

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: <ul style="list-style-type: none">• Leibniz Universität Hannover (LUH), Institut für Pflanzenernährung, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover• Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer (LUFA Speyer), Obere Langasse 40, 76346 Speyer• Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V. (IGZ), Theodor-Echtermeyer-Weg 1, 14979 Großbeeren• Assoziiertes Projekt Universität Hohenheim (UH), Institut für Kulturwissenschaften, Fruwirthstrasse 23, 70599 Stuttgart	Förderkennzeichen: 2809HS016 2810HS008 2810HS009 1811HS014
---	---

Thema:

Entwicklung eines integrierten Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau zur Vermeidung von Stickstoffüberschüssen

mit den Teilprojekten:

- Teilprojekt **LUH**: Strategien zur Verminderung von N-Saldo Überschüssen in Praxisbetrieben Norddeutschlands
- Teilprojekt **LUFA Speyer**: Strategien zur Verminderung von N-Bilanz Saldo und N-Auswaschung in Praxisbetrieben der Pfalz
- Teilprojekt **IGZ**: Gasförmigen N-Verluste und Modellierung
- Ass. Teilprojekt **UH**: Datengestützte N-Bilanzierung im Freiland-Gemüsebau

Laufzeit:

01.12.2010 – 31.10.2014

Berichtszeitraum:

01.01.2012 – 31.10..2014

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

BOLAP GmbH, Speyer
Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz, Fachgruppe Gemüse
N-xt Fertilizers, Emmen, NL
Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Großhelfendorf
Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinpfalz, Neustadt
Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau, Heidelberg
Fachhochschule Bingen

Inhaltsverzeichnis

Seite

Teilprojekt Leibniz Universität Hannover (LUH): Strategien zur Verminderung von N-Saldo Überschüssen in Praxisbetrieben Norddeutschlands.....	3
Teilprojekt LUFA Speyer: Strategien zur Verminderung von N-Bilanz Saldo und N-Auswaschung in Praxisbetrieben der Pfalz	39
Teilprojekt Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V. (IGZ): Gasförmige N-Verluste und Modellierung	115
Assoziiertes Teilprojekt Universität Hohenheim (UH): Datengestützte N-Bilanzierung im Freiland-Gemüsebau: Einfluss von Maßnahmen zur Verminderung von N-Bilanzüberschüssen auf die N ₂ O- Emission gemüsebaulich genutzter Böden	145

Abschlussbericht LUH

Zuwendungsempfänger: <ul style="list-style-type: none">Leibniz Universität Hannover (LUH), Institut für Pflanzenernährung, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover	Förderkennzeichen: 2809HS016
--	--

Thema:

Entwicklung eines integrierten Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau zur Vermeidung von Stickstoffüberschüssen. Teilprojekt LUH: Strategien zur Verminderung von N-Saldo Überschüssen in Praxisbetrieben Norddeutschlands

Laufzeit:

01.12.2010 – 31.10.2014

Berichtszeitraum:

01.01.2012 – 31.10..2014

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren und Erfurt
Institut für Kulturpflanzenwissenschaften Universität Hohenheim
Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer
Landwirtschaftskammer Niedersachsen
N-xt Fertilizers, Emmen, NLN-xt Fertilizers, Emmen, NL
Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Großhelfendorf

1. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

Im Allgemeinen sollte in dem Vorhaben die in der Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S.221) in Anlage 6 Zeilen 12 bis 14 den Betrieben des Erwerbsgartenbaues zugestandenen Überschüsse auf Realisierung und Realisierbarkeit überprüft werden. Hierbei war insbesondere aufzuzeigen, in wie weit in Praxisbetrieben durch gezielte Maßnahmen eine Absenkung „unvermeidlicher“ N-Saldo Überschüsse möglich ist. Das Vorhaben sollte dazu beitragen, die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von Umweltauflagen zu quantifizieren und dadurch die Weiterentwicklung der Düngeverordnung zu unterstützen.

1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Teilvorhaben der LUH wurden integrierte Strategien zur Verbesserung des Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau auf Praxisbetrieben Norddeutschlands erprobt und mit der betriebsüblichen Düngung verglichen. Die Strategien sollen praktikable Möglichkeiten zur Verminderung des Stickstoff-Bilanz-Saldos und der Nitrat-Auswaschung in Praxisbetrieben Niedersachsens aufzeigen. Ziel ist es, das N-Management der Betriebe so zu optimieren, dass die „unvermeidlichen“ N-Überschüsse und damit die Stickstoff-Einträge in die Umwelt minimiert werden. Im Speziellen sollte im Rahmen des Vorhabens untersucht werden, ob durch bestimmte Dünge- bzw. Anbaumaßnahmen der N-Bilanz-Saldo insbesondere beim Anbau von Blumenkohl und Kohlrabi verringert werden kann, ohne einen Qualitätsverlust im Erntegut zu erleiden. Hierzu wurden unterschiedliche Dünge- und Kulturstrategien in praxisnahen Versuchen in 6 Praxisbetrieben in Niedersachsen im Umkreis von bis zu 200 km von Hannover über 3 Jahre verglichen. Insgesamt wurden 21 Versuche (Sätze) durchgeführt, von denen allerdings nur 14 auswertbare Ergebnisse erbrachten, was bei in den Praxisbetrieb integrierten Versuchen eine akzeptable Rate ist. Die unterschiedlichen Strategien werden im Folgenden kurz skizziert.

1.11 Betrieblicher Standard

Die kooperativen Betriebe stehen im täglichen Kontakt mit dem Handel und wissen, welche Anforderungen an die Qualität von Freilandgemüse gestellt werden. Daher stand das Vorhaben unter der Prämisse, dass die im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschriebenen Verfahren den Marktanforderungen gerecht werden müssen und nur dann als erfolgreich gelten, wenn sie qualitativ den betrieblichen Standards zumindest gleichwertig sind.

Da jeder Betrieb seinen eigenen Standard in der Düngung von Blumenkohl und Kohlrabi hat, gilt für jeden einzelnen Betrieb lediglich der jeweilige Standard als Referenz.

1.12 N-Expert

N-Expert ist eine Computersoftware, die am IGZ in Großbeeren entwickelt wurde (Feller et al., 2011; Ver. 3.0). Entscheidende Komponenten der Düngung nach N-Expert sind der in einer Vielzahl von Versuchen bestimmte der N-Bedarf der Kulturen, das gemessene N_{\min} -

Angebot des Bodens zum Kulturbeginn und zum Kopfdüngungstermin und die (geschätzte N-Nachlieferung) in Laufe der Kulturzeit. Entgegen der z.T. noch immer gebräuchlichen Düngung nach Faustzahlen bedeutet diese Düngebedarfsermittlung einen großen Fortschritt.

1.13 Reduktion der empfohlenen N-Düngermenge

Die empfohlene N-Düngung nach N-Expert beinhaltet einen Sicherheitszuschlag, der darin begründet ist, dass für den Praxisbetrieb ein durch unzureichende N-Düngung verursachter Minderertrag (in Menge und Qualität) wirtschaftlich wesentlich stärker ins Gewicht fällt als eine supra-optimale N-Düngung. Weiterhin ist die angenommene N-Nachlieferung von $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ Woche}^{-1}$ gerade im intensiven Gemüsebau nach Einarbeitung von großen Mengen Ernterückständen und reichlicher organischer Düngung möglicherweise recht konservativ angesetzt. So sollte geprüft werden, ob eine Reduktion der N-Düngemenge um 20 oder sogar 40% gegenüber Düngung nach N Expert gleichwertige Erträge hervorbringen kann.

1.14 Platzierte N-Düngung

Insbesondere bei Kulturen mit großen Reihenabständen und langsamer Jugendentwicklung ist damit zu rechnen, dass das Wurzelsystem gerade in frühen Stadien noch nicht den gesamten Boden erschließen kann und somit von den Pflanzen nicht genutzt werden kann und verstärkt Verlusten unterliegt. Durch Applikation des Düngers in den Wurzelraum oder als punktuell Depot eines Ammonium-basierten N-Düngers (geringe Mobilität im Boden von Ammonium-N im Vergleich zu Nitrat-N) soll diesem Missstand entgegengewirkt werden. Mit der platzierten N-Düngung soll auch ermöglicht werden, den gesamten N-Düngerbedarf mit einer Gabe zu Kulturbeginn zu decken.

1.15 Verzicht auf gegenwärtig vom Markt vorgegebene Einzelpflanzengrößen

Derzeit fordert der Lebensmittel Einzelhandel (LEH) „6er Köpfe“ Blumenkohl (6 Köpfe passen in eine Transportkiste) und Kohlrabi mit einem Durchmesser $> 10 \text{ cm}$, während „8er Köpfe“ (8 Köpfe passen in eine Kiste) und Kohlrabi $< 10 \text{ cm}$ eine mindere Qualität bedeuten. Es wird angenommen, dass ein Verzicht auf dieses Qualitätskriterien nicht nur eine höhere Bestandesdichte und eine Verminderung der Erntegänge, sondern auch einen geringeren N-Bedarf ermöglicht.

1.16 Sensor gestützte Düngebedarfsermittlung

Die N-Nachlieferung von Böden ist stark abhängig von der Witterung, Vorkultur, Menge an Ernterückständen und organischer Düngung. Die Höhe der N-Nachlieferung kann mit N-Expert (und damit zwei aufwendigen N_{\min} Untersuchungen) allerdings nicht konkret erfasst werden. Eine Möglichkeit das aktuelle N-Angebot des Bodens auch während der Kultur kontinuierlich zu erfassen bietet die Kontrolle des N-Ernährungszustandes der Kultur. Da destruktive Methoden sehr aufwändig und nicht praxistauglich sind, sollet geprüft werden,

ob eine Sensor gestützte Messung des N-Ernährungszustandes der Kulturen in Verbindung mit bei angezeigter N-Unterversorgung erforderlichen Kopfdüngung auch im Gemüsebau (wie in bei landwirtschaftlichen Kulturen bereits erprobt) tauglich und praktikabel ist.

1.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Erhebungsuntersuchungen zeigen, dass im intensiven Gemüsebau im Vergleich zu landwirtschaftlichen Kulturen wesentlich höhere Stickstoff (N)-Bilanzüberschüsse und damit auch häufig erhöhte Austräge von N in die Umwelt (NO^3 , N_2O) auftreten. Dies beruht zum Teil auf falschen Vorstellungen der Gärtner über den Stickstoffdüngungsbedarf dieser Intensivkulturen und darauf zurückzuführender überhöhter N-Düngung. Solche positiven N-Bilanzsalden treten aber auch dann auf, wenn die Düngung nach den Empfehlungen der Düngeberatung und unter Einsatz der N_{min} -Methode bemessen wird. Letztere kann die Bilanzüberschüsse vermindern, sie aber nicht verhindern. Ein Abweichen von der Düngungsberatung in der Praxis wird auch häufig dadurch begründet, dass die Beratung nicht hinreichend den an die Produktion gestellten Qualitätsansprüchen des Marktes und damit den ökonomischen Zwängen, denen die Betriebe unterliegen, Rechnung trägt.

Grundsätzlich besteht aber Einigkeit zwischen Wissenschaft, Praxis und Beratung, dass ein ökonomisch tragfähiger Gemüseanbau unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht möglich ist, ohne deutlich höhere positive N-Bilanzüberschüsse als in landwirtschaftlichen Marktfruchtbetrieben. Dies beruht insbesondere auf drei Ursachen:

1. viele Gemüsekulturen erfordern bei der Ernte für die Erzielung optimaler Erträge vergleichbar hohe N_{min} -Restgehalte im Boden
2. viele Gemüsekulturen durchwurzeln den Boden nur sehr flach, wodurch eine erhöhte Gefahr des Einwaschen in tiefere Bodenschichten und damit eines potentiellen Eintrages von Dünger- und Boden-N ins oberflächennahe Grundwasser gegeben ist.
3. Bei vielen Gemüsekulturen verbleiben erhebliche Mengen des aufgenommenen N in den Ernterückständen. Ein Teil des in der Regel leicht mineralisierbaren N steht einer im selben Jahr angebauten Folgekultur (teilweise) zu Verfügung, bei einer abtragenden Kultur besteht allerdings eine große Gefahr von N-Verlusten durch Auswaschung über die vegetationslose Zeit zum Jahreswechsel.

Die Höhe der auftretenden Bilanzüberschüsse ist je nach Standort, Fruchtfolge, Anbaumanagement und Düngung erwartungsgemäß sehr unterschiedlich. Betriebsbilanzierungen zeigen, dass die Bilanzüberschüsse in der Regel zwischen 100 und 300 kg N/ha/Jahr liegen. Solche Bilanzierungen ermöglichen bisher nicht die qualifizierte Ableitung von Werten für „unvermeidliche und damit zulässige“ N-Saldo Überschüsse, die es in Zukunft anzustreben gilt. Es muss unter Umsetzung allen verfügbaren und noch zu erweiternden Wissens gelingen, diese Überschüsse deutlich abzusenken oder aber als „unvermeidbar“ zu bestätigen. Hierzu fehlen allerdings gegenwärtig wichtige Grundlagen, auf deren Basis dies zu vertreten ist. Aus diesem Grunde war es erforderlich, in einem Versuchsprogramm Strategien experimentell zu

erarbeiten, wie weit unter Nutzung des verfügbaren pflanzenbaulichen und pflanzenernährerischen Wissens möglich ist, die N-Bilanzüberschüsse und damit verbundene Belastungen der Umwelt zu vermindern. Während über die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen bereits ein großes Wissen aus Exaktversuchen auf Versuchsstationen besteht, ist die Entwicklung von integrierten Stickstoffmanagementsystemen im Gemüsebau eher die Ausnahme (Wiesler et al., 2008) und bislang auch wenig in der Praxis erprobt.

2 Material und Methoden

2.1 Auswahl der Betriebe

In Abstimmung mit der Landwirtschaftskammer Niedersachsen wurden für die Durchführung der Praxisversuche geeignete Gemüsebaubetriebe ausgewählt. Die Lage der teilnehmenden Gemüsebaubetriebe ist in Abb. 1 und ihre Charakteristika sind in Tab. 1 dargestellt.

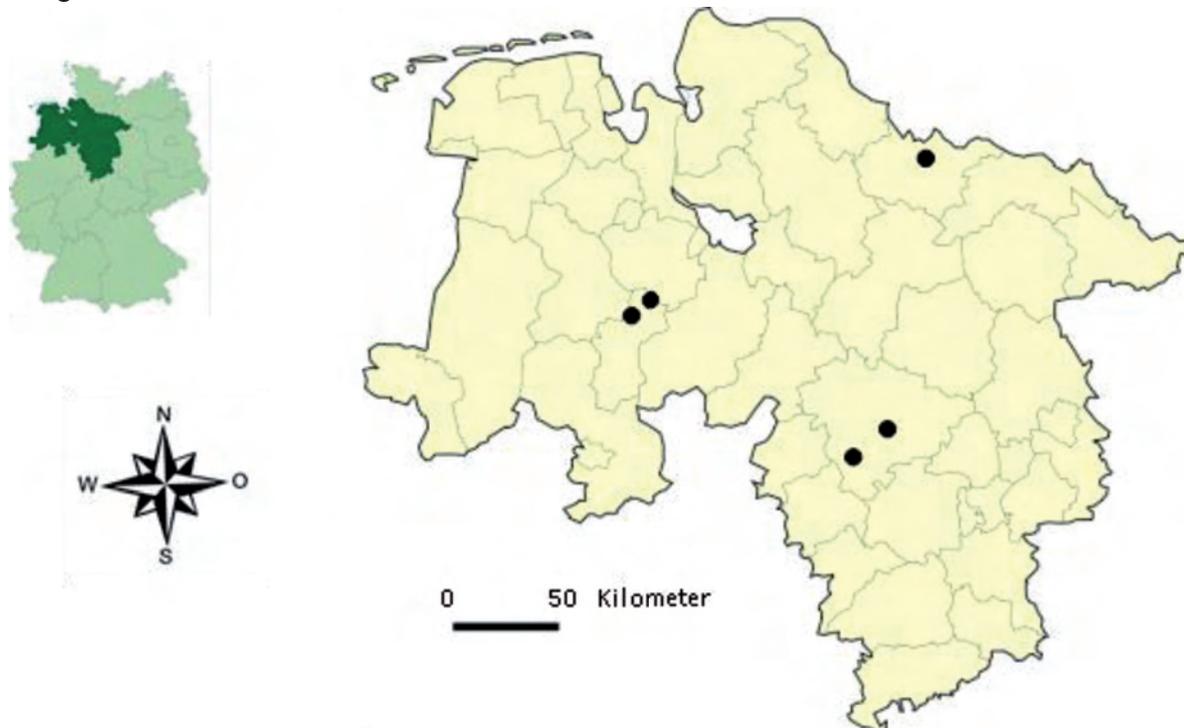


Abbildung 1: Geografische Lage der teilnehmenden Praxisbetriebe in Niedersachsen

Tabelle 1: Angaben zu den Versuchen in den Praxisbetriebe in Niedersachsen

Betrieb Nr.	1	2	3	4	5	6
Versuchskulturen	Blumenkohl	Blumenkohl	Blumenkohl Kohlrabi	Kohlrabi	Porree	Salat
Versuchsjahre	2011-2013	2011	2011-2013	2011-2013	2012-2013	2011
Bodenart	LT	LT	LT	S	LT	SL

2.2. Düngungsstrategien

2.21 Düngung nach betrieblichem Standard

Der betriebliche Standard in Betrieb 1 sah eine regelmäßige N_{\min} -Probe vor. Die Düngegabe zu Blumenkohl erfolgte gesplittet als Startdüngung zu Kulturbeginn und als Kopfdüngung in der dritten Kulturwoche. Die Düngemenge ergab sich nach N_{\min} -Proben durch einen Sollwert von 250 kg N ha^{-1} zur Kopfdüngung.

In Betrieb 2 bestand der betriebliche Standard in einer Kombination aus breitwürfiger und platzierter Düngung zu Blumenkohl. So wurde zwei Wochen vor der Pflanzung 100 kg N ha^{-1} in Form von Kalkstickstoff gegeben und weitere 100 kg N ha^{-1} als flüssige Unterfußdüngung (Harnstoff) während der Pflanzung. Der Betrieb bezog den Flüssigdünger von der Firma N-xt Fertilizers, Veghel, NL, und kombinierte die Technik zur Düngeapplikation (Unterfußdüngung) mit der Pflanzmaschine, sodass Düngung und Pflanzung in einem Arbeitsschritt erfolgen konnten und der Dünger in der idealen Position zur Pflanzreihe ausgebracht wurde.

In Betrieb 3 sah der betriebliche Standard zu Kohlrabi (die Versuche zu Blumenkohl konnten nicht umfassend ausgewertet werden) eine Düngung von 100 kg N ha^{-1} vor der Pflanzung und eine weitere Gabe von 100 kg N ha^{-1} in der dritten Kulturwoche vor.

Im Betrieb 4 wurde wegen des leichten Bodens die Düngung zu Kohlrabi sehr variabel gestaltet, da bei intensiven Niederschlägen mit größeren Verlusten an N durch Auswaschung gerechnet wurde.

Betrieb 5 baute nur Porree an. Der betriebliche Standard beinhaltete eine Gülledüngung vor Kulturbeginn, und eine Kopfdüngung von 100 kg N ha^{-1} zu fortgeschrittenem Entwicklungsstadium vor.

2.22 N-Expert

Die Düngegabe zu Blumenkohl und Kohlrabi erfolgte zu zwei Terminen. Die erste Gabe erfolgte zu Kulturbeginn (Startdüngung). Die zweite Gabe erfolgte als Kopfdüngung, erfolgte in der dritten Kulturwoche vor Schließen des Bestandes. Zu beiden Terminen wurden N_{\min} -Proben genommen, um das jeweilige N-Angebot des Bodens abzubilden. Die N-Gehalte wurden in N-Expert eingegeben und nach der ausgegebenen Empfehlung gedüngt. Für die Beurteilung des N-Angebotes wurde lediglich das während des Betrachtungszeitraums durchwurzelte Bodenvolumen untersucht. Zur Startdüngung entsprach dies für beide Kulturen einer Bodentiefe von 0-30 cm, zum Kopfdüngungstermin 0-30 cm zu Kohlrabe und 0-60 cm zu Blumenkohl.

2.23 Reduktion der empfohlenen N-Düngermenge

Zur Betrachtung der Möglichkeit einer Reduktion der Düngemenge wurde zunächst mit N-Expert der N-Düngebedarf der Kultur bestimmt. Diese Empfehlung wurde zum Start- und Kopfdüngungstermin um 20 und 40 % reduziert. Die parzellenscharfe N_{\min} -Probenahme 2011 führte in einigen Fällen dazu, dass die reduzierte Düngung sich von der N-Expert Empfehlung nicht unterschied. Dieses Verfahren wurde daher ab 2012 aufgegeben. Die Düngung richtete sich dann nach dem Mittel der gesamten Versuchsfläche.

2.24 Platzierte N-Düngung

Die Düngerbedarfsermittlung zur platzierten Düngung erfolgte ebenfalls nach N-Expert.

Die platzierte Düngung wurde zur Pflanzung gegeben und berücksichtigte den N-Bedarf für die gesamte Kultur. Daher wurde zur Düngebedarfsermittlung der gesamte, während der Kultur erschlossene Bodenraum (Kohlrabi 0-30cm, Blumenkohl 0-60 cm). Die N_{\min} -Gehalte wurden in N-Expert eingegeben und als zu versorgenden Zeitraum die gesamte Kulturzeit gewählt. Die empfohlenen N-Düngemengen wurden um 20 bzw. 40 % reduziert. Gedüngt wurde in diesen Fällen nicht mit KAS, sondern mit N-xt FertiVital, einem Harnstoffdünger der Firma N-xt Fertilizers, Veghel, NL.

Die Ausbringung des Düngers erfolgte mit zwei Techniken. Zum einen wurde eine Unterfußdüngung durchgeführt, bei der mithilfe von Scharen, an deren etwa 7 cm tiefen Ende über einen Tropfschlauch der Dünger appliziert wurde. Diese Technik wurde ebenfalls von der Firma N-xt fertilizers zur Verfügung gestellt. Im Blumenkohl wurden je Pflanzreihe zwei Schare – links und rechts von der Reihe – verwendet. Im Kohlrabi wurde aufgrund des engeren Reihenabstands nur ein Schar je Pflanzreihe eingesetzt.

Weiterhin stellte die Güstrower L-M-B GmbH & Co.KG, Güstrow, im Jahr 2011 ihre Spornradtechnik zur Verfügung. An einem Aluminiumrad waren mehrere Sporen befestigt, aus denen ein Dünge depot in den Boden appliziert wurde, sobald der Sporn senkrecht im Boden steckte. Die Ablage dieser Depots erfolgte neben jeder Pflanzreihe in einem Abstand von 13 cm in etwa 7 cm Tiefe. Als Referenz dienten die oben beschriebenen Behandlungen, die nach N-Expert-Empfehlung bzw. deren Reduktion breitwürfig gedüngt wurden.

2.25 Verzicht auf gegenwärtig vom Markt vorgegebener Einzelpflanzengrößen

Es wurden vier Versuche zu Blumenkohl ausgewertet. Da eine frühere Ernte bei kleinerer Kopf Zielgröße ermöglichte, eine größere Gesamtpflanzenzahl je Hektar zu pflanzen, wurde der Pflanzabstand innerhalb einer Reihe verringert von 48 auf 36 cm bzw von 45 auf 30 cm. Gedüngt wurde nach N-Expert sowie um 20% reduziert.

2.26 Sensor gestützte Düngebedarfsermittlung

Bei sensorgestützter Düngung erhielt die Kultur zur Pflanzung die Startdüngung nach N-Expert Empfehlung. Sobald mit dem manuell betriebenen Sensor (Isaria, Fritzmeier Umwelttechnik, Großhelfendorf) ein Mangel gegenüber der N-Expert-Variante erkannt werden konnte, wurde mit einer Rückenspritze (Typ 262, Fa. Brill Gloria, Witten) ein kommerzieller Blattdünger auf Harnstoffbasis (Folium N-xt, Fa. N-xt Fertilizers, Veghel, Niederlande) appliziert.

2.3 Versuchsanlage

Die Parzellengröße mußte sich nach der Kulturtechnik in den Betrieben richten. Zu Blumenkohl betrug in Betrieb 1 die Parzellengröße 2011 6 x 10 m². In jeder Parzelle wurden drei Erntefenster mit je 9 Pflanzen beerntet. 2012 wurden die Parzellen auf 6 x 20 m und die Erntefenster auf 21 Pflanzen vergrößert. In Betrieb 2 betrug die Parzellengröße 2,5 x 50 m. In jeder Parzelle wurden drei Erntefenster mit jeweils 9 Pflanzen beerntet. In Betrieb 3 betrug die Parzellengröße für N-Expert und Sensor gestützte Düngung 3 x 15 m. In jeder Wiederholung wurden zwei Erntefenster mit je ca. 21 Pflanzen beerntet. Die übrigen Varianten wurden in 3 x 30 m großen Parzellen angebaut in denen drei Erntefenster mit ca. 21 Pflanzen beerntet wurden. Zu Kohlrabi betrug in Betrieb 3 die

Parzellengröße für N-Expert und Sensor gestützte Düngung 1,8 x 10 m. Die übrigen Varianten wurden in 1,8 x 20 m großen Parzellen angebaut. In jeder Parzelle wurden zwei Erntefenster mit je 20 Pflanzen beerntet. In Betrieb 4 betrug die Parzellengröße 2011 2 x 20 m. In jeder Parzelle wurden 3 Erntefenster mit je 10 Pflanzen beerntet. 2012 und 2013 betrug die Parzellengröße 2 x 40 m. In jeder Parzelle wurden 3 Erntefenster mit je 21 Pflanzen beerntet. Zu Porree betrug die Parzellengröße für die Behandlungen N-Expert und Sensor gestützte Düngung betrug 3,3 x 20 m. Je Parzelle wurden drei Erntefenster mit jeweils 21 Pflanzen geerntet. Alle Versuchspartellen wurden einmal wiederholt (n = 2).

2.4 N_{min}-Beprobung

Die Parzellen wurden vor der Start- und Kopfdüngung sowie nach der Ernte auf ihren N_{min} Gehalt untersucht. Mit einem Pürckhauer-Bohrstock wurden zur Startdüngung, zur Kopfdüngung und zur Ernte in Kohlrabi pro Parzelle vier Einstiche bis 30 cm Tiefe vorgenommen und die Proben zu einer Mischprobe vereinigt. Diese parzellenscharfe Ermittlung der N_{min}-Ausgangs-Gehalte zu Versuchsbeginn, die gleichzeitig die Grundlage für die Düngebedarfsermittlung darstellte, führte 2011 zu Problemen in der Nachvollziehbarkeit bei den Düngemengen. So basierten die Düngeempfehlungen in den N-Expert-Parzellen und in den reduzierten Behandlungen auf unterschiedlichen N_{min}-Gehalten und folglich separaten N-Expert-Berechnungen. In den Folgejahren wurde die gesamte Versuchsfläche zu Versuchsbeginn mit 20 Einstichen bis 30 cm Tiefe beprobt. So konnte für die gesamte Fläche eine N-Expert-Empfehlung ausgegeben werden, die dann entsprechend den Behandlungen reduziert werden konnte. Zur Kopfdüngung und Ernte in Blumenkohl wurden aufgrund des größeren Wurzelsystems in zwei Bodenschichten (0-30 cm, 30-60 cm) Proben genommen. Porree wurde wie Blumenkohl beprobt. Bodenproben wurden sofort in einer Kühltasche und im Labor bis zur Analyse bei -20 °C gelagert.

Von den auf 5 mm Maschenweite gesiebten feldfeuchten Proben wurde eine Teilprobe 24 h bei 105 °C getrocknet und der Wassergehalt (WG) des Bodens durch Ermittlung der Gewichtsdiiferenz bestimmt (Gl. 1).

$$WG[L] = \frac{Boden_{feucht}[g] - Boden_{trocken}[g]}{1000 g L^{-1}} \quad (Gl. 1)$$

50 g feldfeuchter Boden wurden mit 200 mL 0,1-molarer KCl-Lösung versetzt und 1 h geschüttelt. Die Lösung wurde filtriert und die Konzentration des mineralischen N im Filtrat am AutoAnalyzer (Fa. Skalar Analytic, Oberloisdorf) gemessen. Die Gesamtmenge an N in der Probe ergibt sich nach Gl. 2.

$$N_{Probe}[mg] = C_{Probe}[mg L^{-1}] \cdot V_{Probe} = C_{Probe}[mg L^{-1}] \cdot (0,2 L + WG[L]) \quad (Gl. 2)$$

Dabei ist C_{Probe} die N-Konzentration der Probe in mg L⁻¹ und V_{Probe} das Probenvolumen in L. Unter Annahme einer mittleren Bodendichte von 1,5 t m⁻³ Boden ergibt sich nach Gl. 3 der N_{min}-Gehalt der beprobten Fläche in kg N ha⁻¹.

$$\begin{aligned} N_{min}[kg N ha^{-1}] &= \frac{N_{Probe}[g]}{M_{Probe}[g]} \cdot 100 m \cdot 100 m \cdot 0,3 m \cdot 1.500 kg m^{-3} \\ &= \frac{N_{Probe}[mg]}{50 \cdot 10^3 [mg]} \cdot 4,5 \cdot 10^5 kg \end{aligned} \quad (Gl. 3)$$

2.5 Ernte

Blumenkohl

Die Ernte erfolgte in Betrieb 1 im ersten Satz 2011 am 01., 07. und 11.07. Der zweite Satz wurde am 03., 06. und 10.10. geerntet. 2012 erfolgte die Ernte dort am 03., 06. und 10.07. In Betrieb 2 wurde der erste Satz in 2011 aus organisatorischen Gründen an einem Termin, dem 27.06., geerntet. Der Zweite Satz in dem Jahr wurde am 04., 07. und 14.10. geerntet. In Betrieb 3 wurde der 2012 aus organisatorischen Gründen nur an einem Termin, dem 17.07. geerntet.

Bei den ersten beiden Terminen wurden jeweils nur die 6er Köpfe geerntet und am letzten Termin der gesamte Rest des Erntefensters abgeerntet. Das Frischgewicht von Kopf und Ernterückstand wurde bestimmt. Beide Fraktionen mit einem Gartenhäcksler homogenisiert und ca. 1 kg Frischmasse als Aliquot bei 65 °C getrocknet und zur N-Gehalt-Bestimmung genutzt.

Kohlrabi

Die Ernte in Betrieb 3 erfolgte am 09.07.2012 und 12.07.2013. In Betrieb 4 wurde 2011 am 12.07. und 20.10. geerntet. 2012 fand die Ernte am 23.07. statt. 2013 wurde am 05.08. geerntet. Der Knollendurchmesser sowie das Frischgewicht von Knolle und Ernterückstand wurden bestimmt. Beide Fraktionen wurden mit einem Gartenhäcksler homogenisiert und ca. 1 kg Frischmasse als Aliquot bei 65 °C getrocknet und zur N-Gehalt-Bestimmung genutzt.

Porree

Der Porreeversuch wurde am 03.01.2014 geerntet. Die Sortierung erfolgte in vermarktungsfähig und nicht vermarktungsfähig. Es wurde das Frischgewicht von Erntegut und Ernterückstand bestimmt. Beide Fraktionen wurden mit einem Gartenhäcksler homogenisiert und ca. 1 kg Frischmasse als Aliquot bei 65 °C getrocknet und zur N-Gehalts-Bestimmung genutzt.

2.6 Bestimmung des N-Gehaltes

Die getrockneten Pflanzenproben wurden gemahlen (Mikro Feinmühle Culatti MFC, Fa. IKALabortechnik, Staufen; Siebweite 2 mm) und in Coultergefäße gefüllt. Zur Analyse wurden 10-15 mg des noch einmal bei 65°C nachgetrockneten Pflanzenmaterials in ein Zinnschiffchen eingewogen und in einem automatischen N-Analysator (Vario EL III, Fa. Elementar, Hanau) gemessen. Der N-Gehalt als Fraktion der Gesamtmasse der Probe ergab multipliziert mit der Trockenmasse die N-Aufnahme der Pflanzen (Gl. 4).

$$N\text{-Aufnahme [g]} = C_{\text{Probe}} \cdot \text{Trockenmasse [g]} \quad (\text{Gl. 4})$$

3 Ergebnisse

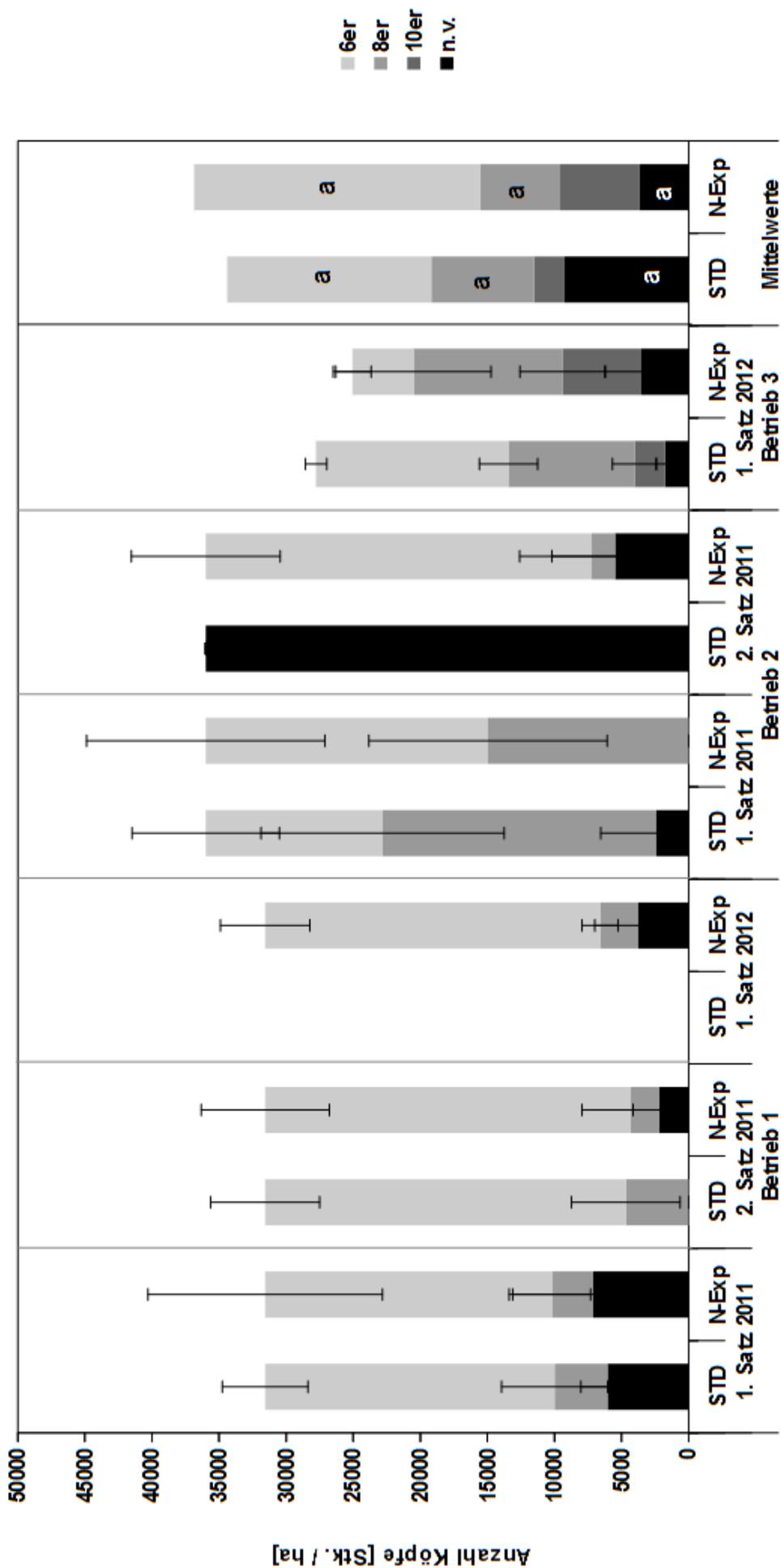
3.1 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

3.11 N-Expert

Es sollte geprüft werden, ob die Düngebedarfsermittlung nach N-Expert denselben Ertrag liefert wie der betriebliche Standard. Um die Ertragsauswertung möglichst praxisnah durchzuführen, werden als Maß die Zahl der geernteten Köpfe und ihre Größensortierung gezeigt (Abb. 2). Düngung nach N-Expert führte in der Regel und im Mittel aller Versuche zu vergleichbaren Erträgen wie Düngung nach betrieblichem Standard. Der Ausfall in Betrieb 1, 1. Satz 2012, ist darauf zurückzuführen, dass der Landwirt die Versuchsparzelle mitgeerntet hat. In Betrieb 2 wurden Teile der Versuchsfläche mit Kohlhernie befallen, wodurch der Totalausfall mit 100% nicht vermarktungsfähigen Pflanzen erklärt werden kann. Die Düngeaufwandmengen bei Düngung nach betrieblichem Standard und nach N-Expert waren im Mittel etwa gleich groß, was auch zeigt, dass die Düngung nach betrieblichem Standard in diesen Betrieben insgesamt gut bemessen ist (Tab. 2). Die N-Salden der Varianten unterscheiden sich statistisch nicht und liegen mit 142 kg N ha^{-1} im betrieblichen Standard und 125 kg N ha^{-1} bei Düngung nach N-Expert gut im gesetzlichen Rahmen bei Düngung als letzter Kultur im Jahr.

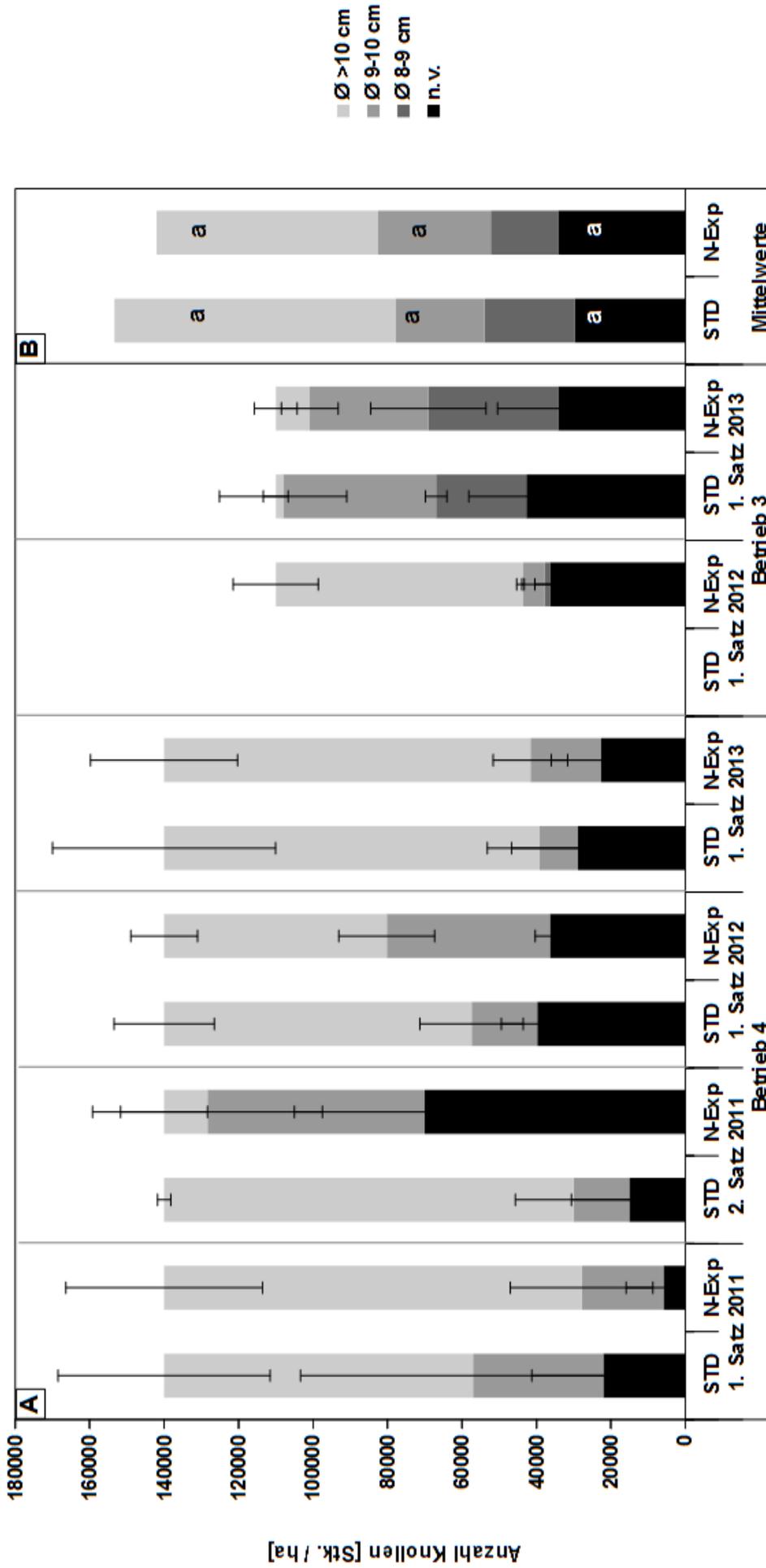
Auch in Kohlrabi konnten mit der Düngung nach N-Expert im Mittel aller Versuche gleiche Erträge (Anzahl Knollen und Knollensortierung) erzielt werden wie mit dem betrieblichen Standard (Abb. 3). Auffällig ist jedoch der 2. Satz 2011 in Betrieb 4. In dieser Wachstumsperiode kam es wiederholt zu starken Niederschlägen und damit verbundener Nitrat-Auswaschung aus dem leichten Sandboden. Dementsprechend fiel der Ertrag in der N-Expert-Behandlung gering aus. Der Betrieb hat diesem Auswaschungseffekt mit sehr hohen, zusätzlichen N-Gaben entgegengewirkt. So belief sich die Gesamtdüngemenge des Betriebs in diesem Satz auf 487 kg N ha^{-1} (Tab. 2, unten) und lag gut doppelt so hoch wie die bei Düngung nach N-Expert (221 kg N ha^{-1}). Insgesamt gesehen wurde jedoch durch den Betrieb die Vermarktungsfähigkeit auch der den Anforderungen entsprechenden Knollengrößen als kritisch eingeschätzt wegen einer unzureichenden sattgrünen Ausfärbung der jüngsten Blätter.

Im Durchschnitt aller Versuche konnte der N-Saldo bei Kohlrabi durch die Düngerbedarfsermittlung mittels N-Expert deutlich und signifikant verringert werden, und zwar von 106 kg N ha^{-1} auf -17 kg N ha^{-1} (Tab. 2).



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

Abbildung 2: Kopfgrößensortierung von Blumenkohl bei Düngung nach betrieblichem Standard (STD) und Düngemittelformulierung mittels N-Expert (N-Exp). Bonitiert wurde der Kopfdurchmesser mit den Stufen 6er, 8er, 10er (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedlicher Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

Abbildung 3: Knollengrößenortierung von Kohlrabi bei Düngung nach betrieblichem Standard (STD) und Düngedarfsermittlung mittels N-Expert (N-Exp). Bonitiert wurde der Knolldurchmesser mit den Stufen ≥ 10 cm, 9-10 cm, 8-9 cm (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Tabelle 2: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes bei Düngung nach betrieblichem Standard (STD) und Düngedarfsermittlung mittels N-Expert (N-Exp). N_{\min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{\min} Ernte – N_{\min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER). Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an. Oben: Blumenkohl. Unten: Kohlrabi.

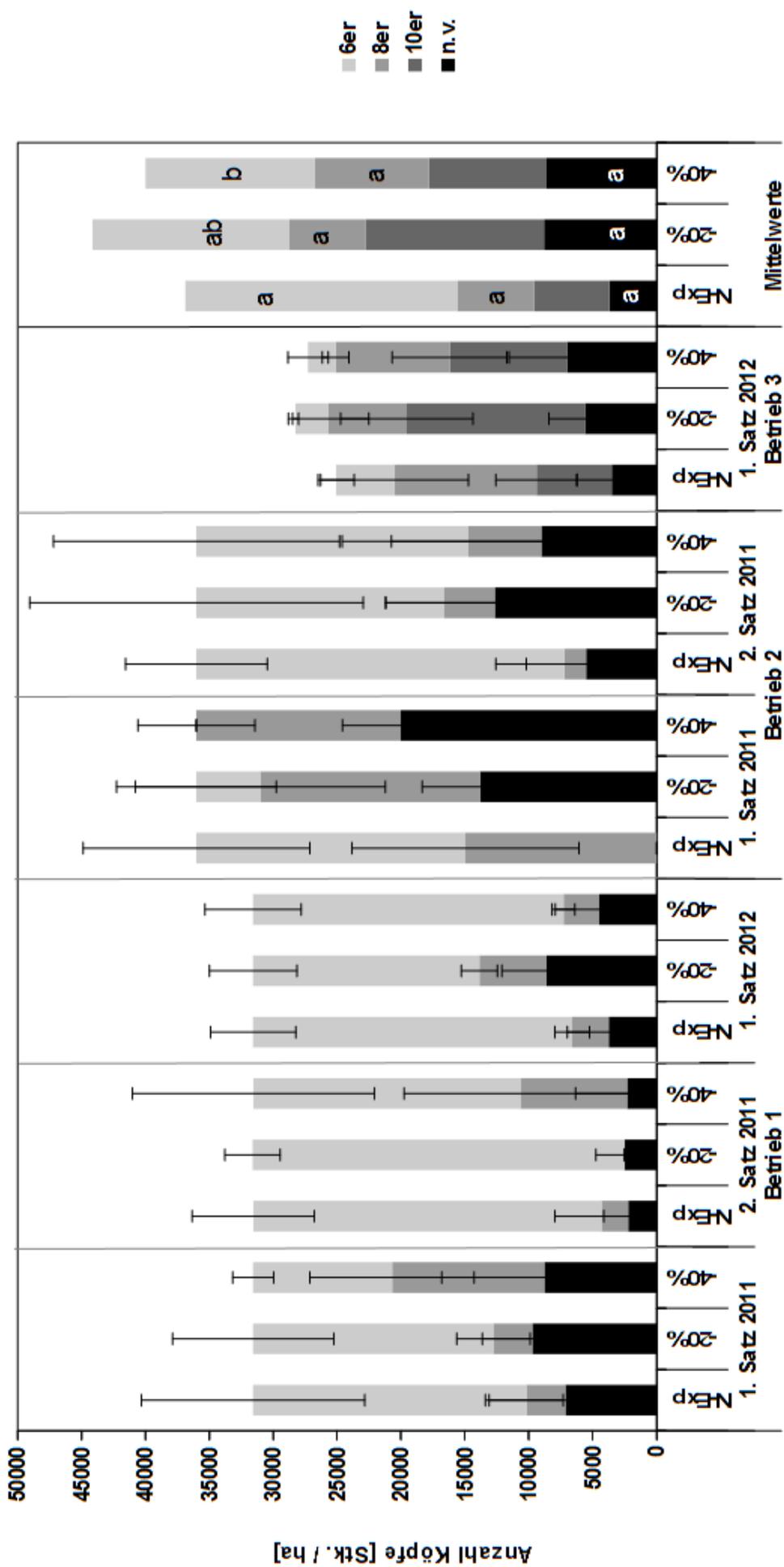
Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{\min} Start	Düngung	FMKopf	N in Kopf	FMER	N in ER	N-Aufnahme	N-Saldo	N_{\min} Ernte	N-Nachlieferung
			kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹				
Betrieb 1	1. Satz 2011	STD	48	200	287	54	350	114	173	146	39	-4
Betrieb 1	1. Satz 2011	N-Exp	48	240	348	75	416	172	246	165	28	-1
Betrieb 1	2. Satz 2011	STD	39	150	416	71	215	65	137	79	64	1
Betrieb 1	2. Satz 2011	N-Exp	28	125	374	74	199	63	136	51	96	8
Betrieb 1	1. Satz 2012	STD	95	200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	28	NA
Betrieb 1	1. Satz 2012	N-Exp	95	234	433	109	430	159	268	125	88	2
Betrieb 2	1. Satz 2011	STD	72	220	346	78	639	173	251	142	34	-1
Betrieb 2	1. Satz 2011	N-Exp	113	179	370	67	509	123	190	112	14	-9
Betrieb 2	2. Satz 2011	STD	34	200	0	0	45	18	18	200	124	-7
Betrieb 2	2. Satz 2011	N-Exp	14	229	375	89	236	86	174	140	61	-1
Betrieb 3	1. Satz 2012	STD	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	N-Exp	128	209	234	54	413	159	213	155	190	7
Mittelwerte		STD	58	194	262 ^a	51 ^a	312 ^a	93 ^a	145 ^a	142 ^a	58 ^a	-3 ^a
		N-Exp	71	203	356 ^a	78 ^a	367 ^a	127 ^a	205 ^a	125 ^a	80 ^a	1 ^a

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{\min} Start	Düngung	FM Knolle	N in Knolle	FMER	N in ER	N-Aufnahme	N-Saldo	N_{\min} Ernte	N-Nachlieferung
			kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹				
Betrieb 4	1. Satz 2011	STD	15	157	968	144	257	53	198	13	13	5
Betrieb 4	1. Satz 2011	N-Exp	15	123	1299	235	372	91	327	-112	19	26
Betrieb 4	2. Satz 2011	STD	15	487	980	201	114	37	239	286	105	-20
Betrieb 4	2. Satz 2011	N-Exp	15	221	723	144	124	30	174	77	134	9
Betrieb 4	1. Satz 2012	STD	22	293	576	159	259	65	225	134	150	7
Betrieb 4	1. Satz 2012	N-Exp	22	224	487	175	224	78	253	49	131	17
Betrieb 4	1. Satz 2013	STD	20	249	728	218	239	75	292	31	100	15
Betrieb 4	1. Satz 2013	N-Exp	20	194	684	226	147	51	278	-32	60	15
Betrieb 3	1. Satz 2012	STD	86	200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	N-Exp	86	145	563	150	NA	NA	NA	-5	172	NA
Betrieb 3	1. Satz 2013	STD	159	200	197	67	216	75	142	133	248	3
Betrieb 3	1. Satz 2013	N-Exp	159	0	254	78	146	48	126	-78	75	5
Mittelwerte		STD	53	264	690 ^a	158 ^a	217 ^a	61 ^a	219 ^a	106 ^a	123 ^a	2 ^a
		N-Exp	53	151	668 ^a	168 ^a	203 ^a	60 ^a	231 ^a	-17 ^b	99 ^a	14 ^a

3.12 Reduktion der empfohlenen N-Düngermenge

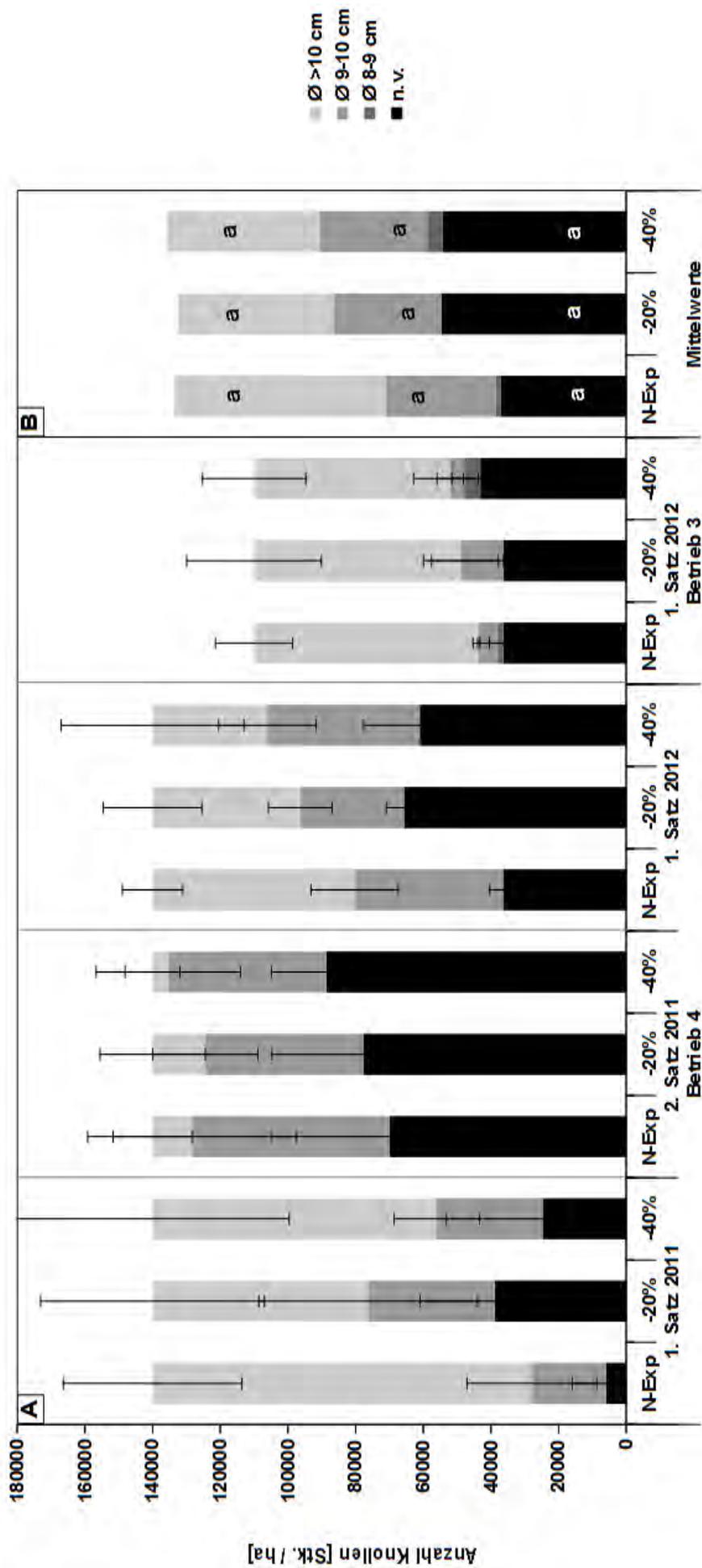
Wie bereits erwähnt enthält die N-Expert-Empfehlung einen gewissen Sicherheitszuschlag, sodass mit diesem Ansatz geprüft werden sollte, ob und in welchem Umfang die Empfehlung gegebenenfalls reduziert werden kann. Aus Abb. 4 geht hervor, dass eine Reduktion der Düngeempfehlung um 20% in Blumenkohl in einigen Versuchen zu keinen, in anderen Versuchen allerdings zu Ertrags- und Qualitätseinbußen führte. Im Mittel waren allerdings die Ertragseinbußen nicht signifikant. Eine weitere Reduktion der Düngergabe um 40% führte allerdings fast immer zu deutlichen Ertragseinbußen, insbesondere zu einer geringeren Zahl an 6er Köpfen, eine Reduktion, die im Mittel auch signifikant war. Tabelle 3 stützt diese Beobachtung mit einer signifikant geringeren Frischmassenbildung in der Behandlung „-40%“. Zwar ist der N-Saldo dieser Variante mit 65 kg N ha^{-1} nur etwa halb so groß wie bei der Ausbringung der gesamten, empfohlenen Düngemenge (125 kg N ha^{-1}), doch verfehlt diese Behandlung das Ziel, zumindest gleichwertige Erträge wie der betriebliche Standard bzw. N-Expert zu erreichen.

Bei Kohlrabi (Abb. 5) war eine Reduktion der Düngeempfehlung ohne signifikante Ertrags- und Qualitätseinbußen möglich, obwohl ein Trend zu geringeren Größen-Sortierungen bestand. Die von Betrieb 4 geäußerten Zweifel an der Vermarktbarkeit wegen unzureichender Grünfärbung der jüngsten Blätter blieben hierbei unberücksichtigt. Die N-Salden (Tab. 4) aller Behandlungen lagen im Mittel bei etwa bei 0 kg N ha^{-1} und geben somit keinen Grund zur Besorgnis. Allerdings bestanden große Unterschiede zwischen den Sätzen mit sehr stark negativen und deutlich höheren Salden. Erwartungsgemäß lagen die N-Salden bei reduzierter Düngung in der Regel niedriger als bei Düngung nach N-Expert. Für die Entwicklung der N-Dynamik im Boden nach der Ernte sind aber auch die N-Mengen in den Ernterückständen und die N_{\min} -Gehalte im Boden nach der Ernte von Bedeutung. Vermindert Düngung führte nicht nur zu verminderten N-Mengen im Erntegut sondern auch in den Ernterückständen. Deutlich, wenn auch im Mittel nicht signifikant, war aber auch der Rückgang der N_{\min} Gehalte im Boden bei reduzierter Düngung.



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

Abbildung 4: Kopfgrößensortierung von Blumenkohl bei Düngung nach Empfehlung nach N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% (-20%) und 40% (-40%). Bonitiert wurde der Kopfdurchmesser mit den Stufen 6er, 8er, 10er (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

Abbildung 5: Knollengrößensortierung von Kohlrabi bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% (-20%) und 40% (-40%). Bonitiert wurde der Knolldurchmesser mit den Stufen ≥10 cm, 9-10 cm, 8-9 cm (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Tabelle 3: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Blumenkohl bei bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% (-20%) und 40% (-40%). N_{min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{min} Ernte – N_{min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER). Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{min} Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FMKopf dt ha ⁻¹	N in Kopf kg N ha ⁻¹	FMER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	N_{min} Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 1	1. Satz 2011	N-Exp	48	240	348	75	416	172	246	165	28	-1
Betrieb 1	1. Satz 2011	-20%	48	125	270	54	351	117	171	71	11	1
Betrieb 1	1. Satz 2011	-40%	48	88	240	49	344	86	135	39	13	1
Betrieb 1	2. Satz 2011	N-Exp	28	125	374	74	199	63	136	51	96	8
Betrieb 1	2. Satz 2011	-20%	11	182	383	68	195	63	130	114	111	5
Betrieb 1	2. Satz 2011	-40%	13	126	318	53	256	71	124	73	96	8
Betrieb 1	1. Satz 2012	N-Exp	95	234	433	109	430	159	268	125	88	2
Betrieb 1	1. Satz 2012	-20%	95	187	359	90	437	158	248	97	24	-1
Betrieb 1	1. Satz 2012	-40%	95	140	316	72	263	97	169	68	73	1
Betrieb 2	1. Satz 2011	N-Exp	93	179	370	67	509	123	190	112	14	-7
Betrieb 2	1. Satz 2011	-20%	93	119	298	52	463	107	159	67	20	-3
Betrieb 2	1. Satz 2011	-40%	93	100	291	53	481	109	161	47	2	-3
Betrieb 2	2. Satz 2011	N-Exp	14	229	375	89	236	86	174	140	61	-1
Betrieb 2	2. Satz 2011	-20%	20	179	294	65	199	74	157	114	44	0
Betrieb 2	2. Satz 2011	-40%	2	145	193	46	152	68	113	99	44	1
Betrieb 3	1. Satz 2012	N-Exp	128	209	234	54	413	159	213	155	190	7
Betrieb 3	1. Satz 2012	-20%	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	-40%	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mittelwerte			68	203	356 ^a	78 ^a	367 ^a	127 ^a	205 ^a	125 ^a	80 ^a	1
			53	158	321 ^{ab}	66 ^{ab}	329 ^a	104 ^a	173 ^{ab}	93 ^{ab}	42 ^a	0
			50	120	271 ^b	54 ^b	299 ^a	86 ^a	140 ^b	65 ^b	46 ^a	2

Tabelle 4: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Kohlrabi bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% (-20%) und 40% (-40%). N_{min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{min} Ernte – N_{min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER). Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{min} Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FM Knolle dt ha ⁻¹	N in Knolle kg N ha ⁻¹	FM ER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	N_{min} Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 4	1. Satz 2011	N-Exp	15	123	1299	235	372	91	327	-112	19	26
Betrieb 4	1. Satz 2011	-20%	15	67	1108	182	252	44	226	-115	12	19
Betrieb 4	1. Satz 2011	-40%	15	72	1089	129	220	47	176	-57	10	12
Betrieb 4	2. Satz 2011	N-Exp	15	221	723	144	124	30	174	77	134	9
Betrieb 4	2. Satz 2011	-20%	15	198	575	129	108	28	158	69	92	5
Betrieb 4	2. Satz 2011	-40%	15	188	652	122	104	30	152	66	73	3
Betrieb 4	1. Satz 2012	N-Exp	22	224	487	175	224	78	253	49	131	17
Betrieb 4	1. Satz 2012	-20%	22	180	339	124	301	111	235	56	125	20
Betrieb 4	1. Satz 2012	-40%	22	134	335	118	283	103	221	16	31	12
Betrieb 3	1. Satz 2012	N-Exp	86	145	563	150	NA	NA	NA	-5	172	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	-20%	86	116	NA	NA	NA	NA	NA	NA	216	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	-40%	86	87	NA	NA	NA	NA	NA	NA	186	NA
Mittelwerte			35	178	768 ^a	176 ^a	240 ^a	60 ^a	251 ^a	2 ^a	114 ^a	17 ^a
			35	140	674 ^a	145 ^{ab}	220 ^a	61 ^a	206 ^a	-5 ^a	111 ^a	14 ^{ab}
			35	120	692 ^a	123 ^b	202 ^a	60 ^a	183 ^a	-3 ^a	75 ^a	9 ^b

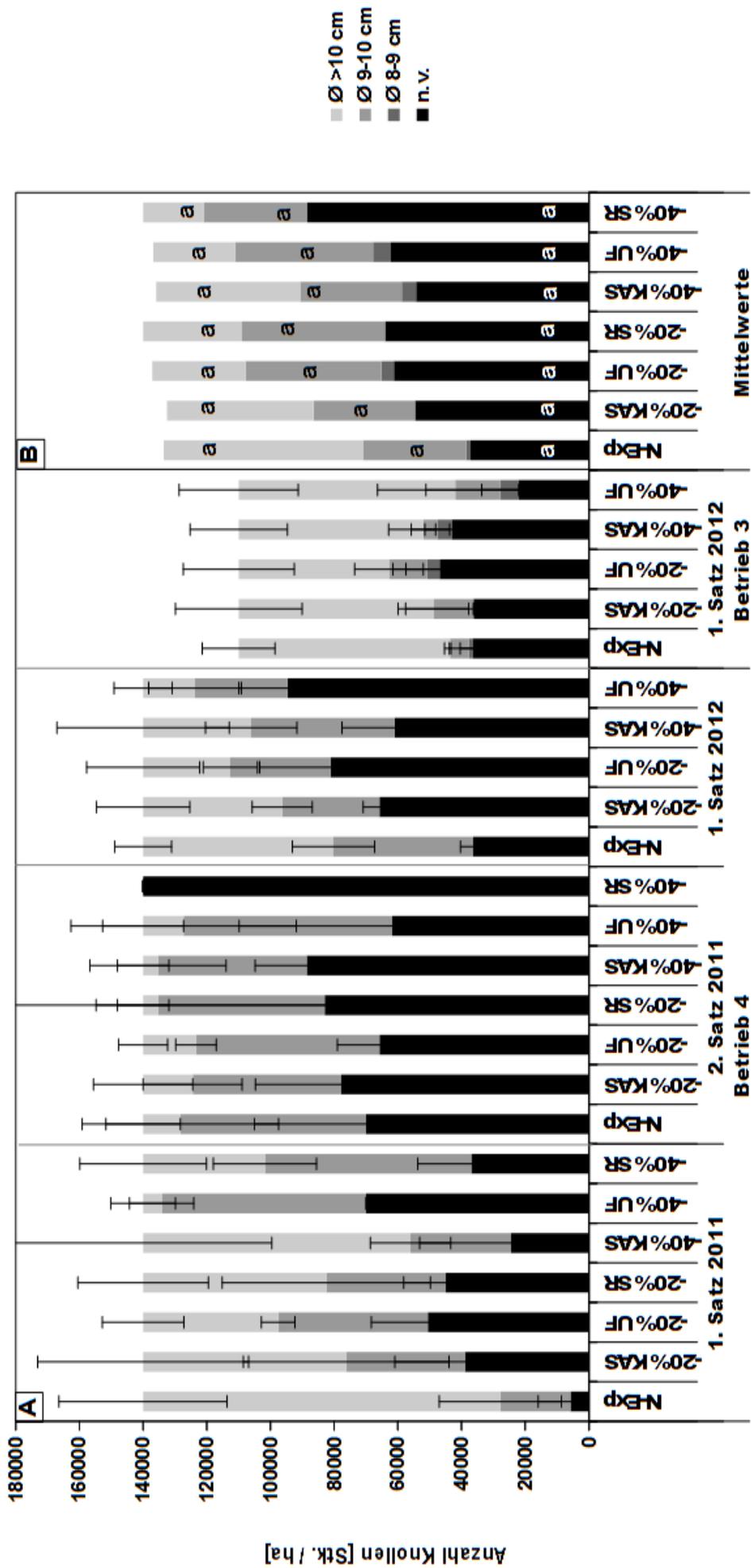
3.13 Platzierte N-Düngung

Bei Blumenkohl führte eine Reduktion der Düngermenge um 20% gegenüber der N-Expert-Empfehlung bei Unterfußdüngung zu keinerlei, auch nicht in der Tendenz, geringeren Erträgen im Vergleich zur breitwürfigen Ausbringung der vollen Düngergabe (Abb. 6). Selbst eine Absenkung der Düngergabe um 40% führte bei Banddüngung nur zu in der Tendenz geringeren Erträgen. Die platzierte Ausbringung mit dem Spornrad schnitt weniger positiv als die Unterfußdüngung ab. Während die Absenkung der N-Düngergabe sich generell vermindern auf den N-Saldo auswirkte (Tab. 5), bestand zwischen platzierter und breitwürfiger Düngung kein systematischer Unterschied, wenn es auch bei der Variante -40% UF den geringsten N-Saldo (43 kg N ha^{-1}) aufwies.

Bei Kohlrabi führte die platzierte Düngung, sowohl Banddüngung als auch Spornraddüngung, eher zu negativen Ertragswirkungen im Vergleich zur breitwürfigen Düngung (Abb. 7). Hierfür dürften insbesondere durch die Düngung nach der Pflanzung an den Pflanzen verursachte Schädigungen (Banddüngung) oder räumlich zu den Pflanzen ungünstige Platzierung des Düngers (Spornrad) verantwortlich sein. Erstaunlicherweise waren trotz der geringeren N-Applikation die N-Salden bei platzierter Düngung gegenüber breitwürfiger Düngung deutlich erhöht, was vorwiegend auf der geringeren N-Abfuhr mit den geernteten Knollen beruhte (Tab. 6).

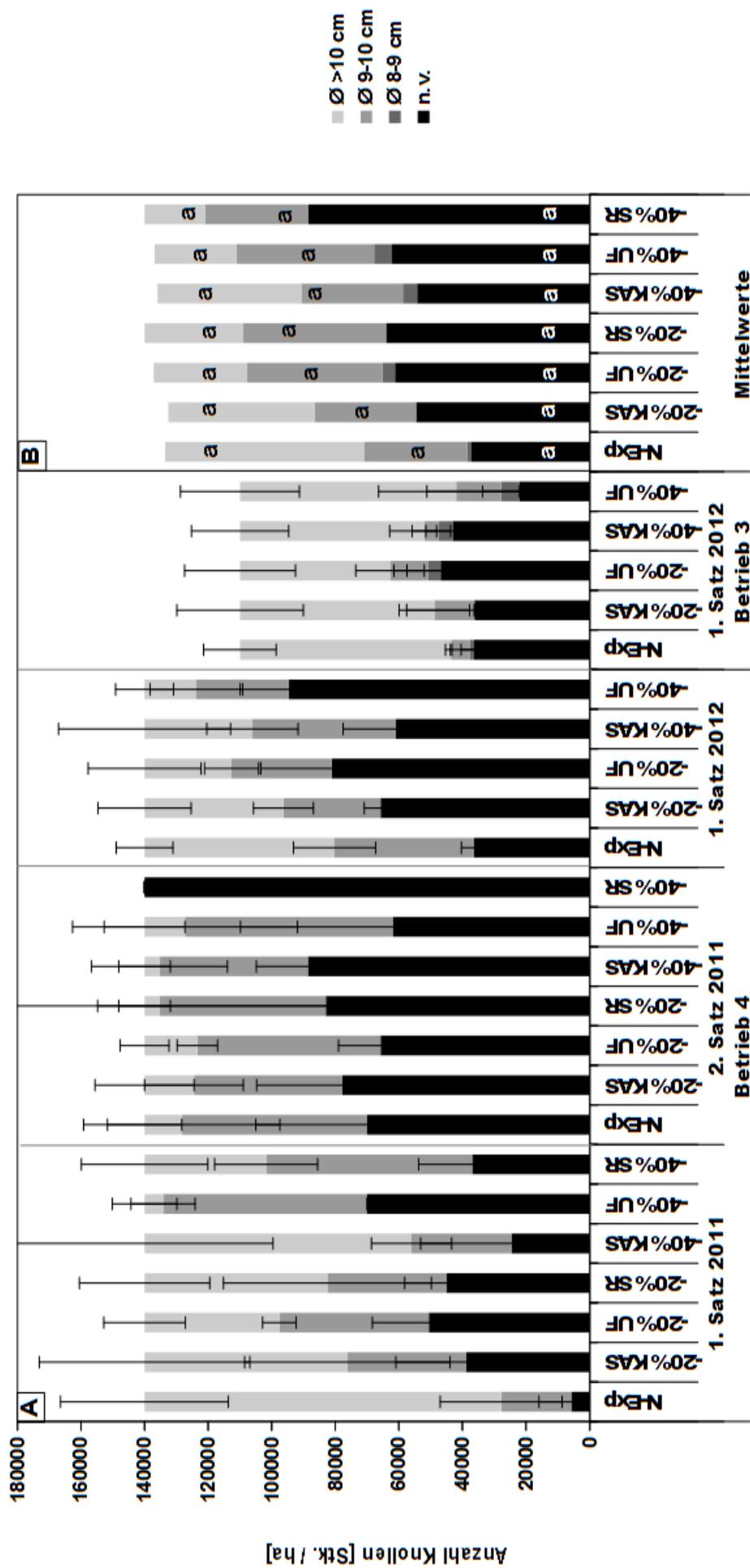
3.14 Verzicht auf gegenwärtig vom Markt vorgegebener Einzelpflanzengrößen

In diesem Ansatz wurde davon ausgegangen, dass ein Verzicht auf fixe Einzelpflanzengrößen (6er-Köpfe bei Blumenkohl) die Zahl der Pflanzen pro Fläche durch geringere Reihenabstände erhöht werden kann. Dadurch konnte die Zahl der geernteten Köpfe deutlich erhöht werden (Abb. 8). Erwartungsgemäß verschob sich zumindest in der Tendenz die Zahl der 6er zu den 8er Köpfen. Eine Reduktion der Düngung führte bei üblichem weitem Reihenabstand zumindest in der Tendenz zu einer Verminderung der Zahl vermarktbarer Köpfe. Bei engerem Pflanzabstand blieb eine Reduzierung der Düngung zu keinerlei Ertragsminderung wenn auch 8er Köpfe vermarktet werden können. Die Kombination von engerem Reihenabstand mit reduzierter Düngung resultierte in den zumindest in der Tendenz geringsten N-Saldo, wofür die verminderte N-Düngung bei gleichbleibend hohem N-Entzug mit den Köpfen verantwortlich war (Tab. 7). Auch den N-Gehalt der Ernterückstände und der N_{\min} -Rest waren geringer.



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

Abbildung 6: Kopfgrößensortierung von Blumenkohl bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% und 40% bei breitwürfiger Ausbringung (-20% KAS, -40% KAS) und platzierter Ausbringung mithilfe der Unterfußdüngung (-20% UF, -40% UF) und der Anwendung des Spornrads (-20% SR, -40% SR). Bonitiert wurde der Kopfdurchmesser mit den Stufen 6er, 8er, 10er (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede (ps0,05) an.



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

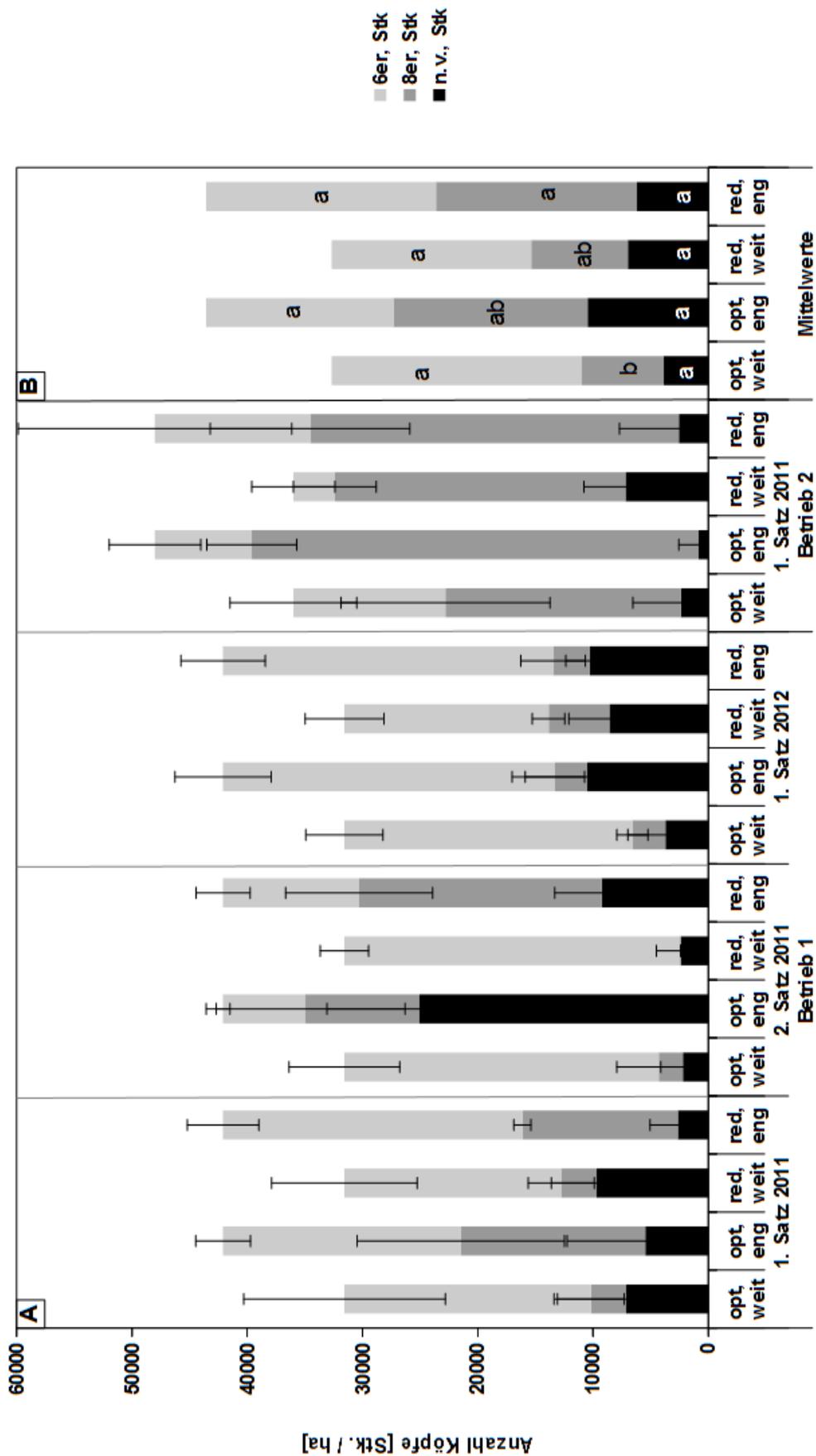
Abbildung 7: Knollengrößensortierung von Kohlrabi bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% und 40% bei breitwürfiger Ausbringung (-20% KAS, -40% KAS) und platzierter Ausbringung mithilfe der Unterfußdüngung (-20% UF, -40% UF) und der Anwendung des Spornrads (-20% SR, -40% SR). Bonitiert wurde der Knolldurchmesser mit den Stufen ≥ 10 cm, 9-10 cm, 8-9 cm (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Tabelle 5: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Blumenkohl bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% und 40% bei breitwürfiger Ausbringung (-20% KAS, -40% KAS) und platzierter Ausbringung mithilfe der Unterfußdüngung (-20% UF, -40% UF) und der Anwendung des Spornrads (-20% SR, -40% SR). N_{min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{min} Ernte – N_{min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER). Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{min} Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FM Kopf dt ha ⁻¹	N in Kopf kg N ha ⁻¹	FM ER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	N_{min} Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 1	1. Satz 2011	N-Exp	48	240	348	75	416	172	246	165	28	-1
Betrieb 1	1. Satz 2011	-20% KAS	48	125	270	54	351	117	171	111	11	1
Betrieb 1	1. Satz 2011	-20% UF	48	169	275	58	362	139	197	111	26	1
Betrieb 1	1. Satz 2011	-20% SR	48	194	314	60	503	120	180	134	15	-5
Betrieb 1	1. Satz 2011	-40% KAS	48	88	240	49	344	86	135	39	13	1
Betrieb 1	1. Satz 2011	-40% UF	48	101	286	63	372	135	198	38	50	10
Betrieb 1	1. Satz 2011	-40% SR	48	132	239	53	388	127	180	79	21	2
Betrieb 1	2. Satz 2011	N-Exp	28	125	374	74	199	63	136	51	96	8
Betrieb 1	2. Satz 2011	-20% KAS	11	182	383	68	195	63	130	114	111	5
Betrieb 1	2. Satz 2011	-20% UF	26	155	331	64	155	63	127	91	288	23
Betrieb 1	2. Satz 2011	-20% SR	15	164	371	53	169	59	111	111	100	3
Betrieb 1	2. Satz 2011	-40% KAS	13	126	318	53	256	71	124	73	96	8
Betrieb 1	2. Satz 2011	-40% UF	50	97	354	57	152	45	102	40	197	15
Betrieb 1	2. Satz 2011	-40% SR	21	119	331	51	164	45	98	68	74	3
Betrieb 1	1. Satz 2012	N-Exp	95	234	433	109	430	159	268	125	88	2
Betrieb 1	1. Satz 2012	-20% KAS	95	187	359	90	437	158	248	97	24	-1
Betrieb 1	1. Satz 2012	-20% UF	95	163	369	85	312	97	182	78	69	-1
Betrieb 1	1. Satz 2012	-40% KAS	95	140	316	72	263	97	169	68	73	1
Betrieb 1	1. Satz 2012	-40% UF	95	122	346	83	305	112	195	39	33	1
Betrieb 2	1. Satz 2011	N-Exp	93	179	370	67	509	123	190	112	14	-7
Betrieb 2	1. Satz 2011	-20% KAS	93	119	298	52	463	107	159	67	20	-3
Betrieb 2	1. Satz 2011	-20% UF	93	136	386	84	566	153	236	52	14	2
Betrieb 2	1. Satz 2011	-40% KAS	93	100	291	53	481	109	161	47	2	-3
Betrieb 2	1. Satz 2011	-40% UF	93	100	302	68	482	110	178	32	10	0
Betrieb 2	2. Satz 2011	N-Exp	14	229	375	89	236	86	174	140	61	-1
Betrieb 2	2. Satz 2011	-20% KAS	20	179	294	65	199	74	157	114	44	0
Betrieb 2	2. Satz 2011	-20% UF	14	177	307	75	170	61	136	102	69	1
Betrieb 2	2. Satz 2011	-40% KAS	2	145	193	46	152	68	113	99	44	1
Betrieb 2	2. Satz 2011	-40% UF	10	140	301	74	198	73	147	66	117	9
		N-Exp	56	201	380 ^a	83 ^a	358 ^a	120 ^a	203 ^a	119 ^a	57 ^a	0 ^a
		-20% KAS	53	158	321 ^{ab}	66 ^{ab}	329 ^a	104 ^a	173 ^{ab}	93 ^a	42 ^a	0 ^a
		-20% UF	55	160	334 ^{ab}	73 ^{ab}	313 ^a	103 ^a	176 ^{ab}	87 ^{ab}	93 ^a	5 ^a
		-20% SR	32	179	343 ^{ab}	56 ^{ab}	336 ^a	89 ^a	146 ^{ab}	123 ^a	58 ^a	-1 ^a
		-40% KAS	50	120	271 ^b	54 ^b	299 ^a	86 ^a	140 ^b	65 ^b	46 ^a	2 ^a
		-40% UF	59	112	318 ^{ab}	69 ^{ab}	302 ^a	95 ^a	164 ^{ab}	43 ^b	81 ^a	7 ^a
		-40% SR	35	126	285 ^{ab}	52 ^{ab}	276 ^a	86 ^a	139 ^{ab}	73 ^{ab}	48 ^a	3 ^a
Mittelwerte												

Tabelle 6: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Kohlrabi bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) und deren Reduktion um 20% und 40% bei breitwürfiger Ausbringung (-20% KAS, -40% KAS) und platzierter Ausbringung mithilfe der Unterfußdüngung (-20% UF, -40% UF) und der Anwendung des Spornrads (-20% SR, -40% SR). N_{min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{min} Ernte – N_{min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER). Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede (p≤0,05) an.

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{min} Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FM Knolle dt ha ⁻¹	N in Knolle kg N ha ⁻¹	FMER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	N_{min} Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 4	1. Satz 2011	N-Exp	15	123	1299	235	372	91	327	-112	19	26
Betrieb 4	1. Satz 2011	-20% KAS	15	67	1108	182	252	44	226	-115	12	19
Betrieb 4	1. Satz 2011	-20% UF	15	152	825	110	303	56	166	42	14	1
Betrieb 4	1. Satz 2011	-20% SR	15	157	868	112	206	42	154	45	12	-1
Betrieb 4	1. Satz 2011	-40% KAS	15	72	1089	129	220	47	176	-57	10	12
Betrieb 4	1. Satz 2011	-40% UF	15	114	629	89	195	44	133	25	11	1
Betrieb 4	1. Satz 2011	-40% SR	15	117	912	131	222	42	173	-14	9	6
Betrieb 4	2. Satz 2011	N-Exp	15	221	723	144	124	30	174	77	134	9
Betrieb 4	2. Satz 2011	-20% KAS	15	198	575	129	108	28	158	69	92	5
Betrieb 4	2. Satz 2011	-20% UF	15	215	666	117	107	32	149	98	80	0
Betrieb 4	2. Satz 2011	-20% SR	15	219	497	97	84	24	122	122	71	-5
Betrieb 4	2. Satz 2011	-40% KAS	15	188	652	122	104	30	152	66	73	3
Betrieb 4	2. Satz 2011	-40% UF	15	187	530	99	89	24	123	88	90	2
Betrieb 4	2. Satz 2011	-40% SR	15	193	329	76	71	26	102	117	87	-2
Betrieb 4	1. Satz 2012	N-Exp	22	224	487	175	224	78	253	49	131	17
Betrieb 4	1. Satz 2012	-20% KAS	22	180	339	124	301	111	235	56	125	20
Betrieb 4	1. Satz 2012	-20% UF	22	159	251	80	297	100	179	79	13	1
Betrieb 4	1. Satz 2012	-40% KAS	22	134	335	118	283	103	221	16	31	12
Betrieb 4	1. Satz 2012	-40% UF	22	119	179	64	348	128	193	55	29	10
Betrieb 3	1. Satz 2012	N-Exp	86	145	563	150	NA	NA	NA	-5	172	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	-20% KAS	86	116	NA	NA	NA	NA	NA	NA	216	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	-20% UF	86	131	NA	NA	NA	NA	NA	NA	54	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	-40% KAS	86	87	NA	NA	NA	NA	NA	NA	186	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	-40% UF	86	96	NA	NA	NA	NA	NA	NA	97	NA
		N-Exp	35	178	768 ^a	176 ^a	240 ^a	66 ^a	251 ^a	2 ^a	114 ^a	17 ^a
		-20% KAS	35	140	674 ^{ab}	145 ^{ab}	220 ^a	61 ^a	206 ^{ab}	-5 ^a	111 ^a	14 ^{ab}
		-20% UF	35	164	581 ^{ab}	102 ^b	236 ^a	62 ^a	165 ^{ab}	62 ^a	40 ^a	1 ^c
		-20% SR	15	164	759 ^{ab}	113 ^b	171 ^a	36 ^a	150 ^b	21 ^a	31 ^a	0 ^c
		-40% KAS	35	120	692 ^{ab}	123 ^{ab}	202 ^a	60 ^a	183 ^{ab}	-3 ^a	75 ^a	9 ^{ac}
		-40% UF	35	129	446 ^b	84 ^b	210 ^a	65 ^a	149 ^b	45 ^a	57 ^a	5 ^{bc}
		-40% SR	15	175	636 ^{ab}	108 ^b	134 ^a	33 ^a	141 ^b	67 ^a	59 ^a	2 ^{bc}
Mittelwerte												



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N/ha]

Abbildung 8: Kopfgrößen-sortierung von Blumenkohl bei optimaler Düngung mit weitem (opt, weit) und engem (opt, eng) Pflanzabstand und um 15-20% reduzierter Düngung mit weitem (red, weit) und engem (red, eng) Pflanzabstand. Bonitiert wurde der Kopfdurchmesser mit den Stufen 6er, 8er, 10er (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p < 0,05$) an.

Tabelle 7: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Blumenkohl bei optimaler Düngung mit weitem (opt, weit) und engem (opt, eng) Pflanzabstand und reduzierter Düngung mit weitem (red, weit) und engem (red, eng) Pflanzabstand. N_{min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N -Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{min} Ernte – N_{min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER). Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{min} Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FM Kopf dt ha ⁻¹	N in Kopf kg N ha ⁻¹	FM ER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	N_{min} Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 1	1. Satz 2011	opt, weit	48	240	348	75	416	172	246	165	28	-1
Betrieb 1	1. Satz 2011	opt, eng	48	247	390	80	418	144	224	167	77	1
Betrieb 1	1. Satz 2011	red, weit	48	125	270	54	351	117	171	71	11	1
Betrieb 1	1. Satz 2011	red, eng	48	193	429	94	335	103	197	99	38	-1
Betrieb 1	2. Satz 2011	opt, weit	28	125	374	74	199	63	136	51	96	8
Betrieb 1	2. Satz 2011	opt, eng	77	74	336	56	248	76	132	18	77	6
Betrieb 1	2. Satz 2011	red, weit	11	182	383	68	195	63	130	114	111	5
Betrieb 1	2. Satz 2011	red, eng	38	64	356	64	221	68	131	0	101	13
Betrieb 1	1. Satz 2012	opt, weit	95	234	433	109	430	159	268	125	88	2
Betrieb 1	1. Satz 2012	opt, eng	95	234	403	93	475	170	263	141	30	-3
Betrieb 1	1. Satz 2012	red, weit	95	187	359	90	437	158	248	97	24	-1
Betrieb 1	1. Satz 2012	red, eng	95	187	359	96	453	149	245	91	29	-1
Betrieb 2	1. Satz 2011	opt, weit	93	220	346	78	639	173	251	142	34	-3
Betrieb 2	1. Satz 2011	opt, eng	93	220	435	73	667	169	242	147	52	-2
Betrieb 2	1. Satz 2011	red, weit	93	190	358	62	489	135	198	128	31	-5
Betrieb 2	1. Satz 2011	red, eng	93	190	449	77	605	133	210	113	15	-6
		opt, weit	66	205	375 ^a	84 ^a	421 ^a	142 ^a	225 ^a	121 ^a	62 ^a	2 ^a
		opt, eng	78	194	391 ^a	75 ^a	452 ^a	140 ^a	215 ^a	118 ^a	59 ^a	0 ^a
		red, weit	62	171	343 ^a	69 ^a	368 ^a	118 ^a	187 ^a	102 ^a	44 ^a	0 ^a
		red, eng	69	159	398 ^a	82 ^a	403 ^a	113 ^a	196 ^a	76 ^a	46 ^a	1 ^a
Mittelwerte												

3.15 Sensor gestützte Düngedbedarfsermittlung

Zur Nutzung des Sensors im Gemüsebau war zunächst zu prüfen, ob und wie empfindlich der Sensor Unterschiede im N-Ernährungszustand von Kohlrabi und Blumenkohl anzuzeigen in der Lage ist. Hierzu wurden umfangreiche methodische Vorversuche im Gewächshaus durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass zwischen dem N-Gehalt der Pflanzen und dem REIP, dem Messwert des Sensors, bei beiden Pflanzenarten sehr enge Beziehungen bestehen (Abb. 9).

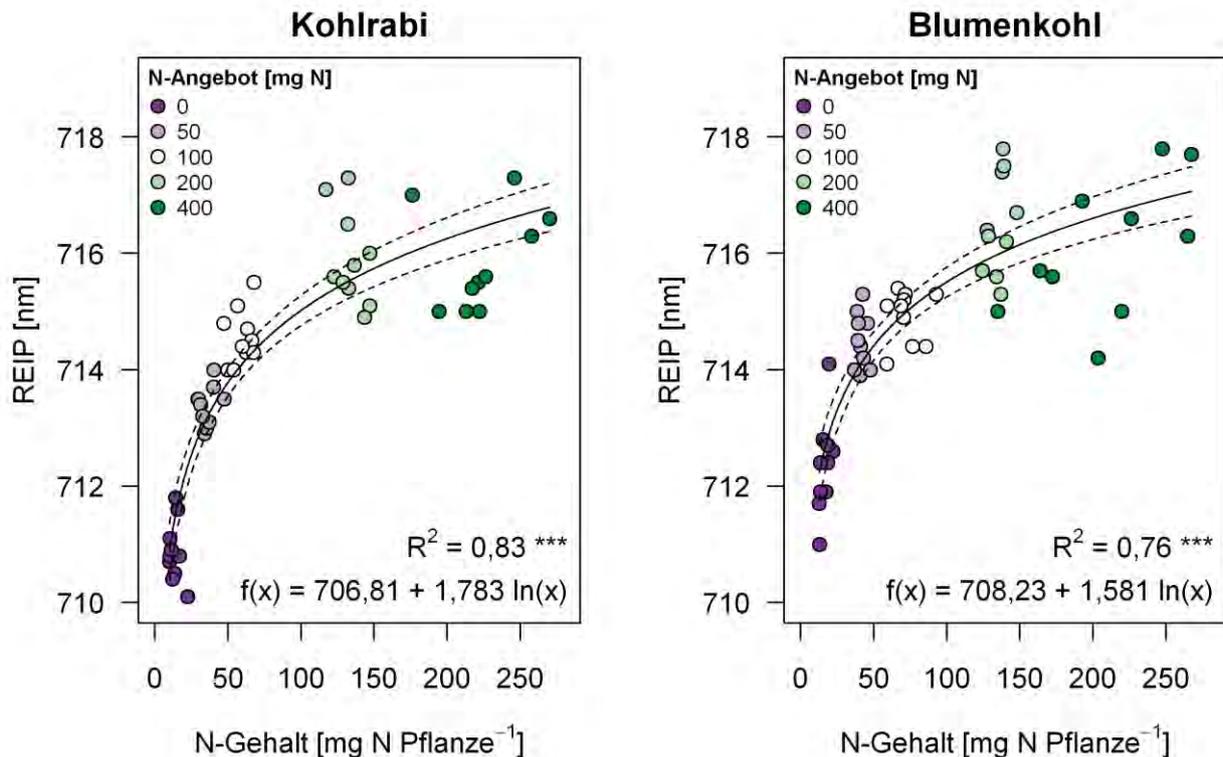


Abbildung 9: REIP von Kohlrabi- (links) und Blumenkohljüngpflanzen (rechts) nach 15 Tagen Kulturdauer in Abhängigkeit vom N-Gehalt der Gesamtpflanze. Eingezeichnet ist die Regressionsfunktion mit zugehörigem 95%-Konfidenzintervall. Die Farben kennzeichnen das N-Angebot (in mg N Topf⁻¹).

Das Prinzip der sensorgesteuerten N-Düngung bestand darin, nach einer einheitlichen Grunddüngung entsprechend dem N_{\min} Gehalt des Bodens nur dann eine Blattdüngung durchzuführen, wenn der Sensor eine Unterversorgung der Pflanzen anzeigte. Die Düngestrategie auf Basis des REIP wird exemplarisch in Abb. 10 gezeigt. Gedüngt wurde, wenn der REIP der zu düngenden Variante um eine Einheit (1 nm) von dem Wert der hoch gedüngten Variante abwich oder der Abstand sich dauerhaft nicht verringerte. Bei der Blattdüngung mit dem verwendeten N-Dünger konnte bei einmaligem Überschreiten der Parzelle mit der Rückenspritze maximal 13.5 kg N gedüngt werden, ohne dass Blattschäden auftraten. Zur Applikation der doppelten Mengen musste die Fläche ein zweites Mal überschritten werden.

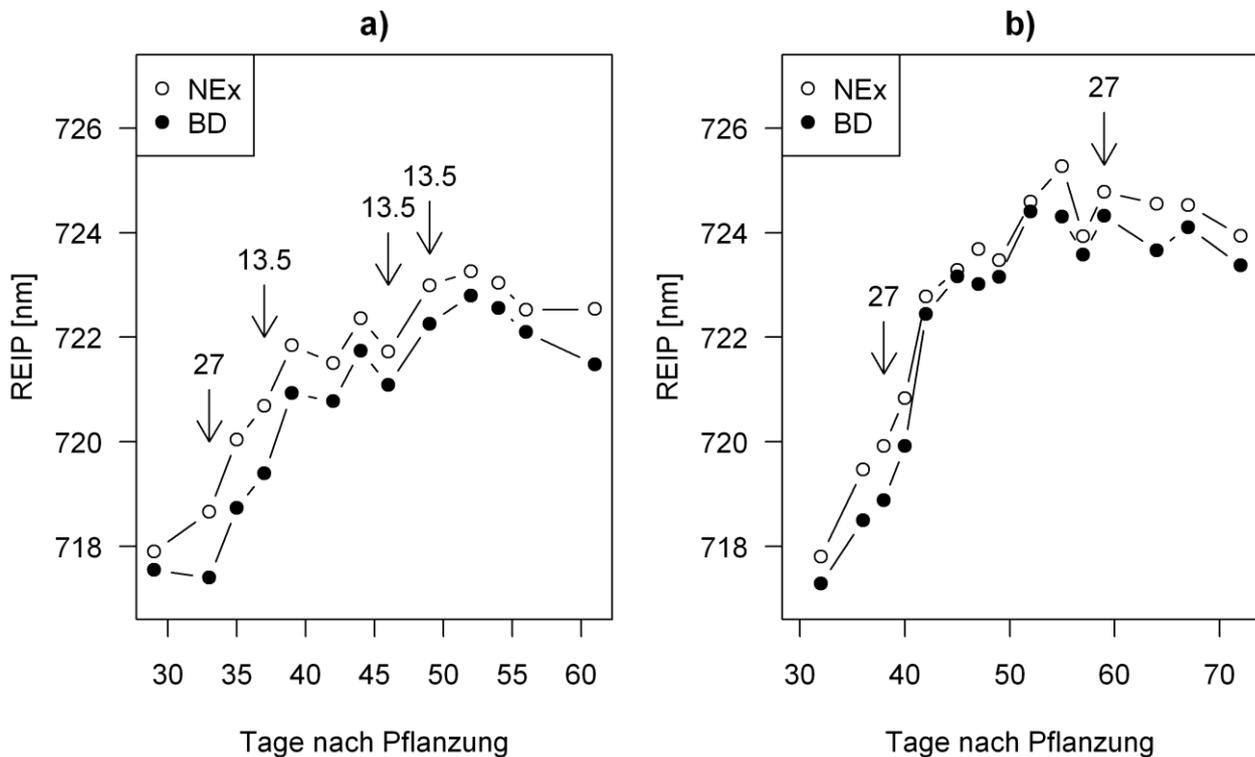


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf des Vegetationsindex' REIP für Kohlrabi (a) und Blumenkohl (b) im Feldversuch. Die Pfeile zeigen eine N-Düngung an, die Zahlen stehen für die applizierte Menge (in kg N ha⁻¹).

Zu Blumenkohl konnte nur ein Versuch sinnvoll ausgewertet werden. In diesem Versuch zeigte sich jedoch sehr eindeutig, dass durch den Sensor-Einsatz im Vergleich zu N-Expert ohne Einbußen bei Ertrag und Qualität (Abb. 11) die N-Düngung deutlich abgesenkt werden konnte, was eine starke Reduktion bei N-Saldo, N_{min}-Gehalt des Bodens nach der Ernte und eine leichte Verminderung der N-Menge in den Ernterückständen bewirkte (Tab. 8).

Zu Kohlrabi konnten 3 Versuche durchgeführt werden, die sich stark unterschieden. Im ersten Versuch (Betrieb 4) konnte durch den Einsatz des Sensors die N-Düngung nur geringfügig abgesenkt werden (Tab. 9), was ohne signifikanten Einfluss auf den Ertrag blieb (Abb. 12), aber den N-Saldo weiter absenkte und den N_{min}-Gehalt des Bodens nach der Ernte deutlich reduzierte. Im zweiten Versuch (Betrieb 3, 2012) war bei Sensor gesteuerter Düngung die N Applikation drastisch reduziert. Dies führte nicht zu negativen Wirkungen auf den Ertrag (Abb. 12), aber zu einer weiteren Absenkung des N-Saldos und einer starken Absenkung des N_{min}-Gehaltes nach der Ernte (Tab. 9). Im dritten Versuch (Betrieb 3, 2013) zeigten sowohl N-Expert als auch der Sensor keinen N-Düngungsbedarf an, da die erste Düngergabe zusätzlich zur N-Nachlieferung für einen optimalen Ertrag ausreichten.

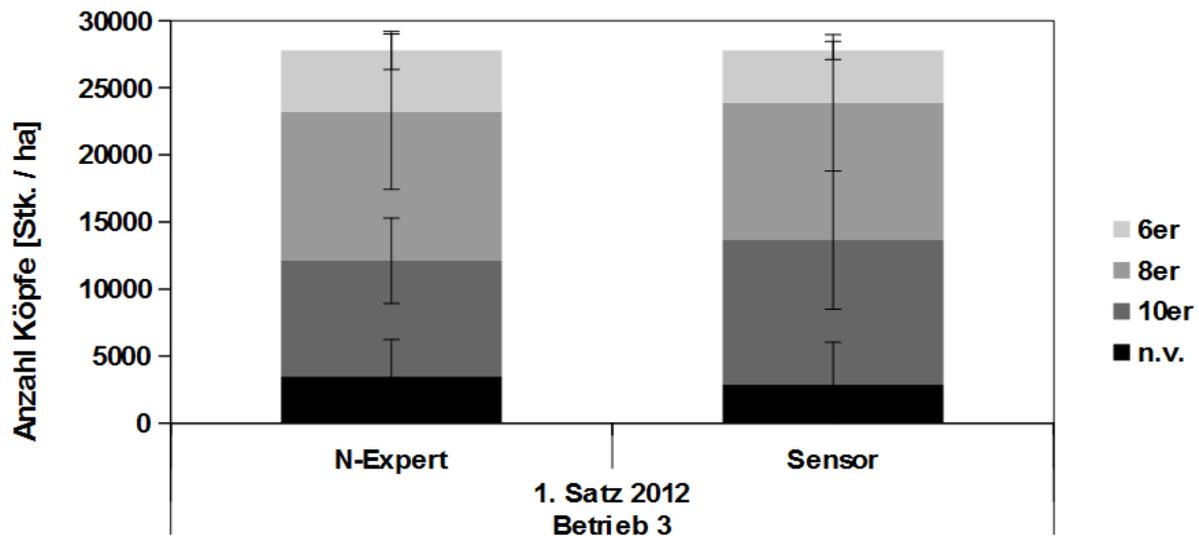


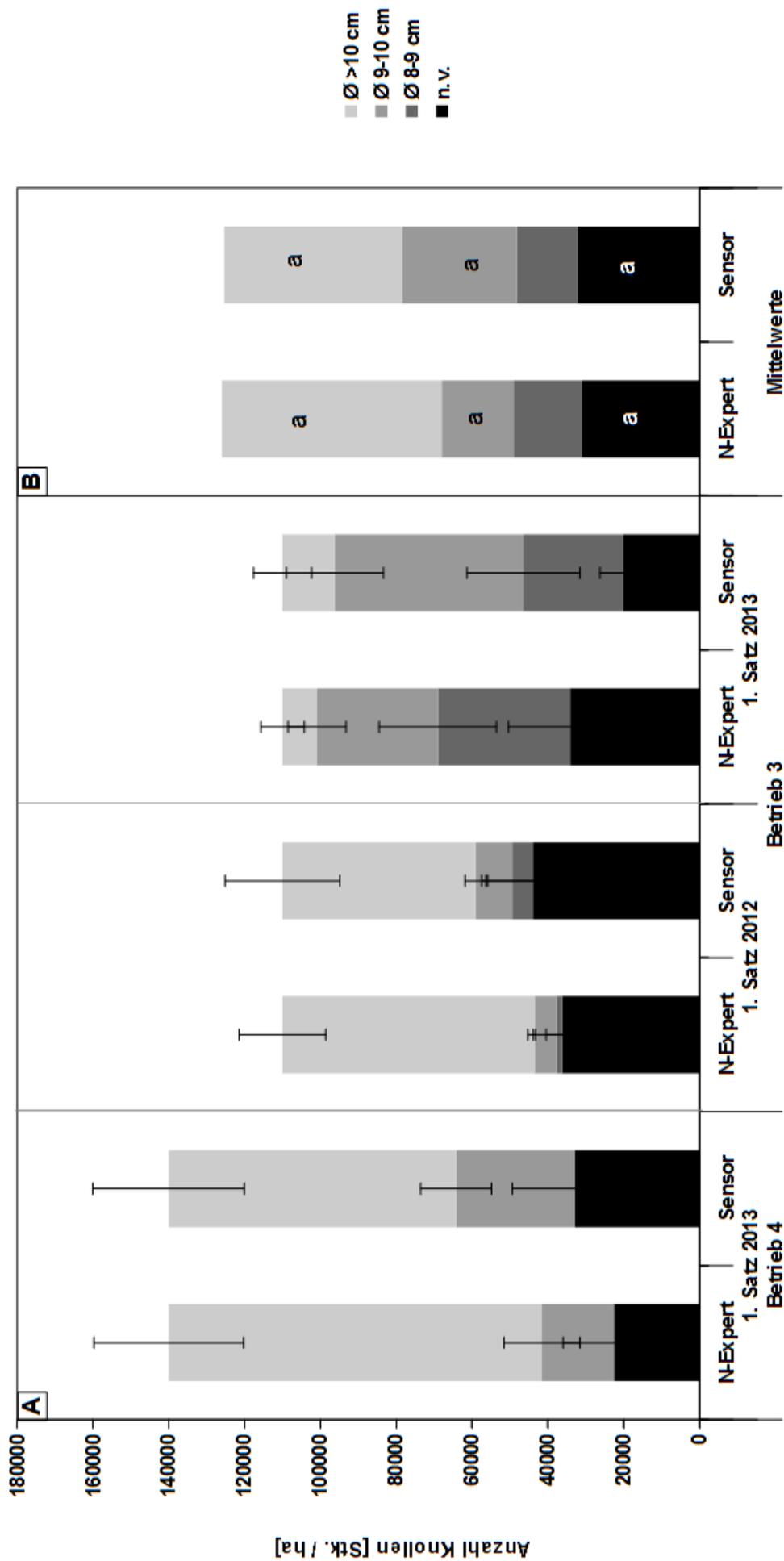
Abbildung 11: Kopfgrößensortierung von Blumenkohl bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Expert) und nach Sensor gestützter Bedarfsermittlung (Sensor). Bonitiert wurde der Kopfdurchmesser mit den Stufen 6er, 8er, 10er (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Im letzten Jahr wurde der Sensor auch zur Bemessung der Kopfdüngung in Porree in Betrieb 5 erprobt. Wegen der reichlichen N-Düngung vor Kulturbeginn in Form von Gülle ergab sich allerdings in diesem Versuch kein zusätzlicher Düngebedarf, was von dem Sensor auch zutreffend angezeigt wurde. Die Erträge unterschieden sich zwischen den beiden Behandlungen nicht (Abb. 13). Auf Grund der Ergebnisse der Sensor- und N_{\min} Messungen entschied der Betrieb, auch auf die eigentlich betriebsübliche Kopfdüngung zu verzichten, so dass im N-Düngeraufwand, dem N-Saldo, der stark negativ war, da die N-Düngung in Form von Schweinegülle nicht in die Berechnung einbezogen werden konnte, und im N_{\min} -Gehalt zur Ernte praktische keine Unterschiede bestanden (Tab. 10).

3.6 N-Nachlieferung

Die Einschätzung der Schätzung der N-Nachlieferung bei N-Expert mit 5 kg N/ha und Woche als Unsicherheitsfaktor für eine dem N-Angebot des Bodens Rechnung tragend N-Düngung veranlasste uns, die Nachlieferung durch eine Bestandesanalyse nachzurechnen nach der Formel: $N\text{-Nachlieferung} = (N\text{-Aufnahme} + N_{\min}\text{ Ernte} - N_{\min}\text{ Start} - \text{Düngung}) / \text{Kulturwochen}$. In der Tat ergaben die Bestandesanalysen sehr große Unterschiede in der N-Nachlieferung zwischen Betrieben den Kulturen und Sätzen innerhalb eines Betriebes von negativ bis deutlich über 5 kg/ha und Woche hinausgehend (Vergleiche in allen Bilanzen die letzte Spalte in den Bilanzierungstabellen). Allerdings ist die Variabilität der Werte auch innerhalb eines Versuches zum Teil sehr groß und nicht wirklich nachzuvollziehen. Dies lässt darauf schließen, dass die Bestandesanalyse mit einem großen Fehler behaftet ist, wobei eine starke kleinräumlich Variabilität der in die Berechnung eingehende N_{\min} -Gehalte zu Beginn und Ende der Kulturzeit und während der Kulturzeit auftretende N-Verluste eine Rolle spielen dürften. Letzteres wird besonders anschaulich, wenn in Tab. 2 unten, die Nachlieferung beim 2. Satz von Kohlrabi im Betrieb

4 bei betriebsüblicher Düngung (STD) und Düngung nach N-Expert verglichen wird. Die stark überhöhte Düngung bei STD führt zu einer stark negativen Nachlieferung, was auf erhöhte N-Verlusten durch Auswaschung zu erklären ist, die ja letztlich der Grund für die hohe Düngung durch den Betrieb war. Abgesehen von diesen Unzulänglichkeiten der Bestandesanalyse im Detail zeigen die Daten aber ein klares und nachvollziehbares Bild: Im Betrieb 4 bei Kohlrabi war die Nachlieferung konsistent hoch und übertraf z.T. die 5 kg/ha und Woche beträchtlich. Ähnlich hohe Nachlieferungsrate traten in Betrieb 1 nur im 2. Satz Blumenkohl (nach Blumenkohl) auf, was sicherlich auf die hohen N-Mengen in den Ernterückständen der ersten Kultur zurückzuführen ist. In den ersten Sätzen und in Betrieb 2 waren die Nachlieferungsrate eher geringer als geschätzt. In Betrieb 3 lag die Nachlieferungsrate in dem geschätzten Bereich von 5 kg/ha und Woche.



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

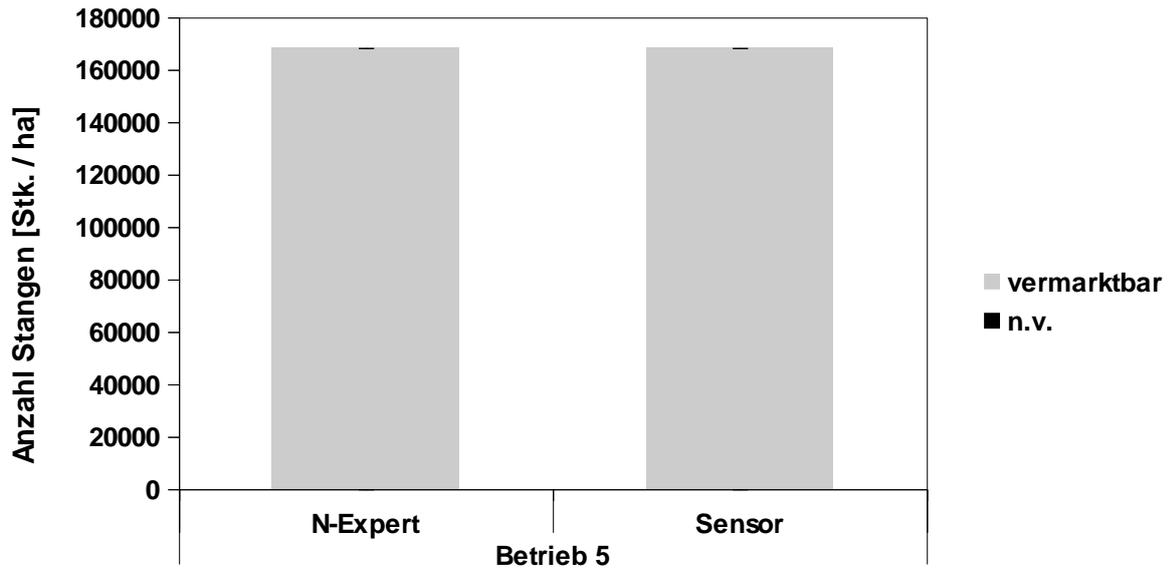
Abbildung 12: Knollengrößensortierung von Kohlrabi bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Expert) und nach Sensor gestützter Bedarfsermittlung (Sensor). Bonitiert wurde der Knolldurchmesser mit den Stufen ≥ 10 cm, 9-10 cm, 8-9 cm (abnehmender Durchmesser und damit verminderte Qualität) und n.v. (nicht vermarktungsfähig). A: Mittelwerte der einzelnen Sätze mit Standardabweichung. B: Mittelwerte über Jahre und Sätze. Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Tabelle 8: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Blumenkohl bei Düngung nach N-Expert (N-Expert) und nach Sensor gestützter Bedarfsermittlung (Sensor). N_{\min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{\min} Ernte – N_{\min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER).

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{\min} Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FM Kopf dt ha ⁻¹	N in Kopf kg N ha ⁻¹	FMER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	N_{\min} Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 3	1. Satz 2012	N-Expert	128	209	234	54	413	159	213	155	190	7
Betrieb 3	1. Satz 2012	Sensor	128	75	225	57	380	140	197	18	32	3

Tabelle 9: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Kohlrabi bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Exp) nach Sensor gestützter Bedarfsermittlung (Sensor). N_{\min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-30 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung = (N-Aufnahme + N_{\min} Ernte – N_{\min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER). Unterschiedliche Buchstaben zeigen statistische Unterschiede ($p \leq 0,05$) an.

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	N_{\min} Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FM Knolle dt ha ⁻¹	N in Knolle kg N ha ⁻¹	FMER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	N_{\min} Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 4	1. Satz 2013	N-Expert	20	194	684	226	147	51	278	-32	60	15
Betrieb 4	1. Satz 2013	Sensor	20	170	566	186	171	57	243	-16	20	9
Betrieb 3	1. Satz 2012	N-Expert	86	145	563	150	NA	NA	NA	-5	172	NA
Betrieb 3	1. Satz 2012	Sensor	86	68	452	113	NA	NA	NA	-46	30	NA
Betrieb 3	1. Satz 2013	N-Expert	159	0	254	78	146	48	126	-78	75	5
Betrieb 3	1. Satz 2013	Sensor	159	0	358	117	143	46	163	-117	59	7
Mittelwerte			88	113	500 [#]	151 ^a	147 ^a	50 ^a	202 ^a	-38 [#]	102 ^a	10 ^a
			88	79	459 [#]	139 [#]	157 ^a	51 ^a	203 ^a	-60 [#]	36 ^a	8 ^a



Betrieb, Versuchszeitraum, Behandlung, Düngemenge [kg N / ha]

Abbildung 13: Stangensortierung von Porree bei Düngung nach Empfehlung durch N-Expert (N-Expert) und nach Sensor gestützter Bedarfsermittlung (Sensor). Einteilung in vermarktbar und nicht vermarktbar (n.v.). Dargestellt sind Mittelwerte mit Standardabweichung.

Tabelle 10: Parameter zur Bilanzierung des Stickstoffeinsatzes in Porree bei Düngung nach N-Expert (N-Expert) und nach Sensor gestützter Bedarfsermittlung (Sensor). N_{\min} -Gehalte in der Bodenschicht 0-60 cm. N-Saldo = Düngung – N in Abfuhr; N-Nachlieferung =

Betrieb	Zeitraum	Behandlung	Nmin Start kg N ha ⁻¹	Düngung kg N ha ⁻¹	FM Abfuhr dt ha ⁻¹	N in Abfuhr kg N ha ⁻¹	FM ER dt ha ⁻¹	N in ER kg N ha ⁻¹	N-Aufnahme kg N ha ⁻¹	N-Saldo kg N ha ⁻¹	Nmin Ernte kg N ha ⁻¹	N-Nachlieferung kg N ha ⁻¹ Woche ⁻¹
Betrieb 5	2013	N-Expert	120	0	588	158	255	76	255	-158	73	7
Betrieb 5	2013	Sensor	120	0	603	157	268	79	268	-157	54	6

(N-Aufnahme + N_{\min} Ernte – N_{\min} Start – Düngung) / Kulturwochen; N-Aufnahme = N in Abfuhr + N in Ernterückstand (ER).

3.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Versuche haben gezeigt, dass es durchaus praktikable Ansätze zur Reduktion der N-Bilanzsalden bei den als besonders problematisch angesehenen Kulturen Blumenkohl und Kohlrabi gibt. Hierzu können beitragen die genauere Erfassung der N-Angebotes (N_{\min} , N Nachlieferung) des Bodens, die Düngungstechnik, und Änderungen der Qualitätsanforderungen des Marktes.

Düngung nach N-Expert

Bei Blumenkohl erbrachte die Düngung nach N-Expert allerdings keine wesentliche Entlastung des N-Bilanzsaldos, da die Betriebe mit großem Sachverstand düngen. Eine Reduktion der Düngung um 20% war in der Mehrzahl der Fälle, aber nicht immer, ohne Verlust an Ertrag und Qualität von Blumenkohl dennoch möglich, wodurch sich bestätigte, dass die Düngeempfehlung nach N-Expert einen Sicherheitszuschlag beinhaltet.

Bei Kohlrabi konnte hingegen die Düngung nach N-Expert zu einem deutlichen Absenken des N-Bilanzsaldos ohne Ertrags- und Qualitätsverluste beitragen unter der Voraussetzung, dass die Grünfärbung der Blätter kein vom Markt gefordertes Qualitätsmerkmal ist. Als ein besonderes Problem erwies sich der Anbau von Kohlrabi auf Sandböden, auf denen auch während der Vegetationsperiode N-Verluste durch Auswaschung von Nitrat aus dem sehr flachen Wurzelraum von Kohlrabi (< 30cm) auftreten können. Eine Lösung könnte der, allerdings nicht untersuchte, Anbau von tieferwurzelnden Sorten darstellen.

Platzierte Düngung

Die vorliegenden, allerdings quantitativ unzureichenden Ergebnisse, lassen erkennen, dass eine Banddüngung zur Pflanzung mit einem Ammonium-basierten N-Dünger die N-Düngerausnutzung verbessern kann und eine 2. Düngergabe als Kopfdüngung überflüssig macht. Voraussetzung ist allerdings eine Ablage des Düngerbandes direkt bei der Pflanzung, da nur so eine exakte Ablage des Düngers in den Wurzelraum ohne Schädigung der Pflänzlinge möglich ist. Der Verzicht auf die Kopfdüngung macht allerdings eine Berücksichtigung der Nachlieferung unmöglich.

Verzicht auf gegenwärtig vom Markt vorgegebene Einzelpflanzengrößen

Die Versuche ergaben, dass ein Abrücken von der Vorgabe, große 6er-Köpfe bei Blumenkohl zu produzieren, erlaubt, bei geringerem N-Düngeraufwand mehr vermarktbar Köpfe zu produzieren. Der größte Vorteil wird darin gesehen, durch gleichwerte Vermarktbarkeit von kleineren Größen sowohl bei Blumenkohl und bei Kohlrabi die Zahl der erforderlichen Erntegänge zu reduzieren.

Sensor gestützte Düngebedarfsermittlung

Trotz der offensichtlichen Ungenauigkeit der Bestandsanalyse zur Ermittlung der N-Nachlieferung während der Vegetationsperiode wurde deutlich, dass die N-Nachlieferung je nach Standort, organischer Düngung, Vorkultur und Management der Ernterückstände sehr stark variieren kann und daher eine qualifizierte N-Düngung auch die Messung der aktuellen und nicht nur die Berücksichtigung einer durchschnittlichen Nachlieferung

erfordert. Die gezeigten, allerdings quantitativ unzureichenden, Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Erfassung des N-Ernährungszustandes durch den getesteten Sensor und dadurch gesteuerte N-Kopfdüngung eine gute Möglichkeit darstellt diesem Ziel näher zu kommen. Allerdings sind weitere Versuche erforderlich, um ein für die Betriebe akzeptable praxisreife Technik zu entwickeln.

4. Zusammenfassung

Im Teilvorhaben der LUH wurden integrierte Strategien zur Verbesserung des Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau auf Praxisbetrieben Norddeutschlands erprobt und mit der betriebsüblichen Düngung verglichen. Die Strategien sollen praktikable Möglichkeiten zur Verminderung des Stickstoff-Bilanz-Saldos und der Nitrat-Auswaschung in Praxisbetrieben Niedersachsens aufzeigen. Ziel war es, das N-Management der Betriebe so zu optimieren, dass die „unvermeidlichen“ N-Überschüsse und damit die Stickstoff-Einträge in die Umwelt minimiert werden. Im Speziellen sollte im Rahmen des Vorhabens untersucht werden, ob durch bestimmte Dünge- bzw. Anbaumaßnahmen der N-Bilanz-Saldo insbesondere beim Anbau von Blumenkohl und Kohlrabi verringert werden kann, ohne einen Qualitätsverlust im Erntegut zu erleiden. Hierzu wurden unterschiedliche Dünge- und Kulturstrategien in praxisnahen Versuchen in 6 Praxisbetrieben in Niedersachsen im Umkreis von bis zu 200 km von Hannover über 3 Jahre verglichen. Insgesamt wurden 21 Versuche (Sätze) durchgeführt, von denen allerdings nur 14 auswertbare Ergebnisse erbrachten. Folgende Strategien wurden mit der betriebsüblichen Standard Düngung verglichen: Ermittlung des Düngerbedarfes nach N-Expert, Absenkung der Düngung nach N-Expert um 20 und 40%, Platzierte N-Düngung als Banddüngung oder Ablage eines Düngerdepots mit dem Spornrad, Verzicht auf gegenwärtig vom Markt vorgegebene Einzelpflanzengrößen, sensorgestützte Ermittlung des Kopfdüngungsbedarfes.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt: (i) die Bemessung der Düngung nach N-Expert erlaubte bei Kohlrabi, nicht aber bei Blumenkohl zum Teil eine deutliche Absenkung der N-Düngung gegenüber „betriebsüblich“. (ii) Eine Reduktion um 20% im Unterschied zu 40% führte in der Regel nicht zu Ertrags- und Qualitätseinbußen. Allerdings kam es bei Düngung nach N-Expert und Absenkung der N-Düngung teilweise zu den Marktanforderungen nicht entsprechenden Grünfärbung der jüngeren Blätter bei Kohlrabi. (iii) Eine Banddüngung in den Wurzelraum unmittelbar bei Pflanzung mit einem Ammonium-basierten N-Dünger kann die N-Düngerausnutzung verbessern und eine 2. Düngergabe als Kopfdüngung überflüssig machen. (iv) Ein Verzicht auf die Vorgabe, große 6er-Köpfe bei Blumenkohl zu produzieren, erlaubt, bei geringerem N-Düngeraufwand mehr vermarktbar Köpfe zu produzieren. (v) Die Erfassung des N-Ernährungszustandes durch den getesteten Sensor und dadurch gesteuerte N-Kopfdüngung stellt eine gute Möglichkeit dar, der N-Nachlieferung, die laut Bestandesanalyse je nach Standort, organischer Düngung, Vorkultur und Management der Ernterückstände sehr stark variieren kann, bei der Kopfdüngung Rechnung zu tragen, und daher bei hoher Nachlieferung die N-Düngung und damit den N-Bilanzsaldo und die N_{\min} -Gehalte im Boden nach der Kultur deutlich zu senken.

Die Versuche haben damit eindrücklich gezeigt dass es durchaus praktikable Ansätze zur

Reduktion der N-Bilanzsalden bei den als besonders problematisch angesehenen Kulturen Blumenkohl und Kohlrabi gibt. Hierzu können beitragen die genauere Erfassung des N-Angebotes (N_{\min} , N Nachlieferung) des Bodens, die Düngungstechnik, und Änderungen der Qualitätsanforderungen des Marktes.

5. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; ggf. mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen

Gegenüber den ursprünglich geplanten Untersuchungen mussten angesichts des enormen Aufwandes für die Versuchsdurchführung in den zum Teil ca. 200 km vom Institut entfernten Betrieben, die eine enge Abstimmung der Versuche in Umfang, Zeitablauf und zur Verfügung stehender Technik und Organisationsstrukturen im betrieblichen Ablauf erforderten, einige Abstriche gemacht werden. Die Fragen Management der Ernterückstände, Fruchtfolge und Wirkung von tiefwurzelnden Genotypen bei Kohlrabi konnten nicht in Angriff genommen werden. Die beiden ersten Fragen wurden allerdings durch die Projektpartner insbesondere LUFA Speyer und UH bearbeitet. Ungünstige Rahmen- (EHEC-Krise) und Wetterbedingungen (sehr langer Winter 2011/2012 und Überschwemmungen im anschließenden Frühjahr) stellten hohe Ansprüche an die Kooperationsbereitschaft der Betriebe. Krankheit des für die Betreuung der Versuche verantwortlichen Projektmitarbeiters und ein Todesfall in seiner engeren Familie stellten im Jahr 2013 ein Problem für die Durchführung der Versuche im geplanten Umfang dar. Hierdurch konnten auch einige der Strategien, insbesondere die Sensorgestützte N-Kopfdüngung nicht in der erforderlichen Tiefe geprüft werden.

Dennoch wurden die Projektziele erreicht. Die erzielten Ergebnisse erlauben durchaus praktikable Ansätze zur Reduktion der N-Bilanzsalden bei den als besonders problematisch angesehenen Kulturen Blumenkohl und Kohlrabi abzuleiten. Als besonders wirksam und vielversprechend werden auf der Basis der Ergebnisse eine qualifiziertere Ermittlung des N-Düngungsbedarfes durch die Kombination einer N_{\min} Probenahme zur Pflanzung mit einer sensorgestützten Bemessung der Höhe der Kopfdüngung, und eine Änderung der Marktanforderungen bezüglich Größensortierung bei Blumenkohl und Grünfärbung der Blätter bei Kohlrabi angesehen. Diese Ansätze sollten in weiteren Versuchen in Praxisbetrieben verifiziert und vertieft werden. Insbesondere erfordert die sensorgestützte Kopfdüngung eine technische Weiterentwicklung zur praxisreifen Anwendung, für die es in der landwirtschaftlichen Praxis bereits Lösungen gibt. Eine Änderung der Anforderungen des Marktes kann nur durch einen intensivierten Dialog zwischen Anbauern, Einzelhandel, Verbrauchern und Politik erreicht werden. Auch sollte die Wahl, Züchtung und Testung von Sorten, die eine Absenkung des N-Bilanzsaldos erlauben und kompatibel sind mit den betrieblichen Anforderungen an die Kultur- und Erntetechnik, intensiviert werden, was insbesondere auf leichten nitratenauswaschungsgefährdeten Standorten von Bedeutung ist.

Abschlussbericht LUFA Speyer

Zuwendungsempfänger: Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer Obere Langgasse 40 67346 Speyer	Forschungsvorhaben Nr.: 2810HS008
--	--------------------------------------

Thema:
Entwicklung eines integrierten Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau zur Vermeidung von Stickstoffüberschüssen. Teilprojekt LUFA Speyer: Strategien zur Verminderung von N-Bilanz Saldo und N-Auswaschung in Praxisbetrieben der Pfalz.

Laufzeit:
01.12.2010 – 31.10.2014

Berichtszeitraum:
01.12.2010 – 31.10.2014

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:
Institut für Pflanzenernährung Hannover
Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren / Erfurt e.V.
Institut für Kulturpflanzenwissenschaften Universität Hohenheim
Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinpfalz, Neustadt
BOLAP GmbH, Speyer
Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz, Fachgruppe Gemüse
Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau, Heidelberg
Fachhochschule Bingen

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	40
1. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens	41
1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens	41
1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	42
2. Material und Methoden	44
2.1 Kooperierende Praxisbetriebe	44
2.2 Bausteine für ein integriertes Stickstoffmanagement im Gemüsebau	45
2.3 Ertrags- und Qualitätsuntersuchungen	48
2.4 Berechnung von Stickstoffsalden	49
2.5 Ermittlung der Nitratauswaschung	49
2.6 Ermittlung der N ₂ O-Emissionen	50
2.7 Charakterisierung der standortsspezifischen N-Mineralisierung	51
3. Ergebnisse	53
3.1 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse	53
3.1.1 Stickstoffbilanzen im Gebiet der Vorderpfalz und der kooperierenden Praxisbetriebe	53
3.1.2 Ergebnisse der Versuche auf Praxisbetrieben	55
3.1.3 Nitratkonzentrationen und Nitratausträge ausgewählter Praxisversuche	69
3.1.4 N ₂ O-Emissionen ausgewählter Praxisversuche	80
3.1.5 Untersuchungen zur standortsspezifischen N-Mineralisierung	86
3.1.6 Ergebnisse des Exaktversuches auf der Feldversuchsstation „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer	94
3.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	105
4. Zusammenfassung	106
5. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen	108
6. Literaturverzeichnis	110
7. Anhang	112
7.1 Liste der Veröffentlichungen und Vorträge mit Projektbezug	112
7.1.1 Veröffentlichungen	112
7.1.2 Vorträge (chronologisch)	113

1. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen der Düngeverordnung werden für die Beurteilung der fach- und umweltgerechten Stickstoffdüngung durch einen Nährstoffvergleich (N-Saldo) „unvermeidliche Verluste“ für den Gemüsebau spezifiziert, die einen erheblichen Einfluss auf Praxis, Beratung und Kontrolle in den Ländern ausüben. Die zugestandenen „unvermeidlichen“ N-Saldo-Überschüsse, die teilweise um ein Vielfaches die den landwirtschaftlichen Ackerkulturen zugestandenen Verluste übersteigen, beruhen im Wesentlichen auf vom IGZ, Großbeeren, zusammengestellten Daten, die auf den damals aktuellen Beratungsgrundlagen und der üblichen Praxis basieren. Vor dem Hintergrund sich verändernder Rahmenbedingungen für die Produktion von Gemüse und stark erhöhter Sensibilisierung von Politik und Öffentlichkeit stehen die dem Gemüsebau zugestandenen „unvermeidlichen“ N-Saldo Überschüsse in der Kritik und erfordern dringend einer Überprüfung/Anpassung, da die angestrebte steuernde Wirkung der Düngeverordnung auf die Stickstoffdüngung im Gemüsebau auf der Basis derartiger Werte nicht gewährleistet werden kann.

Ziele des Projekt war es daher, die in der Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S.221) in Anlage 6 Zeilen 12 bis 14 den Betrieben des Erwerbsgartenbaues zugestandenen Überschüsse auf Realisierung und Realisierbarkeit zu überprüfen. Hierbei sollte insbesondere aufgezeigt werden, in wie weit in Praxisbetrieben durch gezielte Maßnahmen eine Absenkung „unvermeidlicher“ N-Saldo Überschüsse möglich ist.

Im Teilvorhaben der LUFA Speyer stand die im Bezug zur betriebsüblichen Praxis vergleichende Erprobung von integrierten Strategien zur Verminderung des Stickstoff-Bilanz-Saldos und der Nitrat-Auswaschung in Praxisbetrieben der Pfalz im Vordergrund. Ziel war es, das N-Management der Betriebe so zu optimieren, dass die „unvermeidlichen“ N-Überschüsse und damit die Stickstoff-Einträge in die Umwelt minimiert werden.

Für das Teilprojekt der LUFA Speyer war zur Erreichung dieser Ziele folgender Ablauf des Vorhabens **geplant**:

1. Auswahl der Betriebe, Erstellung der betriebsspezifischen Versuchspläne in Kooperation mit der Beratung und den Betriebsleitern (Teilgebiet „Pfalz“);
2. Erstellung der „baseline“ für die Betriebe (Teilgebiet „Pfalz“);
3. Erfassung des Standes der N-Salden in Gemüsebaubetrieben in Beziehung zur geltenden Düngeverordnung. Überprüfung der in der Düngeverordnung zugestandenen Überschüsse; Erstellung eines Zwischenberichtes (Teilgebiet „Pfalz“);
4. Durchführung von Feldversuchen in der Pfalz;
5. Quantifizierung der Nitratauswaschung.

Der **Ablauf** des Vorhabens wird nachfolgend kurz beschrieben und den vorausgehend beschriebenen **Punkten** zugeordnet.

Für die Zusammenarbeit im Forschungsprojekt konnten im Frühjahr 2011 fünf Betriebe gewonnen werden. Auf diesen Betrieben wurden in Kooperation mit der Beratung und den Betriebsleitern Versuchspläne bzw. Versuchskonzepte für den Projektzeitraum erstellt und über den gesamten Projektzeitraum Versuche durchgeführt (**Punkt 1**). In **Ergänzung** zu den Praxisversuchen wurde Sommer 2011 auf der Versuchsstation „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer ein **Exaktversuch** mit 8 ausgewählten Versuchsvarianten angelegt. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Ruser der Universität Hohenheim wurden hier zusätzlich auch die gasförmigen N-Verluste ermittelt. Für die kooperierenden Betriebe wurden über den Projektzeitraum die für die Erstellung von N-Bilanzen erforderlichen Daten (Düngermengen und Verkaufsmengen) in Zusammenarbeit mit der Beratung erfasst (**Punkt 2**). Für den Zeitraum 2008 bis 2013 wurden von der Beratung die N-Bilanzen von etwa 100 Betrieben pro Jahr aus dem Gebiet der Vorderpfalz als Mittelwerte zur Verfügung gestellt. Die N-Bilanzen der Betriebe wurden mit den nach Düngeverordnung zulässigen N-Bilanzüberschüssen verglichen (**Punkt 3**). Ab April 2011 wurden auf den Betrieben Feldversuche durchgeführt, die im Zeitraum Frühjahr 2013 bis Frühjahr 2014 um Detailversuche zur Charakterisierung der standortsspezifischen N-Mineralisierung ergänzt wurden (**Punkt 4**). Die Untersuchungen zur Quantifizierung der N-Auswaschung konnten im Zeitraum Herbst 2012 bis Frühjahr 2014 durchgeführt werden (**Punkt 5**). **Ergänzend** zum geplanten Verlauf wurden im Zeitraum August 2012 bis August 2013 in zwei Praxisversuchen Messungen zur Ermittlung der **N₂O-Emissionen** durchgeführt.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Erhebungsuntersuchungen zeigen, dass im intensiven Gemüsebau im Vergleich zu landwirtschaftlichen Kulturen wesentlich höhere Stickstoff (N)-Bilanzüberschüsse und damit auch häufig erhöhte Austräge von N in die Umwelt (NO_3^- , N_2O) auftreten. Dies beruht zum Teil auf falschen Vorstellungen der Gemüseanbauer über den Stickstoffdüngungsbedarf dieser Intensivkulturen und darauf zurückzuführender überhöhter N-Düngung. Solche positiven N-Bilanzsalden treten aber auch dann auf, wenn die Düngung nach den Empfehlungen der Düngeberatung und unter Einsatz der N_{\min} -Methode bemessen wird. Letztere kann hohe Bilanzüberschüsse vermindern, sie aber nicht verhindern. Ein Abweichen von der Düngungsberatung in der Praxis wird auch häufig dadurch begründet, dass die Beratung nicht hinreichend den an die Produktion gestellten Qualitätsansprüchen des Marktes und damit den ökonomischen Zwängen, denen die Betriebe unterliegen, Rechnung trägt.

Grundsätzlich besteht aber Einigkeit zwischen Wissenschaft, Praxis und Beratung, dass ein ökonomisch tragfähiger Gemüseanbau unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht möglich ist ohne deutlich höhere positive N-Bilanzüberschüsse als in landwirtschaftlichen Marktfruchtbetrieben. Dies beruht insbesondere auf drei Ursachen:

1. Viele Gemüsekulturen erfordern bei der Ernte für die Erzielung optimaler Erträge vergleichbar hohe N_{\min} -Restgehalte im Boden.
2. Viele Gemüsekulturen durchwurzeln den Boden nur sehr flach, wodurch eine erhöhte Gefahr des Einwaschen in tiefere Bodenschichten und damit eines potentiellen Eintrages von Dünger- und Boden-N ins oberflächennahe Grundwasser gegeben ist.
3. Bei vielen Gemüsekulturen verbleiben erhebliche Mengen des aufgenommenen N in den Ernterückständen. Ein Teil des in der Regel leicht mineralisierbaren N steht einer im selben Jahr angebauten Folgekultur (teilweise) zu Verfügung, bei einer abtragenden Kultur besteht allerdings eine große Gefahr von N-Verlusten durch Auswaschung über die vegetationslose Zeit zum Jahreswechsel.

Die Höhe der auftretenden Bilanzüberschüsse ist je nach Standort, Fruchtfolge, Anbaumanagement und Düngung erwartungsgemäß sehr unterschiedlich. Betriebsbilanzierungen zeigen, dass die Bilanzüberschüsse in der Regel zwischen 100 und 300 kg N/ha/Jahr liegen. Solche Bilanzierungen ermöglichen bisher nicht die qualifizierte Ableitung von Werten für „unvermeidliche und damit zulässige“ N-Saldo Überschüsse, die es in Zukunft anzustreben gilt. Aus diesem Grund war es erforderlich, in einem Versuchsprogramm Strategien experimentell zu erarbeiten, wie weit es unter Nutzung aller verfügbaren pflanzenbaulichen und pflanzenernährerischen Maßnahmen möglich ist, die N-Bilanzüberschüsse und damit verbundene Belastungen der Umwelt zu vermindern. Während über die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen bereits ein großes Wissen aus Exaktversuchen auf Versuchsstationen besteht, ist die Entwicklung von integrierten Stickstoffmanagementsystemen im Gemüsebau eher die Ausnahme und bislang auch wenig in der Praxis erprobt. Entsprechende Forschungsansätze wurden in Zusammenhang mit der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie seit dem Jahre 2004 an der LUFA Speyer verfolgt (Wiesler et al., 2008; Armbruster et al., 2012).

2. Material und Methoden

2.1 Kooperierende Praxisbetriebe

In Abstimmung mit dem DLR Rheinpfalz und der Beratungsfirma BOLAP konnten im Jahr 2011 fünf Gemüsebaubetriebe für die Durchführung der Praxisversuche gewonnen werden. Die Lage der teilnehmenden Gemüsebaubetriebe ist in Abb. 1 dargestellt.

In der Tab. 1 sind die Betriebsdaten für das Wirtschaftsjahr 2013 zusammengestellt. Die landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) der fünf Gemüsebaubetriebe reicht aktuell von 80 bis 1245 ha. Durch die unterschiedliche Belegungshäufigkeit an Gemüse, die in den Betrieben zwischen 0,8 und 1,9 liegt, ergibt sich für die Anbaufläche ein Größenbereich von 65 bis 1364 ha. Der gemüsebaulich genutzte Anteil dieser Anbaufläche beträgt 46 bis 100 %.

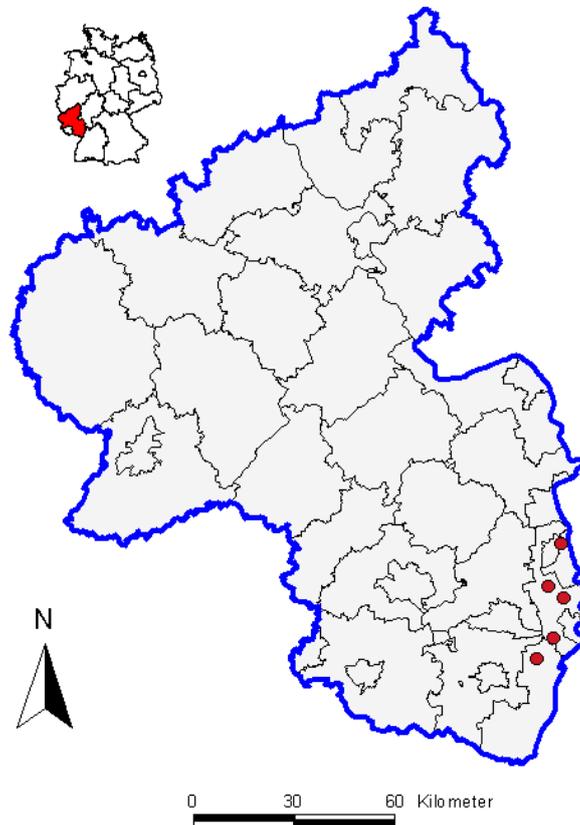


Abb. 1: Geografische Lage der Betriebsstandorte der teilnehmenden Praxisbetriebe in Rheinland-Pfalz.

Tab. 1: Betriebsdaten der fünf Praxisbetriebe (Wirtschaftsjahr 2013).

Betrieb Nr.	1	2	3	4	5	
LN [ha]	80	338	700	1245	206	
Anbaufläche [ha]	65	474	1332,11	1364	275	
Belegungshäufigkeit	0,8	1,4	1,9	1,1	1,3	
Anteil Gemüse an Anbaufläche [%]	50	46	97	100	72	
Angebaute Kulturen						
<i>Gemüsebau</i>	Buschbohne Kürbis Möhre Rettich	Blumenkohl Brokkoli Chinakohl Feldsalat Kohlrabi Mairübe Porree Rettich Rhabarber Rote Rübe Rotkohl Salat Sellerie Spinat Weißkohl	Bundzwiebel Erbsen Feldsalat Porree Radies Salat Zucchini	Bundzwiebel Möhre Porree Radies Salat Sellerie Spinat Zuckermais	Blumenkohl Brokkoli Salat Speisezwiebel	
<i>Ackerbau</i>	Kartoffel	Winterweizen Wintergerste Silomais Körnermais	Körnermais	-	Kartoffel Zuckerrübe	

2.2 Bausteine für ein integriertes Stickstoffmanagement im Gemüsebau

Hohe Nitrat-Restmengen im Boden und hohe N-Bilanzüberschüsse sind Ausdruck einer unbefriedigenden Stickstoffausnutzung durch Gemüsekulturen. Ziel von Strategien zur Verbesserung dieser Situation muss daher sein, die Stickstoffausnutzung zu verbessern bzw. die Stickstoffverluste in der Landwirtschaft zu vermindern. Diesbezüglich wurden in der landwirtschaftlichen Forschung in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl einzelner Maßnahmen zur Verbesserung der Stickstoffausnutzung untersucht (s. Tab. 2).

Tab. 2: Maßnahmen zur Verbesserung der Stickstoffausnutzung in der Pflanzenproduktion, die als Bausteine in ein integriertes Stickstoffmanagementsystem eingehen können (nach Wiesler et al., 2001).

-
- Wahl der Kulturpflanzenart und der Fruchtfolge
 - Berechnung
 - Pflanzenschutz
 - Zeitpunkt, Intensität und Tiefe der Bodenbearbeitung
 - Art der Stickstoffzufuhr
 - Treffsichere Ermittlung des Stickstoffdüngerbedarfs
 - Zeitpunkt der Stickstoffdüngung
 - Technik der Stickstoffdüngung
 - Form des Stickstoffdüngers
 - Sorte
 - Anbau von Zwischenfrüchten
 - Management der Ernterückstände
 - Einarbeitung von Stroh
-

Für die Versuche auf den Betrieben wurde der Vergleich der folgenden Strategien (Einzel- oder Kombinationsmaßnahme) mit der betriebsüblichen Praxis in Betracht gezogen:

1. Ermittlung des Düngebedarfes unter Anwendung von N-Expert und der SPAD-Methode;
2. Veränderung der Düngetechnik durch platzierte Düngung und Einsatz anderer Düngerformen;
3. Management der Ernterückstände wobei je nach Betrieb eine Abfuhr und Verarbeitung in Biogasanlagen oder N-Immobilisierung durch Strohdüngung ins Auge gefasst wurden;
4. Integration von Zwischenfrüchten/Veränderung der Fruchtfolge;
5. Bessere Steuerung der Berechnung.

Ausgehend von der Kulturartenverteilung und den N-Bilanzüberschüssen der kooperierenden Betriebe wurde eine Schwachstellenanalyse der Betriebe durchgeführt. Daraus wurden für den jeweiligen Betrieb angepasste Strategien zur Verminderung der N-Bilanzüberschüsse abgeleitet. Auf Praxisbetrieben konnten im Rahmen dieser Arbeit die Maßnahmen Nr. 1, 2, 4 und 5 aus der obigen Auflistung untersucht werden, die im Folgenden näher erläutert werden.

Zu 1:

Das von der Officialberatung empfohlene N-Expert-Verfahrens (Feller et al., 2007) berücksichtigt die N_{\min} -Gehalte im Boden. In der Regel erfolgt die Ausbringung der Düngung dabei zu zwei Terminen (1: vor Pflanzung; 2: Kopfdüngung nach 3 bis 4 Wochen Kulturzeit). Die relative Verteilung der Düngermengen und der Zeitpunkt der Kopfdüngung sind beim N-Expert-Verfahren kulturspezifisch vorgegeben. Zusätzlich wird mit der „SPAD-Methode“ ein Verfahren geprüft, bei dem die Pflanze als Indikator für den N-Versorgungsgrad dient. Dabei wird mit Hilfe eines SPAD-Chlorophyllmeters (Minolta SPAD 502 DL Meter) die Grünfärbung einer nach N-Expert gedüngten Variante („Düngefenster“) mit einer reduziert gedüngten Variante („SPAD“) verglichen. In dieser Variante werden die Pflanzen zur Kopfdüngung nur mit 60 % der durch das N-Expert-Verfahren empfohlenen N-Menge gedüngt. Eine zusätzliche N-Düngung erfolgt erst, wenn die Grünfärbung der Variante „SPAD“ unter 95 % des Wertes der Vergleichsvariante „N-Expert“ abfällt. Die Höhe der Nachdüngung orientiert sich dann an dem gemessen an einer Aufnahmekurve bis zur Ernte noch erwarteten N-Bedarf, ist also in der Regel niedriger als bei Düngung nach N-Expert. Mit angepassten Düngeverfahren (N-Expert bzw. SPAD) wurden in zurückliegenden Untersuchungen ohne Ertrags- und Qualitätseinbußen erhebliche Mengen an N-Dünger eingespart und N-Bilanzüberschüsse abgebaut (vgl. Armbruster et al., 2012).

Zu 2:

Die platzierte Düngung von Gemüse-Reihenkulturen ermöglicht es, die räumliche Verteilung der Düngergaben besser an das Aneignungsvermögen der Pflanzen anzupassen. So können etwa die Bereiche zwischen den Reihen, wo nur geringere Stickstoff-Mengen von den Pflanzen aufgenommen werden, niedriger gedüngt werden.

So genannte „stabilisierte“ Stickstoff-Dünger bewirken im Vergleich zu konventionellen Mineraldüngern eine verzögerte Umwandlung von der Ammonium- in die Nitrat-Form. Da Ammonium im Gegensatz zu Nitrat an den Sorptionskomplex des Bodens gebunden wird, ist es weniger auswaschungsgefährdet. Andererseits sind nicht alle Pflanzenarten gleichermaßen ammoniumverträglich (Wiesler, 1997). Ein Vergleich der beiden Stickstoff-Formen muss deshalb sowohl Umwelt- als auch Ertrags- und Qualitätsaspekte beinhalten.

Zu 4:

Durch den Anbau von Zwischenfrüchten bzw. Gemüse-/Getreidefruchtfolgen können die N-Bilanzüberschüsse und die Nitratauswaschung gegenüber einer reinen Gemüsefruchtfolge erheblich vermindert werden. Da diese Maßnahmen bei intensivem Gemüsebau mit einem Rückgang des Gemüseanteils in der Fruchtfolge und damit abnehmenden Deckungsbeiträgen pro Flächeneinheit verbunden sind, wird ihre Umsetzbarkeit in der Regel von der Möglichkeit der Ausweitung der für den Gemüsebau zur Verfügung stehenden berechnungsfähigen Fläche abhängen. Allerdings besteht auch ohne Flächenausweitung ein erhebliches Potential für die Integration von Zwischenfrüchten in die Gemüseproduktionsfläche. Darüber hinaus konnte in Versuchen gezeigt werden, dass die Ertragsfähigkeit und Ertragssicherheit von Gemüseflächen durch regelmäßige Integration von Zwischenfrüchten bzw. von Getreide erheblich gesteigert werden kann (vgl. Armbruster et al., 2012).

Zu 5:

Eine erfolgreiche Gemüseproduktion ist im Freiland nur mit der Beregnung der Kulturen möglich. Eine nicht bedarfsgerechte, d. h. zu hohe Beregnungsmenge führt zu Auswaschungsverlusten, was i. d. R. wiederum durch eine erhöhte Stickstoff-Düngung ausgeglichen wird. Ein verbessertes Bewässerungsmanagement führt zu gezielterem Wassereinsatz und daher auch zu einer Reduzierung der N-Verluste. In der Beregnungssteuerung kann die Optimierung des Zeitpunktes und der Beregnungsmenge verbessert werden. Dabei wird entweder die Bodenfeuchte mit Sensoren direkt gemessen und erst bei Erreichen eines Schwellenwertes eine dem Entwicklungsstadium und den Bodenverhältnissen angepasste Wassermenge gegeben oder das Bodenwasserdefizit wird aus Klima-, Pflanzen- und Bodendaten für jeden Tag berechnet und bei Unterschreiten eines Schwellenwertes durch die Beregnung ausgeglichen. Für letzteres Verfahren können auch Messwerte von nahegelegenen Klimastationen ohne eigene Messungen auf dem Feld herangezogen werden. Beispiele für Bewässerungssteuerungen nach der Wasserbilanzmethode sind etwa „agrowetter Beregnung“ des Deutschen Wetterdienstes oder die Geisenheimer Bewässerungssteuerung (Paschold et al., 2002; Hochschule Geisenheim, 2014). Die eingesparten Wassermengen bei Verwendung einer optimierten Bewässerungssteuerung gegenüber „konventioneller“ Bewässerung werden auf etwa 20 bis 30 % geschätzt.

Das **Management der Ernterückstände** sowie die **Einarbeitung von Stroh (Punkt 3)** waren als Maßnahme auf Betrieben nicht durchführbar. Sie wurden allerdings in einem **ergänzenden Exaktversuch** auf dem Versuchsfeld „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer untersucht. Aufgrund teilweise hoher N-Mengen in den Ernterückständen von Gemüse (v.a. Kohlarten), die über Winter stark auswaschungsgefährdet sind, deren Transfer auf die Folgefrüchte nicht gewährleistet ist und deren Einbeziehung in die Düngerbedarfsermittlung unbefriedigend ist besteht ein erhebliches Potential der Verminderung von N-Bilanzüberschüssen durch ein geeignetes Management dieser Ernterückstände. Neben Abfuhr der Ernterückstände und Verarbeitung in Biogasanlagen ist auch deren N-Immobilisierung durch Strohdüngung als Maßnahme denkbar.

2.3 Ertrags- und Qualitätsuntersuchungen

Für alle Gemüsesätze wurde der Ertrag in der Regel getrennt nach vermarktungsfähiger Ware und nicht vermarktungsfähiger Ware ermittelt und daraus der Anteil der vermarktungsfähigen Ware berechnet. Zusätzlich wurden die Ernterückstände, die zusammen mit der nicht vermarktungsfähigen Ware auf dem Feld verblieben, erfasst. Als Kriterium für Vermarktungsfähigkeit wurden die Vermarktungsnormen für Obst und Gemüse der Klasse I herangezogen (AID Infodienst, 2005). Die Ertragsermittlung für Gemüse erfolgte in den Kernbereichen der Parzellen auf Flächen von $>10 \text{ m}^2$. Von der aus dem Kernbereich entnommenen Marktware und den Ernterückständen wurde jeweils eine repräsentative Unterprobe (1 kg Frischgewicht) entnommen und bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Nach Ermittlung der TS-Gehalte wurde die Unterprobe fein vermahlen und der Stickstoffgehalt gemessen (CN-Analysator Vario Max). Aus der Trockenmasse (TM) der marktfähigen Ware und der Ernterückstände sowie deren N-Gehalten wurde die Stickstoffaufnahme berechnet.

2.4 Berechnung von Stickstoffsalden

Die N-Salden wurden für alle Versuchsvarianten wie folgend berechnet:

$$N\text{-Saldo [kg N ha}^{-1}] = N\text{-Düngung [kg N ha}^{-1}] - N\text{-Entzug [kg N ha}^{-1}]$$

Die N-Düngung entspricht dabei jeweils der N-Zufuhr mit dem Mineraldünger. Der N-Entzug entspricht dabei i. d. R. der N-Menge in der marktfähigen Ware. In der Variante mit Abfuhr der Erntereste vom Feld im Exaktversuch der LUFA Speyer ist zuzüglich die N-Menge in den Ernteresten beim N-Entzug anzurechnen.

2.5 Ermittlung der Nitratauswaschung

Zur Ermittlung der Nitratauswaschung wurden über die Winterperioden 2012/2013 sowie 2013 /2014 vier bzw. fünf Standorte mit Saugkerzen ausgerüstet. Die Saugkerzen (Bambach tensio-technik, 105 cm Länge, Keramikkerze groß „P80“) wurden in einem Winkel von 30° möglichst störungsfrei eingebaut (vgl. Abb. 2). Die Sammlung des in 70 cm Bodentiefe gewonnenen Sickerwassers erfolgte im Schaft der Saugkerze. Pro Standort wurden 2 bis 3 Versuchsvarianten mit jeweils 4 Saugkerzen ausgerüstet die einzeln beprobt und auf die Nitratkonzentration untersucht wurden. Die Beprobung erfolgte in etwa 2-wöchigem Abstand, wozu mit einer tragbaren Vakuumpumpe ein kontinuierlicher Unterdruck von ca. 500 hPa angelegt wurde.

Die Sickerwassermenge in 70 cm Bodentiefe wurde über eine vereinfachte Bodenwasserbilanz bzw. klimatische Wasserbilanz berechnet (vgl. Sturm et al., 2004). Dabei wurde die tägliche Versickerung aus der Differenz zwischen Wasser-Input (Niederschlag zzgl. eventueller Beregnung) und der Verdunstung unter Berücksichtigung der Veränderung im Bodenwasservorrat bis in 70 cm Bodentiefe berechnet. Die erforderlichen Niederschlags- und Verdunstungsdaten (FAO56 Grasverdunstung; vgl. Allen et al., 1998) lieferte das agrarmeteorologische Messnetz Rheinland-Pfalz (www.AM.rlp.de). Für die vegetationslose Winterperiode wurde die aktuelle Verdunstung mit 50 % der FAO56 Grasverdunstung angesetzt, bei Zeiten mit Gemüseanbau wurden die entwicklungspezifischen Pflanzenkoeffizienten (kc-Werte) der Geisenheimer Methode (Hochschule Geisenheim, 2014) verwendet, welche auch für die Beregnungssteuerung im Gemüsebau genutzt werden. Zur Ermittlung der für die Berechnung erforderlichen nutzbaren Feldkapazität wurden an 5 Standorten Stechzylinder (100 cm³) in 3 Bodentiefen entnommen (je nach Standort: Tiefe 1: 15-25 cm; Tiefe 2: 37-50 cm; Tiefe 3: 57-75 cm) und es wurde die Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung („pF-Kurve“) ermittelt. An allen mit Saugkerzen ausgerüsteten Standorten wurden die Korngrößenverteilung und der Humusgehalt in 3 Bodentiefen (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm) ermittelt. Diese Parameter wurden ebenfalls zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität herangezogen. Zu Plausibilitätsprüfung der Sickerwasserberechnungen waren an ausgewählten Standorten in 3 Bodentiefen (Tiefe der jeweiligen Stechzylinderbeprobungen) Matrix-

Potential-Sensoren (ECHO.MPS-2k) eingebaut, welche über Datenlogger ausgelesen wurden.

Aus der Nitratkonzentration im Saugkerzenwasser und der Sickerwassermenge des jeweiligen Beprobungszeitraumes wurden die Nitratausträge berechnet



Abb. 2: Ansicht der Messeinrichtung zur Ermittlung der Nitratauswaschung (links) mit 4 Saugkerzen und Datenlogger zur Erfassung der Bodenfeuchte (blaue Kisten). Rechts Detailaufnahme der Saugkerze mit geöffneter Schutzabdeckung.

2.6 Ermittlung der N₂O-Emissionen

Die Lachgas-Messungen auf den Praxisflächen wurden in Kooperation mit der AG Ruser (Universität Hohenheim) durchgeführt. Zwei Praxisflächen mit 3 Versuchsvarianten und vierfacher Wiederholung wurden jeweils über ein Jahr im wöchentlichen Turnus beprobt. Für die Messungen wurde die geschlossene Kammermethode nach Hutchinson und Mosier (1981) eingesetzt (vgl. Abb. 3). Die Gasprobenahme erfolgte durch die LUFA Speyer, die Berechnung der Gasflussraten (linearer Ansatz nach Flessa et al., 1995) erfolgte in Zusammenarbeit mit der AG Ruser. Die N₂O-Konzentrationen wurden gaschromatographisch (Hewlett Packard, ⁶³Ni ECD) ebenfalls an der Universität Hohenheim von der AG Ruser gemessen. Weitere Detailinformationen zu den Messungen und der Auswertung sind im Bericht der AG Ruser zu finden.



Abb. 3: Aufgesetzte Kammer mit fest eingebautem Bodenring (links) und Durchführung der Gasprobenahme mit evakuierten Glasvials (rechts).

2.7 Charakterisierung der standortsspezifischen N-Mineralisierung

Zur Erfassung der N-Mineralisation wurden auf 21 Standorten (20 aus der Vorderpfalz; 1 Standort bei Heidelberg) **Bodensäulen** (Durchmesser 20 cm; Höhe ca. 33 cm) aus dem Oberboden (0-30 cm) entnommen (vgl. Abb. 4). Die Standorte wurden im Hinblick auf Unterschiede im Substrat (Bodenart), Humusgehalt und Nutzung (v. a. Anteil Gemüse in der Fruchtfolge) ausgewählt. Auf 20 Standorten wurden jeweils 6 Bodensäulen entnommen und zum Versuchsfeld „Rinkenbergerhof“ der LUFA gebracht. Auf 15 Standorten wurden die Bodensäulen im Frühjahr 2013 (Zeitraum 27.03.2013-25.04.2013) entnommen; 5 Standorte wurden im Sommer beprobt (17.06.2013-23.07.2013).

Zusätzlich wurden im Exaktversuch des Versuchsfeldes Rinkenbergerhof in 5 Varianten insgesamt 20 Bodensäulen (4 Wiederholungen je Versuchsvariante) während des zweiten Gemüsesatzes im Jahr 2013 (Brokkoli) eingebaut. Bei „Gewinnung“ (bzw. Einbau im Falle der Säulen des Feldversuches auf dem Rinkenbergerhof) der Bodensäulen wurde eine Bodenprobe (0-30 cm) in unmittelbarer Umgebung der Säule entnommen und der N_{\min} -Wert ermittelt („Startwert“, getrennt für jede Bodensäule). Zur Charakterisierung des Standortes wurde an einer Mischprobe des Bodens der 6 Säulen pH-Wert, C_{org} , N_{ges} , Grundnährstoffe und die Körnung (3 Fraktionen) bestimmt.

Die insgesamt 120 Bodensäulen der 20 „Außenstandorte“ wurden zentral auf dem Versuchsfeld in den Boden eingebaut (Abb. 5). Zur Vermeidung von Sickerwasserverlusten waren alle Säulen mit einer Keramikplatte abgedeckt. Bodenfeuchte- und Bodentemperaturverlauf wurden mittels Datenlogger festgehalten. Die Säulen der Außenstandorte wurden am 14.11.2013 wieder ausgebaut und es wurde eine N_{\min} -Probe entnommen. Die 20 Bodensäulen im Exaktversuch der LUFA Speyer verblieben 2013 während der Kulturzeit von Brokkoli (17.06.2013-23.07.2013) in den Versuchspartellen. Nach der Ernte der Kultur Brokkoli wurde eine N_{\min} -Probe aus der Bodensäule entnommen. Aus dem N_{\min} -Wert zu Beginn der Mes-

sungen („Startwert“), dem N_{\min} -Wert zu Versuchsende und dem jeweiligen Einbauzeitraum wurde für alle Bodensäulen die N-Mineralisation pro Woche berechnet.



Abb. 4: Entnahme der Bodensäulen zur Charakterisierung der der standortsspezifischen N-Mineralisierung auf einem Gemüsestandort.



Abb. 5: Einbau und Abdeckung der Bodensäulen auf dem Versuchsfeld Rinkenbergerhof der LUFA Speyer (links). Wieder verfüllte Bodengrube nach Abschluss der Beprobung der ersten 15 Standorte (rechts) mit zwei zusätzlichen Bodensäulen zur Erfassung der Bodenfeuchte und Bodentemperatur im Vordergrund.

Ab Januar 2014 wurde an den Bodenproben der 21 Standorte zusätzlich die **anaerobe N-Mineralisierung** im Brutversuch nach Kandeler (1993) untersucht (vgl. auch Dersch et al. 2003). Die Bebrütung erfolgte an luftgetrockneten und an feldfrischen Proben. Die feldfrischen Bodenproben wurden direkt nach der Probenahme im Tiefkühlraum bei -4 °C eingelagert. An ausgewählten Proben erfolgte zusätzlich die Bebrütung im aeroben Brutversuch (vgl. Zöttl, 1960; Beck, 1983; Wölfelschneider 1994). Die Untersuchungen zur aeroben Bebrütung wurden an der Fachhochschule Bingen (Prof. Appel) durchgeführt.

3. Ergebnisse

3.1 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

3.1.1 Stickstoffbilanzen im Gebiet der Vorderpfalz und der kooperierenden Praxisbetriebe

In Abb. 6 sind die mittleren **Stickstoffbilanzüberschüsse vorderpfälzischer Betriebe** in Abhängigkeit vom Gemüseanteil in der Fruchtfolge in den Jahren 2008 bis 2013 dargestellt. Der Auswertung liegen jeweils die Bilanzen von 101 bis 118 Betrieben zugrunde. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigendem Gemüsebauanteil in den Betrieben die Stickstoffbilanzüberschüsse zunehmen. Diese sind im Mittel über die Betriebe und Jahre **ohne Abzug** weiterer unvermeidbarer Überschüsse für Betriebe mit einem Gemüseanteil unter 50 % kleiner als $60 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, während ab einem Gemüseanteil von 70 % Werte um bzw. über $90 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ erreicht werden. Allerdings ist die Schwankungsbreite der Jahreswerte in allen Klassen sehr hoch. So werden etwa bei einem Gemüseanteil unter 10 % jährliche N-Bilanzüberschüsse im Bereich von -41 bis $109 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ausgewiesen, bei einem Gemüseanteil von 90 bis 100 % liegen diese im Bereich von -7 bis $360 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

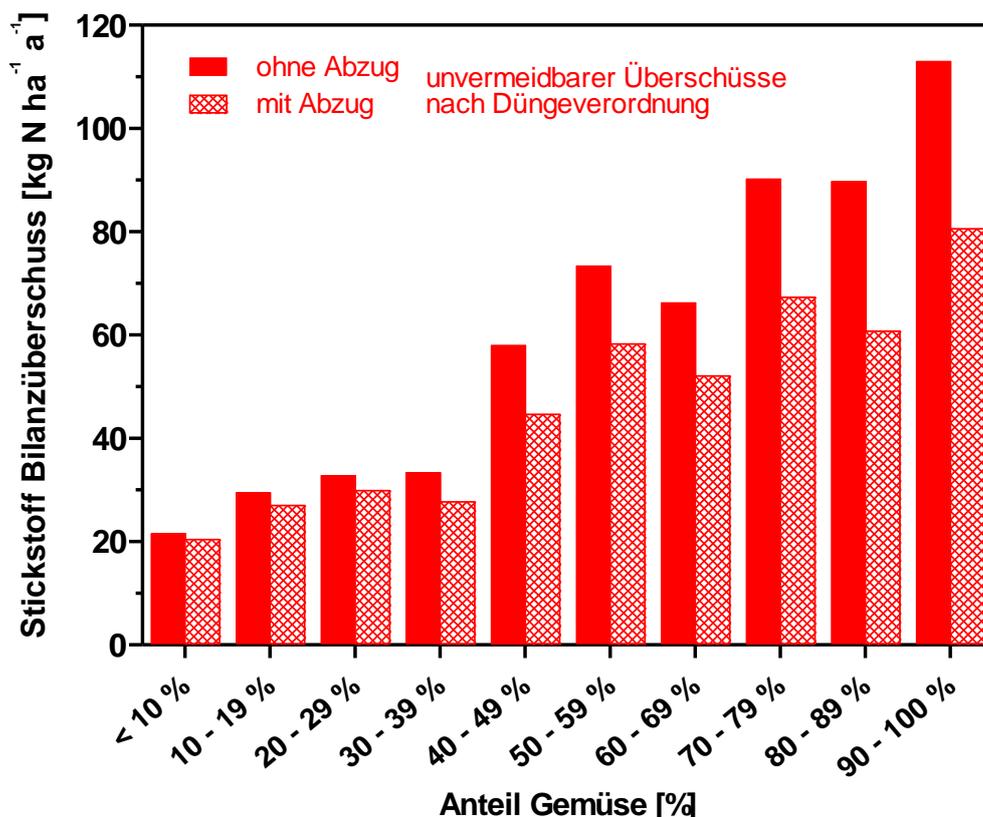


Abb. 6: N-Bilanzüberschüsse pfälzischer Gemüsebaubetriebe in Abhängigkeit vom Gemüseanteil in der Fruchtfolge in den Jahren 2008 – 2013 (Datenquelle: BOLAP GmbH Speyer).

Nach § 6, Abs. 2 der Düngeverordnung können für die letzte Kultur Gemüse vor Winter weitere unvermeidbare N-Überschüsse bei der Berechnung der N-Bilanzen nach Düngeverordnung in Abzug gebracht werden. Dies zeigt sich deutlich in der Zunahme der Differenz zwischen der Bilanz ohne und mit Abzug dieser Verluste mit zunehmendem Gemüseanteil. Der zulässige N-Bilanzüberschuss nach Düngeverordnung **nach Abzug** dieser weiteren unvermeidbaren Verluste beträgt derzeit im dreijährigen Mittel $60 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Abb. 6 zeigt, dass im Mittel der hier betrachteten Betriebe und Jahre (Zeitraum 2008 bis 2013) ab einem Gemüsebauanteil von etwa 70 % dieser Wert überschritten wird. Allerdings gibt es auch hier Betriebe, die diesen Wert deutlich unterschreiten. Dies zeigen die Minimalwerte der jährlichen N-Bilanzüberschüsse bei Gemüseanteilen über 70 % welche in den drei betrachteten Klassen im Bereich von -44 bis $-23 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen. Wiederum ist anzumerken, dass in allen betrachteten Klassen ein erheblicher Schwankungsbereich der N-Bilanzüberschüsse zu verzeichnen ist.

Der mittlere N-Bilanzüberschuss der untersuchten Betriebe (Abb. 7) weist im Zeitraum 2008-2013 eine rückläufige Tendenz auf. Während der mittlere N-Bilanzüberschuss ohne Abzug unvermeidbarer Überschüsse 2008 bei $89 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ lag, ist dieser im Mittel der beiden Jahre 2012 und 2013 auf etwa $62 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ zurückgegangen. Die mittleren Bilanzüberschüsse mit Abzug der unvermeidbaren Überschüsse nach Düngeverordnung liegen 16 bis $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ unterhalb der Werte ohne den Abzug.

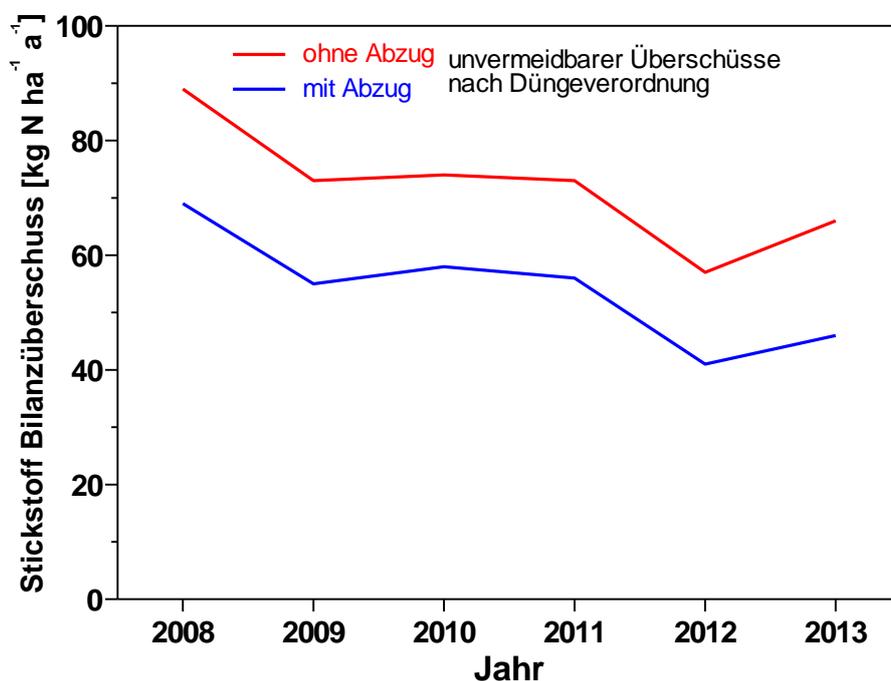


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der mittleren N-Bilanzen von Betrieben in der Vorderpfalz mit unterschiedlichen Gemüseanteilen in der Fruchtfolge in den Jahren 2008-2013 (Datenquelle: BOLAP GmbH Speyer).

Für die **fünf Praxisbetriebe** lagen Nährstoffbilanzen für zwei bis acht Düngejahre vor (Tab. 3). Die N-Bilanz in den Betrieben variierte ohne den Abzug weiterer unvermeidbarer Überschüsse nach DüV zwischen -23 bis $239 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Bei Abzug bzw. Anrechnung der

unvermeidbarer Überschüsse nach § 5, Abs. 3 DüV betrug die N-Bilanz der Betriebe zwischen -24 bis 209 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Für Betriebe mit mehr als drei vorliegenden Jahresbilanzen wurde auch das dreijährige Mittel der N-Bilanzen nach DüV berechnet (mit Abzug unvermeidbarer Überschüsse). Während der Betrieb 1 mit einem Gemüseanteil von 50 % den zulässigen N-Bilanzüberschuss nach DüV von 60 kg N ha⁻¹ a⁻¹ einhielt, überschritten die Betriebe 3 und 5, welche Gemüseanteile von 97 bzw. 72 % aufwiesen diesen Wert deutlich.

Tab. 3: N-Bilanzüberschüsse der 5 Praxisbetriebe.

	Anzahl Bilanzjahre	N-Bilanzüberschuss [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]			Anteil Gemüse (2013) [%]
		ohne Abzug weiterer unvermeidbarer Überschüsse	mit Abzug	Ø letzte 3 Jahre (2011 -2013) (mit Abzug)	
Betrieb 1	6	-23 bis 65	-24 bis 65	34	50
Betrieb 2	7	2 bis 123	-17 bis 117	69 ^b	46
Betrieb 3	8	52 bis 189	52 bis 142	111	97
Betrieb 4	2	33 bis 52	39 ^a	-	100
Betrieb 5	5	134 bis 239	107 bis 209	154	72

^a Wert nur für ein Bilanzjahr verfügbar

^b Jahre 2010, 2012 und 2013

Es sollte bei der weiteren Interpretation der vorliegenden Daten zu den Stickstoffbilanzen berücksichtigt werden, dass diese die bekannten Unsicherheiten im Hinblick auf die Ermittlung des N-Entzuges der Gemüsekulturen aufweisen. So werden bei der Berechnung der Bilanzen überwiegend eine vollständige Beerntung und der entsprechende N-Entzug aus Literaturdaten zugrunde gelegt, was für den praktischen Gemüsebau nur selten zutreffen dürfte.

3.1.2 Ergebnisse der Versuche auf Praxisbetrieben

3.1.2.1 Einfluss der Ermittlung des Stickstoffdüngerbedarfs

Im Zeitraum 2011 bis 2013 konnten im Rahmen des Projektes 10 Versuche zur Ermittlung des Stickstoffdüngerbedarfs bei den Kulturen Blumenkohl (2011), Brokkoli (2012, 2013) Bundzwiebel (2012, 2013) und Zucchini durchgeführt werden (vgl. Tab. 4). Diese wurden um 3 Versuchsergebnisse zu Untersuchungen auf Praxisbetrieben aus einem Vorgängerprojekt (Armbruster et al., 2012) zu Salat („Salanova“, 2008) und Brokkoli (2008, 2009) ergänzt. Dabei wurde in allen Versuchen die betriebsübliche Stickstoff-Düngung mit der Düngebedarfsermittlung nach N-Expert verglichen. In 7 Versuchen wurde zusätzlich die Düngebedarfsermittlung Hilfe eines SPAD-Chlorophyllmeters („SPAD“) untersucht.

In der Tab. 4 sind die in den verschiedenen Varianten pro Gemüsesatz applizierten N-Düngermengen zusammengestellt. Im Mittel aller Versuche wurden pro Gemüsesatz in der betriebsüblichen Variante 247 kg N ha⁻¹ gedüngt (140-305 kg N ha⁻¹). Bei konsequenter Anwendung des N-Expert-Verfahrens wurden diese auf 83 % der betriebsüblichen Stickstoffmenge abgesenkt (205 kg N ha⁻¹). Werden nur die Versuche in denen auch die Düngedarfsermittlung mittels Pflanzenanalyse („SPAD“) untersucht wurden berücksichtigt (n=7), so ergab sich eine Verminderung von betriebsüblicher Düngung zur Düngung nach N-Expert in einer ähnlichen Größenordnung (Verminderung auf 80 % der betriebsüblichen N-Düngermenge). Bei Verwendung der SPAD-Methode zur Düngedarfsermittlung konnten im Mittel über die 7 betrachteten Versuche nochmals 19 % der N-Düngermenge eingespart werden, so dass in dieser Variante nur 61 % der betriebsüblichen Stickstoffmenge ausgebracht wurden. Die eingesparten N-Düngermengen waren in den Versuchen auf Praxisbetrieben insgesamt etwas niedriger als in vorausgehenden Exaktversuchen auf zwei Versuchsbetrieben, wo bei Anwendung der Düngedarfsermittlung nach N-Expert und SPAD im Mittel von 7 Versuchsjahren N-Düngermengen von 64-69 (N-Expert) bzw. 57 % (SPAD) im Vergleich zu einer Düngung nach Faustzahlen festgestellt wurden (vgl. Armbruster et al., 2012). Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den Praxisbetrieben teilweise N_{min}-Werte zur Ableitung der Düngermengen herangezogen werden, während die Düngung nach „Faustzahlen“ der vorausgegangenen Exaktversuche keine N_{min}-Werte berücksichtigte. Dennoch zeigen die Versuche, dass durch eine verbesserte N-Düngedarfsermittlung gegenüber der betriebsüblichen Düngepraxis Einsparpotentiale in der Größenordnung von 20 bis 40 % bestehen.

Tab. 4: Gedüngte N-Mengen (pro Satz) in Abhängigkeit von der Methode der Düngedarfsermittlung auf Praxisbetrieben.

Kultur	Jahr	N Düngung [kg N ha ⁻¹]		
		Betriebsüblich	N-Expert	SPAD
• „Salanova“	2009	140	120	90
• Blumenkohl	2011	280	190	120
• Brokkoli	2008	230	160	120
	2009	245	220	170
	2012	280	250	
	2012	280	240	
	2013	285	235	
	2013	305	275	
• Bundzwiebel	2012	195	165	
	2013	195	165	
• Zucchini	2011	250	220	180
	2012	260	200	130
	2013	260	230	195
Mittel (n = 13) / rel. [%]		247 / 100	205 / 83	
Mittel (n = 7) / rel. [%]		238 / 100	191 / 80	144 / 61

Bei Pflanzgemüse ist der Anteil vermarktungsfähiger Pflanzen an der Gesamtpflanzenzahl der wichtigste Ertragsparameter. Um den Einfluss der Düngedarfsermittlung auf diesen Parameter aufzuzeigen wurde in Tab. 5 die betriebsübliche Düngedarfsermittlung als je-

weils 100 % gesetzt. Im Mittel über alle Versuche wurden sowohl bei Düngung nach N-Expert als auch bei Düngung nach SPAD mit 104 bzw. 103 % der vermarktungsfähigen Pflanzen der betriebsüblichen Variante vergleichbare Werte ermittelt.

Bei Düngebedarfsermittlung nach „N-Expert“ wurden nur in 4 der 13 untersuchten Gemüsesätze niedrigere Anteile (94-97 %) als bei betriebsüblicher Düngung ermittelt. Vor allem für die Kultur Brokkoli wurden mit bis zu 123 % in mehreren Versuchen auch deutlich höhere Anteile als bei betriebsüblicher Düngung ermittelt. Bei der Düngerbedarfsermittlung nach „SPAD“ wurde bei Blumenkohl im Jahr 2011 mit einem Wert von 85 % der betriebsüblichen Düngung eine sehr niedrige vermarktungsfähige Pflanzenzahl gemessen. Dies ist möglicherweise als Hinweis zu werten, dass bei knapp bemessener N-Düngung das Risiko verminderter Ausbeuten an marktfähiger Ware ansteigt. In der Regel wurden aber auch mit den niedrigeren N-Düngermengen der Variante „SPAD“ der betriebsüblichen Düngung vergleichbare Anteile vermarktungsfähiger Pflanzen gemessen. Zusammenfassend lässt sich schließen, dass trotz der Unterschiede in der ausgebrachten Düngermenge die Art der Düngerbedarfsermittlung praktisch keinen Einfluss auf den Anteil marktfähiger Ware hatte.

Tab. 5: Relative Anteile vermarktungsfähige Ware (pro Satz) in Abhängigkeit von der Methode der Düngerbedarfsermittlung. Die betriebsübliche Düngung wurde jeweils als 100 % gesetzt.

Kultur	Jahr	Vermarktungsfähige Ware (%, Betriebsüblich = 100 %)		
		Betriebsüblich	N-Expert	SPAD
• „Salanova“	2009	100	101	99
• Blumenkohl	2011	100	96	85
• Brokkoli	2008	100	123	123
	2009	100	115	112
	2012	100	113	
	2012	100	104	
	2013	100	96	
	2013	100	104	
• Bundzwiebel	2012	100	107	
	2013	100	97	
• Zucchini	2011	100	103	99
	2012	100	94	96
	2013	100	102	104
Mittel (n = 13)		100	104	
Mittel (n = 7)		100	105	103

Aus Sicht des Grundwasserschutzes sind möglichst niedrige N_{\min} -Restmengen im Boden zu Vegetationsende erwünscht, weil nicht genutzter Stickstoff in der vegetationsfreien Zeit stark auswaschungsgefährdet ist. Weiterhin sind die N_{\min} -Restmengen im Herbst auch ein Indikator für die bedarfsgerechte N-Düngung während der Vegetationsperiode. Eine Zusammenfassung der im Rahmen der Versuche zum Einfluss der Düngebedarfsermittlung ermittelten N_{\min} -Restmengen in 0-90 cm Bodentiefe gibt Tab. 6. Es zeigte sich, dass die prozentuale Verminderung in derselben Größenordnung wie die reduzierten Düngermengen liegt (vgl.

Tab. 4). In den einzelnen Versuchen bzw. Kulturen wurden in der Regel (n=10) niedrige, in 3 Fällen nahezu vergleichbare N_{\min} -Restmengen gemessen. Für die Düngungsvariante „SPAD“ zeigte sich im Vergleich zu „N-Expert“ eine weitere Verminderung der N_{\min} -Restmengen um weitere 10 %. Mit 102 kg N ha^{-1} wurde in den 7 untersuchten Gemüsesätzen mit Düngerbedarfsermittlung nach „SPAD“ nur etwa 65 % der N_{\min} -Restmenge bei betriebsüblicher Düngung (157 kg N ha^{-1}) gemessen. Diese relative Verminderung stimmt ebenfalls gut mit der um 61 % verminderten N-Düngermenge bei Düngung nach „SPAD“ überein (vgl. Tab. 4).

Tab. 6: N_{\min} -Mengen im Boden (0-90 cm) nach Kulturende in Abhängigkeit von der Methode der Düngerbedarfsermittlung.

Kultur	Jahr	N_{\min} 0–90 cm [kg N ha^{-1}]		
		Betriebsüblich	N-Expert	SPAD
• „Salanova“	2009	210	228	147
• Blumenkohl	2011	138	83	84
• Brokkoli	2008	325	224	274
	2009	76	50	47
	2012	333	253	
	2012	281	218	
	2013	84	44	
	2013	201	129	
• Bundzwiebel	2012	172	178	
	2013	110	112	
• Zucchini	2011	18	14	19
	2012	236	160	66
	2013	97	61	74
Mittel (n = 13) / rel. [%]		175 / 100	135 / 77	
Mittel (n = 7) / rel. [%]		157 / 100	117 / 75	102 / 65

Nährstoffsalden als Differenz zwischen Nährstoffeinträgen und Nährstoffentzügen sind ein wichtiger Indikator für die Nährstoffeffizienz, die Gefährdung der Umwelt und die Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit, insbesondere wenn sie über einen mehrjährigen Zeitraum betrachtet werden (Baumgärtel et al., 2007). In der vorliegenden Studie wurden die N-Salden pro Gemüsesatz berechnet (Tab. 7). Die höchsten mittleren N-Bilanzüberschüsse pro Gemüsesatz ergaben sich mit 167 kg N ha^{-1} erwartungsgemäß bei betriebsüblicher N-Düngung. Besonders hohe N-Bilanzüberschüsse wurden bei Blumenkohl und Brokkoli ($163\text{-}230 \text{ kg N ha}^{-1}$) aber auch bei Zucchini ($145\text{-}225 \text{ kg N ha}^{-1}$) ermittelt, während die N-Bilanzüberschüsse bei Salat („Salanova“) und Bundzwiebel unter 100 kg N ha^{-1} lagen. Bei Düngung nach „N-Expert“ konnten die Salden im Mittel um etwa 25 % auf 124 kg N ha^{-1} abgesenkt werden (n=13). Die Düngerbedarfsermittlung nach „SPAD“ wies mit 70 kg N ha^{-1} unter 50 % des N-Bilanzüberschusses der betriebsüblichen N-Düngung auf (162 kg N ha^{-1} bei n=7). Damit sind die durch die Anwendung optimierter Verfahren der Düngerbedarfsermittlung erzielten Absenkungen im N-Bilanzüberschuss höher als die absoluten und relativen Absenkungen der N-Düngermengen (vgl. Tab. 4).

Tab. 7: N-Bilanzüberschüsse (pro Satz) in Abhängigkeit von der Methode der Düngerbedarfsermittlung.

Kultur	Jahr	N-Bilanzüberschuss [kg N ha ⁻¹]		
		Betriebsüblich	N-Expert	SPAD
• "Salanova"	2009	77	58	36
• Blumenkohl	2011	190	103	47
• Brokkoli	2008	163	73	36
	2009	177	145	99
	2012	206	172	
	2012	190	149	
	2013	227	177	
	2013	230	199	
• Bundzwiebel	2012	93	53	
	2013	95	75	
• Zucchini	2011	145	116	79
	2012	156	99	28
	2013	225	197	164
Mittel (n = 13) / rel. [%]		167 / 100	124 / 74	
Mittel (n = 7) / rel. [%]		162 / 100	113 / 70	70 / 43

3.1.2.2 Einfluss von Düngerform und Düngungstechnik

Düngerform

Im Jahr 2013 konnte auf dem Betrieb 5 ein Versuch zur N-Düngerform durchgeführt werden (vgl. Tab. 8). Dabei wurde die N-Düngermenge zur Kopfdüngung mittels Ammonsulfatsalpetter (ASS), in welchem der Stickstoff überwiegend in der Ammoniumform (NH₄⁺-N) enthalten ist, sowie Kalkammonsapeter (KAS; Nitrat- und Ammoniumstickstoff zu gleichen Anteilen) ausgebracht. Der zur Pflanzung platziert bzw. breitflächig ausgebrachte N-Dünger war in allen Varianten identisch (KAS: 80 + 105 kg N ha⁻¹). Zusätzlich wurde für jede N-Düngerform die Höhe der Kopfdüngungsmenge variiert. Dabei wurde in der Variante „A“ nur der N_{min}-Sollwert von Brokkoli, abzüglich des N_{min}-Gehaltes im Boden für die Bemessung der N-Düngung berücksichtigt. Bei Variante „B“ wurde zusätzlich das N-Nachlieferungspotential des Bodens und bei Variante „C“ ergänzend die N-Nachlieferung aus den Ernterückständen der Vorkultur berücksichtigt. Folglich ergaben sich im Versuch dadurch 6 Versuchsvarianten mit N-Düngermengen von 245-305 kg N ha⁻¹, wobei jeweils 60-120 kg N ha⁻¹ in einer unterschiedlichen N-Form gedüngt wurden.

Tab. 8: Varianten und Stickstoffdüngermengen zum Versuch zur N-Düngerform im Jahr 2013 bei der Kultur Brokkoli (Betrieb 5).

Variante	Düngerform (Kopfdüngung)	Methode der Düngerbedarfsermittlung	N-Düngermenge [kg N ha ⁻¹]	
			Kopfdüngung	Gesamtmenge**
1	ASS	A: SW* – N _{min}	120	305
2		B: SW* – N _{min} – MIN _{pot} *	90	275
3		C: SW* – N _{min} – MIN _{pot} * – N _{mob} *	60	245
4	KAS	A: SW* – N _{min}	120	305
5		B: SW* – N _{min} – MIN _{pot} *	90	275
6		C: SW* – N _{min} – MIN _{pot} * – N _{mob} *	60	245

* SW: N_{min}-Sollwert; MIN_{pot}: N-Mineralisierungspotential des Bodens; N_{mob}: N-Nachlieferung aus Ernterückständen

** davon 80 kg N ha⁻¹ platziert zur Pflanzung + 105 kg N ha⁻¹ breitflächig nach Pflanzung jeweils als KAS

Trotz deutlich unterschiedlicher applizierter N-Düngermengen unterschieden sich die Anteile der vermarktungsfähigen Brokkoliköpfe mit 78-81 % der Gesamtpflanzen nur unwesentlich (Tab. 9). Ebenso war der marktfähige Frischmasseertrag mit Werten zwischen 193 und 197 dt FM ha⁻¹) nahezu identisch. Die N_{min}-Restmengen nach der Ernte spiegelten i. d. R. die unterschiedlichen N-Düngergaben wider. Im Mittel über die beiden Düngerformen konnte kein Unterschied in den N_{min}-Restmengen festgestellt werden (ASS 159, KAS 155 kg N ha⁻¹). Durch den für alle Varianten nahezu identischen N-Entzug über die Marktware (75-80 kg N ha⁻¹, nicht dargestellt) traten daher die deutlichsten Unterschiede beim N-Bilanzüberschuss zwischen den Varianten der unterschiedlichen Düngebedarfsermittlungen auf. Ein Unterschied zwischen den beiden Düngerformen konnte dagegen nicht festgestellt werden.

Tab. 9: Ertragserhebungen, N_{min}-Werte nach der Ernte (0-90 cm) sowie N-Bilanzüberschuss des Praxisversuches zur N-Düngerform bei unterschiedlicher Düngerbedarfsermittlung (DBE) in einem Brokkolibestand im Jahr 2013 (Betrieb 5).

Düngerform (Kopfdüngung)	DBE „A“ 305 kg N ha ⁻¹		DBE „B“ 275 kg N ha ⁻¹		DBE „C“ 245 kg N ha ⁻¹	
	ASS	KAS	ASS	KAS	ASS	KAS
Anteil marktfähiger Ware [%]	76	78	79	79	81	79
Marktertrag [dt FM ha ⁻¹]	194	193	194	197	194	193
N _{min} nach Ernte [kg N ha ⁻¹]	201	166	129	163	146	135
N-Bilanzüberschuss [kg N ha ⁻¹]	230	227	199	194	170	167

Düngungstechnik

Auf dem Praxisbetrieb 5 konnte im Jahr 2012 ein Versuch zur platzierten Düngung durchgeführt werden. Zusätzlich zur bereits in Kap. 3.1.2.1 erläuterten Düngerbedarfsermittlung konnte durch die Beschaffung einer neuen Pflanzmaschine im Jahr 2012 auch die Fragestellung der platzierten Düngung untersucht werden. Im Vergleich zur bisher eingesetzten Pflanztechnik verfügt diese Pflanzmaschine über einen Reihendüngerstreuer, der es ermöglicht während der Pflanzung granulierten Dünger gezielt an der Pflanzreihe zu applizieren. Untersucht wurden drei Varianten mit flächiger Düngerausbringung (oPI = ohne Platzierung) mit Stickstoffdüngermengen von 310, 280 bzw. 250 kg N ha⁻¹ (310oPI; 280oPI; 250oPI) und drei Varianten mit Platzierung (mPI) von jeweils 80 kg N ha⁻¹ bei Gesamt N-Düngermengen von 280, 250 bzw. 200 kg N ha⁻¹ (280mPI; 250mPI; 200mPI; vgl. Tab. 10).

Die Pflanzung des Versuchs erfolgte am 23.05.2012 mit einer Pflanzdichte von ca. vier Pflanzen pro Quadratmeter. Die Beerntung erfolgte an drei Ernteterminen im Zeitraum von 23.07. bis 30.07.2012.

Vor der Pflanzung erfolgte über alle Varianten hinweg, eine einheitliche Düngerapplikation in Höhe von 120 kg N ha⁻¹ in Form eines Mehrnährstoffdüngers. Bei Pflanzung erfolgte in den Varianten „280mPI“, „250mPI“ und „200mPI“ eine Reihendüngung mit einer Aufwandmenge von 80 kg N ha⁻¹. In den Varianten „310oPI“, „280oPI“ und „250oPI“ wurde am 24.05.2012 die zweite Stickstoffgabe in Höhe von 80 kg N ha⁻¹ mittels Pneumatikstreuer breitflächig ausgebracht. Die Kopfdüngung wurde am 19.06.2012 ebenfalls breitflächig mittels Pneumatikstreuer appliziert. Die unterschiedlichen Stickstoffgaben sowie die Gesamtstickstoffapplikation der untersuchten Varianten sind in Tab. 10 aufgeführt.

Tab. 10: Varianten und Stickstoffdüngermengen des Praxisversuches in einem Brokkolibestand im Jahr 2012 (Betrieb 5).

Variante	N-Düngermenge [kg N ha ⁻¹]				Gesamt-N- Applikation
	flächig vor Pflanzung	flächig zur Pflanzung	platziert zur Pflanzung	flächig zur Kopfdüngung	
310oPI	120	80		110	310
280oPI	120	80		80	280
250oPI	120	80		50	250
280mPI	120		80	80	280
250mPI	120		80	50	250
200mPI	120		80		200

Ab der sechsten Kulturwoche erfolgte in den Varianten „310oPI“, „280oPI“ und „250oPI“ wöchentlich eine Messung mit dem SPAD-Chlorophyllmeter. Die gemessenen Chlorophyllgehalte zeigten dabei keine deutlichen Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten auf (nicht dargestellt).

Den höchsten Ertrag an vermarktungsfähigen Brokkoliköpfen erzielte die Variante „280mPI“ mit 2,8 Pflanzen pro Quadratmeter, gefolgt von der Variante „250oPI“ mit 2,7 Pflanzen pro Quadratmeter (vgl. Tab. 11). Im Vergleich hierzu erreichte die Variante „200mPI“ mit 2,5 Pflanzen pro Quadratmeter und die Variante „280oPI“ mit 2,4 Pflanzen pro Quadratmeter eine etwas geringere Anzahl vermarktungsfähiger Köpfe. Die niedrigste Anzahl vermarktungsfähiger Köpfe wurde in den Varianten „310oPI“ und „250mPI“ mit jeweils 2,3 Pflanzen pro Quadratmeter ermittelt. Der Aufwuchs an vermarktungsfähiger Ware lag für die Varianten im Bereich von 133 bis 158 dt FM ha⁻¹. Betrachtet man die auf dem Feld zurückbleibende Menge an Ernterückständen der untersuchten Varianten, so fällt auf, dass die Variante „280mPI“ mit 368 dt FM ha⁻¹ die geringste Menge an Ernterückständen aufwies. Die Varianten „310oPI“, „250oPI“ und „200mPI“ hatten etwa 400 dt FM ha⁻¹ an Ernterückständen. Die höchste Menge an Ernterückständen wurden mit 428 dt FM ha⁻¹ in der Variante „280oPI“ bzw. 450 dt FM ha⁻¹ in der Variante „250oPI“ gemessen. Die ermittelten Aufwuchswerte variierten sehr stark zwischen den Versuchswiederholungen, wodurch eindeutige Aussagen zu den Effekten von Düngerapplikation und Düngermenge nicht möglich sind.

Tab. 11: Stickstoff-Düngermengen und Ertragserhebungen des Praxisversuches in einem Brokkolibestand im Jahr 2012 (Betrieb 5).

	Variante					
	„310oPI“	„280oPI“	„250oPI“	„280mPI“	„250mPI“	„200mPI“
Düngermenge [kg N ha ⁻¹]	310	280	250	280	250	200
Pflanzenzahl [m ⁻²]	3,7	3,8	3,7	3,9	3,7	3,8
Marktfähige Pflanzen [m ⁻²]	2,3	2,4	2,7	2,8	2,3	2,5
Marktware [dt FM ha ⁻¹]	133	144	156	158	133	138
Ernterückstände ^a [dt FM ha ⁻¹]	409	428	409	368	450	404
Gesamt-Aufwuchs [dt FM ha ⁻¹]	542	572	565	526	583	542
Einzelkopfgewicht [kg]	0,60	0,60	0,58	0,56	0,59	0,55
Ausbeute [%]	62	63	72	73	61	66
N-Entzug [kg N ha ⁻¹]	68	74	78	66	77	65
N-Bilanzüberschuss [kg N ha ⁻¹]	242	206	172	214	173	135

^a Ernterückstände inklusive nicht vermarktungsfähiger Ware

Das Einzelpflanzengewicht der untersuchten Varianten lag in einem engen Bereich zwischen 0,55 kg und 0,60 kg. Bedingt durch Schädlingsbefall lag die Ausbeute an vermarktungsfähigen Pflanzen mit 61 bis 73 % insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Bei vergleichbaren N-Entzügen aller Varianten (65-78 kg N ha⁻¹) hatte die Höhe der N-Düngung den deutlichsten Einfluss auf die Höhe des N-Bilanzüberschusses. Bei gleicher Höhe der N-Düngung (280 bzw. 250 kg N ha⁻¹) konnte kein Unterschied im N-Bilanzüberschuss zwischen platzierter („mPI“) und flächiger Ausbringung des N-Düngers („oPI“) festgestellt werden. Die einzig in platzierter Form untersuchte Variante mit einer geringeren N-Düngung in Höhe von 200 kg N ha⁻¹ („200mPI“) hatte den höher gedüngten Varianten mit flächiger Düngerausbringung vergleichbare Anteile an vermarktungsfähigen Pflanzen. Dies könnte als Hinweis dafür

gewertet werden, dass bei platzierter N-Düngung niedrigere N-Düngergaben ausreichend sind. Die flächige Ausbringung der geringsten N-Düngemenge wurde auf Wunsch des Betriebes allerdings nicht in das Versuchskonzept integriert, sodass der direkte Vergleich von Erträgen und N-Bilanzüberschüssen nicht möglich ist.

Zu Kulturbeginn waren 241 kg Stickstoff als N_{\min} im Boden bis 90 cm Tiefe gespeichert (vgl. Tab. 12). Die Bodenbeprobung zum Kopfdüngungstermin ergab im Mittel der untersuchten Varianten in 0 bis 60 cm Bodentiefe einen N_{\min} -Gehalt von 242 kg N ha⁻¹. Bei einer abschließenden N_{\min} -Beprobung vor Winter (09.10.2012, etwa 2 Monate nach der Ernte) wurden in 0 bis 90 cm Bodentiefe N_{\min} -Gehalte im Bereich von 253 bis 416 kg N ha⁻¹ gemessen.

Tab. 12: N_{\min} -Gehalte im Boden (in kg N ha⁻¹) im Versuch zur Düngerapplikation/ Düngernormermittlung bei Brokkoli 2012 (Betrieb 5).

10.05.2012 vor Pflanzung		14.06.2012 vor Kopfdüngung	09.10.2012 vor Winter					
			„310oPI“	„280oPI“	„250oPI“	„280mPI“	„250mPI“	„200mPI“
N_{\min}								
0-30 cm	122	143	265	221	153	182	217	122
30-60 cm	78	99	76	78	57	79	108	65
60-90 cm	41		47	51	43	58	91	90
0-90 cm	241	242	388	350	253	314	416	277

3.1.2.3 Einfluss der Beregnungssteuerung

Eine zu hohe Beregnungsmenge führt zu Auswaschungsverlusten, was i. d. R. wiederum durch eine erhöhte Stickstoff-Düngung ausgeglichen wird. Ein verbessertes Bewässerungsmanagement führt zu gezielterem Wassereinsatz und daher auch zu einer Reduzierung der N-Verluste. Die Untersuchungen zur Anwendung unterschiedlicher Bewässerungssteuerungsmethoden fanden in den Jahren 2011-2013 auf Praxisflächen des Betriebes 4 statt.

Die Versuche wurden jeweils als Streifenversuche mit vierfacher Wiederholung angelegt. Getestet wurden folgende zwei Varianten:

Variante 1: Betriebsübliche Beregnung: „Betriebsüblich“

Variante 2: Geisenheimer Bewässerungssteuerung: „GS“

Das Verfahren der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (Paschold et al., 2002; Hochschule Geisenheim, 2014) basiert auf der Ermittlung von klimatischen Wasserbilanzen (Niederschlag + Beregnung - Verdunstung), wobei die tägliche Verdunstung über kulturspezifische und vom Entwicklungsstadium abhängige Pflanzenkoeffizienten berechnet wird. Die Wasserbilanz wird über die gesamte Kulturzeit als Summenwert weitergeführt. Übersteigt die Bilanzsumme ein vorher in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und Entwicklungszustand der Kultur festgelegtes Defizit, wird eine Beregnung zum Ausgleich des Bilanzdefizits durchgeführt. Zu Kulturbeginn wird der Bodenwasserspeicher durch Beregnung auf die Feldkapazität aufgefüllt.

Im Zeitraum 2011-2013 konnten auf dem Praxisbetrieb 4 insgesamt 5 Versuche zur Beregnungssteuerung durchgeführt werden. Bei allen Versuchen war die Summe der Beregnungsmenge der beiden Varianten nahezu identisch (vgl. Tab. 13). Zeitpunkt und Höhe der einzelnen Beregnungsgabe differierten jedoch zwischen den Varianten.

Tab. 13: Beregnungsmengen sowie N-Düngergaben der Versuche zur Beregnungssteuerung im Zeitraum 2011-2013. Vergleich der betriebsüblichen Beregnung mit der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (GS).

Jahr / Kultur	Beregnungsmenge [mm]		N-Düngung [kg N ha ⁻¹]
	„Betriebsüblich“	„GS“	
2011 / Bundzwiebel	116	123	195
2011 / Staudensellerie	172	170	297
2012 / Staudensellerie	196	208	196
2013 / Bundzwiebel	128	128	195 / 165 ^a
2013 / Staudensellerie	182	161	281
Mittel / rel. [%]	159 / 100	158 / 99	233^a

^a 2013 bei Bundzwiebel zusätzlich reduzierte N-Düngung, bei Mittelwert nicht berücksichtigt

Im Mittel aller Versuche konnte bei Beregnung nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerung ein etwas höherer Marktertrag erzielt werden (Tab. 14). Der prozentuale Anteil vermark-

tungsfähiger Ware für die drei Versuche mit Staudensellerie war im Mittel dagegen identisch für beiden Varianten (nicht dargestellt).

Tab. 14: Marktfähige Frischmasseerträge (dt FM ha⁻¹) der Versuche zur Beregnungssteuerung im Zeitraum 2011-2013. Vergleich der betriebsüblichen Beregnung mit der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (GS).

Jahr / Kultur	Marktertrag [dt FM ha ⁻¹]		N-Düngung [kg N ha ⁻¹]
	„Betriebsüblich“	„GS“	
2011 / Bundzwiebel	546	571	195
2011 / Staudensellerie	972	993	297
2012 / Staudensellerie	1118	1274	196
2013 / Bundzwiebel	366 / 344 ^a	439 / 447 ^a	195 / 165 ^a
2013 / Staudensellerie	753	724	281
Mittel / rel. [%]	751 / 100	800 / 107	233^a

^a 2013 bei Bundzwiebel zusätzlich reduzierte N-Düngung, bei Mittelwert jeweils nicht berücksichtigt

Im Mittel der 5 Versuche zur Beregnungssteuerung wurden bei Beregnung nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerung („GS“) mit 163 kg N ha⁻¹ in 0-90 cm Bodentiefe tendenziell niedrigere N_{min}-Restmengen als bei betriebsüblicher Beregnung (172 kg N ha⁻¹) gemessen (Tab. 15). Die N-Bilanzüberschüsse beider Verfahren waren dagegen im Mittel über aller Beregnungsversuche nahezu identisch (Tab. 16).

Tab. 15: N_{min}-Mengen im Boden (0-90 cm) nach Kulturende (kg N ha⁻¹) der Versuche zur Beregnungssteuerung im Zeitraum 2011-2013. Vergleich der betriebsüblichen Beregnung mit der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (GS).

Jahr / Kultur	N _{min} 0-90 cm [kg N ha ⁻¹]		N-Düngung [kg N ha ⁻¹]
	„Betriebsüblich“	„GS“	
2011 / Bundzwiebel	161	209	195
2011 / Staudensellerie	210	173	297
2012 / Staudensellerie	240	220	196
2013 / Bundzwiebel	110 / 112 ^a	83 / 101 ^a	195 / 165 ^a
2013 / Staudensellerie	138	130	281
Mittel / rel. [%]	172 / 100	163 / 95	233^a

^a 2013 bei Bundzwiebel zusätzlich reduzierte N-Düngung, bei Mittelwert jeweils nicht berücksichtigt

Tab. 16: N-Bilanzüberschüsse (pro Satz) der Versuche zur Berechnungssteuerung im Zeitraum 2011-2013. Vergleich der betriebsüblichen Berechnung mit der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (GS).

Jahr / Kultur	N-Bilanzüberschuss [kg N ha ⁻¹]		N-Düngung [kg N ha ⁻¹]
	„Betriebsüblich“	„GS“	
2011 / Bundzwiebel	73	58	195
2011 / Staudensellerie	72	90	297
2012 / Staudensellerie	0	35	196
2013 / Bundzwiebel	95 / 75 ^a	87 / 59 ^a	195 / 165 ^a
2013 / Staudensellerie	156	136	281
Mittel / rel. [%]	79 / 100	81 / 102	233^a

^a 2013 bei Bundzwiebel zusätzlich reduzierte N-Düngung, bei Mittelwert jeweils nicht berücksichtigt

3.1.2.4 Einfluss der Gestaltung der Fruchtfolge

Der Anbau von Zwischenfrüchten bzw. die Etablierung von Gemüse-/Getreidefruchtfolgen sind in Gebieten mit intensivem Gemüseanbau als effektive Maßnahmen zur Verminderung der N-Bilanzüberschüsse und der Nitratauswaschung anzusehen. Da die Veränderung der Fruchtfolgegestaltung einen erheblichen Eingriff in den Betriebsablauf darstellt und die Betriebe darüber hinaus teilweise jährlich wechselnde Pachtflächen nutzen, war es daher im Rahmen des Projektes nicht durchführbar z. B. zwei unterschiedliche Fruchtfolgen über die gesamte Projektdauer versuchstechnisch zu begleiten. Folglich konnte im Rahmen des Projektes nur auf einem Betrieb der Effekt des Zwischenfruchtanbaues untersucht werden.

Die Untersuchungen zum Zwischenfruchtanbau fanden auf Praxisflächen des Betriebes 1 statt. Dieser Betrieb baut als Gemüsekulturen überwiegend Kürbis und Möhre an und hat mit 50 % (2013) einen vergleichsweise niedrigen Gemüseanteil (vgl. Tab. 1). In diesem Betrieb wurde der Einfluss von Zwischenfruchtanbau nach der Vorkultur Möhren untersucht werden. Da im Rahmen des Projektes keine weiteren Versuche zum Zwischenfruchtanbau durchgeführt werden konnten, wurde für die nachfolgenden Auswertungen 2 Versuchsergebnisse zum Zwischenfruchtanbau (ebenfalls auf Betrieben) aus einem Vorgängerprojekt ergänzt (vgl. Armbruster et al., 2012). In allen Versuchen wurden drei Versuchsvarianten in einer Blockanlage mit vierfacher Wiederholung untersucht. Dabei wurde jeweils eine Brachevariante („Brache“) mit zwei Varianten mit Sommerzwischenfruchtanbau verglichen (Abfuhr bzw. Verbleib der Biomasse). Als Sommerzwischenfrucht wurden Sudangras (*Sorghum sudanense*, 2009 bzw. 2011) und Zuckerhirse (*Sorghum bicolor*, 2009) untersucht. Im Jahr 2009 war die vorausgehende Gemüsevorfrucht Bundmöhren (vor Zuckerhirse) bzw. Staudensellerie (vor Sudangras). In der Variante „Verbleib“ wurde der Aufwuchs der Sommerzwischenfrucht jeweils im Herbst abgemulcht und verblieb auf der Fläche, während er bei der Variante „Abfuhr“ von der Fläche abgefahren wurde.

Nach den unterschiedlichen Gemüsevorfrüchten wurde in 0-90 cm ein N_{min}-Vorrat im Boden von 97 bis 107 kg ha⁻¹ gemessen (Tab. 17). Zum Zeitpunkt der Ertragerhebung der Zwischenfrucht betrug der N_{min}-Vorrat im Boden mit 14 bis 34 kg ha⁻¹ nur noch durchschnittlich

22 % der Ausgangswerte, während er in der unbegrünten Brachevariante im Mittel der Untersuchung über dem Wert der Ausgangssituation lag. Die Ergebnisse zeigen deutlich die Fähigkeit der Zwischenfrucht Zuckerhirse bzw. Sudangras den hohen Stickstoff-Vorrat aus Gemüsekulturen im Boden bis in große Bodentiefen auszuschöpfen und so potentiell für eine Folgekultur im System zu halten. Für die Zwischenfrucht wurde in den Versuchen eine N-Aufnahme zwischen 87 und 145 kg N ha⁻¹ ermittelt. Demgegenüber ist bei einer Brache ohne N-Aufnahme durch eine Vegetation vor allem über die nachfolgenden Wintermonate von einer Auswaschung von Stickstoff aus dem Boden auszugehen. Die Abnahme der N_{min}-Gehalte in der Brachevariante um etwa 40 kg N ha⁻¹ im Untersuchungszeitraum des Jahres 2011 kann z. B. auch als Folge einer Auswaschung von Stickstoff während des Spätsommers interpretiert werden.

Tab. 17: N_{min}-Gehalte in 0-90 cm Bodentiefe in Abhängigkeit vom Zwischenfruchtanbau sowie N-Aufnahme der jeweiligen Zwischenfrucht. Alle Angaben in kg N ha⁻¹.

Zwischenfrucht / Vorkultur	Jahr	N _{min} 0-90 cm			N-Aufnahme
		Vor Zwischenfrucht	Nach Zwischenfrucht	„Brache“	Zwischenfrucht
Zuckerhirse / Bundmöhren	2009	107	34	141	145
Sudangras / Staudensellerie	2009	104	20	139	136
Sudangras / Möhren	2011	97	14	55	87
Mittel / rel. [%]		103 / 100	23 / 22	112 / 109	123

In zwei der Versuche konnten im Folgejahr des Zwischenfruchtanbaus (2010 bzw. 2012) die Auswirkungen auf Ertrag und Stickstoffaufnahme der Folgekultur Kartoffel untersucht werden. Die Kartoffel wurde dabei in beiden Versuchen und in allen Varianten des vorausgegangenen Zwischenfruchtversuches („Verbleib“, „Abfuhr“ und „Brache“) einheitlich nach betriebsüblicher Praxis mit Stickstoff gedüngt.

Als Ergebnis konnte im Mittel beider Versuche für die vermarktungsfähige Ware der Kartoffel ein höherer Wert in der Variante mit Zwischenfruchtanbau und bei Verbleib der Biomasse ermittelt werden (Tab. 18). Als Erklärung lassen sich neben der durch die Zwischenfrucht gebundenen N-Menge (ca. 90-140 kg N ha⁻¹; vgl. Tab. 17) auch positive Effekte der verbliebenen Biomasse auf die Bodenstruktur des sandigen Standortes anführen. Bei Abfuhr der Biomasse der Zwischenfrucht des Vorjahres („Abfuhr“) und in der Brachevariante („Brache“) wurden dagegen im Mittel der beiden Versuche niedrigere Mengen an marktfähiger Ware ermittelt.

Tab. 18: Marktfähige Kartoffelerträge in Abhängigkeit vom Zwischenfruchtanbau mit Zuckerhirse (2010) sowie Sudangras (2012).

Zwischenfrucht im Vorjahr	Jahr	Marktfähiger Kartoffelertrag [dt ha ⁻¹]		
		Verbleib Zwischenfrucht	Abfuhr Zwischenfrucht	„Brache“
Zuckerhirse	2010	545	396	353
Sudangras	2012	327	332	310
Mittel / rel. [%]		436 / 100	364 / 83	332 / 76

Entsprechend der höheren Markterträge sowie höherer N-Aufnahme von Kartoffel bei Verbleib der Biomasse der Zwischenfrucht im Versuch des Jahres 2010 wurden nach der Ernte hier die niedrigsten N_{min}-Werte im Boden in 0 bis 90 cm Bodentiefe gemessen (Tab. 19). Bei Abfuhr der Biomasse und in der Brachevariante waren diese dagegen deutlich höher. Bei den ähnlichen Kartoffelerträgen der unterschiedlichen Varianten im Versuch des Jahres 2012 wurde dagegen kaum eine Differenzierung in den N_{min}-Gehalten nach der Ernte ermittelt.

Tab. 19: N_{min}-Gehalte in 0-90 cm Bodentiefe (in kg N ha⁻¹) nach Kartoffeln in Abhängigkeit von der Vorfrucht.

Zwischenfrucht im Vorjahr	Jahr	N _{min} 0-90 cm [kg N ha ⁻¹]		
		Verbleib Zwischenfrucht	Abfuhr Zwischenfrucht	„Brache“
Zuckerhirse	2010	79	108	126
Sudangras	2012	88	71	79
Mittel / rel. [%]		84 / 100	90 / 107	103 / 123

3.1.3 Nitratkonzentrationen und Nitratausträge ausgewählter Praxisversuche

Im Zeitraum Dezember 2012 bis April 2014 konnte bei insgesamt 9 Versuchen die Nitratkonzentration im Sickerwasser gemessen werden (Tab. 20). Dabei wurde überwiegend die potentielle Auswaschungsperiode über Winter, welche den versuchstechnisch begleiteten Kulturen folgte, beobachtet. Die Untersuchungsdauer betrug i. d. R. zwischen 3 und 7 Monaten. Beim Versuch Nr. 9 konnte das Sickerwasser nur über einen Zeitraum von 6 Wochen beobachtet werden, beim Versuch Nr. 5 wurde das Sickerwasser dagegen über einen Zeitraum von fast einem Jahr untersucht.

Tab. 20: Kulturen und Versuchsvarianten, die mit Saugkerzen zur Messung der Nitratkonzentration im Sickerwasser (70 cm Tiefe) ausgerüstet wurden.

Nr.	Kultur	Messzeitraum	Versuchsvarianten
1	Bundzwiebel	20.12.2012	- Betriebsübliche N-Düngung
		-	- Reduzierte Betriebsübliche N-Düngung
		20.03.2013	
2	Sommerzwischenfrucht	20.12.2012	- Verbleib Zwischenfrucht
		-	- Abfuhr Zwischenfrucht
		08.04.2013	- Brache
3	Zucchini	20.12.2012	- Betriebsübliche N-Düngung
		-	- Düngung nach N-Expert
		25.06.2013	- N-Düngung nach SPAD
4	Brokkoli	07.01.2013	- N-Düngung nach Faustzahlen
		-	- Betriebsübliche N-Düngung
		04.04.2013	- N-Düngung nach N-Expert
5	Rhabarber	17.05.2013	- Tropfbewässerung
		-	- Beregnung mit Rundregnern
		28.04.2014	
6	Staudensellerie	02.07.2013	- Betriebsübliche Beregnung
		-	- Beregnung nach Geisenheimer
		09.10.2013	Bewässerungssteuerung
7	Bundzwiebel	02.07.2013	- Betriebsübliche Beregnung
		-	- Beregnung nach Geisenheimer
		28.02.2014	Bewässerungssteuerung
8	Zucchini	05.09.2013	- Betriebsübliche N-Düngung
		-	- N-Düngung nach N-Expert
		28.04.2014	- N-Düngung nach SPAD
9	Brokkoli	10.09.2013	N-Düngung nach N-Expert; 3 verschiedene Annahmen der N-Mineralisierung
		-	
		30.10.2013	

In den Versuchen Nr. 1, 3, 4, 7, 8 und 9 wurden unterschiedliche Varianten der N-Düngerbedarfsermittlungen untersucht. Die Versuche Nr. 5, 6 und 7 wurden zur Untersuchung der Beregnungssteuerung bzw. -technik durchgeführt, wobei der Versuch Nr. 7 zusätzlich Varianten der N-Düngebedarfsermittlung enthielt. Im Versuch Nr. 2 wurde das Sickerwasser dagegen bei verschiedenen Varianten des Zwischenfruchtanbaus untersucht.

3.1.3.1 Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser

Nitratkonzentrationen bei differenzierter N-Düngung

Die Abb. 8 bis 12 zeigen die Nitratkonzentration im Saugkerzenwasser der Versuche Nr. 1, 3, 4, 8 und 9. Die Ergebnisse von Versuch Nr. 7 mit zusätzlichen Varianten der Beregnungssteuerung sind bei der Erläuterung der Ergebnisse zur Beregnungssteuerung dargestellt (vgl. Abb. 16). Die Nitratkonzentration im Sickerwasser sind mit Werten von i. d. R. über 200 bis zu Spitzenwerten von fast 1000 mg L⁻¹ Nitrat als hoch einzustufen und weisen auf die Problematik der vergleichsweise hohen N-Bilanzüberschüsse im Gemüsebau hin. Nur in einem Versuch wurde zu einem Termin eine Nitratkonzentration im Bereich von 50 mg L⁻¹ Nitrat im Saugkerzenwasser gemessen (vgl. Abb. 11).

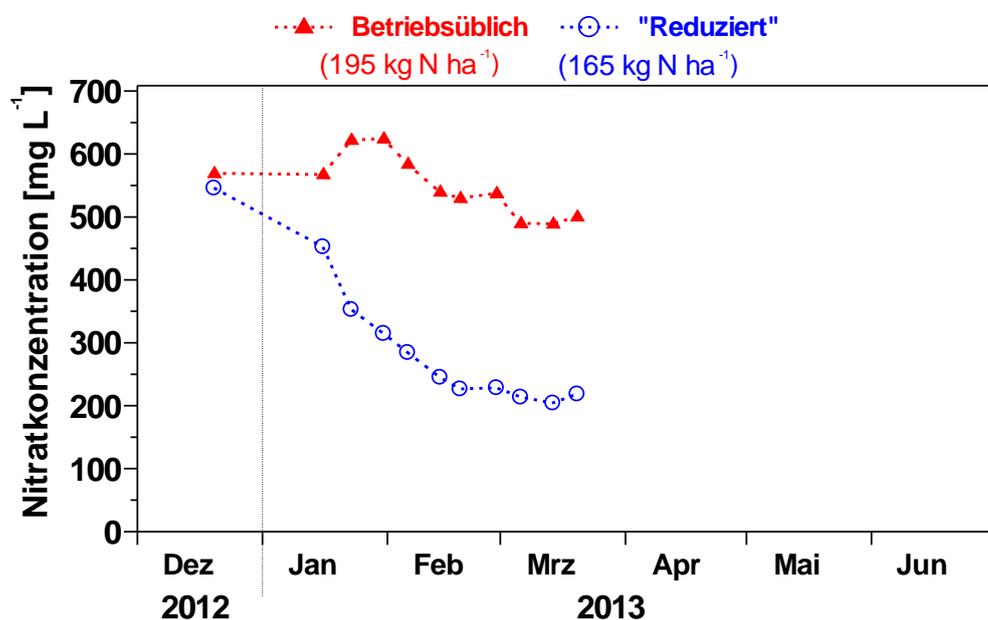


Abb. 8: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum Dezember 2012 bis März 2013 nach differenziert stickstoffgedüngter Bundzwiebelkultur im Herbst 2012 (Anbauzeitraum 16.07.2012-05.11.2012).

Bei allen Versuchen konnte eine Abhängigkeit der Nitratkonzentrationen von der N-Düngungshöhe festgestellt werden. Die Differenzierung zu niedrigeren Nitratkonzentrationen bei niedrigerer N-Düngungshöhe zeigte sich in einigen Versuchen erwartungsgemäß meist erst mit zeitlicher Verzögerung im Saugkerzenwasser (vgl. Abb. 9 und Abb. 10). Zu Beginn der Untersuchungen waren die Konzentrationen teilweise invers zur Düngungshöhe (Abb. 11), teils auch nur wenig differenziert (z. B. Abb. 10). Neben einer zeitlichen Verzögerung aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeiten der Sickerwasserbewegung auf den Standorten ist zu Beginn der Untersuchungen auch noch mit Einflüssen des Einbaus der Saugkerzen auf die Nitratkonzentrationen zu rechnen.

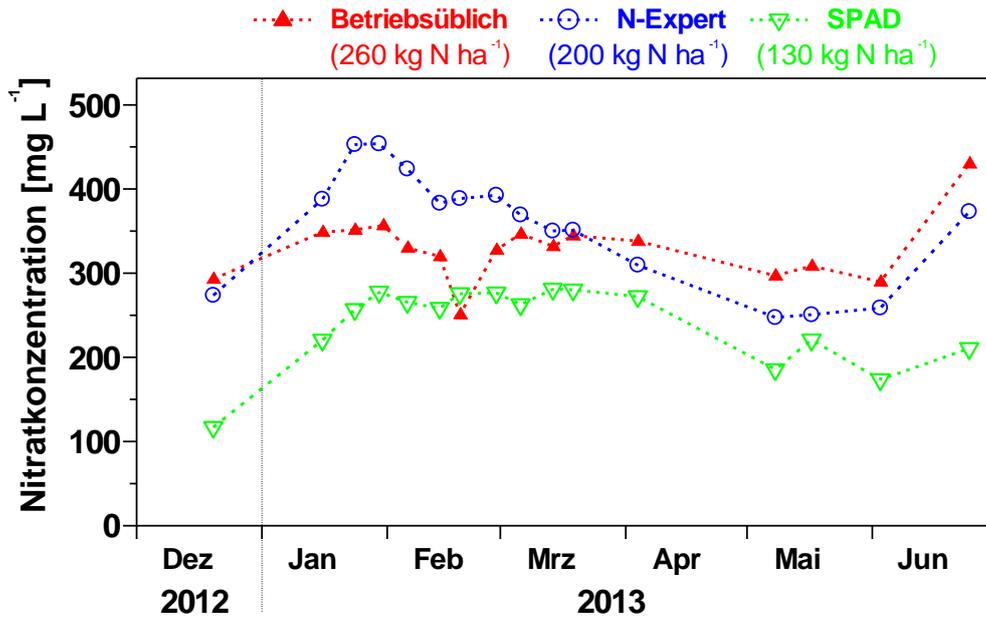


Abb. 9: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum Dezember 2012 bis Juni 2013 nach differenziert stickstoffgedüngter Zucchinikultur 2012 (Anbauzeitraum 02.07.2012-13.09.2012).

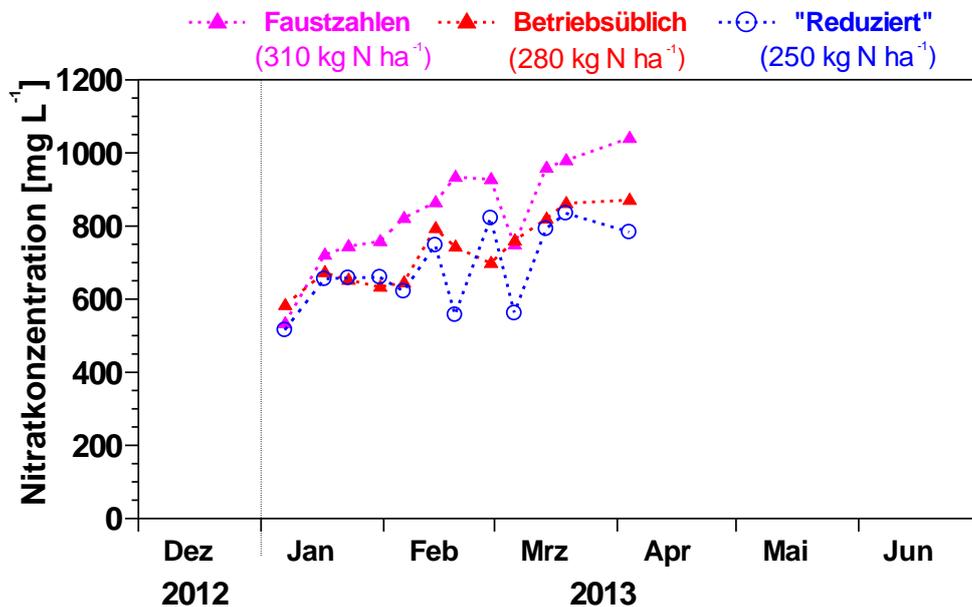


Abb. 10: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum Januar 2013 bis April 2013 nach differenziert stickstoffgedüngter Brokkolikultur im Herbst 2012 (Anbauzeitraum 23.05.2012-23.07.2012).

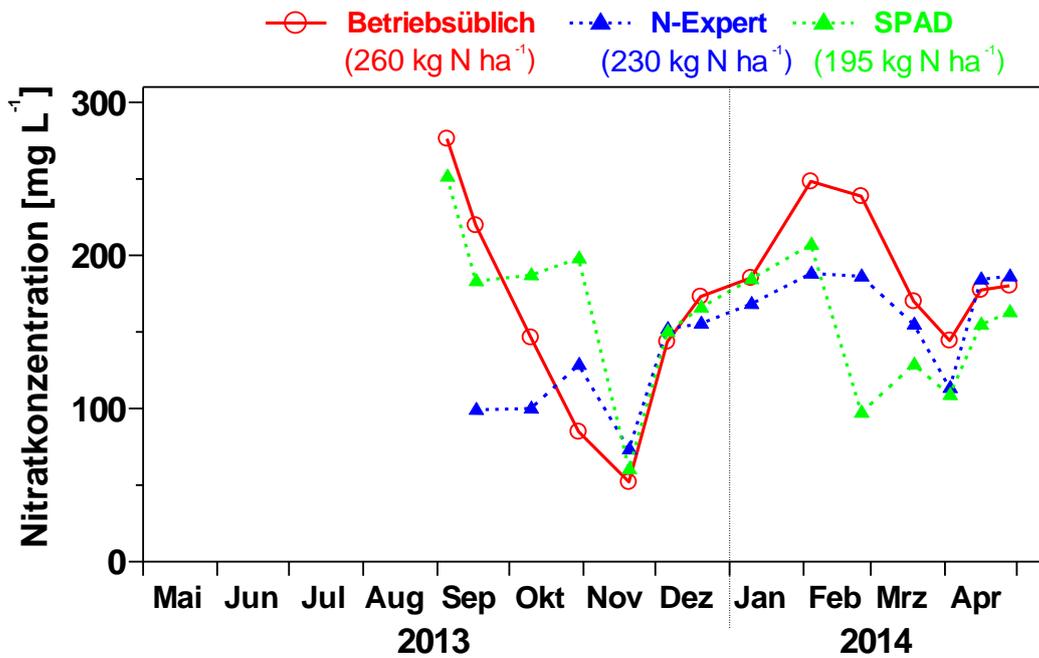


Abb. 11: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum September 2013 bis April 2014 nach differenziert stickstoffgedüngter Zucchinikultur 2013 (Anbauzeitraum 13.07.2013-27.09.2013).

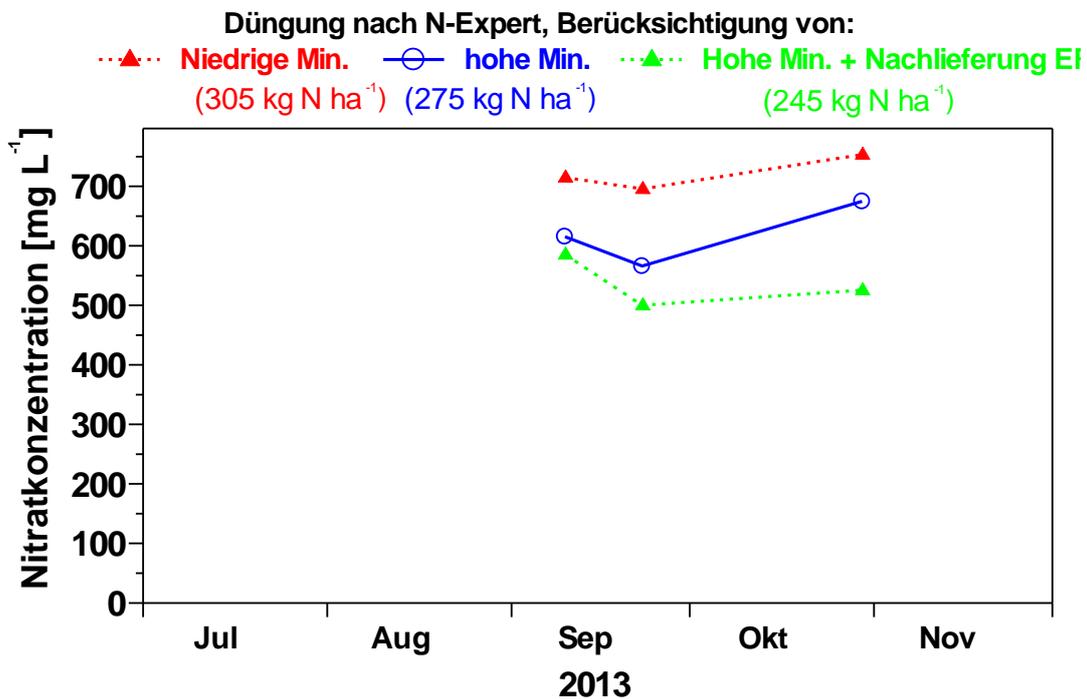


Abb. 12: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum September 2013 bis November 2013 bei einer differenziert stickstoffgedüngter Brokkolikultur 2013 (Anbauzeitraum 23.07.2013-22.10.2013).

Nitratkonzentrationen bei unterschiedlicher Beregnungssteuerung bzw. Bewässerungstechnik

Im Zeitraum Mai bis April 2014 konnten die Nitratkonzentrationen während der mehrjährigen Kultur Rhabarber untersucht werden (Abb. 13). Dabei konnte die bislang im Betrieb eingesetzte Beregnungstechnik mit Rundregnern mit der neu beschafften Tropfbewässerung verglichen werden. Die im Jahr 2013 ausgebrachten Wassermengen unterschieden sich deutlich zwischen den Varianten („Rundregner“: 256 mm; „Tropfbewässerung“: 120 mm). Die N-Düngung war dagegen für beide Varianten identisch (Januar 2013: 162 kg N ha⁻¹; Januar 2014: 158 kg N ha⁻¹). Der zeitliche Verlauf der Beregnungsgaben konnte vom Betrieb nicht zur Verfügung gestellt bzw. aufgezeichnet werden und die im Mai / Juni 2013 bei Rhabarber vorgesehene Ertragshebung konnte aus betriebsorganisatorischen Gründen nicht durchgeführt werden.

Die Nitratkonzentrationen der beiden Varianten unterschieden sich trotz deutlicher Unterschiede in der Höhe der Bewässerungssumme nur unwesentlich. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Verdunstungsverluste bei Rundregnern erheblich höher sind als bei Tropfbewässerung und sich folglich die Sickerwassermengen nur unwesentlich unterscheiden. Die parallel durchgeführten Messungen zur Bodenfeuchte bzw. dem Matrixpotential (Abb. 14) zeichnen tendenziell die geringeren Bewässerungsmengen bei Tropfbewässerung durch höhere (negative) Matrixpotentiale im Zeitraum Juli bis September 2013 nach. Allerdings sind die Unterschiede in 75 cm Bodentiefe, wo auch die Saugkerzen installiert waren nur wenig ausgeprägt.

Während zu Beginn der Untersuchungen zum Zeitpunkt der vorgesehenen Ernte in beiden Varianten Konzentrationen vom 100-200 mg L⁻¹ Nitrat im Saugkerzenwasser gemessen wurden gehen diese offensichtlich aufgrund des weiterwachsenden Rhabarberbestandes bis zum Herbst 2013 hin zurück um über den Winter hinweg wieder leicht anzusteigen. Der Anstieg im Frühjahr 2014 dürfte wiederum schon auf die im Januar 2014 erfolgte N-Düngung zurückzuführen sein. Aufgrund der vorliegenden Daten ist insgesamt nur von geringen Unterschieden im N-Austrag der beiden Varianten auszugehen.

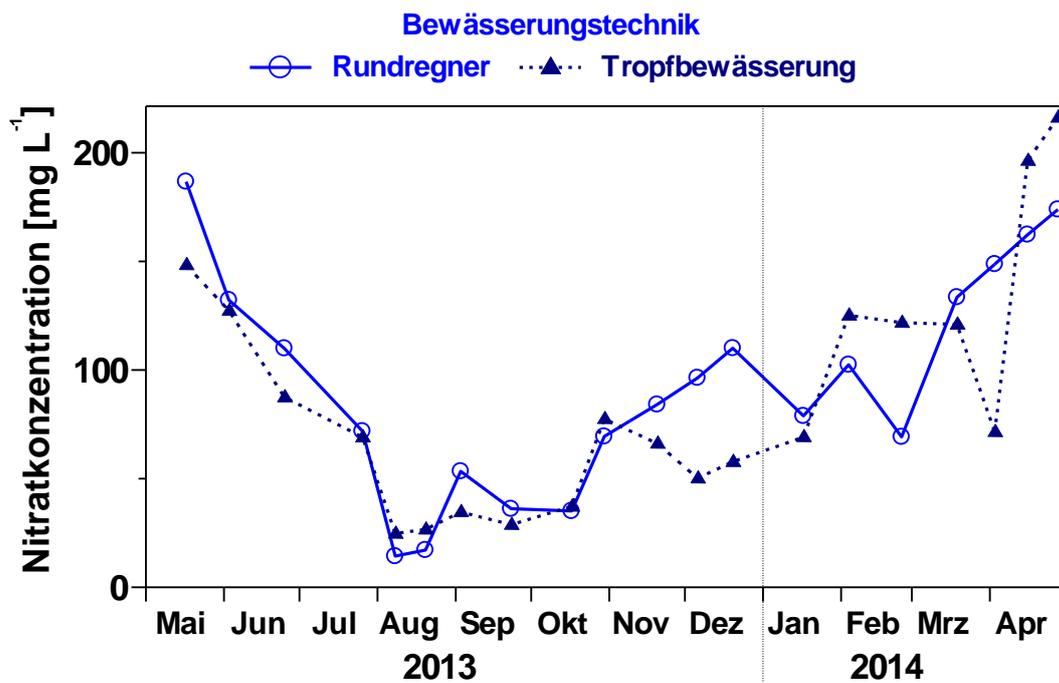


Abb. 13: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum Mai 2013 bis April 2014 bei unterschiedlicher Beregnungstechnik in Rhabarber.

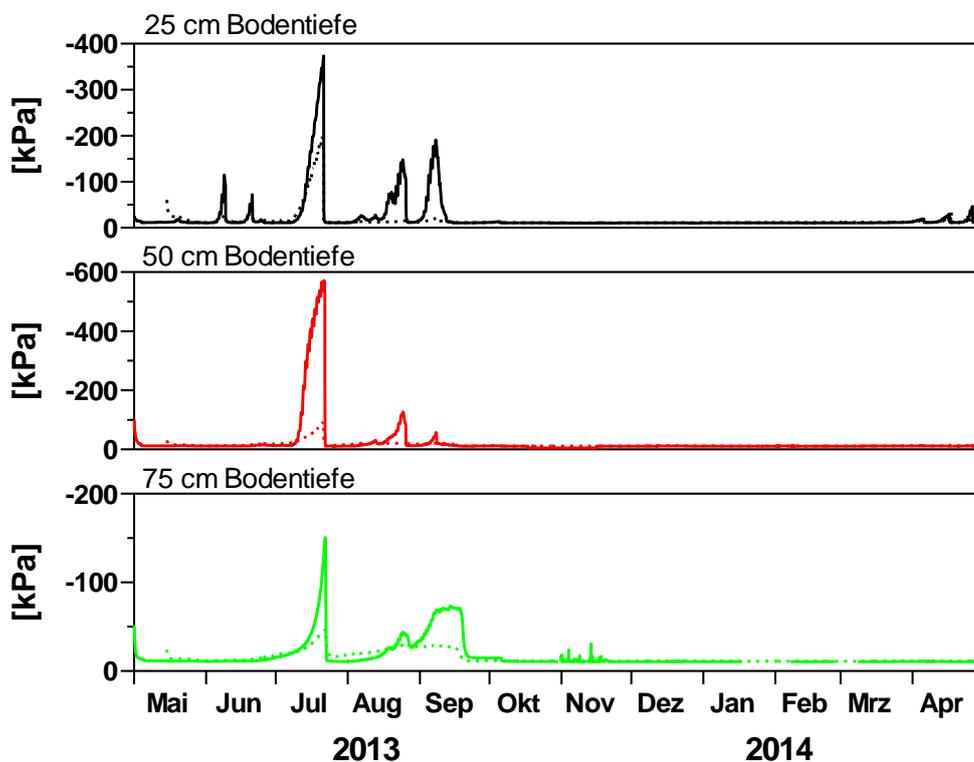


Abb. 14: Verlauf der Matrixpotentiale in verschiedenen Bodentiefen im Zeitraum Mai 2013 bis April 2014 bei unterschiedlicher Beregnungstechnik in Rhabarber. Gestrichelte Linien: Rundregner, durchgezogene Linie: Tropfbewässerung.

In zwei Versuchen konnte der Einfluss unterschiedlicher Bewässerungssteuerung (Betriebsüblich vs. Geisenheimer Bewässerungssteuerung) auf die Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser untersucht werden (Abb. 15 und 16). In einem Versuch wurde zusätzlich noch die Höhe der N-Düngung variiert (Abb. 16). Die Bewässerungsmengen, die Gemüseerträge und die N-Bilanzüberschüsse unterschieden sich in den Varianten der Bewässerungssteuerung kaum (vgl. Kap. 3.1.2). Daher ist es sehr ungewöhnlich, dass in beiden Beregnungsversuchen bei Steuerung der Bewässerung nach dem Geisenheimer Modell deutlich niedrigere Konzentrationen (i. d. R. 100-200 mg L⁻¹ Nitrat) als bei betriebsüblicher Beregnung (i. d. R. 400-700 mg L⁻¹ Nitrat) gemessen wurden (Abb. 15). Aus versuchstechnischen Gründen konnte die Beregnung auf den Praxisflächen nur für einen kompletten „Regnerstrang“ variiert werden und es konnten daher keine echten Wiederholungen untersucht werden. Um den Betriebsablauf nicht zu stark zu stören konnten die Sickerwasseruntersuchungen darüber hinaus nur auf einer räumlich begrenzten Fläche (4 Saugkerzen) durchgeführt werden. Daher ist davon auszugehen, dass der Hauptgrund für die gefundenen Konzentrationsunterschiede überwiegend durch kleinräumige standörtliche Unterschiede begründet ist. Zusätzlich spricht für diese Erklärung, dass im Versuch mit ergänzend zur Beregnungssteuerung untersuchten Einfluss differenzierter N-Düngung der „scheinbare“ Einfluss der Beregnung überwiegt (Abb. 16). Im Gegensatz zu den vorausgehend erläuterten Versuchen konnte in diesem Versuch auch kein Einfluss der N-Düngung auf die Nitratkonzentrationen gefunden werden. Die Konzentrationsverläufe sind trotz unterschiedlicher N-Düngungshöhe nahezu identisch, bei betriebsüblicher Beregnung wies sogar die niedriger gedüngte Variante die tendenziell höheren Konzentrationen auf.

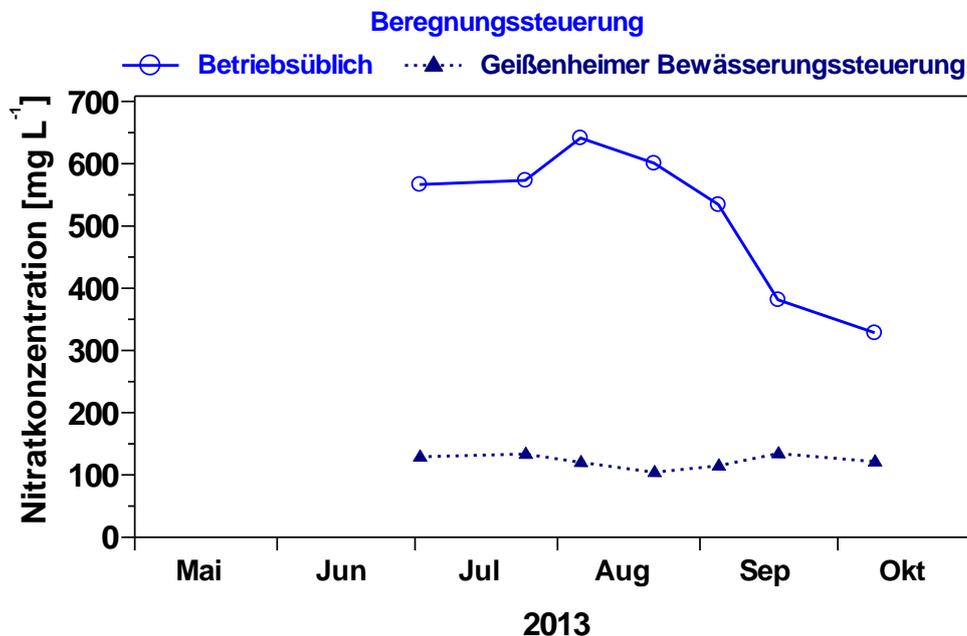


Abb. 15: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum Juni 2013 bis Oktober 2013 bei unterschiedlicher Bewässerungssteuerung in Staudensellerie (Anbauzeitraum 17.05.2013-09.08.2013).

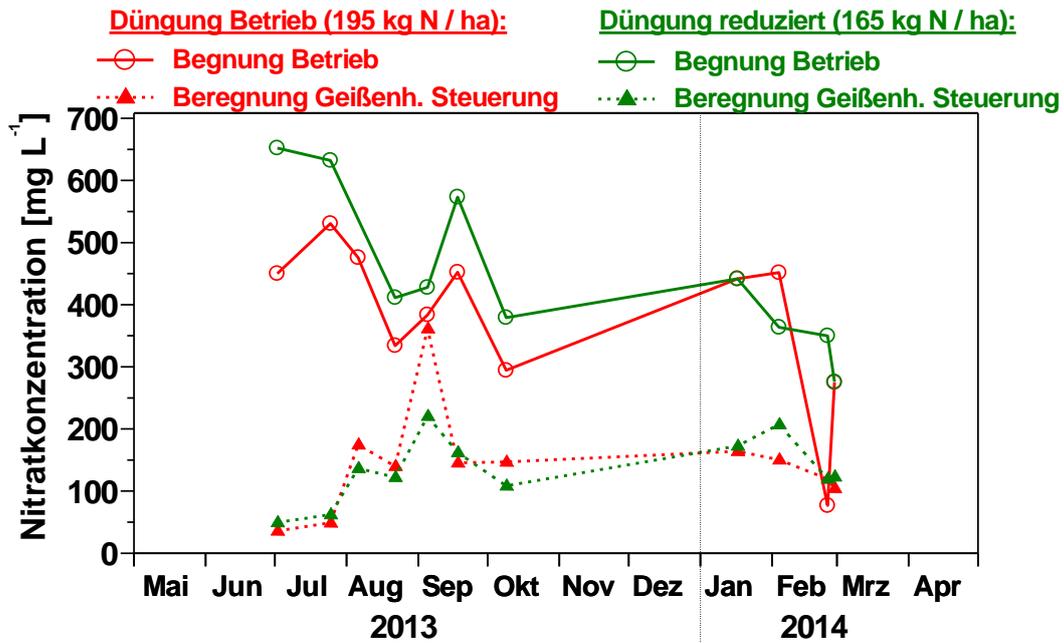


Abb. 16 Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum Juni 2013 bis Februar 2014 bei unterschiedlicher Beregnungssteuerung und Düngung in Bundzwiebel (Anbauzeitraum 09.05.2013-06.08.2013).

Nachwirkung des Zwischenfruchtanbaus auf die Nitratkonzentrationen

Auf Betrieb Nr. 1 konnte die Nachwirkung des Zwischenfruchtanbaus im Jahr 2011 (vgl. Kap. 3.1.2.4) auf die Nitratkonzentrationen untersucht werden. Dazu wurde auf den im Jahr 2011 angelegten Varianten mit Verbleib bzw. Abfuhr der Zwischenfrucht sowie der gleichzeitig untersuchten Brachevariante ab Dezember 2012 das Sickerwasser untersucht (vgl. Abb. 17). Ab Ende Januar 2013 wurden keine deutlichen Unterschiede im Konzentrationsverlauf zwischen den Varianten festgestellt. Die ersten beiden Untersuchungswerte sind u. U. noch durch den Einbau der Saugkerzen beeinflusst, sodass für alle Varianten von einem Rückgang der Konzentrationswerte über Winter von ca. 200 mg L⁻¹ Nitrat Ende Januar 2012 auf ca. 100 mg L⁻¹ Nitrat Ende April 2012 auszugehen ist.

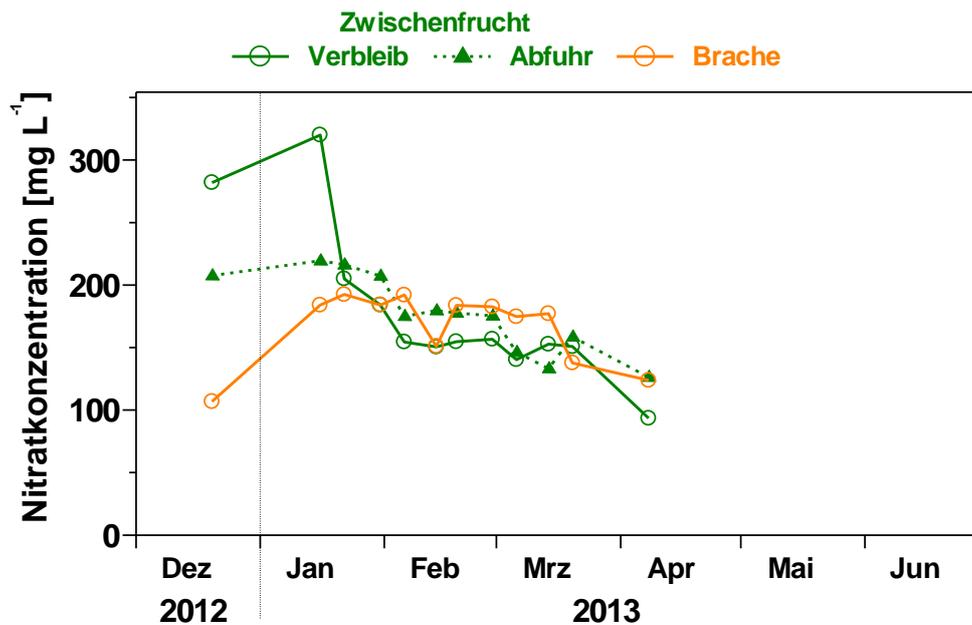


Abb. 17: Nitratkonzentrationen im Saugkerzenwasser in 70 cm Bodentiefe im Zeitraum Dezember 2012 bis April 2013. Untersuchung der Nachwirkung unterschiedlicher Varianten des Zwischenfruchtanbaus im Jahr 2011 (Zeitraum 09.06.2011-21.10.2011) sowie einer Brachevariante.

3.1.3.2 Nitratausträge in 70 cm Bodentiefe

Für die Darstellung der Ergebnisse der Berechnungen zu den Nitratausträgen in 70 cm Bodentiefe wurden die Versuche zum Einfluss der Düngebedarfsermittlung ausgewählt (Nr. 1, 3, 4 und 8; vgl. Tab. 21). Der Messzeitraum dieser Versuche war ausreichend lang und umfasst für alle in etwa den Hauptzeitraum der Auswaschungsperiode über Winter. Zudem lagen hier alle erforderlichen Daten für die Berechnung vor und die Konzentrationsverläufe zeigten plausible Verläufe.

Sickerwassermengen

Grundlage für die Berechnung der Nitratausträge sind Sickerwassermengen in 70 cm Bodentiefe, welche über eine erweiterte klimatische Wasserbilanz berechnet wurden. Als Beispiel sind in Abb. 18 die berechneten Sickerwassermengen, die Niederschlags- und Beregnungsmengen sowie die Matrixpotentiale in drei Bodentiefen für einen Versuch mit Bundzwiebeln dargestellt. Aufgrund der Berechnungen war im Versuch auch während der Kulturzeit von Bundzwiebel von einem Sickerwasseraustrag in 70 cm Bodentiefe auszugehen. Die Hauptsickerwasserperiode setzte in dieser Bodentiefe nach der Ernte der Kultur etwa ab Anfang November ein. Die Saugkerzen konnten erst Anfang Dezember 2012 eingebaut werden (erste verlässliche Konzentrationsergebnisse ab 20. Dezember). Im Versuch konnte mit den Saugkerzen daher nur einen Teil der Sickerwassermenge im Zeitraum August 2012 bis März 2013 erfasst werden. Für den Zeitraum August bis November ist allerdings nur von einem geringen Einfluss der differenzierten N-Düngergaben auf die Nitratkonzentrationen auszugehen.

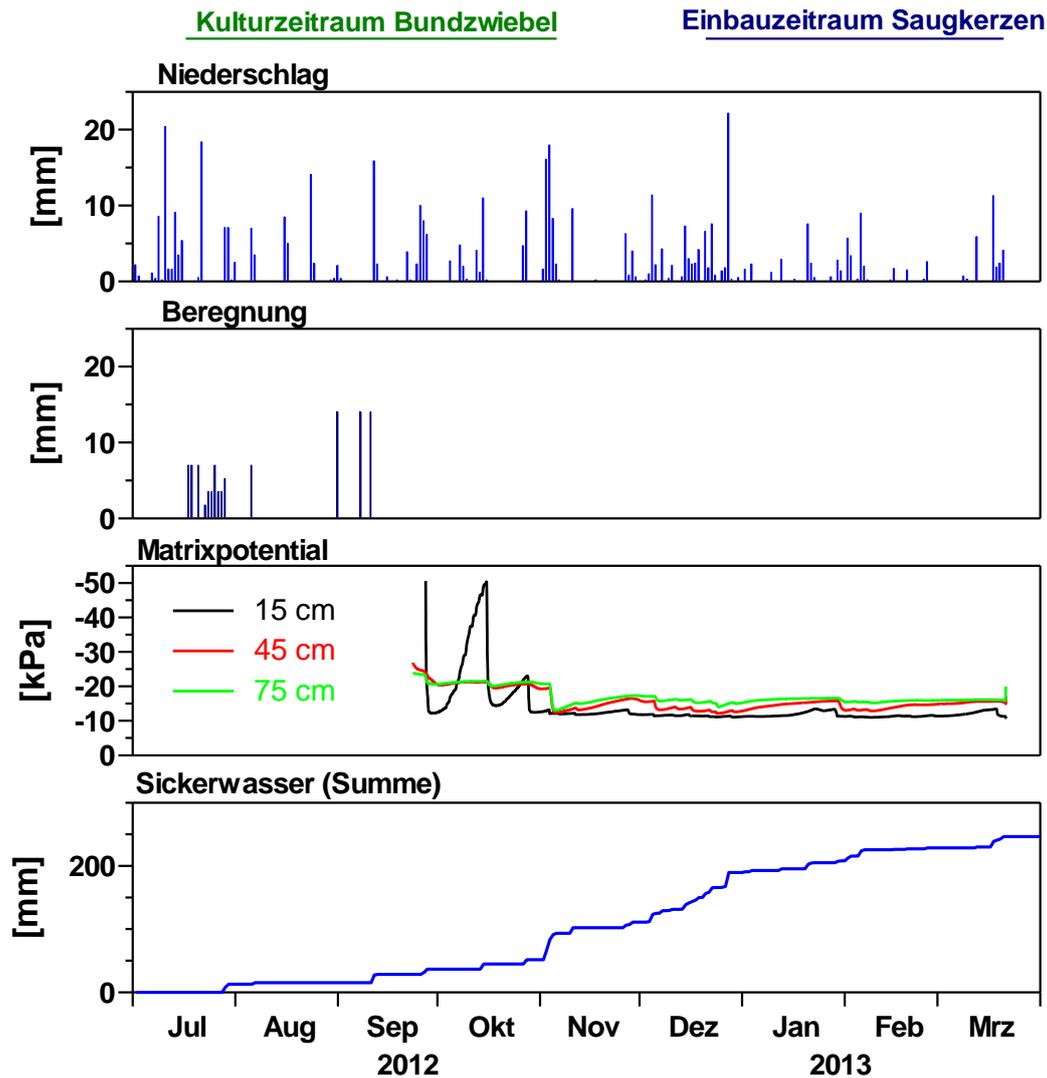


Abb. 18: Niederschläge, Beregnungsmengen, Matrixpotentiale in unterschiedlichen Bodentiefen sowie Berechnungen zur Sickerwassermenge in 70 cm Bodentiefe (klimatische Wasserbilanz). Versuch auf Betrieb 4 in Bundzwiebel (betriebsübliche Beregnung).

In der Tab. 21 sind die den Berechnungen zum N-Austrag zugrundeliegenden Sickerwassermengen (SW) sowie die Niederschläge (N) im jeweils betrachteten Zeitraum zusammengestellt. Die berechneten Sickerwassermengen schwanken aufgrund der unterschiedlich langen Bilanzierungszeiträume erheblich. Wird die durchschnittliche Sickerwassermenge für einen Monat berechnet, so ergeben sich Werte zwischen 17 und 36 mm pro Monat. Bezogen auf die Niederschlagsmenge wurden in den Versuchen zwischen 57 und 82 % des Niederschlages als Sickerwassermenge in 70 cm Bodentiefe berechnet. Diese hohen Anteile sind vor allem auf den fehlenden Bewuchs über Winter zurückzuführen. Insgesamt sind die berechneten Sickerwassermengen als plausibel anzusehen.

Tab. 21: Niederschlagsmengen (N) sowie über die klimatische Wasserbilanz berechnete Sickerwassermengen (SW) in 70 cm Bodentiefe für die den Kulturen nachfolgenden Winterzeitraum.

Kultur	Bilanzzeitraum	N [mm]	SW [mm]	SW/N [%]
Bundzwiebel	14.12.2012	140	115	82
	- 20.03.2013			
Zucchini	14.12.2012	129	85	66
	- 04.04.2013			
Brokkoli	01.01.2013	74	53	72
	- 04.04.2013			
Zucchini	01.09.2013	384	217	57
	- 28.04.2014			

Nitratausträge

Die auf Grundlage der Sickerwassermengen berechneten Nitratausträge sind in Tab. 22 zusammengestellt. In der unmittelbar der differenzierten N-Düngung folgenden Winterperiode war in fast allen Versuchen ein Bezug des N-Austrags zu den jeweiligen N-Düngermengen bzw. dem N-Bilanzüberschuss der Kultur festzustellen. So entsprach die Verminderung im N-Austrag nach Bundzwiebel (2012) der Verminderung im N-Bilanzüberschuss bei optimierter N-Düngung. Nach Brokkoli (2012) wurde der höchste N-Austrag bei der höchsten N-Düngung gemessen, die beiden niedriger gedüngten Varianten zeigten trotz unterschiedlicher N-Düngermengen dagegen keine Differenzierung. Nach der Zucchinikultur im Jahr 2012 wurde nur für die niedrigste N-Düngung ein Rückgang im N-Austrag beobachtet. Für den Versuch mit Zucchini im Jahr 2013 waren die N-Austräge dagegen trotz unterschiedlicher N-Düngung vergleichbar. Mittel- bis langfristig ist allerdings für alle Versuche von einer Verminderung der N-Austräge bei verminderter N-Düngung auszugehen.

Tab. 22: Düngermengen und N-Bilanzüberschüsse der Vorkultur sowie die für den nachfolgenden Winterzeitraum berechneten N-Austräge in 70 cm Bodentiefe. Alle Werte in kg N ha⁻¹.

Kultur	Düngermenge	N-Bilanz- überschuss	Bilanzzeitraum Austräge	N-Austrag
Bundzwiebel (2012)	195	93	14.12.2012	146
	165	53	- 20.03.2013	102
Zucchini (2012)	260	156	14.12.2012	64
	200	99	-	71
	130	28	04.04.2013	41
Brokkoli (2012)	310	242	01.01.2013	102
	280	208	-	85
	205	172	04.04.2013	80
Zucchini (2013)	260	225	01.09.2013	71
	230	197	-	64
	195	164	28.04.2014	74

3.1.4 N₂O-Emissionen ausgewählter Praxisversuche

Auf zwei Versuchsstandorten konnte jeweils über den Zeitraum eines Jahres die N₂O-Emission einer Praxisfläche mit Gemüseanbau untersucht werden. Die beiden Standorte lagen räumlich nur wenig voneinander entfernt. Die Höhenlage und die räumliche Entfernung der beiden Standorte differierten nur unwesentlich, sodass zur klimatischen Charakterisierung dieselbe Klimastation herangezogen werden kann (vgl. Tab. 23). Der Standort „Frankenthal“ (Untersuchungszeitraum 01.08.2011-28.08.2012) weist gegenüber dem Standort „Mörsch“ (Untersuchungszeitraum 01.08.2012 – 21.08.2013) etwas geringere Ton- und Schluffgehalte und daher höhere Sandgehalte auf. Insgesamt sind die Unterschiede in der Bodenart aber ebenfalls als nur gering anzusehen. Die Versuche auf den Praxisflächen wurden jeweils auf randomisierten Versuchsanlagen mit 4-facher Wiederholung durchgeführt.

Am Standort **Frankenthal** wurde der 2. Gemüsesatz 2011 (Blumenkohl) versuchsmäßig mit drei Methoden der Düngerbedarfsermittlungen begleitet. Dabei wurde die betriebsübliche N-Düngung mit der Düngerbedarfsermittlung nach „N-Expert“ und „SPAD“ untersucht (vgl. Tab. 24). Die Messungen der N₂O-Emissionen wurden unmittelbar nach der Pflanzung des Blumenkohlbestandes begonnen. Die im Frühjahr 2012 angebaute Speiszwiebel wurde dagegen einheitlich vom Betrieb mit Stickstoff gedüngt. Im Untersuchungszeitraum wurden daher 496 (Betriebsüblich), 406 (N-Expert) sowie 336 kg N ha⁻¹ (SPAD) als Stickstoff gedüngt. In der Variante N-Expert bzw. SPAD wurden daher im Untersuchungszeitraum 82 bzw. 68 % der N-Düngermenge der betriebsüblichen Variante gedüngt. Die differenzierten N-Düngermengen führten zu deutlichen Unterschieden im N-Bilanzüberschuss bei der Kultur Blumenkohl (vgl. Tab. 25). Bei Düngung nach SPAD wurden etwas niedrigere markfähige Aufwüchse sowie Anteile vermarktungsfähiger Pflanzen ermittelt.

Tab. 23: Klima- und Bodenkenndaten der Versuchsstandorte mit Messung der N₂O-Emissionen.

	Frankenthal	Mörsch
Höhe ü. NN. [m]	91	89
Mitt. Jahrestemp. [°C] ^a	10,9	
Mitt. Jahres-Nd [mm] ^a	529	
Sand [%]	36,5	27,0
Schluff [%]	40,9	45,6
Ton [%]	22,6	27,4
pH-Wert	7,6	7,7

^a Wetterstation „Klein-Niedesheim“ (105 m ü NN) des agrarmeteorologischen Messnetzes Rheinland- Pfalz (1991-2013)

Tab. 24: Versuchsvarianten und N-Düngermengen 2011/2012 am Standort Frankenthal. Nur der Blumenkohlbestand 2011 wurde differenziert gedüngt.

Versuchsvariante / Düngerbedarfsermittlung	N-Düngemenge		Gesamt
	Blumenkohl (2011)	Speisezwiebel (2012)	
		[kg N ha ⁻¹]	
Betriebsüblich (BÜD)	280	216	496
N-Expert	190	216	406
SPAD	120	216	336

Tab. 25: Ertragserhebungen sowie N-Bilanzüberschüsse für den Blumenkohlbestand 2011 am Standort Frankenthal.

	Variante / Düngerbedarfsermittlung		
	Betriebsüblich	N-Expert	SPAD
Marktware [dt FM ha ⁻¹]	320	343	273
Ausbeute [%]	87	82	73
N-Bilanzüberschuss [kg N ha ⁻¹]	184	102	58

Im zeitlichen Verlauf der N₂O-Emissionen (Abb. 19) waren auf dem Standort **Frankenthal** erwartungsgemäß die größten Unterschiede zwischen den Varianten im Zeitraum August bis Oktober, dem Anbauzeitraum vom Blumenkohl mit differenzierter N-Düngung, zu erkennen. Hier wies erwartungsgemäß die betriebsübliche N-Düngung („BÜD“) mit knapp unter 150 µg N₂O-N m² h⁻¹ die höchsten N₂O-Freisetzungsraten auf. Die höchsten Freisetzungsraten

mit Spitzenwerten von $320 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ wurden für alle Versuchsvarianten über das Winterhalbjahr (Dezember bis April) gemessen. Über diesen Zeitraum ist den Versuchsvarianten keine eindeutige Reihung zuzuordnen. Mit Beginn der Vegetationsperiode nahmen die Emissionen wieder ab, ab Juni 2012 waren wieder höhere Emissionen zu beobachten.

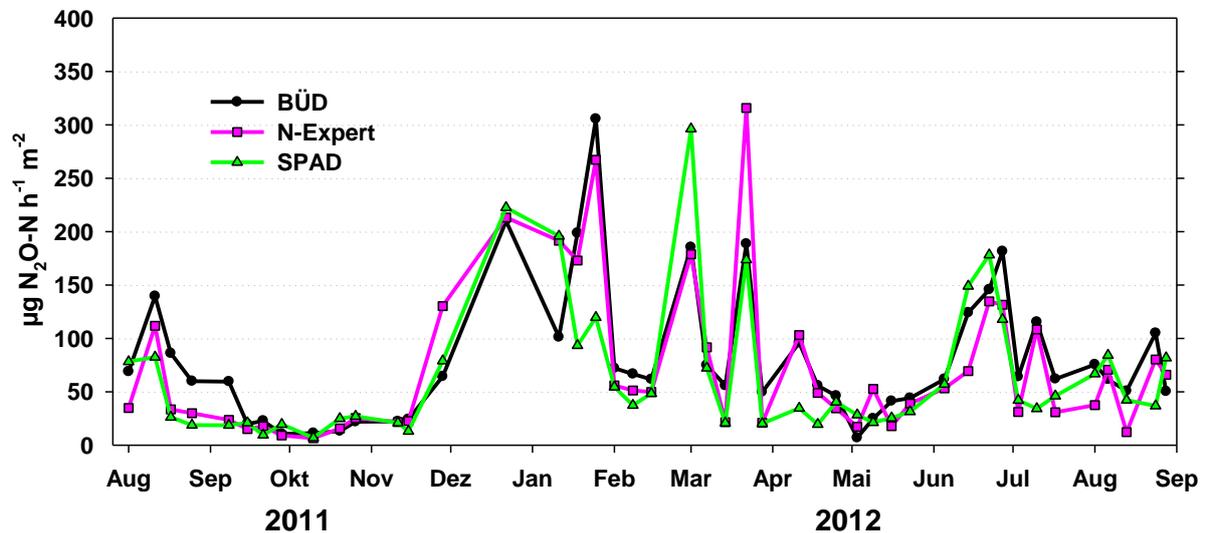


Abb. 19: Mittlere N₂O-Freisetzung (n=4) in Abhängigkeit der N-Düngerbedarfsermittlung am Standort Frankenthal (BÜD: Betriebsübliche Düngung).

Die kumulativen N₂O-Emissionen für den knapp 13-monatigen Untersuchungszeitraum am Standort **Frankenthal** wiesen die gleichen Tendenzen wie die applizierten N-Düngermengen auf (Abb. 20). Die höchsten Emissionen traten mit $7,3 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ bei der betriebsüblichen N-Düngung (BÜD) auf. Bei einer ähnlichen N-Düngermenge (540 kg N ha^{-1}) wurden auf dem wesentlich leichteren Sandstandort des Versuchsfeldes „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer über einen 15-monatigen Untersuchungszeitraum eine kumulative N₂O-Emission von knapp $6 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ gemessen (Seiz et al., 2014). Die optimierten N-Düngerbedarfsermittlungen nach „N-Expert“ und „SPAD“ wiesen mit $6,7$ bzw. $6,1 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ im Vergleich zur betriebsüblichen N-Düngung eine Emissionsminderung um $8,5$ bzw. 17% auf. Für alle Versuchsvarianten wurden für den Brachezeitraum über Winter mit 44 (BÜD) bis 53% (N-Expert) die höchsten Anteile der kumulativen Emissionen ermittelt. Etwa ein Drittel der jeweiligen kumulativen Emissionen wurden während der Kulturzeit von Speisezwiebel (2012) gemessen.

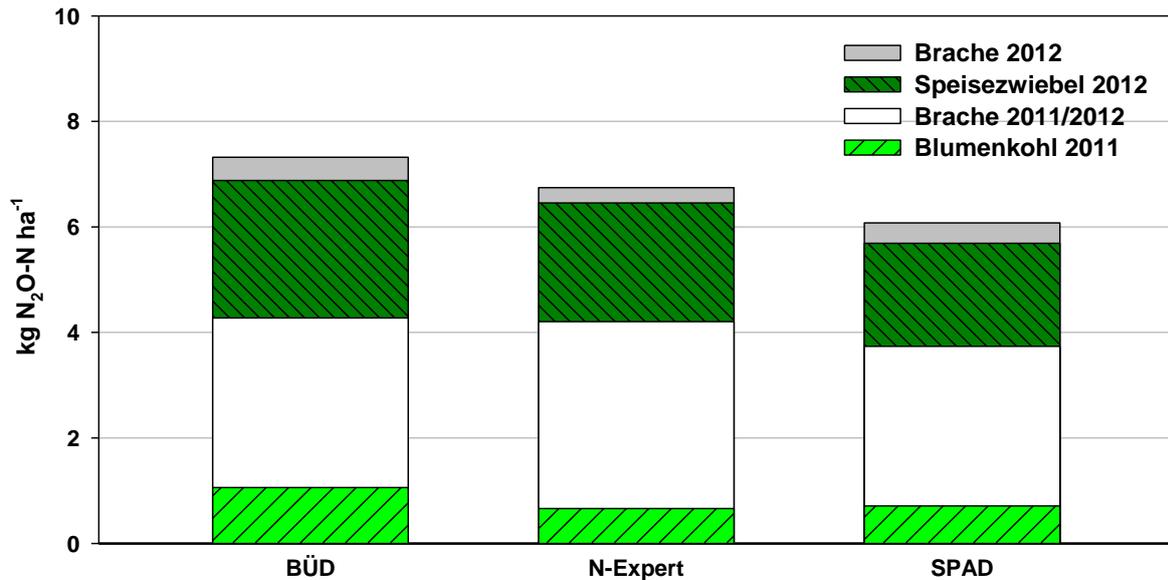


Abb. 20: Mittlere (n=4) kumulative N₂O-Emissionen (01.08.2011- 28.08.2012) in Abhängigkeit der N-Düngerbedarfsermittlung am Standort Frankenthal. (BÜD: Betriebsübliche Düngung).

Am Standort **Mörsch** wurde der 1. Gemüsesatz 2012 (Brokkoli) versuchsmäßig mit drei Methoden der Düngerbedarfsermittlungen begleitet. Dabei wurde bei Brokkoli eine Düngung nach „Faustzahlen“ (keine Berücksichtigung der N_{min}-Gehalte im Boden) mit der betriebsüblichen N-Düngung (BÜD) sowie einer dieser pauschal um 30 kg N ha⁻¹ reduzierten N-Düngung verglichen (BÜDred, vgl. Tab. 26). Die Messungen der N₂O-Emissionen konnten erst nach der Ernte des Brokkolibestandes am 01.08.2012 begonnen werden. Im Gegensatz zum Standort Frankenthal konnte daher der Zeitraum mit differenzierter N-Düngung nicht untersucht werden, wodurch sich die Ergebnisse nur auf die „Nachwirkungen“ im Folgejahr beziehen. Auf der Versuchsfläche wurde im Herbst 2012 keine zweite Gemüsekultur angebaut. Die im Frühjahr 2013 angebaute Kartoffel wurde wiederum einheitlich vom Betrieb mit Stickstoff gedüngt. Die Untersuchung der Nachwirkung bezieht sich daher auf N-Düngermengen von 456 (Faustzahlen), 426 (Betriebsüblich) sowie 396 kg N ha⁻¹ (Betriebsüblich, reduziert). Die differenzierten N-Düngermengen führten zu deutlichen Unterschieden im N-Bilanzüberschuss für die dem Untersuchungszeitraum der N₂O-Emissionsmessungen vorausgehende Kultur Brokkoli (vgl. Tab. 27). Im Gegensatz zum Standort Frankenthal wurden für den Brokkolibestand auf dem Standort **Mörsch** trotz unterschiedlicher N-Düngermengen keine Unterschiede im markfähigen Aufwuchs sowie im Anteil vermarktungsfähiger Pflanzen ermittelt.

Tab. 26: Versuchsvarianten und N-Düngermengen 2012/2013 am Standort Mörsch. Nur der Brokkolibestand 2012 wurde differenziert gedüngt.

Versuchsvariante / Düngerbedarfsermittlung	N-Düngermenge		
	Brokkoli (2012)	Kartoffel (2013) [kg N ha ⁻¹]	Gesamt
Faustzahlen	310	146	456
Betriebsüblich (BÜD)	280	146	426
Betriebsüblich, reduziert (BÜDred)	250	146	396

Tab. 27: Ertragserhebungen sowie N-Bilanzüberschüsse für den Brokkolibestand 2012 am Standort Mörsch.

	Variante / Düngerbedarfsermittlung		
	Faustzahlen	BÜD	BÜDred
Marktware [dt FM ha ⁻¹]	133	144	156
Ausbeute [%]	60	63	70
N-Bilanzüberschuss [kg N ha ⁻¹]	242	206	172

Im zeitlichen Verlauf der N₂O-Emissionen (Abb. 21) waren auf dem Standort **Mörsch** keine ausgeprägten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten zu erkennen. Die höchsten N₂O-Freisetzungsraten mit ca. 125 µg N₂O-N m² h⁻¹ wurden jeweils in der am niedrigsten gedüngten Variante (BÜDred) im Herbst 2012 bzw. Sommer 2013 gemessen. Diese waren allerdings nur unwesentlich höher als in den beiden anderen Versuchsvarianten. Im Gegensatz zum Standort Frankenthal wurden am Standort **Mörsch** über den Winterzeitraum (Dezember bis April) tendenziell sogar niedrigere Emissionswerte gemessen. Grund hierfür sind häufigere Frostwechsel im Januar 2012 gegenüber dem Januar 2013 sowie eine langandauernde, ausgeprägte Frostperiode im Februar 2012 (vgl. Abb. 22) die zu den höheren N₂O-Emissionen des Winters 2011/2012 gegenüber 2012/2013 geführt haben.

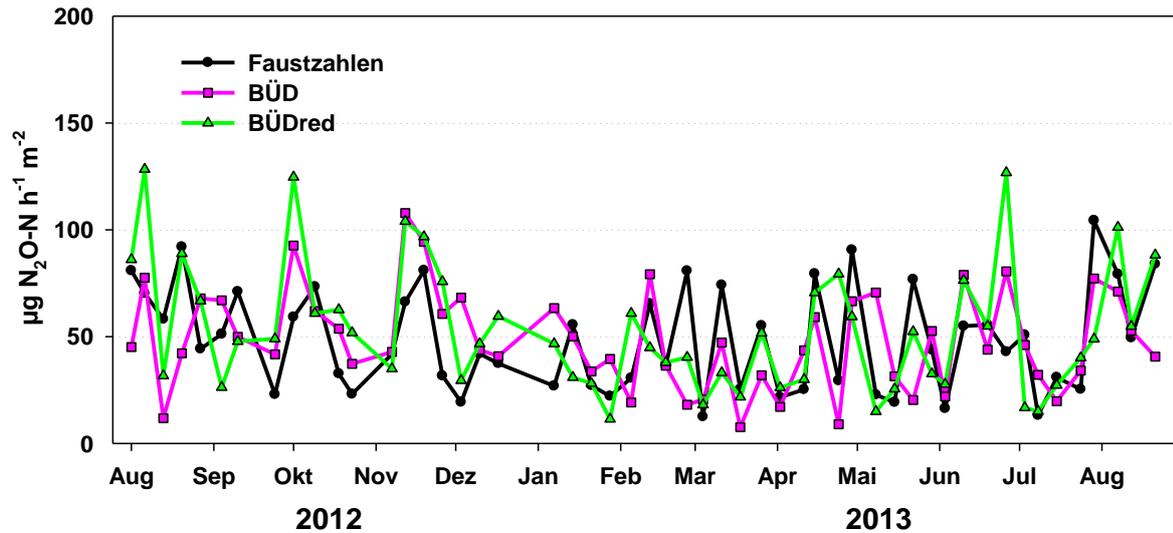


Abb. 21: Mittlere N_2O -Freisetzung ($n=4$) in Abhängigkeit der N-Düngerbedarfsermittlung am Standort Mörsch (BÜD: Betriebsübliche Düngung; BÜDred: reduzierte betriebsübliche Düngung).

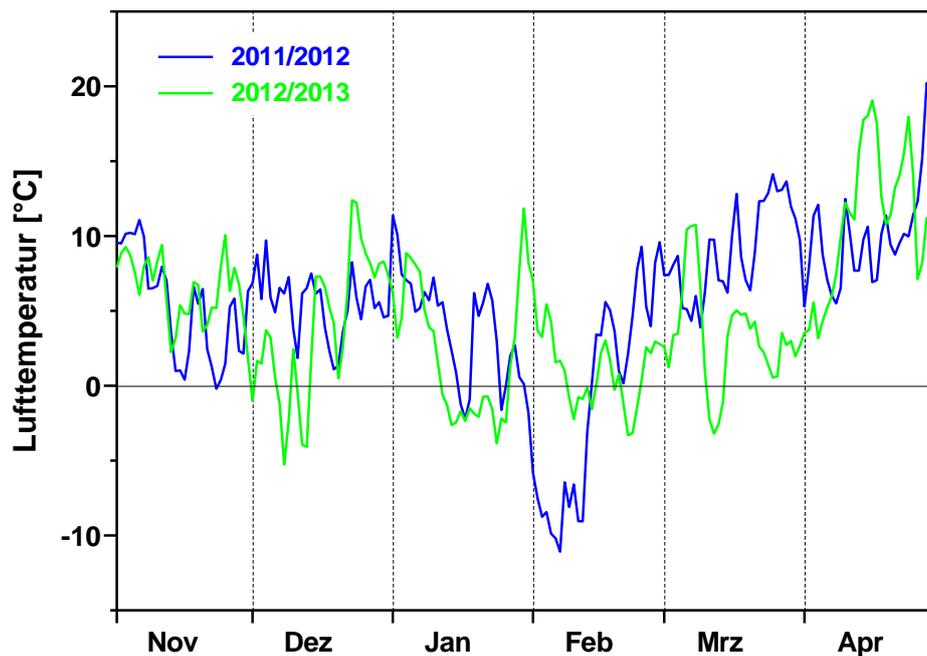


Abb. 22: Vergleich der Tagesmitteltemperaturen der Luft im Winterhalbjahr 2011/2012 (blau) mit dem Winterhalbjahr 2012/2013 (grün). Wetterstation „Klein-Niedesheim“ des agrarmeteorologischen Messnetzes Rheinland-Pfalz.

Die kumulativen N_2O -Emissionen für den knapp 13-monatigen Untersuchungszeitraum am Standort **Mörsch** unterschieden sich nur wenig (Abb. 23). Die höchsten Emissionen traten mit $4,7 \text{ kg } N_2O\text{-N ha}^{-1}$ bei der reduzierten betriebsüblichen N-Düngung („BÜDred“) auf. Die N-Düngerbedarfsermittlungen nach „Faustzahlen“ sowie betriebsüblicher N-Düngung („BÜD“) waren mit jeweils $4,3 \text{ kg } N_2O\text{-N ha}^{-1}$ allerdings nur unwesentlich geringer. Im Ver-

gleich zum Standort Frankenthal wurden auf dem Standort Mörsch in wiederum 13-monatigen Untersuchungszeitraum um 25 bis 30 % niedrigere kumulative N₂O-Emissionen gemessen. Dies ist neben dem ausschließlich auf die „Nachwirkungen“ beschränkten Untersuchungszeitraum vor allem auf die niedrigeren Emissionen im Winterhalbjahr zurückzuführen. Für alle Versuchsvarianten wurden für den langen Brachezeitraum (August 2012 bis Frühjahr 2013) 62 (Faustzahlen) bis 65 % („BÜDred“) die höchsten Anteile der kumulativen Emissionen ermittelt. Während der Kulturzeit von Kartoffel (2013) wurden 30 bis 33 % der jeweiligen kumulativen Emissionen gemessen.

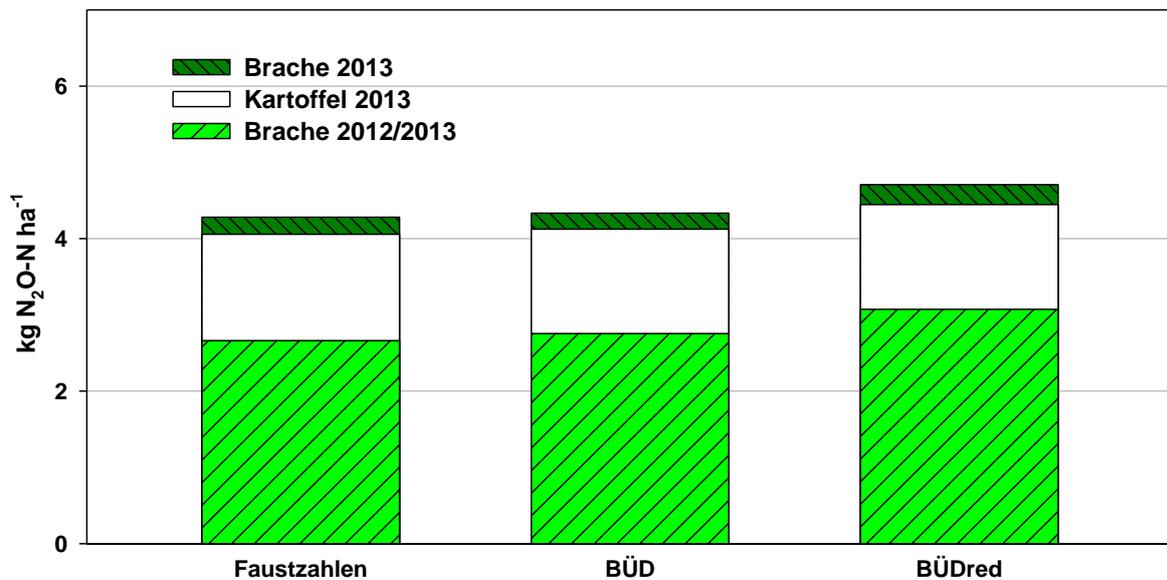


Abb. 23: Mittlere (n=4) kumulative N₂O-Emissionen (01.08.2012- 21.08.2013) in Abhängigkeit der N-Düngerbedarfsermittlung am Standort Mörsch. (BÜD: Betriebsübliche Düngung; BÜDred: reduzierte betriebsübliche Düngung).

3.1.5 Untersuchungen zur standortsspezifischen N-Mineralisierung

3.1.5.1 N-Mineralisierung von 20 Gemüsebaustandorten aus der Vorderpfalz

N-Mineralisierung von Bodensäulen im Freiland

Die 20 Standorte für die Untersuchung zur N-Mineralisierung wurden im Hinblick auf Unterschiede im Substrat (Bodenart), Humusgehalt und Nutzung (v.a. Anteil Gemüse in der Fruchtfolge) ausgewählt. In Tab. 28 ist die Bandbreite der untersuchten Bodendaten dargestellt, Abb. 24 zeigt zusätzlich die Sand-, Ton- und Schluffgehalte im Körnungsdreieck. Die Tongehalte der untersuchten Standorte liegen zwischen 2,8 und 42,9 %, sodass eine weite Bandbreite von Bodenarten abgedeckt wurde (vgl. Abb. 24). Hinsichtlich der pH-Werte sowie der Nährstoffversorgung und der Kalkgehalte wurde ebenfalls ein weiter Bereich abgedeckt. Die Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und dementsprechend die daraus abgeleiteten Humusgehalte decken ebenfalls den beabsichtigten weiten Bereich ab (Humusgehalte

zwischen 0,8 und 4,5 %). Das C/N-Verhältnis liegt im Bereich von 7,5 bis 13,0. Auf Grundlage der vorliegenden Bodendaten ist v. a. im Hinblick auf die Unterschiede in Substrat- und Humusgehalt sowie dem C/N-Verhältnis von einem weiten Bereich unterschiedlicher N-Mineralisationsleistungen der Böden auszugehen.

Tab. 28: Bandbreite (Minimum und Maximum) der Bodendaten der 20 untersuchten Standorte.

	Ton	Schluff	Sand	pH-Wert	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	C _{org}	N _{ges}	C/N	CaCO ₃	Humus
	----- [%] -----				--- [mg 100 g ⁻¹] ---			--- [%] ---			----- [%] ----	
Min.	2,8	16,9	12,5	6,2	17	6	3	0,49	0,044	7,5	0,3	0,85
Max.	42,9	72,9	78,2	7,8	63	53	18	2,66	0,283	13,0	20,2	4,59

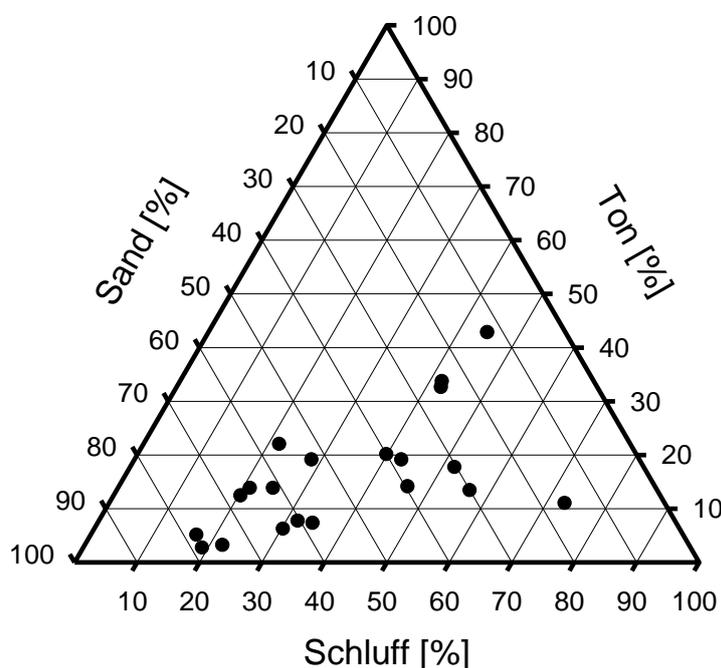


Abb. 24: Körnungsdreieck mit Sand-, Ton- und Schluffgehalt der 20 Standorte.

Die während der 29 bis 33-wöchigen (Standort 1 bis 15) bzw. 16 bis 21-wöchigen Einbauzeit (Standorte 16 bis 21) an im Freiland eingebauten Bodensäulen ermittelte N-Mineralisierung ist in Abb. 25 dargestellt. Dabei ist für alle Standorte die mittlere N-Mineralisierung pro Woche angegeben. Die in den Bodensäulen im Freiland ermittelte N-Mineralisierung betrug zwischen 1,3 und 9,7 kg N ha⁻¹ pro Woche und deckt damit einen weiten Bereich ab. Im Mittel wurde für die Standorte 1 bis 15 eine N-Mineralisierung von 3,3 kg N ha⁻¹ pro Woche und für die Standorte 16 bis 20 mit kürzerer Einbauzeit eine mittlere N-Mineralisierung von 4,9 kg N ha⁻¹ pro Woche gemessen. Die etwas höhere mittlere N-Mineralisierung der Standorte 16 bis 20 kann durch deren Einbauzeitraum über die wärmere Jahreszeit (ab Juni 2013) erklärt werden. Die Bodensäulen der Standorte 1 bis 15 wurden dagegen schon ab März 2013 eingebaut (Ausbau aller Bodensäulen einheitlich am 14.11.2013). Die in dieser Arbeit

ermittelten wöchentlichen N-Mineralisierungsraten liegen im Bereich der von De Willigen (1986) berichteten Werte (2,5 bis 7,4 kg N ha⁻¹ pro Woche). Aufgrund der hier untersuchten Standorte mit hohem Gemüseanteil wurden allerdings höhere Werte als in der Literaturübersicht erwartet.

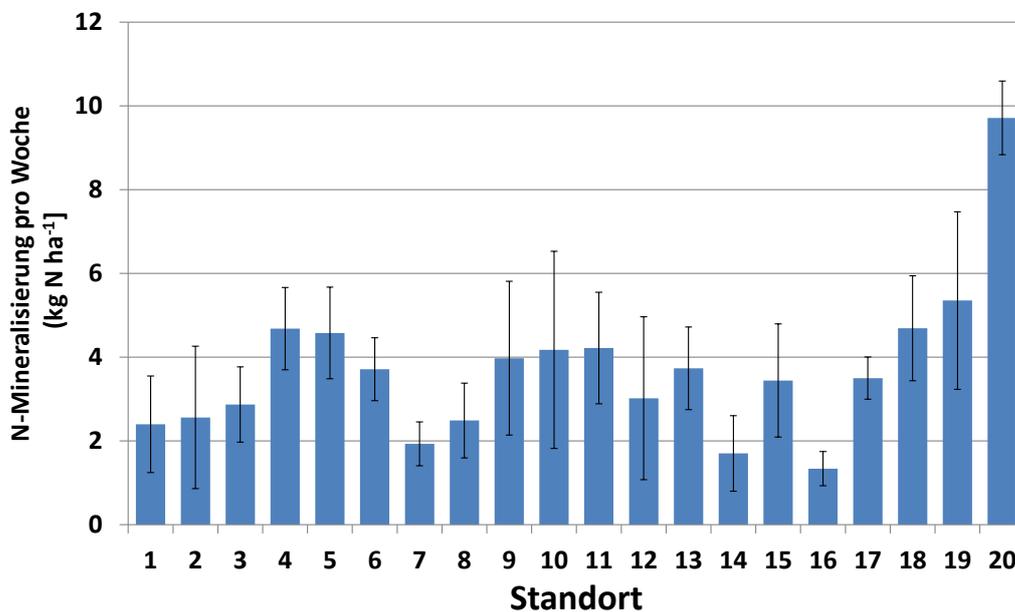


Abb. 25: Durchschnittliche, an Bodensäulen im Freiland ermittelte N-Mineralisierung (pro Woche) der 20 untersuchten Standorte. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der 6 Wiederholungen an.

Mineralisierungsmessungen im Labor

Die Untersuchung der anaeroben N-Mineralisierung erfolgte sowohl an luftgetrockneten als auch an feldfrischen Bodenproben. Die N-Mineralisierung der luftgetrockneten Bodenproben lag grundsätzlich über derer der feldfrischen Bodenproben, was auch von Dersch et al. (2003) berichtet wurde. Wird ein Extremwert der N-Mineralisierung bei trockenem Boden nicht berücksichtigt, so kann über eine Regression für die trockenen Bodenproben eine um etwa 10 mg N pro kg Boden höhere N-Mineralisierung als bei feldfrischen Proben vorhergesagt werden (Abb. 26). Im Laufe der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Homogenisierung der Probe bei getrocknetem Boden eher zufriedenstellend durchzuführen ist als bei feldfrischen Proben, welche zur Lagerung tiefgefroren waren.

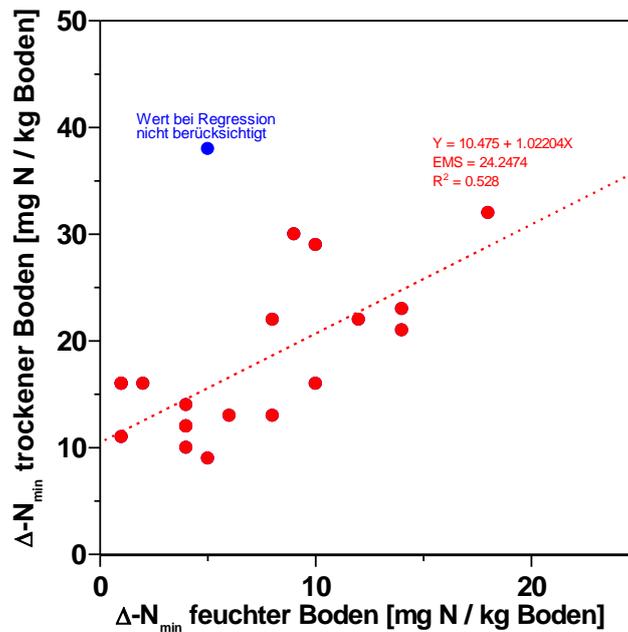


Abb. 26: Vergleich der N-Mineralisierung ($\Delta\text{-N}_{\text{min}}$) im anaeroben Brutversuch mit feuchten (feldfrischen) sowie luftgetrockneten Bodenproben.

Zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse des anaeroben Brutversuches erfolgte an ausgewählten Bodenproben ein Vergleich mit dem arbeitstechnisch wesentlich aufwändigeren aeroben Brutversuch (Abb. 27). Verglichen wurden dabei die Ergebnisse des aeroben Brutversuches mit feldfrischen Bodenproben und einer Bebrütungsdauer von 77 Tagen mit denen des anaeroben Brutversuches mit luftgetrockneten Bodenproben (Bebrütungsdauer 7 Tage). Die aeroben Brutversuche wurden von der Fachhochschule Bingen durchgeführt. Es zeigte sich bei den 8 untersuchten Bodenproben eine recht straffe lineare Beziehung ($r^2 = 0,82$) zwischen den beiden Verfahren. Daher ist davon auszugehen, dass mit dem vergleichsweise einfachen Verfahren des anaeroben Brutversuches plausible Prognosen des N-Mineralisierungspotentials möglich sind. Zur Qualitätssicherung des neu an der LUFA Speyer eingeführten anaeroben Brutversuches wurden zusätzlich 6 Bodenproben an das Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion der AGES in Wien verschickt. Das Institut verfügt bereits über langjährige Erfahrungen bei der Durchführung des anaeroben Brutversuches. Die Ergebnisse zeigten zufriedenstellende Übereinstimmungen der Vergleichsproben (nicht dargestellt).

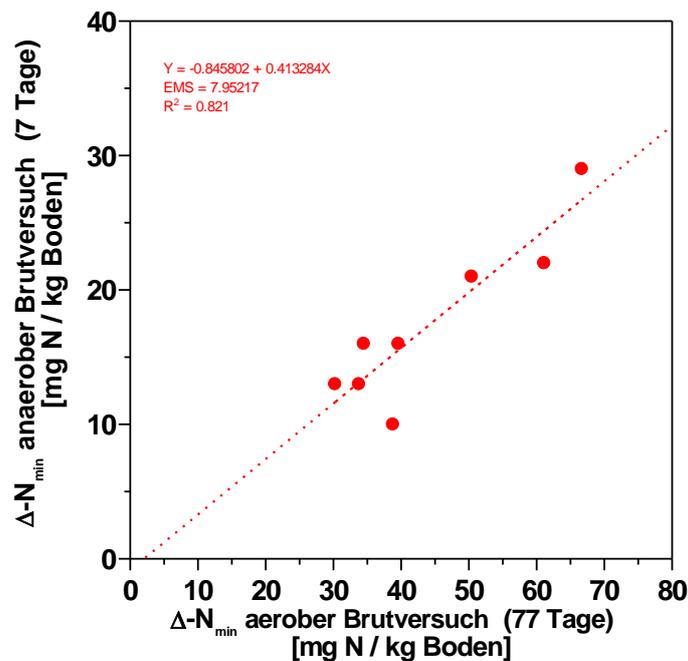


Abb. 27: Vergleich der N-Mineralisierung ($\Delta\text{-N}_{\text{min}}$) im aeroben Brutversuch mit feuchten (feldfrischen) Bodenproben sowie im anaeroben Brutversuch mit luftgetrockneten Bodenproben.

Zur Klärung der Beziehungen zwischen der N-Mineralisierung und Bodenparameter sind in Abb. 28 die Brutversuchsergebnisse gegen den C_{org} - bzw. Humusgehalt, den N_{ges} -Gehalt, das C/N-Verhältnis, den pH-Wert sowie den Ton- und Sandgehalt aufgetragen. Insgesamt ist festzustellen, dass tendenzielle Beziehungen zwischen den Bodenparametern und der N-Mineralisierung für trockene Bodenproben enger erscheinen als für feldfrische Proben. So ist für den C_{org} - bzw. Humusgehalt, den N_{ges} -Gehalt, den pH-Wert und den Tongehalt tendenziell eine Zunahme der N-Mineralisierung bei Zunahme der Bodenparameter zu erkennen. Der Sandgehalt sowie in abgeschwächter Ausprägung auch das C/N-Verhältnis zeigen dagegen eine tendenziell negative Beziehung zur N-Mineralisierung an trockenen Bodenproben. Insgesamt sind die dargestellten Beziehungen aber noch nicht ausreichend, um die im anaeroben Brutversuch ermittelten N-Mineralisierungspotentiale zu prognostizieren.

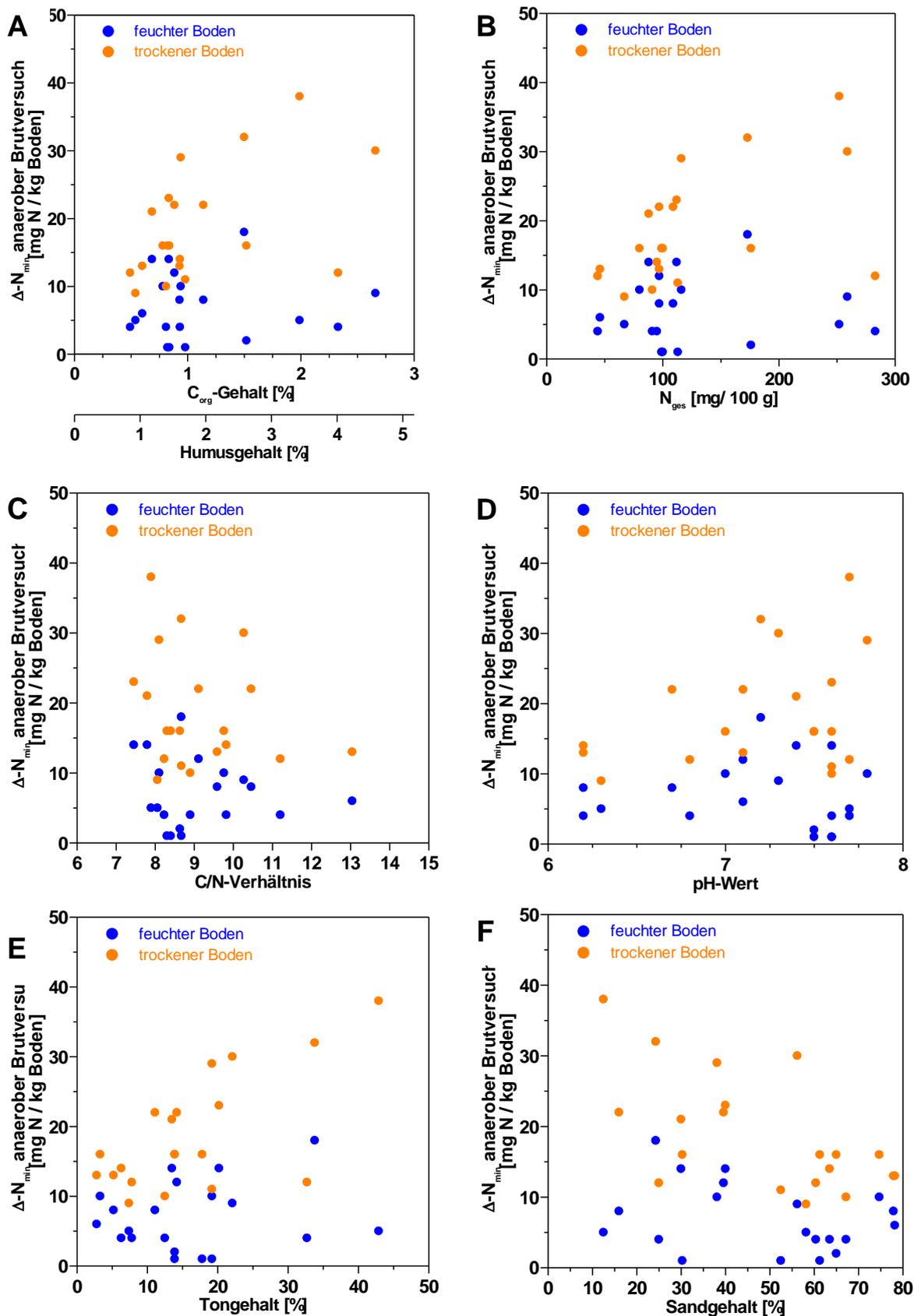


Abb. 28: Beziehung zwischen C_{org} - bzw. Humusgehalt (A), N_{ges} -Gehalt (B), C/N-Verhältnis (C), pH-Wert (D) sowie Sand- (E) und Tongehalt (F) von Bodenproben und dem N-Mineralisationswert im anaeroben Brutversuch.

In der Abb. 29 ist die an Bodensäulen im Freiland ermittelte wöchentliche N-Mineralisierung den Ergebnissen des anaeroben Brutversuches gegenübergestellt. Für die untersuchten 20 Standorte zeigte sich kaum eine Beziehung zwischen den aus dem anaeroben Brutversuch ableitbaren N-Mineralisierungspotential und der an Bodensäulen im Freiland über einen längeren Zeitraum aus der Zunahme der N_{\min} -Gehalte abgeleiteten aktuellen N-Mineralisierung. Die Beziehung zu den anaeroben Bebrütungswerten getrockneter Böden erscheint etwas enger, ist aber nicht ausreichend für eine Prognose der „aktuellen“ N-Mineralisierung aus den Laborwerten. Offensichtlich sind weitere Einflussfaktoren, wie etwa der aktuelle Temperaturverlauf in Wechselwirkung mit den jeweiligen Bodenparametern entscheidend für die Höhe der aktuellen N-Mineralisierung.

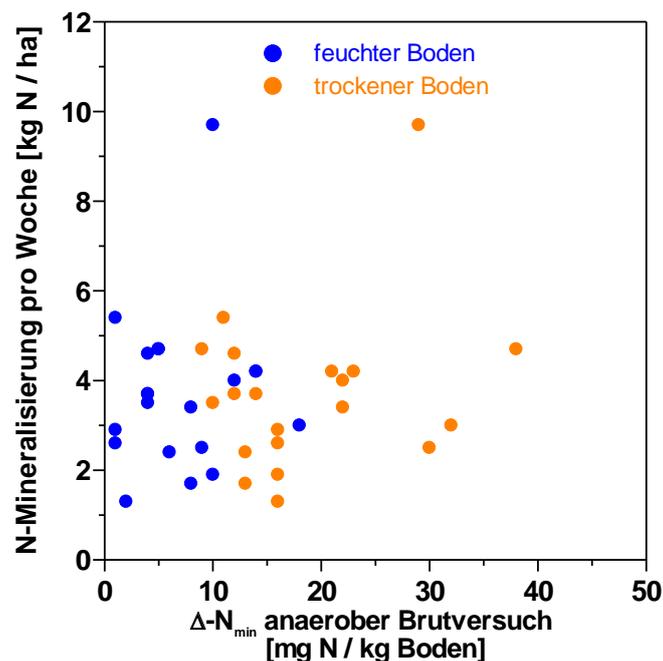


Abb. 29: Vergleich der N-Mineralisierung ($\Delta-N_{\min}$) im anaeroben Brutversuch mit der an Bodensäulen im Freiland ermittelten wöchentlichen N-Mineralisierung.

3.1.5.2 N-Mineralisierung im Exaktversuch der LUFA Speyer

Zusätzlich zu den an 20 Standorten entnommenen und zentral auf dem Versuchsfeld eingebauten Bodensäulen waren im Jahr 2013 im Exaktversuch der LUFA Speyer (vgl. auch nachfolgendes Kapitel 3.1.6) in 5 ausgewählten Varianten während der Kultur Brokkoli Bodensäulen eingebaut. Die verschiedenen Versuchsvarianten wurden bereits seit 2011 durchgeführt. Die Bodensäulen wurden am 10.07.2013 (eine Woche nach der Pflanzung) zwischen die Brokkolipflanzen eingebaut und nach der vollständigen Ernte am 30.09.2013 wieder ausgebaut. Aufgrund der unterschiedlichen Methodik (Einbau in wachsenden Bestand) werden die Ergebnisse getrennt dargestellt. Untersucht wurden eine Variante ohne Stickstoffdüngung (ohne N) sowie vier Varianten, jeweils mit der N-Düngebedarfsermittlung nach „N-Expert“ (vgl. Abb. 30). Dabei wurden drei Varianten jeweils mit Verbleib der Ernterückstände (Einarbeitung, zusätzliche Strohzufuhr; vorausgehende Winterzwischenfrucht) sowie die Variante mit Abfuhr der Ernterückstände (Abfuhr ER) untersucht. Die seit 2011 ohne N-

Düngung durchgeführte Variante („ohne N“) wies in dem knapp 12-wöchigen Zeitraum (82 Tage) eine durchschnittliche N-Mineralisierung von 6,1 kg N pro ha und Woche auf. Die N-Mineralisierung der Variante mit Abfuhr der Ernterückstände und N-Düngung war mit 4,5 kg N pro ha und Woche sogar noch niedriger. Bei Verbleib der Ernterückstände wurde eine N-Mineralisierung von 8,2, bei zusätzlicher Strohzufuhr von 9,2 kg N pro ha und Woche gemessen. Die höchste N-Mineralisierung wurde in der Variante mit Winterzwischenfrucht mit 11,3 kg N pro ha und Woche gemessen. Insgesamt wurde in den unterschiedlichen Varianten über den untersuchten Kulturzeitraum eine N-Freisetzung in den Bodensäulen von 53 bis 132 kg N ha⁻¹ gemessen.

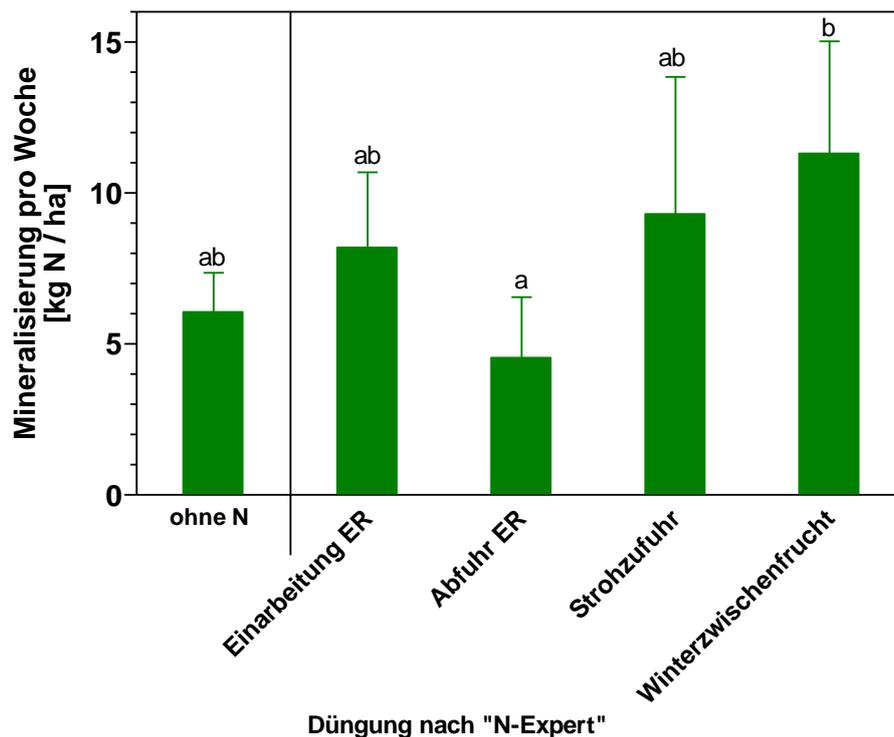


Abb. 30: N-Mineralisierung in Bodensäulen von 5 Versuchsvarianten eines Exaktversuches auf dem Versuchsfeld „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer während der Kultur Brokkoli im Jahr 2013.

Für die während der Kultur Brokkoli ermittelte N-Mineralisierung in Bodensäulen konnte eine Beziehung zu den Ergebnissen des anaeroben Brutversuches an feldfrischen Bodenproben gezeigt werden (Abb. 31). Allerdings wurden an den trockenen Bodenproben nur vergleichsweise geringe maximale N-Mineralisierungspotentiale von 12 mg N pro g Boden gemessen.

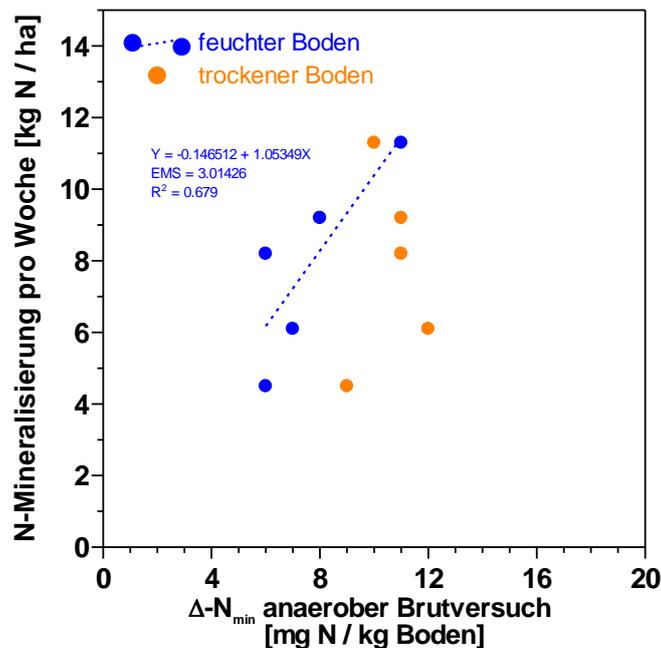


Abb. 31: Vergleich der N-Mineralisierung ($\Delta\text{-N}_{\min}$) im anaeroben Brutversuch mit der an Bodensäulen während der Kultur von Brokkoli im Jahr 2013 (vgl. Abb. 30) ermittelten wöchentlichen N-Mineralisierung.

3.1.6 Ergebnisse des Exaktversuches auf der Feldversuchsstation „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer

3.1.6.1 Versuchsvarianten und angebaute Kulturen

Im Sommer 2011 wurde auf der Versuchsstation „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer ein Exaktversuch mit 8 Versuchsvarianten neu angelegt. Von der ursprünglich vorgesehenen Weiterführung eines seit 2004 laufenden Versuches zur Entwicklung von integrierten Stickstoffmanagementsystemen im Gemüsebau mit 36 Versuchsvarianten wurde aus folgenden Gründen verzichtet:

- Nach Bewilligung des Forschungsantrages der AG Ruser (Uni Hohenheim) sollten Art und Anzahl der Versuchsvarianten aufgrund geplanter gemeinsamer und vergleichbarer Messungen der N_2O -Freisetzung auf dem Standort der LUFA Speyer und der AG Hohenheim identisch sein. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Vorgeschichte der Parzellen im seit 2004 durchgeführten Versuch war dies nicht dort nicht gegeben.
- Durch den langjährigen Gemüseanbau kam es in den Varianten ohne Fruchtwechsel teilweise zu Bodenverdichtungen, welche sich in deutlich erhöhten N_2O -Freisetzungsraten und einem Minderertrag an Gemüse bemerkbar machten.

In Abstimmung mit der AG Ruser wurde 2011 ein neuer Versuch mit 8 Versuchsvarianten angelegt (Tab. 29). Die Variante 1 ohne N-Düngung diente als Vergleichsvariante mit der die N-Mineralisierung und die N_2O -Freisetzung ohne Stickstoff-Düngung erfasst werden kann. Die Stickstoff-Düngung erfolgte in den Varianten 2 bis 4 und 6 bis 8 mit einem nicht stabili-

sierten N-Dünger, während in Variante 5 ein stabilisierter Stickstoffdünger (ENTEC) zum Einsatz kam. Aus Gründen des Schwefel-Ausgleichs mit der ENTEC-Variante wurde als nicht stabilisierter Dünger Ammonsulfatsalpeter (ASS) verwendet. Die Düngerbedarfsermittlung in den Varianten 5 bis 8 erfolgte einheitlich nach dem N-Expert-Verfahren (Feller et al., 2007). In der Versuchsvariante „SPAD“ diente ein SPAD-Chlorophyllmeter (Minolta SPAD 502 DL Meter) zur Ermittlung des Düngedarfs. Dafür wurde mit dem SPAD-Chlorophyllmeter die Grünfärbung der Variante „N-Expert“ und der reduziert mit N gedüngten Variante („SPAD“) gemessen. In der Variante „SPAD“ wurden die Pflanzen zur Kopfdüngung nur mit 60 % der durch das N-Expert-Verfahren empfohlenen N-Menge gedüngt. Eine zusätzliche N-Düngung sollte erst erfolgen, wenn die Grünfärbung der Variante „SPAD“ unter 95 % des Wertes der Variante „N-Expert“ absinkt. Demgegenüber erfolgte in der Variante 2 eine Düngung ohne Anrechnung des N_{\min} -Gehaltes im Boden („Faustzahlen“).

Tab. 29: Versuchsvarianten des im Jahr 2011 angelegten Exaktversuches auf der Versuchsstation „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer und Varianten mit Messung der Lachgas (N_2O)-Freisetzung durch die AG Ruser.

Variante Nr.	Kurzbezeichnung	Erläuterungen	Messung der N_2O-Freisetzung
1	Ohne N	Kontrollvariante ohne Stickstoffdüngung	X
2	Faustzahlen	Stickstoff-Düngung nach „Faustzahlen“ (N-Düngungsmenge etwa in Höhe des N_{\min} -Sollwertes ohne Anrechnung von N_{\min} im Boden).	X
3	N-Expert	N-Düngung nach dem von der Officialberatung empfohlenen N-Expert-Verfahren).	X
4	SPAD	Verwendung von SPAD-Chlorophyllmeter-Messwerten zur Düngerbedarfsermittlung	
5	ENTEC	Düngung mit stabilisiertem Stickstoffdünger (ENTEC)	X
6	Abfuhr	Abfuhr der Erntereste von Gemüse vom Feld	X
7	Stroh	Strohzufuhr im Herbst zur N-Immobilisierung des Stickstoffs in den Ernteresten	
8	Winterzwischenfrucht	Wintergetreide als Zwischenfrucht bis zum Frühjahr	

Im Jahr 2011 wurde im Versuch ein Satz Gemüse (Blumenkohl) angebaut (Pflanzung am 03.08.2011). Im Jahr 2012 wurden zwei Gemüsesätze angebaut (Eissalat und Brokkoli). Die Pflanzung des ersten Satzes Gemüse im Jahr 2012 (Eissalat) erfolgte am 24.04.2012, der zweite Satz Gemüse (Brokkoli) wurde am 25.07.2012 gepflanzt. Im Jahr 2013 wurde Blumenkohl (Pflanztermin 24.04.2013) und Brokkoli (Pflanztermin 03.07.2013) angebaut. Der Blumenkohl im Jahr 2013 wurde unmittelbar nach der Pflanzung sehr stark durch Taubenfraß geschädigt. Um den Taubenfraß im weiteren Versuchsverlauf zu minimieren wurde ein Fleece aufgelegt. Nach Abnahme des Fleece Ende Mai 2013 zeigten sich jedoch so starke Pflanzenschäden, dass eine Weiterführung und Auswertung dieses Satzes nicht mehr mög-

lich war. Der Versuch wurde am 04.06.2013 abgemulcht. Der zweite Gemüsesatz im Jahr 2013 (Brokkoli) konnte ordnungsgemäß berentet werden.

In der Versuchsvariante 8 (Winterzwischenfrucht) wurde über Winter jeweils Winterweizen eingesät (vgl. Abb. 32). Die Aussaat des Winterweizens erfolgte am 14.12.2011 bzw. 22.11.2012. Im Herbst 2013 wurde die gesamte Versuchsfläche am 17.10.2013 mit Grünroggen (Sorte Bonfire) und Landsberger Gemenge (50 % Welsches Weidelgras, 30 % Inkarntklee; 20 % Winterwicken) eingesät. Die Aussaat erfolgte in Streifen, sodass jede Versuchsparzelle mit beiden Winterzwischenfrüchten bestellt war.

3.1.6.2 Vegetationszeiten

Die Fruchtfolgegestaltung kann von großer Bedeutung für den Gewässerschutz sein, da durch sie sowohl die räumliche Erschließung von Nährstoffen im Boden (Flachwurzler vs. Tiefwurzler) als auch die Zeiträume mit besonders auswaschungsgefährdeten Brachezeiten beeinflusst werden. In dieser Hinsicht unterschieden sich die beiden geprüften Fruchtfolgen sehr deutlich (Abb. 32). Die Fruchtfolge der Versuchsvarianten mit ausschließlichem Gemüsebau (Variante 1 bis 7) wies im 3-jährigen Versuchszeitraum vom 1. Juli 2011 bis 30. Juni 2014 einen durchschnittlichen jährlichen Zeitraum ohne Begrünung von 243 Tagen auf. Dagegen war die durchschnittliche jährliche Brachezeit in der Fruchtfolge mit Winterzwischenfrucht (Variante 8) mit 85 Tagen sehr deutlich verkürzt.

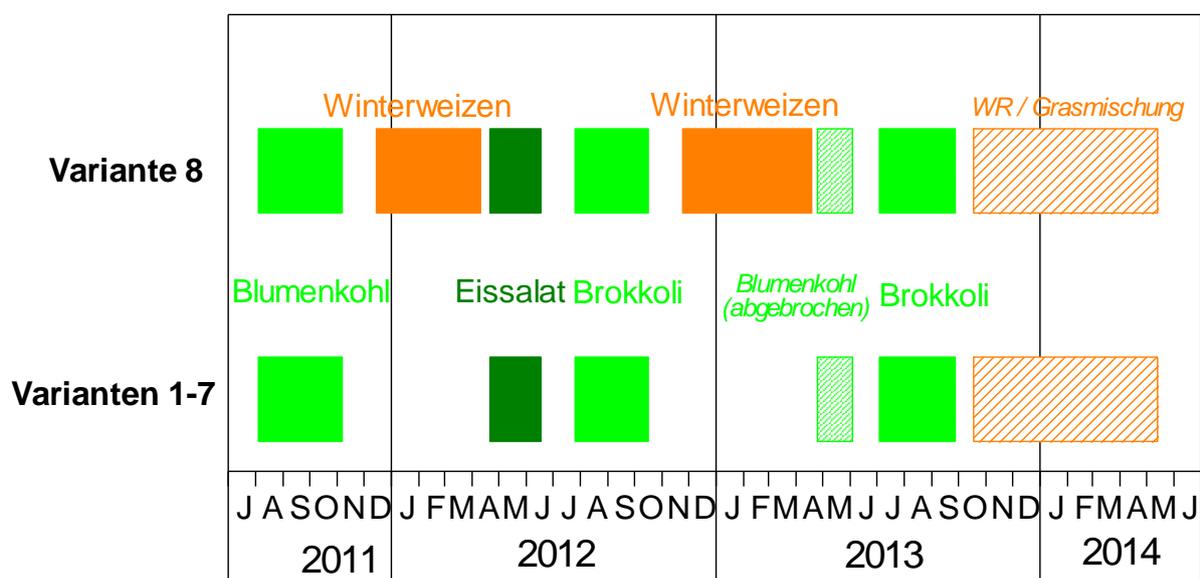


Abb. 32: Vegetationszeiten des im Jahr 2011 angelegten Exaktversuches auf der Versuchsstation „Rinkenbergerhof“ der LUFA Speyer im Zeitraum Juli 2011 – Juni 2013.

3.1.6.3 SPAD-Messwerte

In der Tab. 30 sind die relativen SPAD-Messwerte der Variante „SPAD“ für die im Exaktversuch angebauten Kulturen zusammengestellt. Für die vier angebauten Kulturen wurde zu keinem Termin ein SPAD-Wert unter 95 % der Variante „N-Expert“ gemessen, weshalb keine zusätzliche N-Düngung durchgeführt wurde. Für Eissalat (2012) und Brokkoli (2013) wurden gegen Ende der Vegetationszeit relative SPAD-Werte um 96 % gemessen. Zu diesen Zeitpunkten hatte die Ernte der Kulturen allerdings schon begonnen. Die mittleren relativen SPAD-Messwerte betragen zwischen 99 und 103 % der Werte der Variante „N-Expert“.

Tab. 30: Übersicht der relativen SPAD-Messwerte der Versuchsvariante „SPAD“ (Variante 4) für die Kulturen Blumenkohl (2011), Eissalat (2012) und Brokkoli (2012 bzw. 2013). Als 100 % wurde jeweils der SPAD-Wert der Versuchsvariante 3 („N-Expert“) gesetzt.

Blumenkohl 2011		Eissalat 2012		Brokkoli 2012		Brokkoli 2013	
Datum	SPAD-Wert [%]	Datum	SPAD-Wert [%]	Datum	SPAD-Wert [%]	Datum	SPAD-Wert [%]
07.09.2011	97,1	18.05.2012	104,6	22.08.2012	100,4	02.08.2013	100,4
12.09.2011	97,4	24.05.2012	100,1	29.08.2012	106,0	08.08.2013	98,9
19.09.2011	97,0	04.06.2012	97,8	07.09.2012	96,6	15.08.2013	101,0
26.09.2011	103,7	08.06.2012	96,0	14.09.2012	109,9	21.08.2013	101,0
05.10.2011	101,2			18.09.2012	99,7	27.08.2013	97,2
14.10.2011	99,1			25.09.2012	104,3	11.09.2013	96,8
				02.10.2012	100,6		
<i>Mittelwert</i>	<i>99,3</i>		<i>99,6</i>		<i>102,5</i>		<i>99,2</i>

3.1.6.4 Stickstoffdüngermengen

Die Stickstoff-Düngung zu Gemüse (vgl. Tab. 31) erfolgte in den Varianten 2 bis 4 sowie 6 bis 8 in zwei Gaben (1. Gabe: zur Pflanzung; 2. Gabe: Kopfdüngung in der 3. bis 4. Kulturwoche). Die Düngung des stabilisierten N-Düngers (Variante 5: „ENTEC“) erfolgte jeweils in einer Gabe zur Pflanzung. Die Höhe der N-Düngung nach **Faustzahlen** richtete sich nach dem zu erwartenden N-Entzug der Gemüsekultur zuzüglich eines erforderlichen Rest N_{\min} -Wertes im Boden nach der Ernte.

Im Mittel des Zeitraums 2011-2013 (5 Sätze Gemüse) wurden der Variante „Faustzahlen“ pro Gemüsesatz 269 kg ha^{-1} Stickstoff gedüngt. In den Varianten „N-Expert“ und „ENTEC“ wurden mit 172 bzw. 192 kg ha^{-1} etwa 29-36 % weniger Stickstoff pro Gemüsesatz gedüngt. Für die Versuchsvariante 3 (N-Expert) war im Versuch ursprünglich die identische N-Menge wie in der Variante 5 (ENTEC) vorgesehen. Dies war eine Vorgabe der AG Ruser, da sich für die Lachgasmessungen die Varianten „N-Expert“ und „ENTEC“ nur in der Stickstoffform unterscheiden sollten. Durch den Ausfall des ersten Gemüsesatzes im Jahr 2013, bei welchem schon die volle N-Düngermenge in der Variante 5 (ENTEC) ausgebracht war, konnte diese

Vorgabe im Jahr 2013 nicht mehr umgesetzt werden. Für die ersten beiden Versuchsjahre (die ersten drei Gemüsesätze des Versuches) würde die konsequente Anwendung des N-Expert-Verfahrens (Bemessung der Kopfdüngergabe anhand einer N_{\min} -Messung zu diesem Termin) für die Versuchsvariante 2 zu einer durchschnittlichen N-Düngermenge pro Gemüsesatz von 140 kg ha^{-1} führen, was etwa 50 % der N-Menge nach Faustzahlen entsprechen würde.

Die Variante „**SPAD**“ erhielt zur Kopfdüngung nur 60 % der nach N_{\min} -Sollwert erforderlichen Stickstoff-Menge. Aufgrund der durchgeführten SPAD-Messungen wurde trotz dieser geringeren N-Düngermenge bei allen Kulturen keine weitere N-Düngung durchgeführt. Mit durchschnittlich 117 kg N ha^{-1} wurden in der Variante „SPAD“ pro Gemüsesatz etwa 43 % der N-Menge der Variante „Faustzahlen“ gedüngt. Die **Abfuhr** der Erntereste (Variante 6) erforderte eine höhere N-Düngung (191 kg N ha^{-1}). Bei Anbau einer **Winterzwischenfrucht** (Variante 8) wie bei Zufuhr von **Stroh** (Variante 7) wurden mit durchschnittlich 174 bzw. 179 kg N ha^{-1} pro Gemüsesatz dagegen vergleichbare Mengen wie in der Variante N-Expert gedüngt.

Tab. 31: Stickstoff-Düngermengen (kg N ha^{-1}) im Exaktversuch der LUFA Speyer im Zeitraum 2011-2013.

Variante	Kurzbezeichnung	Blumenkohl 2011	Eissalat 1. Satz 2012	Brokkoli 2. Satz 2012	Blumenkohl 1. Satz 2013	Brokkoli 2. Satz 2013	Mittelwert pro Kultur <i>(in Klammer Anteil von Faustzahlen)</i>
1	Ohne N	0	0	0	0	0	0
2	Faustzahlen	375	170	310	180	310	269 (100 %)
3	N-Expert	275	75	190	60	260	172 (64 %)
4	SPAD	215	10	120	60	180	117 (43 %)
5	ENTEC	275	75	190	250	170	192 (71 %)
6	Abfuhr	275	85	250	75	270	191 (71 %)
7	Stroh	275	110	190	70	250	179 (67 %)
8	Winterzwischenfrucht	275	65	190	80	260	174 (65 %)

3.1.6.5 Erträge der Gemüsekulturen

In der Abb. 33 sind die durchschnittlichen Erträge der angebauten Kulturen im Zeitraum 2011-2013 (Blumenkohl, Eissalat sowie 2 Sätze Brokkoli) dargestellt. Der nicht abgeerntete 1. Satz Blumenkohl im Jahr 2013 ist nicht berücksichtigt. Ohne Stickstoffdüngung betrug der mittlere Gesamtaufwuchs pro geerntete Kultur 413 dt ha^{-1} Frischmasse (FM). Die höchsten Aufwüchse wurden mit ca. 800 dt ha^{-1} FM bei Düngung nach Faustzahlen, Strohapplikation und Winterzwischenfrucht gemessen. Der Gesamtaufwuchs pro Kultur der Varianten „N-Expert“ und „SPAD“ betrug 731 bzw. 732 dt ha^{-1} FM in der Variante „Abfuhr“ dagegen 759

dt ha⁻¹ FM. Der niedrigste Gesamtaufwuchs wurde in der Versuchsvariante mit stabilisiertem Stickstoffdünger („ENTEC“) mit 725 dt ha⁻¹ FM gemessen.

Der vermarktungsfähige Anteil (Variante 1 ohne N-Düngung nicht berücksichtigt) lag mit 262 bis 309 dt ha⁻¹ FM zwischen 36 und 39 % des Gesamtaufwuchses. Die höchsten Markterträge wurden in den Varianten Faustzahlen (299 dt ha⁻¹ FM), Stroh (301 dt ha⁻¹ FM) und Winterzwischenfrucht (310 dt ha⁻¹ FM) gemessen. Die niedrigsten Markterträge wurden 262 dt ha⁻¹ FM in der Variante „ENTEC“ ermittelt. Die Markterträge der Varianten „N-Expert“, „SPAD“ und „Abfuhr“ betragen zwischen 278 und 286 dt ha⁻¹ FM.

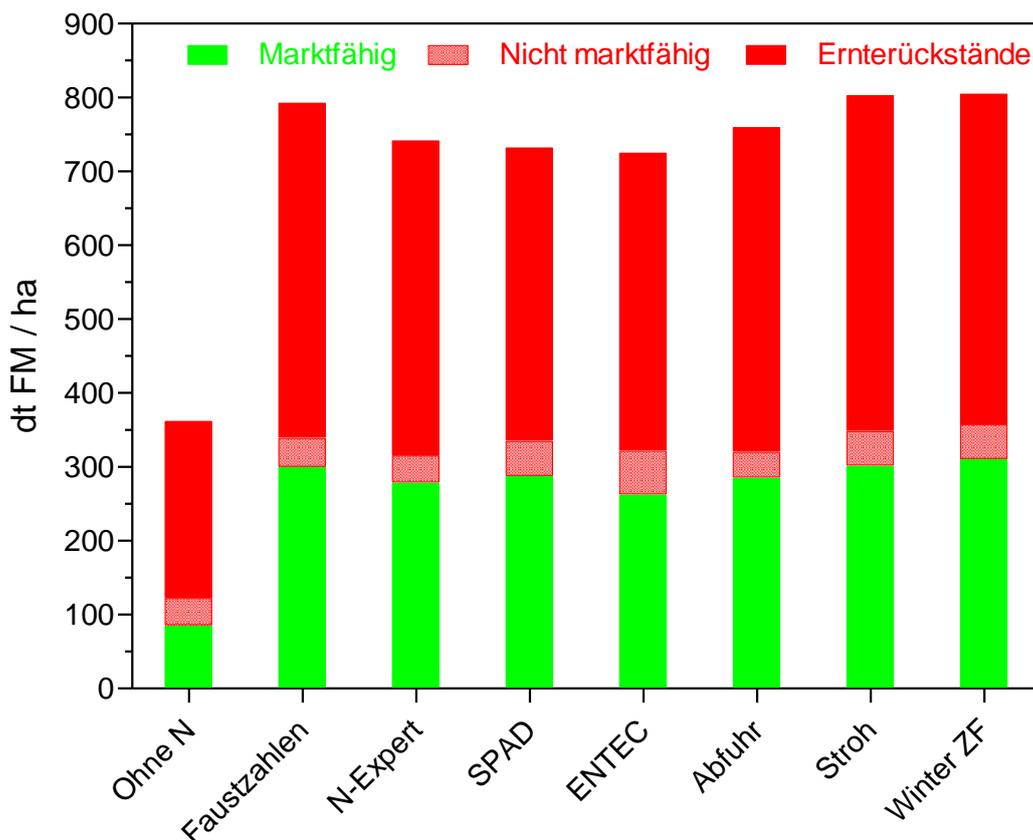


Abb. 33: Gesamt-Erträge sowie Anteile von nicht marktfähiger Ware und Ernterückständen im Zeitraum 2011-2013 im Exaktversuch auf der Versuchsstation der LUFA Speyer. Angaben in dt Frischmasse (FM) pro Hektar, Mittelwerte aus 4 Sätzen Gemüse (Blumenkohl, Eissalat und zwei Sätze Brokkoli; ohne 1. Satz Blumenkohl 2013).

In der Abb. 34 ist der Anteil vermarktungsfähiger Ware im Mittel der vier untersuchten Gemüsesätze dargestellt. Ohne Stickstoffdüngung wurde ein mittlerer Anteil vermarktungsfähiger Ware von 16 % ermittelt. Allerdings wurde ohne Stickstoffdüngung nur bei der Kultur Eissalat vermarktungsfähiger Ware (63 %) erzielt, Blumenkohl und Brokkoli hatten ohne Stickstoffdüngung keine vermarktungsfähige Ware. Im Mittel wurde in den Varianten mit N-Düngung ein vermarktungsfähiger Anteil von 73 % ermittelt. Der Anteil vermarktungsfähiger Ware war in der Varianten „ENTEC“ mit 69 % am geringsten, die höchsten vermarktungsfähigen Anteile wurden mit 75-76 % in den Varianten „Abfuhr“ und „Winterzwischenfrucht“

(Winter-ZF) ermittelt. Die weiteren Versuchsvarianten („Faustzahlen“, „N-Expert“, „SPAD“, „Stroh“) wiesen im Mittel des Versuchszeitraumes vermarktungsfähige Anteile zwischen 72 und 74 % auf.

Bei den Einzelkulturen (nicht dargestellt) wurde im Mittel der Varianten 2 bis 8 bei Eissalat mit 94 % der höchste vermarktungsfähige Anteil ermittelt. Bei Blumenkohl und den beiden Sätzen Brokkoli war dieser mit 68 sowie 74 bzw. 58 % dagegen deutlich geringer.

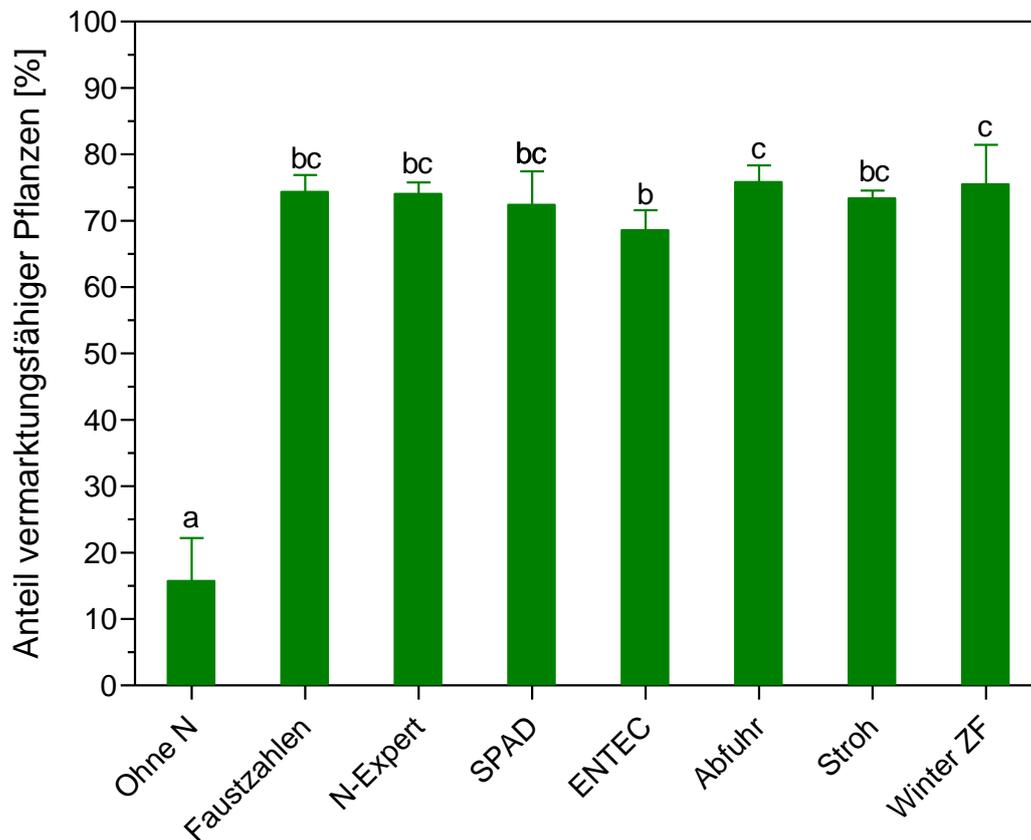


Abb. 34: Anteil vermarktungsfähiger Pflanzen im Exaktversuch auf der Versuchsstation der LUFA Speyer im Zeitraum 2011-2013. Mittelwerte aus 4 Sätzen Gemüse (Blumenkohl, Eissalat und zwei Sätze Brokkoli; ohne 1. Satz Blumenkohl 2013).

3.1.6.6 Erträge und N-Aufnahme der Winterzwischenfrucht

Der Frischmasseertrag der Winterzwischenfrucht Winterweizen betrug in den beiden Versuchsjahren 28 bzw. 29 dt FM ha⁻¹; der Trockenmasseertrag 5 bzw. 7 dt TM ha⁻¹ (Tab. 32). Bis zur Ertragserhebung bzw. dem nachfolgenden Umbruch Mitte April betrug die N-Aufnahme 23 bzw. 26 kg N ha⁻¹. Die N-Aufnahme ist aufgrund des frühen Umbruchtermins, welcher wegen des nachfolgenden ersten Gemüsesatzes erforderlich war, vergleichsweise gering. Bei Anbau der Winterzwischenfrüchte Gerste und Roggen wurden in einem Vorgängerprojekt bei einem Umbruchtermin Mitte Mai mit 59 bis 76 kg N ha⁻¹ wesentlich höhere N-Aufnahmen ermittelt (Armbruster et al., 2012).

Tab. 32: Erträge und N-Aufnahme der Winterzwischenfrucht (Winterweizen, Variante 8 des Exaktversuches).

Periode	Aussattermin	Ertragserhebung / Umbruch	Frischmasse-	Trockenmasse-	N-
			Ertrag (dt FM ha ⁻¹)	Ertrag (dt TM ha ⁻¹)	Aufnahme (kg N ha ⁻¹)
2011/2012	14.12.2011	11.04.2012	28,0	5,0	22,5
2012/2013	22.11.2012	18.04.2013	28,9	7,2	26,2
<i>Mittelwert</i>			28,4	6,1	24,3

3.1.6.7 N_{min} -Restmengen zu Vegetationsende

In Abb. 35 sind die mittleren N_{min} -Restmengen zu Vegetationsende im Zeitraum 2011 bis 2013 dargestellt. Ohne N-Düngung wurde in 0 bis 90 cm Bodentiefe ein N_{min} -Wert von unter 20 kg N ha⁻¹ gemessen. Bei Düngung nach Faustzahlen wurden im Mittel der beiden Jahre nach der Ernte ca. 70 kg N ha⁻¹ in 0 bis 90 cm Bodentiefe gemessen, während bei Düngung nach N-Expert mit etwa 37 kg N ha⁻¹ deutlich niedrigere Werte ermittelt wurden. Die reduzierte Stickstoffdüngermenge der Variante „SPAD“ zeigte sich auch in geringeren N_{min} -Werten im Boden (28 kg N ha⁻¹). Die N_{min} -Restmengen nach der Ernte der Versuchsvarianten „ENTEC“, „Stroh“ und Winterzwischenfrucht unterschieden sich mit 34 bis 35 kg N ha⁻¹ nur wenig von denen der Variante N-Expert. Die N_{min} -Restmengen der Variante „Abfuhr“ waren mit 31 kg N ha⁻¹ nur tendenziell etwas niedriger, obwohl diese Variante den niedrigsten N-Bilanzüberschuss aller Versuchsvarianten aufwies.

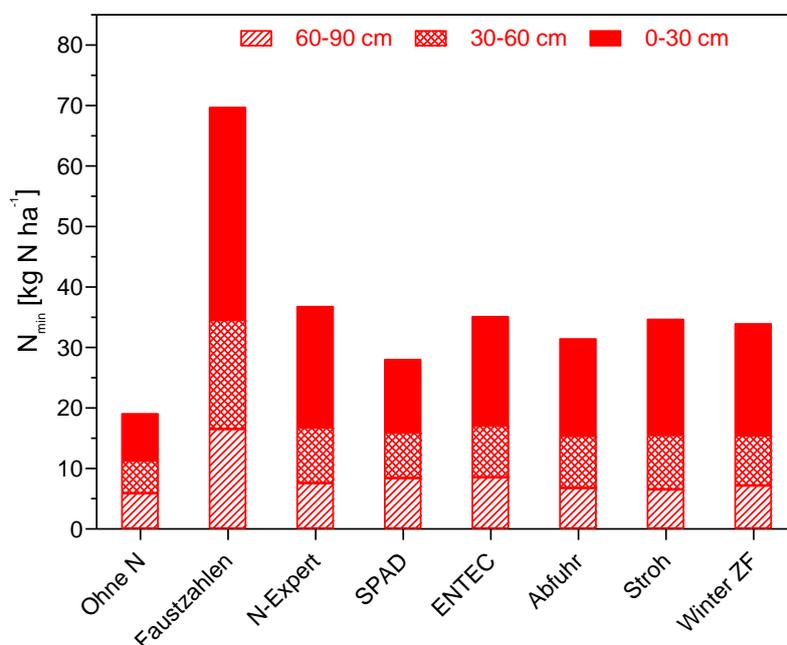


Abb. 35: Mittlere N_{min} -Restmengen in 0-90 cm Bodentiefe nach Vegetationsende der Versuchsjahre 2011-2013 im Exaktversuch auf der Versuchsstation der LUFA Speyer.

3.1.6.8 N-Aufnahme der Gemüsekulturen und N-Bilanzüberschuss

Für den Untersuchungszeitraum 2011-2013 wurden die mittlere N-Aufnahme und die N-Bilanzen (N-Düngung – N-Entzug) pro Gemüsesatz berechnet. Dabei ist in die Berechnung der N-Bilanz auch der nicht abgeerntete aber teilweise gedüngte 1. Satz Blumenkohl eingeflossen (Tab. 33). Die durchschnittliche N-Aufnahme pro Gemüsesatz betrug ohne N-Düngung 51 kg N ha⁻¹. Bei Eissalat wurde vermarktungsfähige Ware auch in der Variante ohne N-Düngung abgefahren, sodass sich eine negative N-Bilanz von -6 kg N ha⁻¹ pro Gemüsesatz berechnet. In den Varianten 2 bis 8 mit mineralischer Stickstoffdüngung betrug die durchschnittliche N-Aufnahme pro Gemüsesatz zwischen 159 und 202 kg N ha⁻¹. Die N-Aufnahme der marktfähigen Ware betrug mit 49 bis 65 kg N ha⁻¹ zwischen 31 und 34 % der Gesamtstickstoffaufnahme. Mit den Ernterückständen verblieben pro Satz in den stickstoffgedüngten Varianten durchschnittlich zwischen 105 und 138 kg N ha⁻¹ auf dem Feld. Bei Verbleib der Ernterückstände wurde der höchste Bilanzüberschuss mit 204 kg N ha⁻¹ pro Gemüsesatz in der Variante „Faustzahlen“ gemessen. Der Bilanzüberschuss der Varianten „N-Expert“, „ENTEC“, „Stroh“ und „Zwischenfrucht“ war mit 113 bis 143 kg N ha⁻¹ deutlich niedriger, wobei die Variante „ENTEC“ den höchsten Wert aufwies. Die Varianten „N-Expert“, „Stroh“ und „Zwischenfrucht“ wiesen nur geringe Unterschiede im N-Bilanzüberschuss auf. Bei Verbleib der Ernterückstände wurde die niedrigste N-Bilanz pro Gemüsesatz mit 63 kg N ha⁻¹ in der Variante SPAD ermittelt. Bei Abfuhr der Ernterückstände und Düngerbedarfsermittlung nach N-Expert wurde im Durchschnitt pro Satz eine leicht positive N-Bilanz von 13 kg N ha⁻¹ ermittelt.

Tab. 33: Durchschnittliche Stickstoffdüngermengen, N-Aufnahmen, N-Entzüge sowie N-Bilanzen im Zeitraum 2011-2013 (Exaktversuch der Versuchsstation der LUFA Speyer). Alle Angaben in kg N ha⁻¹ pro Gemüsesatz.

Variante	Kurzbezeichnung	Düngung	N-Aufnahme Gesamt (Marktware)	N-Entzug	N-Bilanz (in Klammer Anteil von Faustzahlen)
1	Ohne N	0	51 (6)	6	-6
2	Faustzahlen	269	202 (65)	65	204(100 %)
3	N-Expert	172	176 (59)	59	113 (55 %)
4	SPAD	117	159 (55)	55	63 (31 %)
5	ENTEC	192	160 (49)	49	143 (70 %)
6	Abfuhr	191	178 (58)	178	13 (6 %)
7	Stroh	179	174 (56)	56	123 (60 %)
8	Winterzwischenfrucht	174	184 (61)	61	113 (55 %)

3.1.6.9 Erträge und N-Aufnahme von Zwischenfrüchten nach 3-jährigem Anbau von Gemüse

Nach Abschluss des Gemüseanbaus im Herbst 2013 wurde in jeder der Versuchsvarianten Grünroggen und Landsberger Gemenge als Zwischenfrucht angebaut. Am 14.05.2014 wurden der Ertrag der beiden Zwischenfrüchte und die N-Aufnahme ermittelt (Tab. 34). Bei einem durchschnittlichen N_{\min} -Gehalt in 0-90 cm Bodentiefe nach der Ernte des Gemüses im Jahr 2013 von 36 kg N ha^{-1} wurde bei Grünroggen ein mittlerer Frisch- bzw. Trockenmasseertrag von 142 bzw. 72 dt ha^{-1} und eine N-Aufnahme von 40 kg N ha^{-1} ermittelt. Das Landsberger Gemenge wies einen höheren Frischmasseertrag (192 dt ha^{-1}), einen geringeren Trockenmasseertrag (61 dt ha^{-1}) und aufgrund höherer N-Gehalte in der Biomasse eine deutlich höhere N-Aufnahme (100 kg N ha^{-1}) auf. Für beide Zwischenfrüchte ist ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem N_{\min} -Gehalt nach der Ernte und dem Ertrag bzw. der N-Aufnahme zu erkennen. In der Abb. 36 ist die Beziehung zur N-Aufnahme dargestellt. Diese ist für Grünroggen erwartungsgemäß enger als für das leguminosenhaltige Landsberger Gemenge.

Tab. 34: N_{\min} -Werte nach der Ernte im Jahr 2013 sowie Erträge (FM: Frischmasse; TM: Trockenmasse) sowie N-Aufnahmen der nach 3-jährigem Gemüseanbau angebaute Zwischenfrüchte (Aussaat 17.10.2013; Ernte 14.05.2014).

Variante	N_{\min} nach Ernte 2013 (kg N ha^{-1})	Grünroggen			Landsberger Gemenge		
		FM-Ertrag (dt ha^{-1})	TM-Ertrag (dt ha^{-1})	N-Aufnahme (kg N ha^{-1})	FM-Ertrag (dt ha^{-1})	TM-Ertrag (dt ha^{-1})	N-Aufnahme (kg N ha^{-1})
1	19,8	98,2	47,1	29,4	133,7	41,6	72,4
2	54,5	158,0	83,3	47,6	216,4	69,6	111,8
3	39,1	153,7	83,5	42,3	202,9	63,6	99,5
4	27,1	145,6	72,6	40,6	196,6	62,8	100,1
5	38,5	158,7	75,6	43,7	216,5	68,5	104,0
6	29,2	96,7	50,3	32,9	130,6	45,6	72,2
7	39,4	167,2	83,8	47,6	228,3	70,3	123,7
8	37,6	155,5	79,2	39,5	208,3	67,5	113,6
Mittelwert	35,7	141,7	71,9	40,4	191,7	61,2	99,7

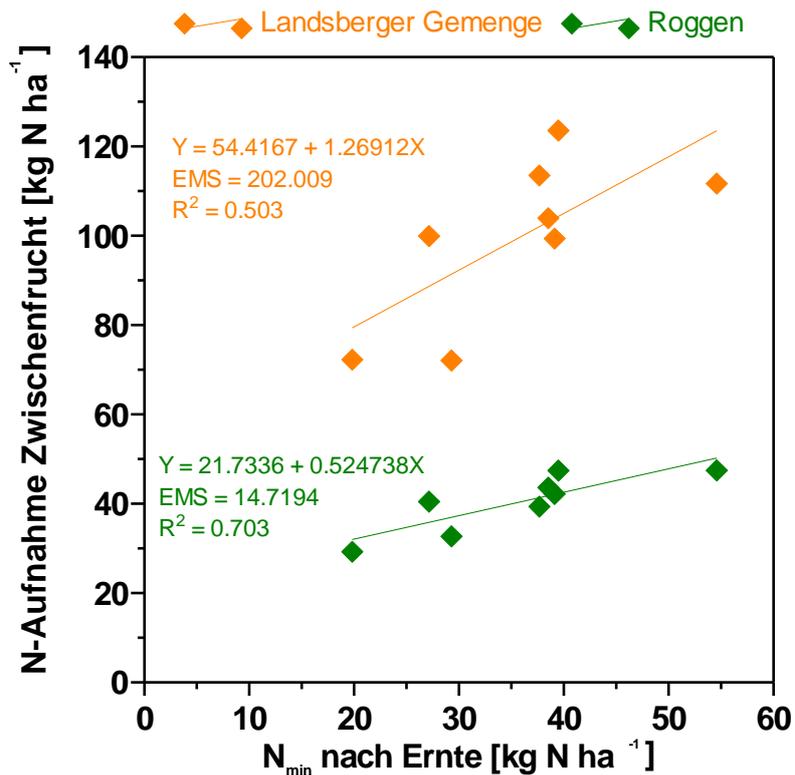


Abb. 36: Beziehung zwischen dem N_{min}-Gehalt nach der Ernte der Gemüsevorkultur (Herbst 2013) und der N-Aufnahme der Zwischenfrucht Grünroggen bzw. Landsberger Gemenge. Exaktversuch auf der Versuchsstation der LUFA Speyer.

3.1.6.10 Schlussfolgerungen zum Exaktversuch der LUFA Speyer im Zeitraum 2011-2013

Trotz deutlicher Unterschiede in den Düngeraufwandmengen unterschied sich der Anteil vermarktungsfähiger Ware zwischen den mit Stickstoff gedüngten Varianten nur geringfügig. Allenfalls die mit stabilisiertem Stickstoff gedüngte Variante („ENTEC“) zeigte tendenziell niedrigere Anteile an vermarktungsfähiger Ware. Durch eine treffsichere Ermittlung des Düngerbedarfs mittels Bodenuntersuchung (Variante „N-Expert“) oder Pflanzendiagnose (Variante „SPAD“) wurden im Vergleich zur Düngung nach Faustzahlen ohne Ertrags- und Qualitätseinbußen der Ernteprodukte daher erhebliche Mengen an N-Dünger eingespart und N-Bilanzüberschüsse abgebaut.

Die Versuchsvarianten mit Strohzufuhr („Stroh“) und Winterzwischenfruchtanbau („Winterzwischenfrucht“) wiesen der mit erheblich höheren N-Mengen gedüngten Variante Faustzahlen vergleichbare absolute Frischmasse-Markterträge auf. Die Versuchsvariante mit Abfuhr der Ernterückstände wies erwartungsgemäß die niedrigsten N-Bilanzüberschüsse auf. Ein in Vorgängerprojekten beobachteter negativer Einfluss der Abfuhr der Ernterückstände auf den Anteil marktfähiger Ware wurde aufgrund der vergleichsweise kurzen Versuchsdauer nicht festgestellt.

3.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Auswertungen zum „Ist-Zustand“ der N-Bilanzüberschüsse auf Gemüsebaubetrieben in der Pfalz weisen deutlich auf die bestehende Stickstoff-Problematik im Freilandgemüsebau der Region hin. Derzeit ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Anteil intensiv wirtschaftender Gemüsebaubetriebe (Gemüseanbaufläche >70 %) die von der aktuell gültigen Düngerverordnung zulässigen N-Bilanzüberschüsse nicht einhält. Besonders ausgeprägt ist diese Problematik in Betrieben die sich auf den Anbau von Kohlarten mit hohem Anteil an Stickstoff in den Ernterückständen oder einem hohen Anteil von Flachwurzlern in der Fruchtfolge spezialisiert haben. Gleichzeitig haben die Versuchsergebnisse auf den Praxisflächen gezeigt, dass allein durch die konsequente Anwendung des N-Expert-Verfahrens zur N-Düngerbedarfsermittlung die N-Bilanzüberschüsse ohne Ertragsverluste um 20 bis 30 % vermindert werden können. Mit Verfahren bei dem die Pflanze als Indikator für den N-Versorgungsgrad dient (z. B. „SPAD“-Verfahren) ist eine weitere Verminderung der N-Überschüsse möglich. Neben der N-Düngerbedarfsermittlung bestehen allerdings weitere Potentiale etwa durch die Integration von Zwischenfrüchten, die Etablierung von Gemüse- / Getreidefruchtfolgen oder das Management der Ernterückstände. Durch die Kombination verschiedener Maßnahmen („integriertes Stickstoffmanagement“) ist von einer weiteren wesentlichen Verminderung von Stickstoffbilanzüberschüssen und damit dem Rückgang der Gefährdung des Grundwassers durch diffuse Stickstoffeinträge auszugehen. Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse sind daher von hohem Nutzen für die zukünftig verstärkte Anwendung dieser Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen im praktischen Freilandgemüsebau, da sie zeigen, dass deren Umsetzung auch auf Praxisflächen i. d. R. ohne Ertrags- oder Qualitätsverluste möglich ist.

Die Projektergebnisse können dazu beitragen, die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von Umweltauflagen im Bereich des Freilandgemüsebaus zu quantifizieren und können dadurch voraussichtlich zukünftig die Weiterentwicklung der Düngerverordnung in diesem Bereich unterstützen.

4. Zusammenfassung

Für die Beurteilung der fach- und umweltgerechten Stickstoffdüngung werden im Rahmen der Düngeverordnung durch einen Nährstoffvergleich (N-Saldo) „unvermeidliche Verluste“ für den Gemüsebau spezifiziert, die einen erheblichen Einfluss auf Praxis, Beratung und Kontrolle in den Ländern ausüben. Im Teilprojekt „Strategien zur Verminderung von N-Bilanz Saldo und N-Auswaschung in Praxisbetrieben der Pfalz“ wurden im Rahmen des Verbundprojektes „Entwicklung eines integrierten Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau zur Vermeidung von Stickstoffüberschüssen“ im Zeitraum 2011 bis 2014 auf 5 intensiv wirtschaftenden Gemüsebaubetrieben in der Pfalz Maßnahmen zur Verminderung der N-Überschüsse geprüft. Diese umfassten die Optimierung der N-Düngerbedarfsermittlung, die platzierte Düngung, den Einsatz von N-stabilisierten Düngern, die Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge sowie die verbesserte Steuerung der Beregnung.

Im Rahmen des Projektes ausgewertete Erhebungen zum N-Bilanzüberschuss auf den 5 Betrieben sowie einer größeren Zahl von Betrieben aus dem Gebiet der Vorderpfalz weisen darauf hin, dass derzeit ein erheblicher Anteil der Betriebe die aktuell gültigen Vorgaben der Düngeverordnung hinsichtlich des zulässigen N-Bilanzüberschusses nicht einhält. Durch den konsequenten Einsatz des N-Expert-Verfahrens zur **N-Düngerbedarfsermittlung** konnte gegenüber der betriebsüblichen N-Düngung im Mittel 20 % der N-Düngermenge eingespart werden, ohne dass es zu einer Verminderung des Ertrags oder der Qualität kam. Bei Verwendung der „SPAD-Methode“ konnten nochmals 20 % an N-Dünger eingespart werden. Die N-Bilanzüberschüsse konnten durch die optimierte N-Düngung in fast identischer Größenordnung vermindert werden.

Hinsichtlich der **N-Düngerform** sowie der **platzierten N-Düngung**, die jeweils nur in einem Versuch untersucht werden konnte, wurden keine Unterschiede im Vergleich zur „konventionellen“ N-Düngung festgestellt. So waren bei vergleichbaren Erträgen sowohl die N_{\min} -Restmengen als auch die N-Bilanzüberschüsse beider N-Düngerformen nahezu identisch. Auch die platzierte N-Düngung führte bei gleicher N-Düngung nicht zu einer Verminderung der N-Bilanzüberschüsse.

Die Versuche zur **Beregnungssteuerung** zeigten bei ähnlicher Höhe der Beregnungsmengen fast identische Ergebnisse. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den betrachteten Versuchen der Betrieb offensichtlich seine Beregnung aktuell schon optimiert steuert.

Die Ergebnisse zum **Zwischenfruchtanbau** weisen deutlich auf die Potentiale einer Sommerbegrünung zur Verminderung der N_{\min} -Restmengen vor Winter und dadurch auch auf eine potentielle Verminderung der N-Auswaschungsverluste über Winter hin.

Maßnahmen, die zu einer Verminderung der N-Bilanzüberschüsse führen, vermindern mittel- bis langfristig die **N-Auswaschung** in das Grundwasser. Für die unmittelbar nach den Versuchen zur Düngerbedarfsermittlung auf Praxisflächen untersuchten N-Austräge mit dem

Sickerwasser konnte in den meisten Versuche eine Verminderung im N-Austrag in 70 cm Bodentiefe schon kurzfristig nachgewiesen werden. Die Messungen der **Lachgasemissionen** auf zwei Praxisflächen mit Gemüseanbau bestätigten die auf Versuchsbetrieben ermittelte Größenordnung der N₂O-Verluste. Es konnte allerdings nur in einem Versuch eine tendenzielle Abnahme der N₂O-Emissionen bei optimierter N-Düngerbedarfsermittlung gezeigt werden.

Mit Hilfe von **N-Mineralisationsversuchen** an Bodensäulen im Freiland konnte gezeigt werden, dass für die untersuchten Standorte mit Gemüseanbau von einer wöchentlichen N-Mineralisierung in der Größenordnung von 2 bis 10 kg N ha⁻¹ auszugehen ist. Diese im Freiland ermittelten Mineralisationspotentiale konnten nicht ausreichend durch eine Laboruntersuchung zum N-Mineralisationspotential (anaerober Brutversuch) vorhergesagt werden. Allerdings konnten tendenzielle Beziehungen zwischen den Laborergebnissen und Bodenparametern (Humus- und Stickstoffgehalt, Bodenart, pH-Wert) gezeigt werden. Die weitere Untersuchung dieser Wechselwirkungen in zusätzlichen Versuchen ist daher als vielversprechend anzusehen um zukünftig die N-Nachlieferung eines Standortes besser für die N-Düngerbedarfsermittlung berücksichtigen zu können.

Ergänzend zu den Versuchen auf Praxisflächen wurde auf der **Versuchsstation „Rinkenbergerhof“** der LUFA Speyer im Zeitraum 2011-2014 ein **Exaktversuch** mit Gemüseanbau durchgeführt. Die hier gezeigten Einsparpotentiale an N-Dünger durch eine optimierte N-Düngerbedarfsermittlung und damit auch die Verminderung der N-Bilanzüberschüssen waren größer als in den Versuchen in den Betrieben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der im Exaktversuch verwendeten Vergleichsvariante (N-Düngung nach „Faustzahlen“) der N_{min}-Gehalt im Boden bei der Düngerbedarfsermittlung nicht berücksichtigt wurde, während dieser bei der betriebsüblichen N-Düngung von den Betrieben zumindest teilweise berücksichtigt wurde. Die Abfuhr der Ernterückstände von Gemüse erwies sich als effektivste Maßnahme zur Verminderung der N-Bilanzüberschüsse. Allerdings ist zu beachten, dass die Abfuhr der Ernterückstände ohne Berücksichtigung des Humusersatzes langfristig nicht nachhaltig ist (vgl. Agneessens et al., 2014). Darauf weisen z. B. niedrigere Erträge der Variante „Abfuhr der Ernterückstände“ in einem länger andauernden Versuch klar hin (Armbruster et al. 2012). Bei der vergleichsweise kurzen Versuchsdauer konnten durch die Varianten „Winterzwischenfrucht“ sowie „Einarbeitung von Stroh“ keine zusätzlichen Verbesserungen hinsichtlich der N-Bilanzüberschüsse nachgewiesen werden. Höhere Gesamtbiomasseaufwüchse in diesen Varianten können allerdings als Hinweis auf eine verbesserte Bodenstruktur gewertet werden.

Insgesamt zeigen die vorgestellten Ergebnisse, dass bei Kulturen, die als problematisch für den Gewässerschutz gelten, durch die Kombination verschiedener Maßnahmen („integriertes Stickstoffmanagement“) auf den Betrieben eine wesentliche Verminderung von Stickstoffbilanzüberschüssen und damit der Gefährdung des Grundwassers durch diffuse Stickstoffeinträge möglich ist.

5. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen

Das im Zeitraum Dezember 2010 bis Oktober 2014 durchgeführte Vorhaben hatte folgende Ziele:

1. Überprüfung der in der Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S.221) in Anlage 6 Zeilen 12 bis 14 den Betrieben des Erwerbsgartenbaues zugestandenen Überschüsse auf Realisierung und Realisierbarkeit.
2. Klärung der Fragestellung, in wie weit in Gemüsebaubetrieben der Pfalz durch gezielte Maßnahmen eine Absenkung „unvermeidlicher“ N-Saldo Überschüsse möglich ist. Dafür sollten Strategien (Einzel- oder Kombinationsmaßnahme) zu i) der Ermittlung des Düngerbedarfs, ii) der Veränderung der Düngetechnik und Düngeform, iii) dem Management der Ernterückstände, iv) der Integration von Zwischenfrüchten bzw. der Veränderung der Fruchtfolge sowie v) der Beregnungssteuerung in Betracht gezogen werden.

Die unter **Punkt 1** genannten geplanten Ziele wurden im Rahmen des Vorhabens fast vollständig erreicht. Im Ergebnisteil zu den mittleren N-Bilanzüberschüssen der Region sowie den spezifischen Bilanzwerten der kooperierenden Betriebe (vgl. Kap. 3.1.1) wurde der Grad der Realisierung für den Erwerbsgartenbau der Pfalz beschrieben. Die Versuchsergebnisse auf den Betrieben (vgl. Kap. 3.1.2 bis 3.1.4) sowie **ergänzende** Exaktversuche (vgl. Kap. 3.1.6) liefern Hinweise, bis zu welchem Grad eine Absenkung der N-Bilanzüberschüsse möglich ist. Für eine weitergehende Überprüfung der Realisierbarkeit – auch vor dem Hintergrund einer „Erfolgskontrolle“ – ist die längerfristige Untersuchung von „Modellbetrieben“ bzw. „Modellregionen“ anzuraten (vgl. unten).

Die Ziele zu **Punkt 2** konnten nicht in allen Punkten allumfassend erreicht werden. So konnte etwa die Untersuchung der Wirkung der Kombination von Maßnahmen auf den Betrieben nicht durchgeführt werden. Ebenso waren die Maßnahmen zum Management der Ernterückstände sowie der Gestaltung der Fruchtfolge nicht bzw. nur unvollständig auf den Betrieben realisierbar. Diese Defizite konnten zwar teilweise durch die **zusätzlichen Untersuchungen** in einem **Exaktversuch** geschlossen werden, deren abschließende Bewertung erfordert allerdings längerfristige Untersuchungen (siehe oben sowie bei den Hinweisen zu weiterführenden Maßnahmen). Im Rahmen des Vorhabens wurde die Erfassung der standortsspezifischen N-Mineralisierung als wichtige Größe für die Optimierung der N-Düngerbedarfsermittlung erkannt und es wurden **zusätzliche Detailuntersuchungen** hierüber **durchgeführt**. Im Ergebnis konnten erste Ansätze für deren Berücksichtigung bei der N-Düngerbedarfsermittlung aufgezeigt werden. **Zusätzlich** zu den geplanten Zielen konnten durch die Kooperation mit der AG Ruser (Uni Hohenheim) die **Lachgasemissionen** auf zwei

Praxisflächen in der Pfalz untersucht werden. Diese **ergänzen** die Ergebnisse der N₂O-Emissionsmessungen der Projektpartner IGZ (Großbeeren) bzw. Uni Hohenheim (AG Ruser), welche auf **Versuchsflächen** der Partner durchgeführt wurden, um die Werte einer Praxisfläche mit Gemüseanbau.

Aufbauend auf den im Projekt erzielten Ergebnissen ist die Untersuchung folgender **weiterführenden Fragestellungen** anzuraten:

- Etablierung eines „Modellbetriebes“ bzw. einer „Modellregion“ zur mittel- bis langfristigen Untersuchung des „integrierten N-Managements“ im Gemüsebau.
Dafür sollten ein oder mehrere Gemüsebaubetriebe dazu gewonnen werden Maßnahmenkombinationen auch langfristig durchzuführen und begleitend untersuchen zu lassen. Über die (mittel- bis langfristig) erfassten N-Bilanzüberschüsse sowie begleitende ökonomische Betrachtungen ist dann eine „Erfolgskontrolle“ der Maßnahmen möglich. Ergänzt werden sollten diese Untersuchungen mit Messungen zu den Nitratkonzentrationen im Sickerwasser und im idealerweise dem Betrieb bzw. der Region zuordenbaren Grundwasserkörper. Dabei sind im Grundwasser erst langfristig Auswirkungen zu erwarten. Zusätzlich sollten Modellrechnungen durchgeführt werden und diese mit den Ergebnissen verglichen werden. Zukünftig wäre dann die Übertragung und Abschätzung der Auswirkung von Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen in die Fläche möglich. Erste Ansätze und Ergebnisse für eine solche Vorgehensweise finden sich in Armbruster et al. (2012).
- Weiterführende Untersuchungen zum N-Mineralisationspotential von Gemüsebauflächen und deren Einbeziehung in die N-Düngerbedarfsermittlung.
Die Erfassung und Bewertung der N-Mineralisierung eines Standortes ist eine wichtige Größe, deren Einbeziehung in die N-Düngerbedarfsermittlung zur Verminderung der N-Überschüsse im Freilandgemüsebau beitragen kann. Die im Projekt verwendete Labormethode erwies sich bislang nicht als zufriedenstellend hierfür geeignet. Weitere Einflussfaktoren, wie etwa der aktuelle Temperaturverlauf in Wechselwirkung mit den jeweiligen Bodenparametern sind offensichtlich ebenfalls entscheidend für die Höhe der aktuellen N-Mineralisierung. Diese Wechselwirkungen sollten zukünftig in Detailuntersuchungen und Modellierungsansätzen auf Gemüseflächen verfolgt werden. Neben „klassischen“ Bodenparametern sind auch Methoden der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) mit in diese Untersuchungen einzubeziehen.

6. Literaturverzeichnis

- Agneessens, L.; De Waele, J.; De Neve, S. (2014): Review of alternative management options of vegetable crop residues to reduce nitrate leaching in intensive vegetable rotations. *Agronomy* 4: 529-555.
- AID Infodienst (2005): Vermarktungsnormen für Obst und Gemüse. AID-Heft 1363/2005, Bonn.
- Allen, R. G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. United Nations FAO, Irrigation and Drainage, N.Y., Paper No. 56.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Wiesler, F. (2012): Entwicklung eines Stickstoff-Managementsystems im Gemüseanbau in der Vorderpfalz in Bezug auf die wirksame Verringerung des Stoffeintrages in das Grundwasser gemäß den Anforderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Abschlussbericht, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten, 144 S.
- Baumgärtel, G.; Breitschuh, G.; Ebertseder, T.; Eckert, H.; Gutser, R.; Hege, U.; Herold, L.; Wiesler, F.; Zorn, W. (2007): Nährstoffbilanzierung im landwirtschaftlichen Betrieb. VDLUFA Standpunkt, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), Speyer.
- Beck, T. (1983): Die N-Mineralisierung von Böden im Laborversuch. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 146: 243-252.
- De Willigen, P. (1986): Supply of soil nitrogen to the plant during the growing season. In: Lambers, H., Neeteson, J. J., Stulen (eds.): *Fundamental, ecological and agricultural aspects of nitrogen metabolism in higher plants*. Dordrecht, Netherlands, S. 417-432.
- Dersch, G.; Pfeffer, M.; Danneberg, O. H. (2003): Die anaerobe Bebrütung zur Bestimmung des N-Nachlieferungspotentials von Böden und ihre Kalibrierung im Gefäßversuch. *Die Bodenkultur* 54 (2), 69-81.
- Feller, C., Fink, M., Laber, H., Maync, A., Paschold, P.J., Scharpf, H.-C., Schlaghecken, J., Strohmeyer, K., Weier, U., Ziegler, J. (2007): Düngung im Freilandgemüsebau. Gartenbauliche Berichte des IGZ Großbeeren/Erfurt e.V., Heft 4, 2. Auflage 2007.
- Flessa, H.; Dörsch, P.; Beese, F. (1995): Seasonal variation of N₂O and CH₄-fluxes in differently managed arable soils in southern Germany. *J. Geophys. Res.* 100, 23115-23124.
- Hochschule Geisenheim (Hrsg.) (2014): Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2014 - für FAO56-Grasverdunstung. Institut für Gemüsebau Hochschule Geisenheim. http://www.hs-geisenheim.de/fileadmin/user_upload/Gemuesebau/Geisenheimer_Steuerung/kc-Werte_FAO56_2014.pdf
- Hutchinson, G.L.; Mosier, A.R. (1981): Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Science Society of America Journal* 45(2), S. 311-316.
- Kandeler, E. (1993): Bestimmung der N-Mineralisation im anaeroben Brutversuch. In: Schinner, F., R. Öhlinger, E. Kandeler, R. Margesin (Hrsg.): *Bodenbiologische Arbeitsmethoden*. 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin.
- Paschold, P.J., Kleber, J., Mayer, N. (2002): Geisenheimer Bewässerungssteuerung 2002. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft* 37, 2002, 1, 5-15.

- Seiz, P.; Schulz, R.; Heger, A.; Armbruster, M.; Müller, T.; Wiesler, F. (2014): Einfluss von N-Düngung, Nitrifikationshemmstoff und Abfuhr der Ernterückstände auf die N₂O-Freisetzung zweier gemüsebaulich genutzter Böden. VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 69/2014, 174-181.
- Sturm, S.; Kiefer, J.; Rödelberger, M. (2004); Validierung und Weiterentwicklung eines standortunabhängigen Bodenkontrollverfahrens zur Ermittlung der Nitratauswaschung mit Modellrechnungen. Veröffentl. aus dem Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, Band 26.
- Wiesler, F. (1997): Agronomical and physiological aspects of ammonium and nitrate nutrition of plants. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 160, 227-238.
- Wiesler, F.; Behrens, T.; Horst, W.J. (2001): The role of nitrogen-efficient cultivars in sustainable agriculture. In: Optimizing Nitrogen Management in Food and Energy Production and Environmental Protection. Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. TheScientificWorld 1, 61-69.
- Wiesler, F.; Laun, N.; Armbruster, M. (2008): Integriertes Stickstoffmanagement – eine Strategie zur wirksamen Verringerung der Gewässerbelastung im Gemüsebau. Agrarspectrum 41, S. 95-108.
- Wölfelschneider, A. (1994): Einflussgrößen der Stickstoff- und Schwefel-Mineralisation auf unterschiedlich behandelten Fichtenstandorten im Südschwarzwald. Freiburger Bodenkundl. Abh. 34, 191 S.
- Zöttl, H.W. (1960): Methodische Untersuchungen zur Bestimmung der Mineralstickstoff-Nachlieferung des Waldbodens. Forstwiss. Cbl. 79, 72-90.

7. Anhang

7.1 Liste der Veröffentlichungen und Vorträge mit Projektbezug

7.1.1 Veröffentlichungen

- Armbruster, M.; Heger, A.; Laun, N.; Wiesler, F. (2014): Integriertes Stickstoff-Managementsystem als Maßnahme zur Verbesserung der N-Effizienz in der Pflanzenproduktion – dargestellt am Beispiel Gemüsebau. VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 69/2014, 182-191.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Heger, A.; Wiesler, F. (2013): Integrated nitrogen management – a strategy to improve nitrogen efficiency in intensive field vegetable production. In: D’Haene, K.; Vandecasteele, B.; De Vis, R.; Crappé, S.; Callens, D.; Mechant, E.; Hofman, G.; De Neve, S. NUTRIHORT : Nutrient management, innovative techniques and nutrient legislation in intensive horticulture for an improved water quality. September 16-18, 2013, Ghent. Proceedings. September 16-18, 2013, Ghent, S. 149-155. ISBN : 978-9040303463.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Heger, A.; Wiesler, F. (2013): Nitrogen efficiency in intensive field vegetable production. International Workshop on Nitrogen, Environment and Vegetables. Turin, book of abstracts, S. 41-42.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Wiesler, F. (2011): Freilandgemüsebau – ein Beispiel für Chancen und Risiken einer hochspezialisierten Pflanzenproduktion. VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 67/2011, 95-105.
- Seiz, P.; Schulz, R.; Heger, A.; Armbruster, M.; Müller, T.; Wiesler, F. (2014): Einfluss von N-Düngung, Nitrifikationshemmstoff und Abfuhr der Ernterückstände auf die N₂O-Freisetzung zweier gemüsebaulich genutzter Böden. VDLUFA-Schriftenreihe Bd. 69/2014, 174-181.
- Seiz, P.; Schulz, R.; Heger, A.; Armbruster, M.; Wiesler, F.; Müller, T.; Ruser, R. (2013): Effect of N-fertilizer amount, nitrification inhibitor and removal of harvest residues on N₂O emissions from a sandy and from a loamy soil under vegetable production. International Workshop on Nitrogen, Environment and Vegetables. Turin, book of abstracts, S. 106-107-19.
- Seiz, P.; Schulz, R.; Heger, A.; Armbruster, M.; Wiesler, F.; Müller, T.; Ruser, R. (2012): Effect of N-fertilizer amount and nitrification inhibitor on N₂O emissions from a sandy and a loamy soil under vegetable production. Proceedings of the 17th International Nitrogen Workshop - Innovations for Sustainable Use of Nitrogen Resources. Wexford, Ireland, S. 74-75.
- Wiesler, F.; Ruser, R.; Armbruster, M. (2013): Integrated nitrogen management – a strategy to reduce N losses in intensive field vegetable production. International Workshop on Nitrogen, Environment and Vegetables. Turin, book of abstracts, S. 18-19.

7.1.2 Vorträge (chronologisch)

- Heger, A.; Armbruster, M.; Wiesler, F. (2011): Integriertes Stickstoffmanagement - eine praxistaugliche Strategie zur Verbesserung der N-Effizienz in Gemüsebaubetrieben der Pfalz. VDLUFA Tagung Speyer, 15.09.2011.
- Armbruster, M. (2011): Ergebnisse aus den weitergeführten Versuchen auf der Versuchsstation in Speyer. Projekttreffen Hannover, 15.12.2011.
- Heger, A. (2011): Ergebnisse aus den Praxisversuchen in der Pfalz. Projekttreffen Hannover, 15.12.2011.
- Wiesler, F.; Laun, N.; Armbruster, M. (2012): Integriertes N-Management im Gemüsebau. Grüne Woche Rheinland-Pfalz. DLR Schifferstadt. 18.04.2012.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Wiesler, F. (2012): Entwicklung eines Stickstoffmanagementsystems im Gemüsebau der Vorderpfalz in Bezug auf die Verringerung des Stickstoffeintrages in das Grundwassergemäß der Anforderungen der EG-WRRL. Beirat des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten zur Begleitung der fachlichen Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie in Rheinland-Pfalz. Kruft (Rheinland-Pfalz), 10.05.2012.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Wiesler, F. (2012): Integriertes Stickstoffmanagement zur Verminderung von N-Überschüssen im Freiland-Gemüsebau. Fortbildungsveranstaltung der Wasserschutzberaterinnen und -berater aus Nordrhein-Westfalen. Bad Sassendorf, 07.11.2012.
- Heger, A., Armbruster, M.; Wiesler, F. (2012): Ergebnisse aus den Praxisversuchen in der Pfalz. Projekttreffen Speyer, 29.11.2012.
- Armbruster, M. (2012): Überblick der weitergeführten Versuche auf der Versuchsstation in Speyer. Projekttreffen Speyer, 29.11.2012.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Wiesler, F. (2013): Vorbeugender Grundwasserschutz in Sonderkulturen - Integriertes Stickstoffmanagement zur Verminderung von N-Überschüssen im Freiland-Gemüsebau. 58. Landwirtschaftliche Woche Südhessen. Gernsheim, 29.01.2013.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Wiesler, F. (2013): Integriertes Stickstoffmanagement im Freiland-Gemüsebau - Möglichkeiten zur Verminderung der N-Überschüsse gemäß den Anforderungen der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Beratungskreissitzung für Gemüseproduzenten und -produzentinnen. Biebesheim (Hessen), 11.04.2013.
- Wiesler, F.; Ruser, R.; Armbruster, M. (2013): Integrated Nitrogen Management – A Strategy to reduce N losses in intensive Field Vegetable Production. International Workshop on Nitrogen, Environment and Vegetables (NEV2013). Turin, 15.04.2013.
- Armbruster, M.; Laun, N.; Heger, A.; Wiesler, F. (2013): Nitrogen Efficiency in Intensive Field Vegetable Production. International Workshop on Nitrogen, Environment and Vegetables (NEV2013). Turin, 15.04.2013.
- Armbruster, M.; Heger, A.; Wiesler, F. (2013): Integrated Nitrogen Management in Intensive Field Vegetable Production – Use of on Farm Experiments for the Development of Strategies to reduce N losses. Workshop "Benchmark study" der Gemüseberatung aus Belgien. DLR Rheinpfalz, Schifferstadt 29.04.2013.

- Armbruster, M.; Laun, N.; Heger, A.; Wiesler, F. (2013): Integrated Nitrogen Management – A Strategy to improve Nitrogen Use Efficiency in Intensive Field Vegetable Production. Nutrihort-Kongress. Gent, 17.09.2013.
- Armbruster, M.; Heger, A.; Laun, N.; Wiesler, F. (2013): Integriertes Stickstoff-Managementssystem als Maßnahme zur Verbesserung der N-Effizienz in der Pflanzenproduktion – dargestellt am Beispiel Gemüsebau. VDLUFA-Kongress Berlin, 19.09.2013.
- Wiesler, F.; Armbruster, M.; Ebertseder, T. (2013): Die Verbesserung der Stickstoffeffizienz als Herausforderung für Landwirtschaft und Gesamtgesellschaft. VDLUFA-Kongress Berlin, 19.09.2013.
- Armbruster, M.; Heger, A.; Laun, N.; Wiesler, F. (2013): Integriertes Stickstoff-Managementssystem – Verbesserung der N-Effizienz im Gemüsebau. 29. Wissenschaftliche Fachtagung: Umweltverträglicher Gemüseanbau - Minimierung der Nitratwerte im Boden und Grundwasser. Bonn, 14.11.2013.
- Heger, A., Armbruster, M.; Wiesler, F. (2013): Ergebnisse aus den Praxisversuchen in der Pfalz. Projekttreffen Großbeeren, 27.11.2013.
- Armbruster, M. (2012): Geplante Arbeiten im Zeitraum Dezember 2013 bis Juni 2014 sowie Ergebnisse des Exaktversuches Speyer im Zeitraum 2011-2013. Projekttreffen Großbeeren, 27.11.2013.
- Heger, A.; Armbruster, M.; Wiesler, F. (2013): Strategien zur Verminderung von N-Bilanzsaldo und N-Auswaschung in Praxisbetrieben der Pfalz. Düng-Seminar für Gemüsebaupraktiker in Rheinland-Pfalz. DLR Rheinland-Pfalz, Schifferstadt 13.12.2013.
- Armbruster, M.; Seiz, P.; Heger, A.; Ruser, R. (2013): Gasförmige N-Verluste in Gemüsebauböden – neue Ergebnisse. Düng-Seminar für Gemüsebaupraktiker in Rheinland-Pfalz. DLR Rheinland-Pfalz, Schifferstadt 13.12.2013.
- Heger, A.; Armbruster, M.; Wiesler, F. (2014): Entwicklung eines integrierten Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau zur Verminderung von Stickstoffüberschüssen - Ergebnisse aus Praxisversuchen in der Pfalz. Pfälzer Kohltag, DLR Rheinland-Pfalz, Neustadt 31.01.2014.
- Heger, A.; Armbruster, M.; Wiesler, F. (2014): Strategien zur Verminderung von N-Bilanzsaldo und N-Auswaschung in Praxisbetrieben der Pfalz. Düng-Seminar für Gemüsebaupraktiker in Rheinland-Pfalz. DLR Rheinland-Pfalz, Neustadt 12.02.2014.
- Armbruster, M.; Heger; Wiesler, F. (2014): Verbesserung der N-Effizienz im Freilandgemüsebau – sind Ergebnisse aus Exaktversuchen auf Betriebe übertragbar? VDLUFA-Kongress Stuttgart-Hohenheim, 18.09.2014.

Abschlussbericht IGZ

Zuwendungsempfänger:

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren
und Erfurt
Theodor-Echtermeyer-Weg 1
14979 Großbeeren

Forschungsvorhaben Nr.:

2810HS009

Thema:

Entwicklung eines integrierten Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau zur Vermeidung von Stickstoffüberschüssen. Teilprojekt IGZ: Gasförmigen N-Verluste und Modellierung.

Laufzeit:

01.12.2010 – 31.10.2014

Berichtszeitraum:

01.12.2010 – 31.10.2014

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

Institut für Pflanzenernährung Universität Hannover

Institut für Kulturpflanzenwissenschaften Universität Hohenheim

Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer

Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinpfalz, Neustadt

BOLAP GmbH, Speyer

Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz, Fachgruppe Gemüse

1. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

In diesem Projekt wurden die in der Düngeverordnung den Betrieben des Erwerbsgartenbaues zugestandenen N-Überschüsse auf Realisierung und Realisierbarkeit überprüft. Hierbei galt es insbesondere aufzuzeigen, in wieweit in Praxisbetrieben durch gezielte Maßnahmen eine Absenkung „unvermeidlicher“ N-Saldo Überschüsse möglich ist.

Die Hauptaufgabe des IGZ-Teilprojekts war es, vertiefende Untersuchungen zu gasförmigen N-Verlusten durchführen, die in den Praxisbetrieben nicht erfasst werden können. Die ermittelten gasförmigen N-Verluste wurden dazu genutzt, die mathematischen Modelle, die Grundlage für das Düngungsberatungsprogramm N-Expert sind, zu überprüfen und an den neuen Erkenntnisstand anzupassen.

Gasförmige N-Emissionen sind im Gegensatz zu der Nitratauswaschung ein bisher weniger beachteter Verlustpfad für N und sowohl aufwendig zu erfassen als auch schwer vorherzusagen. Dies liegt an der Komplexität der Prozesse und ihrer Interaktionen, die im Boden Quellen und Senken für N-haltige Gase bilden können. Es gibt bisher nur wenige Daten über die Größenordnung der gasförmigen N-Verluste im intensiven Freilandgemüsebau. Dabei kann es gerade bei Gemüsekulturen wie Blumenkohl, Brokkoli und Rosenkohl, die große Mengen an Ernterückständen hinterlassen, zu Situationen kommen, in denen hohe Emissionen wahrscheinlich sind. Wegen ihrer umweltschädigenden Wirkung sind bestimmte N-haltige Gase von besonderem allgemeinem Interesse. Hierzu zählen vor allem Lachgas (N_2O), das mit ca. 6 % zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt (Forster et al. 2007), und Ammoniak (NH_3), das einen wichtigen Luftschadstoff darstellt und zu Versauerung und Eutrophierung von Ökosystemen beiträgt (Mosier 2001).

In diesem Projekt sollte die Höhe der "unvermeidlichen" gasförmigen N-Verluste als Teil der in der Düngeverordnung zugelassenen "unvermeidlichen" N-Bilanz-Überschüsse abgeschätzt werden. Hierbei standen Systeme mit Gemüsekulturen im Vordergrund, die hohe Mengen an Ernterückständen hinterlassen.

Die Ziele waren im Detail:

- Anpassung der Modelle des Düngungsberatungsprogramms N-Expert (Feller et al. 2010) in Hinblick auf die Abschätzung anzurechnender gasförmiger N-Verluste aus Gemüseernterückständen,
- Unterstützung bei der Weiterentwicklung der Düngeverordnung durch Abschätzung kulturspezifischer unvermeidlichen N-Bilanzüberschüsse, und
- Aufzeigen von praxisnahen Strategien, mit denen gasförmige N-Verluste im intensiven Freilandgemüsebau bei Anbau "kritischer" Kulturen vermindert werden können.

1.1. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilprojekt des IGZ untergliederte sich in zwei Arbeitspakete (A7 und A8 nach der Arbeits- und Meilensteinplanung des Gesamtprojekts), die miteinander verflochten waren.

Erfassung der quantitativen Wirkungen von Faktoren für gasförmige N-Verluste (A8)

In diesem Arbeitspaket wurden Versuche zur Quantifizierung gasförmiger N-Verluste in gemüsebaulichen Anbausystemen durchgeführt. Dabei wurden Freilandversuche unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt, in denen die abiotischen Bedingungen (insbesondere Bodenfeuchte, Bodentemperatur, Windgeschwindigkeit, Nmin-Gehalt) intensiv messtechnisch erfasst wurden. Der Fokus der Untersuchungen lag auf den gasförmigen N-Emissionen, die durch Gemüseernterückstände hervorgerufen werden.

Modellierung der N-Bilanzen in Abhängigkeit der Strategien und Modellanpassung (A7)

Die ermittelten gasförmigen N-Verluste wurden dazu genutzt, die mathematischen Modelle, die Grundlage für das Düngungsberatungsprogramm N-Expert sind, zu überprüfen und an den neuen Erkenntnisstand anzupassen.

1.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Gasförmige N-Emissionen entstehen vorwiegend als Zwischen- oder Endprodukte mikrobieller Prozesse im Boden, die Teil des natürlichen Stickstoffkreislaufs sind. So kann zum Beispiel bei alkalischen pH-Werten das beim Abbau von organischem Stickstoff entstehende Ammonium (NH_4^+) in Ammoniak (NH_3) übergehen, welches leicht flüchtig ist. Ammoniak führt zu Luftverschmutzung, Versauerung und Eutrophierung und ist daher ein ernstzunehmendes Problem (Mosier 2001). Dies gilt zwar vor allem für Regionen mit konzentrierter Tierproduktion aber Ammoniak kann auch in größeren Mengen beim Abbau von grüner Pflanzenbiomasse entgasen. Die Größenordnung von NH_3 -Emissionen aus Gemüserückständen schwankt zwischen 5 und 16 % des Gesamt-N in 4 Monaten in Abhängigkeit vom C/N-Verhältnis der Rückstände und Gesamt-N-Gehalt (de Ruijter et al. 2010a). Viele Studien deuten außerdem daraufhin, dass Ammoniakemissionen ein Oberflächenphänomen sind und dass es keine Emissionen gibt, wenn die Pflanzenreste in den Boden eingearbeitet werden (Glasener & Palm 1995; Mohr et al. 1998; de Ruijter et al. 2010a, b).

Aufgrund des komplexen Prozessgefüges von Mineralisierung und Immobilisierung sowie der Variabilität der abiotischen Bedingungen, die die NH_3 -Bildung und -Verflüchtigung bestimmen, insbesondere Bodendiffusivität, Luftturbulenz und pH-Wert, sind NH_3 -Emissionen schwer vorherzusagen (Ni 1999).

Lachgas (N_2O) ist ein sehr potentes Treibhausgas, das mit ca. 6% zum anthropogenen Treibhauseffekt beiträgt (Forster et al. 2007). Dieses kann bei verschiedenen Stickstoff-Umwandlungen im Boden entstehen (Butterbach-Bahl et al. 2013), insbesondere bei der Nitrifikation, also der Umwandlung von Ammonium in Nitrat (NO_3^-), und bei der Denitrifikation, also der mikrobiellen Nutzung von Nitrat als alternativen Elektronenakzeptor unter Sauerstoffarmut. Typischerweise treten hohe Lachgasemissionen bei Sauerstoffarmut auf, bei nahezu vollständiger Sauerstoffabwesenheit führt die Denitrifikation allerdings hauptsächlich zur Bildung von molekularem Stickstoff (Davidson et al. 2000).

Die Höhe der Emissionen von Lachgas ist räumlich und zeitlich extrem variabel. Das liegt daran, dass kleinräumige Unterschiede in den abiotischen Bedingungen (u.a. pH-Wert, Konzentrationen an Kohlenstoff, Sauerstoff, Nitrat, Ammonium) und der

mikrobiellen Aktivität die für die Emissionen ursächlichen Prozesse stark beeinflussen. Der Einfluss wichtiger Steuergrößen ist bereits untersucht worden. So sind zum Beispiel die Wirkungen von Sauerstoffverfügbarkeit (Khalil et al. 2004, Bateman und Baggs 2005), Stickstoffverfügbarkeit (Wrage et al. 2001, Khalil et al. 2005, Russow et al. 2008) und Kohlenstoffverfügbarkeit (Morley und Baggs 2010) auf die Denitrifikationsrate beschrieben. Eine große Lücke besteht aber im Verständnis der Ausbildung von „Mikrosites“ hoher Emissionsraten im Boden, die die Gesamtverluste maßgeblich bestimmen und sowohl räumlich als auch zeitlich hoch dynamisch sind (Parkin 1987, Stevenson et al. 2011).

Die Dynamik des N-Kreislaufs und damit der N-Emissionen ist besonders groß, wenn große Mengen an reaktivem N und verfügbarem C in den Boden eingebracht werden. Dies ist im intensiven Gemüsebau regelmäßig der Fall, da hier bei einigen Kulturen große Mengen an Ernterückständen anfallen. So bleiben im Mittel bei Blumenkohl, Brokkoli und Rosenkohl mehr als 150 kg N ha^{-1} in Ernterückständen auf dem Feld zurück (Feller et al. 2010). Es gibt Hinweise darauf, dass unter bestimmten Bedingungen ein beträchtlicher Anteil davon in Form von Gasen in wenigen Wochen verloren gehen kann. So zeigte Schloemer (1991) auf einem lehmigen Boden, dass 40 kg N ha^{-1} in nur 8 Wochen nach Einarbeitung von Blumenkohlernterückständen als N_2O und N_2 verloren gehen können.

Das Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) benutzt einen Standard-Emissionsfaktor für N_2O in Bezug auf jede Art von N-Input in Mineralboden von 1 %, das ist der Anteil des applizierten N, der als N_2O in einem Jahr verloren geht (IPCC 2006). Dies ist offensichtlich auch eine gute Abschätzung des durchschnittlichen Emissionsfaktors für N aus Ernterückständen, wie Novoa & Tejada (2006) in einer Meta-Studie gezeigt haben. Bei Gemüseernterückständen mit einem hohen Wassergehalt und niedrigem C/N-Verhältnis hingegen können die N_2O -Verluste sogar den oberen Grenzwert des IPCC von 3 % überschreiten (IPCC 2006), wie es zum Beispiel Velthof et al. (2002) und Ruser et al. (2009) demonstrierten.

Wann genau es zu solch hohen Verlusten kommt und ob dies auch in Böden mit gröberer Textur vorkommt, bleibt offen. Einige Studien haben bereits gezeigt, dass sich die Umgebung von frisch eingearbeiteten Pflanzenresten durch eine hohe mikrobielle Aktivität, Nährstoffumsatz und Sauerstoffzehrung stark von den Bedingungen im restlichen Boden unterscheiden kann (Flessa & Beese 1995; Azam et al. 2002). Es ist nicht klar, ob dies auch auf eine oberflächlich applizierte Mulchschicht an Gemüseernterückständen zutrifft, eine Situation, die im Freilandgemüsebau zumindest temporär oft auftritt. Vergleiche von Lachgasemissionen nach Einarbeitung von Pflanzenmaterial in Quarzsand und Boden deuten darauf hin, dass die mikrobielle Gemeinschaft, die für Lachgasemissionen notwendig ist, bereits mit dem Pflanzenmaterial geliefert wird (Flessa et al. 2002). Dies legt nahe, dass hohe Lachgasemissionen in oberflächlich applizierten Ernterückständen auch entstehen können, wenn die Kontaktfläche mit dem Boden nur gering ist.

Die meisten Studien zu N-Emissionen aus Ernterückständen sind unter eher artifiziellen Bedingungen im Labor oder Gewächshaus durchgeführt worden, bei denen zum Beispiel die Ernterückstände getrocknet und in kleine Partikel zerschnitten oder die Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Wassergehalt unrealistisch konstant gehalten wurden. Chen et al. (2013) haben eine Meta-Analyse

mit Daten durchgeführt, bei denen N₂O-Emissionen nach Applikation von Ernterückständen untersucht wurden, und gezeigt, dass Labor-Inkubationsversuche generell höhere Emissionsfaktoren produzierten als Freilandstudien. Eine Übertragung der Ergebnisse aus Laborversuchen ins Freiland ist sehr schwierig, insbesondere da bekannt ist, dass wechselnde Umgebungsbedingungen große Effekte auf die N-Dynamik haben. Hinzu kommt, dass es nur sehr wenige Freilandstudien gibt, in denen NH₃ und N₂O gleichzeitig gemessen wurde, obwohl dies dringend notwendig ist, um eine Strategie oder spezielle Behandlung in Hinblick auf N-Emissionen im Gesamten zu beurteilen. Denn NH₃- und N₂O-Emissionen können sich durchaus unterschiedlich, ja sogar gegensätzlich, verhalten in Abhängigkeit von zum Beispiel Bodentyp und Applikationstechnik. Hier kann es also zu einer Situation kommen, in der abgewogen werden muss, welches Gas vorrangig vermindert werden soll.

Für die Messung gasförmiger N-Emissionen im Freiland hat sich die Haubentechnik etabliert, welche den Vorteil gegenüber mikrometeorologischen Methoden hat, keine ausgedehnten Flächen zu benötigen (Mosier et al. 1996). Auf der anderen Seite kann mit der Haubentechnik nicht unter realistischen Bedingungen kontinuierlich gemessen werden und Ergebnisse werden nur auf einer relativ kleinen Fläche erhoben. Aufgrund der Einfachheit und der Möglichkeit, im Freiland mehrere Varianten zu messen, entschieden wir uns daher für den Einsatz der Haubentechnik in Kombination mit Gas-Chromatographie (CO₂, N₂O, CH₄) und dem Einsatz passiver Filterfallen für die NH₃-Messung.

2. Material und Methoden

Haubenmesstechnik

Wir benutzten die statische, geschlossene Haubentechnik mit zweiteiligen, aus PVC gefertigten Hauben. Das bedeutet, es gab einen Basisring, der vor dem Versuch 20 cm tief in den Boden getrieben wurde und dort für den gesamten Versuchszeitraum verblieb, und einen Haubendeckel, der nur für den Zeitraum einer Messung auf den Basisring gesetzt wurde (1 h). Der Aufbau der Hauben richtete sich prinzipiell nach dem Protokoll von Parkin und Venterea (2010). Wir wählten bewusst relativ große Hauben mit einem kreisförmigen Querschnitt von 1152 cm² und einem Volumen von 40–46 L (je nach tatsächlicher Einbautiefe der Basisringe), um einen Teil der bodenbürtigen Variabilitäten der Gasemissionen auszugleichen. Die Basisringe waren am aus dem Boden ragenden Kragen mit Lüftern (Durchmesser 38 mm, Windgeschwindigkeit 1–2 m s⁻¹ in 15 cm Abstand), die Haubendeckel mit Filterhalterungen (für die NH₃-Filterfallen), einem Vent für den Druckausgleich (1,5 cm Durchmesser, 40 cm Länge) und einem Septum-Port für die Gasprobenahme versehen. Basisringe und Haubendeckel konnten mit Spannverschlüssen und einer O-Ring-Gummidichtung luftdicht verschlossen werden und waren an der Außenseite mit reflektierender Folie beklebt (Abb. 1).



Abb. 1 Haubentechnik. Haubenbasis + Haubenkammer (links), Haubenkammer von innen, hier ohne Filterhalterung (Mitte), eingebaute Haubenbasis (rechts).

Lachgas-, Kohlendioxid- und Methanflüsse

Gasproben von je 30 ml wurden mit einer gasdichten Spritze durch das Septum-Port 0, 20, 40 und 60 Minuten nach Haubenverschluss entnommen und in mit Butyl-Hohlstopfen verschlossene 20 ml Glasfläschchen (Vials) gefüllt. Diese Vials wurden vor der Probenahme mit einer Vakuumpumpe evakuiert und der erreichte Vordruck mit einem Handmanometer erfasst. Die Gasproben wurden am Gas-Chromatographen (Shimadzu GC-2014), modifiziert nach Lofffield (1997), auf N_2O -, CO_2 - und CH_4 -Konzentrationen analysiert. Die erhaltenen Konzentrationen wurden um die Verdünnung durch unvollständige Evakuierung korrigiert (Vordruck, s.o.). Die Steigung der Konzentrationen gegen die Zeit wurde mit einer robust-linearen Regression unter Nutzung des Huber-M-Schätzers (Huber 1981) bestimmt und dann unter Berücksichtigung von Luftdruck, -temperatur und Haubenhöhe in eine Emissionsrate umgerechnet.

Ammoniakmesstechnik

Für die Messung von NH_3 -Emissionen bieten sich unterschiedliche Verfahren an, insbesondere mikrometeorologische Verfahren, Verfahren mit Onlinemesssystem und kontrolliertem oder gemessenem Durchfluss (Windtunnel, Hauben mit Durchfluss) und passive Sammler an. Wir haben uns für die Verwendung von passiven, trockenen Filtersammlern entschieden, die den Einsatz in Kombination mit der geschlossenen Haubentechnik ermöglichen, keine großen homogenen Versuchsflächen benötigen (wie mikrometeorologische Methoden) und einen geringen finanziellen und arbeitstechnischen Aufwand erfordern. Für die Vorbereitung der NH_3 -Sammelfilter wurde eine Methode genutzt, die auf der von Dämmgen et al. (2010) für die IVL-Filtersammler beschriebenen Methode basiert. In Kürze, Cellulosefilter (90 mm Durchmesser) wurden in deionisiertem Wasser gewaschen (2x30 min Ultraschallbad), bei 60 °C getrocknet, imprägniert mit 2 ml Phosphorsäurelösung (33 g $\text{H}_3\text{PO}_4 \text{ l}^{-1}$ in Methanol/ H_2O -Lösung (9/1)) pro Filter, im N_2 -Strom getrocknet, und in mit Deckel und Parafilm verschlossenen Zentrifugenröhrchen aufbewahrt. Für die Messung wurden die Filter an der Filterhalterung im Haubendeckel befestigt, für die Haubenverschlusszeit exponiert, nach der Messung eingesammelt und bei -18 °C in Zentrifugenröhrchen bis zur Analyse aufbewahrt. Für die Analyse wurden die Filter mit 40 ml deionisiertem Wasser für eine Stunde im Ultraschallbad extrahiert und die NH_4^+ -N-Konzentration im Extrakt mit einem EPOS Analysator (Eppendorf, Hamburg, Germany) gemessen.

Wir führten einen Vorversuch durch, um die Aufnahmekapazität der Filter und die Wiederfindung des Extraktionsvorganges zu überprüfen. Dafür wurden

unterschiedliche Mengen NH_3 -Kalibriergas ($20 \text{ ml NH}_3 \text{ l}^{-1} \text{ N}_2$) in einen Exsikkator ($22,43 \text{ l}$) injiziert ($0,29$; $0,77$ und $2,30 \text{ mg NH}_3\text{-N}$), der mit Filterhaltern und einem Lüfter (Durchmesser $2,4 \text{ cm}$, Windgeschwindigkeit $0,1\text{--}0,3 \text{ m s}^{-1}$ bei 15 cm Abstand) ausgestattet war. Die Ergebnisse (Abb. 2) zeigten, dass drei der Filter in der Lage sind, hinreichend große Mengen NH_3 in einer Stunde (der üblichen Messdauer) aufzufangen. Dabei lag die durchschnittliche ($n = 3$) Wiederfindung bei $108 \pm 1,2$, $105 \pm 2,3$, and $105 \pm 2,1 \%$ ($\pm\text{SD}$). Das heißt, sowohl die Aufnahme als auch die Extraktion funktionierten gut.

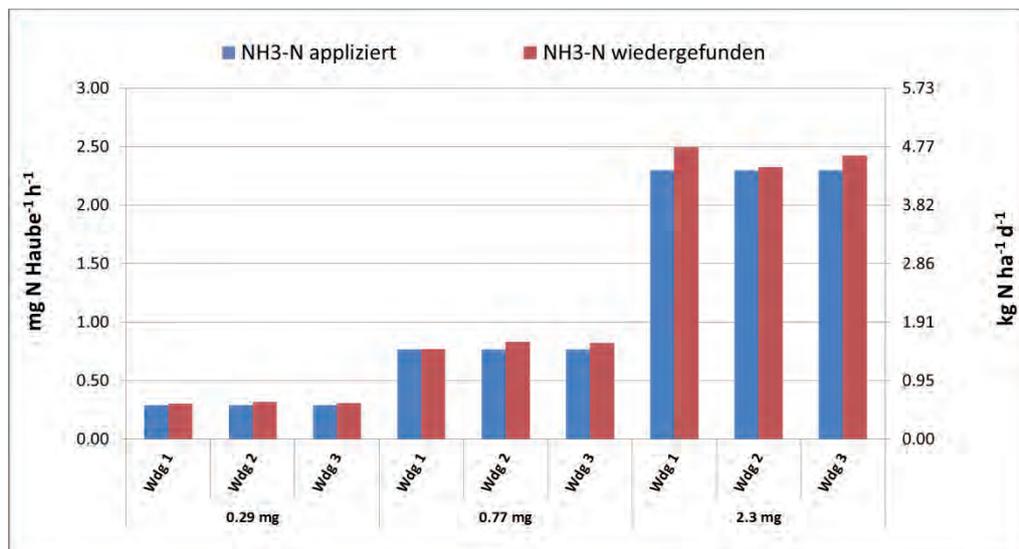


Abb. 2 Ammoniak-Filterfallen-Test.

Die Emissionsraten wurden berechnet als die Mengen an extrahiertem $\text{NH}_4^+\text{-N}$ geteilt durch die Haubenverschlusszeit und die Haubenfläche. Zu allen Messterminen (wie auch im Vorversuch) wurden als Negativ-Kontrolle auch unexponierte Filter extrahiert und analysiert, deren Wert von allen Werten zu diesem Messtermin abgezogen wurde.

Da die Windgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die NH_3 -Emissionen hat, wurden alle Hauben mit einem Lüfter ausgestattet, der am Basisring befestigt ist (Abb. 1, rechts). Dieser Lüfter lief ständig, auch wenn nicht gemessen wurde, und schaffte so eine Situation, in der Luftturbulenz als limitierender Faktor für die NH_3 -Emission wahrscheinlich ausgeschlossen werden kann. Auf der anderen Seite ist eine bedeutende Überschätzung durch diese Belüftung sehr unwahrscheinlich, da die tatsächlichen Windgeschwindigkeiten im Freiland fast immer (ca. 80 % der Zeit) über $0,1 \text{ m s}^{-1}$ liegen, wie wir in einem unserer Versuche auf Höhe der Hauben (40 cm über GOK) gezeigt haben. Dies bedeutet, die Luft überstreicht eine Distanz von > 15 Haubendurchmessern pro Minute. Dieser Wert ist sehr hoch im Vergleich zu Durchflussraten, die während dynamischer Haubmessungen als nicht mehr limitierend für Ammoniakemissionen berichtet wurden ($> 0,3$ Haubenvolumen min^{-1} bei $5 \text{ mg NH}_3\text{-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; Janzen and McGinn 1991). Ungeachtet dessen wäre es wünschenswert, eine Kalibrierung der verwendeten Technik mit anderen bestehenden Techniken durchzuführen, wie es bereits für alternative Methoden gemacht wurde (z.B. Pacholski et al. 2008).

Acetyleninhibierungsmethode

Die Messung natürlicher N_2 -Emissionen aus terrestrischen Böden ist durch den hohen Hintergrundwert des atmosphärischen N_2 -Gehaltes und den geringen Flüssen sehr schwierig. Es bieten sich insbesondere kaum Methoden für die Freilandmessung an, da hier nicht in künstlicher Atmosphäre geschlossener Räume gearbeitet werden kann und die Anwendung der Isotopentechnik sehr teuer ist. Wir entschieden uns daher für die Acetyleninhibierungsmethode trotz ihrer bekannten Schwächen (Groffman et al. 2006). Die verwendete Technik stützte sich in erster Linie auf die Vorarbeiten von Ryden et al (1979a,b), Ryden and Dawson (1982) und Aulakh et al. (1991). Diese Studien haben gezeigt, dass diese Technik insbesondere bei leichten Böden, wie dem an unserem Untersuchungsstandort in Großbeeren, zuverlässig funktionieren kann, wenn der Nachschub an Nitrat durch die ebenfalls durch Acetylen gehemmte Nitrifikation nicht limitierend wirkt. Des Weiteren erfasst sie auch N_2 -Emissionen aus bereits vor dem Versuch im Boden befindlichem organischem N, was mit der Isotopenmethode sehr schwierig ist.

Die Acetyleninhibierungsmethode beruht auf der hemmenden Wirkung von Acetylen (C_2H_2) auf die Reduktion von N_2O zu N_2 , also dem letzten Schritt der Denitrifikation (Abb. 3, rechts). Die geschätzte N_2 -Emission entspricht dann der Differenz der N_2O -Emission zwischen einer gehemmten und einer nicht gehemmten Variante. Dabei muss selbstverständlich die Annahme gelten, dass die C_2H_2 -Begasung keinen Effekt auf die Raten der übrigen Prozesse der Denitrifikation hat.

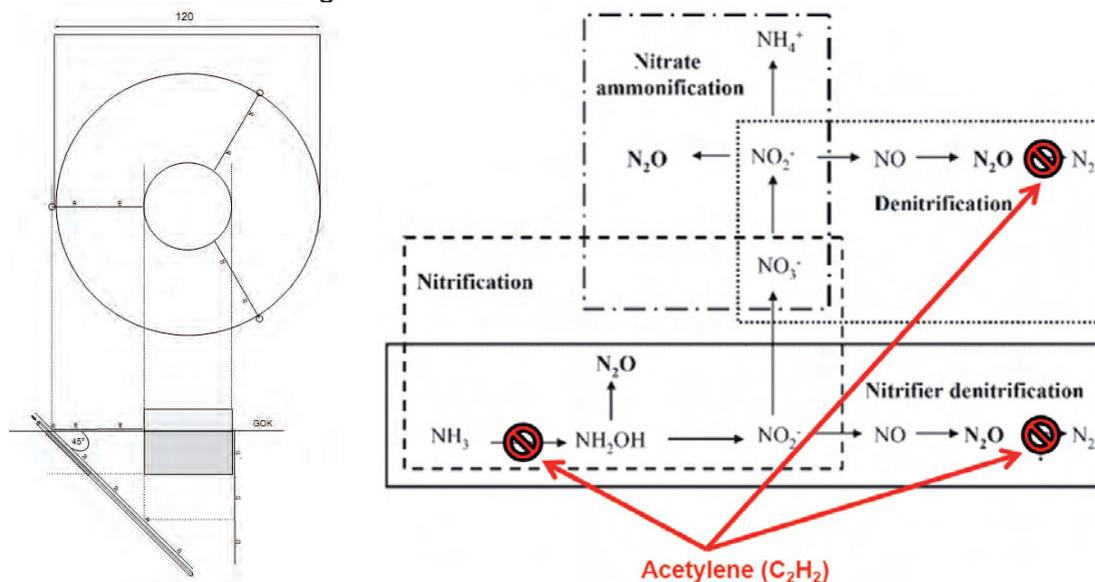


Abb. 3 Acetylenbegasungssystem. links: Schema Einbau Begasungssonden (oben Aufsicht, unten Profil), rechts: Konzeptionelles Modell zur Entstehung von N_2O und N_2 mit Inhibition durch C_2H_2 (Baggs. 2008. Rapid Commun. Mass Spectrom. 22: 1664–1672; verändert durch Wrage et al. 2001. Soil Biol. Biochem. 33: 1723. (verändert))

Die Begasung erfolgte in unseren Versuchen durch Einleitung des C_2H_2 mit jeweils drei Rohren pro Haube, die schräg unter den Basisring der Haube eingebracht wurden (Abb. 3, links). Das C_2H_2 wurde vorher durch Schwefelsäure-Waschflaschen geleitet, um es von Aceton und anderen Begleitgasen zu befreien. Die Durchflussrate wurde über Schwebekörperdurchflussmesser kontrolliert. Die Kontrolle der Bodenluftkonzentration erfolgte durch Entnahme von Bodenluft aus 8 cm Tiefe im Basisring mit Hilfe einer langen Kanüle und gasdichten Spritze (100 ml pro Messung, 3 Einstiche in 2 Hauben) und Messung der Konzentration an C_2H_2 mit

direktanzeigenden Messröhrchen von Dräger Safety AG & Co. KGaA. Von unterschiedlichen getesteten Röhrchen stellte sich dabei der Röhrchentyp "CO 0,3%/b" als geeignet für die Messung der C₂H₂ Konzentration im betrachteten Konzentrationsbereich heraus. Die Messung wurde gestartet, wenn die Konzentration an C₂H₂ in allen Basisringen über 1 % lag (nach ca. 1 h bei einer Infusionsrate von ca. 300 ml min⁻¹).

Emissionssummen

Die Emissionssummen wurden berechnet durch Umrechnung der gemessenen Emissionsraten auf Stundenbasis in Emissionsraten auf Tagesbasis und folgender linearer Interpolation zwischen den Messtagen. Die Emissionssummen wurden nach Abzug der Kontrollvariante (ohne Zugabe von Ernterückständen) auf die mit den Ernterückständen applizierten Mengen an Kohlenstoff und Stickstoff bezogen, um eine Abschätzung der Emissionsfaktoren (EF) zu erhalten.

Statistik

Statistische Analysen wurden mit der R statistics-Software (v. 3.0.0; R Development Core Team 2013) berechnet. Für parametrische Tests wurden die Voraussetzungen der Normalverteilung der Restfehler mit dem Kolmogorov–Smirnov-Test, die Homoskedastizität der Restfehler mit dem Levene-Test getestet. Falls nicht anders angegeben, wurden bei signifikanten Haupteffekten in der Varianzanalyse die multiple Vergleiche einzelner Gruppen mit dem Tukey's HSD-Test durchgeführt.

Freilandversuche

Zwei Freilandversuche wurden in Großbeeren durchgeführt. Im ersten Versuch (Freilandversuch "Trasse") testeten wir den Effekt der Applikationstechnik (gemulcht, eingearbeitet) der Ernterückstände auf die Emissionen an NH₃, N₂O und N₂. Dabei kamen sehr hohe Aufwandmengen an Ernterückständen zum Einsatz. Überdies gab es zur besseren Vergleichbarkeit der Varianten eine Überdachung und somit teilweise Kontrolle der Wetterbedingungen. Die Übertragbarkeit der in diesem Versuch erzielten Ergebnisse auf andere Standorteigenschaften erschien uns fraglich, ist aber von herausragender Bedeutung für die Evaluierung der Ergebnisse und die mögliche Berücksichtigung standortspezifischer Faustzahlen für gasförmige N-Verluste in der Düngungsempfehlung. Daher führten wir einen Versuch (Freilandversuch "Kastenparzelle") zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit dieser Ergebnisse durch. Wir wollten insbesondere den Einfluss unterschiedlicher Bodentypen, dem Hauptmerkmal eines Standorts neben dem Klima, prüfen. Darüber hinaus testeten wir in diesem Versuch eine zusätzliche Applikationstechnik, erfassten sowohl Sommer- als auch Winterperiode und ließen natürliche Wetterbedingungen zu.

Freilandversuch „Trasse“

Standort

Das Experiment wurde auf den Versuchsfeldern von Großbeeren, 20 km südlich von Berlin durchgeführt. Der Boden ist eine Fahlerde-Braunerde mit einem pH-Wert von 5,3 (CaCl₂) und einer Korngrößenverteilung von 91 % Sand, 4 % Schluff, und 5 % Ton. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme beträgt 500 mm und die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 9,8 °C. Die Versuchsfeldfläche wurde in den letzten 10 Jahren für Getreideanbau genutzt mit einer jährlichen N-Gabe von ca. 70 kg N

ha⁻¹. Nur die Stoppeln verblieben auf dem Feld und wurden in der Regel mit der Scheibenegge eingearbeitet. Für rund 1,5 Jahre vor Start des Versuches lag die Fläche brach.

Versuchsanlage und Behandlungen

Die Versuchsanlage des Feldversuches ist in Abb. 4 dargestellt. In Kürze, es gab drei Varianten, eine Kontrolle ohne Applikation von Blumenkohlernterückständen (Kontrolle), eine Behandlung, in der die Ernterückstände gemulcht auf den Boden appliziert wurden (Mulch), und eine Behandlung, in der die Ernterückstände gemulcht und bis 15 cm Tiefe in den Boden eingearbeitet wurden (Mix). Jede Behandlung wurde durch drei räumlich getrennt Hauben repliziert. Die Behandlungen wurden in den Hauben durchgeführt. Der Versuch fand im Freiland statt, war aber überdacht, so dass eine Schattierung und Beregnung möglich war. Das Ziel dieser Maßnahme war die Vermeidung von Peak-Emissionen durch extreme Wetterereignissen und die Ermöglichung der Kontrolle der Bodenfeuchte. Dies könnte die absolute Höhe der Flüsse beeinflusst haben, erleichterte aber den Variantenvergleich deutlich, welcher im Mittelpunkt der Untersuchung stand. Es wurde ca. täglich mit einer Brause homogen beregnet, um den Bodenwassergehalt mehr oder weniger konstant zu halten. Ein für die Situation nach Ernte von Blumenkohl typischer Gehalt an anorganischem N (N_{min}) im Boden wurde durch eine anorganische N-Düngung (930 mg NO₃⁻-N + 70 mg NH₄⁺-N pro g N) in allen Hauben von umgerechnet 30 kg N ha⁻¹ erreicht. Dies hob den N_{min}-Gehalt im Oberboden auf ca. 40 kg N ha⁻¹, einer Menge, die der typischen Situation nach Anbau von Blumenkohl entspricht, wenn die gute landwirtschaftliche Praxis in Bezug auf N-Düngung eingehalten wird (Feller et al. 2010). Die Blumenkohlblätter wurden mit einer Schneidemaschine ohne Einsatz der Schneideblätter zerschlagen, was dem Einwirken eines Schlägelmulchers sehr nahe kam. Die Applikationsrate (1 kg Frischmasse pro Haube) entsprach Mengen von 3367 kg C und 286 kg N ha⁻¹. Diese Menge ist hoch im Vergleich mit durchschnittlichen Werten für Blumenkohl (153–180 kg N ha⁻¹; Feller et al. 2010), kommt aber durchaus in der Praxis vor, insbesondere wenn ein größerer Teil der Frucht aufgrund mangelnder Qualität auf dem Feld verbleibt. Dieser Versuch stellte demnach eine Art „Worst-Case“-Szenario in Bezug auf die Aufwandmenge an Gemüse-Ernterückständen nach.

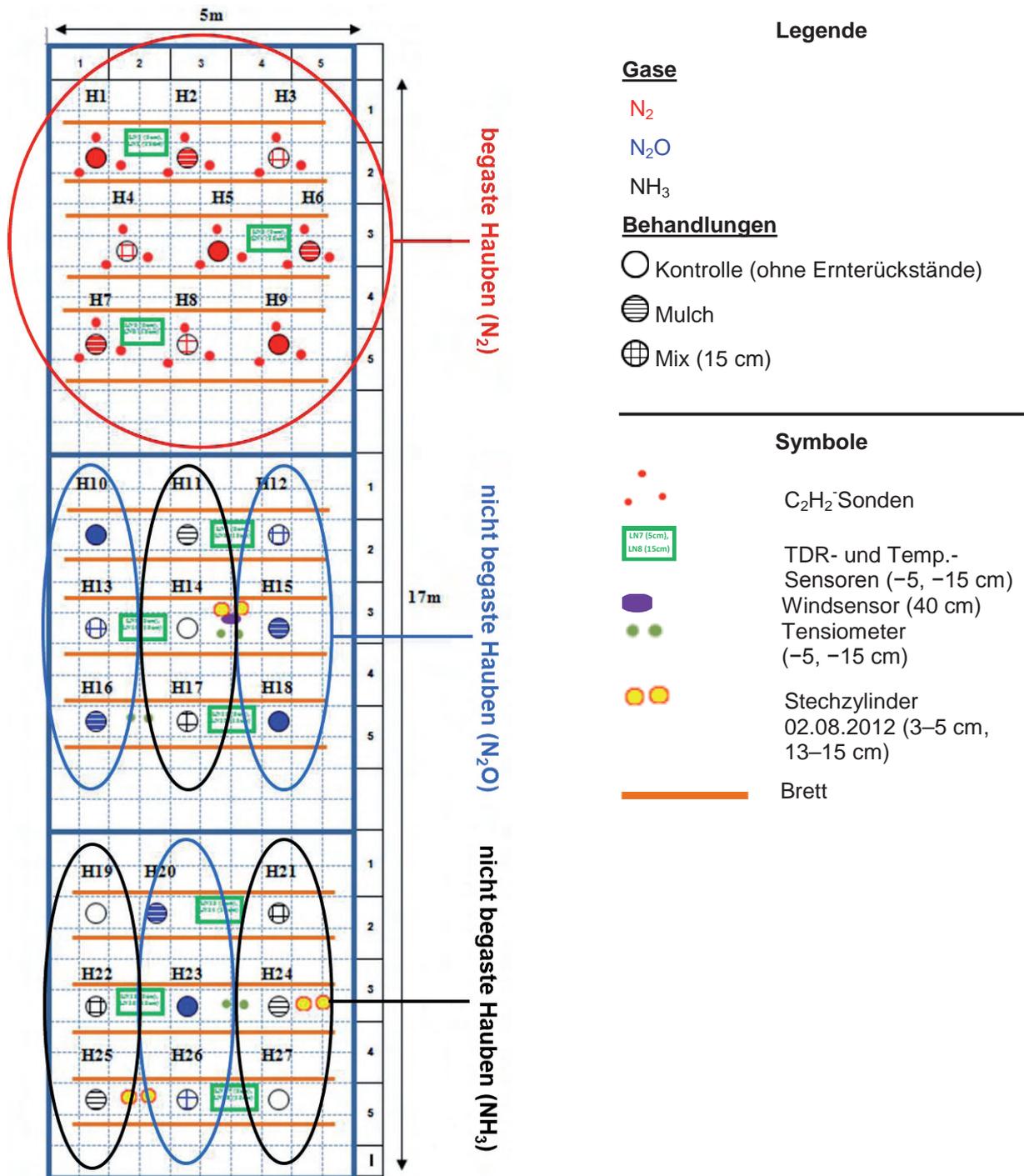


Abb. 4 Versuchsanlage des Freilandversuches Trasse.

Versuchsablauf

Zunächst wurde der Boden der Versuchsfläche 20 cm tief gespätet und geebnet (07.–08.06.2012), dann wurden die Hauben eingetrieben (12.–18.06.2012), die Sensoren eingebaut, die Dächer über die Versuchsfläche geschoben (10.07.2012), und die Lüfter angeschlossen. Die erste Vormessung war am 13.07.2012, gefolgt von der oben beschriebenen Nmin-Düngung. Die zweite Vormessung fand am 16.07.2012 statt, gefolgt von der Applikation der Blumenkohlernterückstände. Danach gab es neun weitere Messungen (1, 4, 9, 14, 21, 28, 37, 44, und 65 Tage

nach Applikation der Ernterückstände). Zu Beginn und Ende wurden Bodenproben für die Gesamt-C und -N sowie Nmin-Analysen genommen.

Freilandversuch „Kastenparzelle“

Standort

Als Versuchsstandort nutzten wir hier die Kastenparzellenanlage (KPA) der Versuchsstation in Großbeeren (Abb. 5). Die Versuchsanlage ist im Detail in Rühlmann (2006) beschrieben. Die KPA beherbergt drei unterschiedliche Böden in jeweils 8 x 24 Betonparzellen mit den Maßen 2 m (L) x 2 m (B) x 0,75 m (H):

- Fahlerde-Braunerde (Arenic-Luvisol) aus schwachschluffigem Sand (88 % Sand, 6% Schluff, 6% Ton), Herkunft Großbeeren, Einzugsbereich der Nuthe-Niederung, Brandenburg, pH-Wert 6,6
- Gley-Vega (Gleyic-Fluvisol) aus stark sandigem Lehm (68 % Sand, 4% Schluff, 28% Ton), Herkunft Golzow, Oderbruch, Brandenburg, pH-Wert 7,6
- Lessivierte Schwarzerde (Luvic-Phaeozem) aus mitteltonigem Schluff (57 % Sand, 26% Schluff, 17% Ton), Herkunft Wanzleben, Magdeburger Börde, Sachsen-Anhalt, pH-Wert 7,5

Diese im Jahr 1972 in Betrieb genommene Kastenparzellenanlage bietet eine hervorragende Möglichkeit, den alleinigen Einfluss des Bodentyps ohne den störenden Einfluss unterschiedlicher klimatischer oder anderer Bedingungen wie dem Geländere relief zu untersuchen. Die klimatischen Bedingungen entsprechen den im Abschnitt Freilandversuch „Trasse“ beschriebenen Kennzahlen.



Abb. 5 Luftbild der Kastenparzellenanlage Großbeeren.

Versuchsanlage und Behandlungen

Im Versuch wurden zwei Einflussfaktoren geprüft:

- Bodentyp (Beschreibungen siehe oben)
 - Fahlerde-Braunerde aus schwachschluffigem Sand (Kurz: **Sand**)
 - Gley-Vega aus stark sandigem Lehm (Kurz: **Lehm**)
 - Lessivierte Schwarzerde aus mitteltonigem Schluff (Kurz: **Schluff**)

- Applikation von Blumenkohl-Ernterückständen
 - Keine (Ernterückstände entfernt, obere 15 cm Boden gemischt) (Kurz: **Kontrolle**)
 - Ernterückstände oberflächlich appliziert, nach 3 Wochen in die oberen 15 cm des Bodens gemischt (Kurz: **Mulch**)
 - Ernterückstände in die oberen 15 cm des Bodens gemischt (Kurz: **Mix**)
 - Ernterückstände 15–20 cm tief untergepflügt (Kurz: **Pflug**)

Das heißt, es ergaben sich 12 Varianten (3 Bodentypen x 4 Applikationen), die für die Gasflussmessungen mit jeweils 3 Hauben repliziert wurden. Die Anwendung der Applikationstechniken erfolgte mit der Hand in den Hauben. Dies stellte eine hinreichende Genauigkeit der applizierten Mengen sicher. Um Begleitmessungen wie Bodengehalte an Nmin, Gesamt-C und -N, Bodenwassergehalt (TDR-Sonden), Bodentemperatur, und Windgeschwindigkeit durchführen zu können, wurden darüber hinaus für jede Variante zwei Plots der KPA vollständig wie oben beschrieben behandelt.

Die Rahmenbedingungen entsprachen, anders als im Freilandversuch „Trasse“ (s.o.), sehr gut den Gegebenheiten in der Realität. Insbesondere gab es keine Überdachung, sondern es herrschten natürliche Wetterbedingungen, eine Blumenkohlkultur wurde auf der gesamten Fläche vor Start des Versuches angebaut (Abb. 6) und die Aufwandmenge der Ernterückstände entsprach dem tatsächlichen Anteil der Ernterückstände in diesem Versuch und stimmte gut mit Durchschnittswerten überein (2627 kg C ha⁻¹ und 154 kg N ha⁻¹).



Abb. 6 Blumenkohlkultur (links) und Mulch-Variante (rechts) im Freilandversuch „Kastenparzellenanlage“.

Da man die einzelnen Parzellen eines Bodentyps der Kastenparzellenanlage als unabhängig voneinander betrachten kann (keine Gradienten oder räumlich differenzierte Einflüsse der Umgebung), entsprach die Versuchsanlage einer vollständig randomisierten Verteilung der Varianten, mit der Einschränkung, dass die Hauben der vier Applikationstechniken jeweils zusammen auf einem Plot angeordnet waren (Abb. 7)

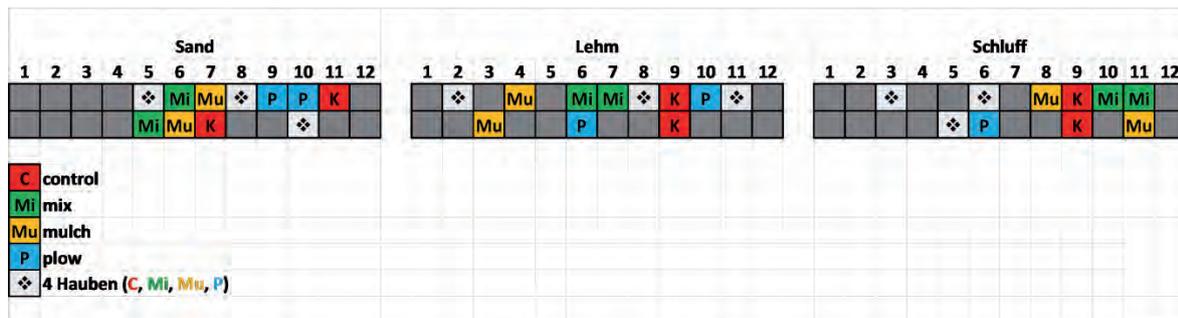


Abb. 7 Versuchsanlage auf der Kastenparzellenanlage.

Versuchsablauf

Der Blumenkohl wurde mit einem Reihen- und Zwischenreihenabstand von 0,5 m x 0,5 m am 14.06.2013 gepflanzt (16 Köpfe pro Plot), mit Kulturschutznetzen abgedeckt, bei Bedarf beregnet und nach Nmin-Sollwerten (Feller et al. 2010) gedüngt. Am 21.08.2013 wurde ein Teil des Blumenkohls geerntet, die Ernterückstände entfernt und die Haubenbasisringe auf den frei gewordenen Plots eingetrieben. Am 22.08.2013 wurde der Rest des Blumenkohls geerntet, die Ernterückstände entfernt, mit dem Rasenmäher zerkleinert und in den Hauben und auf den Plots für die Begleitmessungen appliziert. Die Applikationsrate entsprach in allen Varianten (außer der Kontrolle) einer Menge von 2627 kg C und 154 kg N ha⁻¹. Die Bodenbearbeitung in den Hauben und auf den Parzellen sowie der Einbau der TDR-Sonden und Temperaturfühler auf den Plots (jeweils zwei TDR-Sonden und Temperaturfühler in 5 und 15 cm Tiefe) wurden am 23.08.2013 durchgeführt. Ab dem 1. Tag wurden die Gasemissionen über einen Zeitraum von 7,5 Monaten (24.08.2013–10.04.2014) gemessen. In dieser Zeit gab es 26 Gasflussmessungen und 11 Nmin-Messungen.

3. Ergebnisse

3.1. Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

Freilandversuch „Trasse“

Abiotische Bedingungen

Es zeigte sich, dass der Anteil des wassergefüllten Porenvolumens am Gesamtporenvolumen nie über 25% stieg, obwohl exzessiv beregnet wurde, was die geringe Wasserhaltekapazität dieses sehr sandigen Bodens widerspiegelt (Abb. 8). Die Windgeschwindigkeit lag in 79% der Zeit (Stunden) über 0,1 m s⁻¹, so dass eine Limitierung der NH₃ Emissionen bei den beobachteten Raten (s.u.) unwahrscheinlich war und die Methode der dauerhaften Belüftung des Haubeninnenbereichs gerechtfertigt war. Die kumulierte beregnete Wassermenge zwischen der ersten und letzten Gasflussmessung betrug 123 mm. Die ersten zwei Wochen des Versuches fielen in eine sehr warme Periode, was an den hohen Bodentemperaturen erkennbar wird (Abb. 8) und die hohe biologische Aktivität erklärt, die sich in den hohen CO₂-Emissionsraten zeigte (s.u.).

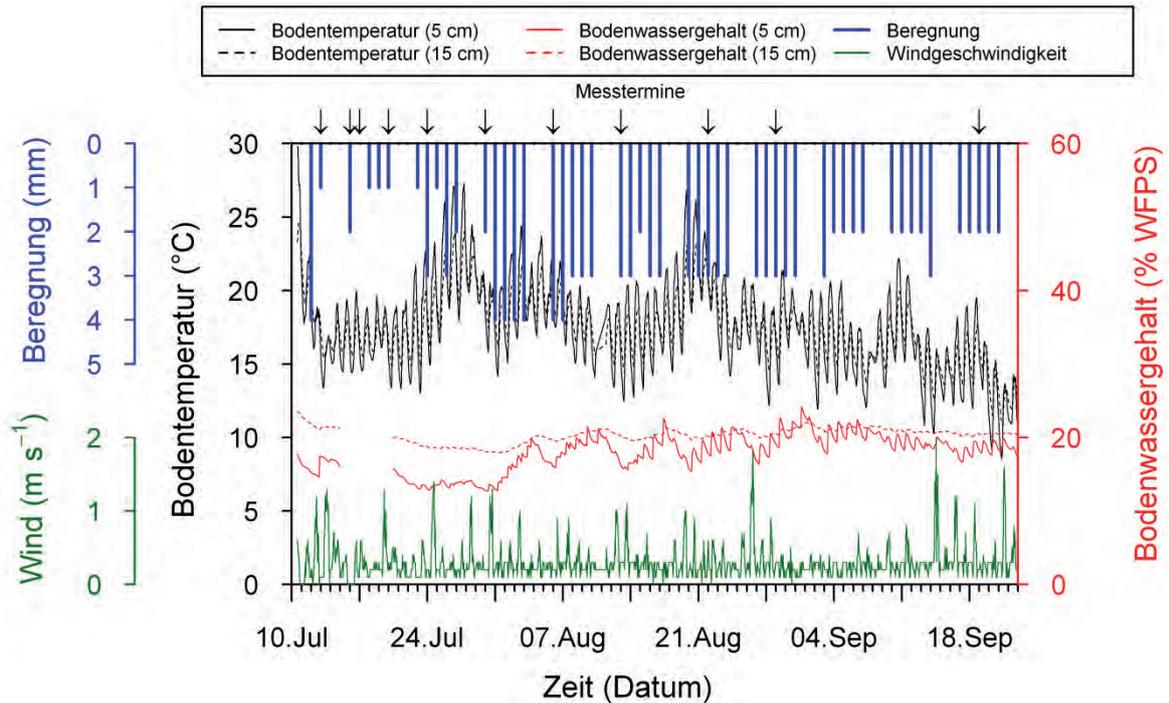


Abb. 8 Abiotische Bedingungen während des Freilandversuches „Trasse“. WFPS=Anteil der wassergefüllten Poren am Gesamtporenvolumen des Bodens.

Emissionsraten

Die CO₂ Emissionsraten (Abb. 9) zeigten, dass unter den gegebenen Bedingungen (hohe Temperatur, hoher Bodenwassergehalt, Applikation zerschlagener und nährstoffreicher Ernterückstände) die biologische Aktivität nach Applikation von Ernterückständen sehr schnell ansteigt, unabhängig davon, ob das Material auf der Bodenoberfläche liegt oder eingearbeitet wird. Im Fall von N₂O (Abb. 10) und NH₃ (Abb. 11) wurden die ersten, gegenüber der Kontrolle deutlich erhöhten Emissionsraten erst beim nächsten Messtermin (Tag 4) beobachtet. Dabei deuten die Ergebnisse darauf hin, dass das Maximum der N₂O-Emissionen um Tag 4 herum lag während die NH₃-Emissionen einen weniger steilen Abfall zeigten mit einem Zeitraum erhöhter Emissionen von 1–2 Wochen. Hierbei sollte beachtet werden, dass die NH₃-Emissionen generell deutlich unter den N₂O-Emissionen lagen.

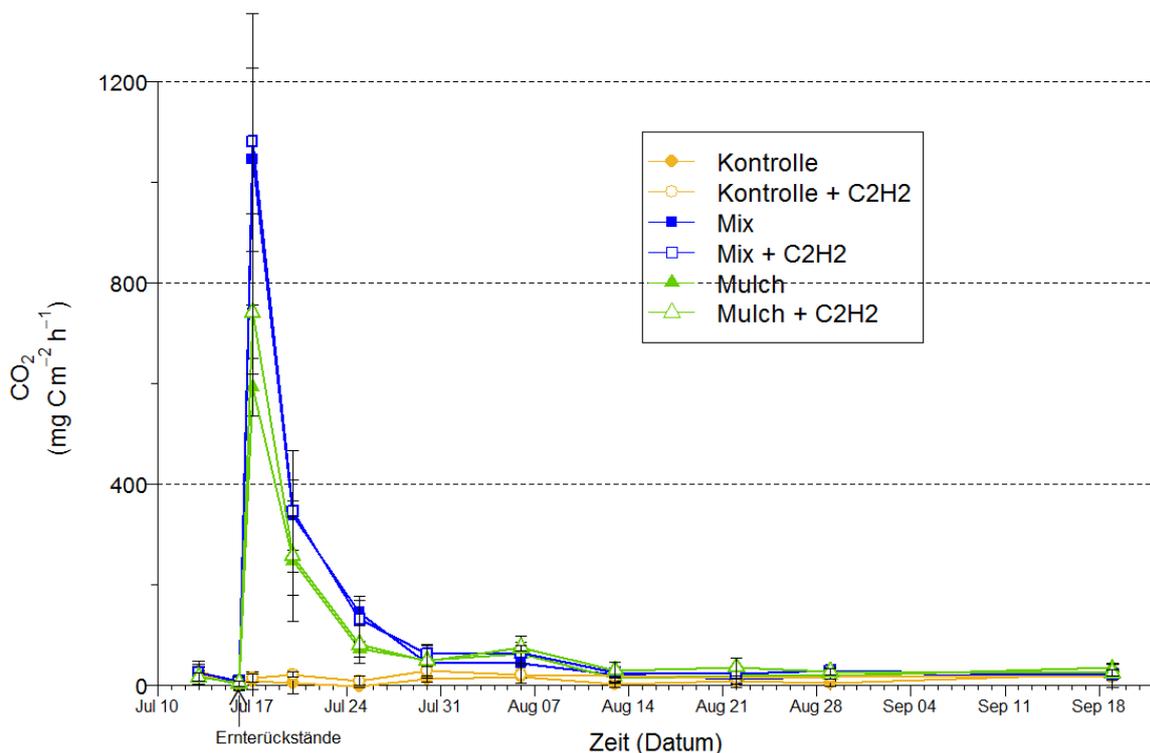


Abb. 9 CO₂-Emissionsraten. Fehlerbalken repräsentieren ± 1 Standardabweichung (n = 3).

Die zeitliche Differenz zwischen dem Anstieg der CO₂-Emissionsraten auf der einen Seite und den N₂O- und NH₃-Emissionsraten auf der anderen Seite lassen vermuten, dass der Abbau organischer Substanz dazu führte, dass die Bedingungen für gasförmige N-Verluste geschaffen wurden. Im Falle des N₂O sind zwei Gründe zu nennen, die O₂-Zehrung durch aeroben Abbau organischer Substanz, welche anaerobe Mikrosites hoher Denitrifikationsraten geschaffen hat, und die erhöhte Verfügbarkeit von Nitrat und C-Quellen, welche für die Denitrifikation essentiell sind. Die NH₃-Emissionen betreffend, ist davon auszugehen, dass die erhöhte NH₄⁺-Verfügbarkeit durch Mineralisation von organischem Material den Anstieg der Emissionen verursachte. Sowohl beim N₂O als auch beim NH₃ kann hier nicht getrennt werden zwischen N, das aus dem applizierten Blumenkohlmateriale selber kam und N, das sich bereits im Boden befand. Letzteres kann bereits in mineralischer Form vorgelegen haben aber auch durch den Anstieg der biologischen Aktivität nach Applikation der Ernterückstände freigesetzt worden sein. Der statistische Variantenvergleich erfolgte anhand der Emissionssummen (s.u.), da aufgrund der großen Streuung einzelner Messtermine keine sicheren Aussagen aus Tageswerten getroffen werden können.

Acetyleninhibierungsmethode

Was die mit der Acetyleninhibierungsmethode abgeschätzten Emissionen von N₂ betrifft, könnte man die Ergebnisse dahingehend interpretieren, dass es in allen Varianten nur sehr geringe N₂-Emissionen gab. So konnten keine signifikanten Erhöhungen der N₂O-Emissionssummen durch C₂H₂-Begasung festgestellt werden (nicht gezeigt; Tukey Test, $\alpha = 0,05$). Unter Berücksichtigung der zeitweise sehr hohen N₂O-Emissionen und der Ergebnisse anderer Studien, die nahelegen, dass das N₂/N₂O-Verhältnis unter diesen Bedingungen höher liegen sollte (z.B. Morkved et al. 2006), können wir aber nicht ausschließen, dass eine Inhibierung nicht oder nur

teilweise erfolgte. Denkbar wäre eine unvollständige Diffusion von C_2H_2 in Bodenaggregate oder Stücke von Ernterückständen, eine Limitierung der Denitrifikation durch lokalen Mangel an Nitrat als Folge der Nitrifikationshemmung, ein Abbau des C_2H_2 durch Mikroorganismen oder die Verminderung der Denitrifikation durch Reaktion von C_2H_2 mit Stickstoffmonoxid (Groffman et al. 2006). Es traten keine erheblichen Unterschiede in den CO_2 -Emissionsraten (Abb. 9) oder -summen zwischen den begasten und unbegasten Varianten auf, oder nicht-lineare Konzentrationsanstiege in den begasten Varianten (nicht gezeigt). Da jedoch die Wirksamkeit der C_2H_2 -Begasung nicht zweifelsfrei festgestellt werden konnte, wurden die Ergebnisse in den folgenden Auswertungen nicht berücksichtigt.

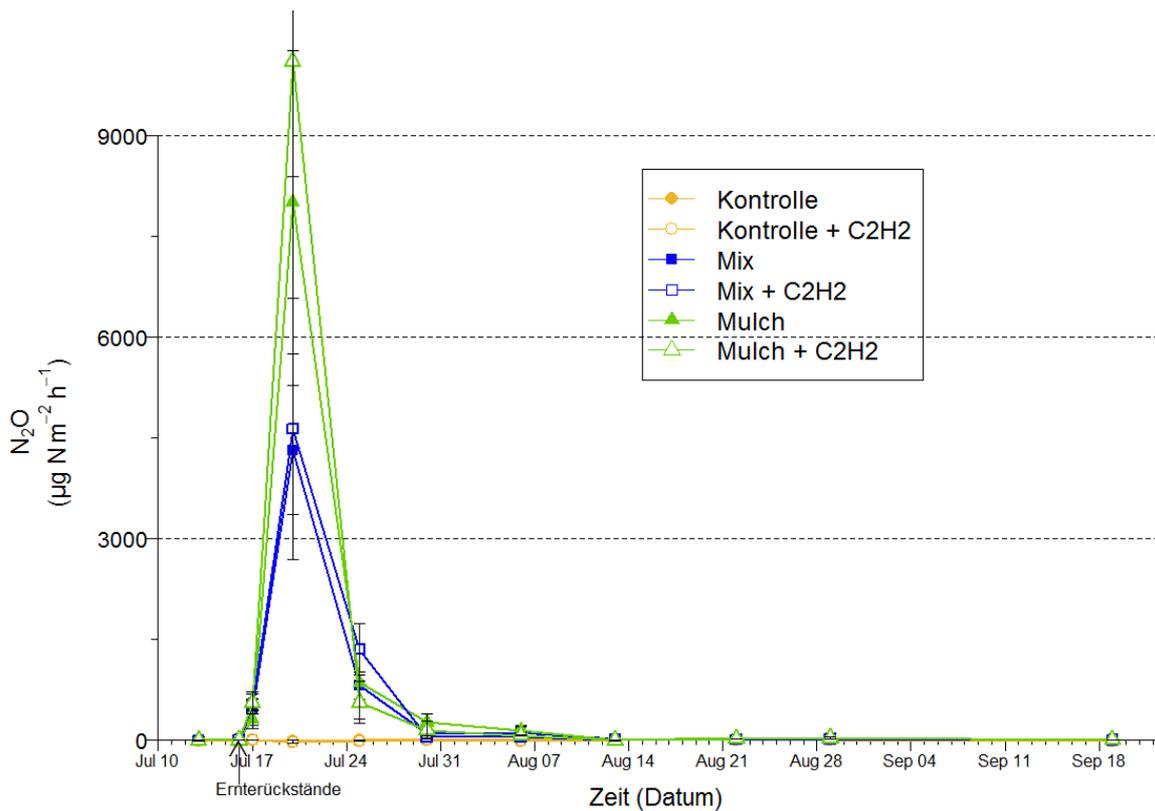


Abb. 10 N₂O-Emissionsraten. Fehlerbalken repräsentieren ± 1 Standardabweichung ($n = 3$).

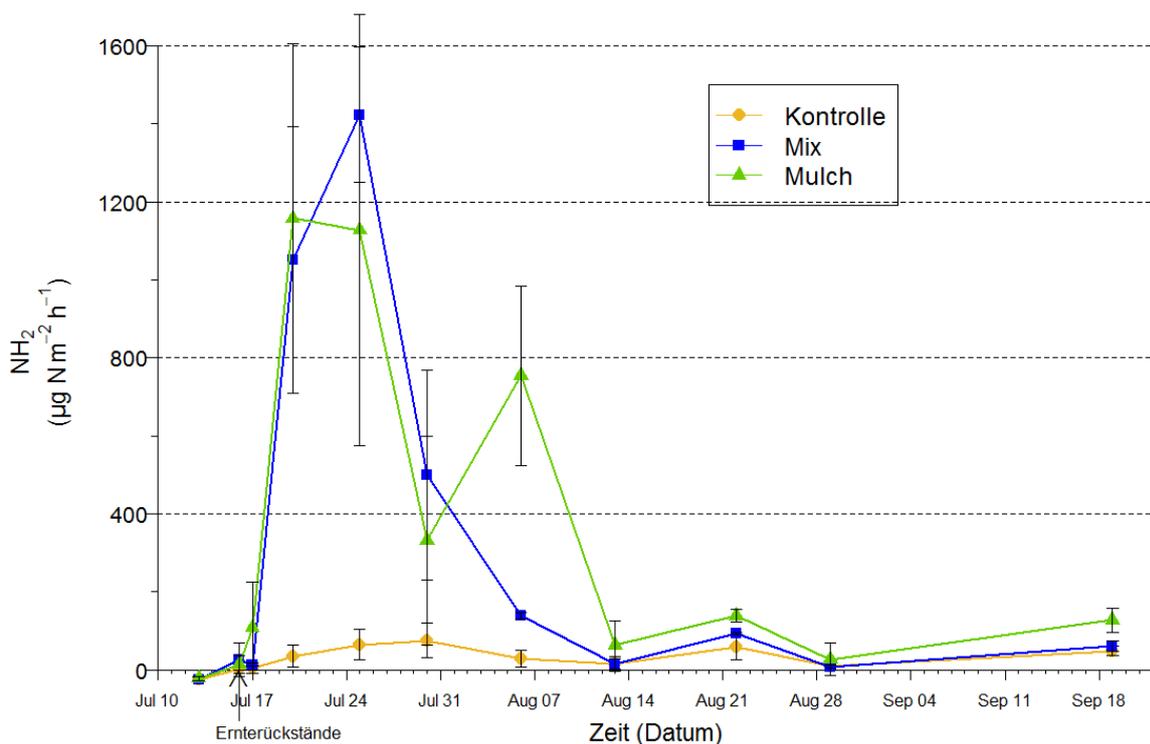


Abb. 11 NH₃-Emissionsraten. Fehlerbalken repräsentieren ± 1 Standardabweichung ($n = 3$).

Emissionssummen

Die Emissionssummen im Versuchszeitraum von 65 Tagen stiegen bei allen drei Gasen von der Kontrolle, über die Mix-Variante zur Mulch-Variante an, wobei sich jeweils nur die Kontrolle statistisch signifikant von den beiden Varianten mit Ernterückständen unterschied (Tab. 1). Anders als vermutet, führte eine oberflächige Applikation der Ernterückstände nicht zur Reduktion der N₂O-Emissionen, was zeigt, dass sich auch oberflächennah anaerobe Bedingungen einstellen können, wenn große Mengen von Ernteresten vorhanden sind. Dies wird ermöglicht durch lokale Bereiche hoher Sauerstoffzehrung und Wassergehalte.

Bei NH₃ hatten wir höhere Emissionen in der Mulch-Variante erwartet, interessanterweise gab es aber keinen deutlichen Unterschied zwischen der Mulch- und der Mix-Variante. Dies deutet auf eine sehr hohe Diffusivität des Bodens hin, der auch die Diffusion von NH₃ aus einigen cm Tiefe des Mineralbodens zulässt. Es ist aber auch denkbar, dass die NH₃-Diffusion durch die dichte Mulchschicht behindert wurde oder dass eine erhöhte N-Mineralisierung in der Mix-Variante die NH₃ Nachlieferung im Vergleich zur Mulch-Variante erhöhte.

Die Emissionssummen von N₂O + NH₃ lagen zwischen 9,9 (Mix) und 14,8 (Mulch) kg N ha⁻¹ (Tab. 1), was nicht in der Größenordnung liegt, die beobachtete N-Bilanzüberschüsse in typischen konventionellen Freilandgemüsebausystemen erklären können (Nett et al. 2011). Unter Beachtung der kurzen Zeit, in der diese Verluste entstanden, sind die Emissionen an NH₃ und insbesondere an N₂O durch ihre umweltschädigende Wirkung aber dennoch ernst zu nehmen. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Gesamtverluste an N₂O und N₂ noch deutlich höher liegen können, wenn die gemulchten Ernterückstände nicht so schnell austrocknen

wie in diesem Versuch. Durch die sehr hohen Temperaturen war das gemulchte Material zwar binnen vier Tagen bereits stark zersetzt, was mit dem beobachteten Emissionspeak zusammenfällt, nach weiteren fünf Tagen aber bereits stark ausgetrocknet (Abb. 12). Des Weiteren ist auf Böden mit einer feineren Korngrößenverteilung und höheren Gehalten an organischer Bodensubstanz mit höheren Emissionen an N_2O und N_2 zu rechnen, da die Bedingungen im Mineralboden Denitrifikation begünstigen.

Tab.1 Gesamtemissionen und Emissionsfaktoren (Werte in Klammern repräsentieren Standardabweichungen für n = 3).

Variante	Emissionssumme (kg C or N ha ⁻¹ in 65 Tagen)			EF* (%)		
	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	CO ₂	N ₂ O	NH ₃
Kontrolle	164 (60.6) a	0.0 (0.02) a	0.6 (0.10) a	n.a.	n.a.	n.a.
Mix	1329 (252.4) b	5.8 (1.17) b	4.1 (0.58) b	35 (7.5) a	2.0 (0.41) a	1.2 (0.20) a
Mulch	1016 (241.0) b	9.7 (2.64) b	5.1 (1.27) b	25 (7.2) a	3.4 (0.92) a	1.6 (0.44) a

Werte, die einen gleichen Buchstaben innerhalb einer Spalte tragen, unterscheiden sich nicht signifikant einem Tukey HSD Test zufolge (Summen) bzw. einem Welch t-Test zufolge (EF)

* Emissionssumme der entsprechenden Variante minus Emissionssumme der Kontrollvariante geteilt durch die Menge an appliziertem C bzw. N mit den Ernterückständen *100

n.a. nicht anwendbar

Die Ergebnisse demonstrierten, dass es auch auf sandigen Böden mit geringem Wasserhaltevermögen zu starken N_2O - und mäßigen NH_3 -Emissionen nach Applikation von Ernterückstände kommen kann, insbesondere aus einer dichten Mulchschicht. Auch die Emissionsfaktoren (Tab. 1) liegen weit über den vom Weltklimarat angenommenen Standardwerten, obwohl nur ein kurzer Zeitraum von 65 Tagen erfasst wurde.

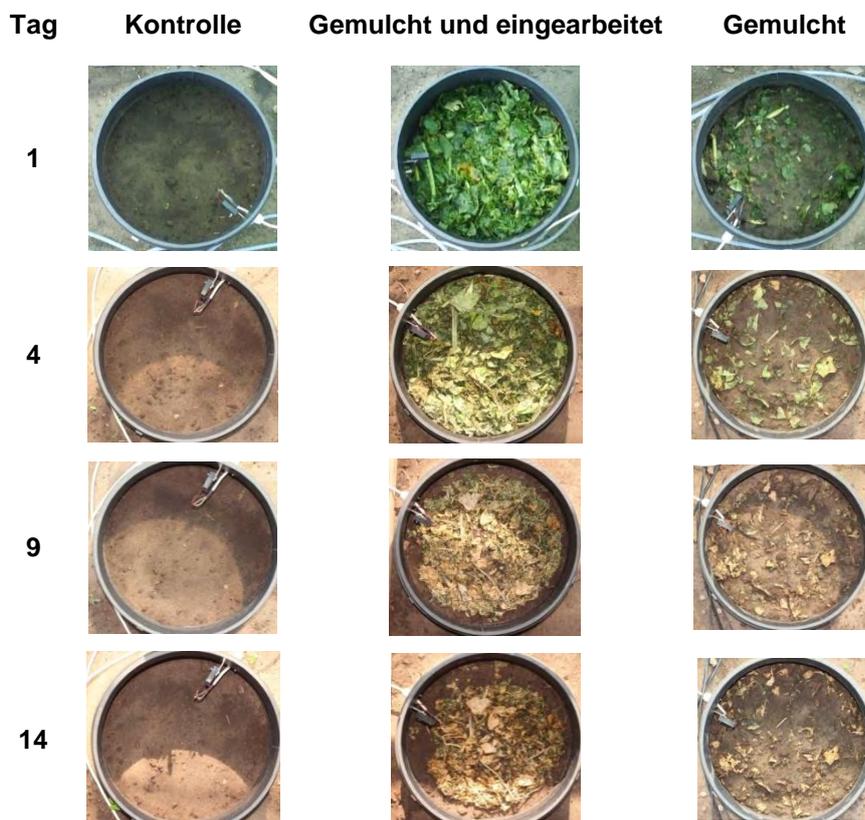


Abb. 12 Fotoserie von drei ausgewählten Hauben.

Freilandversuch „Kastenparzelle“

Abiotische Bedingungen

Deutlich zeichnete sich die unterschiedliche Wasserspeicherefähigkeit der drei Böden bei den Wassergehalten ab (Abb. 13). Diese blieben mehr oder weniger konstant und lagen, ausgedrückt als Anteil des wassergefüllten Porenvolumens, im Mittel bei 81 % (Lehm), 30 % (Sand) und 56 % (Schluff). Dabei fiel auf, dass der Unterschied zwischen 5 und 15 cm Tiefe vom Sand über den Schluff zum Lehm zunahm, was die abnehmende Diffusivität bzw. zunehmende Wasserretention mit feiner werdender Korngrößenverteilung widerspiegelt. Bei den Temperaturen gab es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Böden zu verzeichnen. Bemerkenswert ist die Periode Ende Januar bis Anfang Februar 2014, in der es in allen drei Böden und beiden Tiefen zu Frost kam.

Die Nmin-Gehalte zeigen, dass es in allen Böden zu Netto-N-Mineralisierung nach Applikation der Ernterückstände kam und dass diese insbesondere im Schluff und Lehm bei der Mulch-Variante, anders als in der Mix- und Pflug-Variante, erst nach der Einarbeitung einsetzte. Außerdem ist zu erkennen, dass es im Sand und Schluff bei der Pflug-Variante zu einer kurzen Netto-N-Immobilisierung in den ersten 1–2 Wochen kam (Werte fallen stärker als Kontrolle, siehe Abb. 13). Es ist zu beachten, dass aufgrund einer fehlerhaften Nmin-Ausgleichsdüngung im Blumenkohl die Werte zum Start des Versuchs im Sand in allen Applikationstechniken ca. 100 kg N ha⁻¹ höher lagen als im Lehm und Schluff. Die Abnahmen der Nmin-Gehalte innerhalb eines Zeitraums von ca. drei Monaten auf 50 kg ha⁻¹ oder weniger, zeigen, dass es insbesondere im Sand eine schnelle Verlagerung von Nmin in Bodenschichten tiefer als 60 cm bzw. starke Auswaschung gab (Abb. 13).

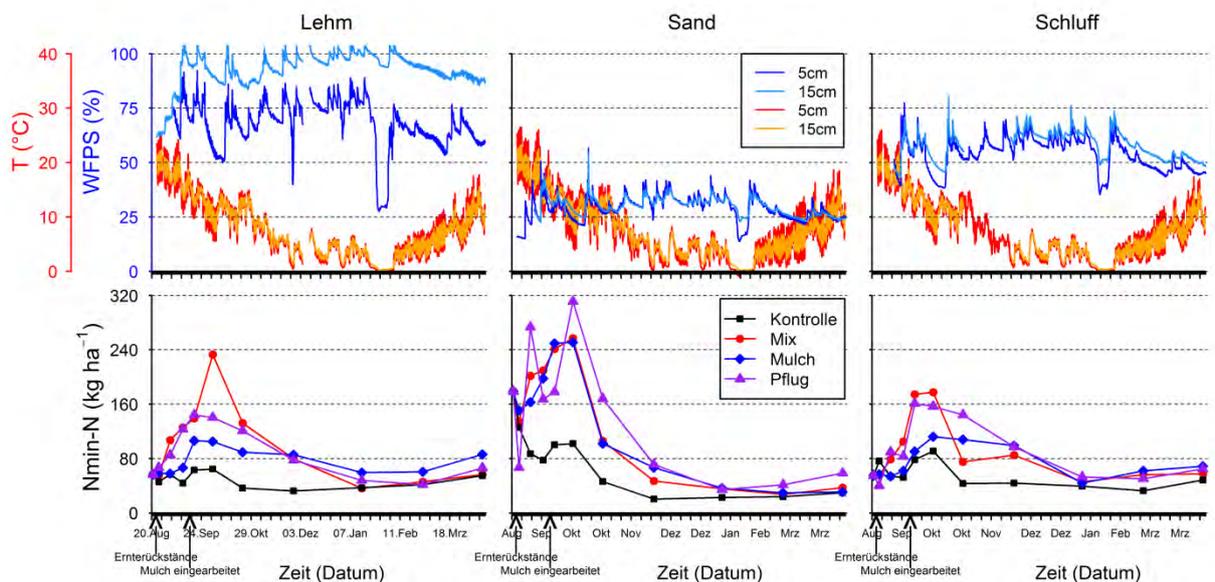


Abb. 13 Abiotische Bedingungen und Bodengehalte an Nmin im Freilandversuch „Kastenparzelle“. WFPS=Anteil der wassergefüllten Poren am Gesamtporenvolumen des Bodens.

Emissionsraten

Die CO₂-Emissionsraten (Abb. 14) demonstrieren, dass der Umsatz der Ernterückstände sehr schnell begann. Dabei zeigte sich, dass keine deutlichen

Unterschiede zwischen den Applikationstechniken Mulch, Mix und Pflug zu erkennen waren. Im Falle des Lehmbodens zeigte auch die Kontrolle eine verstärkte CO₂-Emission zum Start des Versuches, die auf die Bodenbearbeitung und den Abbau von organischer Bodensubstanz zurückzuführen ist. Auffällig war die Erhöhung der CO₂-Emissionen in der Mulch-Variante nach der Einarbeitung, insbesondere im Sand. Der gleichförmige Verlauf der CO₂-Emissionen im späteren Verlauf des Versuchs (ab November 2013) deutet auf die Kontrolle durch abiotische Faktoren (Wassergehalt, Temperatur), unabhängig von der Applikationstechnik hin. Offensichtlich waren leicht verfügbare C-Quellen aus den Blumenkohlernterückständen bereits vorher abgebaut worden.

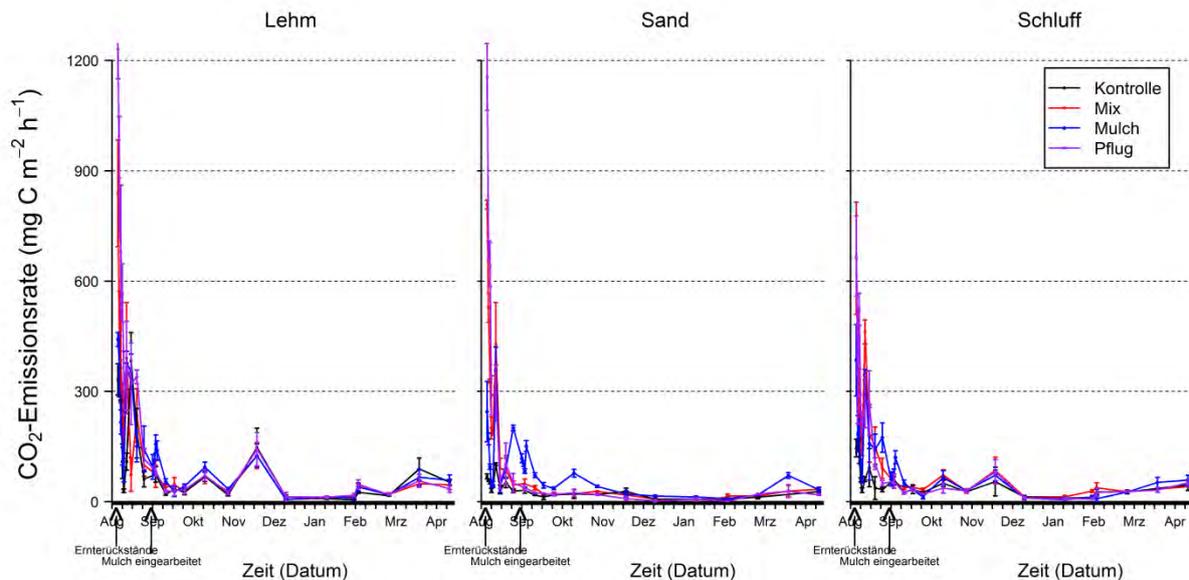


Abb. 14 CO₂-Emissionsraten im Freilandversuch „Kastenparzelle“. Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen (n = 3).

Bei den N₂O-Emissionsraten (Abb. 15) gab es einige interessante Unterschiede. So hob sich die Pflug-Variante in allen drei Böden in den ersten Wochen deutlich von den anderen Applikationstechniken ab. Dies war besonders deutlich im Lehm und Schluff. Nur im Sand lagen die Emissionen der Mix-Variante in diesem Zeitraum ähnlich hoch. Die Mulchvariante zeigte, anders als im Freilandversuch „Trasse“, fast keine N₂O-Emissionsraten im Zeitraum vor der Einarbeitung, unmittelbar nach der Einarbeitung war allerdings in allen drei Böden ein deutlicher Peak zu sehen. Ab Oktober in allen Varianten, wie auch bei der Kontrolle über den gesamten Versuchszeitraum, gab es keine nennenswerten N₂O-Emissionen. Dies gilt auch für den Frost-Tau-Zyklus Ende Januar, der zwar in den Emissionen sichtbar wurde aber nicht die Größenordnung erreichte, die in andere Studien berichtet worden ist (Flessa et al. 1995, Morkved et al. 2006).

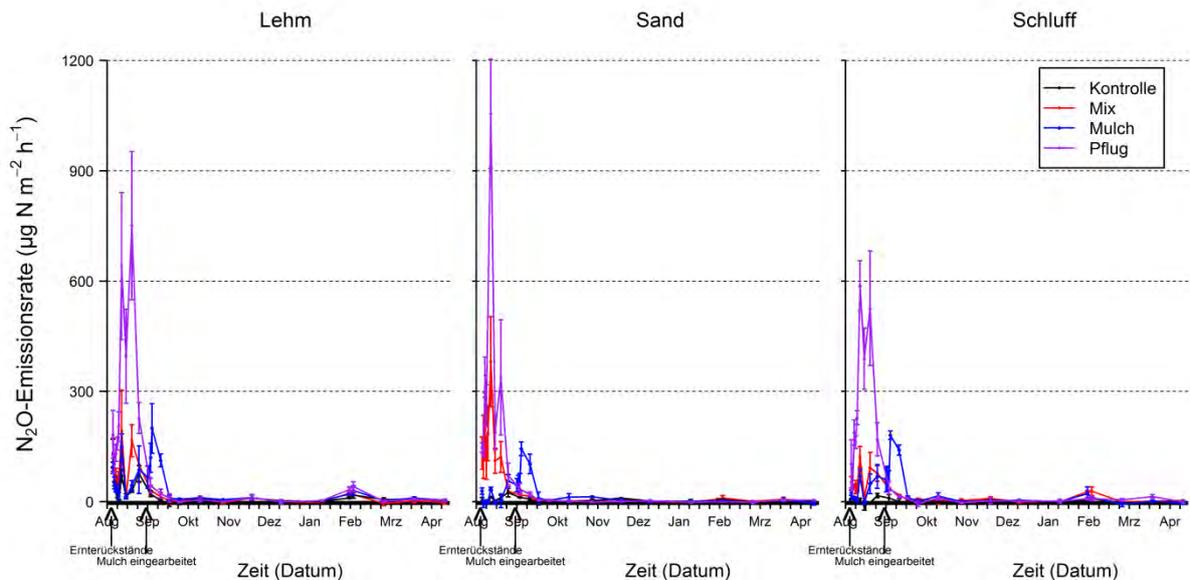


Abb. 15 N₂O-Emissionsraten im Freilandversuch „Kastenparzelle“. Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen (n = 3).

Die NH₃-Emissionsraten (Abb. 16) zeigten die gleiche Größenordnung wie die N₂O-Emissionsraten. Auch hier waren während des ersten Monats deutliche Unterschiede zwischen den Applikationstechniken zu sehen. Anders als bei N₂O, und unseren Erwartungen entsprechend, produzierte die Mulch-Variante die höchsten Emissionsraten. Auch die Mix-Variante setzte sich in den ersten Wochen andeutungsweise nach oben ab. Nach September lassen sich keine Unterschiede zwischen den Applikationstechniken erkennen, unabhängig vom Bodentyp. Der gleichförmige Verlauf aller Varianten deutet auf eine Steuerung der Emissionsraten durch abiotische Faktoren oder einen nicht-systematischen Fehler hin, der mit der Grundkontaminierung bzw. den Werten der Negativkontrollen in Verbindung stehen könnte, die teilweise höher lagen als die Werte der Varianten (negative Emissionsraten).

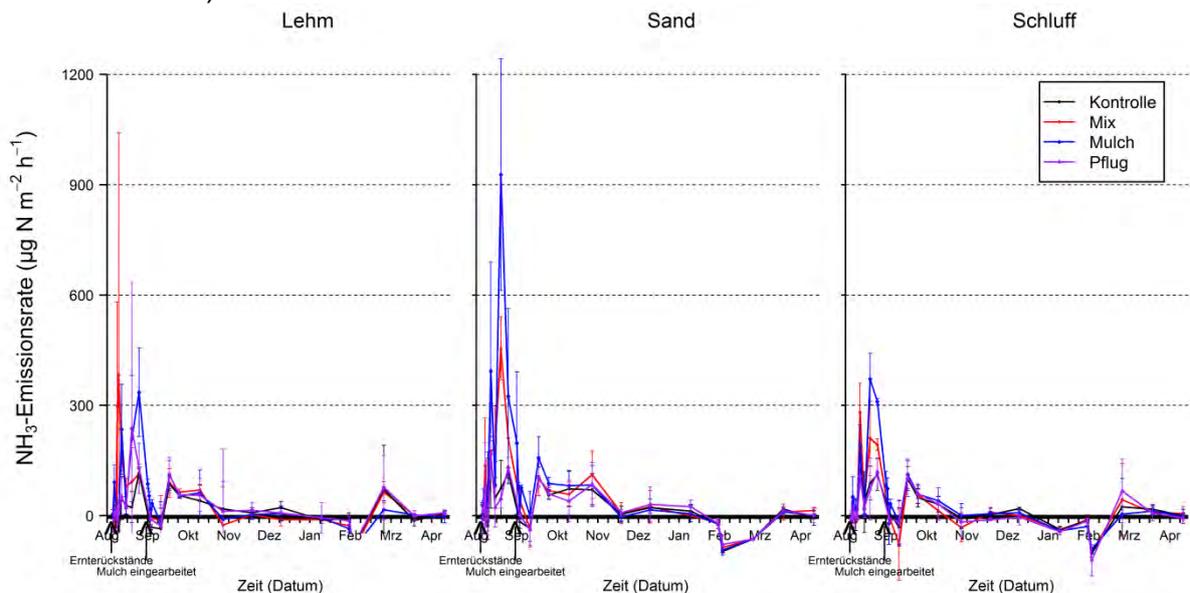


Abb. 16 NH₃-Emissionsraten im Freilandversuch „Kastenparzelle“. Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen (n = 3).

Von statistischen Vergleichen der täglichen Emissionsraten an CO₂, N₂O und NH₃, die auf Stundenmessungen basieren, wurde generell abgesehen, da diese zu variabel sind, um eine hinreichende Sicherheit zu gewährleisten. Stattdessen wurden Emissionssummen für den gesamten Versuchszeitraum von 230 Tagen durch Interpolation berechnet, die dann statistisch verglichen wurden. Die Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

Emissionssummen

Bei den CO₂-Emissionssummen lagen die Varianten mit Applikation von Ernterückständen zwar höher als die Kontrolle, dieser Unterschied war aber nicht statistisch signifikant (Abb. 17, links). Dies ist auf die große Streuung der Werte und den relativ kleinen Beitrag des in dieser Zeit mineralisierten Kohlenstoffs aus den Ernterückständen zur Gesamt-CO₂-Emission zurückzuführen. Einen signifikanten Unterschied gab es zwischen der durchschnittlichen CO₂-Emissionssumme im Lehm und denen im Sand und Schluff (Abb. 18, links). Dies deutet auf eine erhöhte mikrobielle Aktivität und damit verstärkten Abbau von organischer Bodensubstanz im Lehm hin, dessen Gesamt-C und -N-Gehalte (1,8 g Ct und 0,16 g Nt kg⁻¹) nicht höher lagen als die des Schluffs (1,93 g Ct und 0,16 g Nt kg⁻¹). Weder Bodentyp noch Applikationstechnik hatten einen signifikanten Effekt auf die durch Subtraktion der Kontrolle abgeschätzten Anteile mineralisierten Kohlenstoffs aus den Ernterückständen (nicht gezeigt).

Die Summe der Lachgasemissionen über den Beobachtungszeitraum von 230 Tagen hing signifikant von der Applikationstechnik ab (Pflug>Mulch=Mix=Kontrolle; Abb. 17, Mitte). Dass die Pflugvariante am meisten Lachgas produzierte, passt gut zu der Vorstellung, dass in einer konzentrierten untergepflügten Schicht von Ernterückständen hohe Sauerstoffzehrung, hohe Kohlenstoff- und Stickstoff-Verfügbarkeit sowie schlechte Sauerstoffnachlieferung zusammentreffen. Darüber hinaus bestätigen diese Ergebnisse die Beobachtung aus dem Freilandversuch „Trasse“, dass die oberflächige Applikation von Gemüseernterückständen die N₂O-Emissionen nicht gegenüber einer mischenden Einarbeitung in den Oberboden reduziert.

Entgegen unserer Hypothese, dass N₂O-Verluste höher liegen werden bei feinerer Korngrößenverteilung und somit höheren Humusgehalten (Bijaysingh et al. 1988) und Wasserhaltekapazitäten (Maag und Vinther 1996), gab es keinen Effekt des Bodentyps (Abb. 18, Mitte). Verschiedene Ursachen könnten dazu geführt haben, dass dieser Effekt nicht auftrat. Möglich ist zum Beispiel, dass der Anteil des durch Denitrifikation vollständig zu N₂ reduzierten N mit zunehmender Feinkörnigkeit und damit Wasserretention und Sauerstoffmangel (Sand<Schluff<Lehm) anstieg. Eventuell sind auch die höheren Startwerte an N_{min} im Sandboden die Ursache für den fehlenden Unterschied zwischen Sand und Lehm bzw. Schluff. Denkbar ist auch, dass es zu einer stärkeren Festlegung des freigesetzten Stickstoffs in Biomasse und Mineralboden im Lehm und Schluff kam.

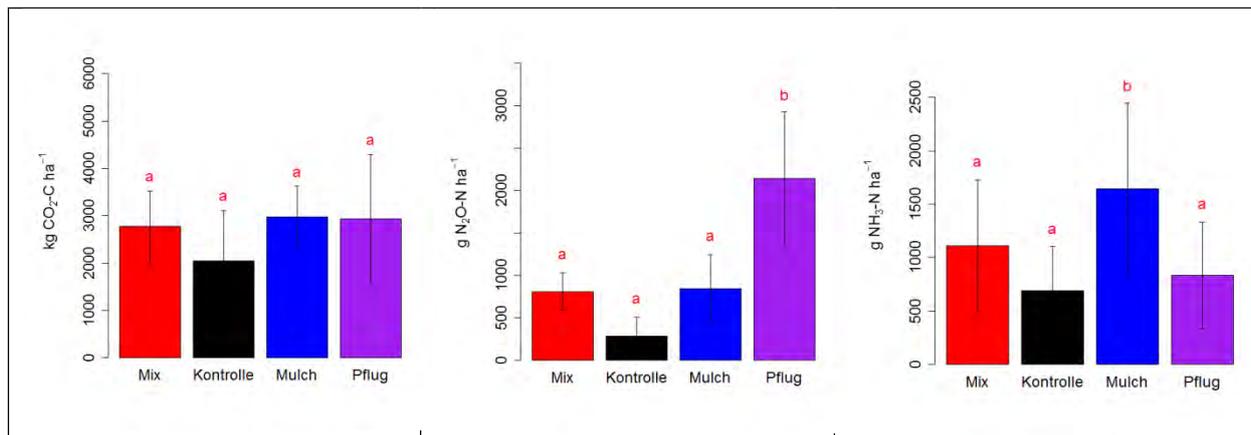


Abb. 17 Emissionssummen (links: CO₂, Mitte: N₂O, rechts: NH₃), gruppiert nach Applikationstechnik im Freilandversuch „Kastenparzelle“. Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen (n = 9). Säulen innerhalb einer Abbildung, die einen gleichen Buchstaben tragen, unterschieden sich nicht signifikant voneinander (Tukey HSD Test) trotz signifikantem Haupteffekt in der Varianzanalyse.

Im Gegensatz zum Lachgas war bei den Ammoniakemissionssummen der Bodeneffekt deutlich und statistisch signifikant (Sand > Lehm > Schluff; Abb. 18, rechts), während sich bei den Applikationstechniken die Mulch-Variante von den übrigen Varianten absetzte (Abb. 17, rechts). Beides passt sehr gut zu unseren Vorstellungen. Denn die Ammoniakemissionen sollten umso größer sein, je näher sich die Produktionsorte, d.h. hier die Ernterückstände, an der Bodenoberfläche befinden. Ferner sollte ein diffusiverer, also für Luft (und NH₃) durchlässigerer Boden mit sandiger Textur größere Ammoniakemissionen erzeugen als ein weniger diffusiver Boden.

Darüber hinaus gab es, anders als beim Lachgas, bei den Ammoniakemissionssummen eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren Boden und Applikation in der zweifaktoriellen Varianzanalyse. Diese Wechselwirkung reflektierte einen zunehmenden Effekt des Faktors Applikation vom Lehm über den Schluff bis hin zum Sand (nicht gezeigt). Dies bedeutet, in Hinblick auf Ammoniakemissionen sollte man bei einem Sand besonders auf die richtige Wahl der Applikationstechnik von Ernterückständen achten. Bei Lachgasemissionen scheint es hingegen unter diesen Bedingungen immer ungünstig zu sein, unterzupflügen, unabhängig vom Bodentyp.

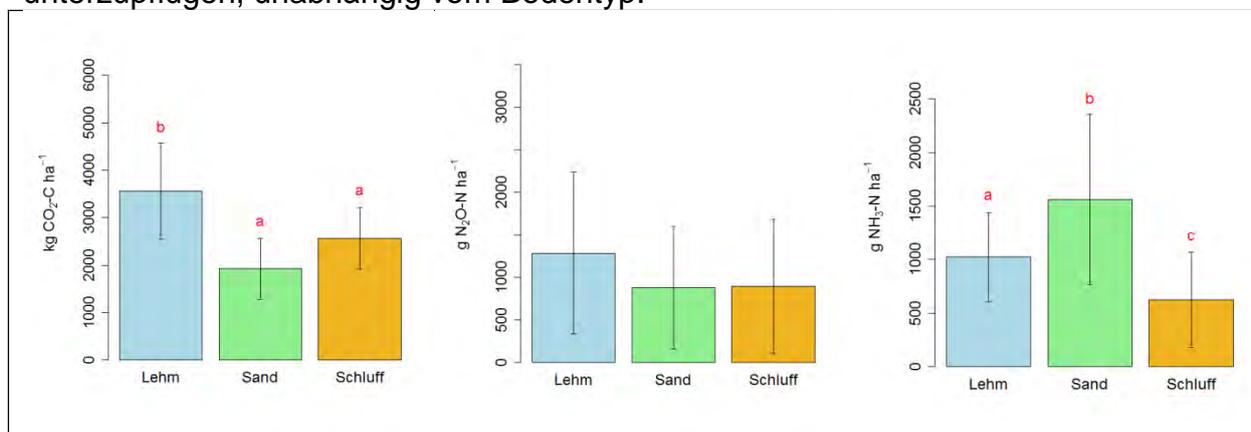


Abb. 18 Emissionssummen (links: CO₂, Mitte: N₂O, rechts: NH₃), gruppiert nach Bodentyp im Freilandversuch „Kastenparzelle“. Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen (n = 12). Säulen innerhalb einer Abbildung, die einen gleichen Buchstaben tragen, unterschieden sich nicht

signifikant voneinander (Tukey HSD Test) trotz signifikantem Haupteffekt in der Varianzanalyse. Bei Säulen, die keine Buchstaben tragen, gab es keine signifikanten Haupteffekte in der Varianzanalyse.

Die Emissionsfaktoren für N₂O und NH₃ lagen in diesem Versuch (Tab. 2) insgesamt deutlich niedriger als im Freilandversuch „Trasse“. Die Bedingungen im Kastenparzellenversuch waren allerdings deutlich näher an der Realität als die im Trassenversuch, insbesondere in Hinblick auf die Applikationsrate an Ernterückständen, der vorherigen Blumenkohlkultur und der natürlichen Wetterbedingungen. Daher gehen wir davon aus, dass die im Freilandversuch „Trasse“ erhaltenen EF eher den oberen Rahmen abstecken, während die hier erhaltenen EF eher Durchschnittswerte repräsentieren. Letztere entsprechen maximalen gasförmigen Verlusten von 2,1 kg N₂O-N ha⁻¹ bei untergepflügten Blumenkohlernterückständen in einem lehmigen Boden und 1,9 kg NH₃-N ha⁻¹ bei oberflächlich applizierten Blumenkohlernterückständen in einem sandigen Boden.

Tab.2 Emissionsfaktoren (Werte in Klammern repräsentieren Standardabweichungen für n = 3).

Bodentyp	EF-N ₂ O* (%)			EF-NH ₃ * (%)		
	Mix	Mulch	Pflug	Mix	Mulch	Pflug
Lehm	0,18 (0,10)	0,38 (0,19)	1,35 (0,65)	0,10 (0,24)	0,27 (0,31)	0,30 (0,11)
Sand	0,45 (0,23)	0,25 (0,29)	1,02 (0,46)	0,65 (0,07)	1,21 (0,03)	0,11 (0,24)
Schluff	0,40 (0,08)	0,46 (0,24)	1,25 (0,41)	0,07 (0,30)	0,38 (0,03)	-0,13 (0,25)

* Emissionssumme der entsprechenden Variante minus Emissionssumme der Kontrollvariante geteilt durch die Menge an appliziertem N mit den Ernterückständen *100

Anpassung der Modellparameter im Düngungsberatungssystem N-Expert

Die ermittelten gasförmigen Verluste wurden in die Datenbank des N-Expert Systems integriert. Der Modellparameter, der die Nutzbarkeit von N aus Ernterückständen bestimmt, wurde angepasst. Dies hat Auswirkungen auf die Höhe der empfohlenen N-Düngung, wenn Ernterückstände einer Vorkultur vorliegen.

Basierend auf den Ergebnissen unserer Literaturrecherche hatten wir zu Beginn des Projekts die Hypothese aufgestellt, dass gasförmige N-Verluste wesentlich zu den beobachteten N-Bilanzlücken ("unerklärte N-Verluste") in Gemüsefruchtfolgen beitragen. Diese Hypothese wurde durch unsere Untersuchungen nicht bestätigt. Die von uns gemessenen gasförmigen N-Verluste waren gering (< 20 kg N ha⁻¹ aus N₂O und NH₃). Es ist anzunehmen, dass zusätzlich zu den von uns gemessenen Verlusten an N₂O und NH₃ noch einmal die gleiche Menge durch N₂ und NO_x (von uns nicht gemessen) verloren gehen kann.

Auch wenn man alle genannten gasförmigen Verluste addiert, liegt die Summe noch erheblich unter den in früheren Versuchen beobachteten N-Bilanzlücken (ca. 100 - 200 kg N/ha/a).

3.2. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Für die **Wissenschaft** sind die Ergebnisse Beiträge zum Erkenntnisfortschritt in Hinblick auf den Einfluss von Bodentyp, Applikationstechnik und deren Wechselwirkungen auf Ammoniak- und Lachgasemissionen in gemüsebaulichen

Systemen. Hierbei ist insbesondere deutlich geworden, dass unter den speziellen Bedingungen des Gemüsebaus, d.h. nach Einarbeitung großer Mengen an Gemüserückständen der Bodentyp eine untergeordnete Bedeutung für die Lachgasemissionen hat. Überdies führt die Applikationstechnik des Unterpflügens generell zu den höchsten Lachgasemissionen, unabhängig vom Bodentyp. Die oberflächige Applikation von Ernterückständen produziert auf leichteren Böden meist hohe Ammoniakemissionen aber nur unter bestimmten Umständen hohe Lachgasemissionen. Diese Umstände zu identifizieren, ist eine neue Herausforderung für die Wissenschaft. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Tiefenverteilung der Quellen für Ammoniak und Lachgas (Mikrosites), insbesondere bei einer oberflächigen Applikation von Ernterückständen, nicht bekannt, aber von großer Bedeutung für den Einfluss der Bodendiffusivität auf die Emissionen ist.

Mit Blick auf die „unvermeidbareren“ **N-Bilanzüberschüsse gemäß Düngeverordnung** wurde deutlich, dass die in Gemüsefruchtfolgen beobachteten großen N-Bilanzüberschüsse nur zum Teil durch gasförmige N-Verluste erklärt werden können.

Für die **gemüsebauliche Praxis** ergeben sich folgende Handlungsempfehlung, um NH_3 - und N_2O -Emissionen zu mindern: Bei Anfall großer Mengen an Ernterückständen sollten, insbesondere auf leichteren Böden, die Ernterückstände schnell eingearbeitet werden, da sonst mit hohen NH_3 -Emissionen und unter Umständen auch mit hohen N_2O -Emissionen zu rechnen ist. Zudem sollte in Hinblick auf N_2O -Verluste die Einarbeitungstechnik des Unterpflügens generell vermieden werden, unabhängig vom Bodentyp. Wie oben dargestellt, vermindern diese Maßnahmen den N-Bilanzüberschuss nur zum Teil. Die Maßnahmen tragen aber auch dazu bei, die Emission umweltschädlicher und klimarelevanter Gase zu vermindern.

4. Zusammenfassung

Der Einsatz synthetischer N-Dünger hat in den vergangenen Jahrzehnten maßgeblich zur Steigerung der agrarischen Produktion beitragen. Der vermehrte Einsatz von N-Düngern führt jedoch auch zu zunehmenden N-Verlusten an die Umwelt. Dazu zählen gasförmige Stickstoff-Verluste, welche u.a. in Form von Lachgas (N_2O) zum anthropogenen Treibhauseffekt sowie in Form von Ammoniak (NH_3) zu Luftverschmutzung, Eutrophierung und Versauerung von Ökosystemen beitragen.

Der Freilandgemüsebau weist aus unterschiedlichen Gründen besonders hohe Stickstoff-Bilanzüberschüsse auf. Einer dieser Gründe sind die hohen Mengen an Stickstoff in Ernterückständen ($> 150 \text{ kg N ha}^{-1}$), die bei einigen Kulturen wie Blumenkohl, Brokkoli oder Rosenkohl in der Regel auftreten. Die Wiederfindung des Stickstoffs aus Ernterückständen in der späteren Fruchtfolge ist meist klein und es ist unklar, wie groß der Beitrag gasförmiger Stickstoff-Verluste zu dieser Bilanzlücke ist. Daher hatte dieses Projekt das Ziel, die in der Düngeverordnung festgelegten zugelassen „unvermeidbaren“ Stickstoff-Bilanz-Überschüsse für gemüsebauliche Kulturen in Hinblick auf gasförmige Stickstoff-Verluste zu überprüfen. Den

Schwerpunkt sollte die Quantifizierung gasförmiger Stickstoff-Verluste aus Ernterückständen bilden.

In zwei Freilandversuchen wurde der Einfluss unterschiedlicher Bodentypen und Applikationstechniken von Blumenkohlernterückständen auf die Emissionen an N_2O und NH_3 überprüft. Hierbei zeigte sich, dass unter diesen speziellen Bedingungen der Bodentyp eine untergeordnete Bedeutung für die Lachgasemissionen spielt. Diese können, auch wenn die mittleren Bedingungen im Boden ungünstig für die Lachgasbildung sind, sehr hoch sein (bis zu ca. $10 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ in 9 Wochen), was mit der Ausbildung von lokalen Mikrosites erklärt werden kann, die sich in ihren Bedingungen stark vom restlichen Boden unterscheiden. Bei den Applikationstechniken stellte sich heraus, dass Unterpflügen generell die höchsten Lachgasemissionen produziert, unabhängig vom Bodentyp. Die oberflächige Applikation von Ernterückständen scheint insbesondere auf leichteren Böden hohe Ammoniakemissionen (bis zu ca. $5 \text{ kg NH}_3\text{-N ha}^{-1}$ in 9 Wochen) zu erzeugen, unter bestimmten Umständen können aus einer solchen Schicht aber auch hohe Lachgasemissionen entstehen. Die Ergebnisse deuten des Weiteren darauf hin, dass die Emissionssummen an NH_3 und N_2O nur einen Teil der in diesen Systemen beobachteten Bilanzlücken von ca. $100 - 200 \text{ kg N ha}^{-1}$ ausmachen.

Die abgeschätzten Emissionsfaktoren zeigen, dass der vom Weltklimarat angenommene Standardwert von 1 % eine gute Annäherung darstellt und nur in Ausnahmefällen Emissionsfaktoren von bis zu 3,4 % (N_2O) und 1,6 % (NH_3) auftreten.

Die ermittelten gasförmigen Verluste wurden in die Datenbank des Düngungsberatungsprogramms N-Expert integriert. Der Modellparameter, der die Nutzbarkeit von N aus Ernterückständen bestimmt, wurde angepasst. Dies hat Auswirkungen auf die Höhe der empfohlenen N-Düngung, wenn Ernterückstände einer Vorkultur vorliegen.

Als Handlungsempfehlungen für die gemüsebauliche Praxis folgt aus den Untersuchungen: große Mengen an Ernterückständen möglichst kurz nach der Ernte einarbeiten, dabei Erntereste und Boden gleichmäßig mischen, z.B. fräsen statt pflügen. Diese Maßnahmen vermindern den N-Bilanzüberschuss nur zum Teil; sie tragen aber dazu bei, die Emission umweltschädlicher und klimarelevanter Gase zu vermindern.

5. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; ggf. mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen

Die geplanten Ziele wurden erreicht. Die in den Freilandversuchen gewonnenen Ergebnisse sind in die Weiterentwicklung des Düngungsberatungsprogramms N-Expert (Feller et al. 2010) eingeflossen. Aus den Variantenvergleichen lassen sich Handlungsempfehlungen für die Praxis aufzeigen, die gasförmige N-Verluste im intensiven Freilandgemüsebau verringern können. Dabei wurden unterschiedliche Strategien für die Verminderung von Ammoniak und Lachgas identifiziert, d.h. die Vermeidung des Unterpflügens von Ernterückständen zur Reduktion von N_2O -

Emissionen und die Vermeidung der oberflächigen Applikation von Ernterückständen zur Verminderung von NH₃-Emissionen, insbesondere auf leichteren Böden. Eine wesentliche Verminderung der N-Bilanzüberschüsse kann jedoch - anders als aufgrund der Literaturrecherche bei Projektbeginn erwartet - durch diese Handlungsempfehlungen nicht erreicht werden.

Unsere Untersuchungsergebnisse und unsere Literaturlauswertungen machen deutlich, dass die Zusammenhänge zwischen abiotischen Umweltbedingungen und Lachgasemissionsmengen noch nicht so gut verstanden sind, dass es möglich ist, exakte quantitative Vorhersagen über Menge und Zeitverlauf von Lachgasemissionen aus Ernterückständen zu machen. Insbesondere zu den Bedingungen in sog. "Microsites" im Boden und in Mulchschichten ist weitere Forschung notwendig.

6. Literaturverzeichnis

- Aulakh M, Doran J, and Mosier A. 1991. Field-Evaluation of 4 Methods for Measuring Denitrification. *Soil Science Society of America Journal* 55, 1332-1338.
- Azam F, Muller C, Weiske A, Benckiser G, and Ottow J. 2002. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide - role of oxidizable carbon and applied nitrogen. *Biology and Fertility of Soils* 35: 54-61.
- Baggs E. 2008. A review of stable isotope techniques for N₂O source partitioning in soils: recent progress, remaining challenges and future considerations. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 22: 1664-1672.
- Baker J, Doyle G, McCarty G, Mosier A, Parkin T, Reicosky D, Smith J, and Venterea R. 2003. Chamber-based Trace Gas Flux Measurement Protocol. USDA-ARS GRACEnet , 1-28.
- Bateman E, and Baggs E. 2005. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils* 41, 379-388.
- Bijay-Singh, Ryden J, and Whitehead D. 1988. Some Relationships Between Denitrification Potential and Fractions of Organic-Carbon in Air-Dried and Field-Moist Soils. *Soil Biology & Biochemistry* 20: 737-741.
- Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, and Zechmeister-Boltenstern S. 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 368.
- Chen H, Li X, Hu F, and Shi W. 2013. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta-analysis. *Global Change Biology* 19: 2956-2964.
- Dämmgen U, Thöni L, Lump P, Gilke K, Seitler E, and Bullinger M. 2010. Feldexperiment zum Methodenvergleich von Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft, 2005 bis 2008 in Braunschweig. 337: 1-54.
- Davidson E, Keller M, Erickson H, Verchot L, and Veldkamp E. 2000. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. *Bioscience* 50: 667-680.
- de Ruijter F, Huijsmans J, and Rutgers B. 2010. Ammonia volatilization from crop residues and frozen green manure crops. *Atmospheric Environment* 44: 3362-3368.
- de Ruijter F, ten Berge H, and Smit A. 2010. The fate of nitrogen from crop residues of broccoli, leek and sugar beet. 852: 157-161.
- Feller C, Fink M, Laber H, Maync A, Paschold P, Scharpf HC, Schlaghecken J, Strohmeyer K, Weier U, and Ziegler J. 2010. Düngung im Freilandgemüsebau. In: Fink M (ed): *Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ)*, 3rd edn., issue 4, Großbeeren, 265 pp.
- Flessa H, and Beese F. 1995. Effects of Sugar-Beet Residues on Soil Redox Potential and Nitrous-Oxide Emission. *Soil Science Society of America Journal* 59: 1044-1051.
- Flessa H, Dorsch P, and Beese F. 1995. Seasonal-Variation of N₂O and Ch₄ Fluxes in Differently Managed Arable Soils in Southern Germany. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 100: 23115-23124.

- Flessa H, Potthoff M, and Lofffield N. 2002. Greenhouse estimates of CO₂ and N₂O emissions following surface application of grass mulch: importance of indigenous microflora of mulch. *Soil Biology & Biochemistry* 34, 875-879.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Berntsen T, Betts R, Fahey D, and Haywood J et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (Eds.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA. pp. 131–234.
- Glasener K, and Palm C. 1995. Ammonia volatilization from tropical legume mulches and green manures on unlimed and limed soils. *Plant Soil* 177:33–41.
- Groffman P, Altabet M, Bohlke J, Butterbach-Bahl K, David M, Firestone M, Giblin A, Kana T, Nielsen L, and Voytek M. 2006. Methods for measuring denitrification: Diverse approaches to a difficult problem. *Ecological Applications* 16: 2091–2122.
- Huber P. 1981. *Robust statistics*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- IPCC. 2006. Agriculture, forestry and other land use (Volume 4). In H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds.), *2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES Japan.
- Janzen H, and McGinn S. 1991. Volatile loss of nitrogen during decomposition of legume green manure. *Soil Biology and Biochemistry*, 23, 291–297.
- Khalil K, Mary B, and Renault P. 2004. Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. *Soil Biology & Biochemistry* 36, 687-699.
- Khalil K, Renault P, Guerin N, and Mary B. 2005. Modelling denitrification including the dynamics of denitrifiers and their progressive ability to reduce nitrous oxide: comparison with batch experiments. *European Journal of Soil Science* 56, 491-504.
- Lofffield N, Flessa H, Augustin J, and Beese F. 1997. Automated gas chromatographic system for rapid analysis of the atmospheric trace gases methane, carbon dioxide, and nitrous oxide. *Journal of Environmental Quality* 26: 560–564.
- Maag M, and Vinther F. 1996. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology* 4: 5–14.
- Mohr R, Janzen H, and Entz M. 1998. Nitrogen dynamics under greenhouse conditions as influenced by method of alfalfa termination. 1. Volatile N losses. *Canadian Journal of Soil Science* 78: 253–259.
- Morley N, and Baggs E. 2010. Carbon and oxygen controls on N₂O and N₂ production during nitrate reduction. *Soil Biology & Biochemistry* 42, 1864-1871.
- Morkved P, Dorsch P, Henriksen T, and Bakken L. 2006. N₂O emissions and product ratios of nitrification and denitrification as affected by freezing and thawing. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 3411–3420.
- Mosier A. 2001. Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere. *Plant and Soil* 228: 17–27.
- Mosier A, Duxbury J, Freney J, Heinemeyer O, and Minami K. 1996. Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil* 181: 95–108.
- Nett L, Feller C, George E, and Fink M. 2011. Effect of winter catch crops on nitrogen surplus in intensive vegetable crop rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91: 327–337.
- Ni J. 1999. Mechanistic models of ammonia release from liquid manure: a review. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72: 1–17.
- Novoa R, and Tejeda H. 2006. Evaluation of the N₂O emissions from N in plant residues as affected by environmental and management factors. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 75: 29–46.
- Pacholski A, Cai G, Fan X, Ding H, Chen D, Nieder R, and Roelcke M. 2008. Comparison of different methods for the measurement of ammonia volatilization after urea application in Henan Province, China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 361–369.
- Parkin T. 1987. Soil Microsites As A Source of Denitrification Variability. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1194-1199.
- Parkin T, and Venterea R. 2010. Sampling Protocols. Chapter 3. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. In: R. F. Follett (Ed.), *Sampling Protocols*. p. 3-1 to 3-39, <http://www.ars.usda.gov/research/GRACEnet>
- Rühlmann J. 2006. The Box Plot Experiment in Grossbeeren after six rotations: Effect of fertilization on crop yield. *Archives of Agronomy and Soil Science* 52: 313–319.
- Ruser R, Sehy U, Buegger F, and Munch J. 2009. N₂O fluxes from a high and low yield area after incorporation of ¹⁵N-labeled mustard. 205–206.

- Russow R, Spott O, and Stange C. 2008. Evaluation of nitrate and ammonium as sources of NO and N₂O emissions from black earth soils (Haplic Chernozem) based on N-15 field experiments. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 380-391.
- Ryden J, Lund L, and Focht D. 1979a. Direct Measurement of Denitrification Loss from Soils .1. Laboratory Evaluation of Acetylene Inhibition of Nitrous-Oxide Reduction. *Soil Science Society of America Journal* 43, 104-110.
- Ryden J, Lund L, and Focht D. 1979b. Direct Measurement of Denitrification Loss from Soils .2. Development and Application of Field Methods. *Soil Science Society of America Journal* 43, 110-118.
- Ryden J, and Dawson K. 1982. Evaluation of the Acetylene-Inhibition Technique for the Measurement of Denitrification in Grassland Soils. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 33, 1197-1206.
- Schloemer S. 1991. Denitrification Losses from A Horticultural Soil As Affected by Incorporation of Fresh Plant Residues. *Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde* 154: 265–269.
- Stevenson B, Schipper L, McGill A, and Clark D. 2011. Denitrification and Availability of Carbon and Nitrogen in a Well-drained Pasture Soil Amended with Particulate Organic Carbon. *Journal of Environmental Quality* 40, 923-930.
- Velthof G, Kuikman P, and Oenema O. 2002. Nitrous oxide emission from soils amended with crop residues. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62: 249–261.
- Wrage N, Velthof G, van Beusichem M, and Oenema O. 2001. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry* 33, 1723-1732.

Abschlussbericht UH

Zuwendungsempfänger: Universität Hohenheim, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, FG. Düngung und Bodenstoffhaushalt Fruwirthstraße 20 70599 Stuttgart-Hohenheim	Forschungsvorhaben Nr.: 1811HS014
Thema: Entwicklung eines integrierten Stickstoffmanagements im Freilandgemüsebau zur Vermeidung von Stickstoffüberschüssen. Teilprojekt Universität Hohenheim: Einfluss von Maßnahmen zur Verminderung von N-Bilanzüberschüssen auf die N ₂ O-Emission gemüsebaulich genutzter Böden	
Laufzeit: 15.08.2011 – 31.10.2014	
Berichtszeitraum: 15.08.2011 – 31.10.2014	
Zusammenarbeit mit anderen Stellen: Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Speyer Institut für Pflanzenernährung, Leibniz Universität Hannover Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren / Erfurt e.V.	
Autoren: Perik Seiz ¹ , Reiner Ruser ¹ , Rudolf Schulz ¹ , Torsten Müller ¹ , Andreas Heger ² , Martin Armbruster ² , Franz Wiesler ² ¹ Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt (340i), Universität Hohenheim, Fruwirthstraße 20, 70599 Stuttgart ² Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt, Obere Langgasse 40, 67346 Speyer	

Inhaltsverzeichnis	146
Verzeichnis der Tabellen	148
Verzeichnis der Abbildungen	149
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	150
1. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens	151
1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens	151
1.2 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation	151
1.2.1 Stand der Wissenschaft	151
1.2.2 Technische Ausgangssituation	154
2. Material und Methoden	155
2.1 Versuchsstandorte	155
2.2 Feldversuche	155
2.3 Bestimmungen der Lachgas- und Kohlenstoffdioxid- Emissionen	159
2.4 Bestimmung des N ₂ /N ₂ O-Verhältnisses mit der Acetyleninhibierungsmethode	160
2.5 Bodenprobenahme und –extraktion	161
2.6 Ermittlung von N _{min} und wassergefüllten Porenvolumina	161
2.7 Ertragsermittlung	162
2.8 Elementaranalysen (C/N)	162
2.9 SPAD-Messungen	162
2.10 Berechnungen und Statistik	162
3. Ergebnisse	164
3.1 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse am Standort Hohenheim ..	164
3.1.1 Witterungsverlauf im Versuchszeitraum	164
3.1.2 Ergebnisse der N ₂ O-Flussmessungen	164
3.1.2.1 Zeitliche Dynamik der N ₂ O-Freisetzung	164
3.1.2.2 Kumulative N ₂ O-Emissionen	168
3.1.2.3 Ergebnisse aus dem Inkubationsversuch / Distickstoff-Messung	173
3.1.3 Nitratverlagerung in Abhängigkeit der N-Managementmaßnahmen am Standort Heidfeldhof	175

3.1.4	Erträge, N-Aufnahmen, N-Salden, N-Saldo/N ₂ O	177
3.1.5	Ergebnisse aus zusätzlichen Erhebungen in der Nachkultur (SPAD-Messungen, Biomasse des oberirdischen Aufwuchses)	181
3.2	Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse am Standort Speyer	183
3.2.1	Zeitliche Dynamik der N ₂ O-Freisetzung	183
3.2.2	Kumulative N ₂ O-Emissionen am Standort Speyer	185
3.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	189
4.	Zusammenfassung	192
5.	Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; ggf. mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen	195
6.	Literaturverzeichnis	197
7.	Anhang	201
7.1	Liste der Veröffentlichungen und Vorträge mit Projektbezug	201

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Standort- und Bodeneigenschaften (jeweils Ap-Horizont, 0-30 cm)	155
Tab. 2: Kulturführung, Flächenbearbeitung und Pflanzenschutzmaßnahmen des Hohenheimer Feldversuchs	158
Tab. 3: Applizierte N-Düngermengen	159
Tab. 4: Korrelationen von N₂O mit wichtigen Einflussgrößen	168
Tab. 5: Frischmasseerträge marktfähiger Ware am Standort Hohenheim	178
Tab. 6: N-Salden am Standort Hohenheim	180

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lufttemperatur, Tagesniederschläge und Bewässerung im Versuchszeitraum..... 164

**Abb. 2: Mittlere N₂O-Flussraten der Behandlungen Kontrolle, KNS, KNS+NI und
Faustzahlen, sowie N_{min} (0-30 cm) und Wassergehalte am Standort Hohenheim .. 165**

**Abb. 3: Mittlere N₂O-Flussraten der Behandlung KNS+ZF, KNS+Stroh, KNS-ER und SPAD,
sowie N_{min} (0-30 cm) und Wassergehalte am Standort Hohenheim..... 166**

Abb. 4: Kumulative N₂O-Emissionen (03.08.2011-30.03.2014, 32 Monate) 169

Abb. 5: Kumulative N₂O-Emissionen der Kombinations-Varianten mit Zwischenfrucht 172

**Abb. 6: Kumulative Winter-N₂O-Emission der Varianten mit Piadin-Zusatz und
verzögerter Einarbeitung..... 173**

Abb. 7: N₂:N₂O Verhältnisse aus dem Inkubationsversuch 175

Abb. 8: N_{min}-Gehalte in den Bodentiefen 0-30, 30-60 und 60-90 cm 177

Abb. 9: N in oberirdischer Biomasse 179

Abb. 10: Zusammenhang zwischen N-Saldo und N₂O-Emission 181

Abb. 11: SPAD-Werte der ungedüngten Nachkultur 182

Abb. 12: Oberirdische Biomasse des Aufwuchses der Nachkultur 183

**Abb. 13: Mittlere N₂O-Flussraten, Verlauf von N_{min} (0-30 cm) und wassergefüllte
Porenvolumina; Speyer 184**

Abb. 14: Kumulative N₂O-Emissionen vom Standort Speyer 185

Abb. 15: Standortvergleich: Kumulative N₂O-Emissionen 187

Abb. 16: Standortvergleich: Wassergefüllte Porenvolumina 188

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

ASS: Ammonsulfatsalpeter

Bluko: Blumenkohl

Brokk.: Brokkoli

CO₂: Kohlenstoffdioxid

DMPP: 3,4-Dimethylpyrazolphosphat

EF: Emissionsfaktor nach IPCC für direkte N₂O-Emissionen aus mineralischen Böden

-ER: Entfernen/Abfuhr der Ernterückstände

FZ: Versuchsvariante mit N-Düngung nach Faustzahlen

KNS: Versuchsvariante mit Düngung nach Sollwert des KNS-Systems

MW: Mittelwert

N₂O: Distickstoffmonoxid, Lachgas

NH₄⁺: Ammonium

NI: Nitrifikationshemmstoff

N_{min}: mineralischer Stickstoff im Boden ($\sum_{\text{Ammonium+Nitrat}}$)

NO₃⁻: Nitrat

PE: Polyethylen

PVC: Polyvinylchlorid

S. N. K.-Test: Student Newman Keuls-Test

Stabw: Standardabweichung

StErr: Standardfehler

TS: Trockensubstanz

VE: Verzögerte Einarbeitung

WFPS: wassergefülltes Porenvolumen (engl. water-filled pore space)

ZF: Zwischenfrucht

1. Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde entsprechend der im Antrag formulierten Planung realisiert. Obwohl der Zuwendungsbescheid erst auf den 15.08.2011 erfolgte, konnte der erste Gemüsesatz im Hohenheimer Parzellenversuch bereits am 04.08.2011 gesetzt und in derselben Woche die ersten Feldmessungen durchgeführt werden. Im Feldversuch traten keinerlei unvorhergesehene Ereignisse auf. Im Gegensatz zum Projektantrag wurde der Feldversuch aufgrund interessanter Fragestellungen, welche sich aus den Feldmessungen ergaben, um mehrere zusätzliche Behandlungen erweitert. Es kam im Projekt zu keinen nennenswerten Verzögerungen.

1.2 Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation

Die Betreuung der Spurengasmessungen erfolgte durch Herrn Dr. Reiner Ruser. In seiner AG werden innovative Verfahren zur N-Düngung sowohl hinsichtlich deren Ertragswirkung als auch hinsichtlich deren Umweltwirkungen untersucht. Bisherige oder laufende Arbeiten beschäftigen sich beispielsweise mit platzierter N-Düngung, dem Einsatz von Nitrifikationshemmstoffen sowie mit der Optimierung der Düngung mit mineralischen und wirtschaftseigenen Düngern und Sekundärrohstoffen.

Ein Schwerpunkt der Untersuchungen des Antragstellers liegt auf der Bewertung von landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Minderung der N₂O-Freisetzung aus Böden. Die Expertise auf diesem Gebiet wird durch zahlreiche Publikation und Gutachtertätigkeiten für internationale Fachzeitschriften und Behörden belegt. Dr. Ruser betreute bereits mehrere Forschungsvorhaben im Bereich „klimarelevante Spurengase“, darunter drei Doktor- sowie mehrere Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten.

1.2.1 Stand der Wissenschaft

Vor allem wegen der Ernte im vegetativen Stadium werden im Gemüsebau hohe Stickstoff-Düngermengen ausgebracht um die Pflanzen ausreichend mit Stickstoff (N) zu versorgen und um verschiedenen Marktanforderungen, wie z.B. Größe oder Grünfärbung gerecht werden zu können. Hohe Rest-N_{min}-Gehalte nach Ernte, sowie N- und C-reiche Ernterückstände verbleiben oft ohne weitere Anrechnung für die Folgekultur auf der Fläche und stellen somit kurzfristige Nährstoffüberschüsse dar.

Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

Anhaltende N-Überschüsse erhöhen dabei das Risiko für N-Verluste in die Umwelt (Zhu et al. 2005). Lachgas (N_2O) ist ein klimarelevantes Spurengas das zu 8% am anthropogenen Treibhauseffekt beteiligt ist (IPCC, 2007) und überdies zum stratosphärischen Ozonabbau beiträgt (Crutzen, 1981). Landwirtschaftlich genutzte Böden sind eine Hauptquelle für N_2O welches überwiegend während der Nitrifikation und der Denitrifikation gebildet wird. Zunehmende N-Überschüsse in der Landnutzung gehen einher mit einem Anstieg der N_2O -Emissionen (McSwiney und Robertson, 2005).

Im (Konsortialantrag Hannover, Speyer & Großbeeren) wurden geeignete N-Managementmaßnahmen definiert, deren Wirkung auf Praxisversuchen hinsichtlich Ertragswirkung und Nitratverlagerung getestet werden sollten. Im vorliegenden Teilprojekt der Uni Hohenheim war es Ziel, den Effekt dieser Maßnahmen auf die Freisetzung des klimarelevanten Spurengases N_2O im Parzellenmaßstab zu quantifizieren.

Hintergrund und Ziele für diese Arbeit:

- Mit Hilfe von Maßnahmen zur Reduktion von N-Überschüssen im Gemüsebau konnte die Nitrat Auswaschung auf einem sandigen Standort sehr effizient vermindert werden (Wiesler et al., 2008). In den Untersuchungen von Wiesler et al. (2008) wurden unter anderem verschiedene Fruchtfolgen, angepasste N-Düngung, reduzierte N-Düngung, das Integrieren einer Zwischenfrucht sowie die Abfuhr der Ernterückstände als N-Managementmaßnahmen getestet. Die Nitrat austräge konnte durch zusätzliche Winterbegrünung innerhalb einer reinen Gemüsefruchtfolge von 185 auf 88 kg N ha⁻¹ a⁻¹ abgesenkt werden. Durch die Abfuhr der Ernterückstände konnte die N-Auswaschung von 421 auf 297 kg N ha⁻¹ a⁻¹ bei der höchstgedüngten und von 185 auf 133 kg N ha⁻¹ a⁻¹ bei einer nach KNS gedüngten Variante reduziert werden.

Inwiefern diese Maßnahmen auch auf einem schweren Standort erfolgreich angewandt werden können, ist bisher nur unzureichend untersucht. Zudem wurde der Einfluss dieser Maßnahmen auf andere umweltrelevante Austräge wie beispielsweise die N_2O -Emission bislang nur unzureichend untersucht.

- Beurteilung praxisrelevanter N-Managementmaßnahmen, wie eine Reduktion der N-Düngung, Abfuhr der Ernterückstände, Winterbegrünung, Strohzusatz vor Winter hinsichtlich ihres N_2O -Minderungspotentials mittels Feldversuch.

Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

- Nach Bouwman (1996) sind ganzjährige N₂O-Datensätze notwendige Voraussetzung für eine zuverlässige Bewertung der Klimawirksamkeit von Bewirtschaftungsmaßnahmen. Sowohl Flessa et al. (1995, 1998) als auch Kaiser et al. (1998) haben gezeigt, dass Winteremissionen mehr als 50 % bis hin zu 76 % der Jahresemission ausmachen können. Die Untersuchungen von Pfab et al. (2011) belegten diesen Sachverhalt für den Hohenheimer Standort. Daraus abgeleitet ist es unerlässlich, dass die Folgewirkungen der oben genannten Managementmaßnahmen, die teils deutlich später auftreten können, mit erfasst werden müssen.
 - Quantifizierung von N₂O-Verlusten auf überannueller Basis
- Hénault et al. (1998) beobachteten große Unterschiede in der N₂O-Emission in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenbearbeitung. Lan et al. (2013) fanden bei einem Tonboden höhere N₂O Emissionen als bei einem Schluff-dominierten Lehmboden und führten dies auf die Bodenart und die damit verbundenen höheren Bodenwassergehalte zurück.
 - Quantifizierung von N₂O-Emissionen aus zwei, gemüsebaulich genutzten Böden mit stark unterschiedlicher Textur.
- N-Bilanzlücken werden häufig mit einem N₂-Verlust während der Denitrifikation erklärt. Die Messung von N₂-Verlusten über einen längeren Zeitraum ist im Feld kaum möglich. Probleme bereitet dabei u.a. die hohe N₂-Konzentration in der Luft (78 %), sodass eine Konzentrationsänderung durch bodenbürtige Freisetzung vor diesem hohen Hintergrund nicht erfasst werden kann. Eine zuverlässige Möglichkeit zur Quantifizierung der N₂-Verluste im Feld, und dort vor allem auch auf schwereren Böden, ist derzeit nur mit hohem finanziellem Aufwand durch Einsatz des stabilen Isotops ¹⁵N möglich.
 - Inkubation von Bodenmonolithen zur quantitativen Abschätzung der N₂-Verluste aus Denitrifikation mittels Acetylenbegasung zur Hemmung der N₂O-Reduktase im Labor.
- Speziell im Gemüsebau begünstigen Risikofaktoren wie hohe Bewässerungsmengen (Yuan, 2000) und Schwarzbrache über Winter die Wahrscheinlichkeit für N-Verlagerungen. Lange Brachzeiträume in Klimazonen mit nassen Wintern begünstigen N-Auswaschungen (Owens, 1990).
 - Erfassung der Nitrat-Verlagerungen in tiefere Bodenschichten

Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

1.2.2 Technische Ausgangssituation

Für die Hohenheimer Feldversuche stand Universitäts-eigenes Gelände zur Verfügung. Die Durchführung der Feldversuche wurde durch die ehemalige Landesanstalt für Gemüse- und Zierpflanzenbau der Universität Hohenheim mit Maschinen auf Parzellenmaßstab unterstützt.

Der Feldversuch in Hohenheim wurde bereits in einem Vorgängerprojekt angelegt, somit waren die Düngungsintensitäten bereits „etabliert“. Ein häufig kritizierter Schwachpunkt an neu angelegten Parzellenversuchen mit unterschiedlichen N-Düngungsintensitäten ist, dass sich die Behandlungen aufgrund der Neuanlage des Versuchs und der einheitlichen Vorbewirtschaftung noch nicht im „solid state“ befinden. Dieser Kritikpunkt kann durch die 4-jährige Vornutzung widerlegt werden.

In der Spurengasgruppe waren sämtliche Voraussetzungen für einen, mit der Bewilligung, raschen Versuchsbeginn gegeben. Die notwendigen Gassammelhauben wurden aus einem ehemaligen Projekt zur Verfügung gestellt, der Routinebetrieb an GCs der Spurengasgruppe wurde bis zur Einarbeitung des Doktoranden Perik Seiz über Personal aus anderen laufenden Projekten sichergestellt. Deshalb konnte das Projekt, welches auf den 14.08.2011 bewilligt wurde, bereits am 04.08.2012 den ersten Gemüsesatz setzen und die ersten Feldmessungen durchführen.

2. Material und Methoden

2.1 Versuchsstandorte

Die Versuche fanden in zwei für Süddeutschland repräsentativen Gemüseanbaugebieten, der Filderebene und der Vorderpfalz, statt. Stellvertretend für die Filderebene wurden Messungen auf dem Heidfeldhof, einer Versuchsstation der Universität Hohenheim, durchgeführt. Dieser befindet sich 11 km südlich von Stuttgart und liegt ca. 410 m ü. NN. Die gewählte Versuchsfläche war 14 Ar groß und schwach nach Süden geneigt. Bodentyp war eine Parabraunerde aus Lößlehm, die Bodenart im Oberboden war lehmiger Schluff. Die Messungen in der Vorderpfalz wurden auf dem Rinkenbergerhof, einer Versuchsstation der LUFA Speyer 4 km nördlich von Speyer durchgeführt. Bodentyp war eine Braunerde aus Terrassensanden des Rheins, der Standort liegt 99 m ü. NN. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Bodenkenndaten des Oberbodens der beiden Standorte.

Tab. 1: Standort- und Bodeneigenschaften (jeweils A_p-Horizont, 0-30 cm)

Standort	Sand	Schluff	Ton	N _t	C _{org}	pH	Jahresdurchschnittstemp.	Mittlerer Jahresniederschlag
Hohenheim	2 %	68 %	30 %	0,16 %	1,8 %	6,5	9,9 °C	686 mm
Speyer	80 %	15 %	5 %	0,07 %	0,7 %	6,2	10,0 °C	591 mm

2.2 Feldversuche

Auf beiden Standorten wurde zum 04.08.2011 ein Feldversuch in vollrandomisiertem Blockdesign mit vier Wiederholungen angelegt. Am Standort Hohenheim waren bereits vierjährige Untersuchungen in derselben Düngungsintensität vorangegangen. Die Parzellen bestanden aus drei Beeten je 1,5 m Breite. Die Parzellengröße hierbei war 4,5 x 6 m. Pflanzungen wurden an beiden Standorten zeitgleich durchgeführt. Pflanzenschutz- und Bewässerungsmaßnahmen sowie Erntetermine können Tabelle 2 entnommen werden. Die Messungen am Standort Speyer umfassten den Zeitraum 01.08.2011 bis 28.03.2013, während die Messungen in Hohenheim bis zum 26.03.2014 fortgeführt wurden.

Auf den beiden Standorten (Hohenheim und Speyer) wurden die Freilandmessungen in mindestens wöchentlicher Routine für die folgenden Varianten durchgeführt:

1. Keine N-Düngung (Kontrolle)
2. N-Düngung nach Faustzahlen, Pflanzenbedarf plus Sicherheitszuschlag (Faustzahlen)
3. N-Düngung nach N-Expert = Pflanzenbedarf minus N_{\min} zeitnah gemessen (KNS)
4. N-Düngung nach N-Expert mit Zusatz von Nitrifikationshemmstoff 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (KNS_{+NI})
5. N-Düngung nach N-Expert mit kontinuierlicher Abfuhr der oberirdischen Erntereste (KNS_{-ER}).

Weiterhin wurden am Standort Hohenheim folgende Varianten zusätzlich über den gesamten Versuchszeitraum untersucht:

6. reduzierte N-Düngung mit Option auf weitere N-Gaben bei Rückgang des mit Sensor gemessenen Chlorophyllgehalts (SPAD)
7. N-Düngung nach N-Expert plus Strohapplikation nach Ernte im Herbst (KNS_{+Stroh}). Die Menge an notwendigem Stroh richtete sich dabei nach der Menge an N_{\min} im Oberboden sowie nach den N-Mengen in den Ernteresten und im Stroh. Ziel war die Immobilisation des überschüssigen mineralischen N über den Winter. Berechnungen ergaben, dass ca. 100 kg Stroh zur sicheren Immobilisierung von 1 kg N notwendig waren. Bei einer Ausbringung von 2 kg Häckselstroh m^{-2} war demnach mit einer Immobilisierung von 200 kg N ha^{-1} zu rechnen (Scheffer/Schachtschabel, 2010). Diese Menge entspricht dem N aus Ernterückständen plus N-Mindestvorrat nach Brokkoli- oder Blumenkohlernte.
8. N-Düngung nach N-Expert plus Winterbegrünung (Grünroggen, Winterweizen) zur Absenkung des Nitrat-Gehalts im Boden während des Winterhalbjahrs (KNS_{+ZF})

Zwei weitere Maßnahmen-Kombinationen wurden ab 15.08.2012 in den Hohenheimer Versuch integriert:

9. Kombination 1: KNS_{-ER} plus Winterbegrünung (KNS_{-ER+ZF})
10. Kombination 2: SPAD plus Winterbegrünung (SPAD_{+ZF})

Ab November 2013 wurden zudem noch Wintermessungen in den beiden folgenden Behandlungen durchgeführt:

11. KNS plus Nitrifikationshemmstoff (Piadin, Aufwandmenge: 10 l ha^{-1}) auf Ernterückstände (KNS_{Pi})
12. KNS mit verzögerter Einarbeitung der bereits abgeernteten noch lebendigen Pflanzen (KNS_{VE}). Ziel dieser Behandlung war es, den Zeitraum einer hohen N- und C-Verfügbarkeit für die N_2O -bildenden Prozesse möglichst kurz zu gestalten.

Bewirtschaftung

Die Versuchsanlagen wurden entsprechend guter fachlicher Praxis konventionell bewirtschaftet (Tab. 2). Phosphor und Kalium wurden einmalig Mitte 2013 ausgebracht. Vor Winter wurde in den beiden ersten Jahren gepflügt, im dritten Jahr wurde der Versuch lediglich gegrubbert. In der folgenden Tabelle 2 sind die durchgeführten Maßnahmen chronologisch aufgeführt.

Material und Methoden

Tab. 3: Applizierte N-Düngermengen in Abhängigkeit der Gemüsekultur und der N-Managementmaßnahme. Im gesamten Versuch wurde Ammonsulfatsalpeter (ASS) verwendet. Für ‚KNS NI‘ wurde der Handelsdünger ENTEC 26 verwendet, welcher auf ASS basiert und dem der Wirkstoff 3,4-DMPP zugesetzt ist. * Ausgleichsdüngung

N-Düngemengen in kg N ha ⁻¹																					
Termin	05.08.		06.09.		25.04.		09.05.		27.07.		29.08.		06.05.		13.06.		08.08.		30.09.		Gesamt
Kultur	Blumenkohl			Summe	Eissalat			Summe	Brokkoli		Summe	Blumenkohl		Summe	Brokkoli		Summe				
Behandlung	2011		AD*	2012			2012		2013		2013		2013		2013						
Kontrolle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	
SPAD	100	90	0	190	0	65	65	45	0	45	75	150	225	35	30	65	65	590			
KNS	100	150	0	250	0	85	85	10	170	180	50	240	290	0	70	70	875				
KNS-ER	100	0	20	120	20	85	105	30	145	175	80	240	320	0	90	90	810				
KNS+ZF	100	0	0	100	0	105	105	0	165	165	60	250	310	0	60	60	740				
KNS+Stroh	100	0	20	120	20	85	105	0	145	145	50	260	310	0	0	0	680				
KNS+NI	240	0	0	240	85	0	85	180	0	180	210	0	210	200	0	200	915				
Faustzahlen	130	195	0	325	170	0	170	140	170	310	140	170	310	140	140	280	1395				
SPAD+ZF	100	0	0	100	0	105	105	0	30	30	70	165	235	0	70	70	540				
KNS-ER+ZF	100	0	0	100	0	105	105	0	125	125	65	240	305	0	60	60	695				

2.3 Bestimmung der N₂O- und der CO₂-Flussraten

An beiden Versuchsstandorten wurden Spurengasmessungen im wöchentlichen Rhythmus mit der „geschlossenen Kammer“-Methode (Hutchinson und Livingston, 1993) durchgeführt. Zusätzliche Probenahmen erfolgten bei Frost/Tau-Ereignissen, nach N-Düngung oder nach deutlich erhöhten Niederschlagsmengen. Bei dem Vergleich von bewachsenen und unbewachsenen Bodenringen konnte Winkler (2009) auf dem Hohenheimer Versuchsstandort keine Unterschiede in der N₂O-Freisetzung bei Blumenkohl nachweisen. Aufgrund des einfacheren Handlings wurden die Bodenringe deshalb so installiert, dass keine Kulturpflanzen in den Bodenringen wuchsen. Die Gassammelhauben bestanden aus einem Bodenring (15 cm Höhe), welcher fest installiert und lediglich vor Bodenbearbeitungsmaßnahmen entfernt wurde und einer mobilen aufsetzbaren Haube (11,5 cm Höhe). Das Haubendesign wurde von Flessa et al. (1995) detailliert beschrieben. Zur Gasmessung wurden die Hauben auf die Bodenringe aufgesetzt und vier Gasproben in periodischen Abständen mittels gasdichter Spritze aus der Haube entnommen und unverzüglich in evakuierte Glasgefäße (22,4 ml) überführt. Die Anreicherungszeit betrug i.d.R. 45 Minuten. Die N₂O- und CO₂-Konzentrationen in den Gasproben wurde an einem Gaschromato-

graphen (GC) mit Hilfe eines ^{63}Ni -Elektroneneinfangdetektors bestimmt (GC: 5890 Series II, Hewlett Packard, HS40-Autosampler, Perkin Elmer) gemessen. Die GC-Konfiguration mit Sauerstoff-Backflush wurde von Lofffield et al. (1997) publiziert.

Die Ermittlung der Gasflussraten erfolgte unter der Annahme einer linearen Anreicherung der Spurengaskonzentrationen nach Flessa et al. (1995):

$$F_N = k_{\text{N}_2\text{O}}(273/T)(V/A)(\Delta c/\Delta t)$$

mit

$$F_N = \text{N}_2\text{O-Flussrate } (\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1})$$

$$k_{\text{N}_2\text{O}} = \text{Konstante } (1,25 \mu\text{g N } \mu\text{L}^{-1})$$

T = Lufttemperatur innerhalb der Kammer (Kelvin)

V = Luftvolumen in der Kammer (m^{-3})

A = Bodenoberfläche (m^{-2})

$\Delta c/\Delta t$ = Konzentrationsänderung ($\mu\text{L L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)

und

$$F_C = k_{\text{CO}_2}(273/T)(V/A)(\Delta c/\Delta t)$$

mit

$$F_C = \text{CO}_2\text{-Flussrate } (\text{mg CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ h}^{-1})$$

$$k_{\text{CO}_2} = \text{Konstante } (0,536 \mu\text{g C } \mu\text{L}^{-1})$$

2.4 Bestimmung des $\text{N}_2/\text{N}_2\text{O}$ -Verhältnisses mit der Acetylen-Inhibierungsmethode

Ziel des Inkubationsversuchs mittels Acetylen-Inhibierung war die Abschätzung der bei der Denitrifikation anfallenden N_2 -Menge und die Ermittlung des $\text{N}_2:\text{N}_2\text{O}$ -Verhältnisses. Damit sollte ein weiterer Verlust-Pfad für Stickstoff näherungsweise quantifiziert werden. Acetylen hemmt die Nitrifikation, sowie in höheren Konzentrationen (10 kPa) die Aktivität der N_2O -Reduktase, sodass bei einer erfolgreichen Hemmung das gesamte Produkt der Denitrifikation als N_2O freigesetzt wird. Im Gegensatz zur Messung geringer Mengen an N_2 aus der Denitrifikation vor einem hohen atmosphärischen N_2 -Hintergrund (ca. 78%) können so auch geringe Mengen an N_2O (atmosphärischer Hintergrund: 330 ppb_{vol}) freigesetztem N_2 analytisch problemlos erfasst werden (Groffman et al., 2006).

Nachteil dieser Methode ist die verringerte Gasdiffusion des Acetylens bei hohen Bodenwassergehalten (Groffman et al., 1999). Aus diesem Grund wurde ein Laborinkubationsansatz gewählt. Die ungestört entnommenen Bodenmonolithe wurden über Nacht bei der im Feld gemessenen Bodentemperatur mit Acetylen begast und die N₂O-Anreicherung gemessen. Als Kontrolle wurde die N₂O-Freisetzung aus den Monolithen vor der Acetylenzugabe bestimmt.

2.5 Bodenprobenahme und -extraktion

Zur Parametrisierung der Spurengasflüsse wurde parallel zu den Gasproben je Behandlung jeweils eine Mischprobe aus den vier Wiederholungspartzellen aus 0-10 cm Tiefe entnommen. Die Proben wurden gekühlt ans Institut transportiert und bis zur weiteren Analyse tiefgekühlt gelagert.

Zur Ermittlung der Nitratverlagerung wurde in jedem Versuchsjahr vor und nach der Vegetationsperiode eine Tiefenbeprobung durchgeführt. Dabei wurden aus jeder Parzelle separat Proben aus den Tiefen 0-30, 30-60 und 60-90 cm entnommen. Zusätzlich wurden Tiefenproben im „Sommerwechsel“ zwischen zwei Kulturen entnommen.

2.6 Ermittlung von N_{min} und wassergefüllten Porenvolumina

Zur Bestimmung der N_{min}-Konzentrationen wurden 20 g Boden mit 50 ml einer 0,5 M K₂SO₄ eine Stunde geschüttelt und anschließend über ein Blaubandfilter abfiltriert. Die Nitrat- und Ammoniumkonzentration in den Bodenextrakten wurden mit einem Flowinjection-Analyzer (3 QuAAtro.AQ2.AACE, SEAL Analytical, UK) gemessen. Zur Umrechnung der N_{min}-Konzentrationen in N-Mengen wurde einmalig die Trockenraumdichte im A_p-Horizont (0-30 cm) mit Hilfe von Stechzylindern bestimmt. Sie betrug 1,29 g cm⁻³.

Die Bodenwassergehalte wurden durch Trocknen eines Aliquots des feldfrischen Bodens bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C bestimmt.

Das wassergefüllte Porenvolumen wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\text{WFPS} = \text{H}_2\text{O}_{\text{grav}} \times \text{TRD} / \text{PV}$$

mit: WFPS = wassergefülltes Porenvolumen [%]; H₂O_{grav} = gravimetrischer Wassergehalt [%]; TRD = Trockenraumdichte [g cm⁻³] und PV = Porenvolumen [%]

Die Berechnung des Porenvolumens erfolgte nach:

$$PV = (1 - TRD / 2,65)$$

mit: TRD = Trockenraumdichte (dimensionslos); 2,65 = Festsubstanzdichte von Quarz

2.7 Ertragsermittlung

Zur Ernte wurden auf einer Fläche von 7 m² alle ganzen Pflanzen entnommen, der oberirdische Gesamtaufwuchs gewogen und anschließend der marktfähige Anteil ermittelt. Nach der Ertragsermittlung wurden die Erntereste, mit Ausnahme der Behandlung „Abfuhr Erntereste“ wieder auf die Versuchspartellen ausgebracht. Um die Wassergehalte der Pflanzen zu ermitteln wurden repräsentative Teilproben der marktfähigen Ware bzw. der Erntereste bei 60°C getrocknet und rückgewogen.

2.8 C- und N-Gehalte der Pflanzenproben

Zur Probenvorbereitung wurden Aliquote der getrockneten Pflanzen in einer Retschmühle gemahlen. Die Messung der C- und N-Konzentrationen in den Pflanzenproben erfolgte an einem C/N-Analyser (Vario MAX CN, Elementar Analysensysteme, Hanau).

2.9 SPAD-Messungen

Um die N-Versorgung in der Behandlung „SPAD“ zu verfolgen wurden im Zeitraum zweite N-Düngung bis zwei Wochen vor Ernte SPAD-Messungen durchgeführt. Dabei wurde mit einem Handgerät (SPAD-Meter) der Firma Minolta jeweils die Absorption von photosynthetisch aktivem Licht am jüngsten vollentfalteten Blatt gemessen. Der Chlorophyllgehalt korreliert mit der N-Versorgung der Pflanze. Dieser „Grünwert“ sollte als Indikator für den Beginn eines N-Mangels verwendet werden. Als Grenze für eine zusätzliche N-Düngung wurde eine Abweichung des SPAD-Werts um 5 % verglichen mit der nach KNS gedüngten Behandlung angesetzt. Um der großen Variabilität des „Grünwerts“ Rechnung zu tragen, wurden je Blatt 10 Einzelmessungen durchgeführt und die Messungen an fünf Pflanzen je Parzelle wiederholt.

2.10 Berechnungen und Statistik

Die Datensätze wurden mit dem Software-Paket SigmaStat 11.0 ausgewertet. Zum Vergleich von Mittelwerten unter den Varianten eines Standorts wurden die Datensätze zuerst jeweils auf Normalverteilung geprüft und anschließend einem multiplen

Mittelwert-Vergleich (einfache Varianzanalyse nach Kruskal-Wallis, Student-Newman-Keuls Methode) unterzogen.

Zur Ermittlung von Unterschieden zwischen zwei identisch geführten Varianten auf den beiden Standorten Hohenheim und Speyer wurde ein paarweiser t-Test durchgeführt. Um die N₂O-Flussraten zu parametrisieren wurden Pearson'sche Korrelationsanalysen gerechnet. Die Datensätze wurden, wenn nötig, vor der Analyse durch einfache Transformationen (i.d.R. durch log₁₀-Transformation) normalverteilt.

Die Berechnung der kumulativen N₂O-Emissionen erfolgte unter der Annahme konstanter Gasflüsse zwischen zwei Messterminen. Die Berechnung erfolgte somit mit Hilfe einer stufenweisen Interpolation der gemessenen Gasflüsse.

Vor der Ernte der Gemüsepflanzen wurden die Parzellen auf Ertragsausfall bonitiert. Die Ergebnisse dieser Bonituren wurden bei der Berechnung der Flächenerträge berücksichtigt.

Die N-Salden (S) wurden wie folgt berechnet:

- 1) Behandlungen ohne Abfuhr der Ernterückstände (KNS, KNS_{+NI}, KNS_{Stroh},

KNS_{+ZF}, SPAD, Faustzahlen, und SPAD_{+ZF}:

$$S = \text{N-Eintrag}_{(\text{N-Düngung})} - \text{N-Entzug}_{(\text{Erntegut})}$$

- 2) Behandlung mit Abfuhr der Ernterückstände (KNS_{-ER}, KNS_{-ER+ZF})

$$S = \text{N-Eintrag}_{(\text{N-Düngung})} - \text{N-Entzug}_{(\sum \text{Erntegut} + \text{Erntereste})}$$

- 3) Behandlung mit Stroh-Zugabe (KNS_{+Stroh})

$$S = \text{N-Eintrag}_{(\sum \text{N-Düngung} + 0,5 \text{ Stroh-N}^*)} - \text{N-Entzug}_{(\text{Erntegut})}$$

* 0,5 des durch Stroh zugegebenen Stickstoffs, da pro Jahr zwei Kulturen angebaut wurden, Stroh jedoch nur einmal vor Winter appliziert wurde. Zeitpunkte für die Freisetzung des durch Strohzusatz immobilisierten Nitrat-N waren nicht bekannt.

3. Ergebnisse

3.1 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse am Standort Hohenheim

3.1.1 Witterungsverlauf im Versuchszeitraum

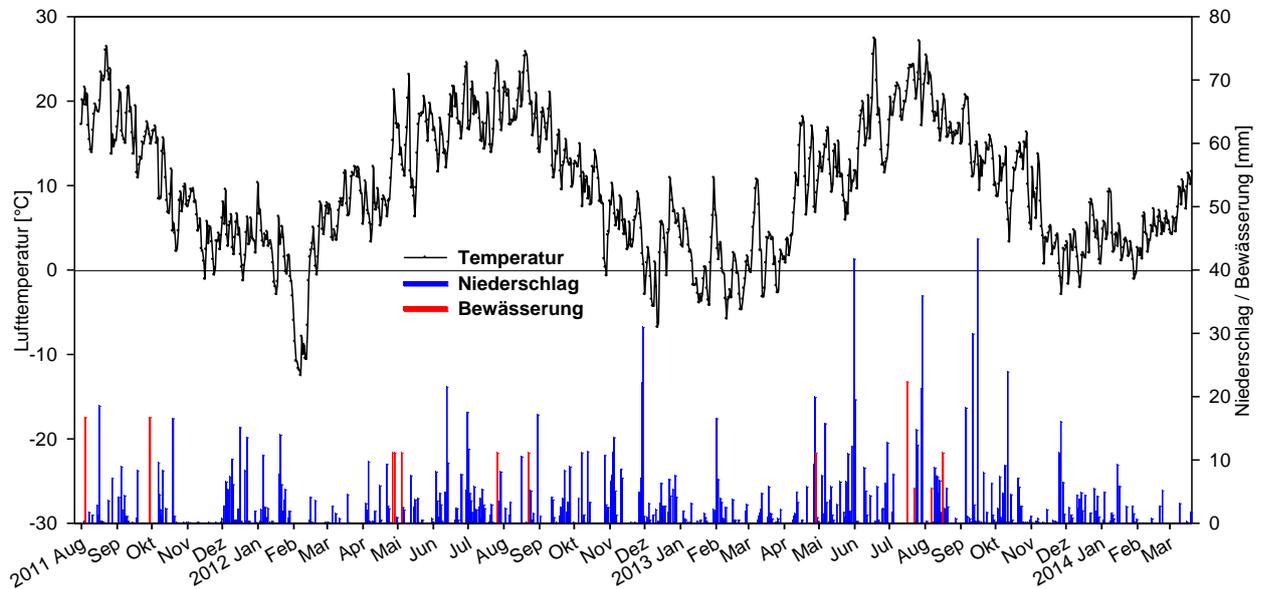


Abb. 1: Lufttemperatur in 2 m Höhe, Tagesniederschläge und Bewässerung im Versuchszeitraum am Standort Hohenheim (01.08.2011 bis 31.03.2014).

Die Witterung während des Versuchszeitraumes zeichnete sich vor allem durch zwei aufeinander folgende, untypisch warme Winter 2012/13 und 2013/14 aus. Der Oberboden war im ersten Winter 2011/12 für zwei Wochen bis auf ca. 30 cm Tiefe gefroren. In den beiden Folgewintern hingegen waren jeweils nur einige wenige Zentimeter des Oberbodens kurzzeitig gefroren. Ebenfalls als untypisch muss der Frühsommer 2013 bezeichnet werden, welcher sich durch auffallend wenig Sonnenschein (nicht dargestellt) und hohen Niederschlagsmengen auszeichnete.

3.1.2 Ergebnisse der N₂O-Flussmessungen

3.1.2.1 Zeitliche Dynamik der N₂O-Freisetzung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Darstellung der Gasflussraten auf zwei Grafiken je vier Varianten aufgeteilt worden (Abb. 2 und Abb. 3).

Ergebnisse

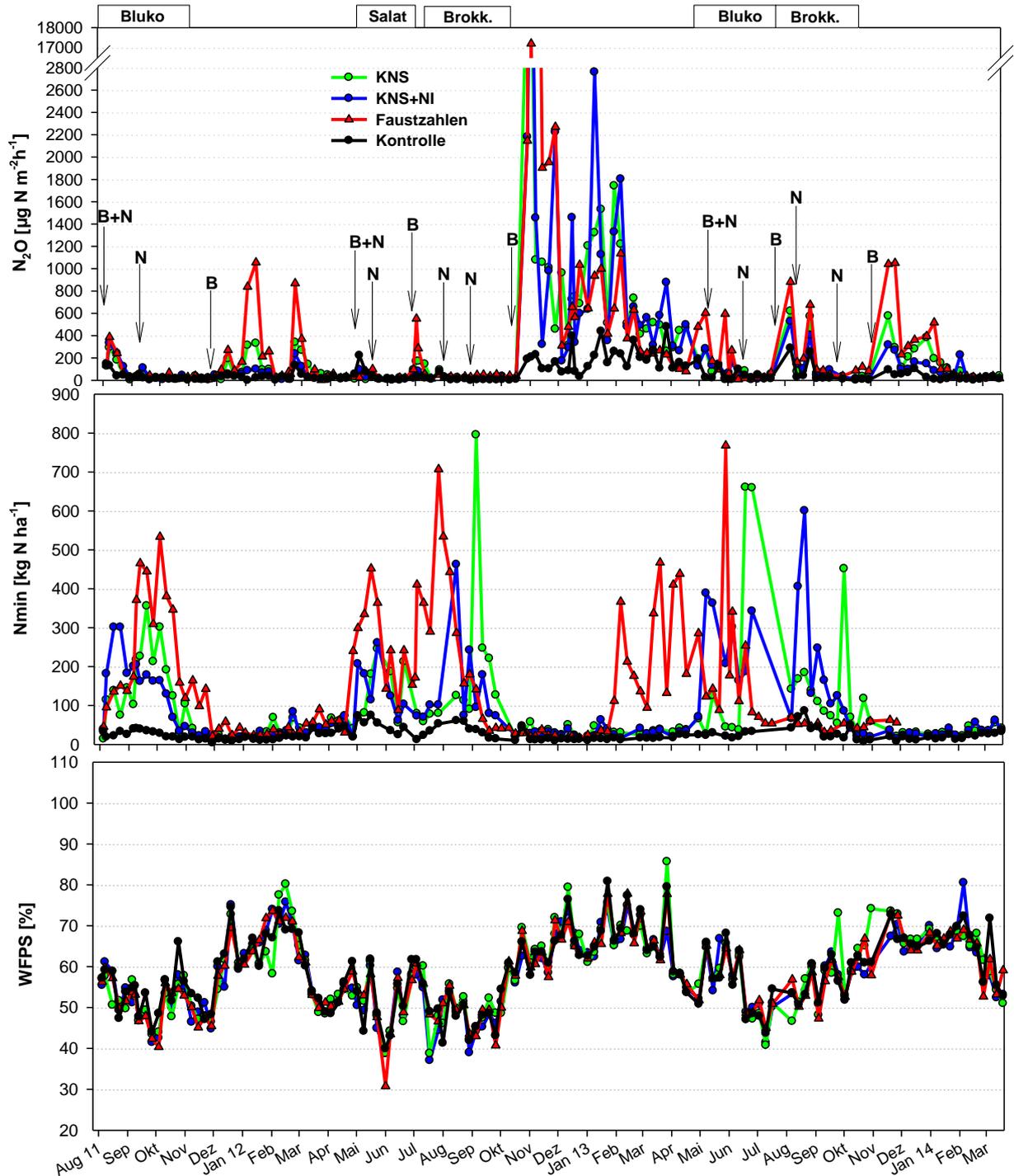


Abb. 2: Mittlere N_2O -Flussraten ($n=4$) der Varianten ‚KNS‘, ‚KNS+NI‘, ‚Faustzahlen‘, und ‚Kontrolle‘ (obere Abb.), N_{min} -Gehalte (0-30 cm) (mittlere Abb.) sowie Bodenfeuchte (untere Abb.) im Zeitraum August 2011 - März 2014 am Standort Hohenheim. N-Düngungen sind mit „N“ und Bodenbearbeitungsmaßnahmen mit „B“ gekennzeichnet.

Ergebnisse

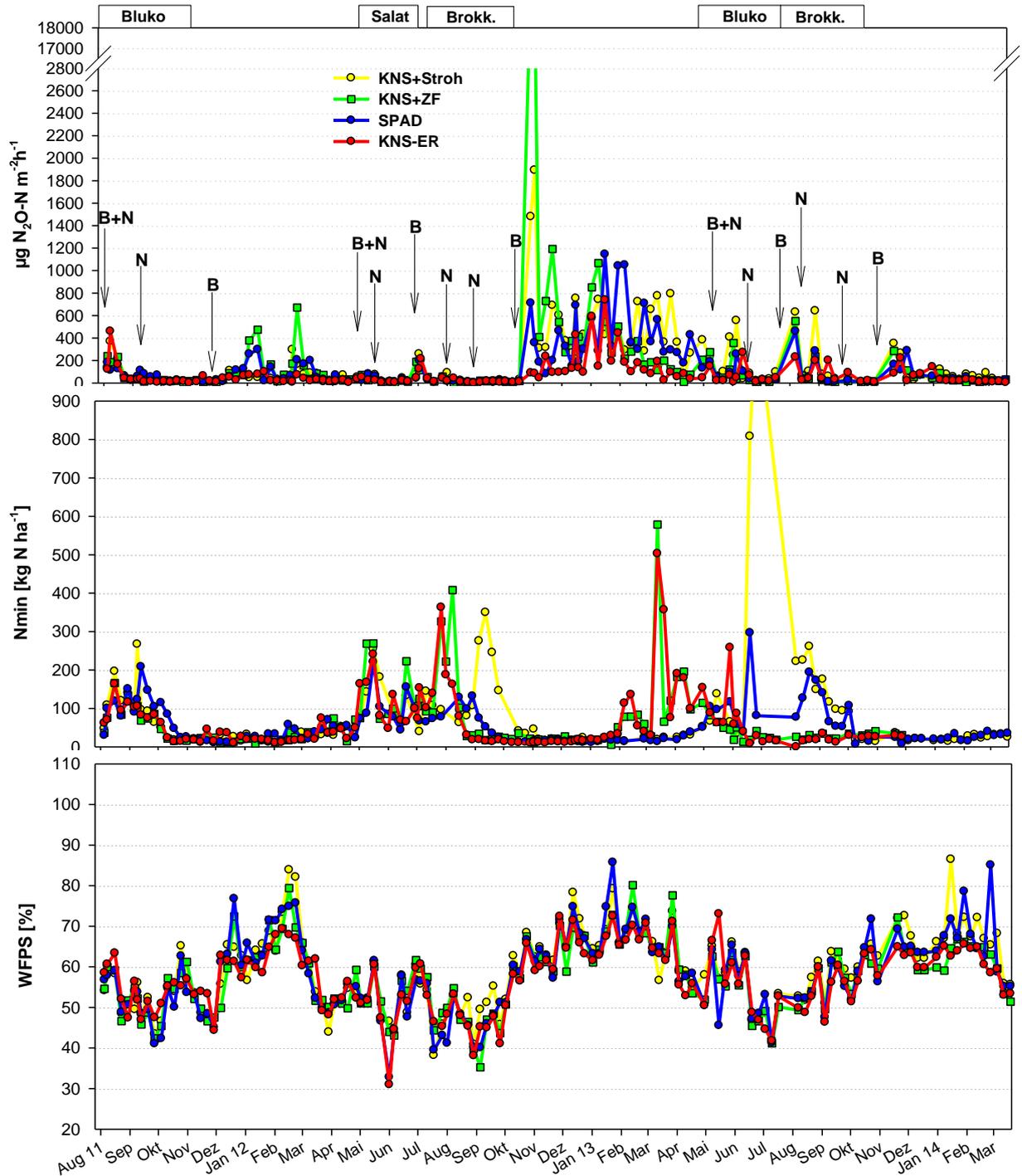


Abb. 3: Mittlere N_2O -Flussraten ($n=4$) der Varianten ‚KNS+Stroh‘, ‚KNS+ZF‘, ‚SPAD‘, und ‚KNS-ER‘ (obere Abb.), N_{min} -Gehalte (0-30 cm) (mittlere Abb.), sowie Bodenfeuchte (untere Abb.) im Zeitraum August 2011 - März 2014 am Standort Hohenheim. N-Düngungen sind mit „N“ und Bodenbearbeitungsmaßnahmen mit „B“ gekennzeichnet.

Ergebnisse

Aus den Abbildungen 2 und 3 geht deutlich hervor, dass hohe N_2O -Freisetzungen sowie länger andauernde Emissionsereignisse vor allem außerhalb der Vegetationsperiode auftraten. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen in denen hohe N_2O -Emissionen auf Standorten in Deutschland im Winter in Zusammenhang mit Frost/Tau-Zyklen standen (z.B. Flessa et al., 1995; Jungkunst et al. 2006) waren die Bedingungen vor allem im Winter 2013/14 nicht durch Tau-Ereignisse geprägt (Abb. 1 und 2). Die hohen Wassergehalte im Oberboden dürften die Denitrifikation begünstigt haben und waren sicher ein Grund für die hohen und lange anhaltenden Flussraten im Winter 2012/13, obwohl diese im Winter nicht mit den Flussraten korreliert waren (Tab. 4). Grund für den fehlenden Zusammenhang zwischen N_2O -Flüssen und den Wassergehalten im Winterzeitraum dürften die stets hohen Wassergehalte gewesen sein. Der Korrelation der N_2O -Flüsse mit den NO_3^- -Konzentrationen deuten auf die Denitrifikation als maßgebliche N_2O -Quelle im Winter hin.

Die hohen N_2O -Flüsse traten zudem in Zeiträumen erhöhter C-Verfügbarkeit auf, was durch die Korrelationen zwischen N_2O - und CO_2 -Flüssen belegt wird (Tabelle 4). So folgten die Emissionsspitzen stets der Einarbeitung der Ernterückstände im Herbst was neben der hohen N-Verfügbarkeit auf einen erhöhten C-Umsatz hinweist. Ein starker Anstieg der N_2O -Freisetzung nach Einarbeitung von Zuckerrübenblättern wurde von Flessa und Beese (1995) berichtet. Dieser Anstieg verlief synchron mit einer Abnahme des Redoxpotentials aufgrund der O_2 -Zehrung beim Umsatz der Rübenblätter. Somit wurde die Denitrifikation stimuliert und dadurch auch die N_2O -Freisetzung induziert.

Neben den hohen Emissionen nach Einarbeitung der Kohlrückstände traten Emissionsspitzen nach Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf. Diese waren meist höher als die Emissionen nach den N-Applikationen. Die Bodenbearbeitung fördert den Umsatz der organischen Substanz, dies führt zur Mineralisation von N und zur erhöhten Verfügbarkeit an mikrobiell leicht verwertbarem gelöstem C (Zsolnay, 2003). Dies kann zu der oben beschriebenen O_2 -Zehrung und so zu erhöhten N_2O -Flüssen aus der Denitrifikation führen.

Verglichen mit den Emissionen aus einem Getreidebestand waren die N_2O -Flussraten aus dem Gemüsebauversuch als sehr hoch einzustufen. Die höchsten N_2O -Flussraten innerhalb einer zweijährigen Untersuchung wurden von Guzman-Bustamante et al.

Ergebnisse

(2014) auf einer benachbarten Winterweizenfläche mit $120 \mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ gemessen (vgl. Abb. 2 und 3).

Tab. 4: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten für die Zusammenhänge zwischen den N_2O -Flussraten und den im Feld erhobenen Steuergrößen.

Steuergröße	Sommerzeitraum (n=432)	Winterzeitraum (n=503)	Gesamter Zeitraum (n=935)
NH_4^+	0,00	-0,01	-0,05
NO_3^-	0,03	0,33***	-0,03
WFPS	0,31***	0,05	0,142***
CO_2	0,35***	0,55***	0,50***
Bodentemperatur	0,08	0,03	-0,09**

3.1.2.2 Kumulative N_2O -Emissionen am Standort Hohenheim

Die über den gesamten Messzeitraum (32 Monate) kumulierten N_2O -Emissionen schwankten zwischen $15 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ in der Kontrolle und $91 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ in der Behandlung „Faustzahlen“ (Abb. 4). Aus Abbildung 4 wird das hohe Potential des Winterzeitraums für N_2O -Verluste ersichtlich. Der Anteil der Emissionen im Winter an den kumulierten Emissionen variierte zwischen 63 % in der ‚KNS-ER‘-Variante und 86 % in der ‚KNS‘- und der ‚Faustzahlen‘-Variante. Vor allem der Vergleich der extrem hohen Winteremissionen 2012/13 mit den Emissionen der beiden anderen Winterperioden belegt zudem die Notwendigkeit mehrjähriger annueller Freilandmessungen. Im Winter 2012/13 waren die Emissionen im Mittel um das 9,4-fache höher als in den beiden anderen Winterzeiträumen. Eine ähnlich hohe interannuelle Variabilität trotz identischer Bewirtschaftung wurde beispielweise auch von Dobbie und Smith (2003) berichtet.

Ergebnisse

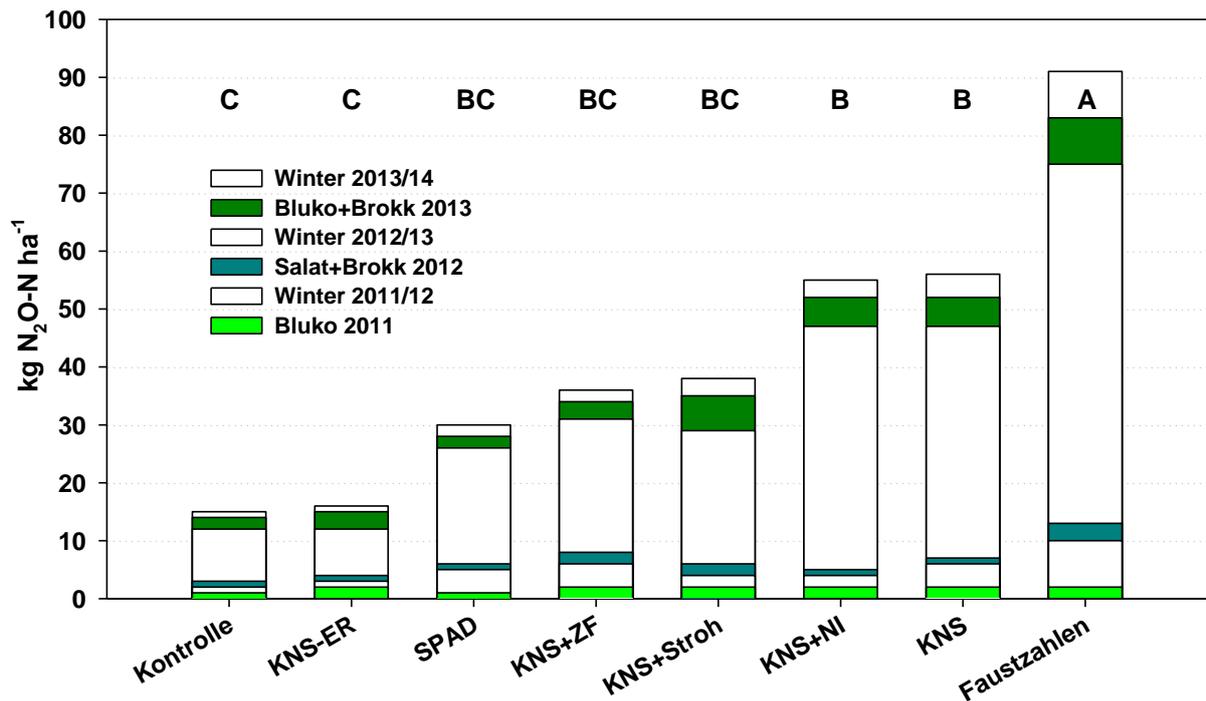


Abb. 4: Kumulative N₂O-Emissionen für den gesamten Versuchszeitraum (03.08.2011-30.03.2014, 32 Monate) der acht „Hauptvarianten“. Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Student-Newman-Keuls Test, $p < 0,05$, $n=4$).

N₂O-Emissionen in Abhängigkeit der N-Düngermenge

Über den vollständigen Versuchszeitraum ergab sich für die Reduktion der N-Düngermenge von Pflanzenbedarf plus Sicherheitszuschlag (Faustzahlen) auf Pflanzenbedarf minus N_{\min} (KNS) eine signifikante Minderung der N₂O-Emissionen (Abb. 4). Eine weitere Reduktion der N-Düngermenge auf das Niveau der „SPAD“-Behandlung führte zwar im Mittel zu einer weiteren N₂O-Minderung, diese war jedoch statistisch nicht abzusichern. Bei den ackerbaulichen Versuchen von Goglio et al. (2014) gingen reduzierte N-Düngermengen ebenfalls mit reduzierten N₂O-Emissionen einher. Pfab et al. (2011) stellten am selben Standort bei einer ähnlichen Gemüsefruchtfolge ebenfalls eine Minderung der N₂O-Emissionen in der Reihenfolge „Faustzahlen“ > „KNS“ > „KNS -20 % N“ fest. Während sich die Emissionen bei Pfab et al. (2011) in allen drei Behandlungen statistisch unterschieden, führte die Reduktion von „KNS“ auf „KNS -20%“ bei deren Untersuchungen auch zu einem geringeren Kopfsalatertrag.

Einfluss des NIs 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) auf die N₂O-Emissionen

Durch den Zusatz von 3,4-DMPP konnte in dieser Studie keine Reduktion der kumulativen N₂O-Emissionen festgestellt werden (Abb. 4). Bei der Anwendung des N-Düngers mit DMPP und der damit verbundenen einmaligen Düngergabe fiel außerdem auf, dass das Einsparen eines zweiten N-Düngetermins insbesondere dann ein Nachteil sein kann, wenn nach der ersten N-Düngung eine größere Menge N aus Bodenvorräten nachgeliefert wird. In solch einem Fall (vgl. Tab. 2 Brokkoli 2013) entsteht bei zweimaliger N-Düngermengen-Bemessung eine geringere Gesamt-N-Düngemenge. So könnte eine einmalige N-Gabe auf Böden mit hohem N-Nachlieferungspotential für Kulturen die empfehlungsgemäß Grund- und Kopfdüngung erhalten sollten, insbesondere beim Anbau als letzten Kultur vor Winter (erhöhter Rest-N_{min} zur Brache), in Frage gestellt werden. Im Gegensatz zu den hier gezeigten Ergebnissen sind im Ackerbau mehrfach N₂O-Minderungen bei Einsatz von NIs beobachtet worden (z.B. Decock 2014, Vitale et al. 2014, De Antoni et al. 2014). Ruser und Schulz (2014) berechneten für die Anwendung eines NIs ein Minderungspotential von ca. 35% gegenüber einer Düngungsstrategie ohne Hemmstoff. Im Gemüsebau konnten Pfab et al. (2011) ebenfalls eine signifikante N₂O-Reduktion durch Anwendung von DMPP feststellen. Ein Grund für die fehlende Response der N₂O-Flüsse auf den NI in unserer Untersuchung dürfte die Tatsache sein, dass die höchsten Emissionen in der vorliegenden Studie im Winter auftraten, also einem Zeitraum in dem die Hemmwirkung mit Sicherheit nicht mehr stattfand wohingegen im Zeitraum mit N-Düngung kaum erhöhte Flüsse auftraten (Abb. 2 und 3).

Einfluss der Winterzwischenfrucht auf die N₂O-Emissionen

Für den zusätzlichen Anbau einer Winterzwischenfrucht (hier: Wintergetreide) konnte keine statistisch gesicherte Reduktion der N₂O-Emissionen festgestellt werden (Abb. 4). Betrachtet man die kumulativen N₂O-Emissionen lässt sich jedoch eine deutliche Tendenz zur Minderung erkennen. Über den gesamten Versuchszeitraum waren die mittleren N₂O-Emissionen um 36 % und damit 20 kg N₂O-N ha⁻¹ geringer. Auf Grund verspäteter Ernte im ersten Herbst 2011 konnte im ersten Winter keine Zwischenfrucht mehr angebaut werden. In diesem Winter fielen auch die N₂O-Emissionen vergleichsweise gering aus, sodass eine mögliche Minderung keinen größeren Einfluss auf die Gesamtemissionen gehabt hätte.

Einfluss des Ernterestmanagements auf die N₂O-Emissionen

Das kontinuierliche Entfernen der oberirdischen Pflanzenreste nach der Ernte hat in dieser Studie zur größten Minderung der N₂O-Emissionen geführt. Dabei wurde sogar das Niveau der ohne N geführten Kontrolle erreicht. Die Bedeutung des frischen Pflanzenmaterials als C- und N-Quelle für N₂O-bildende Prozesse wird dadurch hervorgehoben. Da hohe N₂O-Flussraten stets in Verbindung mit Maßnahmen auftraten die die C-Verfügbarkeit erhöhten und weil die N_{min}-Gehalte des Oberbodens in der Behandlung mit Abfuhr der Erntereste über den gesamten Versuch hinweg nicht höher waren als in der „KNS“-Behandlung, wird daraus geschlossen, dass die C-Verfügbarkeit auf diesem Standort zeitweise eine Schlüsselrolle für die heterotrophe, denitrifizierende Biomasse gespielt hat (vgl. auch Korrelation der N₂O- und der CO₂-Flüsse in Tabelle 4). Durch das Abfahren der Ernterückstände fehlten die für die Nitratreduktion während der Denitrifikation notwendigen Elektronendonatoren aus der organischen Substanz. Aus Sicht der N₂O-Minderung ist diese Maßnahme besonders hervorzuheben, keine andere Behandlung konnte das enorme Minderungspotential auch nur annähernd erreichen. Zudem sind bis heute auch für andere Landnutzungssysteme wie beispielweise den Ackerbau keine Maßnahmen mit ähnlichem Minderungspotential bekannt. Inwiefern diese Maßnahme in die Praxis überführt werden könnte ist letztlich auch eine Frage der technischen Machbarkeit. Die Bedeutung von Gemüseernterückständen für die N₂O-Emission ist bislang nicht untersucht worden, jedoch zeigten De Ruijter et al. (2010) bereits, dass durch den Entzug von Gemüseernterückständen auch eine Minderung der NitratAuswaschung erreicht werden kann.

Einfluss einer Stroh-Zugabe auf die N₂O-Emissionen

Innerhalb dieser Arbeit ergab sich für das Zusetzen von Häckselstroh vor Winter (2 kg m⁻²) keine signifikante Reduktion der N₂O-Emissionen, allerdings zeigte sich im Mittel auch hier eine deutliche Tendenz zur Minderung (-18 kg N₂O-N ha⁻¹ verglichen zur Behandlung „KNS“) (Abbildung 4). Ein Grund dafür, dass sich diese Maßnahme nicht gesichert emissionsmindernd auswirkte, könnte ein kurzzeitiger N₂O-Puls nach der Stroheinarbeitung im November 2012 gewesen sein. Dabei entstanden durch die kurzzeitig erhöhte Verfügbarkeit und den Umsatz leicht löslicher C-Verbindungen aus dem Stroh anaerobe Kompartimente, die die N₂O-Freisetzung während der Denitrifikation förderten.

Ergebnisse

Einfluss von Kombinationen mit Zwischenfrucht auf die N₂O-Emissionen

Abbildung 5 zeigt die kumulativen N₂O-Emissionen eines 19-monatigen Vergleichszeitraumes. Durch den zusätzlichen Anbau einer Winterzwischenfrucht konnte in den Varianten „SPAD“ und „KNS-ER“ keine zusätzliche N₂O-Minderung erreicht werden. Allerdings war die mittlere N₂O-Emission bei der „SPAD“-Behandlung tendenziell geringer, wenn eine Zwischenfrucht angebaut wurde. Bei dem Zeitraum der zur Berechnung dieser Behandlungen herangezogen wurde, handelt es sich um die letzten 19 Versuchsmonate am Standort Hohenheim. Die Tatsache, dass sich die Emission der „SPAD“-Behandlung statistisch von der Emission der „KNS“-Variante trennen lässt, belegt nochmals zusätzlich den mindernden Einfluss einer N-Düngereinsparung.

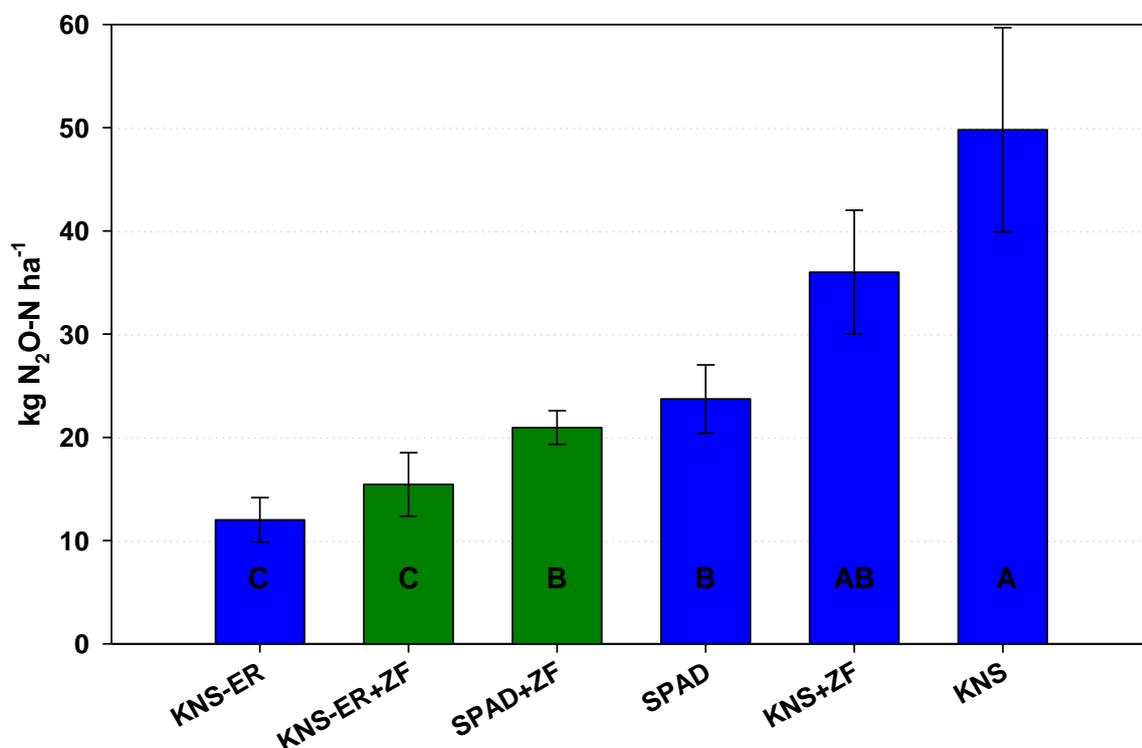


Abb. 5: Kumulative N₂O-Emissionen der Kombinationsvarianten plus Winterzwischenfrucht und deren Vergleichsvarianten (15.08.2012 bis 31.03.2014). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (Student-Newman-Keuls Test, $p < 0,05$, $n=4$).

Einfluss von Piadin-behandelten Ernterückständen und verzögerter Einarbeitung auf die N₂O-Emissionen

Um die beiden Varianten „KNS+Piadin“ und „KNS_{VE}“ hinsichtlich ihres N₂O-Minderungspotentials beurteilen zu können, sind nachfolgend die kumulativen N₂O-Emissionen für den Zeitraum, in dem diese zusätzlichen Varianten im Parzellenversuch

Ergebnisse

integriert waren, dargestellt (Abb. 6). Die relativ großen Standardabweichungen vor allem der „Faustzahlen“- und der „KNS“-Varianten führten dazu, dass keine sicherbaren Unterschiede zwischen den Behandlungen auftraten. Die Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass durch jeglichen Zusatz einer Maßnahme zur einfachen KNS-Behandlung tendenziell auch eine N₂O-Minderung erreicht werden kann. Die verzögerte Einarbeitung (VE) und die Behandlung der Ernterückstände mit Piadin stellen jeweils eine solche Maßnahme dar.

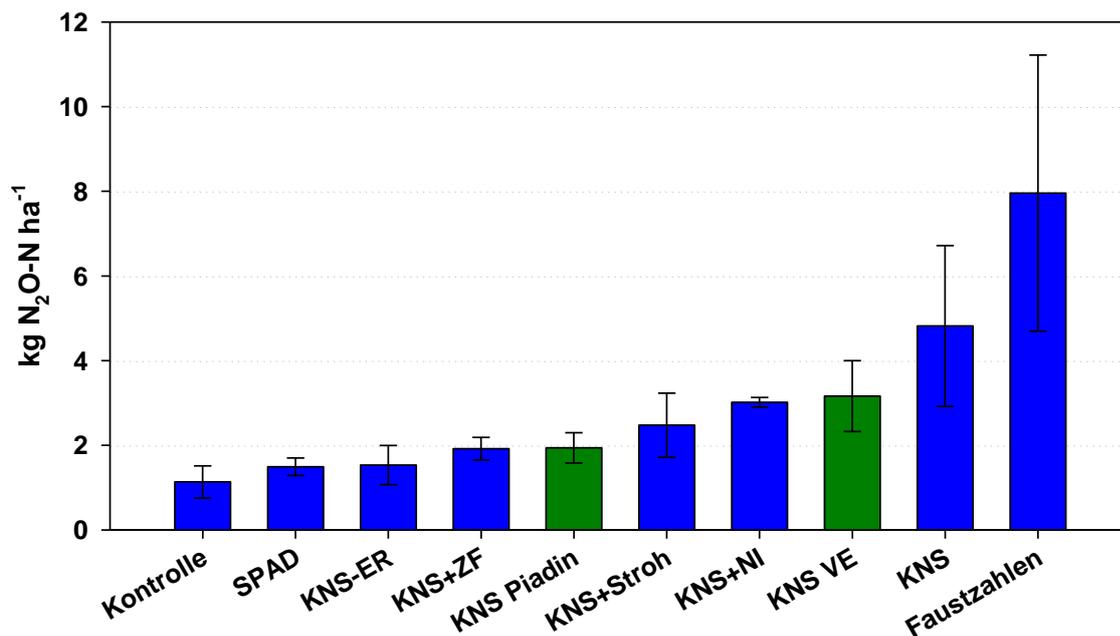


Abb. 6: Mittlere kumulative N₂O-Winteremission (n=4, ±Standard-Fehler) der Varianten mit Piadin-Zusatz und verzögerter Einarbeitung im Versuchszeitraum 2013/2014 (20.11.2013-26.03.2014, 4 Monate). Keine statistisch signifikanten Unterschiede! Dunkelgrün sind die Varianten gekennzeichnet, welche ausschließlich in den Winterzeitraum 2013/2014 zusätzlich in den Feldversuch integriert wurden.

3.1.2.3 Ergebnisse aus dem Inkubationsversuch / Distickstoff-Messung

Die im Labor ermittelten N₂O-Emissionen der unbegasteten Monolithe zeigten weder zeitlich noch quantitativ Zusammenhänge mit den im Feld gemessenen N₂O-Flüssen. Sie waren viel niedriger als die Feldflussraten. Ein Grund dafür dürfte die geringe Fläche der mit den Stechzylindern entnommenen Bodenmonolithe sein, die die bekanntermaßen große räumliche Variabilität der N₂O-Freisetzung (Parkin, 1987; 1990) nur unzureichend abbildete. Durch die vergleichsweise große Fläche die durch die Gassammelhauben im Feld abgedeckt wurde, wird diese Variabilität deutlich reduziert

Ergebnisse

(Kaiser et al., 1996). Weiterhin wurden die Monolithe jeweils aus einer Bodentiefe in 5-10 cm entnommen, somit wurde unterschiedlichen N_2O -Bildungstiefen im Boden nicht Rechnung getragen. Untersuchungen zur N_2O -Konzentration in der Bodenluft am selben Standort belegten extrem hohe N_2O -Konzentrationen von bis zu 70 ppm_{vol} im Unterboden und somit dem ca. 200-fachen der ambienten Konzentration (Ruser et al., 2011). Die Diffusion von hoch mit N_2O angereicherter Luft aus dem Unterboden kann zudem ein weiterer Grund für die hohen N_2O -Emissionen *in situ* im Vergleich zu den Laboremmissionen sein.

Da die Labor- und Feldemissionen nicht miteinander korreliert werden konnten, wurde auf einen Übertrag der im Labor gemessenen $N_2:N_2O$ -Verhältnisse auf die Feldemissionen verzichtet. Sie hätte zu unrealistisch hohen N_2 -Verlusten in der Größenordnung von ca. 300 kg $N_2-N\ ha^{-1}$ (gesamter Versuchszeitraum) für die untersuchten Behandlungen „KNS“, „KNS_{+NI}“ und „Faustzahlen“ gelegen.

Allerdings kann das im Labor gemessene Verhältnis von N_2/N_2O als ein möglicher Ansatz zur Klärung der großen interannuellen Variabilität der N_2O -Emissionen beitragen. Die größten Unterschiede der N_2O -Emissionen traten, verglichen mit 2013/14 bei einheitlicher Bewirtschaftung am Standort Hohenheim im Winter 2012/13 auf. Die Witterungsbedingungen waren im Winter 2012/13 und 2013/14 nahezu identisch. Es gab kaum längere Frostperioden, die Lufttemperaturen waren ähnlich, selbiges traf auch für die Niederschlagsmengen und deren Verteilung zu. Abbildung 7 zeigt den zeitlichen Verlauf des N_2/N_2O -Verhältnis in der Laborinkubation. Im Winter 2012/13 waren die N_2O -Emissionen sehr hoch (vgl. Abb. 2 und 3), gleichzeitig deutete das niedrige N_2/N_2O -Verhältnis mit Werten zwischen 0,01 und 6 (im Mittel 1) auf relativ hohe N_2O -Anteile bei der Denitrifikation hin (Abbildung 7). Im Gegensatz dazu waren die N_2O -Emissionen im Winter 2013/14 vergleichsweise niedrig bei gleichzeitig hohen N_2/N_2O -Verhältnissen zwischen 0,05 und 32 (im Mittel 12).

Im August 2013 erfolgte eine während des Versuchszeitraums einmalige Kalkgabe, welche einen Anstieg des pH-Werts im Boden zur Folge hatte. Da das N_2/N_2O -Verhältnis und pH-Wert des Bodens positiv miteinander korrelieren können (Liu et al., 2010) könnte sich das Verhältnis nach der Kalkung und somit im Winter 2013/14 zu Gunsten der N_2 -Emission verschoben haben (Qu et al., 2014; Zaman und Nguyen, 2009).

Ergebnisse

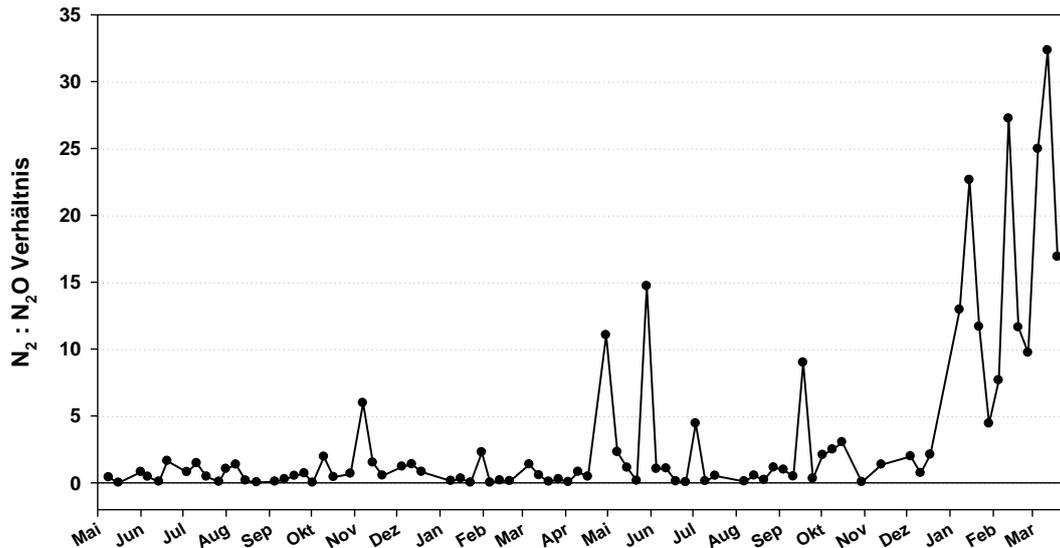


Abb. 7: Mediane der N₂:N₂O Verhältnisse aus dem Inkubationsversuch (n=12) für den Versuchszeitraum 09.05.2012 bis 19.03.2014.

3.1.3 Nitratverlagerung in Abhängigkeit der N-Managementmaßnahme

Aus Abbildung 8 geht hervor, dass die Variante ‚Faustzahlen‘ nicht nur nach N-Düngungsmaßnahmen, sondern auch nach der Ernte des jeweils letzten Gemüsesatzes die höchsten N_{min}-Gehalte aufwies. Damit lässt sich ein erhöhtes N-Verlustpotential während des anschließenden Zeitraums (hier: Schwarzbrache über Winter) für diese Variante begründen. Diese Behandlung zeigte sowohl die höchsten N₂O-Verluste wie auch die höchsten Nitratgehalte im Unterboden auf. Im Dezember 2013 waren die Nitratgehalte in dieser Behandlung mit ca. 85 kg N ha⁻¹ in 30-90 cm Tiefe nahezu doppelt so hoch wie in allen weiteren gedüngten Versuchsvarianten (Abbildung 8).

Die Reduktion der N-Düngermenge nach „KNS“ bewirkte eine deutliche Verminderung der N_{min}-Gehalte im Oberboden und somit auch eine Verringerung der N-Verluste. Neben der Minderung der N₂O-Verluste konnte auch die Nitratverlagerung im Vergleich zur „Faustzahlen“-Variante deutlich (ca. 50%) im Winter 2013/14 vermindert werden. Im Gegensatz dazu hatte eine weitere Reduktion der N-Düngung („SPAD“) nur einen geringen Einfluss auf die Nitratgehalte in 30-90 cm Tiefe und damit auf eine mögliche Nitratauswaschung.

Da die Düngung bei „KNS_{+NI}“ jeweils als einmalige Gabe appliziert wurde, waren die N_{min}-Gehalte des Oberbodens nach Düngung entsprechend höher als in der

Ergebnisse

Behandlung „KNS“ mit zweigeteilter Gabe. Auf die Nitratverlagerung hatte dies jedoch, trotz der insgesamt etwas höheren N-Düngermengen, keinen Einfluss, die Nitratgehalte in 30-90 cm Tiefe unterschieden sich nicht von der „KNS“-Variante. Die höheren Düngermengen der „KNS_{+NI}“-Variante resultierten aus der Tatsache, dass bei der zweiten Düngergabe bei „KNS“ der aktuelle N_{\min} -Gehalt des Oberbodens nochmals zum Abzug kam, während dieser bei der „KNS_{+NI}“-Variante nicht der Fall war.

Besonders auffällig sind die hohen N_{\min} -Werte in der ‚Stroh‘-Variante. Zwar ist bei dieser Variante am meisten N ausgebracht worden (Tab. 3), der dennoch relativ groß erscheinende Unterschied im N_{\min} von ca. 60 kg N ha^{-1} (30-90 cm) zur „KNS“-Behandlung lässt sich alleine durch die N-Düngung nicht erklären. Wahrscheinlich kam es bei dieser Variante zusätzlich zu einer erhöhten N-Nachlieferung aus bodeninternen N-Vorräten. Zudem könnten konvektive N-Flüsse aus dem Oberboden durch „preferential flow“ nach Starkregen in dieser trockenen Phase mit visuell sichtbaren Schrumpfrissen Ende Juli 2013 ein weiterer Grund für die hohen Nitratgehalte im Unterboden Anfang August gewesen sein. Der extrem starke Anstieg des N_{\min} im Oberboden kann dagegen in dieser Größenordnung von mehreren hundert kg N ha^{-1} nicht begründet werden. Möglicherweise wurde bei der Beprobung des Oberbodens direkt nach der N-Düngung ein Düngerhotspot mit erfasst, dies führt vor allem in trockenen Phasen zu hohen N-Wiederfindungen, weil die Düngerkörner teils noch nicht vollständig in Lösung gegangen sind.

Die zeitliche Vorhersage der Freisetzung des immobilisierten N nach Strohgabe dürfte generell die Schwierigkeit bei diesem Verfahren der N-Konservierung sein, es wären entsprechend häufig Bodenproben zur Kontrolle der N_{\min} -Gehalte nötig. Prinzipiell ist der Zusatz von Stroh im Gemüsebau, wie im Ackerbau, als positiv zu bewerten, da neben der Nitratimmobilisierung auch positive Bodenstruktureffekte erwartet werden können. In der vorliegenden Studie reichte die N-Nachlieferung in der Strohverante aus um den gesamten N-Bedarf des Brokkolis 2013 zu decken, eine mineralische N-Ergänzung war nicht notwendig um einen vollwertigen marktfähigen Ertrag zu erzielen. Mit Ausnahme der „Faustzahlen“-Behandlung waren die Nitratgehalte in 30-90 cm Tiefe in der ungedüngten Kontrolle bei den Winter Beprobungen nur unwesentlich geringer als in den restlichen gedüngten Behandlungen. Somit ist die Realisierung der Verminderung der Nitratverlagerung und damit potenzieller Auswaschung bei verhaltener N-Düngung im Gegensatz zur N_2O -Minderung nur schwer zu erreichen.

Ergebnisse

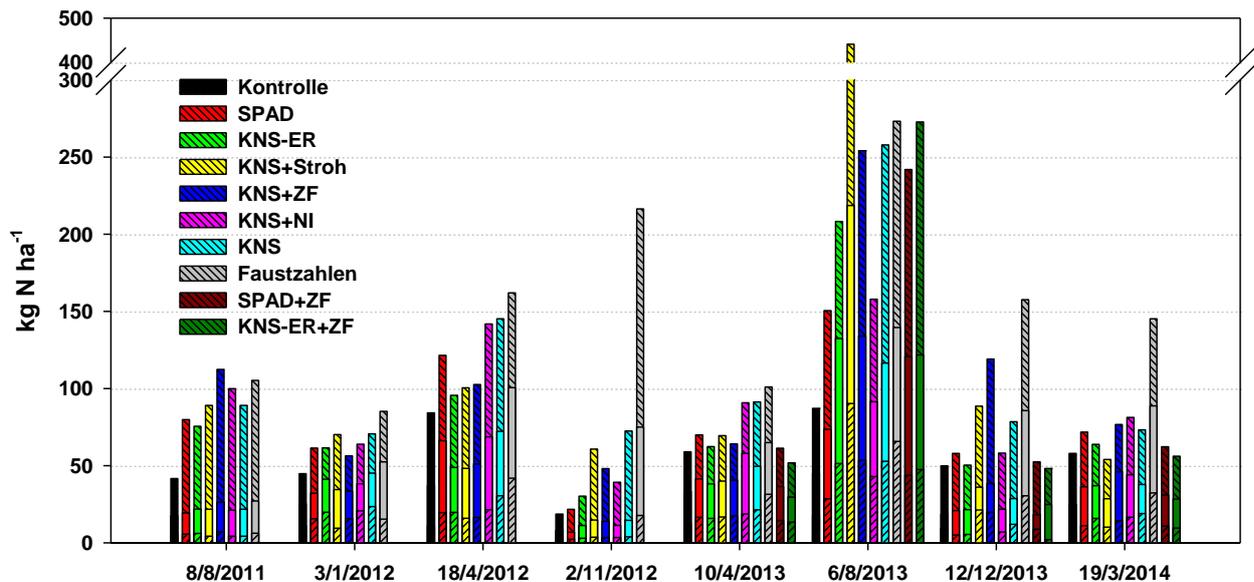


Abb. 8: N_{min}-Gehalte in den Bodentiefen 0-30, 30-60 und 60-90 cm (von oben nach unten) am Standort Hohenheim.

3.1.4 Erträge, N-Aufnahmen, N-Salden, N-Saldo/N₂O

Marktfähige Erträge am Standort Heidfeldhof

In Tabelle 5 sind die marktfähigen Erträge aus dem Parzellenversuch dargestellt. Die Erträge der gedüngten Versuchsvarianten schwankten zwischen 212 und 311 dt ha⁻¹ bei Blumenkohl und lagen damit in einem für Süddeutschland normalen Bereich (282 dt ha⁻¹, Bayerisches Landesamt für Statistik, 2011). Bei Brokkoli lagen die Erträge mit 181 bis 228 dt ha⁻¹ eher in einem überdurchschnittlichen Bereich (vgl. LSB, 153 dt ha⁻¹). Auch die Ertragszahlen von Eissalat im Frühsommeranbau 2012 lagen mit 362 bis 445 dt ha⁻¹ eher in einem hohen Bereich (vgl. LSB, 323 dt ha⁻¹). Die überdurchschnittlich hoch liegenden Flächenerträge lassen sich nicht zuletzt durch teilweise mehrere Erntedurchgänge sowie vollständiges Abernten der Flächen, wie es in der Praxis nicht immer geschieht, erklären. Bei der Kultivierung von Eissalat 2012 sind keine Ertragsunterschiede aufgetreten, auch die Kontroll-Variante (keine N-Düngung) erbrachte einen voll marktfähigen Salatertrag. Beim Anbau von Kohlkulturen hingegen, war es ohne N-Düngung kaum möglich marktfähige Ware zu produzieren. Schon eine reduzierte KNS-Düngung erwies sich auf dem hier untersuchten Standort als ausreichend, um einen voll marktfähigen Kohlertrag zu erzielen.

Ergebnisse

Tab. 5: Mittlere marktfähige Ware am Standort Hohenheim (n=4). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (Student Newman Keuls-Test, p<0,05).

Jahr Kultur	Marktfähiger Ertrag in dt ha ⁻¹				
	2011 Blumenkohl	2012 Eissalat	2012 Brokkoli	2013 Blumenkohl	2013 Brokkoli
Kontrolle	0 ^d	362 ^{n.s.}	12 ^b	0 ^b	0 ^b
SPAD	215 ^{bc}	401 ^{n.s.}	181 ^a	262 ^a	181 ^a
KNS	212 ^b	445 ^{n.s.}	187 ^a	264 ^a	188 ^a
KNS_{+Stroh}	190 [*]	392 ^{n.s.}	201 ^a	240 ^a	191 ^a
KNS_{+ZF}	146 [*]	420 ^{n.s.}	212 ^a	311 ^a	196 ^a
KNS_{-ER}	116 [*]	410 ^{n.s.}	228 ^a	227 ^a	189 ^a
KNS_{+NI}	265 ^{ab}	417 ^{n.s.}	207 ^a	266 ^a	199 ^a
Faustzahlen	310 ^c	416 ^{n.s.}	207 ^a	292 ^a	205 ^a
SPAD_{+ZF}			207 ^a	284 ^a	181 ^a
KNS_{-ER+ZF}			194 ^a	292 ^a	179 ^a

*Zum Zeitpunkt der Ernte war diese Versuchsbehandlung noch nicht im Versuch integriert und erhielten deshalb zu diesem Satz lediglich reduzierte N-Gaben. Daraus resultierten entsprechend geringere Erträge.

N-Gehalte im oberirdischen Aufwuchs am Standort Hohenheim

Die folgende Abbildung 9 zeigt die N-Gehalte des oberirdischen Aufwuchses zum Erntezeitpunkt. Zwei Auffälligkeiten sind dabei zu bemerken. Erstens hatte der Eissalat 2012 hat in allen Varianten unabhängig von der N-Düngung (vgl. Tab. 3) nahezu gleichviel N in die oberirdische Biomasse aufgenommen. Zweitens konnte durch Anbau einer Winterzwischenfrucht in der nachwinterlichen Kultur, Blumenkohl 2013, mehr N in oberirdischem Aufwuchs festgestellt werden (stat. sig.), als es bei praktizierter Winterbrache der Fall war (vgl. KNS und KNS_{+ZF}). Der zusätzliche Anbau eines Wintergetreides führte bei den Varianten „KNS_{-ER}“ und „SPAD“ jeweils zu tendenziell mehr akkumuliertem N in Biomasse in der Folgekultur (Abbildung 9). Das Konzept der Konservierung von mineralischem N im Herbst und die Bereitstellung dieses N für die Folgefrucht im nächsten Frühjahr haben sich somit bewährt.

Ergebnisse

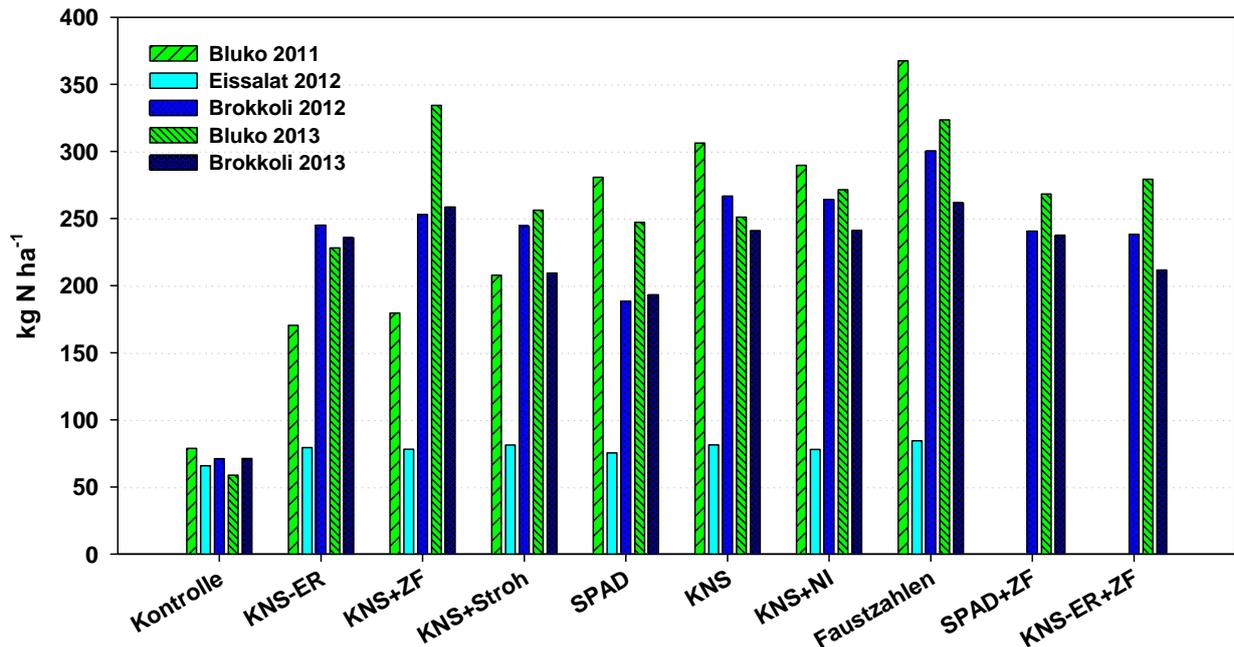


Abb. 9: Mittlere N-Gehalte (n=4) in oberirdischer Biomasse (Gesamt-Aufwuchs) zum Erntezeitpunkt am Standort Hohenheim.

N-Salden der Gemüsekulturen am Standort Hohenheim

Die N-Salden der einzelnen Gemüsesätze variierten zwischen +250 und -152 kg N ha⁻¹ (Tab. 6). Aufgrund der geringeren Düngermengen waren die N-Salden bei Eissalat i.d.R. geringer als bei Blumenkohl und Brokkoli. Die N-Salden der ungedüngten Kontrolle waren dann gleich null, wenn der Fläche keine vermarktungsfähige Ware entnommen wurde.

Die höchsten N-Salden wurden aufgrund der hohen N-Düngung in der „Faustzahlen“-Variante erreicht. Bei den einzelnen Kohlarten wurden dabei N-Überschüsse von durchschnittlich 211 kg N ha⁻¹ erzeugt.

Ergebnisse

Tab. 6: Mittlere N-Salden (n=4) am Standort Hohenheim. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (Student-Newman-Keuls Test, p>0,05)

Jahr Kultur	N-Saldo [kg N ha ⁻¹]					Gesamt
	2011 Blumenkohl	2012 Eissalat	2012 Brokkoli	2013 Blumenkohl	2013 Brokkoli	
Kontrolle	0 ^d	-38 ^f	-3 ^d	0 ^e	0 ^c	-41
SPAD	119 ^c	26 ^e	-23 ^e	161 ^c	-4 ^c	271
KNS	172 ^b	31 ^d	105 ^b	217 ^b	-5 ^c	520
KNS_{+Stroh}	64 ^{d*}	62 ^b	71 ^{bc}	250 ^a	-62 ^d	387
KNS_{+ZF}	56 ^{d*}	54 ^c	71 ^{bc}	221 ^b	-17 ^c	390
KNS_{-ER}	-50 ^{d*}	26 ^d	-70 ^e	92 ^d	-146 ^e	-148
KNS_{+NI}	160 ^b	32 ^d	104 ^b	141 ^c	119 ^b	556
Faustzahlen	220 ^a	116 ^a	206 ^a	224 ^b	195 ^a	961
SPAD_{+ZF}			-51 ^e	157 ^c	-2 ^c	102
KNS_{-ER+ZF}			55 ^c	228 ^b	-152 ^e	132

*Zum Zeitpunkt der Ernte war diese Versuchsbehandlung noch nicht im Versuch integriert und erhielten deshalb zu diesem Satz lediglich reduzierte N-Gaben! Daraus resultierten entsprechend geringere N-Salden.

Abbildung 10 illustriert den Zusammenhang zwischen N₂O-Emission und N-Saldo, letzterer als Indikator für Umweltrisiken von N-Überhängen. Ein Anstieg des N-Überschusses ging mit einem Anstieg der kumulierten N₂O-Emissionen einher. Durch vermehrte Substrat-Bereitstellung (N_{min}) konnte demnach auch mehr N sowohl bei der Nitrifikation als auch bei der Denitrifikation umgesetzt werden. Von einem Gemüseversuch auf demselben Standort berichteten Pfab et al. (2011) ebenfalls von steigenden N₂O-Emissionen mit zunehmendem N-Saldo. Im Gegensatz zu deren Untersuchung war in der hier vorliegenden Studie sowohl der Background mit 16,6 kg N ha⁻¹ um das ca. sechsfache wie auch der Emissionsfaktor mit 9 % ca. vierfach höher als bei Pfab et al. (2011). Diese höheren Verluste sind auf die hohen Emissionen im Winter 2012/13 zurückzuführen. Wenn das zweite Versuchsjahr mit den hohen Emissionen des Winters 2012/13 nicht berücksichtigt, so ergab sich ein mit Pfab et al. (2011) vergleichbarer Emissionsfaktor von ca. 3 %.

Neben dem Gemüsebau wurde ein ähnlicher Zusammenhang zwischen N-Saldo und N₂O-Emission auch für Ackerbausysteme in Deutschland bzw. für Silomais in Holland berichtet (Van Groeningen et al., 2004; Ruser et al., 2008).

Ergebnisse

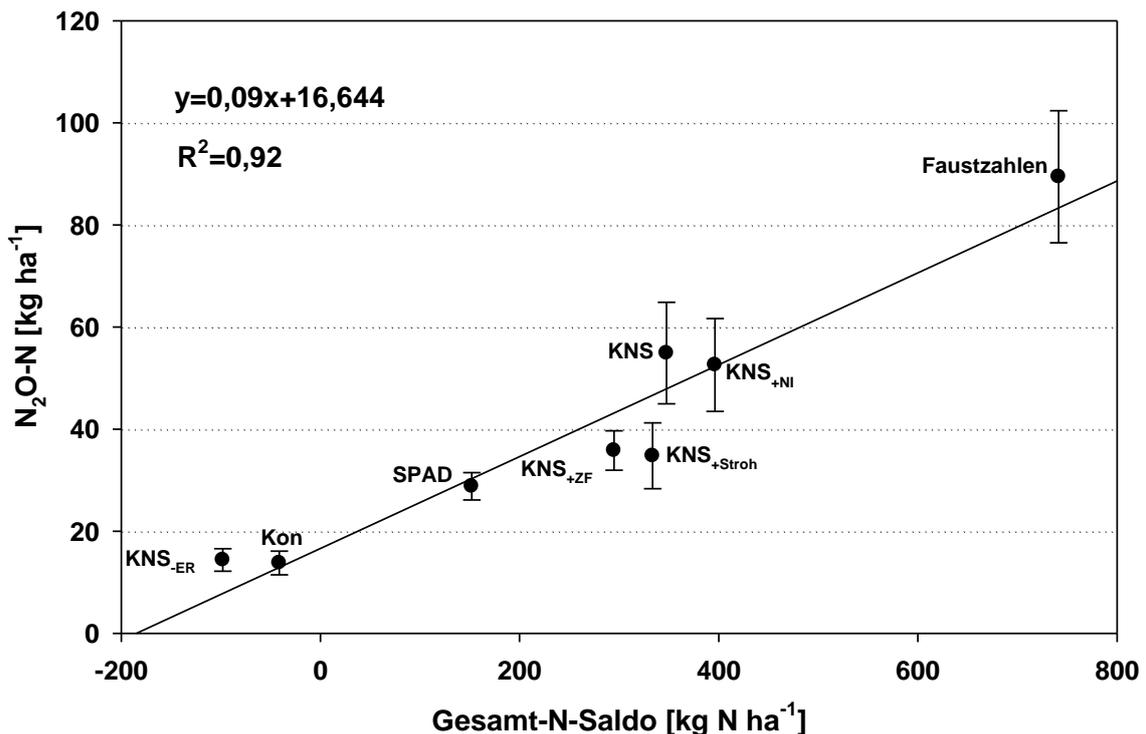


Abb. 10: Zusammenhang zwischen N-Saldo und N₂O-Emission am Standort Hohenheim für den Zeitraum 20.04.2012 bis 31.03.2014 (Mittelwerte ± Standardfehler).

3.1.5 Ergebnisse der Erhebungen in der Nachkultur am Standort Hohenheim

Im Frühjahr 2014, nach Abschluss der Freiland-Gasmessungen, wurde auf dem Gemüseschlag in Hohenheim ungedüngter Sommerweizen angebaut. Ziel dabei war es, die N-Bereitstellung des Bodens (Rest-N_{min} + N-Nachlieferung) anhand der Entwicklung der Folgekultur sowie an N_{min}-Werten abzuschätzen.

Die gemessenen SPAD-Werte lassen Rückschlüsse auf den „Grünwert“ der Pflanzen und somit auf die N-Versorgung zu. Die N-Immobilisierung durch Stroh-Zusatz, sowie der N-Entzug über die Erntereste führten sehr wahrscheinlich zu einem geringeren N-Angebot für den anschließend kultivierten Weizen und somit zu niedrigeren SPAD-Werten. Bemerkenswert war hierbei, dass die KNS_{Piadin}-Variante bis zu diesem Zeitpunkt der SPAD-Messung vergleichsweise wenig N zur Verfügung gestellt hatte. Die vier Varianten mit den höchsten SPAD-Werten unterschieden sich damit von der Kontrollvariante, welche während des gesamten Versuchszeitraums keine N-Düngung erhalten hatte. Sowohl durch die Verwendung von DMPP (KNS_{NI}), als auch durch die

Ergebnisse

verzögerte Einarbeitung der Ernterückstände (KNS_{VE}) ergaben sich SPAD-Werte entsprechend dem Niveau der maximalen N-Dünge-Variante (Faustzahlen).

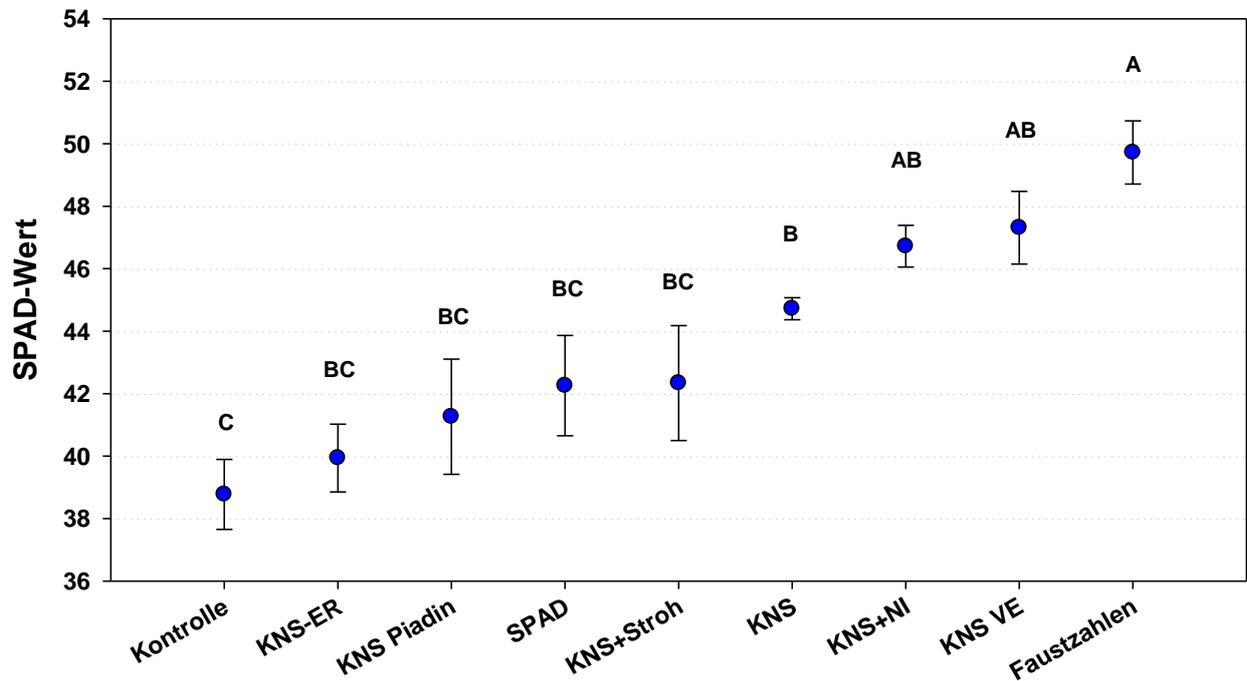


Abb. 11: Mittlere SPAD-Werte (\pm Standardfehler) der Nachkultur (Sommerweizen) im Frühjahr 2014. Die Pflanzen befanden sich in EC 25 (Ende der Bestockung). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (Student-Newman-Keuls Test, $p < 0,05$).

Die höchsten Biomasseerträge zum Schossbeginn wiesen die drei Varianten „ KNS_{VE} “, „Faustzahlen“ und „ KNS_{NI} “ auf (Abbildung 12). Alle weiterhin untersuchten Behandlungen unterschieden sich nicht im Biomasseaufwuchs.

Ergebnisse

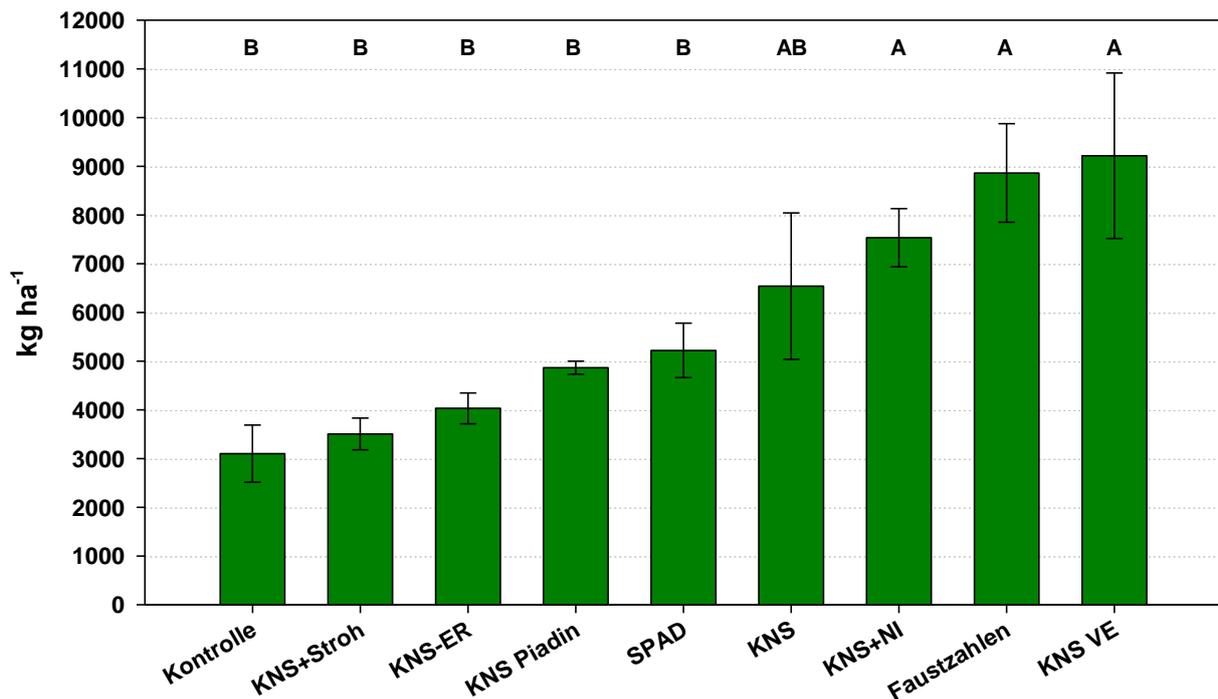


Abb. 12: Mittlere oberirdische Biomasse (\pm Standardfehler) von Sommerweizen (22.05.2014) in Abhängigkeit von Vorbehandlung. Verschieden Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (Student-Newman-Keuls Test, $p < 0,05$).

3.2 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse am Standort Speyer

3.2.1 Zeitliche Dynamik der N₂O-Freisetzung am Standort Speyer

Betrachtet man die Dynamik der N₂O-Freisetzung am Standort Speyer (Rinkenbergerhof) im Vergleich zum Standort Hohenheim (Abb. 2 und 3), so wird das insgesamt niedrigere Emissionsniveau ersichtlich (Abb. 13). Die höchsten N₂O-Flussraten wurden mit ca. 1150 $\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ in der „KNS“-Variante gemessen. Dieser Peak trat, mit Ausnahme der ungedüngten Kontrolle sowie der „KNS-ER“-Variante, in allen Behandlungen Ende Juni nach der Einarbeitung von Salaternterückständen in Kombination mit starken Regenfällen auf. Im Gegensatz zum Standort Hohenheim reagierte der Standort Speyer i.d.R. auf die N-Düngungsmaßnahmen mit leicht erhöhten N₂O-Emissionen. Vor allem jedoch im Winter waren die N₂O-Flüsse deutlich niedriger als am Standort Hohenheim. Die höchsten N₂O-Flussraten lagen hier mit ca. 1200 $\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ um Faktor 14 unter denen des Hohenheimer Standorts (vgl. Abb. 2 und 3).

Ergebnisse

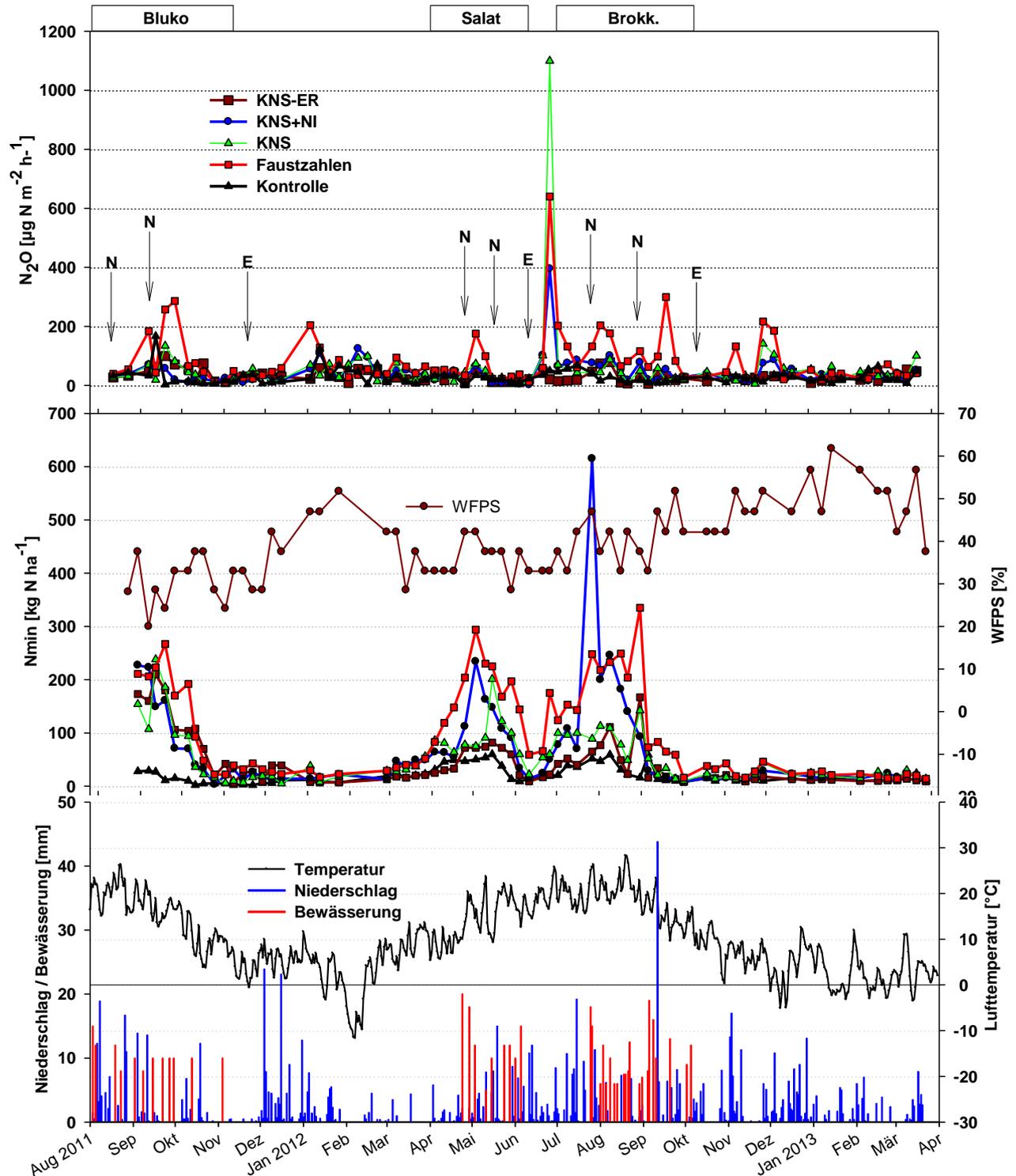


Abb. 13: Mittlere N_2O -Flussraten ($n=4$) in Abhängigkeit der N-Managementmaßnahmen (obere Abb.), N_{\min} -Gehalte und über alle Behandlungen gemittelte Wassergehalte in 0-30 cm Tiefe (mittlere Abb.) sowie mittlere Tagestemperatur (Luft in 2 m Höhe), Tagesniederschlag und Beregnung (untere Abb.).

Ergebnisse

3.2.2 Kumulative N₂O-Emissionen am Standort Speyer

In Abbildung 14 sind die kumulativen N₂O-Emissionen vom Standort Speyer dargestellt. Die N₂O-Emissionen schwankten zwischen 4,8 kg N₂O-N ha⁻¹ in der Kontrollvariante und 13 kg N₂O-N ha⁻¹ in der „Faustzahlen“-Variante. Bei Betrachtung der Anteile von Sommer- und Winteremissionen fällt auf, dass die Winteremissionen im Gegensatz zu denen des Standorts Hohenheim (Abb. 4), einen geringeren Anteil ausmachten. Die Winteranteile der N₂O-Emissionen über den gesamten Versuchszeitraum variierten in Speyer zwischen 41 und 52 %.

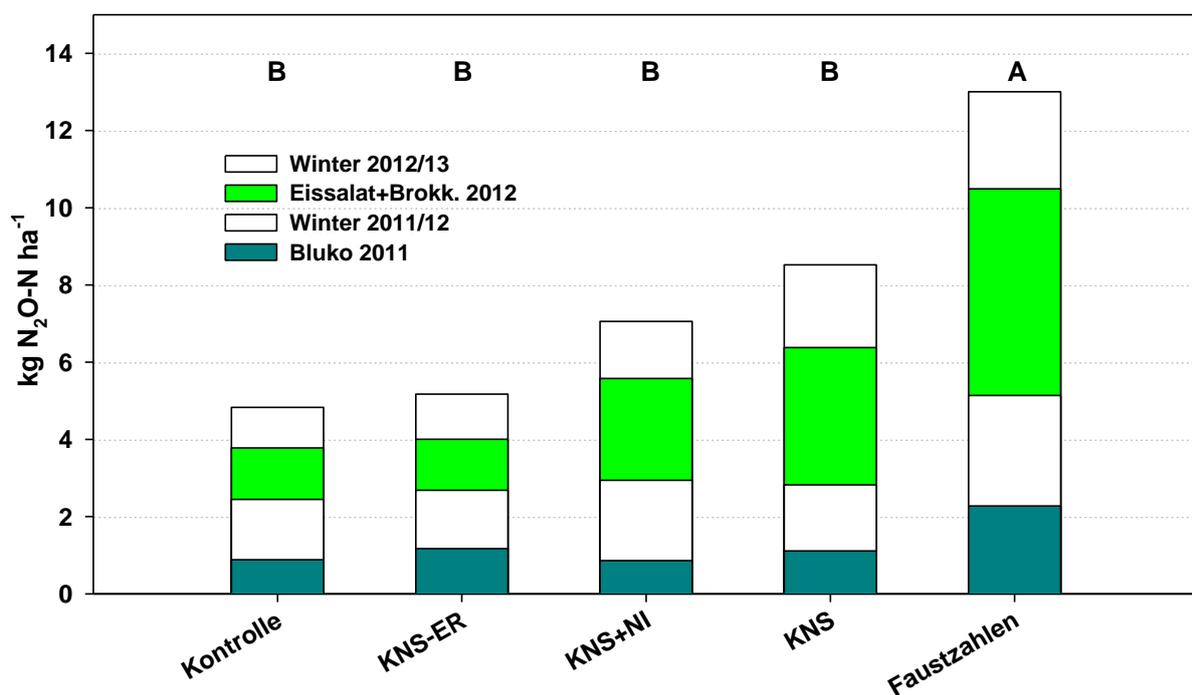


Abb. 14: Mittlere kumulative N₂O-Emissionen (n=4) in Abhängigkeit der Behandlung am Standort Speyer (03.08.2011-31.03.2013). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (Student-Newman-Keuls Test, p<0,05).

Über den gesamten Messzeitraum konnten, mit Ausnahme der „Faustzahlen“-Variante, keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen am Standort Speyer nachgewiesen werden.

Aus Abbildung 14 geht hervor, dass die Reduktion der N-Düngemenge von Pflanzenbedarf plus Sicherheitszuschlag (Faustzahlen) auf Pflanzenbedarf minus N_{min} (KNS) eine deutliche Minderung der N₂O-Emissionen zur Folge hatte. Dieser Effekt konnte auch auf dem Hohenheimer Standort festgestellt werden (vgl. Abb. 4). Dieses

Ergebnisse

Ergebnis deckt sich mit Messungen von Ruser et al. (2009) die durch eine weitere Reduktion der N-Düngung vom Niveau der „KNS“-Behandlung ausgehend keine weitere N₂O-Minderung erreichen konnten, auch in ihrem Fall unterschieden sich die Emissionen aller Behandlungen (Ausnahme „Faustzahlen“) nicht von den Emissionen der ungedüngten Kontrolle.

Die Applikation des Nitrifikationshemmstoffs DMPP zeigte keinen Effekt auf die kumulativen N₂O-Emissionen (Abb. 14). Dies entspricht sowohl den Beobachtungen am Hohenheimer Standort (vgl. Abb. 4) als auch den Ergebnissen der Messungen von Ruser et al. (2009) am Rinkenbergerhof.

Durch den kontinuierlichen Entzug der Erntereste konnte am Standort Speyer keine gesicherte Minderung der N₂O-Emissionen erreicht werden. Im Mittel waren die Emissionen dieser Behandlung jedoch nur unwesentlich höher als in der „Kontrolle“ bzw. um 3,3 kg N₂O-N geringer als in der „KNS“-Variante, was abermals auf den wichtigen Einfluss der verfügbaren organischen Substanz hinweist. Insofern decken sich die Ergebnisse der N₂O-Messungen am Standort Rinkenbergerhof abermals mit den Ergebnissen des Hohenheimer Standorts „Heidfeldhof“ (vgl. Kap. 3.1.2.2).

N₂O-Emissionen im Standortvergleich: lehmiger Boden am Standort Heidfeldhof versus sandigen Boden am Standort Rinkenbergerhof

Aus Abbildung 15 geht hervor, dass am Standort Hohenheim (Heidfeldhof) trotz nahezu identischer Bewirtschaftung (N-Düngung, Pflanztermine etc.) im selben Zeitraum deutlich mehr N₂O emittiert wurde, und dass die Standortsunterschiede bei allen Versuchsvarianten statistisch signifikant waren. Daraus kann abgeleitet werden, dass die beiden Standorte über unterschiedlich große Potentiale zur N₂O-Freisetzung verfügen. Demnach wäre das absolute N₂O-Minderungspotenzial durch N-Managementmaßnahmen umso größer, je größer das Potential zur N₂O-Freisetzung ist. In einem zweijährigen Feldversuch am Standort Hohenheim wiesen Pfab et al. (2012) nach, dass die N₂O-Emissionen durch den Einsatz von DMPP in jedem der beiden Versuchsjahre um ca. 40% gesenkt werden konnten, obwohl die Gesamtemissionen in diesen beiden Versuchsjahren um Faktor 2 differierten.

Ergebnisse

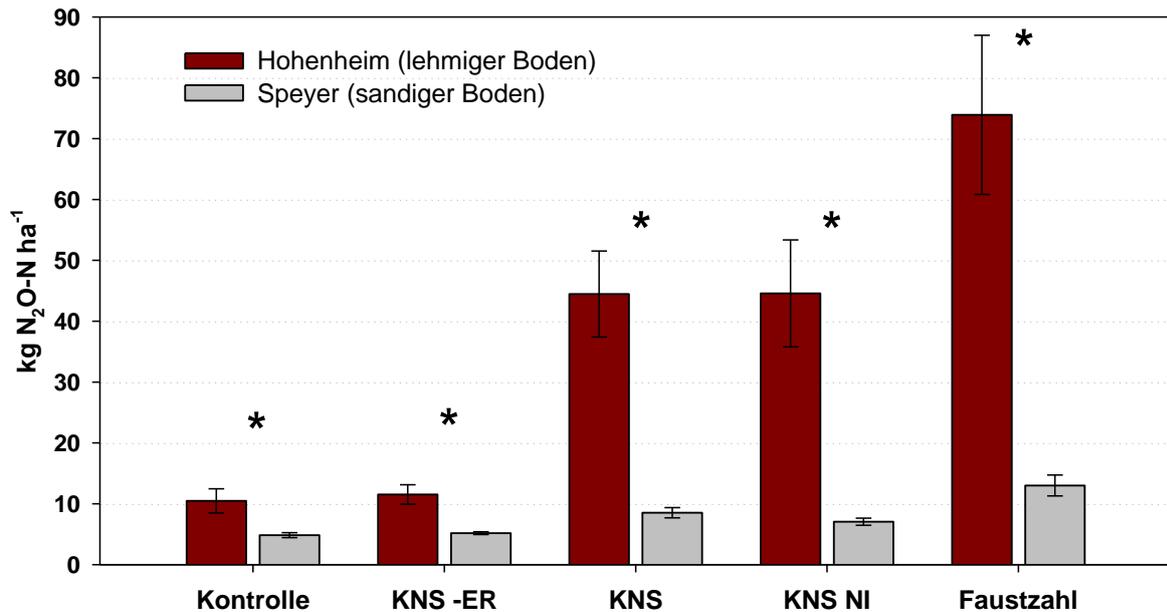


Abb. 15: Mittlere kumulative N₂O-Emissionen ±Standardfehler in Abhängigkeit vom Versuchsstandort für den Zeitraum 01.08.2011-31.03.2013 (20 Monate). Sterne markieren statistisch signifikante Standortsunterschiede (t-Test, p<0,05, n=4).

Die in der folgenden Abbildung 16 dargestellten Wassergehalte der beiden Versuchsstandorte zeigen, dass der sandige Boden in Speyer aufgrund seiner leichten Textur und der damit verbundenen geringen Wasserhaltekapazität, den Schwellenwert für eine erhöhte N₂O-Freisetzung durch Denitrifikation nicht erreichte. Dieser Schwellenwert entspricht etwa der Feldkapazität und wurde für Grünlandböden von De Klein und Van Logtestijn (1996) sowie aus den Daten von Ruser et al. (2001) für Ackerböden empirisch ermittelt. Somit kann für den Versuchsstandort Rinkenbergerhof als Forderung abgeleitet werden, dass die Effizienz von N-Managementmaßnahmen auf sandigen Standorten vor allem auf Basis der Minderung der Nitratausträge bewertet werden sollte. Die ständig gute Belüftung dieses Bodens führt dazu, dass die N₂O-Emissionen, mit Ausnahme einer starken Überdüngung, nicht auf N-Managementmaßnahmen ansprechen.

Ergebnisse

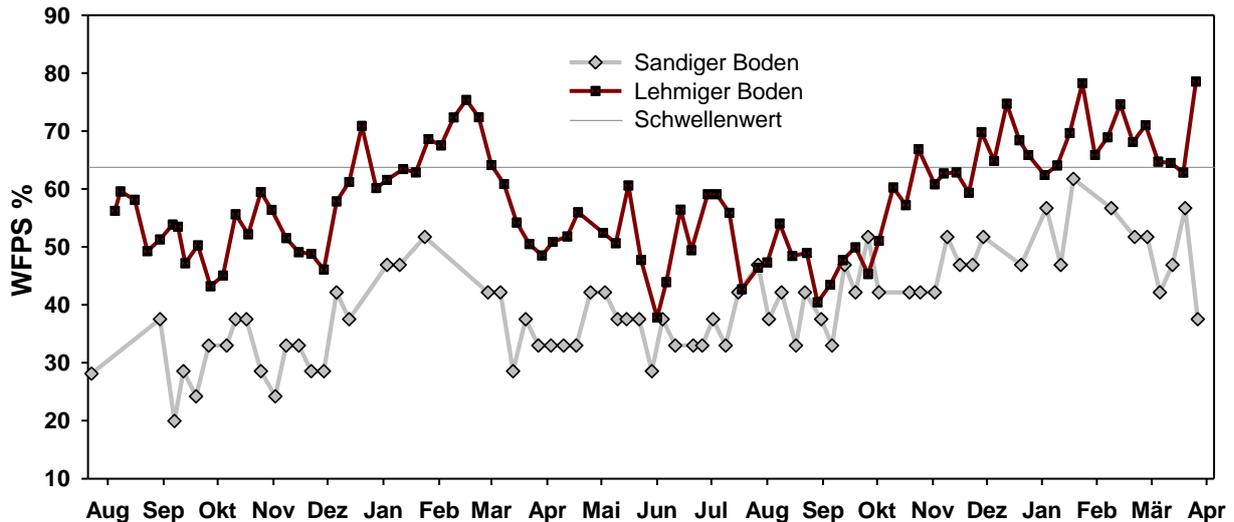


Abb. 16: Wassergehalte im Oberboden (0-30cm) an den beiden Versuchsstandorten Heidfeldhof (Hohenheim) und Rinkenbergerhof (Speyer) im Versuchszeitraum 23.07.2011-27.03.2013. Dargestellt sind jeweils Mittelwerte über alle Versuchsbehandlungen. Bei ca. 63% WFPS ist der Schwellenwert markiert, oberhalb dessen stark erhöhte N_2O -Emissionen auftreten können (abgeleitet aus Ruser et al., 2001).

Im Gegensatz zum Rinkenbergerhof traten am Heidfeldhof in Hohenheim, trotz der geringeren Bewässerung, deutlich höhere Wassergehalte auf (Abb. 18). Die lehmige Textur dieses Bodens bedingt eine hohe Wasserhaltekapazität, welche zu entsprechend anaeroben Bedingungen nach Niederschlägen, Beregnung oder nach Einarbeitung von frischer organischer Substanz führte. Diese begünstigten die Denitrifikation und somit die N_2O -Freisetzung. Die teils um ca. 80 kg N ha^{-1} höheren Nitratgehalte (30-90cm vgl. Abb. 8) der „Faustzahlen“-Behandlung gegenüber der „KNS“-Variante belegen, dass auch auf diesem schwereren Standort eine Nitratverlagerung während des Versuchs stattfand und die Wirksamkeit der Maßnahmen auch auf diesem Standort anhand der Nitratverlagerung bewertet werden muss. Allerdings muss hier auch die Wirkung der Maßnahmen auf die N_2O -Freisetzung mitberücksichtigt werden, da sie viel deutlicher ausdifferenzierte als am Standort Rinkenbergerhof.

3.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Beurteilung der einzelnen untersuchten Varianten im Gesamtkontext

- N-Düngung nach Faustzahlen (Pflanzenbedarf plus Sicherheitszuschlag):

Durch N-Düngung mit Pflanzenbedarf plus Sicherheitszuschlag wurden durchweg voll marktfähige Gemüseerträge produziert. Im Frühjahr 2013 zeigten zirka acht Wochen alte Blumenkohlpflanzen eine stärkere Grünfärbung und optisch beurteilt mehr Biomasse in Aufwuchs als Pflanzen die mit weniger N gedüngt wurden. Dies war sicherlich die Folge einer witterungsbedingt verspäteten zweiten N-Düngung, die bei den optimal gedüngten Pflanzen (KNS) zu einer vorübergehenden N-Unterversorgung geführt hat. Die Erträge der später marktfähigen Pflanzen unterschieden sich jedoch nicht. Dauerhafte Anwendung dieser N-Düngestrategie führte zu hohen N-Überschüssen im Boden und damit verbunden zu hohen N_2O -Verlusten ($91 \text{ kg } N_2O-N \text{ 32 Monate}^{-1}$) und zu Nitratauswaschung.

- N-Düngung nach kulturbegleitendem N_{\min} -Sollwert-System (KNS):

Gemäß den in diesem Teilprojekt erhobenen Daten erwies sich dieses Verfahren für die praktische Anwendung im Gemüsebau als sehr geeignet. Die Pflanzen wurden optimal mit N versorgt. Es konnten keine Einbußen hinsichtlich Gemüseertrag und Produktqualität beobachtet werden. Gleichzeitig wurden die N_2O -Emissionen und der N-Saldo gegenüber einer höher gedüngten Variante abgesenkt.

- Anwendung des Nitrifikationshemmstoff 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (KNS_{NI}):

Innerhalb dieser Studie konnte kein zusätzlicher Nutzen, aber auch kein Nachteil, durch die Anwendung von DMPP verbunden mit einmaliger N-Gabe anstatt Dünge-Splitting festgestellt werden. N-Salden, Produktqualitäten und Gasemissionen entsprachen weitestgehend der Variante ohne DMPP-Zusatz. Dies gilt für beide untersuchten Standorte gleichermaßen. Da auch in der niedriger gedüngten „SPAD“-Variante keine Ertragseinbußen ermittelt wurden, scheint es sinnvoll, bei der N-Düngeberechnung bei NI-Anwendung einen Abschlag größer des aktuellen N_{\min} anzusetzen.

- Stroh-Zusatz vor Winter (KNS_{+Stroh})

Durch Applikation von Häckselstroh (2 kg m^{-2}) vor Winter konnte hinsichtlich der N_2O -Emission eine tendenzielle Minderung beobachtet werden. Der Zusatz von

Ergebnisse

Stroh erbrachte keinen merklichen Effekt auf die N-Salden. Innerhalb dieser Variante konnte eine zeitversetzte nicht vorhersehbare erhöhte N-Mineralisierung festgestellt werden. Um diese für den Pflanzbestand und hinsichtlich der N-Bilanz nutzbar machen zu können, muss entweder N_{\min} oder Pflanzen-N-Status regelmäßig überwacht werden, um die resultierende N-Nachlieferung auf eine zeitnah geplante N-Düngung anrechnen zu können.

- Anbau einer Winterzwischenfrucht (KNS_{+ZF})

Durch Anbau einer Winterbegrünung (Getreide) zu Anfang Herbst wurde eine tendenzielle Minderung der N_2O -Emission beobachtet. Auch wurde einmalig eine tendenzielle Ertragsteigerung in der Folgekultur (Blumenkohl 2013) im anschließenden Frühjahr beobachtet. Auf die N-Salden konnte dabei keine Auswirkung festgestellt werden. Die Winterzwischenfrucht wurde hier vergleichsweise spät ausgesät (Ende Oktober). Daraus resultierte jeweils ein relativ schwach entwickelter Pflanzbestand vor Winter. Dies könnte eine Verminderung des zu erwartenden Effekts zur Folge gehabt haben.

- Weitere Reduktion der bereits angepassten N-Düngermenge (KNS) mit Option auf Nachdüngung (SPAD)

Diese Maßnahme war durch tendenziell geringere N_2O -Emissionen gekennzeichnet und wirkte sich senkend auf den N-Saldo aus. Dies war bei stabilem Ertragsniveau möglich, jedoch war die Grünfärbung bei Kohlpflanzen optisch erkennbar wiederholt leicht abgeschwächt. Diese Maßnahme kann nur für Standorte mit erhöhtem N-Nachlieferungspotential bei gleichzeitiger Möglichkeit zur Überwachung des Pflanzen-N-Status und Möglichkeit zu bedarfsbedingter N-Nachdüngung, empfohlen werden.

- Entfernen der oberirdischen Ernterückstände (KNS_{-ER})

Durch das kontinuierliche Entfernen der Ernterückstände wurde innerhalb dieser Studie die mit Abstand größte N_2O -Minderung erreicht. Die Emissionen entsprachen denen einer ohne N-Düngung geführten ‚Kontroll‘-Variante. Die Anwendung dieser Maßnahme führte in jedem Fall zu einer signifikanten Reduktion des N-Saldos, wobei Produktqualität und Ertragsniveau absolut stabil blieben. Ein weiterer Vorteil dieser Maßnahme war eine tendenzielle Absenkung des N_{\min} vor Winter, sodass damit auch einer übermäßigen Nitratverlagerung während eines Brache-Zeitraumes vorgebeugt

Ergebnisse

werden konnte. Vor allem bei Schwarzbrache über Winter erwies sich diese Maßnahme damit als sehr wirkungsvoll zur Verlustminimierung. Vorteile dieser Maßnahme sind eine abgesenkte N-Bilanz, verminderte Treibhausgasemissionen und ein geringeres Risiko für N-Verlagerungen. Das Entfernen der Ernterückstände ist als besonders sinnvoll hinsichtlich der Gesamt-N-Problematik einzustufen, wenn dies nach Anbau eines Starkzehrers (Gemüse-Kategorie III) mit anschließender Brache einhergeht. Allerdings sollten die Humusgehalte des Bodens bei Abfuhr der Erntereste kontrolliert und ggf. durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. den Anbau von Zwischenfrüchten, stabilisiert werden.

Schlussfolgerungen

Auf Böden mit leichter Textur scheint die angepasste N-Düngung (KNS) adäquat, um Gemüseerträge zu sichern und dabei gasförmigen N-Verlusten (N_2O) in die Umwelt zu vermindern. Auf solchen Böden sollte speziell der Nitratverlagerung Aufmerksamkeit zukommen, da die geringere Wasserhaltekapazität des Bodens diesen Verlustpfad begünstigen könnte.

Die Abfuhr der Ernterückstände empfiehlt sich immer dann, wenn hohes Risiko für N-Verluste zu erwarten ist, wie z.B. vor längeren Brache-Zeiträumen, und /oder der N-Saldo deutlich abgesenkt werden soll.

Auch auf Lehmböden ist der Praktiker mit der angepassten N-Düngung (KNS) auf der sicheren Seite, was Ertrag und Produktqualität angeht. Gleichzeitig wird damit das Risiko für N_2O -Verluste merklich abgesenkt. Auf Grund des höheren Wasserhaltevermögens des schwereren Bodens und des damit verbundenen höheren Denitrifikationspotentials zeigen die N-Managementmaßnahmen eine effektivere N_2O -Minderung. Das Integrieren einer dieser Maßnahmen (vgl. Kap. 2.2) lässt in der Regel mindestens tendenzielle Effekte hinsichtlich N-Konservierung und N-Verlust-Minderung erwarten. Neben dem stark absenkenden Effekt auf den N-Saldo, kann die Maßnahme „Abfuhr der Ernterückstände“ auf mittelschweren Standorten als effektivste Maßnahme zur Reduktion von N_2O und vorbeugende Maßnahme gegen N-Verlagerung angesehen werden.

4. Zusammenfassung

Hohe N-Einträge sowie die Rückführung von extrem C- und N-reichen Ernterückständen können beim Gemüsebau zu Nährstoffüberschüssen im Boden führen. Nährstoffüberschüsse, und insbesondere Nitrat, erhöhen das Risiko für N-Verluste in benachbarte Umweltkompartimente wie Luft und Grundwasser.

Ziele der vorliegenden Arbeit waren die Beurteilung von praxisrelevanten N-Managementmaßnahmen hinsichtlich ihres N₂O-Minderungspotentials. Daneben sollte der Einfluss von zwei stark unterschiedlichen Bodentexturen (Sandboden gegenüber Lehmboden) auf die N₂O-Emission aus gemüsebaulich genutzten Flächen quantifiziert werden. Überdies sollte eine Einschätzung der Größenordnung von N₂-Verlusten über den Pfad der Denitrifikation durch Bodeninkubation gemacht werden. Weiterhin wurde der mineralische Stickstoff im Boden in 0-90 cm Tiefe bestimmt, um die Nitratverlagerungen zu bestimmen.

Die Untersuchungen wurden auf zwei identisch bewirtschafteten Versuchsstandorten durchgeführt. Ein Standort war ein lehmiger Acker auf der Filderebene nahe Stuttgart, der zweite Standort lag auf sandigen Terrassenschottern des Rheins nahe Speyer. Auf dem Hohenheimer Standort wurden die Spurengasuntersuchungen über 32 Monate hinweg durchgeführt, in Speyer über 20 Monate. Dabei wurden in Hohenheim die folgenden Behandlungen untersucht: keine N-Düngung (Kontrolle), N-Düngung nach KNS, Einsatz eines Nitrifikationshemmstoffs, Abfuhr der Erntereste, N-Düngung nach Faustzahlen, und weiterhin Immobilisierung des mineralischen N im Herbst durch Strohzugabe, reduzierte N-Düngung kombiniert mit Kontrolle des N-Status des Pflanzenbestands mittels Sensor, Anbau einer Winterzwischenfrucht. Am Standort Speyer wurden die ersten fünf der oben genannten Maßnahmen getestet.

In mindestens wöchentlichem Abstand wurden Spurengasproben im Feld entnommen. Parallel dazu wurden wichtige Steuergrößen wie mineralischer N-Gehalt des Oberbodens, Bodenwassergehalte und Klimadaten erhoben. Zur Abschätzung der N₂-Verluste wurden wöchentlich feldfrische Bodenmonolithe mit der Acetylen-Inhibierungsmethode inkubiert.

Zusammenfassung

Die N₂O-Flussraten erreichten auf dem Hohenheimer Standort Maxima von bis zu 17200 µg N₂O-N m⁻² h⁻¹, während auf dem sandigen Standort in Speyer 1200 µg N₂O-N m⁻² h⁻¹ nicht überschritten wurde. Generell traten stark erhöhte Flussraten nach Einarbeitung von Pflanzenmaterial und auch bei Frost/Tau-Ereignissen auf. N-Dünger-Applikation alleine löste meist nur leicht erhöhte N₂O-Flussraten aus. Bei den kumulativen N₂O-Emissionen des Standortvergleichs zeigte der lehmige Boden in Hohenheim aufgrund der höheren Wassergehalte höhere kumulative N₂O-Emissionen auf als der Sandboden in Speyer. Während der 20 Monate des Standortvergleichs emittierten in Hohenheim zwischen 10,5 (ohne N-Düngung) und 73,9 kg N₂O-N ha⁻¹ bei maximaler N-Düngeintensität, die korrespondierenden Emissionen in Speyer schwankten zwischen 4,8 und 13 kg N₂O-N ha⁻¹. Der Anteil der Emissionen außerhalb der Vegetationsperiode lag in Hohenheim aufgrund extrem hoher N₂O-Verluste in einem der drei Versuchswinter bei 75 % (32 Monate). In Speyer lag dieser Anteil wegen des geringeren Emissionspotentials bei 46 % (20 Monate). In Hohenheim wurde eine sehr große inter-annuelle Variabilität festgestellt, hier waren die Emissionen im zweiten Versuchsjahr im Mittel um das 4-fache höher als im dritten Versuchsjahr.

Auf beiden Standorten konnte durch Reduktion der N-Düngemenge von Pflanzenbedarf plus Sicherheitszuschlag auf Pflanzenbedarf minus N_{min} eine gesicherte Minderung der N₂O-Freisetzung erzielt werden. Auf dem lehmigen Standort in Hohenheim zeigten N-Managementmaßnahmen wie weitere N-Dünger-Reduktion, Stroh-Addition vor Winter und Winterbegrünung jeweils Tendenzen zur weiteren Absenkung der N₂O-Verluste gegenüber ‚KNS‘-Variante. Es konnte kein Effekt des Nitrifikationshemmstoffs auf die N₂O-Emission festgestellt werden. Nur die kontinuierliche Abfuhr der Erntereste führte zu einer statistisch gesicherten Reduktion des emittierten N₂O auf das Basis-Niveau einer ohne N-Düngung geführten Kontroll-Variante.

Stark positive Korrelationen mit den N₂O-Flüssen wurden in Hohenheim für die CO₂-Emission ganzjährig, für die Wassergehalte im Sommerzeitraum und für Nitrat im Winterzeitraum gefunden. Vor allem die hoch signifikante Beziehung der N₂O-Emissionen mit den CO₂-Flüssen deutet auf eine zeitweilige C-Limitierung der N₂O-Produktion hin und unterstreicht somit die Bedeutung der Abfuhr der Erntereste als N₂O-Quelle.

Zusammenfassung

Mangels Korrelation mit den Felddaten konnten die Ergebnisse aus dem Inkubationsversuch nicht zur Abschätzung der Feld-N₂-Verluste verwendet werden. Die im Labor gemessenen N₂:N₂O-Verhältnisse (Mai 2012 - März 2014) betragen im Mittel 1,3 für die ersten 15 Monate vor einer Erhaltungskalkung und 7,7 für die acht Monate danach bis zum Versuchende.

Auf dem Hohenheimer Standort wurde vom 10.04.2013 bis zum nächsten Beprobungstermin am 06.08.2013 ein deutlicher Anstieg der N_{min}-Werte festgestellt. Dieser belief sich in der Bodentiefe 30-60 cm von im Mittel 43 auf 119 kg N ha⁻¹ und in 60-90 cm von 18 auf 49 kg N ha⁻¹. Diese N-Verlagerung war sehr wahrscheinlich die Folge des nasskalten Fröhsommers 2013 mit mehrfach Starkregen und 250 mm Gesamtniederschlag im Zeitraum vom 15.05.2013 bis zum 30.07.2013.

5. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; ggf. mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen

Ein Ziel des Projekts war die Messung der Spurengasfreisetzung in Abhängigkeit der N-Managementmaßnahmen, die zu Beginn der Antragstellung des Konsortialantrags Hannover/Großbeeren/Speyer definiert wurden. Der Einfluss dieser Maßnahmen auf die Spurengasflüsse war weitgehend unklar. Hier wurden wegen der mitunter hohen Winteremissionen zwei ganzjährige Messdatensätze anvisiert.

Die Hohenheimer Feldmessungen beinhalteten ursprünglich acht vorgegebene Behandlungen die letztlich über einen Zeitraum von 32 Monaten gemessen wurden. Im Gegensatz zu den im Antrag geplanten zwei weiteren Behandlungen wurden fünf weitere Behandlungen im Laufe des Projekts in den Parzellenversuch mit integriert.

Ein Ziel im Hohenheimer Teilprojekt war es, den Einfluss der Bodenart zu quantifizieren. Deshalb wurden fünf ausgewählte Versuchsbehandlungen des Hohenheimer Versuchs zeitgleich am Speyerer Standort realisiert. In Speyer wurden die Spurengasflüsse über 20 Monate hinweg gemessen.

Als weiteres Ziel wurde angestrebt, die N₂O-Flüsse mit Hilfe des Umweltsimulationsprogramms „Expert-N“ modelmäßig zu beschreiben und Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen mittels Simulation abzuleiten, die im letzten Versuchsjahr in das Feldprogramm integriert werden sollten.

Für die Modellierung und vor allem für die Implementierung der Wachstumsmodelle von Gemüsepflanzen war dem Hohenheimer Teilprojekt Unterstützung von der AG Priesack am Helmholtz-Zentrum München zugesagt. Dabei sollten die von der AG Finck/Nett am IGZ Großbeeren entwickelten Wachstumsmodelle in das Umweltmodell „Expert-N“ implementiert werden. Es stellte sich heraus, dass die Implementierung deutlich zeitaufwendiger sein würde als geplant. Deshalb konnte die AG Priesack diesen Mehraufwand nicht umsetzen. Da sich mittlerweile interessante Maßnahmenkombinationen aus den ersten Feldergebnissen herauskristallisierten, wurden diese in den Feldversuch in Hohenheim mitaufgenommen und auf die Fortsetzung der Modellierungsarbeiten in München verzichtet.

Ursprüngliche Ziele und tatsächlich Erreichtes

Ein letztes Ziel des Projekts war die Etablierung der Acetylen-Inhibierung zur Abschätzung der denitrifikativen N_2 -Freisetzung. Die Acetyleninhibierung wurde als Laborinkubation am Institut etabliert, seit Mai 2012 wurden zu jedem Feldtermin in Hohenheim auch Bodenmonolithe aus ausgewählten Versuchsbehandlungen mittels Stechzylindern entnommen, um die N_2 -Freisetzung während der Denitrifikation zu ermitteln. Aufgrund der großen Streuung der N_2O - und N_2 -Flüsse dieser Monolithe wurde die Anzahl an Messwiederholungen verdoppelt. Mit Hilfe der Ergebnisse gelang es, einen Erklärungsansatz für die großen Unterschiede der N_2O -Freisetzung zwischen den Versuchsjahren zu formulieren. Allerdings hat sich gezeigt, dass das im Labor ermittelte N_2/N_2O -Verhältnis nicht auf die Freilandmessungen übertragen werden kann. Die resultierenden N_2 -Verluste waren unrealistisch hoch. In diesem Zusammenhang scheinen weiterführende Untersuchungen angebracht, die die N_2 -Freisetzung mit Hilfe stabiler Isotope direkt im Freiland quantifizieren.

6. Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Statistik (2011) 10.11.2014: https://www.statistik.bayern.de/presse/archiv/2011/365_2011.php: Gemüseernte in Bayern 2011.
- Bouwman, A. F. (1996) Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 46, 53-70.
- Crutzen, P.J. (1981) Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen including nitrous oxide. In: Delwiche, C.C. (Ed.): *Denitrification, Nitrification and Atmospheric N₂O*. John Wiley & Sons, Chichester, 17-44.
- De Antoni Migliorati M., Scheer C., Grace P.R., Rowlings D.W., Bell M., McGree J. (2014) Influence of different nitrogen rates and DMPP nitrification inhibitor on annual N₂O emissions from a subtropical wheat-maize cropping system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 186: 33-43.
- De Klein, C.A.M., Van Logtestijn, R.S.P. (1996) Denitrification in grassland soils in the Netherlands in relation to irrigation, N-application rate, soil water content and soil temperature. *Soil Biol. Biochem.* 28, 231-237.
- De Ruijter F.J., Ten Berge H.F.M., Smit A.L. (2010) The fate of nitrogen from crop residues of broccoli, leek and sugar beet. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 86, 241-253.
- Decock C. (2014) Mitigating nitrous oxide emissions from corn cropping systems in the midwestern U.S.: Potential and data gaps. *Environ. Sci. Technol.* 48, 4247-4256
- Flessa, H., Dörsch, P., Beese, F. (1995) Seasonal variation of N₂O and CH₄ fluxes in differently managed arable soils in southern Germany. *J. Geophys. Res.* 100, 23115-23124.
- Flessa, H., Wild, U., Klemisch, M. Pfadenhauer, J. (1998) Nitrous oxide and methane fluxes from organic soils under agriculture. *Eur. J. Soil Sci.* 49, 327-335.
- Groffman, P.M., Altabet, M.A., Bo, J.K., Butterbach-Bahl, K., David, M.B., Firestone, M.K., Giblin, A.E., Kana, T.M., Nielsen, L.P., Voytek, M.A. (2006) Methods for measuring denitrification: diverse approaches to a difficult problem. *Ecol. Applic.* 16, 2091–2122.
- Groffman, P.M., Holland, E., Myrold, D.D., Robertson, G.P., Zou, X. (1999) Denitrification. Pages 272–288 in G. P.Robertson, C. S. Bledsoe, D. C. Coleman,

Literaturverzeichnis

- and P. Sollins (editors). *Standard Soil Methods for Long Term Ecological Research*. Oxford University Press, New York, New York, USA.
- Henault, C., Devis, X., Page, S., Justes, E., Reau, R., Germon, J.C. (1998) Nitrous oxide emissions under different soil and land management conditions. *Biol. Fertil. Soils* 26, 199-207.
- Hutchinson, G. L., Livingston, G. P. (1993) Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. *ASA Spec. Publ.*, 63-78. *Agricultural ecosystems effects trace gases and global climate change*. ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 7 A.D Climate Change (2007) *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland
- Kaiser, E. A., Kohrs, K., Kücke, M., Schnug, E., Heinemeyer, O., Munch, J. C. (1998) Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1553-1563.
- Kaiser, E. A., Munch, J.-C., Heinemeyer, O. (1996) Importance of soil cover box area for the determination of N₂O emissions from arable soils. *Plant Soil* 181, 185-192.
- Lan, T., Han, Y., Roelcke, M., Nieder, R., Cai, Z. (2013) Processes leading to N₂O and NO emissions from two different Chinese soils under different soil moisture contents. *Plant Soil* 371, 611-627.
- Liu, B., Mørkved, P.T., Frostegård, A., Bakken, L.R. (2010) Denitrification gene pools, transcription and kinetics of NO, N₂O and N₂ production as affected by soil pH, *FEMS Microbiol. Ecol.* 72, 407-417.
- McSwiney, C.P., Robertson, G.P. (2005) Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. *Glob. Change Biol.* 11, 1712-1719.
- Owens, L.B. (1990) Nitrate-nitrogen concentrations in percolate from lysimeters planted to a legume-grass mixture. *J. Environ. Qual.* 19: 131-135.
- Parkin, T.B. (1987) Soil microsites as a source of denitrification variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51, 1194-1198.
- Parkin, T.B. (1990) Characterizing the variability of denitrification. In Revsbech, N.P. and Sorensen, J. (Herausgeber): *Denitrification in soils and sediments*. Plenum Press New York, 213-227.

- Pfab H., Palmer I., Buegger F., Fiedler S., Müller T., Ruser R. (2011) N₂O fluxes from a Haplic Luvisol under intensive production of lettuce and cauliflower as affected by different N-fertilization strategies. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 545–553.
- Qu, Z., Wang, J., Almøy, T., Bakken, L.R. (2014) Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high N₂O/(N₂O+N₂) product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils. *Biol. Fert. Soils* 50, 1001-1007.
- Ruser, R., Flessa, H., Schilling, R., Beese, F., Munch, J.C. (2001) Effect of crop-specific field management and N fertilization on N₂O emissions from a fine-loamy soil. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 59, 177-191.
- Ruser, R., G. Gerl, M. Kainz, T. Ebertseder, H.J. Reents, H. Schmid, J.C. Munch, Gutser, R. (2008) Effects of the management system on N-, C-, P- and K-fluxes from FAM soils. Pp. 41-78 in Schröder, P., Pfadenhauer, J., Munch, J.C. (Editors) *Perspectives for Agroecosystem Management* Elsevier, Amsterdam
- Ruser, R., Müller, T., Armbruster, M., Wiesler, F. (2009) Lachgasfreisetzung eines ackerbaulich genutzten Bodens in der Vorderpfalz. *VDLUFA-Schriftenreihe* 65, 72-78.
- Ruser, R., Pfab, H., Palmer, I., Schulz, R., Müller, T., Fiedler, S. (2011) Verminderung direkter und indirekter N₂O Emissionen und NO₃⁻-Verluste durch gezieltes Bewirtschaftungsmanagement im intensiven Feldgemüsebau. *DBU-Abschlussbericht AZ 25420*.
- Ruser, R., Schulz, R. (2014) The effect of nitrification inhibitors on the N₂O release from agricultural soils – a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, *accepted*
- Scheffer / Schachtschabel (2010) *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010, S. 405, ISBN 978-3-8274-1444-1.
- Vitale L. , Ottaiano L., Polimeno F., Maglione G., Amato U., Arena C., Di Tommasi P., Mori M., Magliulo V. (2014) Effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate-added nitrogen fertilizers on crop growth and N₂O emissions in Southern Italy. *Plant Soil Environ.* 59, 517-523.
- Wiesler, F., Laun, N., Armbruster, M. (2008) Integriertes Stickstoffmanagement – eine Strategie zur wirksamen Verringerung der Gewässerbelastung im Gemüsebau. *Agrarspectrum* 41, 95-108.

Literaturverzeichnis

- Winkler, B. (2009) Räumliche und zeitliche Variabilität der N₂O-Emissionen im Feldgemüsebau. Bachelorthesis, Institut für Pflanzenernährung, Universität Hohenheim.
- Yuan, X. M. (2000) Nitrate nitrogen leaching and factors influencing. *Arid Zone Res.* 17, 46–52.
- Zaman, M., Nguyen, M.L. (2010) Effect of lime or zeolite on N₂O and N₂ emissions from a m. pastoral soil treated with urine or nitrate-N fertilizer under field conditions, *Agric. Ecosyst. Environ.* 136, 254-261.
- Zhu J.H., Li X.L., Christie P., Li J.L. (2005) Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 111, 70-80.
- Zsolnay, À. (2003) Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions. *Geoderma* 113, 187-209.

7. Anhang

7.1 Liste der Veröffentlichungen und Vorträge mit Projektbezug

2014

- **Posterbeitrag:** Seiz, P., Schulz, R., Müller, T., Ruser, R. (2014) Effect of measures to reduce N surpluses in vegetable production on N₂O emissions from a loamy soil in South Germany. P. 119 in Abstract book of Plant Nutrition, Halle, Germany.
- **Vortrag:** Seiz, P., Schulz, R., Müller, T., Ruser, R. (2014) Einfluss von N-Düngung und N-Managementmaßnahmen auf die N₂O-Emissionen und die N-Salden eines gemüsebaulich genutzten Lehmbodens in Süddeutschland. In Druck, in Kongressband VDLUFA-Tagung 2014, Stuttgart-Hohenheim, Deutschland.

2013

- **Posterbeitrag:** Seiz, P., Schulz, R., Heger, A., Armbruster, M., Wiesler, F., Müller, T., Ruser, R. (2013) Effect of N fertilizer amount, nitrification inhibitor and removal of harvest residues on N₂O emissions from a sandy and a loamy vegetable cropped soil. Pp. 106-107 in Book of abstracts of NEV 2013, Torino, Italy.
- **Vortrag:** Seiz, P., Schulz, R., Heger, A., Armbruster, M., Müller, T., Wiesler, F., Ruser, R. (2013) Einfluss von N-Düngung, Nitrifikationshemmstoff und Abfuhr der Ernterückstände auf die N₂O-Freisetzung zweier gemüsebaulich genutzter Böden. S. 174-181 in Kongressband VDLUFA-Tagung 2013, Berlin, Deutschland.
- **Posterbeitrag:** Ruser, R., Seiz, P., Schulz, R., Müller, T. (2013) Einfluss von Stroh-Applikation oder Entfernen der Ernterückstände auf die N₂O-Emission eines intensiv gemüsebaulich genutzten Bodens. 3 Seiten (DBG-Eprint) in Tagungsband der Deutschen bodenkundlichen Gesellschaft 2013, Rostock, Deutschland.

2012

- **Posterbeitrag:** Seiz, P., Schulz, R., Heger, A., Armbruster, M., Wiesler, F., Müller, T., Ruser, R. (2012) Effect of N-fertilizer amount and nitrification inhibitor on N₂O emissions from a sandy and a loamy soil under vegetable production. Pp. 74-75 in (Richards, K.G., Fenton, O., Watson, C.J., eds.): Proceedings of the 17th International Nitrogen Workshop - Innovations for Sustainable Use of Nitrogen Resources, Wexford, Ireland.

