

N-Stabilisierung und wurzelnahe Platzierung als innovative Technologien zur Optimierung der Ressourceneffizienz bei der Harnstoffdüngung

F&E-Verbundprojekt **StaPlaRes** (2016 - 2020)

Abschlussbericht

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Projektpartner

Martin-Luther-Universität Halle-
Wittenberg



LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN



SACHSEN-ANHALT

Landesanstalt für
Landwirtschaft und
Gartenbau



Leibniz-Zentrum für
Agrarlandschaftsforschung
(ZALF) e.V.



THÜNEN

TUM

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

skw.
PIESTERITZ

 **RAUCH**

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



Gemeinsamer fachlicher Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben "StaPlaRes"



Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: N-Stabilisierung und wurzelnahe Platzierung als innovative Technologien zur Optimierung der Ressourceneffizienz bei der Harnstoff-Düngung (StaPlaRes)		
Laufzeit des Vorhabens: 25. Juli 2016 bis 31. Dezember 2020		
Berichtszeitraum: 25.07.2016 bis 31.12.2020		
Zuwendungsempfänger:		Förderkennzeichen:
SKWP	SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH (Dr. Kreuter)	2818102115
TUM	Technische Universität München (Prof. Hülsbergen)	2818102315
MLU	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Prof. Christen)	2818102415
ZALF	Leibniz-Zentrum f. Agrarlandschaftsforschung (Prof. Augustin)	2818102615
TI	Thünen Institut (Dr. Stichnothe)	2818102715
LLG	Landesanstalt f. Landwirtschaft und Gartenbau (Dr. Tauchnitz)	2818102815
Rauch	Rauch Landmaschinenfabrik GmbH (Dr. Rauch)	2818102215
LfULG	Landesamt f. Umwelt, Landwirtschaft u. Geologie (Dr. Grunert)	2818102915
Zitationsvorschlag: <i>Kreuter T, Bischoff J, Rauch N, Eißner F, Rücknagel J, Kühling I, Schäfer F, Tauchnitz N, Simon A, Maidl FX, Hülsbergen KJ, Augustin J, Pamparin H, Stichnothe H, Mallast J, Thiel E, Grunert M, Böttcher F, Christen, O (2020). Das F&E-Vorhaben „StaPlaRes“ – ein Verbundprojekt im Rahmen der Innovationsförderung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Fachlicher Abschlussbericht der Verbundpartner, Cunnersdorf, 30 Juni 2021.</i>		

Vorwort

Der vorliegende fachliche Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben StaPlaRes entstand in enger und vertrauensvoller Zusammenarbeit aller Verbundpartner. Die Projektkoordination bedankt sich an dieser Stelle herzlich für die ausgesprochen professionelle, fachlich qualitätsvolle und ergebnisorientierte Zusammenarbeit innerhalb dieses großen Konsortiums.

Die fachlichen Inhalte der einzelnen Teilberichte liegen im Verantwortungsbereich der jeweiligen Verbundpartner.

In den Unterkapiteln des Kapitels 1 sind die separat durch jeden Verbundpartner erstellten fachlichen Abschlussberichte zu den Arbeitspaketen 1 bis 6 zusammengestellt. Die daran anschließenden Kapitel 2 bis 4 enthalten die obligatorischen Statements der Partner zur Aufgabenerfüllung. In den abschließenden Kapiteln 5 bis 7 wird detailliert auf die Verwertung der Ergebnisse eingegangen. In Kap. 7 findet sich als Bestandteil der Verwertung eine Liste von Publikationen und Vorträgen, in denen Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben thematisiert werden.

Zwischen den Daten in den folgenden Abschlussberichten der einzelnen Verbundpartner und den Daten in der ab 2022 öffentlich zugänglichen Datenbank „StaPlaRes-DB-Thuenen“ besteht nicht in allen Fällen eine vollständige Konformität. Abweichungen können z.B. infolge unterschiedlicher Berechnungs- und Auswertungsmethoden oder abweichender zeitlicher Betrachtungshorizonte entstanden sein.

Unser Dank gilt dem BMEL und der BLE für die finanzielle Förderung des F&E-Vorhabens StaPlaRes sowie für die allzeit engagierte Unterstützung. Das Konsortium ist zuversichtlich, dass die zahlreichen neuen und aussagekräftigen Erkenntnisse aus diesem bemerkenswerten Projekt in zukünftige agrar- und umweltpolitische Weichenstellungen einbezogen werden.

Thomas Kreuter
StaPlaRes-Projektkoordinator

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
Zusammenfassung	4
1. Abschlussberichte der Verbundpartner zu Arbeitspaketen (AP)	5
1.1. SKWP – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	5
1.2. TUM – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	39
1.3. MLU – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	59
1.4. ZALF – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	77
1.5. TI – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	89
1.6. LLG – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	118
1.7. Rauch – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	132
1.8. LfULG – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	138
2. Abweichungen zwischen Stand der Arbeiten und bewilligter Planung	146
3. Erreichung der gesteckten Ziele im Berichtszeitraum	148
4. Entwicklungen außerhalb des Verbunds mit Projekt-Relevanz	149
5. Fortschreibung des Verwertungsplans – Gesamtschau	150
6. Fortschreibung des Verwertungsplans – Maßnahmen der Partner	152
7. Publikationen und Vorträge	160

Zusammenfassung

An drei sehr unterschiedlichen Standorten wurden die Harnstoff-Dünungsvarianten (1) Standard, (2) Stabilisierung und (3) Platzierung hinsichtlich ihrer Effekte auf NH_3 - und N_2O -Verluste, Ertragsparameter und N-Effizienz in der Fruchtfolge Winterraps → Winterweizen → Wintergerste geprüft. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Verlustminderung: Die gasförmigen N-Verluste aus Standard-Harnstoff (gestreut, nicht stabilisiert) waren sehr gering und lagen weit unter den offiziellen Emissionsfaktoren. Dennoch bewirkten sowohl die Stabilisierung mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor als auch die wurzelnahe Platzierung eine deutliche NH_3 -Verlustminderung. Die Platzierung führte dabei meist zu erhöhten N_2O -Verlusten, während durch die Stabilisierung eine komplexe Minderung aller gasförmigen N-Verluste möglich war.

Dünger-N-Effizienz / Ökoeffizienz: Die Platzierung führte nur in Roggenstein zu einem Effizienzzuwachs. Mit der N-Stabilisierung wurde im Winterraps und im Winterweizen eine Steigerung erzielt. In der Wintergerste blieben entsprechende Vorteilseffekte aufgrund suboptimaler Düngungstermine aus. In einer vergleichenden Ökoeffizienzanalyse erwies sich die Stabilisierung als Vorzugsvariante.

Überführung in die Praxis: Sowohl Platzierung als auch Stabilisierung bedürfen spezieller Einsatzstrategien. Für die stabilisierte Düngung existieren bereits angepasste Systeme. Diese werden sukzessive weiterentwickelt, so im Rahmen des Folgeprojektes StaPrax-Regio (ab 2021). Im Jahr 2018 erfolgte die Markteinführung der doppelt stabilisierten Düngerspezialität ALZON® neo-N. Die Platzierung hat perspektivisch vor allem in Spezialkulturen und im Ökolandbau entsprechende Verwertungspotenziale.

Wissenschaftliche Verwertung: Die StaPlaRes-Ergebnisse wurden vielfach publiziert. Ab Januar 2022 werden sämtliche Datensätze in der Datenbank StaPlaRes-DB-Thuenen (www.openagrar.de) frei zugänglich und verfügbar sein.

1. Abschlussberichte der Verbundpartner zu Arbeitspaketen (AP)

1.1. SKWP – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum (Arbeitspakete 1 bis 6)

Im Rahmen der Projektkoordination wurden folgende Verbundtreffen und Workshops organisiert:

<i>Datum</i>	Veranstalter; Ort	Inhalt
19.07.2016	MLU; Halle	Kick-Off-Meeting
09.08.2016	LLG; Bernburg	Versuchsanlage; Injektionstechnik; Acker- und Pflanzenbau
15.08.2016	SKWP; Cunnersdorf	Festlegungen zur Gasmesstechnik Lachgas
14.10.2016	SKWP; Cunnersdorf	Versuchsanlage; Injektionstechnik; Versuchsdünger; Acker- und Pflanzenbau
03.11.2016	Rauch; Rheinmünster	Konstruktion Injektionstechnik
29.11.2016	ZALF; Müncheberg	Script und Messmethodik Lachgas
30.01.2017	SKWP; Cunnersdorf	Script und Messmethodik Ammoniak
19.06.2017	SKWP; Cunnersdorf	Unterschiede, Herausforderungen; Versuchs- feldbesichtigung; Injektionstechnik; Acker- und Pflanzenbau; aktueller Ergebnisstand
18.06.2018	LLG; Bernburg	Organisatorisches (Projektverlängerung); Ergebnisse Pflanzenbau, Emissionen; Versuchsfeldbesichtigung; Prozessbetrachtung; Datenbank; geplante Publikationen
13.02.2019	SKWP; Cunnersdorf	Organisatorisches; Vorstellung der Arbeitspakete 1-5; Ergebnis-Verwertung

Im Hinblick auf die fachlichen Aktivitäten laut Arbeitsplan realisierte SKWP während der Projektlaufzeit planmäßig sowohl die Fruchtfolgeversuche am Standort Cunnersdorf und die fachliche Koordination und Zusammenführung der Arbeiten im Arbeitspaket AP 4 als auch alle geplanten Aktivitäten zur Bewertung und Verwertung der Erkenntnisse, bezogen auf das Prüfglied Stabilisierung. Die in AP 1 bis AP 4 erhobenen Daten wurden in die Datenbank „StaPlaRes-DB-Thuenen“ eingepflegt.

Die pünktliche und qualitätsvolle Bereitstellung des stabilisierten Düngers war auf allen Standorten in allen Jahren gewährleistet. Die Platzierungstechnik konnte an allen Standorten zumindest einmal pro Vegetationsperiode eingesetzt werden. Vereinzelt traten aufgrund von Witterungsunbilden unerhebliche Abweichungen vom Arbeitsplan auf.

Alle Daten im fachlichen Abschlussbericht der SKWP weisen eine vollständige Übereinstimmung mit den Daten in der gemeinsamen Datenbank „StaPlaRes-DB-Thuenen“ auf.

1.1.1. Fruchtfolge-Versuch mit integrierten Gasmessungen am Standort Cunnersdorf: Versuchsanlagen, Methodik, Ertragsauswertung (SKWP; AP-1 und AP-5)

Folgende Freilandversuche wurden im Rahmen des Projektes StaPlaRes durchgeführt:

- 3-jähriger Fruchtfolge-Versuch mit integrierten Gasmessungen (LLG/MLU; SKWP; TUM) in der 3-gliedrigen Fruchtfolge Winterraps (WRa) -> Winterweizen (WWz) -> Wintergerste (WGe) zur Prüfung der Varianten Kontrolle (ohne N), Harnstoff, HS-Stabilisiert und HS-Platziert.
- 3-jährige Versuche in WWz zur frühen Terminierung mit HS-Stabilisiert (Cunnersdorf)
- 2-jährige Versuche in WGe zur frühen Terminierung mit HS-Stabilisiert (Cunnersdorf, Roggenstein)

Die acker- und pflanzenbauliche Anlage und Führung der Freilandversuche entsprachen den Regeln der „Guten fachlichen Praxis“ (GfP). Bei allen Bonituren, Entnahmen und Analysen von Boden- und Pflanzenproben, Erntemaßnahmen, Ertragsauswertungen und Effizienzberechnungen kamen Standardmethoden des Feldversuchswesens zum Einsatz.

(A) Standort-Charakterisierung

Bodenkundliche und klimatische Standortparameter

Mit den Versuchsflächen in Bernburg, Cunnersdorf und Roggenstein standen für die zentralen Fruchtfolge-Versuche des Projektes StaPlaRes drei typische Standorte für den marktf Fruchtbetonten Ackerbau in Deutschland zur Verfügung. Gleichzeitig wiesen die Flächen eine bodenkundlich und agrarmeteorologisch sehr unterschiedliche Charakteristik auf, so dass, ungeachtet der natürlich deutlich höheren Standortvielfalt in Deutschland, ein hohes Maß an Repräsentativität erreicht werden konnte. In Tab. SKWP-1 sind ausgewählte Standortparameter gegenübergestellt.

Tab. SKWP-1: Klimatisch-Bodenkundliche Charakteristik der drei Standorte, auf denen der Fruchtfolge-Feldversuch mit integrierten Gasmessungen durchgeführt wurden

Standort:	Bernburg	Cunnersdorf	Roggenstein
Höhe über NN:	80 m	140 m	520 m
Jahresniederschlag:	519 mm	605 mm	914 mm
Jahresmitteltemperatur:	9,7 °C	9,6 °C	8,7 °C
Leitbodenform:	Löß-Schwarzerde	Staugley-Fahlerde	Parabraunerde
Bodenart in 0...30 cm (Kurzzeichen):	stark toniger Schluff (Ut4)	schluffig-lehmiger Sand (Slu)	sandig-lehmiger Schluff (Uls)
C _{org} -Gehalt:	1,4 %	0,96 %	1,22 %
KAK _{effektiv} :	17,5 cmol ⁺ /kg	6,8 cmol ⁺ /kg	7,7 cmol ⁺ /kg
pH-Wert:	7,4	6,7	6,2
Ackerwertzahl:	87	45	56

Der Oberboden des Versuchsfeldes in Cunnersdorf besitzt den höchsten Sandanteil (44 %), während der Boden in Bernburg den höchsten Schluff- und Tonanteil (69 % bzw. 23 %) aufweist. Die C_{org} -Gehalte der Böden der Standorte Roggenstein (1,22 %) und Bernburg (1,4 %) liegen deutlich über dem C_{org} -Gehalt in Cunnersdorf (0,96 %). Der Standort Bernburg besitzt den höchsten pH-Wert_{CaCl2} (7,1) und auch die höchste effektive Kationenaustauschkapazität (17,5 cmol⁺/kg).

Agrarmeteorologische Charakterisierung

Für die drei StaPlaRes-Standorte wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) spezifische agrarmeteorologische Analysen (Modell BEKLIMA) durchgeführt. Schwerpunkte waren die zusammenfassende Auswertung des Witterungsgeschehens und Berechnungen zur statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit meteorologischer Muster. Die Ergebnisse wurden in einem „Klimabericht“ zusammengefasst (s. Anhang DWD I).

Auf Basis der Messwerte genormter DWD-Wetterstationen im Umkreis der Versuchsstandorte (Bernburg -> Bernburg; Cunnersdorf -> Leipzig-Schkeuditz; Roggenstein -> Augsburg) wurde ferner eine vergleichende Detailanalyse zu Unterschieden zwischen den drei Regionen und Abweichungen vom langjährigen Mittel durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse wurden in einem „Fachlichen Abschlussbericht des DWD“ zusammengefasst (s. Anhang DWD II).

Die Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum am Standort Cunnersdorf sind den Abb. SKWP-1 und SKWP-2 zu entnehmen.

Die Niederschlagsmenge war im ersten Versuchsjahr mit 690 mm Niederschlag (NS) im Vergleich zum durchschnittlichen Jahresniederschlag (602 mm, 1989-2018) relativ hoch, während die letzten beiden Versuchsjahre deutlich trockener ausfielen. Von September 2017 bis August 2018 fielen 522 mm und von September 2018 bis August 2019 nur 417 mm NS (Abb. SKWP-1).

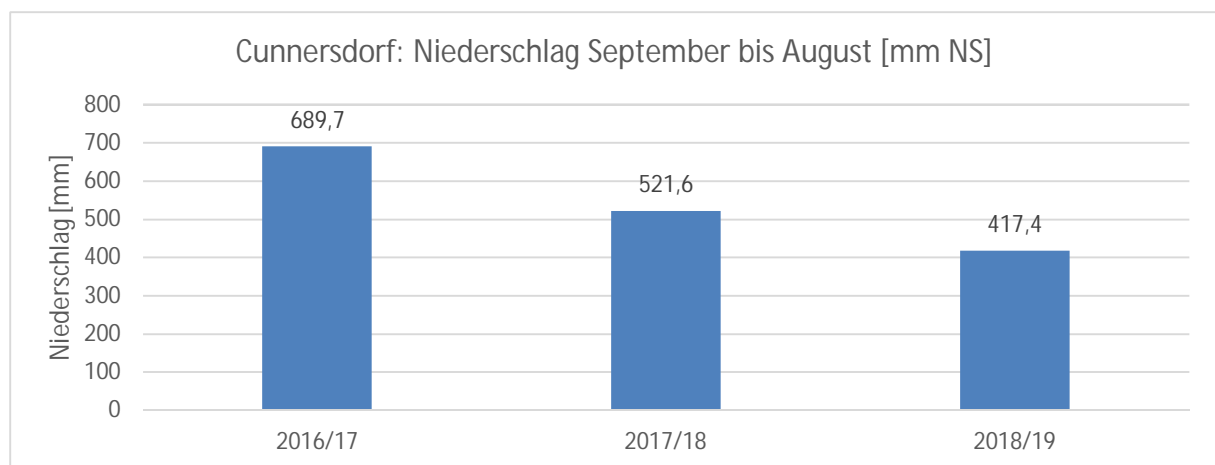


Abb. SKWP-1: Niederschlagsmengen für Cunnersdorf je Versuchsjahr, d.h. von September eines Jahres bis zum August des Folgejahres für die Abbildung der Niederschlagsmenge je Kultur.

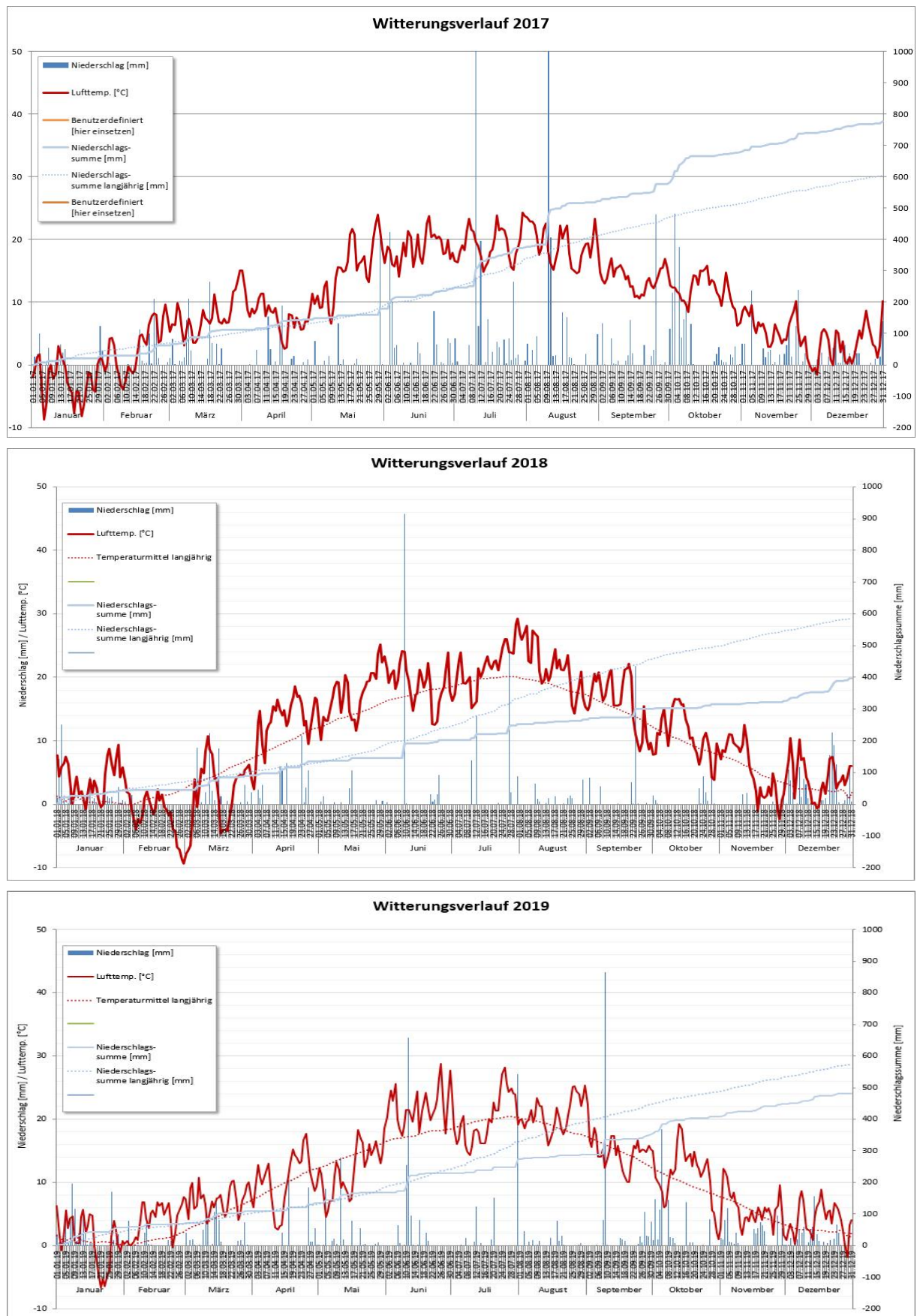


Abb. SKWP-2: Witterungsverlauffür Cunnnersdorf je Versuchsjahr, d.h. von September eines Jahres bis zum August des Folgejahres für die Abbildung der Niederschlagsmenge je Kultur.

(B) Methodik im Fruchtfolge-Versuch

Wie in der gemeinsamen Vorhabenbeschreibung geplant und dargelegt, wurden vom 25. Juli 2016 bis 30. Juni 2020 folgende Arbeiten durchgeführt:

- Versuche in einer 3 gliedrigen Fruchtfolge (Winterraps, Winterweizen, Wintergerste)
- Anwendung der Rauch-Technik für Platzierung („Side Dressing“)
- Nutzung des stabilisierten Düngers HS+UI+NI (Prüfglied „Stabilisiert“)
- N₂O-Messung ca. 1x wöchentlich in der Hauptkultur
- NH₃-Messungen im Düngezeitraum in der Hauptkultur
- Durchführung der Bonituren laut Vorhabenplanung
- Ganzpflanzenentnahme im Raps nur im ersten Versuchsjahr in der Hauptkultur, in den folgenden Jahren im Nebenversuch nicht möglich.

Prüfglieder: Gemäß der Projektzielstellung wurden folgende Varianten der HS-Düngung geprüft:

- (1) Kontrolle (ohne N-Düngung) = ohne N
- (2) HS gestreut (nicht inhibiert) = HS
- (3) HS-Stabilisiert (mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor, ebenfalls gestreut) = HS+UI+NI
- (4) HS-Platziert (nicht inhibiert, Einarbeitung im Side-Dressing-Verfahren) = HS-Platziert

Versuchsdesign: Um die Kombination von NH₃- und N₂O-Verlustmessungen, Ertragsanalysen, Bonituren und Probenahmen zu ermöglichen, wurde eine komplexe dreiteilige Versuchsanlage (Abb. SKWP-3 und Abb. SKWP-4) entworfen. Zwei herkömmliche randomisierte Parzellenversuche PV I und PV II (jeweils ohne Gasmessungen) flankierten einen zentralen Großparzellenversuch (GPV, mit Gasmessungen). Die Randomisierung der Prüfglieder erfolgte in jedem der 3 Teilversuche in Form lateinischer Quadrate (n = 4). In diese Versuchsanlage wurde eine 3-feldrige Fruchtfolge mit den Kulturen Winterweizen (WWz), Wintergerste (WGe) und Winterraps (WRa) integriert. In jedem Jahr und auf jedem Standort standen somit die drei Kulturen nebeneinander, einmal im dreijährigen Projektzeitraum stand jede Kultur auf dem GPV. Dort begann die geprüfte Fruchtfolge auf allen Standorten mit WRa (2016/17), gefolgt von WWz (2017/18) und WGe (2018/19). Jede Großparzelle enthielt drei separate Bereiche für (a) Ertragsauswertung, (b) Gasmessungen und (c) sonstige Probennahmen. Gemäß den Anforderungen der NH₃-Messmethode waren alle Großparzellen des GPV von speziell bewirtschafteten Pufferbeständen umgeben.

Auf Basis dieses Versuchsdesigns liegen aus dem Fruchtfolgeversuch pro Standort und Fruchtart drei Ernteergebnisse (für die Jahre 2017, 2018, 2019) vor. Gasförmige Verluste wurden dagegen für die spezifische Fruchtfolge des GPV (WRa -> WWz -> WGe) ermittelt.

Agrarmeteorologische Datenerfassung: Die agrarmeteorologische Begleitung des Projektes StaPlaRes erfolgte durch den Deutschen Wetterdienst (DWD). Detaillierte Wetterdaten wurden durch Wetterstationen im direkten Umfeld der StaPlaRes-Versuchsflächen erfasst. Daten zur Bodenfeuchte wurden direkt auf den Fruchtfolge-Versuchen mittels SENTEK-Sonden auf Grundlage der FDR-Methodik erfasst.

Die Strategie der N-Stabilisierung weist neben dem Einsatz speziell modifizierter Dünger auch ein vom traditionellen Gabensplitting abweichendes Düngungsregime auf: In den Prüfgliedern HS und HS-Platziert (mit traditionellem Gabensplitting) wurde die zu düngende N-Menge i.d.R. zu Wintergerste (WGe) und Winterraps (WRa) in 2 Teilgaben (zu Vegetationsbeginn und zu BBCH 32...35) und zu Winterweizen in 3 Teilgaben (Vegetationsbeginn, BBCH 32, BBCH 49...53) appliziert. In der Variante HS-Stabilisiert (HS+UI+NI) wurde die Anzahl der Teilgaben im Weizen von 3 auf 2, in Raps und Gerste von 2 auf 1 Termin reduziert. Die 2. stabilisierte Düngergabe im Weizen wurde zu BBCH 35 ... 39 durchgeführt. Die stabilisierte Einmalgabe zu Raps erfolgte ca. 2 bis 3 Wochen eher (also bereits vor Vegetationsbeginn). Die Startgaben zu Getreide erfolgten in allen Prüfgliedern zeitgleich.

(C) Ergebnisse der Ertragsanalyse im Fruchtfolge-Versuch am Standort Cunnersdorf, SKWP (AP-1)

I. Erträge am Standort Cunnersdorf

In Anbetracht des sehr geringen Niveaus der Stickstoffverluste (siehe Kapitel C-4 und C-5) war grundsätzlich nicht zu erwarten, dass sich Veränderungen der emittierten N_2O - bzw. NH_3 -Mengen infolge von Platzierung und Stabilisierung auf das Ertragsniveau auswirkt. Von Interesse war eher, ob andere Einflüsse, im stabilisierten System z.B. ein abweichendes Gaben-Splitting und die ammoniumbetonte N-Aufnahme, im platzierten System die Effekte des Striegels, der Bodenlockerung und der erzeugten Wurzelnähe des Düngers) ertragsrelevant werden können.

Bei der Analyse und Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Start-N-Gabe zu Winterweizen und Wintergerste erst ab Vegetationsbeginn und erst bei Durchführbarkeit der Platzierung erfolgte. Für das N-stabilisierte System ist diese Terminierung atypisch spät. Das gilt insbesondere für die Gerste, in der möglichst frühe Einmalgaben – analog zum Winterraps – oft systemrelevant sind. Bei der Festlegung des StaPlaRes-Arbeitsprogramms hat SKWP einer einheitlichen Startgabe zu Getreide zugestimmt, um die aufwendigen NH_3 -Kampagnen zeitlich zu begrenzen und um direkte Vergleiche düngerbürtiger NH_3 - und N_2O -Emissionen zu ermöglichen. Um die für N-stabilisierte Systeme charakteristische frühe Gabenstrategie in allen Kulturen der StaPlaRes-Fruchtfolge prüfen zu können, erfolgten in Roggenstein und Cunnersdorf Begleitversuche, die in Kapitel D vorgestellt werden.

Die Analyse der Ernte-Ergebnisse weist für die drei Varianten mit N-Düngung mittlere Korn- bzw. Samenerträge in Höhe von 38,9 dt/ha Winterraps, 87,4 dt/ha Winterweizen und 87,3 dt/ha Wintergerste pro Jahr aus. Die N-Entzüge je Jahr (Abb. SKWP-3 und Abb. SKWP-6 a, b, c) variieren aufgrund der unterschiedlichen Witterungsverhältnisse (Abb. 4 a, b, c - SKWP) relativ stark. Die folgenden Tabellen gewähren einen Überblick über die in Winterraps (Tab. SKWP-2), Winterweizen (Tab. SKWP-3) und Wintergerste (Tab. SKWP-4) erzielten Samen- bzw. Kornerträge.

Im Winterraps (Tab. SKWP-2) ließen sich die Erträge im Mittel der drei Versuchsjahre bei N-Stabilisierung in Cunnersdorf um ca. $1 \text{ dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ im Vergleich zur Variante HS gestreut (ohne UI+NI) steigern. Zwischen HS platziert und HS (gestreut, ohne UI+NI) bestand annähernd Ertragsgleichheit. Im Winterweizen (Tab. SKWP-3) bestand zwischen HS stabilisiert und HS gestreut (ohne UI+NI) annähernd Ertragsgleichheit. Auch die Effekte der wurzelnahen Platzierung blieben marginal.

Tab. SKWP-2: Samenerträge in der Kultur Winterraps; Erntejahre 2017 bis 2019, Standort Cunnersdorf

Winterraps	Kontrolle ohne N		Harnstoff (HS) PIAGRAN® 46		HS + UI + NI ALZON® neo-N		HS platziert PIAGRAN® 46	
Prüfglied:	Kornertrag		Kornertrag		Kornertrag		Kornertrag	
	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **
Cunnersdorf 2017	37,3 c	74,9	49,8 b	100	53,2 a	106,7	49,6 b	99,6
Cunnersdorf 2018	20,5 b	65,2	31,4 a	100	31,9 a	101,6	31,7 a	101,2
Cunnersdorf 2019	28,1 b	72,1	39,0 a	100	38,0 a	97,4	37,8 a	96,9
Ø 2017 - 2019	28,6	71,5	40,1	100	41,0	102,3	39,7	99,1

* ... unterschiedliche Buchstaben hinter dem Ertragswert = signifikanter Unterschied (a = 0,05)

** ... relativer Ertrag, bezogen auf das Ergebnis im Prüfglied HS (PIAGRAN® 46) = 100 %

Tab. SKWP-3: Kornerträge in der Kultur Winterweizen; Erntejahre 2017 bis 2019, Standort Cunnersdorf

Winterweizen	Kontrolle ohne N		Harnstoff (HS) PIAGRAN® 46		HS + UI + NI ALZON® neo-N		HS platziert PIAGRAN® 46	
Prüfglied:	Kornertrag		Kornertrag		Kornertrag		Kornertrag	
	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **
Cunnersdorf 2017	54,1 b	62,7	86,2 a	100	83,8 a	97,2	91,1 a	105,7
Cunnersdorf 2018	54,8 c	66,5	82,3 b	100	84,8 a	103,0	81,1 b	98,5
Cunnersdorf 2019	64,8 b	68,9	94,0 a	100	93,3 a	99,2	89,9 a	95,6
Ø 2017 - 2019	57,9	66,1	87,5	100	87,3	99,7	87,4	99,8

* ... unterschiedliche Buchstaben hinter dem Ertragswert = signifikanter Unterschied (a = 0,05)

** ... relativer Ertrag, bezogen auf das Ergebnis im Prüfglied HS (PIAGRAN® 46) = 100 %

In der Wintergerste (Tab. SKWP-4) konnte das stabilisierte System (HS+UI+NI) nicht überzeugen. Die Erträge blieben um ca. 4 % hinter dem Ergebnis im Prüfglied HS gestreut (ohne UI+NI) zurück. Auf die Problematik der Startgaben-Terminierung, die speziell für die N-stabilisierte Düngung zu Gerste nicht optimal war, wurde bereits eingegangen.

Tab. SKWP-4: Kornerträge in der Kultur Wintergerste; Erntejahre 2017 bis 2019, Standort Cunnersdorf

Wintergerste	Kontrolle ohne N		Harnstoff (HS) PIAGRAN® 46		HS + UI + NI ALZON® neo-N		HS platziert PIAGRAN® 46	
Prüfglied:	Kornertrag		Kornertrag		Kornertrag		Kornertrag	
	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **	dt ha ⁻¹ *	% **
Cunnersdorf 2017	64,2 c	56,3	114,1 a	100	99,3 b	87,0	108,3 a	94,9
Cunnersdorf 2018	32,6 b	51,5	63,3 a	100	63,3 a	99,9	62,9 a	99,2
Cunnersdorf 2019	38,5 c	40,0	96,2 a	100	99,8 a	103,7	79,7 b	82,9
Ø 2017 - 2019	45,1	49,4	91,2	100	87,5	95,9	83,6	91,7

* ... unterschiedliche Buchstaben hinter dem Ertragswert = signifikanter Unterschied (a = 0,05)

** ... relativer Ertrag, bezogen auf das Ergebnis im Prüfglied HS (PIAGRAN® 46) = 100 %

Die wurzelnahe Platzierung konnte unter den gegebenen Einsatzbedingungen ebenfalls keine Ertragsvorteile in der Wintergerste generieren. Der Kornertrag blieb bei dieser Technologie um mehr als 9 % (ca. 7 dt ha⁻¹a⁻¹) hinter dem Standard HS zurück.

II. N-Entzüge am Standort Cunnersdorf

Auch im Hinblick auf die N-Aufnahme lässt das geringe N-Verlustniveau keine Effekte einer erfolgreichen Verlustminderung oder eines unerwünschten Pollution Swapping erwarten. Eher dürften die veränderte Terminierung und Gabenzusammenfassung im stabilisierten System sowie acker- und pflanzenbauliche Effekte von Platzierung bzw. Stabilisierung die N-Aufnahme beeinflusst haben.

Die folgenden Tabellen gewähren einen Überblick über die ermittelten Werte in Winterraps (Tab. SKWP-5), Winterweizen (Tab. SKWP-6) und Wintergerste (Tab. SKWP-7) jeweils für alle drei untersuchten Standorte.

Im Winterraps (Tab. SKWP-5) ließen sich durch das stabilisierte System (HS+UI+NI) im Vergleich zu HS (PIAGRAN® 46) die mittleren N-Entzüge in Cunnersdorf um 3 kg ha⁻¹a⁻¹ steigern. Die Platzierungsvariante blieb dagegen um ca. 3 kg ha⁻¹ a⁻¹ hinter dem Prüfglied HS gestreut (ohne UI+NI) zurück.

Tab. SKWP-5: N-Aufnahme (mit dem Samenertrag) von Winterraps; Erntejahre 2017 bis 2019, Standort Cunnersdorf

Winterraps	Kontrolle ohne N		Harnstoff (HS) PIAGRAN® 46		HS + UI + NI ALZON® neo-N		HS platziert PIAGRAN® 46	
Prüfglied:	N-Aufnahme		N-Aufnahme		N-Aufnahme		N-Aufnahme	
	kg ha ⁻¹ *	% **	kg ha ⁻¹ *	% **	kg ha ⁻¹ *	% **	kg ha ⁻¹ *	% **
Cunnersdorf 2017	88,5 c	63,1	140,3 b	100	150,4 a	107,3	134,8 b	96,1
Cunnersdorf 2018	52,0 b	53,8	96,7 a	100	99,4 a	102,8	97,8 a	101,1
Cunnersdorf 2019	78,5 b	61,0	128,8 a	100	124,8 a	96,9	125,0 a	97,0
Ø 2017 - 2019	73,0	59,9	121,9	100	124,9	102,4	119,2	97,7

* ... unterschiedliche Buchstaben hinter dem N-Aufnahmewert = signifikanter Unterschied (a = 0,05)

** ... relative N-Aufnahme, bezogen auf das Ergebnis im Prüfglied HS (PIAGRAN® 46) = 100 %

Im Winterweizen (Tab. SKWP-6) führte das stabilisierte System im Mittel der drei Versuchsjahre zu einer Erhöhung der jährlichen N-Aufnahme um mehr als 2 kg ha⁻¹a⁻¹. Eine in Begleitversuchen geprüfte betont frühe stabilisierte Gabenstrategie erbrachte eine weitere Erhöhung der N-Aufnahme (siehe auch Kap. D). Die wurzelnahe Platzierung überzeugte nicht; die N-Aufnahme blieb um ca. 3 kg ha⁻¹ a⁻¹ hinter der Variante HS (gestreut) zurück.

In der Wintergerste (Tab. SKWP-7) konnte das stabilisierte System mit ALZON® neo-N - analog zur Situation bei den Erträgen - auch in puncto N-Aufnahme die Erwartungen nicht erfüllen. Die N-Entzugswerte lagen ca. 7 kg ha⁻¹ a⁻¹ unter den Vergleichswerten in der Standardvariante HS gestreut (ohne UI+NI). In Begleitversuche konnte belegt werden, dass ein früherer Applikationstermin eine erhebliche Effizienzsteigerung bewirkt hätte (siehe Kap. D).

Tab. SKWP-6: N-Aufnahme (mit dem Kornertrag) von Winterweizen; Erntejahre 2017 bis 2019
Standort Cunnersdorf

Winterweizen	Kontrolle ohne N		Harnstoff (HS) PIAGRAN® 46		HS + UI + NI ALZON® neo-N		HS platziert PIAGRAN® 46	
Prüfglied:	N-Aufnahme		N-Aufnahme		N-Aufnahme		N-Aufnahme	
	in kg ha ⁻¹	in % *	in kg ha ⁻¹	in % *	in kg ha ⁻¹	in % *	in kg ha ⁻¹	in % *
Cunnersdorf 2017	69,9 c	42,4	164,8 ab	100	157,0 b	95,3	173,2 a	105,1
Cunnersdorf 2018	64,7 c	38,3	168,9 a	100	172,3 a	102,0	160,8 b	95,2
Cunnersdorf 2019	83,9 d	40,8	205,6 b	100	216,6 a	105,4	196,1 c	95,4
Ø 2017 - 2019	72,8	40,5	179,8	100	182,0	101,2	176,7	98,3

* ... unterschiedliche Buchstaben hinter dem N-Aufnahmewert = signifikanter Unterschied (a = 0,05)

** ... relative N-Aufnahme, bezogen auf das Ergebnis im Prüfglied HS (PIAGRAN® 46) = 100 %

Tab. SKWP-7: N-Aufnahme (mit dem Kornertrag) von Wintergerste; Erntejahre 2017 bis 2019
Standort Cunnersdorf

Wintergerste	Kontrolle ohne N		Harnstoff (HS) PIAGRAN® 46		HS + UI + NI ALZON® neo-N		HS platziert PIAGRAN® 46	
Prüfglied:	N-Aufnahme		N-Aufnahme		N-Aufnahme		N-Aufnahme	
	in kg ha ⁻¹	in % *	in kg ha ⁻¹	in % *	in kg ha ⁻¹	in % *	in kg ha ⁻¹	in % *
Cunnersdorf 2017	82,9 c	41,0	202,5 a	100	170,4 b	84,2	183,3 b	90,5
Cunnersdorf 2018	39,0 b	37,5	104,2 a	100	104,9 a	100,7	99,1 a	95,1
Cunnersdorf 2019	39,7 c	28,8	137,9 b	100	148,9 a	108,0	138,3 b	100,3
Ø 2017 - 2019	53,9	36,4	148,2	100	141,4	95,4	140,2	94,6

* ... unterschiedliche Buchstaben hinter dem N-Aufnahmewert = signifikanter Unterschied (a = 0,05)

** ... relative N-Aufnahme, bezogen auf das Ergebnis im Prüfglied HS (PIAGRAN® 46) = 100 %

Bei wurzelnaher Platzierung blieb die N-Aufnahme in Cunnersdorf sogar um 8 kg ha⁻¹ a⁻¹ hinter den Werten der Standardvariante HS gestreut (ohne UI+NI) zurück. Auch hier bestehen – analog zur Situation bei der N-stabilisierten HS-Düngung – erhebliche Optimierungsmöglichkeiten durch standort- und technologiespezifische Anpassungen des Platzierungsverfahrens. Erfahrungen dazu aus anderen Projekten liegen vor. Im Rahmen des Verbundprojektes StaPlaRes wurden diesbezüglich allerdings keine begleitenden Versuche geplant und durchgeführt.

III. N-Bilanzen am Standort Cunnersdorf

Bis zur aktuellen - im Frühjahr 2020 erfolgten - Anpassung der Düngeverordnung (in Reaktion auf Anforderungen und Auflagen seitens der EU) spielte die Berechnung mehrjähriger N-Bilanzüberschüsse eine entscheidende Rolle für den jährlichen Nachweis und für die Kontrolle einer fach- und umweltgerechten Stickstoffdüngung in den Betrieben. Im Projekt StaPlaRes wurde diesem Parameter ein entsprechend großes Augenmerk geschenkt.

Auch wenn die N-Bilanz in der aktualisierten Düngeverordnung als Nachweis- und Kontrollwerkzeug keine Rolle mehr spielt, kann sie nach wie vor als relativ gut geeigneter Indikator für den Grad der Ressourceneffizienz und Umweltschonung der Stickstoffdüngung herangezogen werden.

Mit einem durchschnittlichen N-Bilanzüberschuss von ca. 40...42 kg ha⁻¹ a⁻¹ in der Fruchtfolge Winterraps ® Winterweizen ® Wintergerste wurde auf allen drei Standorten, in Anbetracht der schwierigen, oft extremen Witterungsverhältnisse, eine beachtliche Düngeeffizienz erreicht. Harnstoff (HS) erwies sich generell und unabhängig vom geprüften Verfahren als eine erfolgreich einsetzbare Dünger-N-Form.

Die Übersicht in Tab. SKWP-8 enthält für jede Kultur den durchschnittlichen jährlichen Bilanzüberschuss nach drei Anbaujahren (Erntejahre 2017, 2018, 2019). Angegeben ist jeweils die Jahreszahl der Ernte.

Tab. SKWP-8: Mittlere jährliche Überhänge (+) bzw. Defizite (–) in der Bilanz der N-Düngung zu Winterraps, Winterweizen und Wintergerste nach dreijährigem Anbau; Standort Cunnersdorf*

Prüfglied:	Harnstoff (HS)	HS + UI + NI	HS platziert
Eingesetzter Dünger:	PIAGRAN® 46	ALZON® neo-N	PIAGRAN® 46
Standort Cunnersdorf			
Winterraps 2017 – 2019:	+ 58 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	+ 55 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	+ 61 kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Winterweizen 2017 – 2019:	+ 20 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	+ 18 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	+ 23 kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Wintergerste 2017 – 2019:	+ 12 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	+ 19 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	+ 20 kg ha ⁻¹ a ⁻¹

* ... [Bilanz der N-Düngung] = [N-Input] – [N-Entzug]

Die Variante Stabilisierung (HS+UI+NI) führte in den Leitkulturen Winterraps und Winterweizen am Standort Cunnersdorf zu einer mittleren Entlastung der N-Bilanzüberschüsse in Höhe von 2 bis 3 kg ha⁻¹a⁻¹ (Cunnersdorf) im Vergleich zum Prüfglied HS (PIAGRAN® 46).

In der Wintergerste führten die oben genannten vergleichsweise schlechten N-Aufnahme-Werte zu entsprechend erhöhten N-Überhängen; der Bilanzüberschuss betrug gegenüber der Variante HS gestreut (ohne UI+NI) 7 kg ha⁻¹a⁻¹. Wie bereits beschrieben, konnte die N-Effizienz von HS+UI+NI sowohl in der Gerste als auch im Weizen durch frühe Düngungsterminierungen deutlich verbessert werden (siehe auch Kap. D).

Das Prüfglied HS platziert konnte unter den gegebenen Einsatzbedingungen in keiner Kultur einen Vorteilseffekt generieren. Im Vergleich zum Standard HS gestreut (ohne UI+NI) erhöhten sich die Bilanzüberschüsse aus der N-Düngung im Mittel der 3 Jahre um jeweils 3 kg ha⁻¹a⁻¹ in Winterraps und Winterweizen sowie um 8 kg ha⁻¹a⁻¹ in Wintergerste. Auch hier bestehen Optimierungspotenziale durch Düngungssysteme, die an die Spezifik der Platzierungstechnologie angepasst sind.

1.1.2. Ammoniak-Messungen am Standort Cunnersdorf, SKWP (AP-2 / AP-5)

(A) Einleitung

Seit ca. 20 Jahren weisen alle Freilandstudien zu NH_3 -Emissionen nach HS-Düngung darauf hin, dass die N-Verluste deutlich unter den gemäß EU-Methoden-Guidebook verbindlich anzuwendenden Pauschalwerten (Emissionsfaktoren) liegen. Diese lagen für HS in den letzten EMEP-Dokumenten zwischen 11 % (EMEP 2009) und 21 % (EMEP 2013) des applizierten Dünger-N. Neben der Bewertung der nachweislich verlustmindernden Maßnahmen Ureaseinhibitor-Einsatz (= Stabilisierung) und Einarbeitung (= Platzierung) war folglich von Interesse, ob diese geringen NH_3 -Verluste unter den in Deutschland üblichen Ackerbau-Bedingungen erneut bestätigt werden. Weiterhin bestand die Frage, wie groß der Standorteinfluss ist.

Aus der Fachliteratur ist bekannt, dass die Höhe der NH_3 -Freisetzung aus gedüngtem HS nicht allein vom Wetter- und Witterungsverlauf nach Applikation, sondern maßgeblich auch von Bodeneigenschaften und dabei vor allem von der Kationenaustauschkapazität (KAK) abhängt. Der Standort Cunnersdorf hat diesbezüglich im Vergleich der drei StaPlaRes-Standorte das höchste NH_3 -Verlustpotenzial. Im Labor unter extremen Verlustbedingungen emittieren aus dem Cunnersdorfer Boden innerhalb der ersten zwei Wochen nach Applikation ca. 50 % des applizierten HS-N. Auch in Freilandmessungen, die in Cunnersdorf seit 2013 kontinuierlich durchgeführt werden, wurden in der Kultur Winterweizen vereinzelt recht hohe Verlustraten von mehr als 20 % des applizieren HS-N festgestellt. Allerdings waren selbst im Winterweizen, erst recht aber in der vergleichsweise früh gedüngten Kultur Raps sehr geringe NH_3 -N-Verlustraten zwischen 0 und 5 % wesentlich häufiger.

So überrascht es auch im Rahmen der NH_3 -Untersuchungen im Projekt StaPlaRes nicht, dass auf allen Standorten vergleichsweise geringe NH_3 -N-Verluste ermittelt worden sind. Die Verlustraten lagen einmal mehr, sehr deutlich unter den aktuellen und früheren EMEP-Emissionsfaktoren und bestätigen das für Deutschland und Mitteleuropa publizierte Verlustniveau.

(B) Methodik

Die NH_3 -Messungen erfolgte mit der zweistufigen Methodik des Calibrated Passiv Sampling auf Basis der Methodenvorschrift von Pacholski (2016). Dabei wird der düngungsinduzierte NH_3 -Flux aus der theoretisch am stärksten emittierenden Variante mit einem dynamischen Haubensystem bestimmt (Dräger-Tube-Messung) und die relativen Unterschiede zwischen allen geprüften Düngungsvarianten über Säurefallen ermittelt (Passive Sampling).

(C) Ergebnisse und Diskussion

Bei der Interpretation der NH_3 -Ergebnisse ist zu beachten, dass die wurzelnahe Platzierung nicht zu jedem Düngungstermin eingesetzt werden konnte. Dennoch beziehen sich die Berechnungen zur Verlustminderung auf die gesamte Düngung und damit auf eine Kombination platzierter und gestreuter HS-Gaben. Darin liegt kein Widerspruch, denn in der geprüften Form ist eine solche Kombination für das Verfahren der Platzierung systemimmanent. Das heißt, in zu feuchten, wenig tragfähige Böden sowie in höhere Getreide- und Rapsbestände lässt sich der Dünger mit der vorliegenden Technik prinzipiell nicht einschlitzen. In diesen Fällen muss – zumindest bei üblicher Gabenaufteilung – ein traditionelles Streuverfahren zum Einsatz kommen. Im Projekt StaPlaRes wurden boden- und witterungsbedingt in Roggenstein die meisten und in Cunnersdorf die wenigsten Platzierungen vorgenommen. Jedoch konnte – wie geplant – auch am Standort Cunnersdorf in jeder Kultur wenigstens eine Teilgabe wurzelnah platziert werden.

Ein Überblick über die emittierten Dünger-N-Mengen und Verlustraten sowie über die Verlustminderungswirkung von Stabilisierung und Platzierung wird in Tab. SKWP-9 gegeben.

Tab. SKWP-9: Ergebnisse der NH_3 -Messungen * am Standort Cunnersdorf

Fruchtfolge Winterraps ® Winterweizen ® Wintergerste

Prüfglied	Harnstoff (HS)	HS + UI + NI	HS platziert
	PIAGRAN® 46	ALZON® neo-N	PIAGRAN® 46
W-Raps, Düngungsperiode 2017			
Dünger-N-Input:	180 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹	180 kg ha ⁻¹
NH_3 -N-Verlust:	5,97 kg ha ⁻¹	< 0,01 kg ha ⁻¹	5,19 kg ha ⁻¹
NH_3 -N-Verlustrate **:	3,32 % (a)	0 % (c)	2,88 % (b)
Verlustminderung (–) gegenüber HS:		-100,0 %	-13,2 %
W-Weizen, Düngungsperiode 2018			
Dünger-N-Input:	200 kg ha ⁻¹	200 kg ha ⁻¹	200 kg ha ⁻¹
NH_3 -N-Verlust:	10,43 kg ha ⁻¹	5,23 kg ha ⁻¹	9,17 kg ha ⁻¹
NH_3 -N-Verlustrate **:	5,21 % (a)	2,61 % (c)	4,59 % (b)
Verlustminderung (–) gegenüber HS:		-49,9 %	-12,0 %
W-Gerste, Düngungsperiode 2019			
Dünger-N-Input:	160 kg ha ⁻¹	160 kg ha ⁻¹	160 kg ha ⁻¹
NH_3 -N-Verlust:	1,84 kg ha ⁻¹	0,20 kg ha ⁻¹	0,16 kg ha ⁻¹
NH_3 -N-Verlustrate **:	1,15 % (a)	0,13 % (b)	0,10 % (b)
Verlustminderung (–) gegenüber HS:		- 89,1 %	- 91,3 %
NH_3 -N-Verlustrate in der Fruchtfolge (2017 bis 2019):	3,38 %	1,01 %	2,69 %
Verlustminderung (–) gegenüber HS (Ø 2017 - 2019):		– 70,2 %	– 20,4 %

* ... Die Messperioden begannen bei Dünger-Applikation und endeten nach dem endgültigen Abklingen der düngungsinduzierten Emissionen (i.d.R. nach ergebnigen Niederschlägen)

** ... unterschiedliche Buchstaben (...) hinter den Verlustwerten = signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$)

Am Standort Cunnersdorf gingen in der Fruchtfolge Winterraps ® Winterweizen ® Wintergerste im Mittel etwa 3,4 % des gedüngten HS-N in Form von NH_3 verlustig. Am höchsten waren die Emissionen mit etwas mehr als 5 % im Winterweizen, während aus der Düngung zu Winterraps und Wintergerste lediglich 3 % bzw. 1 % des HS-N emittierten. Durch den Einsatz von ALZON® neo-N ließen sich die N-Verluste im Mittel um ca. 70 % reduzieren. Die Platzierung erbrachte in Cunnersdorf lediglich eine Verlustminderung um ca. 20 %.

1.1.3. Lachgas-Messungen am Standort Cunnersdorf, SKWP (AP-3 / AP-5)

(A) Einleitung

In den letzten Jahren haben mehrere wissenschaftliche Studien aufgezeigt, dass die N_2O -Emissionen aus der Mineraldüngung auf vielen Ackerbaustandorten in Deutschland vergleichsweise gering sind. Die Verluste lagen in der Regel deutlich unter dem IPCC-Faktor, der von einer Dünger-N-Verlustrate von 1...1,5 % ausgeht. In diversen F&E-Projekten der StaPlaRes-Verbundpartner wurde dieses generell geringe N_2O -Verlustniveau nach N-Düngungsmaßnahmen und insbesondere nach Mineraldünger-Einsatz schon im Vorfeld des Projektes mehrfach nachgewiesen.

So verwundert es nicht, dass auch im Projekt StaPlaRes, gemessen am IPCC-Faktor (IPCC 2006, 2019), bereits die Basisvariante HS (gestreut, ohne UI+NI) sehr geringe N_2O - Verluste aufwies.

Im Hinblick auf die Platzierung war die Frage interessant, inwieweit diese eine gewisse Eigeninhibierung (CULTAN-Effekt) erzeugen kann, der N_2O -mindernd wirkt oder zumindest einer Erhöhung der N_2O -Verluste infolge der Einarbeitung entgegenwirkt. Bei der Stabilisierung war von Interesse, ob die zeitlich begrenzt wirkende N_2O -Minderung des Nitrifikationsinhibitors auch über die gesamte dreijährige Fruchtfolge betrachtet noch einen verlustmindernden Effekt zeigt.

(B) Methodik

Die N_2O -Messungen erfolgten auf Basis des Konzentrationsanstiegs des emittierenden Gases in einer geschlossenen Kammer (Closed-Chamber-Methode). Die von Hutchinson & Mosier (1983) beschriebene Methode wurde in adaptierter Form eingesetzt. Sowohl zwischen den Hauben-Systemen an den drei Einsatzstandorten als auch zwischen den Berechnungsalgorithmen bestanden gewisse Differenzen, die aber im Rahmen der Projektzielstellung zu vernachlässigen sind.

(C) Ergebnisse und Diskussion

Auch bei der Interpretation der N_2O -Ergebnisse ist zu beachten, dass die wurzelnahe Platzierung nicht zu jedem Düngungstermin eingesetzt werden konnte. Bei der Berechnung der Dünger-N-Verluste wird darauf keine Rücksicht genommen, da eine Kombination platzierter und gestreuter HS-Gaben für das Verfahren der wurzelnahen Platzierung systemimmanent ist. Boden- und witterungsbedingt wurden in Cunnersdorf die wenigsten Platzierungen vorgenommen, jedoch konnte pro Kultur wenigstens eine HS-Gabe eingearbeitet werden.

In Tab. SKWP-10 sind die emittierten N_2O -N-Mengen und Dünger-N-Verluste sowie die prozentuale Verlustminderung durch Stabilisierung und Platzierung für den gesamten Projektzeitraum (von Winterraps-Aussaat 2016 bis Aussaat der auf Wintergerste folgenden Kultur 2019) dargestellt.

Die N_2O -Verlustraten nach Düngung von PIAGRAN® 46 (Standard HS) lagen zwischen 0,17 % (HS stabilisiert) und 0,33 % (HS platziert). Die Dynamik der Emissionen im Jahresverlauf (nicht dargestellt) verdeutlicht den großen Einfluss der Bodenfeuchte.

Die Stabilisierung (und dabei in erster Linie die Nitrifikationsinhibierung) führte zu einer Minderung der Verluste aus HS gestreut (ohne UI+NI) um 22 % über den Zeitraum der gesamten Fruchtfolge betrachtet. Im Zeitraum der N-Düngung (jeweils Februar bis Juni) betrug die Minderung ca. 80 % (nicht dargestellt).

Die wurzelnahe Platzierung brachte erwartungsgemäß eine Verlagerung der Emissionen vom Verlustpfad NH_3 auf den Verlustpfad N_2O mit sich, so dass die N_2O -Verluste um 49 % zunahmen. CULTAN-Effekte der Platzierung waren nicht erkennbar.

Tab. SKWP-10: Ergebnisse der N₂O-Messungen in der Messperiode 08/2016 – 07/2019 *
(Fruchtfolge Winterraps @ Winterweizen @ Wintergerste)

Prüfglied	Harnstoff (HS)	HS + UI + NI	HS platziert
	PIAGRAN® 46	ALZON® neo-N	PIAGRAN® 46
Standort Cunnersdorf			
Dünger-N-Input:	540 kg ha ⁻¹	540 kg ha ⁻¹	540 kg ha ⁻¹
N ₂ O-N-Verlust:**	1,21 kg ha ⁻¹ (b)	0,94 kg ha ⁻¹ (b)	1,80 kg ha ⁻¹ (a)
N ₂ O-N-Verlustrate:	0,22 %	0,17 %	0,33 %
Verlustminderung (–) bzw. -Steigerung (+) gegenüber HS (PIAGRAN® 46) um ...		– 22 %	+ 49 %

* ... die Messperiode begann mit der Winterraps-Aussaat (Ende August 2017) und endete vor der Aussaat der auf Wintergerste folgenden Kultur (Ende September 2019)

** ... unterschiedliche Buchstaben (..) hinter den Verlustwerten = signifikanter Unterschied (α = 0.05)

1.1.4. Feldversuche zur Gabenterminierung im N-stabilisierten System an den Standorten Cunnersdorf, SKWP und Roggenstein, TUM (AP-1 / AP-5)

Methodik

Der Einsatz eines Nitrifikationsinhibitors (NI) erfolgt in der landwirtschaftlichen Praxis i.d.R. im Rahmen eines entsprechend angepassten "stabilisierten" Düngungssystems, welches den NI-Effekten auf N-Umsatz und N-Verlustgeschehen Rechnung trägt. Dazu gehören neben der Zusammenfassung von Teilgaben vor allem sehr zeitige Startgaben im ausgehenden Winter (vor Vegetationsbeginn) sowie die flexible Terminierung der Schossergaben zu Winterweizen – oft ebenfalls in Form einer Vorverlegung. Im Zuge des Klimawandels hat die Bedeutung dieser Maßnahmen stetig zugenommen. Im gemeinsamen StaPlaRes-Fruchtfolgeversuch wurde aus verschiedenen Gründen lediglich eine Vorverlegung der ersten stabilisierten N-Gabe zu Winterraps vereinbart.

Um die für stabilisierte Düngungsregimes systemimmanente Vorverlegung von Applikationsterminen auch in den Getreidekulturen prüfen zu können, wurden von 2016/17 bis 2018/19 insgesamt sieben Begleitversuche zum Thema durchgeführt.

Diese randomisierten Versuche (n = 4) erfolgten in den Kulturen Winterweizen (Standort Cunnersdorf, 3 Versuchsjahre) und Wintergerste (Roggenstein und Cunnersdorf, 2 Versuchsjahre).

Geprüft wurden die Varianten (1) Kontrolle, (2) HS-Stabilisiert.

Ergebnisse

Die Prüfung der Effekte möglichst früher stabilisierter Einmalgaben zu Wintergerste (untersucht in Cunnersdorf und Roggenstein 2018 und 2019) sowie vorgezogener Start- und Schossergaben zu Winterweizen (untersucht in Cunnersdorf 2017- 2019) erbrachte folgendes eindeutige Ergebnis:

An beiden Standorten wiesen vor allem die N-Aufnahme-Werte in den jeweils untersuchten Getreidekulturen im Mittel der Versuche überwiegend deutliche Zuwächse auf.

Das Diagramm in Abb. SKWP-5 verdeutlicht dies am Beispiel der N-Aufnahme.

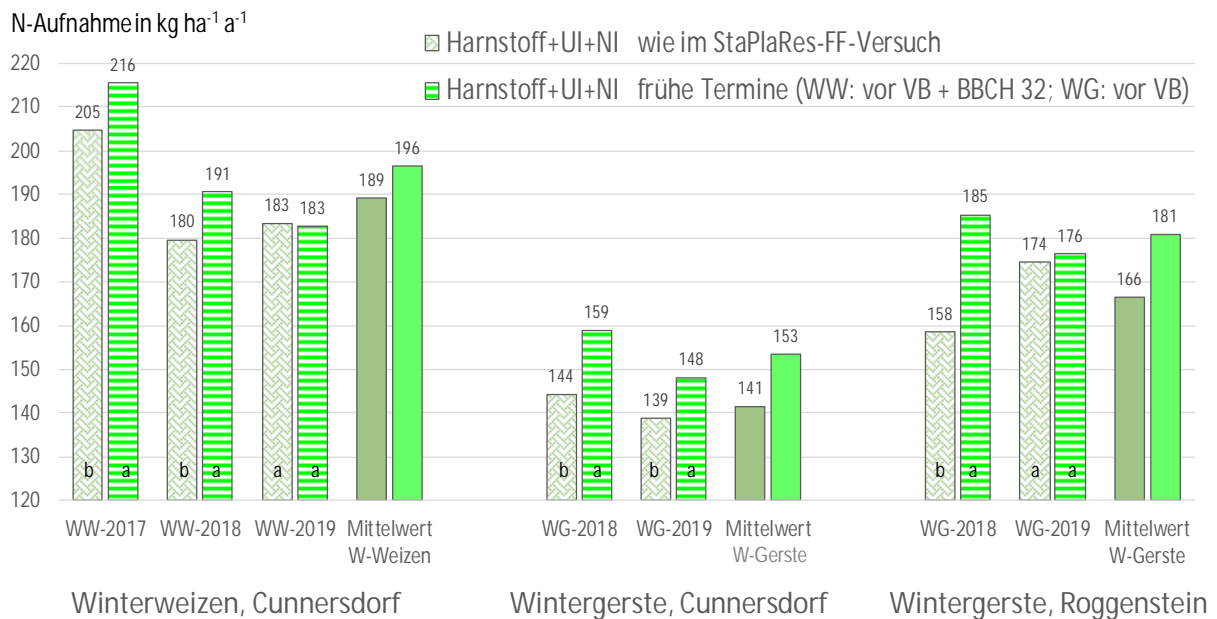


Abb. SKWP-5: Effekt vorgezogener Start- und Schossergaben (zu WW) bzw. Einmalgaben (zu WG) auf die N-Aufnahme im Vergleich zu der im StaPlaRes-Fruchtfolge-Versuch üblichen Terminierung

Die Kornerträge (nicht dargestellt) reagierten insbesondere im Weizen weit weniger stark, d.h. dort spiegelte sich die verbesserte Stickstoffnutzungseffizienz in erster Linie in erhöhten Rohprotein-Gehalten wider. Am Standort Cunnersdorf stiegen die Erträge im Winterweizen im Mittel tendenziell um ca. $1 \text{ dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ bzw. 1,2 %. In der Wintergerste betrug der Zuwachs ca. $1,7 \text{ dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ bzw. 2 %. In Roggenstein stieg der mittlere Ertrag im Zuge der vorgezogenen stabilisierten Einmalgabe (vor VB) stärker an. Der Zuwachs gegenüber der Gabe zu VB lag bei $4 \text{ dt ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ bzw. 3,9 %.

Die N-Aufnahme (Abb. SKWP-5) lag im Winterweizen bei vorgezogenen Düngungsgaben im Mittel der drei Versuchsjahre um ca. $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ bzw. 4 % über dem Ergebnis bei üblicher Gabeterminierung. In der Wintergerste betrug der Zuwachs in Cunnersdorf ca. $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ bzw. 4 %, in Roggenstein sogar ca. $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ bzw. 4 %. Die Steigerung der N-Aufnahme war dabei in 3 der 4 Einzelversuche mit Wintergerste signifikant.

Die Werte verdeutlichen, dass die im StaPlaRes-Fruchtfolge-Versuch ursprünglich präferierte (relativ späte) stabilisierte Gabeterminierung insbesondere für die Düngernutzungseffizienz der Kultur Wintergerste als wenig zielführend einzuschätzen ist. Auch in der Landwirtschaftspraxis wird dem Anpassungspotenzial stabiler Systeme im Zusammenhang mit häufiger werdenden Trockenphasen zunehmend Beachtung geschenkt.

In Auswertung der vielversprechenden Ergebnisse aus den vorliegenden Begleitversuchen und weiterer Erkenntnisse aus dem Projekt StaPlaRes wird SKWP mit seinen stabilisierten Systemen in den nächsten Jahren die Entwicklung standortangepasster Düngungssysteme forcieren. Im Mittelpunkt werden dabei die agrarmeteorologische und bodenkundliche Charakterisierung der Standorte sowie die Übersetzung dieser Analysen in jeweils zielführende Düngungsstrategien stehen.

1.1.5. Arbeiten zur Prozessbetrachtung (AP-4)

Das AP 4 gliedert sich in 4 Teilprojekte (TP): Potenzial NO_3^- -Austrag, Potenzial Denitrifikation, Potenzial NH_3 -Freisetzung und Agrarmeteorologie. Die inhaltlich gegliederten Teilprojekte haben jeweils unterschiedliche Projektpartner einzeln oder zusammen bearbeitet. Die einzelnen N-Verlust-Prozesse (NO_3^- -Auswaschung sowie NH_3 -, N_2O - und N_2 -Emission) wurden im AP 4 detailliert auf verschiedenen räumlichen Ebenen betrachtet. In Labor-, Gewächshaus- und Lysimeterversuchen wurden gezielt praxisrelevante Szenarien im Hinblick auf Verlustbedingungen für NO_3^- , NH_3 , N_2O sowie N_2 konstruiert und untersucht. Darüber hinaus wurde ein Modell zur Abbildung der gemessenen NH_3 -Verluste (Freiland) parametrisiert. Die Simulation von Szenarien und deren Verlustpotenziale zur Ableitung robuster Emissionsfaktoren konnte nicht durchgeführt werden. Zusätzlich erfolgte im AP eine Bereitstellung und Aufbereitung von agrarmeteorologischen Daten für die Auswertung der Feldmessungen der anderen Projektpartner.

Vom 25. Juli 2016 bis 30. Juni 2020 wurden im Arbeitspaket 4 (Prozessbetrachtung) beim Projektpartner SKWP und durch die Unterauftragnehmer BfUL und DWD die in der Tab. SKWP-11 aufgeführten Arbeiten in den Teilprojekten (TP) 4.1, TP 4.3 und 4.4 realisiert. Die Details zu den Methoden sowie die ausführlichen Ergebnisse sind in den aufgelisteten Jahresberichten oder externen Veröffentlichungen einsehbar (siehe Tab. SKWP-11). An dieser Stelle werden daher die Kernergebnisse der TP in Bezug auf den im Projektantrag definierten Forschungsbedarf dargestellt.

Tab. SKWP-11: Durchgeführte Arbeiten im Arbeitspaket 4 im Rahmen des Projektes StaPlaRes

TP	Bereich	Inhalte	Detailbeschreibung in ...	externe Publikation, Präsentation
TP 4.1 TP 4.3	SKWP Labor	chemische Grundanalytik des Oberbodens der 3 Standorte	Jahresbericht 2016	Präsentation auf DBG-Tagung 2017 (Göttingen)
TP 4.3		Bestimmung Ureaseaktivität des Oberbodens der 3 Standorte	Jahresbericht 2016	Präsentation auf DBG-Tagung 2017 (Göttingen)
TP 4.3		AVT mit Oberboden Cunnersdorf bei 20 °C	Jahresbericht 2017	-
TP 4.3		AVT mit Oberboden Cunnersdorf bei 5 °C	Jahresbericht 2017	-
TP 4.1		BMT mit Oberboden 3 Standorte bei 20 °C	Projekttreffen 06/2017	Präsentation auf DBG-Tagung 2017 (Göttingen)
TP 4.3		AVT mit Oberboden 3 Standorte bei 20 °C	Jahresbericht 2018	Präsentation beim Tag der Agrarmeteorologie 2019 (Leipzig) Präsentation am Thünen-Institut 2019 (Braunschweig, AG Agrarklimaschutz)
TP 4.3		AVT mit Oberboden 3 Standorte bei 5 °C	Jahresbericht 2018	Präsentation beim Tag der Agrarmeteorologie 2019 (Leipzig) Präsentation am Thünen-Institut 2019 (Braunschweig, AG Agrarklimaschutz)
TP 4.1		BMT Substratgemische (Boden/Quarzsand) 3 Standorte bei 20 °C	Jahresbericht 2019	-
TP 4.3		AVT Substratgemische (Boden/Quarzsand) 3 Standorte bei 20 °C	Jahresbericht 2019	-

Tab. SKWP-11: Durchgeführte Arbeiten im Arbeitspaket 4 im Rahmen des Projektes StaPlaRes
(Fortsetzung)

Teilprojekt	Bereich	Inhalte	Detailbeschreibung in ...	externe Publikation, Präsentation
TP 4.1 TP 4.3	SKWP Gewächshaus	7 GV (Hafer, Sommergerste, Mais, Sommerraps) Boden Cunnersdorf, verschiedene Verlustbedingungen	Jahresbericht 2017	Präsentation 2017, 2018, 2019 an Universität Leipzig Präsentation auf VDLUFA-Tagung 2017 (Freising)
		Bodenaufbereitung 2017 (je 300 kg FM) der 3 Standorte für GV	Jahresbericht 2017	-
		Anlage Bodenprofil ca. 1,6 m Tiefe Feldversuch Cunnersdorf, chem./physikal. Grundanalytik	Jahresbericht 2017	-
		1 GV (Hafer) mit Substratmischung 3 Standorte	Jahresbericht 2018	Publikation in LOP 02/2020 Präsentation am Thünen-Institut 2019 (Braunschweig, AG Agrarklimaschutz)
		1 Methoden-GV zur Einarbeitung von HS	Jahresbericht 2018	-
		Bodenaufbereitung 2018 (je 300 kg FM) der 3 Standorte für GV	Jahresbericht 2019	-
		1 GV (Sommerweizen) mit Substratmischung 3 Standorte	Jahresbericht 2019	Publikation in LOP 02/2020 Präsentation beim Tag der Agrarmeteorologie 2019 (Leipzig)
TP 4.1		Vergleich Modellierung Wasserhaushalt (CANDY, METVER, ArcEGMO-PSCN, HYDRUS 1D) Standort Cunnersdorf	Abschlussbericht	-

Tab. SKWP-11: Durchgeführte Arbeiten im Arbeitspaket 4 im Rahmen des Projektes StaPlaRes
(Fortsetzung)

Teilpr jekt	Bereich	Inhalte	Detailbeschreibung in ...	externe Publikation, Präsentation
TP 4.1	SKWP Qualifizierungs- arbeiten	Masterarbeit Maxi Boßlet "N-Verlagerung Boden" (Universität Leipzig, 2017)	Jahresbericht 2017	-
TP 4.3		Praktikumsarbeit Frederike Zeibig "Pufferkapazität Boden" (Universität Bonn, 2018)	Jahresbericht 2017	Publikation in GEODERMA eingereicht
TP 4.1		Masterarbeit Julia Weiß "Bodenwasserhaushalt" (Universität Leipzig, 2019)	Jahresbericht 2018	-
TP 4.3		Bachelorarbeit Thomas Ohnemus "Regionalisierung NH ₃ -Emission"(Universität Leipzig, 2019)	Jahresbericht 2019	Präsentation beim Tag der Agrarmeteorologie 2020 (Leipzig), Publikation in GEODERMA eingereicht
TP 4.1	Lysimeter- station Brandis (BfUL)	Anbau Winterweizen 2016/2017	Jahresbericht 2017	-
		Anbau Mais 2018	Jahresbericht 2018	-
		Anbau Winterweizen 2018/2019	Jahresbericht 2019	-
		Modellierung Wasserhaushalt (ArcEGMO-PSCN) Standort Cunnersdorf	Jahresbericht 2019	Modellierungsworkshop 02/2020 (Cunnersdorf)
TP 4.4	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Beschaffung/Einbau/Kalibrierung der Sondentechnik der Fa. SENTEK	Jahresbericht 2016	-
		Beschaffung/Aufbau Wetterstation	Jahresbericht 2016	-
		Datenbereitstellung, Sondenvergleich (Wassergehaltsmessungen)	Jahresbericht 2017, 2018, 2019	-
		Klimabericht 3 Standorte	-	Präsentation beim Tag der Agrarmeteorologie 2019 (Leipzig)

I. TP 4.1 Potenzial Nitrataustrag

In zahlreichen Studien wurde das Umsatzverhalten verschiedener N-Düngerformen im Boden sowie der Einfluss von UI oder NI getestet. Forschungsbedarf wurde zur Wirkung der Einarbeitung von Harnstoff in den Boden sowie zu der Kombination von HS mit UI und NI unter starken Verlustbedingungen sowie praxisnahen Einsatzbedingungen gesehen. Der Oberboden (0-30 cm) der drei Projektstandorte wurde durch eine chemische und physikalische Grundanalytik (Labor Fremdvergabe) hinsichtlich der wesentlichen Bodenparameter charakterisiert. Im Labor (SKWP) erfolgte unter Modellbedingungen (20 °C, optimale Bodenfeuchte) eine Prüfung der Oberböden sowie des später in den Gefäßversuchen verwendeten Substratgemisches (Oberboden/Quarzsand) in dem standardisierten Verfahren eines Bodenmodelltests (BMT) zur Einschätzung der Geschwindigkeit des N-Umsatzes sowie zur Wirkung von Inhibitoren auf die N-Transformation und damit dem Potenzial einer Nitratauswaschungsminderung.

Der Prozess der N-Verlagerung wurde anhand von Gefäß- und Säulenversuchen (SKWP) betrachtet. In Gefäßversuchen mit Sommergetreide in Mitscherlichgefäßen, u.a. mit dem Oberboden der drei Projektstandorte, wurden Effekte der N-Stabilisierung und wurzelnahen Platzierung auf die Parameter N-Auswaschung, Ertrag, N-Entzug und N-Effizienz ermittelt.

In der Lysimeterstation Brandis (BfUL) wurden in ca. 3 m tiefen Lysimetern auf 3 verschiedenen Böden die Effekte der N-Stabilisierung auf die N-Verlagerung, N-Auswaschung, Ertrag, N-Entzug und N-Effizienz untersucht.

Anhand der umfangreichen Daten zum Bodenprofil vom Standort Cunnersdorf und zahlreichen hochaufgelösten Messungen zum Bodenwasserhaushalt wurden, mit verschiedenen Simulationsmodellen, Berechnungen zur Abschätzungen eines Nitratverlagerungspotenzials im Freiland vorgenommen (BfUL, DWD, TI, SKWP).

Arbeiten der SKWP zum Thema Nitrataustrag

Grundanalytik:

Der Oberboden des Versuchsfeldes in Cunnersdorf besitzt den höchsten Sandanteil (44 %), wohingegen der Boden in Bernburg den höchsten Schluff- und Tonanteil (69 % bzw. 23 %) aufweist. Die C_{org} -Gehalte der Böden der Standorte Roggenstein (1,22 %) und Bernburg (1,4 %) liegen deutlich über dem C_{org} -Gehalt in Cunnersdorf (0,96 %). Der Standort Bernburg besitzt den höchsten pH-Wert_{CaCl2} (7,1) und auch die höchste effektive Kationenaustauschkapazität (17,5 cmol⁺/kg).

Bodenmodelltest (BMT) mit den Oberböden der Projektstandorte bei 20 °C:

Im BMT wurden unter standardisierten Laborbedingungen, ohne den Einfluss von Pflanzen, Ergebnisse zur Wirkung von Harnstoff ohne/mit Inhibitor auf die N-Umsatzdynamik (HS-N, NH_4 -N, NO_3^- -N mittels KCl-Extraktion in 1-7 d Auflösung) in den Oberböden ermittelt. Aus den Daten wurden die t_{50} -Werte (d.h. 50 % des eingesetzten HS-N liegen als NO_3^- -N vor) errechnet (Abb. SKWP-6).

Es wurden die Oberböden (0-30 cm) der Projektstandorte untersucht, da dies die Hauptverteilungszone des N-Düngers und die Hauptwurzelzone der Pflanze ist.

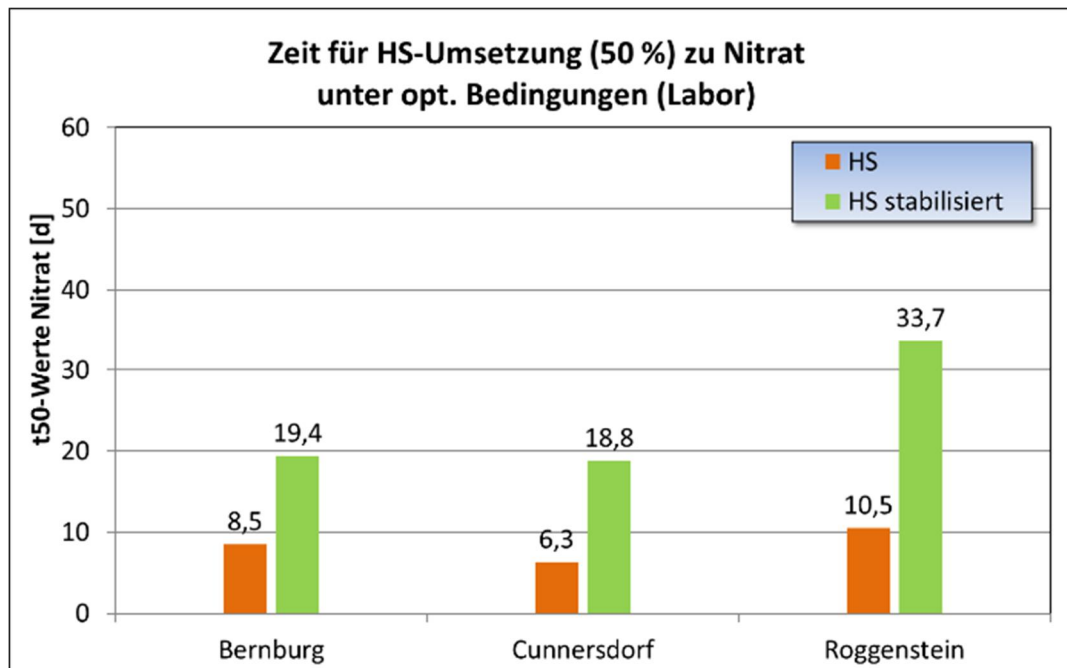


Abb. SKWP-6: Im Labor unter Standardbedingungen (20°C, 50 % nFK) ermittelte t_{50} -Werte (Nitrat)

Der Oberboden vom StaPlaRes-Versuchsfeld am Standort Cunnersdorf wies neben der höchsten Ureaseaktivität auch den geringsten t_{50} -Wert auf. Für den Standort Cunnersdorf waren deshalb die schnellsten N-Umsatzraten zu erwarten. Aufgrund der geringeren Ureaseaktivität zeigten die Standorte Bernburg und Roggenstein anfängliche Verzögerungen der NH_4 -Bildung beim Inhibitoreinsatz (UI) unter Modellbedingungen.

Die ermittelten t_{50} -Werte lagen beim reinen Harnstoffeinsatz für den Standort Cunnersdorf bei 6,3 d, für Bernburg bei 8,5 d und für Roggenstein bei 10,5 d. Der Oberboden vom Standort Roggenstein wies somit den langsamsten Grundumsatz auf. In allen drei Böden war beim Einsatz des stabilisierten Harnstoffdüngers eine Verzögerung der Nitratbildung zu erkennen.

Die Verzögerung bei 20 °C Bodentemperatur lag in den Böden Roggenstein und Cunnersdorf bei einem Faktor von 3 und im Boden Bernburg bei einem Faktor von 2,3. Der Grundumsatz wird durch die Ureaseaktivität, den pH und den Sandanteil geprägt. Die mögliche Verzögerungsleistung kann anhand des Sandgehaltes und pH-Wertes grob abgeschätzt werden.

Demnach führen hohe Sandanteile und niedrige pH-Werte, als Parameter die oft so kombiniert vorzufinden sind, zu längeren Umsatzverzögerungen. Anhand der Auswertung weiterer BMTs ist davon auszugehen, dass unter kühleren Bodentemperaturen diese Verzögerungsleistungen verlängert sind. Insgesamt kann anhand der Laborergebnisse davon ausgegangen werden, dass auf allen drei Standorten eine Stickstoffstabilisierung in Form von Ammonium über mehrere Wochen und somit ein Schutz vor Nitratauswaschung möglich ist. Der native NH_4^+ -Gehalt war in allen drei Böden im BMT erwartungsgemäß sehr gering. Der native NO_3^- -Gehalt lag in allen drei Oberböden (Probenahme 04/2016) auf einem einheitlichen Niveau (ca. 4 mg N/100 g Boden).

BMT mit Substratgemischen (Boden/Quarzsand) bei 20 °C:

Aus pflanzenbaulichen Gründen erfolgte für die Herstellung von Substraten für die Gefäßversuche eine Mischung von Oberboden und Quarzsand (2,5:1). Das N-Umsatzverhalten dieser Substratmischung wurde im BMT unter Standardlaborbedingungen geprüft. Der BMT zeigte, dass die Zumischung von Quarzsand zum Boden in allen drei Substraten insgesamt nur zu eher geringfügigen Veränderungen im N-Umsatz führt. Die Ureaseaktivität geht leicht zurück. Die Auswirkungen auf den Gesamt-HS-Abbau sind aber sehr gering. Die Nitrifikationsrate geht durch die Quarzsandzumischung leicht zurück, was in einer schwachen Erhöhung der t_{50} -Nitrat-Werte erkennbar wird. Die Verlängerung zum Erreichen des t_{50} -Wertes in der Variante HS stabilisiert aufgrund der Quarzsandbeimischung beträgt zwischen 5 (Cunnersdorf, Bernburg) und 9 Tagen (Roggenstein).

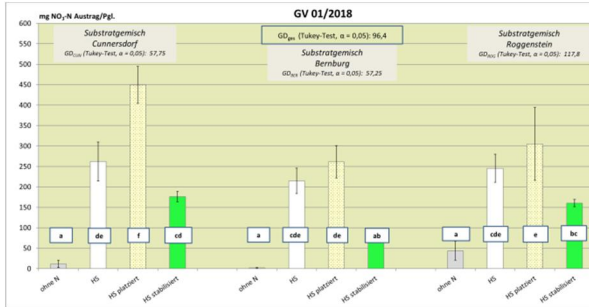
Gefäßversuche:

In allen Gefäßversuchen (GV) wurde eine Mischung von Oberboden und Quarzsand (2,5:1) verwendet. Im ersten Versuchsjahr wurden drei Gefäßversuche im Gewächshaus Cunnersdorf mit der Substratmischung aus Cunnersdorfer Boden unter reinen Nitratverlustbedingungen (Mais) sowie unter kombinierten Ammoniak- und Nitratverlustbedingungen (Gerste, Mais) durchgeführt. Unter reinen Nitratverlustbedingungen wies die Variante Harnstoff platziert eine erhöhte Nitratauswaschung auf. Die Variante Harnstoff stabilisiert führte hier zu einer signifikanten Reduktion der Nitratauswaschung. In den beiden Versuchen mit kombinierten Verlustbedingungen wies die Variante HS platziert immer einen im Vergleich zum Standard (HS) erhöhten Nitrataustrag auf. Durch die Kombination mit Ammoniakverlustbedingungen konnten durch die Platzierung von HS jedoch deutliche Ertrags- und N-Entzugssteigerungen erzielt werden. In Laboruntersuchungen (AVT) mit dem verwendeten GV-Substratgemisch wurde deutlich, dass die Größenordnung der Ammoniakverluste im Gewächshausversuch die der Nitratverluste deutlich übersteigt. Diese Erkenntnis war insbesondere für die Interpretation der Gefäßversuche unter kombinierten Verlustbedingungen wichtig.

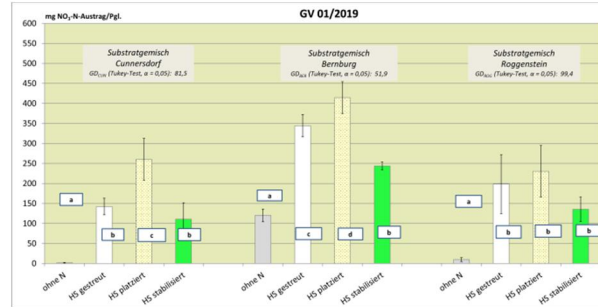
Für weitere Gefäßversuche im zweiten (2018) und dritten Versuchsjahr (2019) wurde von den drei Projektstandorten Oberboden aus 0-30 cm Tiefe gewonnen (Herbst 2017 nach Winterraps, 2018 nach Ernte Winterweizen), ins Gewächshaus Cunnersdorf geliefert und standardisiert aufbereitet. Mit den Böden der drei Standorte konnten zwei Gefäßversuche (Hafer 2018, Sommerweizen 2019) unter kombinierten Ammoniak- und Nitratverlustbedingungen durchgeführt werden (Abb. SKWP-7). Die Werte der Nitratauswaschungen der reinen Substratvarianten (ohne N) zeigen in den beiden Versuchsjahren unterschiedlich hohe Nitratfrachten an (insbesondere für den Standort Bernburg 2019), was in der Bodenprobenentnahme nach Ernte Winterraps begründet ist (schlechte standortspezifische N-Ausnutzung 2017, Ernterückstände Winterraps).

Die Variante Harnstoff stabilisiert führte im Mittel der beiden GV und der Substrate der drei Standorte zu einer Reduktion der Nitratauswaschung um 43 %, währenddessen die Variante HS platziert eine Erhöhung der Nitratauswaschung von im Mittel 27 % zeigte. Unter den starken Verlustbedingungen wies die Variante reiner Harnstoff (gestreut), entsprechend des standortspezifischen Verlustpotenzials für Ammoniak- und Nitratverluste (bezogen auf die Eigenschaften des geprüften Oberbodenmaterials, insbesondere KAK, pH, C_{org}), eine unterschiedlich hohe N-Effizienz auf (12 % Cunnersdorf < 18 % Roggenstein < 26 % Bernburg). Die Steigerungen im Ertrag und N-Entzug (Abb. SKWP-7) durch die geprüften Minderungsvarianten (platziert, stabilisiert) waren dementsprechend auch standortspezifisch überprägt.

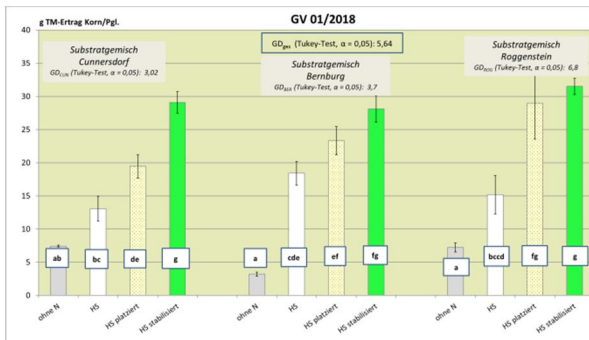
a) Nitratauswaschung Hafer



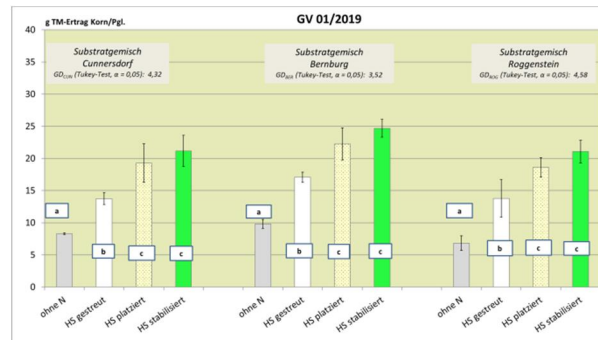
b) Nitratauswaschung Sommerweizen



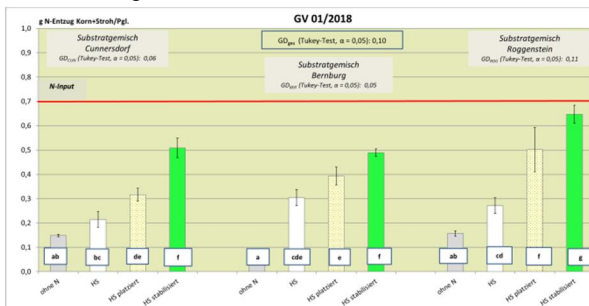
c) Ertrag Hafer



d) Ertrag Sommerweizen



e) N-Entzug Hafer



f) N-Entzug Sommerweizen

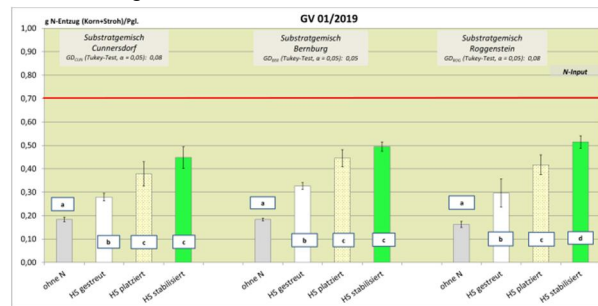


Abb. SKWP-7a-f: Ergebnisse (Nitratauswaschung, Ertrag, N-Entzug) der beiden Gefäßversuche im Hafer (a, c, e) und Sommerweizen (b, d, f) mit den Substraten der drei Projektstandorte

Der Ertrag und die N-Effizienz einer Harnstoffdüngung konnte unter extremen Verlustbedingungen im Mittel der beiden GV und drei Substrate in der Variante HS platziert um 45 % bzw. 18 % und in der Variante HS stabilisiert um 72 % bzw. 34 % gesteigert werden. Damit zeigt sich das Potenzial der beiden Techniken unter kombinierten Verlustbedingungen deutlich.

In einem Methodenversuch (Gefäßversuch ohne Pflanze) wurde geprüft, ob die Art der Einarbeitung von Harnstoff (Depot-Schlitz oder Depot-breit verteilt) prinzipiell zu einer Nitrataustragsminderung im GV führen kann. Durch die Einarbeitung Depot-Schlitz waren tendenzielle Minderungen bis 7 % im Gefäßversuch möglich. Im Vergleich zu den im GV erfassten Minderungseffekten eines Nitrifikationsinhibitors ist diese Wirkung jedoch sehr gering.

Säulenversuche:

Im Rahmen einer Masterarbeit (Maxi Boßlet, Universität Leipzig) wurde das Verlagerungspotenzials der Variante Harnstoff gestreut auf zwei unterschiedlichen Böden (Nähe Cunnersdorf bzw. Bernburg) nach einem 100-jährigen Extremniederschlag anhand von in-situ gestochenen Bodensäulen (Ø 16 cm, Länge 50 cm) geprüft. In den Verlagerungsmustern zeigte sich der prägende Einfluss der Wasserbewegung (bspw. präferentieller Fluss) auf den Vertikaltransport. Ein Vertikalprofil der Ureaseaktivität (bei 5 °C und 20 °C) zeigte, dass der Harnstoffumsatz an beiden Standorten mit der Bodentiefe abnimmt. Die Temperaturabhängigkeit der Harnstoffhydrolyse zeigte sich durch eine Steigerung der Umsatzraten um den Faktor 1,5 – 2,5 bei Temperaturerhöhung um 15 °C. Unter den worst-case-Bedingungen (100-jähriges Starkniederschlagsereignis unmittelbar nach Düngung auf einem wassergesättigten Boden) erfolgte eine HS-Verlagerung von 17-27 % des applizierten Düngern-N bis in eine Tiefe von >40 cm. Der überwiegende Düngeranteil (ca. 75 %) verblieb innerhalb des Oberbodens (bis 40 cm). Die Untersuchung des in-situ Harnstoffabbaus innerhalb der Säulen zeigte, dass bereits innerhalb von 24 h ein schneller HS-Abbau zu Ammonium von über 50 % des oberflächlich applizierten Harnstoffs erfolgt (Ø 12 °C Bodentemperatur). Der schnelle Abbau von HS in die immobile Ammonium-Form wirkt einer Verlagerung zunehmend entgegen. Unter Berücksichtigung eines anhaltenden HS-Abbaus ergibt sich daraus eine rasch abnehmende Mobilität des initial als Harnstoff applizierten Dünger-N im Vergleich zum mobilen Nährstoffen (i.e. Nitrat) mit gleichbleibend hoher Mobilität. Eine Auswaschung von Harnstoff ist für die untersuchten Standorte nicht zu erwarten.

Arbeiten des BfUL (Unterauftragnehmer) zum Thema Nitrataustrag

Auf den monolithisch gestochenen Lysimetern (3 m tief, 1m²) und Sickerwassersammlern (1 m tief, 1 m² Fläche) der Station Brandis wurden die Effekte der N-Stabilisierung auf drei Bodentypen (3 Lysimeter mit Braunerde-Pseudogley, 3 Sickerwassersammler mit Braunerde-Fahlerde, 3 Sickerwassersammler mit Parabraunerde-Braunerde) untersucht. Die Bodentypen sind typisch für die Umgebung des Projektstandortes Cunnersdorf. Pro Bodentyp wurde jeweils auf einem Lysimeter bzw. Versickerungssammler eine ungedüngte Kontrolle, eine HS-Düngung und eine Düngung HS stabilisiert in der Fruchtfolge Winterweizen (2016/2017) – Silomais – Winterweizen geprüft. Die Fruchtfolge orientierte sich am umliegenden Landwirtschaftsbetrieb und wich somit von der Fruchtfolge auf den StaPlaRes-Versuchsfeldern ab. Pro Bodentyp standen drei Lysimeter bzw. Sickerwassersammler zur Verfügung. Die Variante HS platziert konnte nicht geprüft werden, da mechanische Eingriffe ins Bodengefüge eines Lysimeters vermieden werden sollen. Es gab anlagebedingt keine Wiederholungen in den Prüfvarianten. Zwei der Untersuchungsjahre (2018, 2019) waren durch eine extreme Trockenheit in der Vegetationsperiode gekennzeichnet. Dadurch kam es auf den Lysimetern/Sickerwassersammlern zur Ausbildung sehr heterogener Pflanzenbestände, welche nicht für eine Ertragsauswertung geeignet waren. Nach drei Untersuchungsjahren lassen sich noch keine veränderten Nitratgehalte im Sickerwasser der Lysimeter bzw. Sickerwassersammler feststellen. Die Untersuchungen werden in einem bilateralen Projekt BfUL-SKWP fortgeführt.

Aufgrund der schlechten Bestandesetablierung wurde, entgegen der im Projektantrag beschriebenen Idee, das Wasserhaushaltsmodell ARCEGMO-PSCN nicht für eines der Lysimeter oder Versickerungssammler, sondern für den Projektstandort Cunnersdorf angewandt.

Gemeinsame Arbeiten von BfUL, DWD, TI und SKWP zum Thema Nitrataustrag

Am Projektstandort Cunnersdorf wurden in der Nähe des StaPlaRes-Versuchsfeldes für detailliertere Auswertungen zum Nitrataustrag, zur Ammoniak-Freisetzung und zur Bodenfeuchtedynamik ein Bodenprofil (Fahlerde-Pseudogley aus Sandlöss über Geschiebelehm; 1,6 m tief) im Herbst 2017 angelegt und die relevanten Bodenparameter ermittelt. Die zur Erfassung der Bodenfeuchtedynamik auf dem Versuchsfeld eingesetzte Messtechnik (cosmic-ray Sonde, FD-Sonde, grav. Messung) wurde in einer Masterarbeit (Julia Weiß, Universität Leipzig) vergleichend bewertet und die Messwerte wurden für eine Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell HYDRUS 1-D genutzt.

In einer Praktikumsarbeit (Alice Künzel, DWD/Universität Potsdam) wurden erste Prognosen der Sickerwasserbildung für alle drei Projektstandorte erstellt. Diese Prognosen wurden im „StaPlaRes-Klimabericht“ des DWD weiter präzisiert. Für diese Auswertungen wurden langjährige Aufzeichnungen (Zeitraum 1961 – 2018) von DWD-Wetterstationen in der Nähe der drei Projektstandorte genutzt. Die Auswertungen zeigten, dass in den Regionen Cunnersdorf und Bernburg die Monate Juli, August und Oktober selbst im Mittel über 20 Jahre sickerwasserfrei sind, während in der Region Roggenstein in jedem Monat des Jahres Bodenwasser aus der betrachteten Wurzelzone versickert. In der Jahressumme sind dies dort mehr als 220 mm, während dies in Bernburg nur ca. ein Siebtel und in der Region Cunnersdorf weniger als ein Drittel der Summe ist. In Bernburg gibt es nach den DWD-Berechnungen im Jahr nur etwa 6 bis 8 Tage mit Sickerwasserbildung. Diese konzentrieren sich auf die Wintermonate und schon zu Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr ist das Risiko für Sickerwasserverluste mit 2 bis 3 Tagen im März vergleichsweise gering. In der Region Cunnersdorf gibt es im März 7 bis 8 Sickerwassertage. In der Region Roggenstein muss davon ausgegangen werden, dass im Mittel Sickerwasserbildung zu Vegetationsbeginn der Normalfall ist. Der Klimabericht wurde allen Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Aufgrund der umfangreichen Messwerte der Bodenfeuchte (2017-2019) und der detaillierten Bodenprofilbeschreibung am Standort Cunnersdorf wurden die vier unterschiedlichen Wasserhaushalts- bzw. Stoffumsatzmodelle ARCEGMO-PSC (BfUL), METVER (DWD), CANDY (TI) und SIMPEL (SKWP) zur Beschreibung der Bodenwasser- und Sickerwasserdynamik im Projektzeitraum eingesetzt. Die Modellierungsarbeiten wurden in einem Workshop (02/2020) diskutiert und in einer vergleichenden Übersichtsdarstellung zusammengefasst. Die Übersichtsdarstellung sowie die Vorträge wurden in die allen Projektpartnern zugängliche cloud-Anwendung des TI integriert. Aus der Ensemble-Modellierung mit den vier unterschiedlichen Wasserhaushalts- bzw. Stoffumsatzmodellen wurde ersichtlich, dass eine mittlere Sickerwasserbildung (in 2 m Profiltiefe) am Standort Cunnersdorf von ca. 222 mm (s=150 mm) im gesamten Projektzeitraum möglich war. Nitratausträge waren deshalb im Projektzeitraum eher unwahrscheinlich und ggf. nur über einen Zwischenabfluss (bspw. Drainage; nicht in den Modellen abbildbar) zu erwarten.

II. TP 4.2 Potenzial Denitrifikation

Die Arbeiten zum Potenzial Denitrifikation sind im Berichtsteil des Projektpartners ZALF (Prof. Augustin; Kap. 1.4) separat beschrieben.

III. TP 4.3 Potenzial Ammoniakfreisetzung

Forschungsbedarf wurde im Projektantrag hinsichtlich zur Wirkung der Einarbeitung von Harnstoff in den Boden sowie zu der Kombination von HS mit UI und NI auf die Ammoniakverluste unter starken Potenzialbedingungen definiert. Ansätze zur Übertragbarkeit von NH_3 -Emissionspotenzialen auf dt. Ackerbauregionen und kulturartenspezifische Düngestrategien waren bisher nicht bekannt.

Im Labor (SKWP) erfolgte unter Modellbedingungen (optimale Bodenfeuchte) eine Prüfung der Oberböden sowie des später in den Gefäßversuchen verwendeten Substratgemisches (Oberboden/Quarzsand) hinsichtlich der Ureaseaktivität sowie in dem standardisierten Verfahren Ammoniakverflüchtigungstest (AVT) zur Einschätzung des Ammoniakverlustpotenzials.

Das Potenzial der NH_3 -Minderung der beiden Techniken (platziert, stabilisiert) wurde anhand von Gefäßversuchen (SKWP) untersucht. Anhand einer Praktikums- und einer Bachelorarbeit wurde eine Karte zur Regionalisierung der Ammoniakverlustpotenziale von Ackerböden in Deutschland erstellt (SKWP). Anhand von relevanten Witterungsparametern konnte eine Abschätzung der Ammoniakverlustbedingungen zu Düngungsterminen von Winterweizen erfolgen (DWD/SKWP).

Zu Projektbeginn wurde von Prof. A. Pacholski (damals Univ. Lüneburg, dann Eurochem Agro, aktuell Thünen Institut) Modellansätze zur Ammoniakfreisetzung nach Harnstoffdüngung vorgestellt. Aufgrund der geringen Ammoniak-Emissionen unter Praxisbedingungen (Freiland Projektstandorte) war eine Weiterentwicklung Modellierung (Prof. Pacholski) nur eingeschränkt möglich.

Eine zusammenfassende Auswertung des Witterungsgeschehens erfolgte im „Klimabericht“ (DWD).

Arbeiten der SKWP zum Thema Ammoniakfreisetzung

Ureaseaktivität:

Die Bestimmung der Ureaseaktivität (nach Kandeler & Gerber, 1988) der Böden der Versuchsstandorte unter Modellbedingungen diente der Beurteilung der Böden in Bezug auf ihr Harnstoff-Hydrolyse-Vermögen und ihr Ammoniakverlustpotenzial nach einer Harnstoffdüngung. Der Oberboden vom Standort Cunnersdorf (Probenahmezeitpunkt zur Versuchsanlage im April 2016) wies eine höhere Ureaseaktivität als die anderen Standorte auf. Allerdings weisen SKWP-Messreihen (n=89) mit verschiedenen Böden darauf hin, dass die Ureaseaktivität, die auch in ein und demselben Boden sehr variabel sein kann, kein sicheres Kriterium zur Beurteilung des Ammoniakverlustpotenziales eines Standortes darstellt.

Ammoniakverflüchtigungstest (AVT) mit den Oberböden der Projektstandorte bei 5 °C und 20 °C:

Im Ammoniakverflüchtigungstest (AVT) wurden unter standardisierten Laborbedingungen bei 5 °C sowie 20 °C, ohne den Einfluss von Pflanzen, Ergebnisse zur Wirkung von Harnstoff-Dünger ohne/mit Inhibitor auf die NH_3 -Emissionen (Erfassung NH_3 -N mittels H_2SO_4 -Fallen in 2-4 d Auflösung) ermittelt. Das Ammoniakverlustpotenzial der drei Standorte ist entsprechend ihrer Bodeneigenschaften stark verschieden. Der Einsatz eines Ureaseinhibitors konnte die NH_3 -Emissionen auf allen drei Standorten deutlich, insbesondere in den ersten Tagen nach der Düngung, reduzieren (Abb. SKWP-8). Durch die Verminderung der Bodentemperatur von 20 °C auf 5 °C konnte unter den gegebenen Modellbedingungen (extremes und anhaltendes NH_3 -Verlustpotenzial) eine Minderung der NH_3 -Verluste nach HS-Düngung von ca. 94 % am 3. Tag nach der HS-Düngung auf allen drei Böden erzielt werden (Abb. SKWP-9). Der starke Effekt einer verringerten Bodentemperatur auf die NH_3 -Emissionen nach einer HS-Düngung wurde von SKWP bereits vor Projektabschluss in den Düngeempfehlungen zur zeitigen Anwendung der nitrifikationsinhibierten Produkte aufgegriffen.

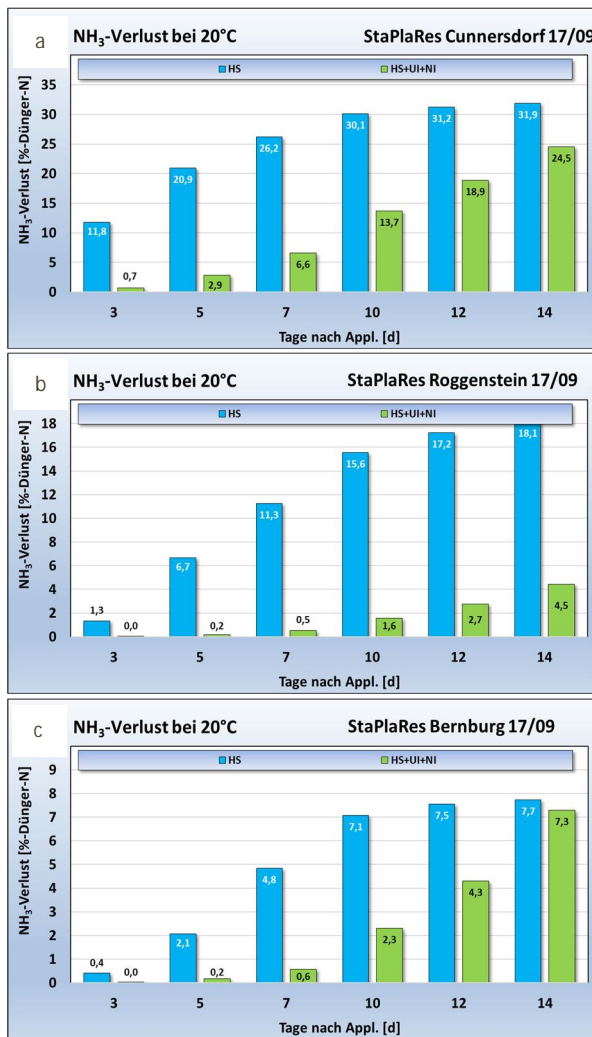


Abb. SKWP-8a-c: NH₃-Verluste im AVT bei 20 °C für die Standorte Cunnersdorf (a), Roggenstein (b) und Bernburg (c)

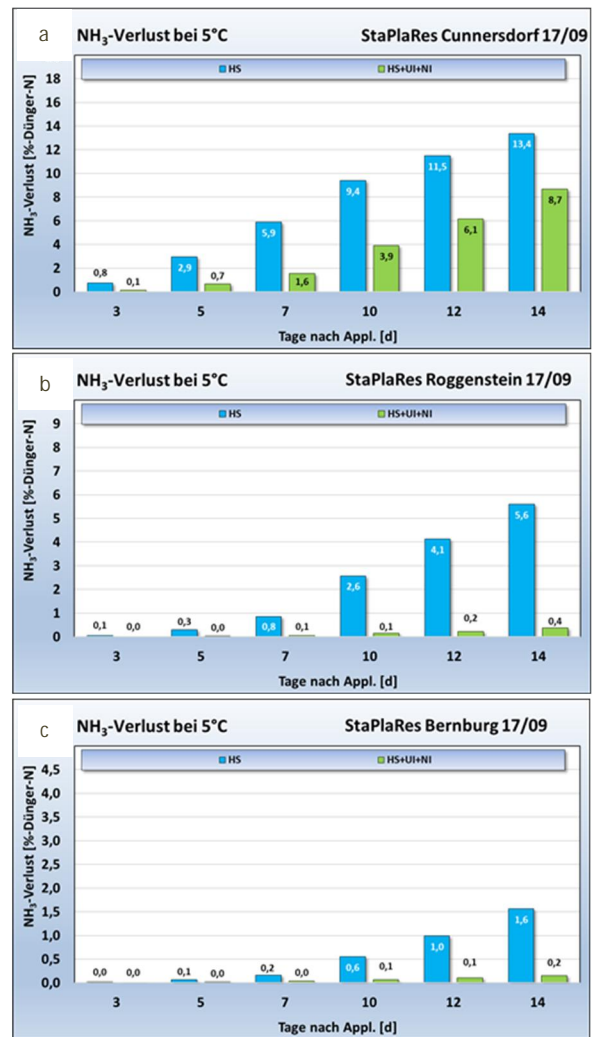


Abb. SKWP-9a-c: NH₃-Verluste im AVT bei 5 °C für die Standorte Cunnersdorf (a), Roggenstein (b) und Bernburg (c)

AVT mit Substratgemischen (Boden/Quarzsand) bei 20 °C

Pflanzenbaulich bedingt ist die Zumischung von Quarzsand in den Gefäßversuchssubstraten (Mischung von Oberboden und Quarzsand 2,5:1) notwendig. Das Substrat zeigte eine leicht verringerte Ureaseaktivität. Die Zumischung hat auch eine Absenkung der Kationenaustauschkapazität (KAK) zur Folge. Dies führt zur Erhöhung des NH₃-Verlustpotenzials (Abb. SKWP-5). Besonders in dem Bereich der KAK unter 10 cmol/kg wird eine sehr starke Zunahme der NH₃-verlustpotenziale erkennbar. Die Steigerung des NH₃-Verlustpotenzials ist besonders für das Substrat Roggenstein ausgeprägt. Während die Substrate der Standorte Cunnersdorf und Bernburg mit einer Verluststeigerung von 15 bzw. 11 % Dünger-N relativ ähnliche Bedingungen anzeigen, wurde für das Substrat Roggenstein eine Verluststeigerung von ca. 38 % Dünger-N aufgrund der Quarzsandzumischung im Modellversuch (AVT) ermittelt. Das eingesetzte GV-Substrat bietet somit insgesamt ein hohes Potential zum Nachweis von Effekten beim UI-Einsatz im Gewächshausversuch. Die im Gefäßversuch geprüften Substratmischungen entsprechen durch die Quarzsandbeimischung nicht den realen Bodenbedingungen am Freilandstandort.

Gefäßversuche

In drei Gefäßversuchen (Mais, Hafer) zur Prüfung der Verlustminderung der beiden Techniken (HS platziert, HS stabilisiert) unter reinen Ammoniakverlustbedingungen wurde eine Substratmischung von Oberboden (Cunnersdorf) und Quarzsand (2,5:1) verwendet. Durch die verwendete Substratmischung mit geringer KAK, eine Oberflächendüngung auf ein feuchtes Substrat, eine fehlende Einarbeitung des Düngers sowie durch das Aufstellen von Ventilatoren zur Erzeugung eines Luftstromes über der Gefäßoberfläche konnten sehr starke Ammoniakverlustbedingungen erzeugt werden. Unter diesen GV-Bedingungen lag die N-Effizienz von HS im Mittel bei 42 %. Der Ertrag und die N-Effizienz einer Harnstoffdüngung konnte im Mittel der beiden GV in der Variante HS platziert um 53 % bzw. 46 % und in der Variante HS stabilisiert um 48 % bzw. 40 % gesteigert werden. Damit zeigt sich das Potenzial der beiden Techniken, insbesondere der Platzierung von HS im Boden, unter reinen NH_3 -Verlustbedingungen.

Arbeiten zur Regionalisierung von Ammoniakverlustpotenzialen deutscher Ackerböden

Im Rahmen einer Praktikumsarbeit (Frederike Zeibig, Universität Bonn) und einer Bachelorarbeit (Thomas Ohnemus) wurde an der Thematik „Regionalisierung von Ammoniakverlustpotenzialen auf Ackerflächen Deutschlands“ gearbeitet.

Als wesentliche Steuergrößen für Ammoniakverluste nach einer Harnstoffdüngung wurden die Bodenparameter effektive KAK, initialer pH und C_{org} des Oberbodens ermittelt. Mittels eines neu erstellten Modells (PAL1 = Potential Ammonia Loss, Abb. SKWP-10) wurde eine Karte (Abb. SKWP-11) der potenziellen Bodenammoniakverluste nach Harnstoffdüngung für deutsche Ackerflächen erstellt. Die Arbeiten wurden zur Publikation in der Zeitschrift GEODERMA eingereicht. Der Artikel befindet sich aktuell unter Begutachtung.

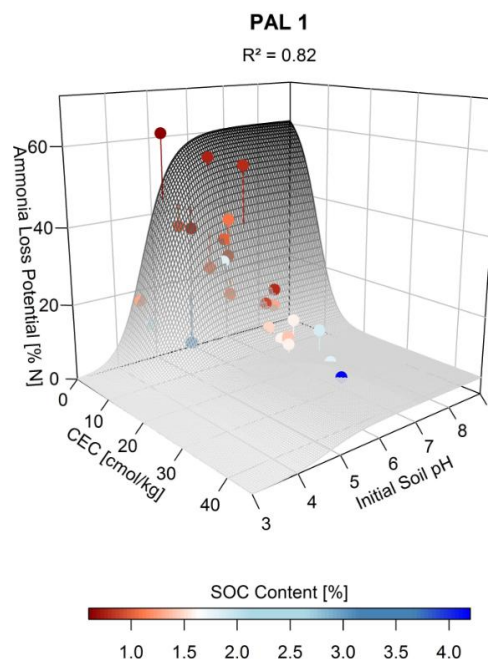


Abb. SKWP-10: Ammoniakverlustpotenzial des Bodens in Abhängigkeit von der effektiven Kationenaustauschkapazität (CEC), organ. Kohlenstoffgehaltes (SOC) und des Ausgangs-pH-Wertes vor einer HS-Applikation

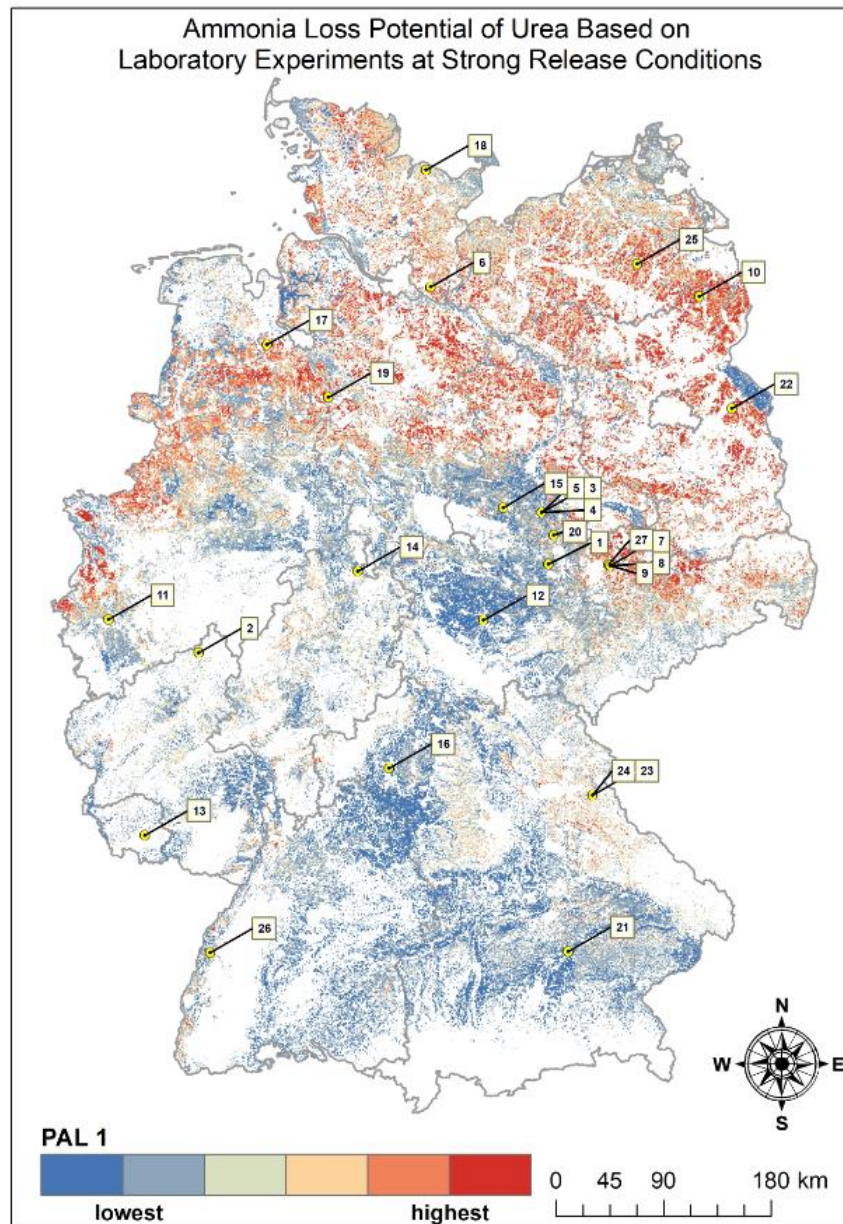


Abb. SKWP-11: Mit Hilfe des Modells PAL 1 ermittelte Ammoniakverlustpotentiale von Böden dt. Ackerflächen (Zahlen in der Karte kennzeichnen die Standorte der für die Laboruntersuchungen sowie Modellentwicklung verwendeten Böden; u.a. Standorte 7, 8, 9=Cunnersdorf, 3, 4, 5=Bernburg, 23, 24=Roggenstein)

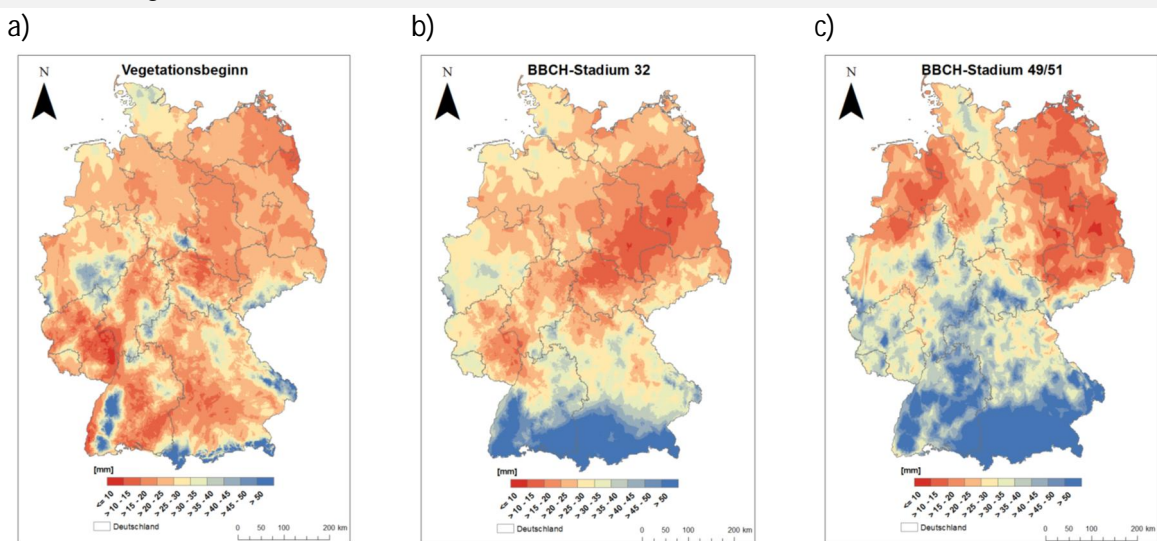
Die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Bodenammoniakverlustpotenziale nach Harnstoffdüngung zeigt, dass i.W. nur Regionen nördlich der Mittelgebirgsschwelle geeignete edaphische Bedingungen aufweisen, die zu deutlich erhöhten Ammoniakemissionen führen. Die SKWP-Arbeiten zur Regionalisierung von Ammoniakverlustpotenzialen können eine Vorlage für weitergehende Arbeiten zur Ableitung standortspezifischer Emissionsfaktoren für Deutschland (Thünen-Institut, Arbeitsbereich Emissionsinventare, Prof. Flessa, Prof. Pacholski) bilden

Gemeinsame Arbeiten von DWD und SKWP zum Thema Ammoniakfreisetzung

Durch den DWD erfolgte für die drei Projektstandorte die Datenbereitstellung (Niederschlag, Windgeschwindigkeit in 0,2 m und 2 m Höhe, Lufttemperatur sowie Luftdruck in 15 min. Auflösung) für die Berechnung der Ammoniakemissionen (kg/ha) aus den Freilandmessungen.

Für die Bearbeitung der Thematik „Regionalisierung von Ammoniakverlustpotenzialen“ im Rahmen der Bachelorarbeit (Thomas Ohnemus) wurden umfangreiche Rasterdatensätze (Tageswerte der Temperatur und des Niederschlags, 1 km² Auflösung) über das Climate Data Center (CDC) des DWD zur Verfügung gestellt. Anhand der Ermittlung typischer Düngungstermine für Winterweizen (3-Gaben-Strategie: (1) Vegetationsbeginn, (2) BBCH 32; (3) BBCH 49/51) wurden in der o.a. Bachelorarbeit die regionale Verteilung von Niederschlag und Lufttemperatur dargestellt (Abb. SKWP-12).

Niederschlag



Lufttemperatur

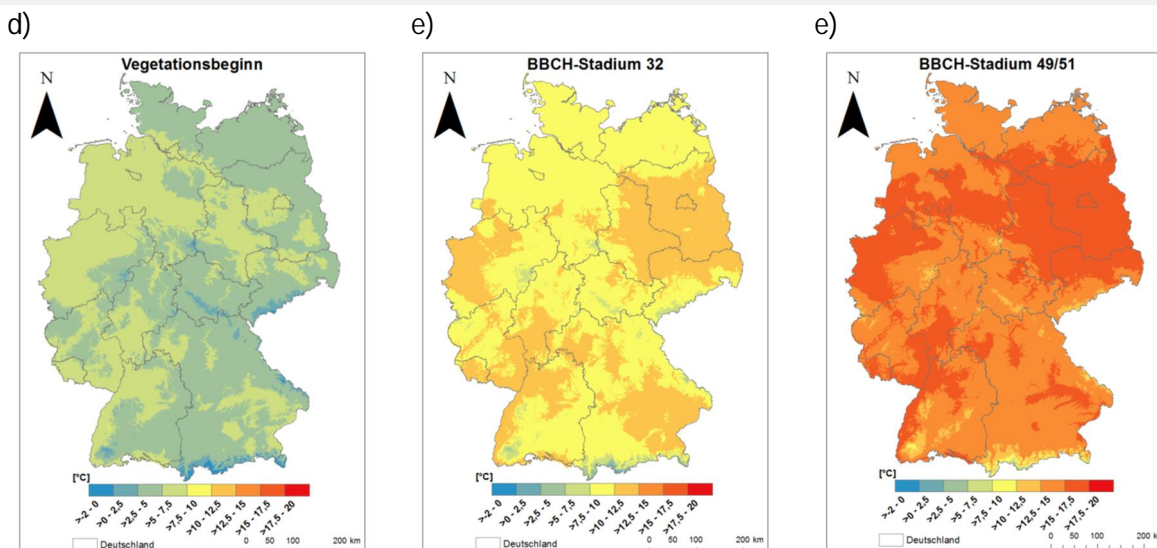


Abb. SKWP-12: Niederschlagssummen (obere Reihen) und Durchschnittstemperaturen (untere Reihe) der Jahre 2015 – 2019 für anhand des Standortes Cunnersdorf exemplarisch gewählte Düngungszeiträume (jeweils +/- 7 d um den Vegetationsbeginn, das BBCH-Stadium 32 und das BBCH-Stadium 49/51) von Winterweizen

Durch die Darstellung der Witterungsparameter (Abb. SKWP-12). konnte eine erste Abschätzung der Ammoniakverlustbedingungen zu diesen Düngungsterminen, über die rein edaphische Regionalisierung hinaus, erfolgen. Die Lufttemperatur und die Niederschlagsmengen erhöhen sich vom Vegetationsbeginn zum BBCH-Stadium 49/51. Die Temperaturentwicklung ist relativ homogen verteilt mit einer Temperaturzunahme für alle Flächen von etwa 5 °C zwischen den Düngungszeiträumen. Die wärmeren und kühleren Flächen zeigen über alle Zeiträume eine ähnliche räumliche Verteilung. Die Niederschlagsverteilung im Zuge der Vegetationsentwicklung ist allerdings deutlich heterogener. Der allgemeinen Erhöhung der Niederschlagssummen steht eine Abnahme auf einigen Flächen vom Vegetationsbeginn zum BBCH-Stadium 49/51 gegenüber.

Auch diese Betrachtung der relevanten Witterungsparameter bietet eine Methodik-Vorlage für weitergehende Arbeiten zur Ableitung standortspezifischer Emissionsfaktoren (Thünen-Institut, Arbeitsbereich Emissionsinventare, Prof. Flessa, Prof. Pacholski), bspw. zu den Düngungsterminen der ackerbaulichen Leitkulturen in Deutschland. Die Regionalisierung edaphischer und klimatischer Bedingungen ist notwendig, um sich den tatsächlichen Ammoniakemissionen anzunähern, da einfache Emissionsfaktoren nach EMEP/EEA (2016) diesen Anforderungen nicht gerecht werden.

Arbeiten von Prof. Pacholski (aktuell Thünen Institut) zum Thema Ammoniakfreisetzung

Insgesamt unterliegen N-Verluste nach N-Dünger-Applikation starken witterungs-, boden- und kulturartabhängigen Variationen. Ergänzende Aussagen können durch die Verwendung dynamischer oder empirischer Simulationsmodelle gewonnen werden (Ni et al. 2014). Für NH₃-Emissionen nach Harnstoff-Düngung liegen bereits dynamische Simulationsmodelle vor (Genermont et al. 1997, Pacholski et al. 2007). Forschungsbedarf wurde hier hinsichtlich der Erprobung unter mitteleuropäische Bedingungen gesehen. Alle an den drei StaPlaRes-Versuchsstandorten gemessenen Parameter (Labor, Freiland) stehen dem Projektpartner Prof. Pacholski (jetzt TI) über die cloud-Anwendung des TI zur Verfügung.

Die Datensätze (NH₃-Freiland-Messungen) der Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019 ergaben allerdings insgesamt sehr geringe Ammoniak-Emissionen. Die auf dieser Datenbasis durch den Projektpartner geplanten und durchgeführten Modellläufe, Validierungen und Anpassungen gaben bislang keine Anhaltspunkte für eine weitere Schärfung oder Anpassungen der letzten Modellversion des Bearbeiters (Pacholski et al. 2017). Diese wurde im Laufe des ersten StaPlaRes-Projektjahres entwickelt und publiziert.

Aktuell laufen am TI Serienauswertungen europäischer NH₃-Messprojekte unter Einbeziehung der StaPlaRes-NH₃-Daten. Gleichzeitig hat der Bearbeiter die fachliche Leitung und Weiterentwicklung des Themas unter dem Dach des BMEL (TI) übernommen. Am Thünen-Institut laufen diesbezüglich ab 2020 bzw. 2021 zwei Großprojekte (WIN-N und NH₃-MIN), die die Datenbasis für eine weitergehende Anpassung vorhandener NH₃-Simulations- und Prognosemodelle verbessern soll.

IV. TP 4.3 Agrarmeteorologie

Modellgestützte Empfehlungen zur Terminierung und Düngemenge können im Zeichen des Klimawandels wesentlich zu einer nachhaltigen Anwendung von Harnstoff-Düngern beitragen. So wird die Höhe der NH_3 -Verluste durch Wetter, Witterung und bestimmte meteorologische Muster stark beeinflusst (Sommer 2004).

Von besonderem Interesse sind Veränderungen in der Häufigkeit, Intensität und Dauer extremer Wetter- und Klimaereignisse (Hänsel 2009).

Zur statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit meteorologischer Muster in Verbindung mit Bodenwasserzuständen und Kulturartenentwicklung als Steuergrößen der N-Verlustprozesse nach einer N-Düngung ist bisher wenig bekannt.

Klimabericht für die StaPlaRes-Versuchsstandorte:

Für die drei Standorte wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) spezifische agrarmeteorologische Analysen (Modell BEKLIMA) durchgeführt. Schwerpunkte waren die zusammenfassende Auswertung des Witterungsgeschehens und Berechnungen zur statistischen Wiederkehrwahrscheinlichkeit meteorologischer Muster. Die Ergebnisse wurden in einem „Klimabericht“ zusammengefasst und allen Projektpartnern übergeben (s. Anhang DWD I).

Standortbezogene agrarmeteorologische Analyse des Untersuchungszeitraums:

Auf Basis der Messwerte genormter DWD-Wetterstationen im Umkreis der Versuchsstandorte (Bernburg -> Bernburg; Cunnersdorf -> Leipzig-Schkeuditz; Roggenstein -> Augsburg) wurde ferner eine vergleichende Detailanalyse zu Unterschieden zwischen den drei Regionen und Abweichungen vom langjährigen Mittel durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen wurden in einem „Fachlichen Abschlussbericht des DWD“ zusammengefasst (s. Anhang DWD II).

Weiterführendes Projekt StaPrax-Regio:

Der DWD ist maßgeblich an der Erstellung der Projektskizze StaPrax-Regio (N-Stabilisierung in der Düngepraxis: Optimierung durch Regionalisierung auf Basis meteorologisch-edaphischer Parameter) beteiligt, die im 1. Quartal 2020 bei der Deutschen Innovationspartnerschaft Agrar des BMEL eingereicht worden ist. In dem geplanten Projekt sollen die in StaPlaRes gewonnenen Erkenntnisse zur agrarmeteorologischen Dynamik und Entwicklung in ihrer Bedeutung für das Stickstoffverlustgeschehen und die Effizienz der N-Düngung im Rahmen standortangepasster stabiler Dünungssysteme umgesetzt werden.

Unabhängig davon werden die agrarmeteorologischen Analysen und Ableitungen des DWD auch aktuell bereits in die aktuellen Düngeempfehlungen und Beratungsmodule der SKWP integriert.

1.1.6. Verwertung SKWP (AP-6)

Auf die umfangreichen Aktivitäten der SKWP hinsichtlich der Verwertung der Ergebnisse in der Endphase des Verbundvorhabens StaPlaRes wird in den Kapiteln 6 und 7 detailliert eingegangen.

1.1.7. Literatur / Referenzen zum Abschlussbericht der SKWP

- EMEP/EEA. (2009). *Air pollutant emission inventory guidebook. Part B: sectoral guidance chapters Chapter 4.D: Agriculture-Crop production and agricultural soils* (Publications Office of the European Union, Hrsg.), Luxemburg
- EMEP/EEA. (2016). *Air pollutant emission inventory guidebook*. (Publications Office of the European Union, Hrsg.); <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- Genermont S; Cellier P (1997): A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 88(1-4), 145-167.
- Hänsel S (2009): *Saxon Precipitation Characteristics – trends of extreme precipitation and drought*. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg, Cuvillier, Göttingen, 269 pp.
- Hutchinson GL, Mosier AR (1981): Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Science Society of American Journal* 45: 311-316.
- IPCC (2006). *Guidelines for integration greenhouse gas inventories*. IPCC. Available at: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_1_Overview.pdf; 2006.
- IPCC (2019): *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- Kandeler E, Gerber, H (1988): Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biology and Fertility of Soils* 6(1): 68-72; <https://doi.org/10.1007/BF00257924>
- Ni K, Pacholski A, Kage H (2014): Ammonia volatilization after application of urea to winter wheat over 3 years affected by novel urease and nitrification inhibitors, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 197:184-194.
- Pacholski A (2016). Calibrated Passive Sampling - Multi-plot field measurements of ammonia emissions with a combination of dynamic tube method and passive samplers. *J. Visualized experiments* 109, <http://dx.doi.org/10.3791/53273>.
- Pacholski A, Doehler J, Schmidhalter U, Kreuter T (2017). *Scenario modeling of ammonia emissions from surface applied urea under temperate conditions: Application effects and model comparison*. *Nutr Cycl Agroecosyst* 110, 177–193.
- Sommer SG, Schjoerring JK, Denmead OT (2004): Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. *Adv. Agron.* 82, 557–622. DOI: 10.1016/S0065-2113(03)82008-4 (2004).

1.2. TUM – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.2.1 FF-Versuch am Standort Roggenstein (AP-1)

A) Versuchsbeschreibung Roggenstein (TUM)

Im August 2016 wurde der Feldversuch „StaPlaRes“ in Roggenstein (Bayern) angelegt. Analog zu den Versuchsstandorten Cunnersdorf (Sachsen) und Bernburg (Sachsen-Anhalt) bestand der Versuch aus einem lateinischen Quadrat mit 3 x 16 randomisierten Versuchspartzen (siehe Abb. TUM-1).

In jedem Versuchsjahr wurden die drei Fruchtarten Winterraps, Winterweizen und Wintergerste angebaut, wovon jeweils in einer Fruchtart NH₃- und N₂O-Emissionen gemessen wurden. Geprüft wurden die Wirkungen von stabilisiertem Harnstoffdünger (mit Urease- und Nitrifikationsinhibitor, Variante „Stabilisiert“) und wurzelnah platziertem Harnstoffdünger (technische Umsetzung durch Düngerstreueraufsatz der Firma Rauch Landmaschinenfabrik GmbH, Variante „Platziert“) auf N-Verluste und N-Bilanzen (N-Entzüge der Pflanzen, N-Auswaschungspotential des Bodens, NH₃-Verluste, N₂O-Verluste).

Als Referenz wurden ein oberflächlich aufgebracht Harnstoffdünger (Variante „Gestreut“) sowie eine ungedüngte Kontrollvariante (Variante „Kontrolle“) geprüft. Ziel der Untersuchungen sind Aussagen zum Einfluss der Düngevarianten der N-Effizienz sowie eine Senkung der Dünger-N-Verluste. Abb. TUM-2 zeigt ein Luftbild des StaPlaRes-Versuchs am Standort Roggenstein aus dem Jahr 2018.

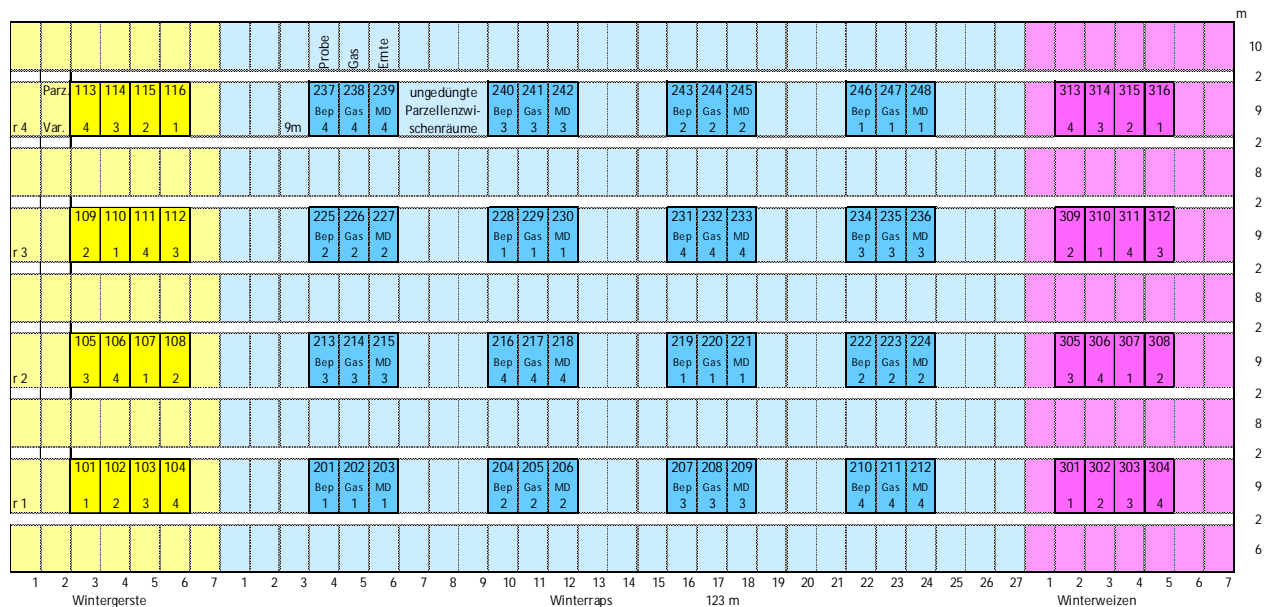


Abb. TUM-1: Parzellenplan aus dem Jahr 2016/2017, Standort Roggenstein.



Abb. TUM-2: Luftbild des StaPlaRes-Versuchs im Jahr 2018, Standort Roggenstein.

B) Standort Roggenstein (TUM)

Der Standort Roggenstein zeichnet sich durch hohe Niederschläge und niedrige Temperaturen aus (Niederschlag 914 mm a^{-1} , Temperatur 8.7 °C , langjähriges Mittel 1995 bis 2016). Die Vorfrucht des StaPlaRes-Versuchsfeldes war einheitlich Hafer. Bodenparameter sind in Tab. TUM-1 angegeben.

Tab. TUM-1: Bodenparameter StaPlaRes-Versuchsfeld, Standort Roggenstein.

Ackerzahl		56
Entstehungsart		Diluvium (D)
Bodentyp		Parabraunerde
Bodenarten:		
0-35 cm		Schluffig lehmiger Sand (Slu)
35-55 cm		Schwach sandiger Lehm (Ls2)
55-70 cm		Schwach toniger Lehm (Lt2)
> 70 cm		Sandig lehmiger Schluff (Uls)
P ₂ O ₅	mg 100 g ⁻¹	11
K ₂ O	mg 100 g ⁻¹	27
C _{org}	g kg ⁻¹	11.5
N _t	g kg ⁻¹	1.15
pH		6.2

C) Düngung am Standort Roggenstein (TUM)

Die Düngung erfolgte standortangepasst, die genauen Düngezeitpunkte wurden abhängig von den erreichten EC-Stadien sowie witterungsbedingt festgelegt. Die N-Düngemengen und Düngezeitpunkte (EC-Stadien) der Fruchtarten Winterraps, Winterweizen und Wintergerste sind in Tab. TUM-2 dargestellt.

Tab. TUM-2: N-Düngemengen und Düngezeitpunkte der Kulturarten Winterraps, Winterweizen und Wintergerste; Standort Roggenstein.

Winterraps	VB kg ha ⁻¹	EC 30-32 kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Summe kg ha ⁻¹
Kontrolle	-	-	-	-	0
Gestreut	60	120	-	-	180
Stabilisiert	180	-	-	-	180
Platziert	60	120	-	-	180
Winterweizen	VB kg ha ⁻¹	EC 31-32 kg ha ⁻¹	EC 35-37 kg ha ⁻¹	EC 51 kg ha ⁻¹	Summe kg ha ⁻¹
Kontrolle	-	-	-	-	0
Gestreut	40	60	-	80	180
Stabilisiert	80	-	100	-	180
Platziert	40	60	-	80	180
Wintergerste	VB kg ha ⁻¹	EC 31 kg ha ⁻¹	EC 32 kg ha ⁻¹	EC 47 kg ha ⁻¹	Summe kg ha ⁻¹
Kontrolle	-	-	-	-	0
Gestreut	60	-	100	-	160
Stabilisiert	160	-	-	-	160
Platziert	60	-	100	-	160

Die Düngung erfolgte mit dem Düngersteuer der Firma Rauch Landmaschinenfabrik GmbH, der für den Standort Roggenstein zur Verfügung gestellt wurde (siehe Abb. TUM-3). Der Düngersteuer wurde während der Projektlaufzeit regelmäßig weiterentwickelt und verbessert. Für die Variante „Platziert“ wurde von der Firma Rauch eine Striegel-Schlitztechnik entwickelt, durch die der Boden zunächst geschlitzt, das Düngergranulat ca. 5-7 cm in den Boden zwischen die Saatreihen eingebracht und der Schlitz dann wieder geschlossen wurde. Abb. TUM-4 zeigt die Düngung in der Wintergerste im Jahr 2019 in der Variante „Gestreut“ und „Platziert“. Um Schäden an der Vegetation zu vermeiden, wurde bei der späten Düngung des Weizens in EC 51 (siehe Tab. TUM-2) keine platzierte Düngung vorgenommen, das Düngegrgranulat wurde oberflächlich aufgebracht.



Abb. TUM-3: Düngerstreuer der Firma Rauch im Winterweizen im Jahr 2018, Standort Roggenstein.



Abb. TUM-4: Düngung der Wintergerste im Jahr 2019. Links: Variante gestreut. Rechts: Variante platziert mit Einarbeitung des Düngergranulats in den Boden. Standort Roggenstein.

Ab dem 05.09.2016 bis zum 30.09.2019 wurden am Standort Roggenstein kontinuierlich Bodenproben entnommen und analysiert (NO_3 und NH_4 -Gehalte an über 150 Beprobungsterminen) und N_2O -Emissionen mit der Closed-Chamber-Methode (200 Beprobungstermine) gemessen. Die Erfassung von Ammoniakverlusten mittels kombinierter Dräger-Tube-Methode und Passiv-Flux-Methode fand jeweils nach den Düngeterminen statt.

Nach der Ernte wurden neben den Erträgen auch Ertragsparameter (Strohertrag, N-Gehalt Korn und Stroh, Proteingehalt Korn, Tausendkornmasse (TKM), Bestandesdichte, Schotenzahl/Pflanze, Kornzahl/Ähre, Ölgehalt) erfasst sowie N-Salden und N-Effizienzen berechnet.

D) Witterung am Standort Roggenstein (TUM)

Das Versuchsjahr 2016/17 startete mit einem sehr kalten Winter mit Schnee und Dauerfrost im Januar und war damit deutlich kälter als in den Vorjahren. Wechselfröste im Februar verursachten in den Winterrapsbeständen leichte Auswinterungsschäden. Der späte Vegetationsbeginn fiel auf Mitte März, worauf eine warme Trockenzeit bis zur nächsten Kältewelle Mitte April folgte. Ab Mitte Mai herrschten sehr trockene Bedingungen am Standort, die bis zur Gerstenernte Anfang Juli anhielten. Aufgrund guter Aussaatbedingungen im Herbst konnten sich alle Kulturen für das kommende Versuchsjahr 2017/18 bisher sehr gut etablieren.

Das Versuchsjahr 2017/18 war durch zwei Kälteeinbrüche im Frühjahr geprägt. Ende Februar/Anfang März wurde ein starker Kälteeinbruch von einem weiteren, jedoch weniger starken Temperaturabfall Mitte März gefolgt, wodurch es zu einem späten Vegetationsbeginn Ende März kam. Da die Pflanzen während der Kälteeinbrüche mit Schnee bedeckt waren, kam es jedoch nur zu sehr geringen Frostschäden. Der gesamte April und Anfang Mai waren von einer ausgeprägten Trockenheit und stark negativer Wasserbilanz geprägt. Trotz mehrerer Niederschlagsereignisse in der zweiten Maihälfte herrschte von Juni bis zur Ernte des Winterweizens große Trockenheit verbunden mit hohen Temperaturen, wodurch erneut negative Wasserbilanzen entstanden.

Das Versuchsjahr 2018/19 war durch einen milden Winter ohne stärkere Kälteeinbrüche geprägt. Dadurch kam es zu einem frühen Vegetationsbeginn in der ersten Märzdekade. Wie bereits im Jahr 2018 war auch in 2019 die Wasserbilanz in einigen Monaten stark negativ, insbesondere April, Juni und Juli waren deutlich trockener als im langjährigen Mittel.

Eine grafische Übersicht über Verlauf von Temperatur und Niederschlag am Standort Roggenstein ist Abbildung TUM-6 zu entnehmen. Die Daten wurden durch eine Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes DWD am Standort Roggenstein ermittelt.

E) Erträge, Ertragsparameter und N-Salden am Standort Roggenstein (TUM)

Im Jahr 2017 wurden die Fruchtarten Winterraps, Winterweizen und Wintergerste auf dem Versuchsfeld nach der einheitlichen Vorfrucht Hafer etabliert. Aufgrund der Witterungsextreme waren keine Höchsterträge zu erwarten. Vor allem aber bei den Gerstenerträgen mit bis zu 116.7 (Gestreut) und 115.4 (Platziert) dt ha⁻¹ zeigte sich, dass die Winterfeuchte noch optimal genutzt werden konnte (Tabelle TUM-3). Die stabilisierte Variante erreichte mit einem TM-Ertrag von 100.7 dt ha⁻¹ (Gerste) ein signifikant niedrigeres Ergebnis. Im Winterweizen konnte die stabilisierte Variante mit 104.6 dt ha⁻¹ dagegen den höchsten Ertrag erreichen, dieser Wert unterschied sich jedoch nicht signifikant von den Varianten gestreut und platziert. Raps und Weizen erreichten witterungsbedingt im Jahr 2017 für den Standort Roggenstein unterdurchschnittliche Erträge, bei den Druschergebnissen konnten zudem keine signifikanten Ertragsunterschiede zwischen den gedüngten Varianten festgestellt werden. Der signifikant höchste N-Gehalt im Winterraps (Korn) in der platzierten Variante führte auch zum signifikant höchsten Proteingehalt von 18.4 % (Tabelle TUM-3). Ansonsten konnten bei den Ertragsparametern in der Fruchtart Winterraps keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei gedüngten Varianten festgestellt werden.

Das Jahr 2018 war deutschlandweit durch extreme Frühjahrs- und Frühsommertrockenheit geprägt. Dies zeigt sich auch an den sehr niedrigen Erträgen von Wintergerste und Winterraps. In der Wintergerste konnte in der Variante „Stabilisiert“ mit 85.6 dt ha⁻¹ der signifikant höchste Ertrag erzielt werden. Dies ist auf die Einmalgabe des stabilisierten Düngers zu Vegetationsbeginn zurückzuführen, da zu diesem Zeitpunkt noch Restfeuchte im Boden vorhanden war und der stabilisierte Dünger lange wirksam war. Im Winterweizen konnten die signifikant höchsten Erträge mit 116.9 dt ha⁻¹ in der Variante „Platziert“ erzielt werden. Durch die wurzelnahe Platzierung des Düngegranulats war eine Auflösung des Düngers und dadurch verbesserte N-Aufnahme durch die Pflanze möglich. In den Varianten mit oberflächlich aufgebrachtem Dünger konnte dieser durch die extreme Trockenheit über mehrere Wochen nicht aufgenommen werden.

Auch beim N-Gehalt des Korns und Rohproteingehalt konnten in der Variante „Platziert“ die höchsten Ergebnisse erreicht werden, jedoch nicht signifikant unterschiedlich von der Variante „Gestreut“.

Im Jahr 2019 konnten zwischen den gedüngten Varianten von Wintergerste, Winterraps und Winterweizen keine signifikanten Unterschiede bei den Erträgen ermittelt werden. Wie im Jahr 2018 hatte aber der stabilisierte Dünger bzw. die Terminierung (Einmalgabe zu Vegetationsbeginn) einen positiven Ertragseffekt auf Wintergerste (TM-Ertrag 101.7 dt ha⁻¹) und der platzierte Dünger auf den Winterweizen (TM Ertrag 111.4 dt ha⁻¹). Die Rapsrerträge der gedüngten Varianten erreichten im Jahr 2019 erstmals während der Projektlaufzeit Ergebnisse von im Mittel über 50 dt ha⁻¹.

In der Wintergerste konnten die höchsten N-Gehalte im Korn und Proteingehalte in der Variante „Platziert“ gemessen werden. Bei den N-Entzügen des Korns und insbesondere von Korn und Stroh waren aber nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Varianten zu verzeichnen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass zwar in allen gedüngten Varianten gleiche N-Mengen appliziert wurden, die N-Gaben aber teilweise zu unterschiedlichen Zeitpunkten und unterschiedliche hohen Teilgaben erfolgen (siehe Tabelle TUM-2). Ertragseffekte können auch durch die Terminierung verursacht oder mitverursacht worden sein.

In allen drei Versuchsjahren und den drei Fruchtarten ist festzustellen, dass sowohl die Variante „Stabilisiert“ als auch die Variante „Platziert“ häufig höhere oder signifikant höhere Erträge als die Standardvariante „gestreut“ erreichten. Es zeigt sich jedoch keine klare Tendenz, welche der beiden geprüften Varianten vorzuziehen ist. Durch die getesteten Verfahren konnten Ertragseinbußen bei Wetterextremen (anhaltende Trockenheit) vermindert werden. Sowohl die frühe Gabe des stabilisierten Düngers als Einmalgabe als auch die Einarbeitung in den Boden und damit die Auflösung des Düngers durch Bodenrestfeuchte trugen zu signifikant höheren Erträgen und Proteingehalten bei.

Tab. TUM-3: Erträge und N-Entzüge im StaPlaRes-Versuch 2017 am Standort Roggenstein (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$).

Parameter	Kornertrag (86 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn	Kornertrag (91 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn	Kornertrag (86 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn
Einheit	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Fruchtart	Gerste			Raps			Weizen		
N-Input	160 kg ha ⁻¹			180 kg ha ⁻¹			180 kg ha ⁻¹		
Kontrolle	40.7c	52c	-52b	18.2b	45b	-45b	48.6b	54c	-54c
Gestreut	116.7a	191ab	-31ab	45.8a	116a	64a	94.9a	119b	61a
Stabilisiert	100.7b	167b	-7a	47.4a	121a	59a	104.6a	155a	25b
Platziert	115.4a	193a	-33ab	46.2a	124a	56a	98.7a	127b	53a

Tab. TUM-4: N- und Proteingehalt Korn, TKM (Tausendkornmasse), Bestandesdichte, Schotenzahl, Ölgehalt und Ölertrag von Winterraps im StaPlaRes-Versuch im Jahr 2017 am Standort Roggenstein (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$).

Raps 2017	N-Gehalt Korn	Proteingehalt Korn	TKM (91 % TM)	Bestandes- dichte	Schotenzahl	Ölgehalt	Ölertrag
Einheit	%	%	g 1000 Körner ⁻¹	Pflanzen m ⁻²	Schoten Pflanze ⁻¹	%	l ha ⁻¹
Kontrolle	2.73c	17.0c	5.5a	42.3a	41.7b	50.0b	892b
Gestreut	2.78bc	17.4bc	4.6b	42.8a	113.4a	49.4a	2192a
Stabilisiert	2.81b	17.6b	4.7b	41.3a	114.2a	49.7a	2279a
Platziert	2.94a	18.4a	4.8b	39.0a	123.8a	49.8a	2235a

Tab. TUM-5: Erträge und N-Entzüge im StaPlaRes-Versuch 2018 am Standort Roggenstein (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$).

Parameter	Kornertrag (86 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn	Kornertrag (91 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn	Kornertrag (86 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn
Einheit	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Fruchtart	Gerste			Raps			Weizen		
N-Input	160 kg ha ⁻¹			180 kg ha ⁻¹			180 kg ha ⁻¹		
Kontrolle	28.0c	39c	-39c	15.4b	44c	-44c	49.2c	61c	-61c
Gestreut	77.4b	131b	29a	36.9a	104b	76a	107.2b	195b	-15a
Stabilisiert	85.6a	134ab	26ab	37.5a	107b	73a	107.9b	186b	-6a
Platziert	77.7b	144a	16b	38.7a	121a	59b	116.9a	217a	-37b

Tab. TUM-6: N- und Proteingehalt Korn, Strohertrag, N-Entzug Korn und Stroh, TKM (Tausendkornmasse), Bestandesdichte und Kornzahl von Winterweizen im StaPlaRes-Versuch im Jahr 2018 am Standort Roggenstein (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$).

Weizen 2018	N-Gehalt Korn	Proteingehalt Korn	Strohertrag (TM)	N-Entzug Korn + Stroh	N-Saldo Korn + Stroh	TKM (86 % TM)	Bestandes- dichte	Kornzahl
Einheit	%	%	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	g (1000 Körner) ⁻¹	Ähren m ⁻²	Körner Ähre ⁻¹
Kontrolle	1.44c	8.2c	50.4b	83c	-83bc	41.0b	409b	36.0b
Gestreut	2.11a	12.0a	70.7a	244b	-64ab	45.8a	575a	40.7ab
Stabilisiert	2.01b	11.5b	60.5ab	229b	-49a	42.9ab	493ab	47.6a
Platziert	2.16a	12.3c	76.5a	275a	-95c	45.2a	572a	47.5a

Tabelle TUM-7: Erträge und N-Entzüge im StaPlaRes-Versuch 2019 am Standort Roggenstein (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$).

Parameter	Kornertrag (86 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn	Kornertrag (91 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn	Kornertrag (86 % TM)	N-Entzug Korn	N-Saldo Korn
Einheit	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Fruchtart	Gerste			Raps			Weizen		
N-Input	160 kg ha ⁻¹			180 kg ha ⁻¹			180 kg ha ⁻¹		
Kontrolle	35.7b	49b	-49b	31.1b	74c	-74c	55.7b	66c	-66c
Gestreut	98.2a	177a	-17a	53.1a	140b	40a	106.0a	185ab	-5ab
Stabilisiert	101.7a	166a	-6	55.0a	153a	27b	106.6a	176b	4a
Platziert	97.5a	177a	-17a	54.2a	152a	28b	111.4a	203a	-23b

Tab. TUM-8: N- und Proteingehalt Korn, Strohertrag, N-Entzug Korn und Stroh, TKM (Tausendkornmasse), Bestandesdichte und Kornzahl von Wintergerste im StaPlaRes-Versuch im Jahr 2019 am Standort Roggenstein (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$).

Gerste 2019	N-Gehalt Korn	Proteingehalt Korn	Strohertrag (TM)	N-Entzug Korn + Stroh	N-Saldo Korn + Stroh	TKM (86 % TM)	Bestandes- dichte	Kornzahl
Einheit	%	%	dt ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	g (1000 Körner) ⁻¹	Ähren m ⁻²	Körner Ähre ⁻¹
Kontrolle	1.55c	9.7c	38.3c	64b	-64b	43.3b	442c	16.2b
Gestreut	1.88ab	11.8ab	68.7b	208a	-48ab	50.0a	693ab	24.7a
Stabilisiert	1.77b	11.1b	83.5a	204a	-44a	48.1a	775a	24.7a
Platziert	1.99a	12.4a	62.4b	206a	-46ab	48.3a	612b	27.5a

1.2.2 NH₃-Messungen am Standort Roggenstein (AP-2)

Im Frühjahr 2017 begann am Standort Roggenstein in der Kultur Winterraps die erste hochauflösende NH₃-Messkampagne. Die NH₃-Verluste der mineralischen N-Düngung wurden mittels Kombination aus Dräger-Tube-Methode (DTM) und Passiv-Flux-Methode (PFM) bestimmt.



Abb. TUM-5: Messung von NH₃-Emissionen mit Dräger-Tube-Methode (links) und Passiv-Flux-Methode (rechts), Standort Roggenstein.

Die Messkampagnen starteten jeweils am Tag der Düngung auf dem StaPlaRes-Versuch in Roggenstein und wurden bis zum nächsten größeren Niederschlagsereignis (> 6 mm) durchgeführt. Die DTM-Messung erfolgte jeweils viermal täglich, die Passivsammler der PFM wurden einmal pro Tag entleert und neu befüllt. Die Termine der Messkampagnen sind in Tabelle TUM-9 aufgeführt.

Tab. TUM-9: Termine der NH₃-Messkampagnen in den Jahren 2017, 2018 und 2019.

2017	Winterraps
T1	15.03.2017 – 26.03.2017
T2	27.03.2017 – 15.04.2017
2018	Winterweizen
T1	26.03.2018 – 30.03.2018
T2	23.04.2018 – 07.05.2018
T3	08.05.2018 – 14.05.2018
T4	17.05.2018 – 19.05.2018
2019	Wintergerste
T1	07.03.2019 – 11.03.2019
T2	18.04.2019 – 30.04.2019

In keinem der Versuchsjahre konnten bei den jeweils herrschenden kühlen Temperaturen der ersten Messkampagne (T1) NH₃-Emissionen gemessen werden. Auch an den anderen Terminen wurden nur geringe Emissionen ermittelt, was auf die häufig sehr trockene Witterung und das niedrige Emissionspotential des Standorts Roggenstein (keine Staunässe durch teilweise hohe Sandgehalte, siehe Tabelle TUM-1) zurückgeführt werden kann.

Die kumulierten Emissionen der zwei bis vier Messtermine der Versuchsjahre 2017 bis 2019 sind in Tabelle TUM-10 dargestellt. In allen drei Jahren waren in der Variante gestreut die signifikant höchsten Emissionen messbar. Der insgesamt höchste Wert von NH_3 -Verlusten in Höhe von 4.75 kg ha^{-1} wurde im Jahr 2017 in der Variante „Gestreut“ im Raps gemessen. Signifikant niedrigere Ergebnisse erzielte die Variante „Platziert“ mit maximal 2.03 kg ha^{-1} NH_3 -Verlust im Raps. Das höchste NH_3 -Einsparungspotential wies die Variante „Stabilisiert“ auf, es wurden extrem niedrige Mengen an NH_3 von 0.02 (Gerste) bis 1.23 kg ha^{-1} (Raps) emittiert.

Tab. TUM-10: NH_3 -Gesamtemissionen (jeweils zwei bis vier Messtermine) der drei Varianten Gestreut, Stabilisiert und Platziert und der drei Versuchsjahre sowie der Summe in kg ha^{-1} (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$), Standort Roggenstein.

NH_3 -Emissionen	2017	2018	2019	2017-2019	Verlust- minderung*
kg ha^{-1}	Winterraps	Winterweizen	Wintergerste	Σ	%
Gestreut	4.75a	1.40a	0.36a	6.50a	-
Stabilisiert	1.23c	0.52b	0.02c	1.77c	72.8
Platziert	2.03b	0.58b	0.15b	2.77b	57.4

*in Bezug auf die Variante „Gestreut“.

Das prozentuale NH_3 -Verlustminderungspotential betrug somit über die drei Versuchsjahre 72.8 % für die Variante „Stabilisiert“ und 57.4 % für die Variante „Platziert“.

Bei der Betrachtung der NH_3 -Emissionsfaktoren (Tabelle TUM-11) wird das extrem niedrige NH_3 -Verlustpotential des Harnstoffdüngers am Standort Roggenstein deutlich. Mit maximal 2.64 % NH_3 -N-Verlusten in der Variante „Gestreut“ (Raps) lagen die Emissionsfaktoren deutlich unter den in der Literatur (z. B. Rösemann et al. 2019, Thünen-Report 67) angegebenen Emissionsfaktoren für Deutschland von bis zu 15.5 %.

Im Mittel der drei Versuchsjahre lag die Variante „Gestreut“ bei einem Emissionsfaktor von 1.21 %, die Variante „Platziert“ bei 0.52 % und die Variante „Stabilisiert“ bei 0.33 %.

Tab. TUM-11: NH_3 -Emissionsfaktoren der drei Varianten Gestreut, Stabilisiert und Platziert in Prozent des ausgebrachten Stickstoffs (Winterraps und Winterweizen $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Wintergerste $160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), drei Versuchsjahre sowie Mittelwert, Standort Roggenstein.

NH_3 -Emissionsfaktor	2017	2018	2019	2017-2019
%	Winterraps	Winterweizen	Wintergerste	π
Gestreut	2.64	0.78	0.22	1.21
Stabilisiert	0.68	0.29	0.01	0.33
Platziert	1.13	0.32	0.10	0.52

Es kann geschlussfolgert werden, dass ein signifikantes NH_3 -Einsparungspotential durch die verwendeten neuen Technologien vorhanden ist.

1.2.3 N₂O-Messungen am Standort Roggenstein (AP-3)

Abbildung TUM-6 zeigt den N₂O-Emissionsverlauf der Varianten „Kontrolle“, „Gestreut“, „Stabilisiert“ und „Platziert“ sowie die Witterung (Temperatur und Niederschlag) am Standort Roggenstein unterteilt in die drei Versuchsjahre 2016/17 (Winterraps), 2017/18 (Winterweizen) und 2018/19 (Wintergerste).

Im Anbaujahr 2016/17 war die N-Düngung im Winterraps mit 180 kg ha⁻¹ auf mittlerem Niveau (nach Düngeverordnung beträgt der N-Düngebedarf 200 kg ha⁻¹ bei einem Zielertrag von 40 dt ha⁻¹). In den Phasen mit hohem Emissionspotenzial zwischen Blüte und Abreife der Bestände herrschte Trockenheit, wodurch die N₂O-Emissionen sehr gering waren (Abbildung TUM-6). Nach der Ernte kam es bedingt durch Wiederbefeuchtung und intensive Bodenbearbeitung zu einigen Emissionspeaks, welche im Laufe des Spätsommers aber schnell wieder abflachten.

Im Vegetationsjahr 2017/18 wurde der Winterweizen mit 180 kg ha⁻¹ gedüngt (nach Düngeverordnung beträgt der N-Düngebedarf 230 kg ha⁻¹ bei einem Zielertrag von 80 dt ha⁻¹). Die trockene Witterung führte nur zu sehr geringen Emissionen. Der Winter verlief nahezu ohne messbare Emissionen, auch die langanhaltende Trockenphase im März und April 2018 war praktisch emissionsfrei. Erst nach ergiebigen Niederschlägen im Mai 2018 konnten Emissionen gemessen werden, allerdings auf einem extrem niedrigen Niveau. Nach der Weizenernte und dem Bodenumbruch waren einige Emissionspeaks feststellbar, die aber nicht das Niveau des Vorjahres erreichten.

Im Vegetationsjahr 2018/19 wurde die Wintergerste mit 160 kg ha⁻¹ gedüngt (nach Düngeverordnung beträgt der N-Düngebedarf 180 kg ha⁻¹ bei einem Zielertrag von 70 dt ha⁻¹). Auch dieses Jahr war durch Trockenheit geprägt und verlief bis Anfang Mai nahezu emissionsfrei. Emissionspeaks konnten in Zusammenhang mit der Düngung ab Mitte Mai bis Ende Juni 2019 gemessen werden. Nach der Ernte und der Bodenbearbeitung kam es im Unterschied zu den Vorjahren zu keinen auffälligen Emissionspeaks.

Abbildung TUM-7 zeigt die Ergebnisse der N₂O-Messungen aller Messtermine, unterteilt in die drei Vegetationsjahre bzw. Fruchtarten und eine Gesamtdarstellung. Die N₂O-Flüsse der Varianten „Kontrolle“, „Gestreut“, „Stabilisiert“ und „Platziert“ sind in µg m⁻² h⁻¹ angegeben und weisen hohe Standardabweichungen auf, insbesondere im Vegetationsjahr 2016/17 (Winterraps). Hohe Standardabweichungen sind bezeichnend für N₂O-Flüsse, die einer starken Fluktuation und Dynamik unterworfen sind. Bereits geringe Unterschiede im Wasserhaushalt, der Bodentextur oder der Bodendichte können das Emissionsgeschehen stark beeinflussen.

Abbildung TUM-7 zeigt, dass sich die gemessenen N₂O-N-Emissionen aller drei Jahre auf einem sehr niedrigen Niveau befanden. Der Median der Einzelmessungen liegt in allen Varianten nahe Null. Zwischen der Kontrolle und den gedüngten Varianten sind im Mittelwertsvergleich teilweise signifikante Unterschiede zu erkennen. Bei Wintergerste waren die N₂O-N-Verluste der Varianten „Gestreut“ und „Platziert“ signifikant höher als die der Kontrolle, bei Winterweizen die der Variante „Platziert“. Die Variante „Stabilisiert“ unterschied sich nie signifikant von der Kontrolle. Beim Vergleich der gedüngten Varianten untereinander konnten weder in den Einzeljahren noch im Gesamtzeitraum signifikante Unterschiede bei den N₂O-N-Verlusten ermittelt werden.

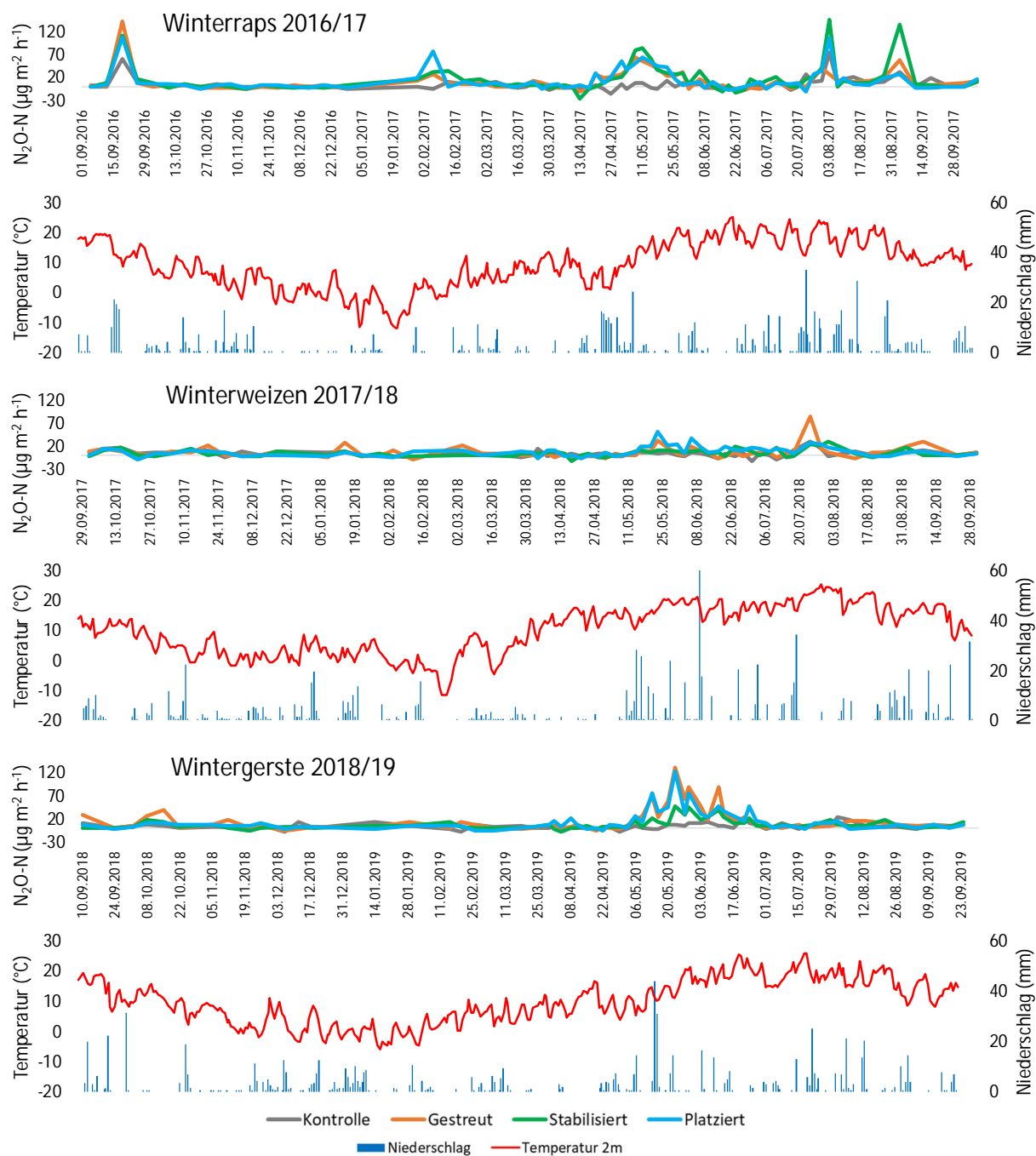


Abb. TUM-6: N_2O -N-Emissionsverlauf der Varianten Kontrolle, Gestreut, Stabilisiert und Platziert, Temperatur und Niederschlag von 01.09.2016 bis 30.09.2019, unterteilt nach Anbaujahren und Fruchtarten (2016/17: Winterraps, 2017/18 Winterweizen, 2018/19 Wintergerste), Standort Roggenstein.

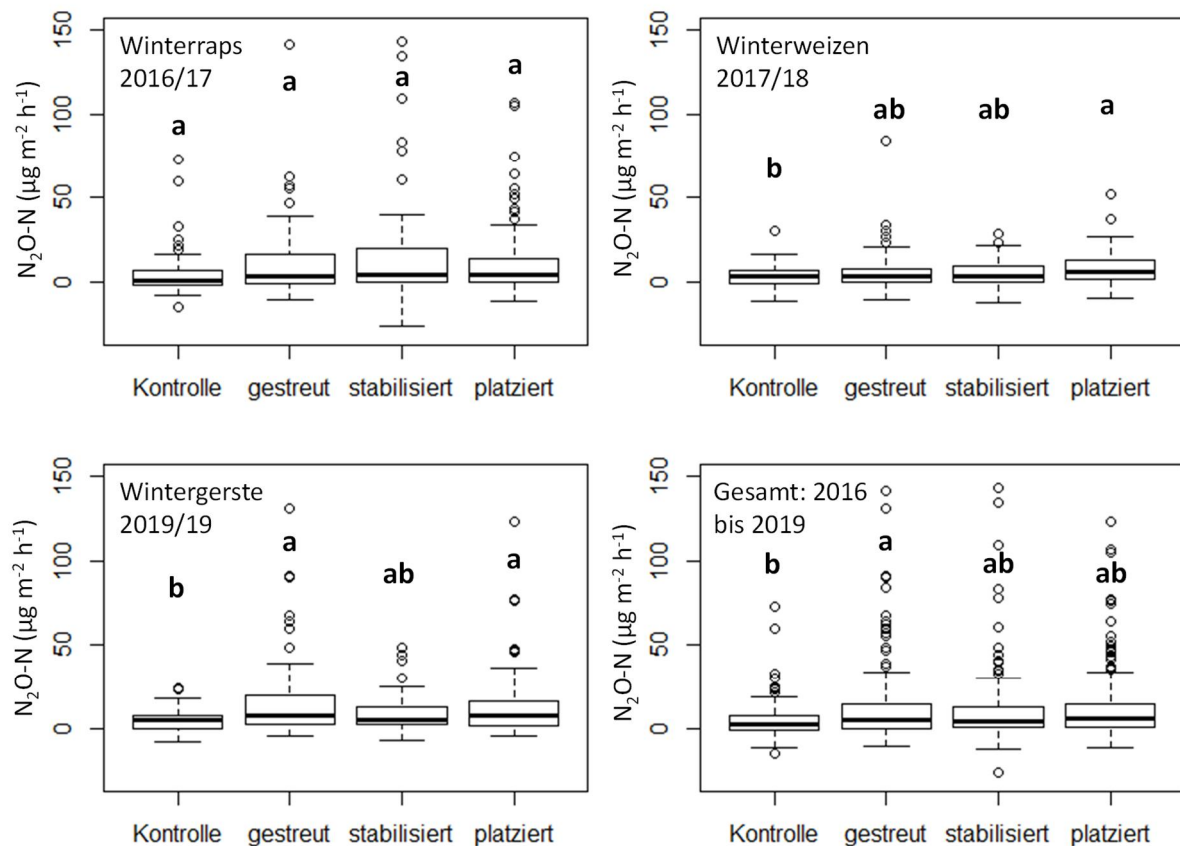


Abb. TUM-7: Gemessene $\text{N}_2\text{O-N}$ -Verluste in $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ aller Messtermine der drei Versuchsjahre aufgeteilt nach 2016/17 Wintertraps (links oben), 2017/18 Winterweizen (rechts oben), 2018/19 Wintergerste (links unten) sowie des Gesamtzeitraums (rechts unten). Linie = Median, Box = 50 % der Daten, Whiskers = Interquartilsabstand * 1.5, o = Ausreißer (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$), Standort Roggenstein.

Die in Abbildung TUM-7 gezeigten Ergebnisse der Einzelmessungen geben noch keine Auskunft über die Gesamtemissionen am Standort Roggenstein. Um diese zu berechnen, wurden die Zeiträume zwischen den Messungen interpoliert und die Emissionen kumuliert. Somit ist eine Angabe der $\text{N}_2\text{O-N}$ -Verluste in kg ha^{-1} für die drei Vegetationsjahre möglich.

Tabelle TUM-12 zeigt die kumulierten $\text{N}_2\text{O-N}$ -Verluste der drei Versuchsjahre 2016/17 (Wintertraps), 2017/18 (Winterweizen) und 2018/19 (Wintergerste) inkl. der Nachernteemissionen sowie die Summe der Emissionen zwischen 2016 und 2019.

Im Jahr 2016/17 wies die Variante „Stabilisiert“ signifikant höhere Emissionen auf als die ungedüngte Kontrolle. Die anderen beiden Varianten unterschieden sich nicht signifikant von der Kontrolle. Im Vegetationsjahr 2017/18 wurden im Winterweizen die insgesamt niedrigsten Emissionen ermittelt, die Varianten unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Die höchsten Emissionen im Winterweizen wurden in der Variante „Platziert“ mit nur 0.56 kg ha^{-1} $\text{N}_2\text{O-N}$ -Verlust gemessen.

Im Vegetationsjahr 2018/19 wurden in der Kontrolle (0.42 kg ha^{-1}) und der Variante „Stabilisiert“ (0.67 kg ha^{-1}) die signifikant niedrigsten $\text{N}_2\text{O-N}$ -Verluste ermittelt. In der Variante „Gestreut“ wurde mit 1.16 kg ha^{-1} $\text{N}_2\text{O-N}$ -Verlust ein signifikant höherer Wert berechnet.

Bei den Gesamtemissionen der drei Versuchsjahre lagen alle drei gedüngten Varianten mit N₂O-N-Verlusten von 2.45 kg ha⁻¹ bis 2.68 kg ha⁻¹ sehr eng beieinander, signifikante Unterschiede konnten nur zur ungedüngten Kontrolle festgestellt werden. Die N₂O-N-Verlustminderung der untersuchten Technologien liegt im Vergleich zur Variante „Gestreut“ bei 8.6 % („Stabilisiert“) bzw. 4.8 % („Platziert“).

Demnach konnte für die Technologien der Stabilisierung und wurzelnahmen Platzierung am Standort Roggenstein kein signifikantes Minderungspotential für N₂O-N-Verluste ermittelt werden. Das niedrige Niveau der gemessenen Emissionen zeigt, dass an diesem Standort bei der Verwendung von Harnstoffdünger in Kombination mit hohen N-Entzügen und meist ausgeglichenen bzw. negativen N-Salden (siehe Tabelle TUM-3 bis Tabelle TUM-8) kein erhöhtes Risiko für N₂O-N-Verluste besteht. Auch in den Vorjahren (seit dem Jahr 2013) konnten am Standort Roggenstein bei N₂O-Messungen mittels manueller Haubentechnik nur niedrige Emissionen gemessen werden (vgl. Vinzent et al 2018).

Tab. TUM-12: N₂O-N-Verluste (Saat bis Ernte und Nachernteemissionen) der vier Varianten „Kontrolle“, „Gestreut“, „Stabilisiert“ und „Platziert“ und der drei Versuchsjahre sowie der Summe in kg ha⁻¹ (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$), Standort Roggenstein.

N ₂ O-N-Verluste	2016/17	2017/18	2018/19	2016-2019	Verlust- minderung*
kg ha ⁻¹	Winterraps	Winterweizen	Wintergerste	Σ	%
Kontrolle	0.43b	0.33a	0.42c	1.18b	
Gestreut	0.99ab	0.53a	1.16a	2.68a	-
Stabilisiert	1.39a	0.40a	0.67bc	2.45a	8.6
Platziert	1.09ab	0.56a	0.90ab	2.55a	4.8

*in Bezug auf die Variante „Gestreut“.

Werden die N₂O-N-Verluste mit den Düngermengen in Relation gesetzt, ergeben sich die Emissionsfaktoren für die einzelnen Versuchsjahre. Tabelle TUM-13 zeigt zusätzlich zu den Emissionsfaktoren für die Fruchtarten Winterraps, Winterweizen und Wintergerste den mittleren Emissionsfaktor über die drei Versuchsjahre.

Die ermittelten Emissionsfaktoren liegen durchweg weit unter einem Prozent N₂O-N-Verlust. Im Mittel wurden Faktoren in Höhe von 0.23 % (Variante „Stabilisiert“) bis 0.30 % (Variante „Gestreut“) berechnet.

Tab. TUM-13: N₂O-Emissionsfaktoren der drei Varianten „Gestreut“, „Stabilisiert“ und „Platziert“ in Prozent des gedüngten Stockstoffs (Winterraps und Winterweizen 180 kg ha⁻¹ a⁻¹, Wintergerste 160 kg ha⁻¹ a⁻¹) abzüglich Emissionen der Kontrollvariante. Drei Versuchsjahre sowie Mittelwert, Standort Roggenstein.

N ₂ O-Emissionsfaktor	2016/17	2017/18	2018/19	2016-2019
%	Winterraps	Winterweizen	Wintergerste	π
Gestreut	0.31	0.11	0.47	0.30
Stabilisiert	0.53	0.04	0.16	0.23
Platziert	0.37	0.13	0.30	0.27

In den Emissionsfaktoren sind die Nachernteemissionen einbezogen, da diese ebenfalls der Fruchtart und der Düngung im Anbaujahr zuzuordnen sind. Nachernteemissionen treten insbesondere nach der Bodenbearbeitung (Bodenumbruch) auf. Dabei wird das Bodengefüge und das vorhandene Porensystem gestört und organische Substanz (z. B. in Form von Ernteresten) wird in den Boden eingearbeitet und so für Bodenmikroorganismen zugänglich gemacht.

Die Darstellung des N_2O -Emissionsverlaufs in Abbildung TUM-6 zeigt, dass in den Vegetationsjahren 2016/17 und 2017/18 Nachernteemissionen als Emissionspeaks messbar waren. Im Vegetationsjahr 2018/19 (Wintergerste) konnten keine Emissionspeaks ermittelt werden, was insbesondere mit der trockenen Witterung im Sommer 2019 in Verbindung zu bringen ist.

Abbildung TUM-8 zeigt die N_2O -Emissionen der drei Versuchsjahre unterteilt in kumulierte Emissionen von Ansaat bis Ernte und kumulierte Nachernteemissionen. Bei den Nachernteemissionen konnten in keinem der Versuchsjahre signifikante Unterschiede zwischen den vier Versuchsvarianten ermittelt werden. Jedoch zeigte sich insbesondere im Jahr 2017 (Winterraps) die Bedeutung der Nachernteemissionen für das Gesamtemissionsgeschehen. Die höchsten Nachernteemissionen wurden im Jahr 2017 in der Variante „Stabilisiert“ gemessen und trugen mit $0.49 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ zu den Gesamtemissionen von $1.39 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (siehe Tabelle TUM-12) bei. Dies entspricht einem Anteil von 35 % an den Gesamtemissionen des Vegetationsjahres 2016/17.

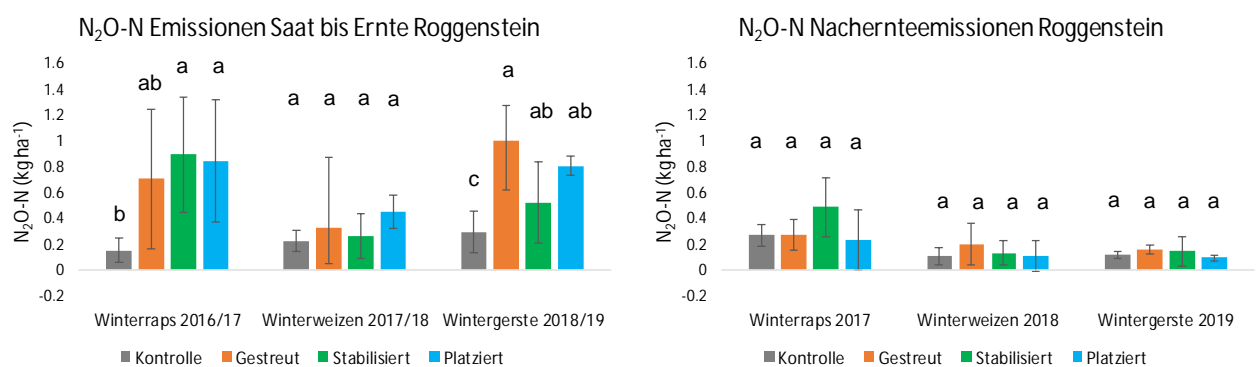


Abb. TUM-8: N_2O -N-Emissionen in kg ha^{-1} der drei Versuchsjahre und vier Varianten Kontrolle, Gestreut, Stabilisiert und Platziert, aufgeteilt in Emissionen von Saat bis zur Ernte (links) und Nachernteemissionen (rechts) mit Angabe der Standardabweichung und Signifikanzniveaus (Tukey-HSD-Test, $p < 0.05$), Standort Roggenstein.

1.2.4 Prozessbetrachtung, TUM (AP-4)

Alle für die Prozessbetrachtung und Ökobilanzierung benötigten Daten aus dem Freilandversuch Roggenstein wurden gemäß Vorhabensbeschreibung an das Thünen-Institut übermittelt und vollständig in die Projektdatenbank übernommen. Zu den hierfür erhobenen Parametern zählen Ertragsdaten, Ertragsparameter (Strohertrag, N-Gehalt Korn und Stroh, Proteingehalt Korn, TKM, Bestandesdichte, Schotenzahl/Pflanze, Kornzahl/Ähre, Ölgehalt), N_{min} , NO_3^- und NH_4^- -Gehalte des Bodens, Textur, NH_3 -, N_2O - und CO_2 -Emissionen und Versuchsbewirtschaftungsdaten.

1.2.5 Bewertung, TUM (AP-5)

Im StaPlaRes-Projekt fand eine Erfassung relevanter N-Inputs (Düngung, Saatgut, Stroh) und N-Outputs (N-Entzug durch Kornerträge, N_2O - und NH_3 -Emissionen) sowie die Ermittlung von Auswaschungspotenzialen anhand der Dynamik der N_{\min} -Vorräte des Bodens durch die intensive und lückenlose Messkampagne statt. Mit dem Modell „REPRO“ (Küstermann et al. 2010) wurden auf der Grundlage der Anbaudaten, Standortdaten und der Messdaten N-Kreisläufe modelliert, um relevante N-Flüsse, N-Pools und deren Verknüpfung darzustellen sowie nicht gemessene N-Flüsse zu berechnen.

Abbildung TUM-9 zeigt exemplarisch die N-Kreisläufe der drei Versuchsvarianten Gestreut, Stabilisiert und Platziert aus dem Vegetationsjahr 2017/18 (Winterweizen). Als Inputs sind alle N-Stoffströme in das System dargestellt (Rote Linie = Systemgrenze eines Betriebs), sie unterscheiden sich nicht zwischen den Varianten. Die Outputs unterscheiden sich je nach Winterweizenertrag und N-Gehalten des Korns sowie den gemessenen NH_3 - und N_2O -Verlusten. Die modellierten NO_3 -Verluste betragen in allen drei Varianten 0.0 kg ha^{-1} , da im Jahr 2017/18 durch die moderate Düngung und hohe Erträge ein negativer N-Saldo entstand. Die modellierten NO_3 -Verluste durch Auswaschung müssen jedoch in Zusammenhang mit den gemessenen N_{\min} -Gehalten im Boden und der Bodenfeuchtedynamik betrachtet werden (siehe Abbildung TUM-10). Bei niedrigen NO_3 -Gehalten im Boden besteht nur geringe Auswaschungsgefährdung für Stickstoff. Nur in der Variante Platziert trat kurzzeitig (am 28.05.2018) ein NO_3 -Peak mit fast $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ auf (Abbildung TUM-10); bei der Interpretation muss der Niederschlagsverlauf mit einbezogen werden. Zwischen dem 28.05.2018 und dem 01.06.2018 fielen fast 30 mm Niederschlag, wodurch eine N-Auswaschung stattgefunden haben kann. Aufgrund der Bilanzergebnisse und der Witterung bei weiteren NO_3 -Peaks im Januar und April 2018 ist jedoch insgesamt von sehr geringen Verlustpotenzialen durch Auswaschung auszugehen.

Der innerbetriebliche N-Kreislauf (siehe Abbildung TUM-9) zeichnet sich in allen drei Varianten durch hohe N-Entzüge aus, insbesondere in der Variante Platziert (274 kg ha^{-1}). Trotz der dadurch bedingten negativen N-Salden konnten für alle drei Varianten positive $\Delta \text{N}_{\text{org}}$ -Werte modelliert werden. Die $\Delta \text{N}_{\text{org}}$ -Werte von 9 (Gestreut), 8 (Stabilisiert) bzw. 16 (Platziert) kg ha^{-1} stellen die Menge an Stickstoff dar, die zum Aufbau von organischer Substanz (Humus) im Boden beiträgt; der modellierte Humusaufbau resultiert aus den hohen Inputs organischer Substanz (Strohdüngung, Ernte- und Wurzelnrückstände von Wintergetreide und Winterraps). Negative N-Salden weisen darauf hin, dass von den Pflanzen Rest- N_{\min} als Vorjahren genutzt wurde oder N-Inputs (z.B. die N-Deposition) unterschätzt wurden. Bei der Betrachtung der gesamten Fruchtfolge Winterraps, Winterweizen und Wintergerste wurden niedrige negative $\Delta \text{N}_{\text{org}}$ -Werte von -4 (Gestreut), -4 (Stabilisiert) bzw. -3 (Platziert) kg ha^{-1} modelliert; somit sind die N-Bilanzen nahezu ausgeglichen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Messung und Bilanzierung/Modellierung übereinstimmend, dass die geprüften N-Düngevarianten unter den gegebenen Standort- und Versuchsbedingungen zu hohen Erträgen, hoher N-Effizienz und außerordentlich geringen N-Verlustpotenzialen führen.

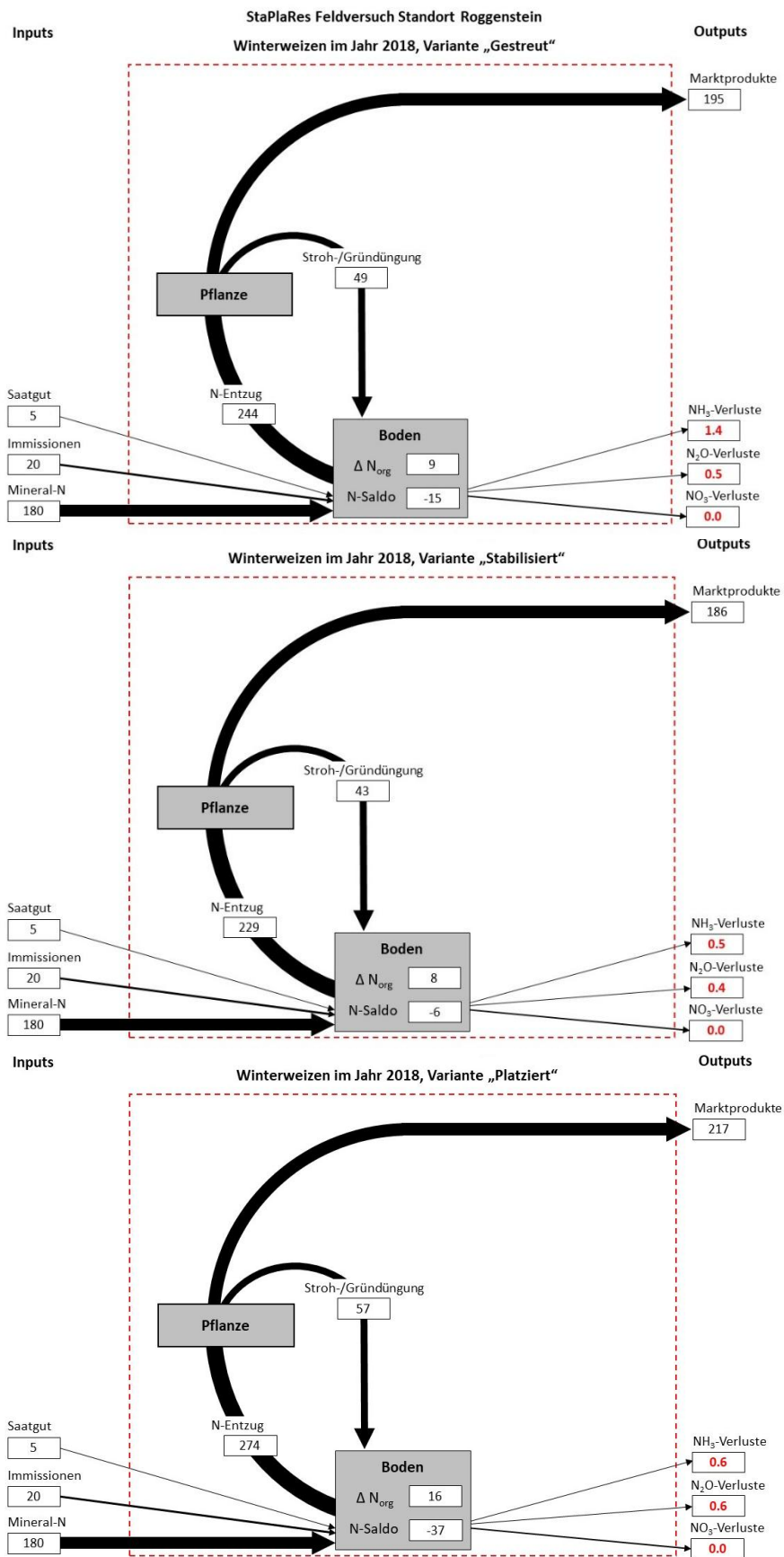


Abb. TUM-9: Stickstoffkreisläufe (berechnet mit dem Modell REPRO, vgl. Küstermann et al. 2010), Varianten Gestreut, Stabilisiert und Platziert im Vegetationsjahr 2017/18 (Winterweizen) in kg ha⁻¹ a⁻¹ N am Standort Roggenstein. Rote Line = Systemgrenze des bilanzierten Betriebs.

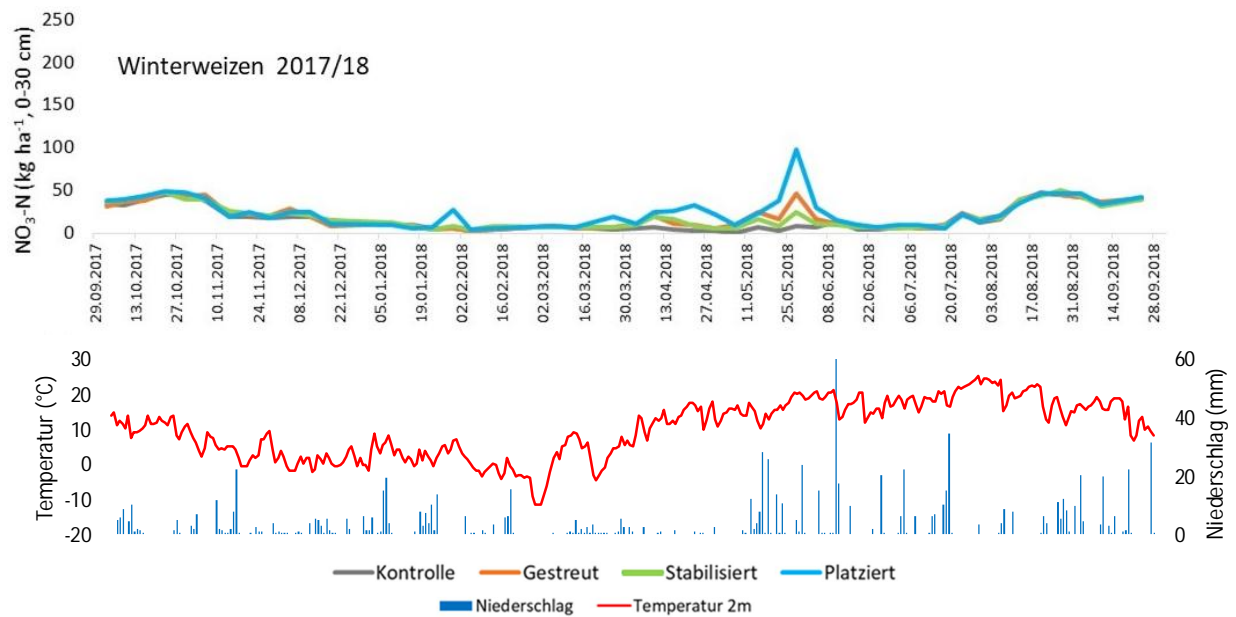


Abb. TUM-10: Gemessene $\text{NO}_3\text{-N}$ -Mengen in kg ha^{-1} im Boden (0-30 cm) und Witterung des Vegetationsjahres 2017/18 der Varianten Kontrolle, Gestreut, Stabilisiert und Platziert.

1.2.6 Verwertung: Wissenstransfer, Workshops mit Praktikern; TUM (AP-6)

Feldtage und Tagungen

Die Projektergebnisse aus dem StaPlaRes-Versuch wurden jährlich in der Versuchsstation Roggenstein der TUM im Rahmen von Feldtagen vorgestellt. An den Feldtagen nehmen Landwirte, Berater, Wissenschaftler und Studierende der TUM teil (Abbildung TUM-11). Im November 2019 wurden die Projektergebnisse auf Ackerbautagungen in Bernburg und Iden vorgestellt.



Abb. TUM-11: Feldtag in Roggenstein im Juli 2019. Vorstellung des Düngerstreuers der Firma Rauch Landmaschinenfabrik GmbH und des StaPlaRes-Feldversuchs.

Ebenfalls im November 2019 wurden die Projektergebnisse auf der internationalen Fachtagung „ARC Conference 2019: Multi-Scale Resilience Practices“ in Südkorea unter dem Titel „Innovative Fertilization Technologies to Face Climate Change Impacts and to Reduce Further GHG Emissions from Agriculture“ einem internationalen Publikum aus über 20 Ländern präsentiert.

Die für den 18.03.2020 geplante Abschlussveranstaltung des StaPlaRes-Projekts „Strategien zur Erhöhung der Stickstoffeffizienz im Pflanzenbau“ am Hans Eisenmann-Forum der TUM musste coronabedingt abgesagt werden.

Integration der Ergebnisse in die Lehre und Wissensvermittlung; TUM

Projekt Agrarsysteme

Im Rahmen des Moduls „Projekt Agrarsysteme“ wurde das Forschungsprojekt „StaPlaRes“ Masterstudierenden vorgestellt. Die Studierenden besuchten den Feldversuch, führten Messungen von Ammoniak und Lachgas durch und werteten Projektergebnisse aus. Anschließend wurden die Ergebnisse wissenschaftlich aufbereitet und präsentiert.

Studentische Abschlussarbeiten

In den drei Versuchsjahren wurde jeweils eine Masterarbeit über die Ergebnisse des StaPlaRes-Versuchs angefertigt. Im Jahr 2020 entstand zusätzlich eine Forschungsarbeit.

- Fruchtart Winterraps im Jahr 2017: „Lachgas- und Ammoniakemissionen nach Anwendung von Harnstoff in Kombination mit Urease- und Nitrifikationsinhibitoren sowie einem Injektionsverfahren im Raps“ (2018), Masterarbeit von M. Sc. Svenja Maria Gruhn.
- Fruchtart Winterweizen im Jahr 2018: „Analyse der Stickstoffeffizienz, Lachgas- und Ammoniakemissionen bei unterschiedlichen Verfahren der Harnstoffdüngung im Winterweizen“ (2019), Masterarbeit von M. Sc. Felicitas Winkhart.
- Fruchtart Winterweizen im Jahr 2018: „Reduzierung von Ammoniakemissionen nach Harnstoffdüngung durch wurzelnahe Platzierung und N-Stabilisierung“ (2020), Projektarbeit von David Schoo.
- Fruchtart Wintergerste im Jahr 2019: „Analyse der Stickstoffeffizienz, Lachgas- und Ammoniakemissionen nach Anwendung von verschiedenen Verfahren der Harnstoffdüngung in Wintergerste“ (2020), Masterarbeit von M. Sc. Alexander Reinl.

1.3. MLU – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum MLU

1.3.1. FF-Versuch am Standort Bernburg, LLG/MLU (AP-1)

Am Standort Bernburg wurden die Arbeiten am dreijährigen Fruchtfolge-Versuch gemäß dem vorgeschriebenen Arbeitsplan für den Projektzeitraum (25.07.2016 bis 30.06.2020) in sehr guter Kooperation mit dem Projektpartner LLG Sachsen-Anhalt durchgeführt.

Die Witterungsbedingungen während des gesamten Projektzeitraumes können, im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010) für den Standort Bernburg (LJM: 519 mm und 9,7 °C), als zu warm und zu trocken zusammengefasst werden. In Tab. MLU-1 werden die einzelnen Jahresniederschlagssummen sowie die durchschnittlichen Jahrestemperaturen der einzelnen Versuchsjahre dargestellt.

Tab. MLU-1: Durchschnittliche Jahrestemperaturen und Niederschlagssummen am Standort Bernburg im gesamten Versuchszeitraum (2016-2019)

Versuchsjahr	Ø Jahres- temperatur (°C)	Abweichung vom LJM (9,7 °C) (%)	Jahresnieder- schlagssumme (mm)	Abweichung vom LJM (519 mm) (%)
2016	10,65	+9,7	361	-30,4
2017	10,59	+9,1	513	-1,2
2018	11,33	+16,8	372	-28,3
2019	11,28	+16,3	437	-15,8

Einzig das Versuchsjahr 2017 entsprach mit 513 mm Niederschlag nahezu dem langjährigen Mittel. Mit einem Jahresniederschlagsdefizit von 147 mm (-28,3 % vom LJM) im Jahr 2018 und 82 mm im Jahr 2019 (-15,8 % vom LJM) wurden besonders die beiden letzten Versuchsjahre stark von der Witterung beeinflusst. Zusätzlich kam es in diesen beiden Jahren auch noch zu überdurchschnittlich höheren Temperaturen. Mit knapp einem Grad Celsius über dem langjährigen Mittel (9,7 °C) waren auch die Versuchsjahre 2016 und 2017 zu warm. Aufgrund dieser Witterungsverläufe konnte in allen drei Versuchsjahren das hohe Ertragspotenzial am Standort Bernburg nicht ausgeschöpft werden. Dies verdeutlichen auch die unterdurchschnittlichen Erträge (Abb. MLU-1) sowie die Korn-N Gehalte (Tab. MLU-2) der einzelnen Versuchsjahre.

Die sehr trockenen Aussaatbedingungen in 2016, resultierend aus den geringen Niederschlagsmengen, äußerten sich besonders beim Winterraps in einer sehr schlechten Jugendentwicklung bis zum Herbst. Dementsprechend kann der Ertrag, mit einer Spannweite von 0,66 t/ha⁻¹ (Kontrolle) bis 1,87 t/ha⁻¹ (stabilisiert), als stark unterdurchschnittlich eingestuft werden. Dagegen kamen Wintergerste (5,12 - 9,92 t/ha⁻¹) und Winterweizen (2,87 - 7,33 t/ha⁻¹) mit den Witterungsbedingungen etwas moderater zurecht. Lediglich Wintergerste erreichte einen durchschnittlichen Ertrag in 2017. Der Weizenertrag konnte als leicht unterdurchschnittlich bewertet werden. Das Jahr 2018 war spürbar zu trocken. Die Jahresniederschlagssumme betrug nur 372 mm.

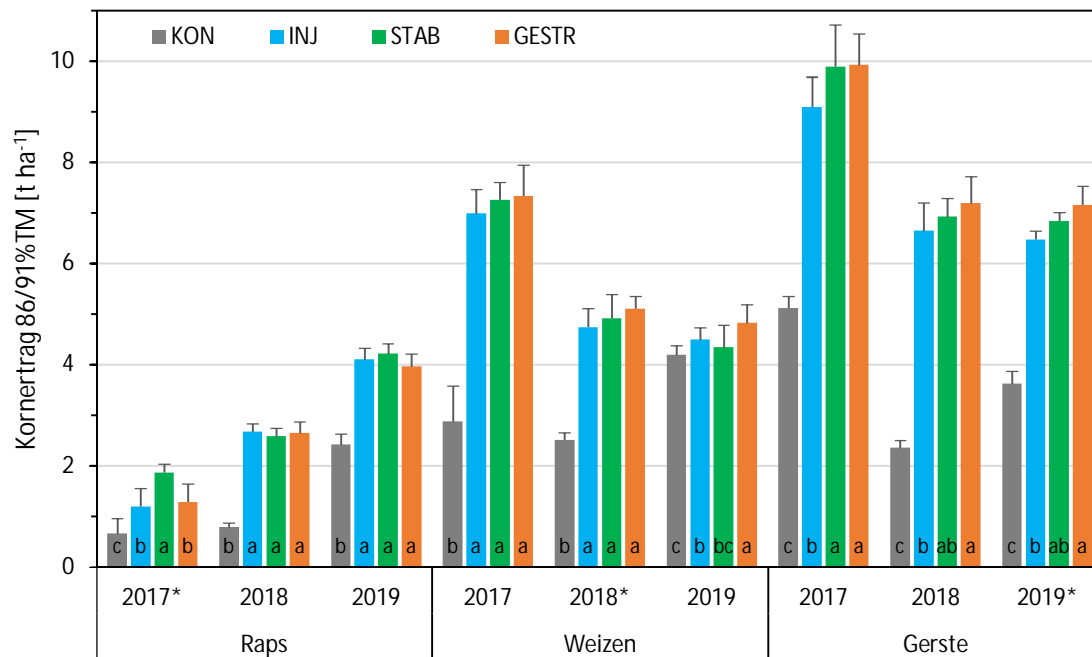


Abb. MLU-1: Erträge (t ha⁻¹) Winterraps, Winterweizen und Wintergerste in den jeweiligen Düngungsvarianten von 2017 bis 2019 am Standort Bernburg. Die Kennzeichnung * steht für die Kultur/Jahr in der die N₂O und NH₃ Emissionen ermittelt wurden. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Kultur je Jahr (p=0.05, Tukey-Test)

Tab. MLU-2: Korn-N-Gehalte (% TM) der Versuchskulturen in den jeweiligen Düngungsvarianten von 2017 bis 2019 am Standort Bernburg. Die Kennzeichnung * steht für die Kultur/Jahr in der die N₂O und NH₃-Emissionen ermittelt wurden. (Mittelwerte aus 4 Wiederholungen)

		Korn-N-Gehalt (% TM)		
		2017	2018	2019
Winterraps		*		
	Kontrolle	3,30	2,58	2,6
	injiziert	3,67	3,08	3,53
	stabilisiert	3,57	3,07	3,43
	gestreut	3,69	3,06	3,34
Winterweizen			*	
	Kontrolle	1,36	1,30	1,34
	injiziert	2,29	2,14	2,67
	stabilisiert	2,17	2,12	2,77
	gestreut	2,18	2,15	2,64
Wintergerste				*
	Kontrolle	1,22	1,28	1,18
	injiziert	1,76	1,77	2,12
	stabilisiert	1,66	1,71	1,96
	gestreut	1,69	1,71	2,06

Alle drei Versuchskulturen reagierten mit starker Ertragsreduktion auf diese Witterung, was folglich zu unterdurchschnittlichen Erträgen führte. Der Winterraps'ertrag bewegte sich zwischen 0,78 t/ha⁻¹ (Kontrolle) und 2,67 t/ha⁻¹ (injiziert). Die beiden Wintergetreidekulturen konnten die Vorjahreserträge nicht erreichen. Der Ertrag im Winterweizen (Ø 4,92 t/ha⁻¹) fiel um knapp 31,6 % geringer aus im Vergleich zum Versuchsjahr 2017 (Ø 7,19 t/ha⁻¹). In der Wintergerste war ein ähnliches Szenario zu verzeichnen (28,1 % Ertragsminderung zum Vorjahr). Auch im darauffolgenden letzten Erntejahr (2019) spiegelten die Erträge die extreme Trockenheit während der Aussaat und der Hauptwachstumsphase wider. Alle drei Winterkulturen des Fruchtfolgeversuchs erreichten wieder nur unterdurchschnittliche Erträge. Im Winterraps lagen die Erträge zwischen 2,42 t/ha⁻¹ (Kontrolle) und 4,22 t/ha⁻¹ (stabilisiert). Der Winterweizen verbuchte nochmals einen Rückgang im Ertrag (Ø 4,55 t/ha⁻¹) von 7,5 % im Vergleich zum Vorjahr 2018. Auffällig war, dass selbst die ungedüngte Variante (Kontrolle) einen durchschnittlichen Ertrag von 4,19 t/ha⁻¹ realisierte. Der Wintergerstenertrag lag 2019 zwischen 3,62 t/ha⁻¹ (Kontrolle) und 7,15 t/ha⁻¹ (gestreut) und damit auf einem sehr ähnlichen Niveau wie 2018.

1.3.2. NH₃-Messungen am Standort Bernburg; LLG/MLU (AP-2)

Die Messkampagnen zur Bestimmung der Ammoniak-Emissionen erfolgten jährlich in der Hauptkultur und jeweils nach den einzelnen Teilgabendüngungen in allen Düngungsvarianten (Tab. MLU-3). Zur Ermittlung der NH₃-Emissionen wurde eine Kombination der Dräger-Tube- und Passivsammler-Methode gewählt. Nachfolgend wird auf die Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der einzelnen Messkampagnen von 2017 bis 2019 eingegangen. Die kumulativen NH₃-Verluste sowie Emissionsfaktoren für den gesamten Versuchszeitraum sind in Tab. MLU-4 dargestellt.

Versuchsjahr 2017 – Winterraps

Für das Versuchsjahr 2017 beliefen sich die Messungen auf insgesamt 33 Tage.

T1: 03.03.2017 bis 22.03.2017

T2: 28.03.2017 bis 18.04.2017

Im ersten Messzeitraum (T1) fiel mit 30,7 mm eine adäquate Niederschlagsmenge, welche dem langjährigen Mittel (1981-2010) von 37 mm für den Monat März nahezu entsprach. Mit 7,9 °C war der März 2017 im Vergleich zum LJM um fast 3°C wärmer. Auch im Messzeitraum T2 kam es zu vereinzelt Niederschlagsereignissen (kumulativ 19,7 mm). Jedoch konnten bei der darauffolgenden Bestimmung der Ammoniakkonzentration mit Hilfe der Dräger-Röhrchen sowie bei der Analyse der Säurefallen mittels einer hochsensiblen Ammoniumelektrode im Labor der Universität Halle-Wittenberg keine Ammoniak Emissionen ermittelt werden.

Versuchsjahr 2018 – Winterweizen

T1: 09.04.2018 bis 20.04.2018

T2: 20.04.2018 bis 09.05.2018

T3: 09.05.2018 bis 22.05.2018

T4: 22.05.2018 bis 08.06.2018

Tab. MLU-3: Applikationsmengen sowie Termine der verschiedenen N-Düngungsvarianten in den Hauptkulturen (Emissionsermittlung) der Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019 am Standort Bernburg

Hauptkultur für die Emissionsmessung	Variante	Applikationstermine inkl. Teilgabenmenge (kg N ha ⁻¹)				Summe (kg N ha ⁻¹)
		T1	T2	T3	T4	
2017		03. Mrz	28. Mrz			0
Winterraps	Kontrolle					0
	injiziert		130			130
	stabilisiert	130				130
	gestreut		130			130
2018		09. Apr	20. Apr	09. Mai	22. Mai	0
Winterweizen	Kontrolle					0
	injiziert	70	70		60*	200
	stabilisiert	10		100		200
	gestreut	70	70		60	200
2019		23. Mrz	23. Apr			0
Wintergerste	Kontrolle					0
	injiziert	80	80			160
	stabilisiert	160				160
	gestreut	80	80			160

* oberflächige Applikation

Im zweiten Versuchsjahr wurde das Düngungsniveau von 200 kg N ha⁻¹ auf vier Gaben (T1 – T4) aufgeteilt. Begleitend wurden nach der jeweiligen Applikation die NH₃-Messungen durchgeführt. Die Messperiode belief sich somit auf 63 Tage. Aufgrund hoher Niederschlagsmengen (kum. 48 mm) im März und einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 2,3 °C, war ein Befahren der Versuchsfläche mit der RAUCH Side-Dressing Maschine nicht möglich. Daher erfolgte die erste Stickstoffgabe (T1) Anfang April. Gleichzeitig kam es in diesem Zeitraum auch zu einem sprunghaften Temperaturanstieg gepaart mit leichten Niederschlagsereignissen (kum. 22 mm), welche zwei Tage nach der T1-Applikation einsetzten. Die gemessenen und kumulierten NH₃-Emissionen für T1 lagen zwischen - 0,022 NH₃- N kg ha⁻¹ (injiziert) und 0,127 NH₃-N kg ha⁻¹ (gestreut). Am 20.04.2018 erfolgte dann die zweite Gabe (T2) in der injizierten und gestreuten Variante. Innerhalb dieser 20 Messtage kam es in der Summe lediglich zu 7 mm Niederschlag und die durchschnittliche Temperatur betrug 14,4 °C. Trotzdem konnten im T2-Zeitraum die höchsten NH₃-Emissionen festgestellt werden (injiziert: 2,404 NH₃-N kg/ha⁻¹ / gestreut: 6,245 NH₃-N kg/ha⁻¹). In den darauffolgenden letzten beiden Messzeiträumen (T3 + T4) war es im Vergleich zum LJM mit über 2,5 °C wärmer. Die Niederschlagssumme für T3 betrug 22,6 mm und für T4 18,1 mm. Während dieser beiden Messzeiträume konnten keine Ammoniak-Emissionen ermittelt werden. Insgesamt bewegten sich die NH₃-Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau. Die Verlustraten des applizierten Stickstoffdüngers lagen zwischen 1,19 % (injiziert) und 3,19 % (gestreut). Mit nur 0,36 % kam es in der stabilisierten Variante zu den geringsten NH₃-Verlusten.

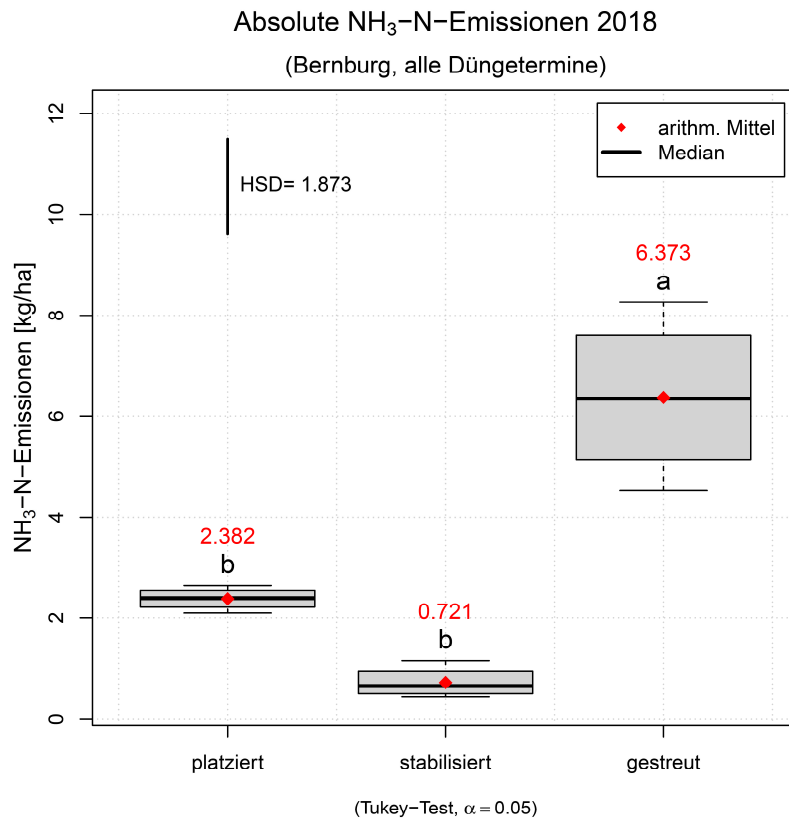


Abb. MLU-2: Kumulierte NH₃-N-Verluste aller Düngungstermine (T1 bis T4) im Winterweizen 2018 am Standort Bernburg. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen

Versuchsjahr 2019 – Wintergerste

T1: 23.03.2019 bis 12.04.2019

T2: 23.04.2019 bis 14.05.2019

Als letztes Glied des dreijährigen Fruchtfolgeversuches stand die Wintergerste. An zwei Terminen (T1 + T2) wurden die insgesamt zu applizierenden 160 kg N ha⁻¹ in den jeweiligen Düngungsvarianten ausgebracht. Die daraus resultierende Messperiode, zur Bestimmung der Ammoniak-Verluste, bezifferte sich auf 42 Messtage. Die erste Teilgabe (T1) wurde in allen drei Varianten (injiziert, stabilisiert und gestreut) am 23.03.2019 ausgebracht. Wobei in der stabilisierten Variante bereits im T1 die kompletten 160 kg N ha⁻¹ appliziert wurden. Die kumulierte Niederschlagsmenge im T1-Messzeitraum betrug lediglich 7,9 mm bei gleichzeitig milden Temperaturen. Mit 1,360 NH₃-N kg/ha⁻¹ wurden zwischen dem 23.03.2019 und dem 12.04.2019 die höchsten Emissionen in der gestreuten Variante ermittelt. Gefolgt von der injizierten Variante, welche um 0,200 NH₃-N kg/ha⁻¹ weniger Ammoniak emittierte. Die NH₃-Emissionen in der stabilisierten Variante (0,724 NH₃-N kg/ha⁻¹) waren im Vergleich zur gestreuten Variante um 46,8 % geringer.

Am 23.04.2019 wurde die zweite und abschließende N-Gabe (T2) in den Varianten platziert und gestreut ausgebracht. Innerhalb des T2 -Zeitraumes summierte sich der Niederschlag auf 34,1 mm wobei der Hauptniederschlagsanteil im Mai fiel. Generell war der Mai 2019 der niederschlagsstärkste Monat im gesamten Versuchsjahr 2019. Mit insgesamt 73 mm fielen 17 mm mehr im Vergleich zum LJM. Die durchschnittliche Temperatur im T2 betrug 10,8 °C.

Im Vergleich zur T1 Messperiode erhöhten sich die NH_3 -Emissionen in allen drei Varianten. Zudem viel auf, dass die noch zum T1 am geringsten emittierende Variante (stabilisiert) nun die höchsten Verluste aufwies mit 2,136 $\text{NH}_3\text{-N kg/ha}^{-1}$. Mit 1,782 $\text{NH}_3\text{-N kg/ha}^{-1}$ wurden in der gestreuten Variante die zweithöchsten Ammoniak-Emissionen im T2 ermittelt. Am geringsten waren die Emissionen bei der Platzierung von Harnstoff mit 1,585 $\text{NH}_3\text{-N kg/ha}^{-1}$. Aus Abb. MLU-3 wird ersichtlich, dass sich im Versuchsjahr 2019 (T1 + T2) keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Varianten bzgl. der NH_3 -Emissionen ergaben. Die Ammoniakverluste in den drei Düngungsverfahren bewegten sich zwischen 2,744 und 3,142 $\text{NH}_3\text{-N kg/ha}^{-1}$ und somit auf einem sehr ähnlichen und niedrigen Niveau. Dies verdeutlichen auch nochmal die Verlustraten (Tab. MLU-4) mit 1,72 % in der Platzierung, gefolgt von der stabilisierten Variante mit 1,81 % und 1,96 % in der gestreuten Variante.

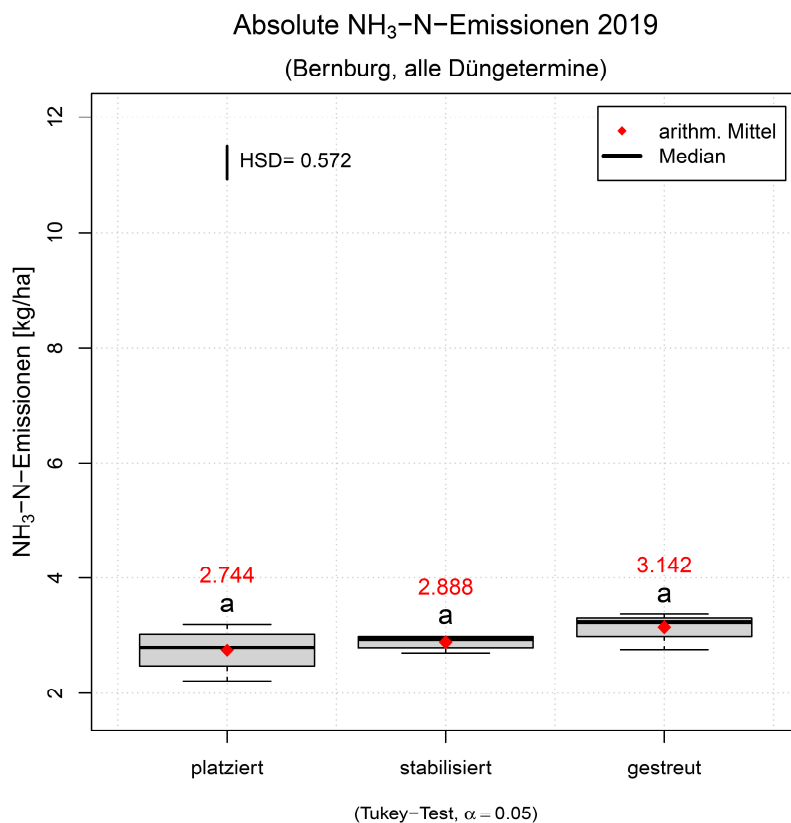


Abb. MLU-3: Kumulierte $\text{NH}_3\text{-N}$ -Verluste aller Düngungstermine (T1 + T2) in der Wintergerste 2019 am Standort Bernburg. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen

Tab. MLU-4: $\text{NH}_3\text{-N}$ -Verluste und Emissionsfaktoren von 2017 bis 2019 im Winterraps, Winterweizen und Wintergerste am Standort Bernburg. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen ($p=0.05$, Tukey-Test)

Versuchsjahr	Kultur	Varainte	$\text{NH}_3\text{-N}$ - Emmision (kg ha^{-1})	Emissions- faktoren (%)
2017	Winterraps	injiziert	0	0
		stabilisiert	0	0
		gestreut	0	0
2018	Winterweizen	injiziert	2,38 ^b	1,19 ^b
		stabilisiert	0,72 ^b	0,36 ^b
		gestreut	6,37 ^a	3,19 ^a
2019	Wintergerste	injiziert	2,74 ^a	1,72 ^a
		stabilisiert	2,89 ^a	1,81 ^a
		gestreut	3,14 ^a	1,96 ^a

1.3.3 N_2O - Messungen am Standort Bernburg; LLG/MLU (AP-3)

Die Lachgasmessungen am Standort Bernburg erfolgten nach der Closed Chamber Methode (Parkin and Venterea 2010). Dabei werden auf die fest in den Boden installierten Rahmen geschlossene lichtundurchlässige Gassammelhauben gestellt, welche eine Grundfläche von $0,56 \text{ m}^2$ haben. In den abgedichteten Gashauben sammelten sich die aus dem Boden emittierten Gase. Zur Gasprobengewinnung wurde die Pump - Spültechnik angewendet. Pro Messtermin und Versuchsvariante wurden bei einer Verschlusszeit von einer Stunde, im 20-minütigen Intervall, Proben entnommen. Die Lachgasmessung begann am 13.09.2016 und wurde ab diesem Tag an bis zum 24.09.2019 mindestens wöchentlich und in den verlustträchtigen Phasen auch zweimal pro Woche durchgeführt. Für die gaschromatographische Bestimmung der N_2O , CH_4 und CO_2 Konzentrationen wurden die Proben anschließen nach Braunschweig zum Thünen Institut weitergeleitet. In allen drei Versuchsjahren wurden die Messkampagnen zur Untersuchung der N_2O -Emissionen gemäß Arbeitsplan durchgeführt. Über den ganzen Versuchszeitraum (13.09.16 bis 24.09.19) betrachtet ergaben sich somit 186 Messtage. Die Berechnung der Gasflüsse aus den Konzentrationen erfolgte mit dem R-Skript „flux“ (Jurasinski et al. 2014) und wurde mit „gasflux“ (Fuss 2019) kumuliert.

1. Versuchsjahr: Winterraps - Messzeitraum 13.09.16 bis 28.09.2017

Die zum ersten Versuchsjahr in den Großparzellen angebaute Kultur, zur Ermittlung der Emissionen, war Winterraps. An insgesamt 64 Messtagen wurden Gasproben entnommen. Die Abb. MLU-4 veranschaulicht die Lachgasflüsse der vier Düngungsvarianten über den betrachteten Messzeitraum.

Wie aus Tab. MLU-3 zu entnehmen ist, erfolgte am 03.03 die erste Düngerapplikation in der stabilisierten Variante (stabilisiert). Rund drei Wochen später (27.03.17) wurde Harnstoff injiziert und oberflächlich breitverteilt (gestreut). Unmittelbar nach den Applikationsterminen kam es zu einem minimalen Anstieg der N_2O -Emissionen, was zum einen auf Niederschlagsereignisse und gleichzeitig milde Temperaturen im April zurückgeführt werden kann. Erst Anfang Mai stiegen die Temperaturen kontinuierlich an und parallel dazu auch die Lachgasemissionen in allen Varianten. Der sprunghafte Emissionsanstieg Mitte Mai lässt sich mit einem Starkniederschlagsereignis (27,8 mm) am 19.05.2017 begründen. Dabei wurden die höchsten Emissionen in der injizierten ($52,87 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) Variante, gefolgt von der gestreuten Variante ($34,38 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), ermittelt. Kurz vor der Winterrapsenernte am 31.07.2017 kam es erneut zu ausgiebigen Niederschlägen. Die injizierte Variante reagierte auf die Wiederbefeuchtung des Bodens mit den höchsten N_2O -Emission ($61,36 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) im Betrachtungszeitraum. Aufgrund von Bodenbearbeitungsmaßnahmen (Pflug) am 16.08.2017 kam es kurzfristig zu höheren Nachernte-Emissionen in allen vier Varianten. Generell bewegten sich die Lachgas-Emissionen im Versuchsjahr 2017 in allen Düngungsvarianten auf einem sehr niedrigen Niveau ($<1 \text{ kg N ha}^{-1}$).

Die kumulierten N_2O -Emissionen (Abb. MLU-5) für den Betrachtungszeitraum (13.09.2016 bis 28.09.2017) bewegten sich in den vier Varianten zwischen $0,10 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ und $0,79 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$. Die injizierte und gestreute Variante emittierten nahezu die gleiche Menge an Lachgas und unterschieden sich lediglich um $0,08 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$. Im Vergleich dazu ergab sich bei der doppelt stabilisierten Variante eine um 51,9 % geringere Gesamt- N_2O Freisetzung gegenüber der injizierten Variante ($0,79 \text{ kg N ha}^{-1}$). Die Unterschiede zwischen den Varianten ließen sich statistisch nicht absichern.

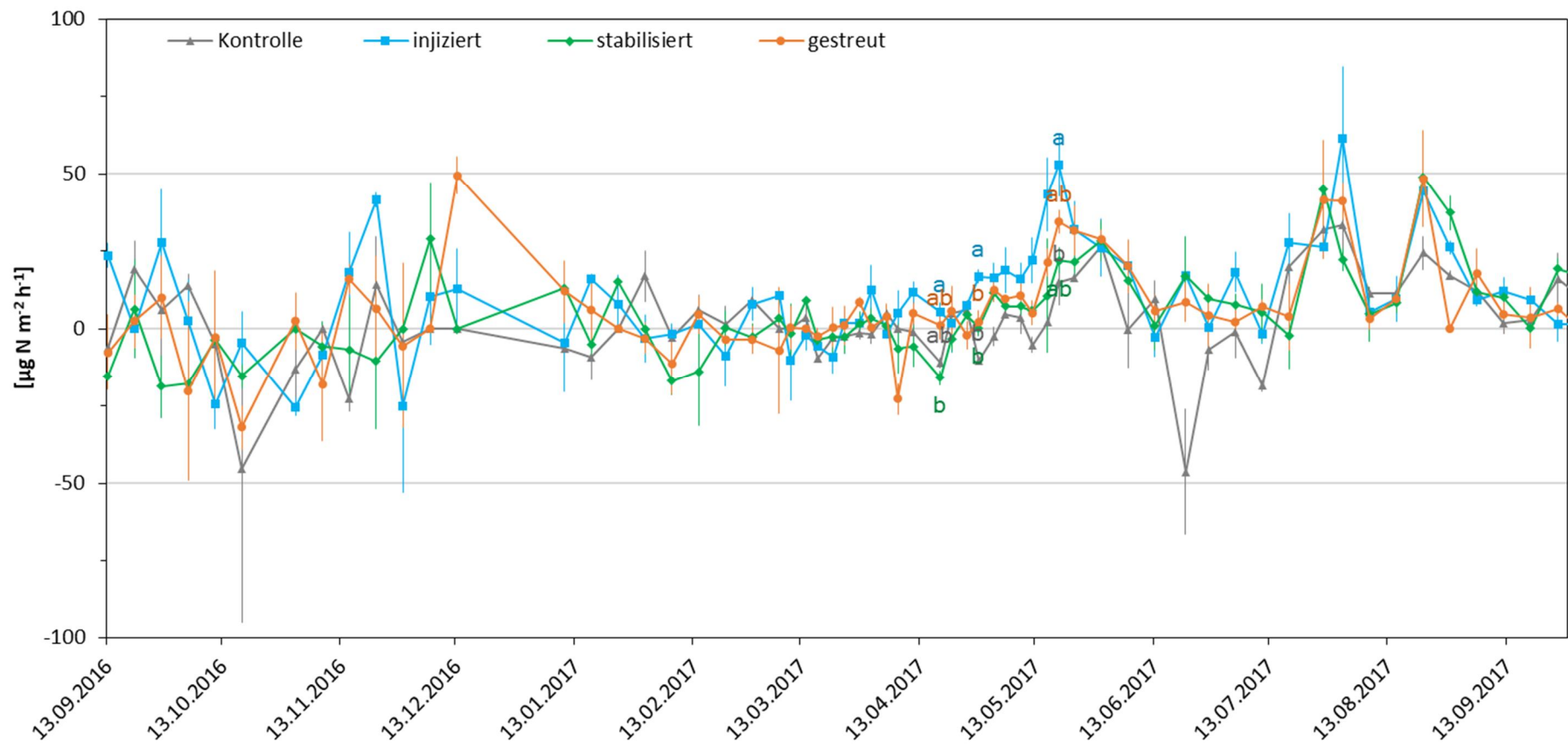


Abb. MLU-4: Lachgasflüsse (Mittelwert aus 4 Wiederholungen \pm Standardfehler) aller Düngungsvarianten im Zeitraum von 13.09.2016 bis 28.09.2017 in Winterraps am Standort Bernburg. An Messterminen mit signifikanten Mittelwertdifferenzen sind diese durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet ($p=0.05$, Tukey-Test)

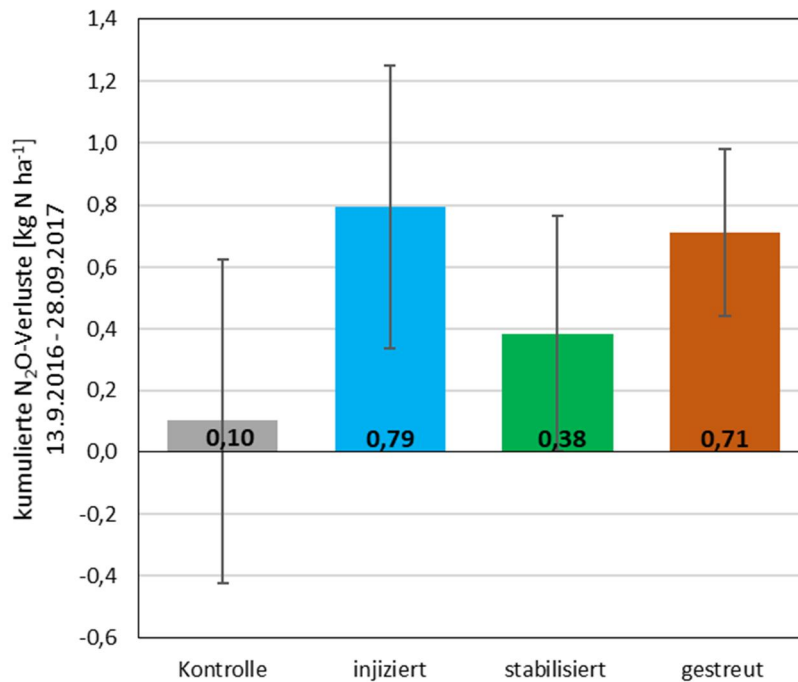


Abb. MLU-5: Kumulierte N₂O-Verluste in Winterraps am Standort Bernburg im Zeitraum 13.09.2016 bis 28.09.2017 (Mittelwert aus 4 Wiederholungen \pm Standardabweichungen, Unterschiede nicht signifikant)

2. Versuchsjahr: Winterweizen – Messzeitraum 28.09.2017 bis 27.09.2018

Im zweiten Versuchsjahr wurden an insgesamt 61 Tagen Proben für die Ermittlung der Lachgasemissionen im Winterweizen entnommen. Der Zeitraum belief sich vom 29.08.2017 bis zum 27.09.2018. Die während dieses Zeitraumes ermittelten Lachgasflüsse werden in Abb. MLU-6 dargestellt.

Nach der Aussaat am 28.09.2017 bis zum ersten Düngungstermin am 09.04.2018 bewegten sich die N₂O-Emission auf einem konstant niedrigen Niveau (unter 30 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Erst mit dem Beginn der Harnstoffapplikation (alle Düngungs-Varianten) am 09.04.2018 konnte unmittelbar am 13.04.2018 ein Emissionsanstieg in der injizierten Variante beobachten werden. Bereits elf Tage nach der ersten Stickstoffapplikation wurde im Betrachtungszeitraum der höchste Emissionswert von 63,02 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ in der injizierten Variante nachgewiesen. Darüber hinaus erfolgte am 20.04.2018 die zweite N-Gabe in der gestreuten und injizierten Variante. Ein leichter Emissionsanstieg (gestreute Variante) konnte zum Messtermin am 27.04.2018 bis zum nächsten Termin am 04.05.2018 ermittelt werden. In diesem kurzen Zeitraum fielen über mehrere Tage knapp 7 mm Niederschlag. Mit der zweiten und letzten N-Gabe konnte die stabilisierte Variante bereits am 09.05.2018 abgeschlossen werden. Die beiden übrigen Düngungsvarianten erhielten ihre Abschlussgabe am 22.05.2019. Wobei die Injektion aufgrund verfahrenstechnischer Gründe (zu etablierter Weizenbestand) nicht realisiert werden konnte und die Applikation oberflächlich erfolgte.

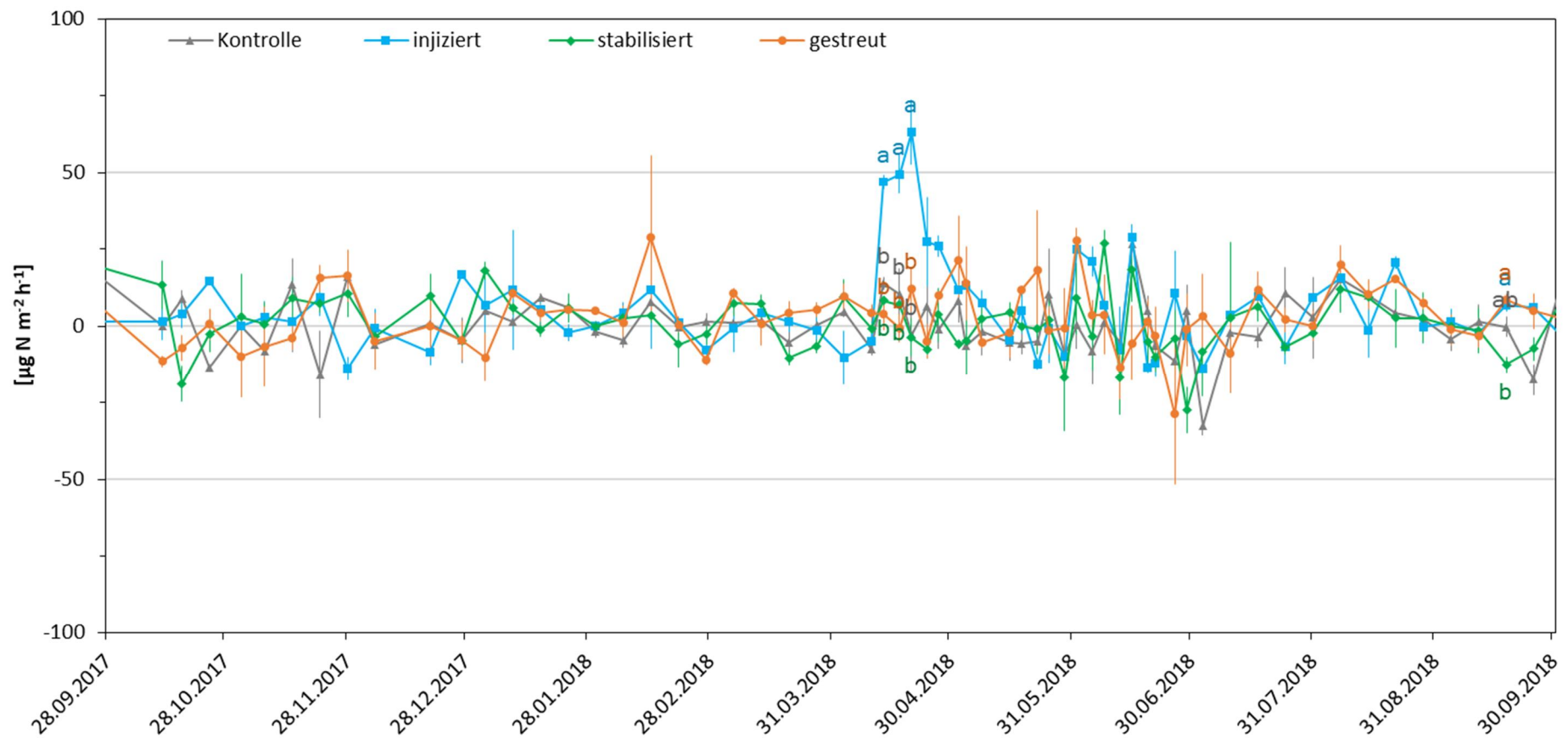


Abb. MLU-6: Lachgasflüsse (Mittelwert aus 4 Wiederholungen \pm Standardfehler) aller Düngungsvarianten im Zeitraum von 29.08.2017 bis 27.09.2018 in Winterweizen am Standort Bernburg. An Messterminen mit signifikanten Mittelwertdifferenzen sind diese durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet ($p=0.05$, Tukey-Test)

Erneut kam es kurz nach der Düngerapplikation zu einer leichten Erhöhung der N_2O -Emission. Im Zeitraum vom 01.06.2018 bis zum 15.06.2018 emittierte die stabilisierte Variante N_2O in Höhe von $26,85 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, gefolgt von der gestreuten Variante mit $27,56 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Die Emissionen der injizierten Variante stiegen auf $28,92 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Begleitend dazu, führten vereinzelte Niederschlagsereignisse innerhalb dieser 14 Tage zu einer Wiederbefeuchtung der oberen Ackerkrume. Wie auch im Versuchsjahr 2017 konnte nach der Ernte in allen Varianten ein Emissionsanstieg von bis zu $19,91 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ beobachtet werden. Dies kann mit dem Pflugeinsatz am 03.08.2018 und einem Niederschlagsereignis in Höhe von 54,9 mm begründet werden.

Wie im ersten Versuchsjahr konnte auch 2018 im Winterweizen eine verfahrenstechnisch analoge kumulierte Emissionsverteilung der Varianten beobachtet werden (Abb. MLU-7). Jedoch mit einer reduzierten Spannweite der kumulierten Lachgasverluste (0,06 bis $0,40 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$). Erwartungsgemäß wurden mit $0,06 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ die geringsten Verluste in der ungedüngten Variante festgestellt. Die stabilisierte Variante emittierte lediglich $0,04 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ mehr im Vergleich zur Kontrolle. Minimal höher waren die kumulierten Emissionen in der gestreuten Variante ($0,23 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$) und am höchsten in der Harnstoff-injizierten Variante mit $0,40 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$. Die Unterschiede zwischen den Varianten ließen sich statistisch nicht absichern. Wiederum ist zu erwähnen, dass auch im Versuchsjahr 2017/2018 sich die gesamten Lachgasemissionen auf einem sehr niedrigen Niveau von unter 1 kg N ha^{-1} bewegten.

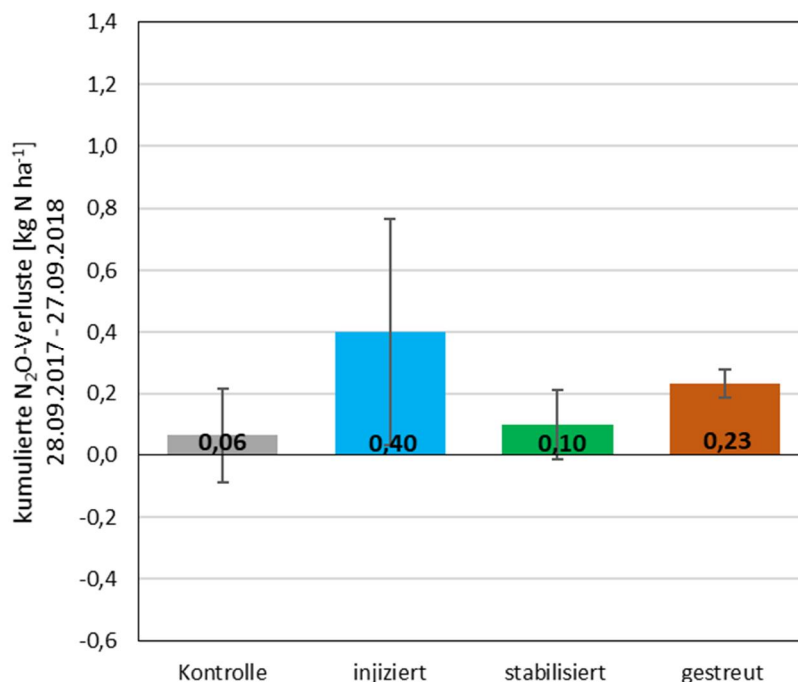


Abb. MLU-7: Kumulierte N_2O -Verluste in Winterweizen am Standort Bernburg im Zeitraum 28.09.2017 bis 27.09.2018 (Mittelwert aus 4 Wiederholungen \pm Standardabweichung, Unterschiede nicht signifikant)

3. Versuchsjahr: Wintergerste – Messzeitraum 27.09.2018 bis 24.09.2019

Das letzte Versuchsjahr des Fruchtfolgeversuches beinhaltete nochmals eine Lachgas-Messkampagne von insgesamt 61 Tagen in der Wintergerste. Im Zeitraum vom 27.09.2018 bis zum 24.09.2019 wurden die Lachgas-Emissionen am Standort Bernburg erhoben. Die Abb. MLU-8 veranschaulicht die daraus resultierenden Lachgasflüsse für diesen Zeitraum. Die Aussaatbedingungen für die am 27.09.2018 gedrillte Wintergerste waren aufgrund der anhaltenden Trockenheit im Herbst (September bis November) sehr schwierig. Die Wiederbefeuchtung des Bodens durch vereinzelte Niederschlagsereignisse bei gleichzeitig noch sehr moderaten Temperaturen bis zum Jahresende führte zu kurzzeitigen Emissionen bis max. $16,81 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Anfang März 2019 konnte wiederum eine Erhöhung der Emissionswerte bis auf $13,77 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ nachgewiesen werden, nachdem die Emissionen Mitte Januar bis Ende Februar sich auf einem Niveau von unter $5 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ bewegten. Im Zuge des ersten Applikationstermins (Tab. MLU-3) am 22.03.2019 konnte ein stärkerer Anstieg der N_2O -Emissionen, insbesondere in der injizierten Variante ($36,48 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), am 29.03.2019 ermittelt werden. Dagegen erreichten die gestreute und stabilisierte Variante nach dem ersten Applikationstermin einen maximalen Emissionswert von $19,83 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und $16,98 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Ende April erhielten die injizierte und gestreute Variante ihre letzte N-Teilgabe. An den darauffolgenden Messtagen konnte in den beiden Varianten kein wesentlicher Anstieg der Lachgas-Emissionen festgestellt werden. Nachdem es bereits Ende April/Anfang Mai immer wieder zu leichten Niederschlägen gekommen war, fiel erst am 11.05.2019 eine adäquate Menge von 16,6 mm sowie nochmals 10 mm am 16.05.2019. An den darauffolgenden Messterminen am 17.05.2019 und 21.05.2019 wurden in allen Varianten deutlich höhere Emissionswerte festgestellt im Vergleich zu den vorigen Terminen. Mit $42,38 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ erreichte die gestreute Variante zu diesem Zeitpunkt ihren höchsten Emissionswert im Betrachtungszeitraum. Dieser konnte in der stabilisierten Variante ($25,37 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) am 07.06.2019 ermittelt werden. Vier Tage später wurde auch in der injizierten Variante der Höchstwert ($47,33 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) nachgewiesen. Die Nachernte-Emissionen bewegten sich wie im Versuchsjahr 2017/18 auf einem Niveau von unter $20 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Bei der Betrachtung der kumulierten Emissionen (Abb. MLU-9) wurde wie in den Vorjahren eine ähnliche N_2O -Emissionsverteilung der Varianten ermittelt. Die gestreute Variante lag mit einer kumulierten Menge von $-0,04 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ im negativen Bereich und emittierte zum ersten Mal im gesamten Versuchszeitraum weniger Lachgas als die stabilisierte Variante. Die höchsten Emissionen wurden erneut in der injizierten Variante mit $0,28 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ ermittelt. Gegenüber der Injektion wurde in der stabilisierten Variante eine Reduktion der N_2O -Emissionen von rund 64,3 % beobachtet. Mit einem Lachgas-Verlust von $0,13 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ emittierte die ungedüngte Kontrolle erstmalig mehr Lachgas als die stabilisierte und gestreute Variante. Mit einem Gesamtniveau von unter $0,50 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ waren die N_2O -Emissionen nochmals geringer gegenüber den vorigen Versuchsjahren. Unterschiede zwischen den Varianten ließen sich auch im dritten Versuchsjahr nicht statistisch absichern.

Bei der Betrachtung der kumulierten Emissionen (Abb. MLU-9) wurde wie in den Vorjahren eine ähnliche N_2O -Emissionsverteilung der Varianten ermittelt. Die gestreute Variante lag mit einer kumulierten Menge von $-0,04 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ im negativen Bereich und emittierte zum ersten Mal im gesamten Versuchszeitraum weniger Lachgas als die stabilisierte Variante.

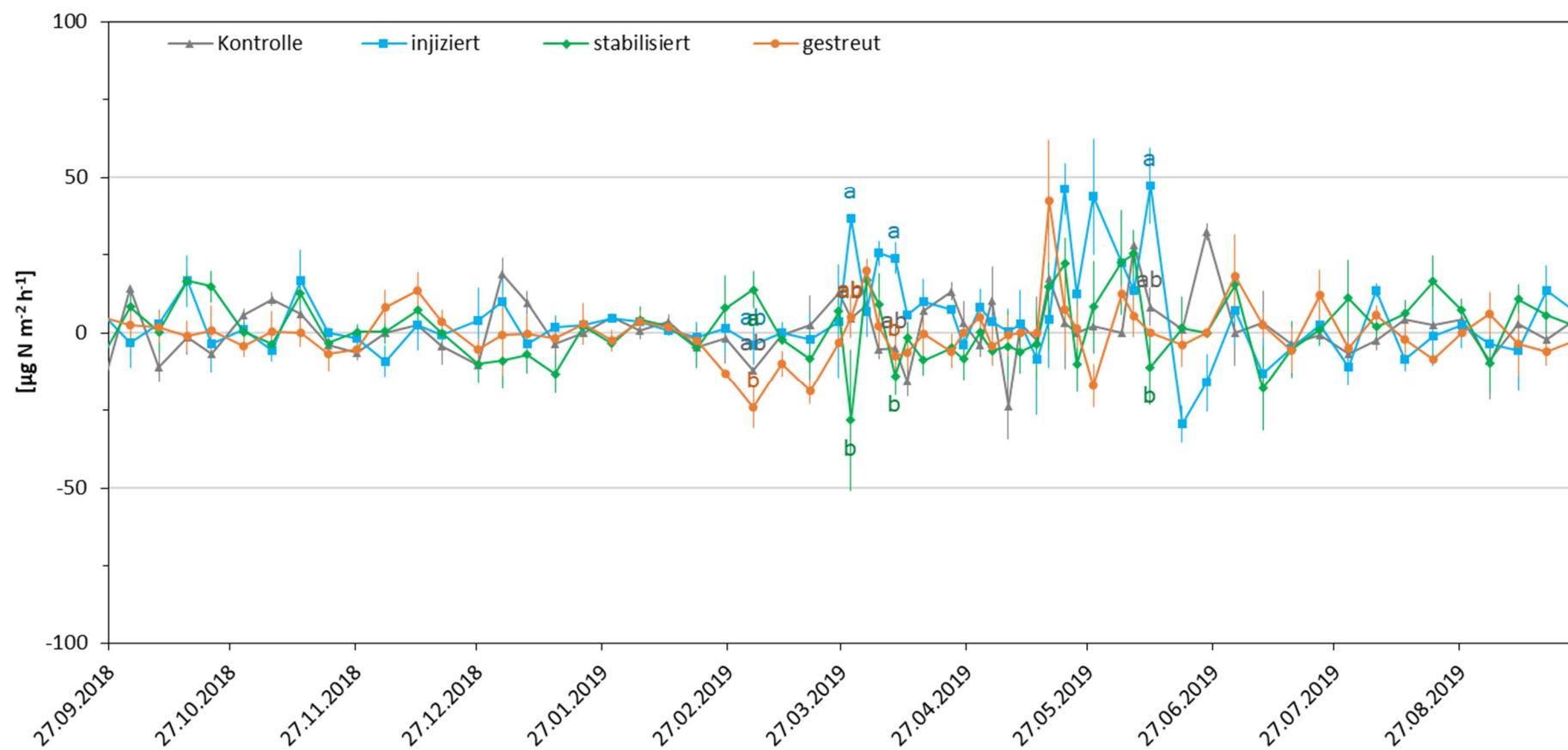


Abb. MLU-8: Lachgasflüsse (Mittelwert aus 4 Wiederholungen \pm Standardfehler) aller Düngungsvarianten im Zeitraum von 27.09.2018 bis 24.09.2019 in Wintergerste am Standort Bernburg. An Messterminen mit signifikanten Mittelwertdifferenzen sind diese durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet ($p=0.05$, Tukey-Test)

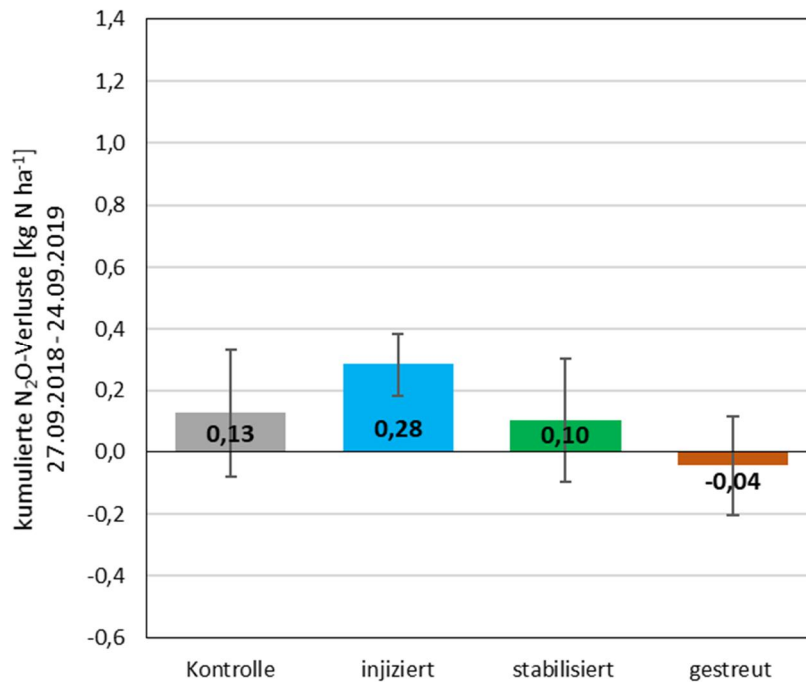


Abb. MLU-9: Kumulierte N₂O-Verluste in Wintergerste am Standort Bernburg im Zeitraum 27.09.2018 bis 24.09.2019 (Mittelwert aus 4 Wiederholungen \pm Standardabweichungen, Unterschiede nicht signifikant)

Die höchsten Emissionen wurden erneut in der injizierten Variante mit 0,28 kg N₂O-N ha⁻¹ ermittelt. Gegenüber der Injektion wurde in der stabilisierten Variante eine Reduktion der N₂O-Emissionen von rund 64,3 % beobachtet. Mit einem Lachgas-Verlust von 0,13 kg N₂O-N ha⁻¹ emittierte die ungedüngte Kontrolle erstmalig mehr Lachgas als die stabilisierte und gestreute Variante. Mit einem Gesamtniveau von unter 0,50 kg N₂O-N ha⁻¹ waren die N₂O-Emissionen nochmals geringer gegenüber den vorigen Versuchsjahren. Unterschiede zwischen den Varianten ließen sich auch im dritten Versuchsjahr nicht statistisch absichern.

Gesamtemissionen im Versuchszeitraum – 13.09.2016 bis 24.09.2019

In Abb. MLU-10 sind die kumulierten N₂O-Emissionen aus insgesamt 186 Messtagen der einzelnen Düngungsverfahren zusammengefasst worden. Auch beim kompletten Vergleich der Varianten über die gesamte Fruchtfolge lassen sich die Unterschiede nicht statistisch absichern. Betrachtet man allerdings die beiden innovativen Düngungsverfahren ist eine tendenziell höhere Lachgasemission aus der Injektion zu erwarten als durch die Stabilisierung (siehe Abb. MLU-4, 6, 8 mit signifikant höheren Emissionen zu einzelnen Terminen).

Aus Tab. MLU-4 können nochmals die einzelnen kumulierten Emissionen je Variante und Versuchsjahr nachvollzogen werden. Gleichzeitig mit angegeben sind auch die dazugehörigen Verlustraten, welche sich allesamt unter einem Prozent befinden und somit auf einem sehr niedrigen Niveau. Im Vergleich der beiden innovativen Düngeverfahren liegen die Emissionsfaktoren für die injizierte Variante stets höher als für die stabilisierte Variante.

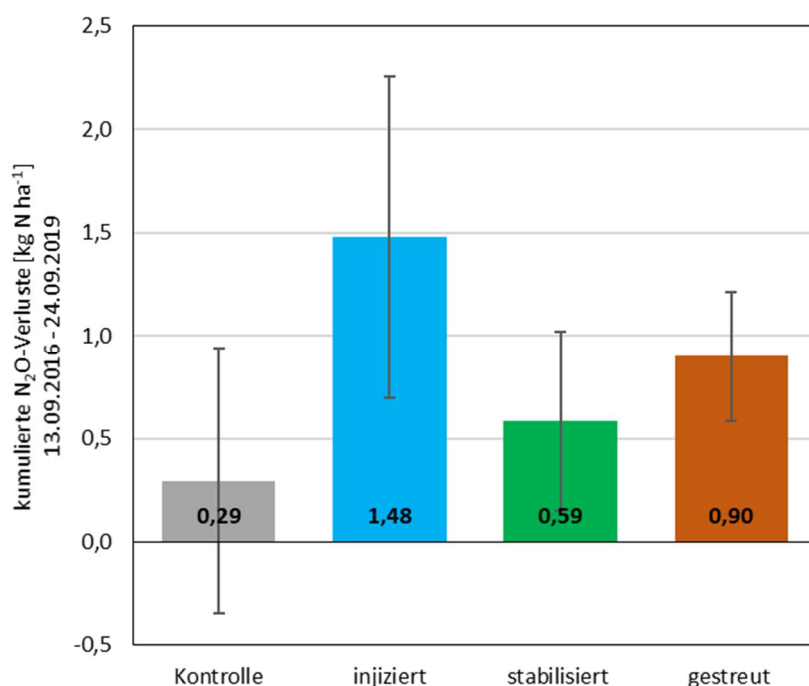


Abb. MLU-10: Kumulierte N₂O-Verluste im gesamtem Versuchszeitraum (13.09.2016 bis 24.09.2019) aller Düngungsvarianten am Standort Bernburg (Mittelwert aus 4 Wiederholungen \pm Standardabweichung, Unterschiede nicht signifikant)

Tab. MLU-4: Kumulierte N₂O-Emissionen und Emissionsfaktoren der einzelnen Düngungsvarianten im Winterraps, Winterweizen, Wintergerste am Standort Bernburg

Versuchsjahr	Kultur	Varainte	kum. N ₂ O-N-Emission (kg ha ⁻¹)	Emissionsfaktoren (%)
2017	Winterraps	Kontrolle	0,10	-
		injiziert	0,79	0,53
		stabilisiert	0,38	0,22
		gestreut	0,71	0,47
2018	Winterweizen	Kontrolle	0,06	-
		injiziert	0,40	0,17
		stabilisiert	0,10	0,02
		gestreut	0,23	0,08
2019	Wintergerste	Kontrolle	0,13	-
		injiziert	0,28	0,10
		stabilisiert	0,10	-0,01
		gestreut	-0,04	-0,11

1.3.4 AP 4 nicht bearbeitet (gemäß Vorhabenbeschreibung)

Alle NH_3 -Verlustraten aus dem dreijährigen Freilandversuch am Standort Bernburg wurden fristgerecht an Herrn Dr. Pacholski übermittelt (gemäß Vorhabenbeschreibung).

1.3.5 Bewertung; LLG/MLU (AP-5)

Bei der Betrachtung der N_2O -Verlustraten bzw. Emissionsfaktoren der einzelnen Düngungsverfahren wird sehr deutlich, dass in allen drei Versuchsjahren sowie Kulturen die ermittelten Emissionsfaktoren am Standort Bernburg unter den vom IPCC (2006) definierten Emissionsfaktor lagen. Laut IPCC (2006) beträgt dieser $0,01 \text{ kg N}_2\text{O-N/kg N}$ bzw. 1 % des applizierten N-Düngers. Mit gerade mal 0,53 % wurde der höchste Emissionsfaktor im dreijährigen Versuchszeitraum im ersten Versuchsjahr (Winterraps) bei dem innovativen Verfahren, der Platzierung von Harnstoff, ermittelt. Nicht zu vernachlässigen ist allerdings, dass im gesamten Projektzeitraum die sehr trockenen und niederschlagsarmen Witterungsbedingungen, insbesondere während der Düngesaison, einen erheblichen Einfluss auf die festgestellten Ergebnisse hatten.

Korrespondierend damit bewegten sich auch die gemessenen Ammoniakemissionen auf einem sehr niedrigen Niveau. Die aus den NH_3 -Messkampagnen resultierenden Emissionsfaktoren sind vergleichend zum EMEP-Emissionsfaktor (2016) von $0,155 \text{ kg NH}_3 (\text{kg N})^{-1}$ wesentlich geringer ausgefallen. Im ersten Versuchsjahr konnten keine Emissionen nachgewiesen werden. Im zweiten Versuchsjahr wurden mit $6,37 \text{ NH}_3\text{-N kg/ha}^{-1}$ die höchsten Ammoniakverluste (gestreute Variante) im gesamten Versuchszeitraum ermittelt, was einen Verlust von 3,19 % des applizierten Harnstoffs entsprach. 2019 lagen die NH_3 -Emissionen in allen Varianten auf einem sehr ähnlichen und niedrigen Niveau ($2,74 - 3,19 \text{ NH}_3\text{-N kg/ha}^{-1}$) und dementsprechend gering waren die Emissionsfaktoren von unter 2 % des ausgebrachten N-Düngers. Darüber hinaus sind NH_3 -Verluste auch immer abhängig vom Standort bzw. standortspezifisch zu betrachten. Das niedrige Ammoniak-Verlustpotenzial an diesem Versuchsstandort hat, neben den trockenen Witterungsbedingungen, auch dazu beigetragen, dass sich die Emissionen im Projektzeitraum insgesamt auf einem sehr niedrigen Niveau bewegten.

Neben der umweltseitigen Bewertung der Stickstoff-Emissionen spielt auch die Nutzungseffizienz eine Rolle, in der die Erträge mit zu berücksichtigen sind. Vergleicht man die derzeit praxisübliche Variante der oberflächlichen Ausbringung von Harnstoff („gestreut“) mit den beiden innovativen Düngeverfahren in Bezug auf Ertrag und Emissionen, ergibt sich tendenziell ein Vorteil der stabilisierten Variante (\nearrow Erträge bei \searrow Emissionen) gegenüber der injizierten Variante (\searrow Erträge bei \nearrow Emissionen). Betrachtet man die injizierte und stabilisierte Variante hinsichtlich ihrer Erträge und der Stickstoffnutzungseffizienz unterscheiden sich die beiden innovativen Verfahren im Mittel aller Versuchsjahre kaum. Zur Bestätigung dieser qualitativen Unterschiede sind weitere Versuchsjahre bzw. eine Gasmessung in allen Kulturen über die gesamte Rotation nötig.

1.3.6 Verwertung: LLG/MLU (AP-6)

Im Rahmen des Wissenstransfers resultierten aus dem Projekt eine Reihe von Aktivitäten in enger Kooperation der Bearbeiter des Fruchtfolge-Versuche in Bernburg (LL + MLU). Die ermittelten Ergebnisse wurden auf Fachtagungen in Form von Vorträgen, Postern und in Vorlesungen der MLU präsentiert. Darüber hinaus befindet sich eine Publikation (2020) in einem begutachteten Fachjournal in Vorbereitung. Die im Projektzeitraum erfolgten Vorträge sind nachfolgend nach Jahren aufgelistet.

2017

Eißner, F., Bischoff, J., Koblenz, B., Rücknagel, J., Tauchnitz, N., Klein, F., Schäfer, F., Schickinger, H., Rauch, N., Kunz, J., Kreuter, T., Thiel, E. & Christen, O (2017). Erste Erfahrungen zur Harnstoff-Einarbeitung im Side-Dressing-Verfahren im Projekt STAPLARES am Standort Bernburg-Strenzfeld. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften - Band 29: Anforderungen an den Pflanzenbau in einer sich urbanisierenden Welt - 60. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. in Kassel – Witzenhausen. 2017, (S. 160 – 161).

Eißner, F., Bischoff, J., Koblenz, B., Rücknagel, J., Tauchnitz, N., Klein, F., Schäfer, F., Schickinger, H., Rauch, N., Kunz, J., Kreuter, T., Thiel, E., Schuster, C., Vinzent, B., Maidl, F.-X., Hülsbergen, K.-J., Grunert, M., Stichnothe, H. & Christen, O (2017). Erste Erfahrungen zur Harnstoff-Einarbeitung im Side-Dressing-Verfahren im Projekt STAPLARES am Standort Bernburg-Strenzfeld. VDLUFA-Schriftenreihe Band 74: Standortgerechte Landnutzung - umweltverträglich und wirtschaftlich - 129. VDLUFA-KONGRESS. 2017 in Freising. (S. 223 – 232).

Eißner, F., Bischoff, J., Koblenz, B., Rücknagel, J., Tauchnitz, N., Klein, F., Schäfer, F., Schickinger, H., Rauch, N., Kunz, J., Kreuter, T., Thiel, E., Schuster, C., Vinzent, B., Maidl, F.-X., Hülsbergen, K.-J., Grunert, M., Stichnothe, H. & Christen, O (2017). Voll daneben und dennoch genau. Innovative Düngungssysteme in Mais, Raps und Getreide. Agritechnica-Forum „Pflanzenbau live“ des DLG-Ausschuss für Pflanzenernährung in Hannover (13.11.2017).

Eißner, F., Bischoff, J., Koblenz, B., Rücknagel, J., Tauchnitz, N., Klein, F., Schäfer, F., Schickinger, H., Rauch, N., Kunz, J., Kreuter, T., Thiel, E., Schuster, C., Vinzent, B., Maidl, F.-X., Hülsbergen, K.-J., Grunert, M., Stichnothe, H. & Christen, O (2017). Feldversuche zur Zwischenreihendüngung und wurzelnahen Stickstoff(N)-Platzierung in Getreide und Raps. Ackerbautagung der LLG Sachsen-Anhalt in Iden (22.11.2017) und Bernburg (23.11.2017).

2018

Vorstellung des Versuches und seiner Konzeption sowie der eingesetzten Versuchstechnik auf der DLG-Technikertagung in Hannover (30. -31.01.2018)

Vorstellung des Side-Dressing-Verfahrens im Rahmen der DLG-Feldtage 2018 (12. – 16.06. 2018)

2019

Eißner F, Bischoff J, Rauch N, Rücknagel J, Kühling I, Kreuter T, Schuster C, Schäfer F, Tauchnitz N, Simon A, Maidl FX, Hülsbergen KJ, Augustin J, Stichnothe H, Grunert M, Böttcher F, Christen, O., 2019: Wurzelnahe Platzierung von mineralischen Harnstoffdünger im Side-Dressing Verfahren – eine ackerbauliche und umweltseitige Verfahrensbewertung. Jahrestagung der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz und der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft.

Eißner F, Bischoff J, Rauch N, Rücknagel J, Kühling I, Kreuter T, Schuster C, Schäfer F, Tauchnitz N, Simon A, Maidl FX, Hülsbergen KJ, Augustin J, Stichnothe H, Grunert M, Böttcher F, Christen, O. ,2019: Vortrag auf Ackerbautagung der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau (LLG) Sachsen-Anhalt, 26. November (Bernburg) und 27. November (Iden) 2019.

1.4. ZALF – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Das ZALF war mit unterschiedlicher Gewichtung an den Arbeitspaketen AP 3 (Lachgas-Verluste) und AP 4 (Prozessbetrachtung) beteiligt. Gemäß Arbeitsplan konzentrierten sich die Aktivitäten des ZALF auf die Konzipierung und Vorbereitung der N_2O -Flussmessungen in den Fruchtfolgeversuchen (AP3: Lachgas-Verluste) und die Quantifizierung des Nitrifikations/Denitrifikationspotenzials (d.h. des Potenzials an N_2O und N_2 -Verlusten). Nachfolgend werden in den Kapiteln 1.4.1 und 1.4.2 die Aktivitäten zu beiden Arbeitspaketen abschließend zusammengefasst.

1.4.1. Lachgas-Verluste (AP-3)

Das ZALF hat sich wie vorgesehen an der Konzipierung von N_2O -Messungen auf Feldexperimenten beteiligt. Das beinhaltete folgende Aktivitäten:

- Beratung der Projektpartner hinsichtlich der Art und Weise der Durchführung von Gasflussmessungen,
- Gewinnung der Begleitdaten,
- Unterstützung bei der Beschaffung der Messtechnik (Gashauben etc.)
- Einführung in ein R-Skript zur Auswertung und Modellierung der Messungen zu den N_2O -Flüssen.

Wie geplant führte das ZALF in diesem Kontext einen Workshop durch, der der Einführung der Projektpartner in die Nutzung eines selbst entwickelten R-Skripts zur Auswertung und Modellierung der Messungen zu den N_2O -Flüssen gewidmet war.

Die Durchführung und Auswertung der N_2O -Flussmessungen auf den Standorten Cunnersdorf, Roggenstein und Bernburg erfolgte in Eigenverantwortung der Projektpartner SKW Piesteritz GmbH, Technische Universität München und der Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau, Sachsen-Anhalt/MLU Halle-Wittenberg.

1.4.2. Potential Denitrifikation (AP-4.2)

In enger Zusammenarbeit mit dem SKW Piesteritz zeichnete das ZALF für die Durchführung Teilprojektes im Arbeitspaket AP 4.2 verantwortlich, welches sich der Ermittlung des Nitrifikations/Denitrifikationspotenzials beim Einsatz stabiler Harnstoffdünger mithilfe der sogenannten Heliuminkubationstechnik widmete. Während am ZALF die Messungen zu den N-Gasflüssen durchgeführt wurden, bestimmte Herr Dr. Oliver Spott vom Projektpartner SKW Piesteritz die Gehalte an Ammonium- und Nitrat-N in den inkubierten Bodenproben.

Wie geplant erfolgte zunächst die Feinabstimmung und Optimierung des Experimentalprogrammes. Als Basis dafür dienten Vorversuche, welche auf folgende Ziele ausgerichtet waren: (I) Entwicklung und Testung einer modifizierten Heliuminkubationsanlage hinsichtlich Stabilität und Genauigkeit der N_2O und insbesondere N_2 -Messergebnisse; (II) Eignung der Anlage für die simultane Bestimmung der Freisetzung von N_2O , N_2 und anderen Treibhausgasen (CO_2 und CH_4) aus Bodenproben über Zeiträume von mehreren Wochen zur Präzisierung und Optimierung des Experimentalprogrammes.

Zu Punkt I erfolgte im Dezember 2017 die Integration eines TRACE 1300 Gas Chromatographs (Thermo Fisher) in eine bestehende Anlage (Abb. ZALF-1). Dies erhöht die Messgenauigkeit der Anlage im Falle der zu erfassenden N_2 -Flüsse vom einstelligen ppm-Bereich in den einstelligen ppb-Bereich, wodurch nun auch deutlich geringere Flüsse bzw. etwaige Undichtigkeiten des Inkubationssystems erfassbar sind. Zu Punkt II wurden in enger Absprache mit dem Verbundpartner SKW Piesteritz mehrere Vorversuchsläufe durchgeführt, in deren Ergebnis ein optimiertes und präzisiertes Experimentalprogramm erstellt werden konnte. Parallel dazu wurden Tools (R basiert) zur Auswertung der mittels der Inkubationsanlage erhobenen Daten entwickelt.



Abb. ZALF-1: Gesamtansicht der optimierten Heliuminkubationsanlage mit Trace 1300 Gas Chromatograph, 6 Inkubationsgefäßen (Kühltruhe), dem Modul zur Konstanthaltung des Gasvolumenstroms und Multiplexer zum Umschalten der Gasflüsse als Schlüsselkomponenten der Anlage

Im Anschluss dessen fand die Durchführung aller geplanten Untersuchungen zum Nitrifikations/Denitrifikationspotenzial statt. Mithilfe der vorher optimierten Heliuminkubationsmethode galt es, die N_2O - und N_2 -Freisetzung aus dem Oberbodensubstrat von den StaPlaRes-Flächen Cunnersdorf, Bernburg und Roggenstein zu bestimmen.

Hierzu wurden die Bodensubstrate nach der Rapsernte im Herbst 2017 entnommen, gesiebt und getrocknet. In Abstimmung mit dem Kooperationspartner SKW Piesteritz erfolgte für jedes Bodensubstrat die Untersuchung der kombinierten Wirkung ausgewählter Bodenfeuchtestufen, der synthetischen N-Düngerformen Harnstoff und Kalkammonsalpeter (im Vergleich zu einer ungedüngten Kontrolle) und des O₂-Gehaltes in den Inkubationsgefäßen bzw. der Bodenluft auf die N-Gasfreisetzung.

Aus Kapazitätsgründen wurden die Versuchsvarianten für jedes Substrat etappenweise separat wie folgt untersucht.

Etappe 1: Inkubation ohne zusätzliche N-Düngung

Variante	Bodenfeuchte (%tualer Anteil des wassergefüllten Porenraums – WFPS)	O ₂ -Gehalt in der Inkubationsluft
1	70	21 % (aerob)
2	70	0 % (anaerob)
3	90 ¹	21 % (aerob)
4	90 ¹	0 % (anaerob)

¹Im Fall des Substrates vom Standort Bernburg wurde ein WFPS von 79 % eingestellt

Etappe 2: Inkubation mit zusätzlicher N-Düngung (10 mg N/100 g trockener Boden, 70% WFPS)

Variante	N-Düngerform	O ₂ -Gehalt in der Inkubationsluft
1	Kalkammonsalpeter (KAS)	21 % (aerob)
2	Kalkammonsalpeter (KAS)	0 % (anaerob)
3	Harnstoff (HARN)	21 % (aerob)
4	Harnstoff (HARN)	0 % (anaerob)

Die Inkubation der Bodenproben erfolgte in Stechzylindern mit einem Volumen von 250 cm³ (je drei pro Variante) über einen Zeitraum von 16-21 Tagen und einer Temperatur von 20 °C. Das getrocknete Bodensubstrat wurde vor der Inkubation zunächst angefeuchtet, durchmischt und mit einer Lagerungsdichte von 1.4 g cm⁻³ in die Stechzylinder eingefüllt und anschließend in die gasdichten Gefäße der Inkubationsanlage überführt, wo sie von einem Gasgemisch definierter Zusammensetzung (mit bzw. ohne O₂) überströmt wurden. Bei den Varianten mit N-Düngung erfolgte vorher noch die Zugabe des N-Düngers in flüssiger Form. Zu ausgewählten Zeitpunkten der Versuchsdurchführung (Beginn Heliuminkubation, Erreichen der Peaks der N₂O- und N₂-Freisetzung, Ende der Heliuminkubation) wurden an parallel inkubierten Stechzylindern die NH₄- und NO₃-Konzentrationen im Bodensubstrat ermittelt.

Generell ergaben sich zwischen den untersuchten Bodensubstraten große Unterschiede in der Dynamik der Gasflüsse. Ein exemplarisches Beispiel für diese Aussagen stellen die CO₂-Flüssen nach N-Düngerzugabe unter aeroben Bedingungen dar. Während beim Substrat vom Standort Roggenstein und in abgeschwächter Form beim Substrat vom Standort Bernburg ein Peak der CO₂-Flüsse kurz nach Beginn der Inkubation zu verzeichnen war, trat beim Substrat vom Standort Cunnersdorf lediglich eine schwacher CO₂-Peak zum am Ende der Inkubation auf (Abb. ZALF-2).

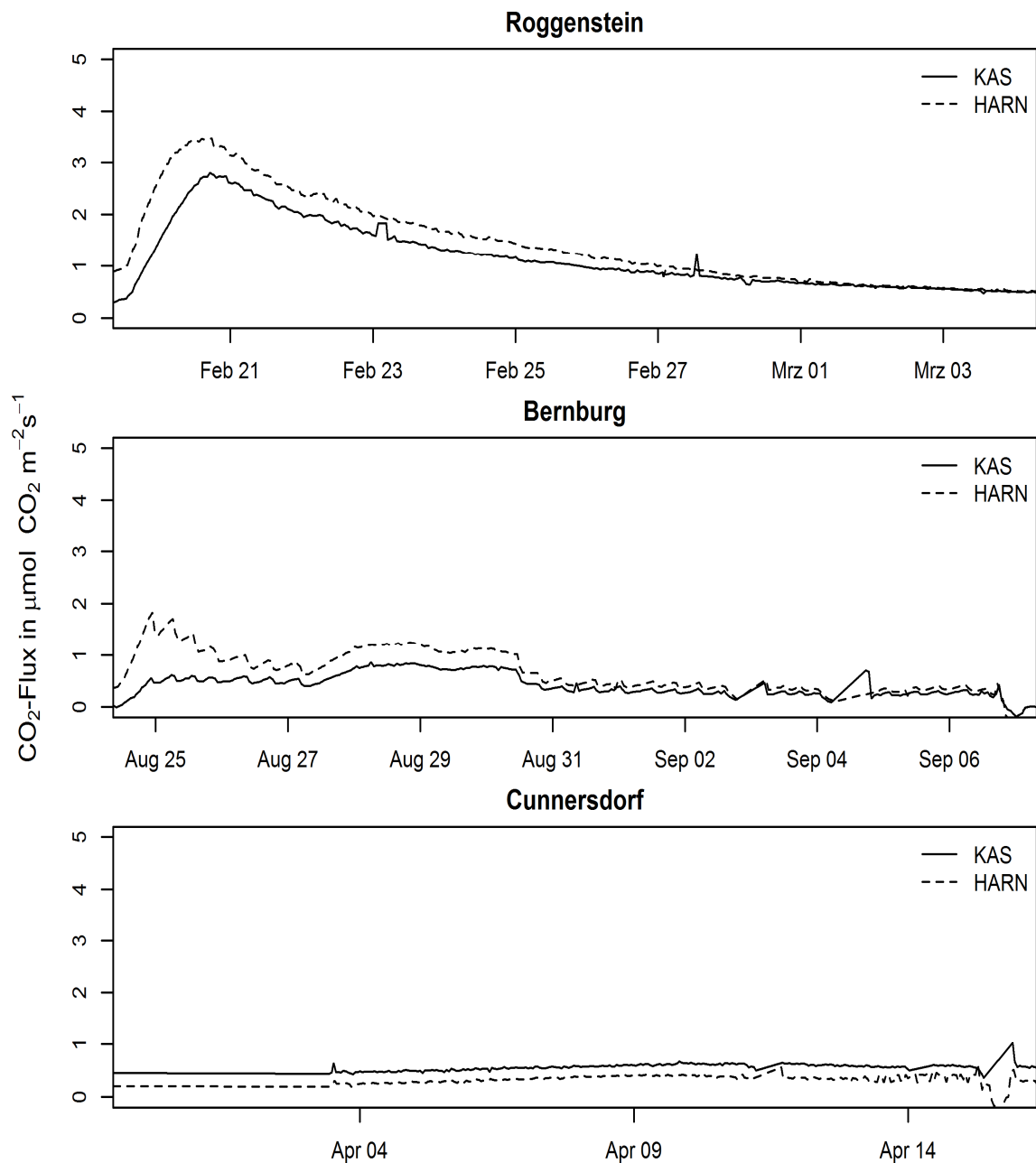


Abb. ZALF-2: Verlauf der CO₂-Freisetzung bei Inkubation der Substrate von den Standorten Roggenstein, Bernburg und Cunnersdorf bei KAS- oder Harnstoffapplikation unter aeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (WFPS = %tueler Anteil wassergefüllter Poren, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

Unabhängig von der Form des applizierten N-Düngers zeigten sich ähnliche Verhaltensmuster bei der Dynamik der N₂O- und N₂-Freisetzung. Bei den hier vorgestellten Resultaten, die unter aeroben Bedingungen gewonnen wurden, wies das Substrat vom Standort Cunnersdorf stets die höchste Intensität bei den N₂O- und N₂-Freisetzungsraten auf (Abb. ZALF-3 und ZALF-4). Es waren jedoch keine eindeutigen Unterschiede in der Wirkung der verschiedenen N-Düngerformen auf die Dynamik der Gasflüsse unter aeroben Bedingungen festzustellen (Abb. ZALF-2 bis ZALF- 4).

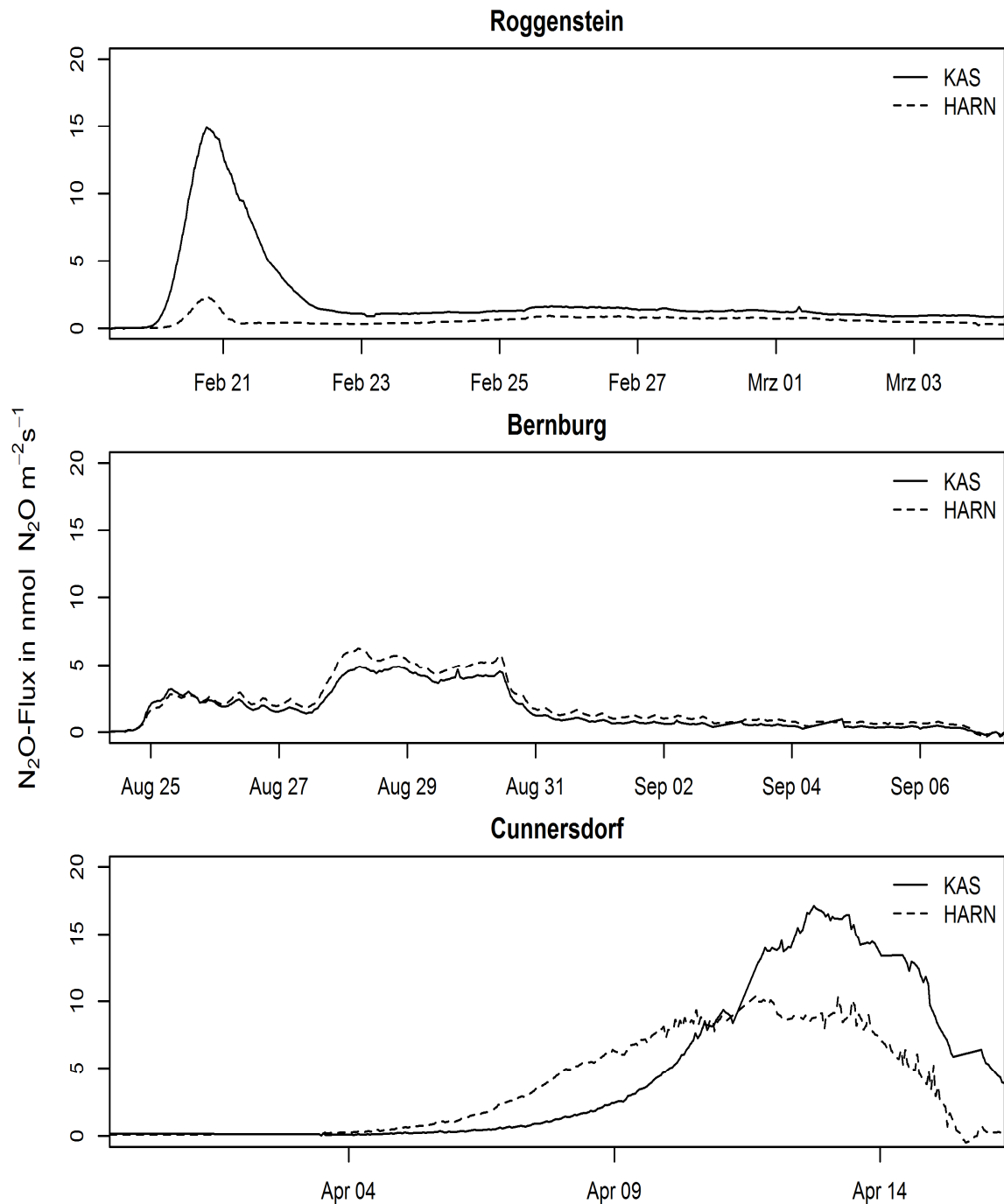


Abb. ZALF-3: Verlauf der N₂O-Freisetzung bei Inkubation der Substrate von den Standorten Roggenstein, Bernburg und Cunnersdorf bei KAS- oder Harnstoffapplikation unter aeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (WFPS = %tualer Anteil wassergefüllter Poren, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

Das galt auch für den Einfluss des Sauerstoffangebotes im Boden auf die N-Gasflüsse. Unter anaeroben Bedingungen fielen zum Beispiel die N₂O-Flussraten am Standort Cunnersdorf deutlich niedriger als unter aeroben Verhältnissen aus. Demgegenüber reagierte das Substrat vom Standort Bernburg mit sehr deutlichen Peaks der N₂O- und N₂-Freisetzung.

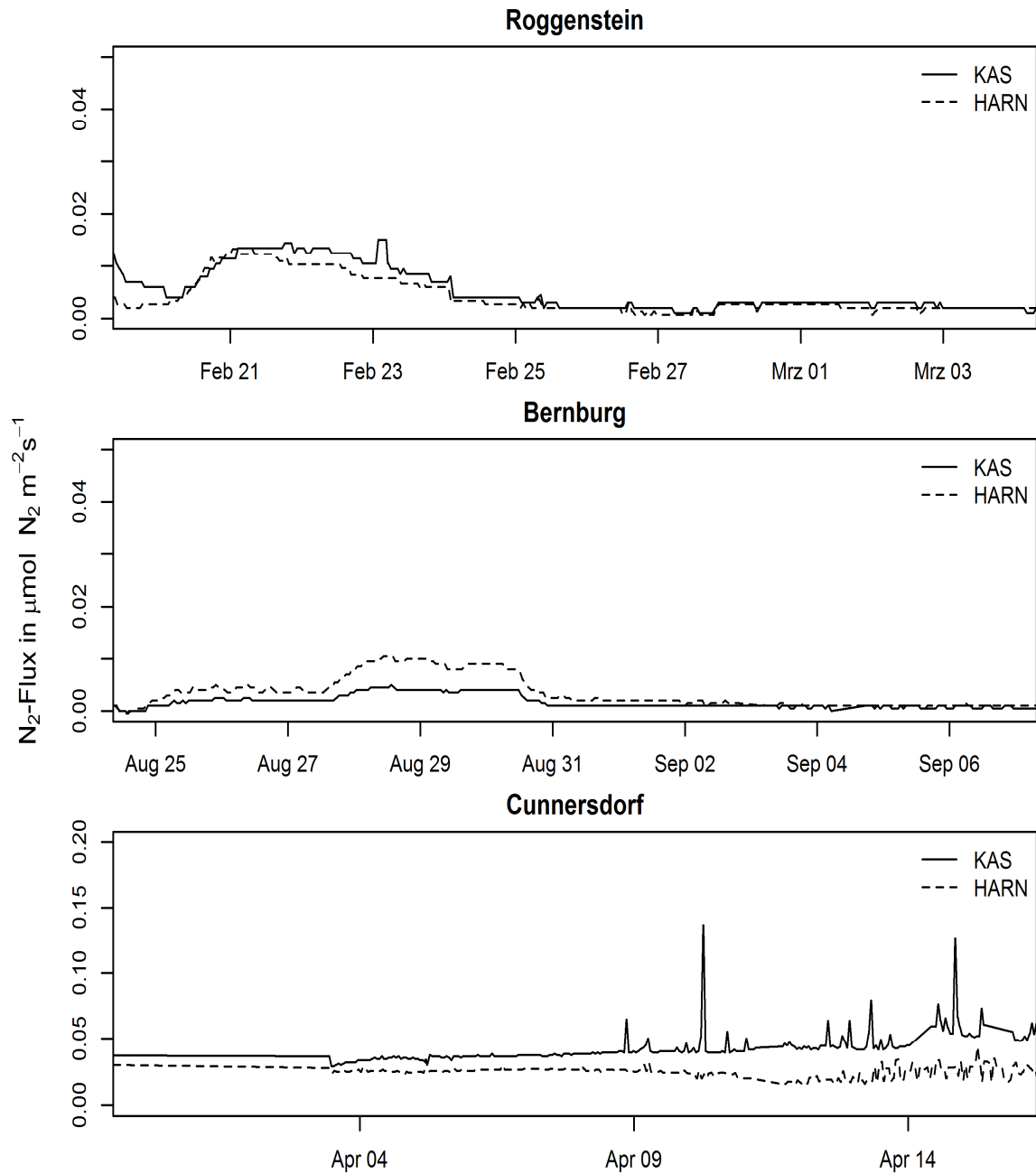


Abb. ZALF-4: Verlauf der N_2 -Freisetzung bei Inkubation der Substrate von den Standorten Roggenstein, Bernburg und Cunnersdorf bei KAS- oder Harnstoffapplikation unter aeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (WFPS = %tualer Anteil wassergefüllter Poren, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

Zwar bewirkte die N-Düngergabe auch hier stets eine Erhöhung der N_2 -Flüsse, aber vor allem bei dem Substrat vom Standort Cunnersdorf zeichnete sich auch die ungedüngte Variante durch eine anhaltend hohe N_2 -Freisetzungsrates aus. Des Weiteren lag bei der Mehrzahl der Varianten anders als unter aeroben Verhältnissen das Niveau der N-Gasemissionen nach KAS-Applikation deutlich höher als nach Harnstoffapplikation (Abb. ZALF-5 und ZALF-6).

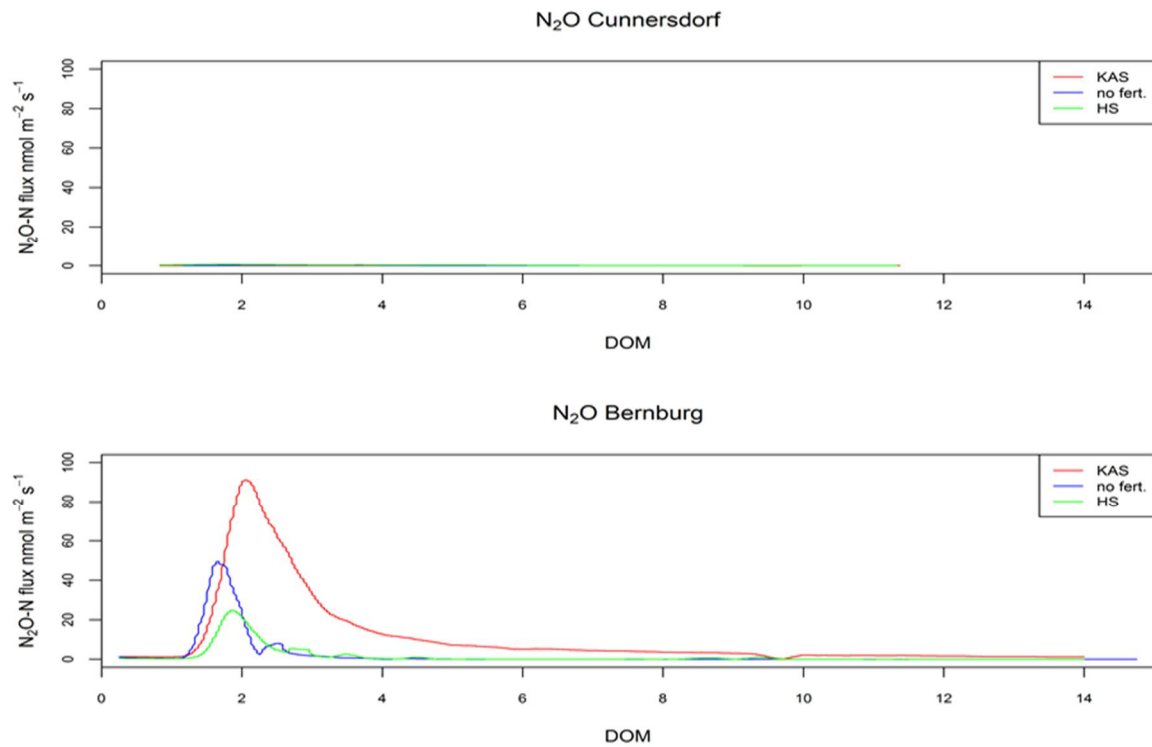


Abb. ZALF-5: Verlauf der N₂O-Emissionen bei Inkubation der Substrate von den Standorten Cunnersdorf und Bernburg unter anaeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (no Fert. = ungedüngt, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

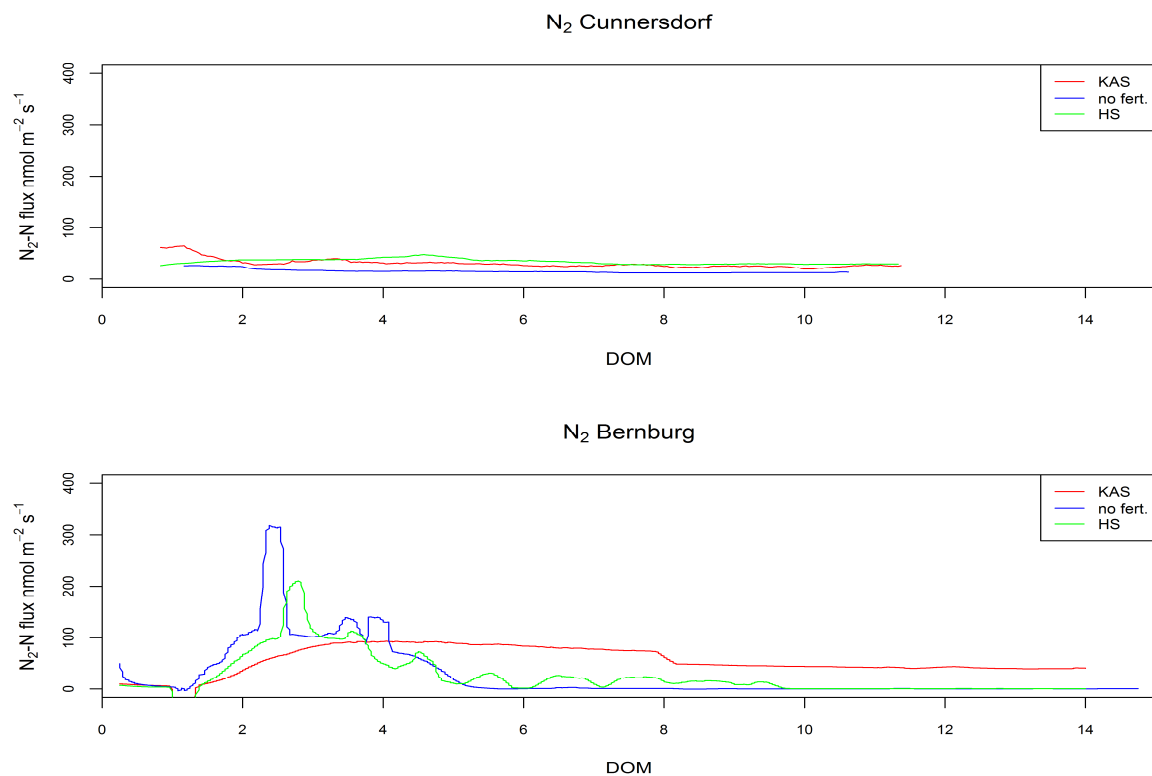


Abb. ZALF-6: Verlauf der N₂-Emissionen bei Inkubation der Substrate von den Standorten Cunnersdorf und Bernburg unter anaeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (no Fert. = ungedüngt, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

Im Hinblick auf die Dynamik der NH_4^+ - und NO_3^- -N-Gehalte im Boden waren ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Standorten zu verzeichnen. Während die NH_4^+ -N-Gehalte bei den Substraten der Standorte Roggenstein und Bernburg unter aeroben Bedingungen nach einem anfänglichen Anstieg im Zuge der Inkubation deutlich zurückgingen, verblieben diese beim Substrat vom Standort Cunnersdorf ungeachtet zwischenzeitlicher Schwankungen auf einem hohem Niveau. Bei den NO_3^- -N-Gehalten waren die Abweichungen noch deutlicher.

Im Fall der Standorte Roggenstein und Bernburg stieg die NO_3^- -Konzentration im Verlauf der Inkubation kontinuierlich an, im Fall von Cunnersdorf waren dagegen nur geringfügigere Veränderungen auf niedrigem Niveau zu erkennen. Zwar wiesen die Varianten mit Harnstoffdüngung häufig wie zu erwarten etwas höhere Gehalte an NH_4^+ -N und die Varianten mit KAS-Düngung etwas höhere NO_3^- -N-Werte auf, aber der Einfluss der N-Düngerform auf die Dynamik der N-Gehaltsveränderungen im Boden selbst war gering (Abb. ZALF-7 bis ZALF-9).

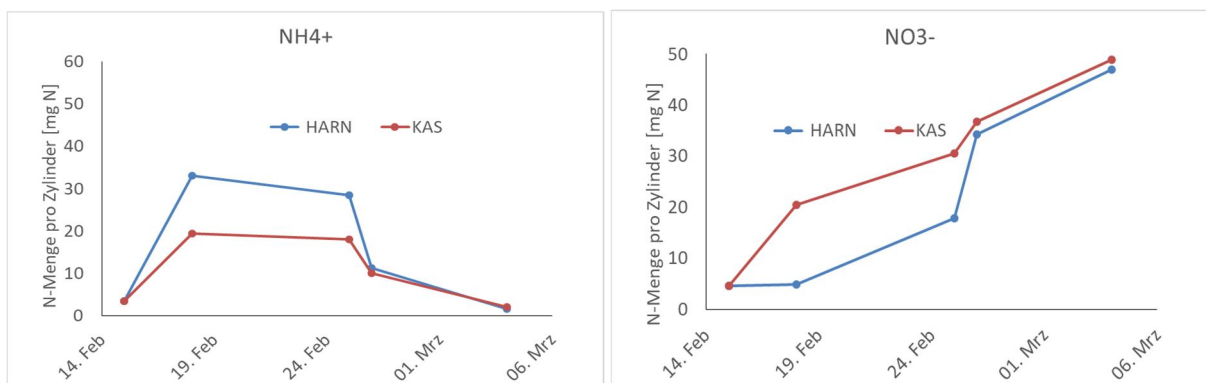


Abb. ZALF-7: Veränderungen in den NH_4^+ -N (links) und NO_3^- -N-Konzentrationen (rechts) im Substrat von Standort Roggenstein im Verlauf der Inkubation bei KAS- oder Harnstoffapplikation unter aeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (WFPS = %tueler Anteil wassergefüllter Poren, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

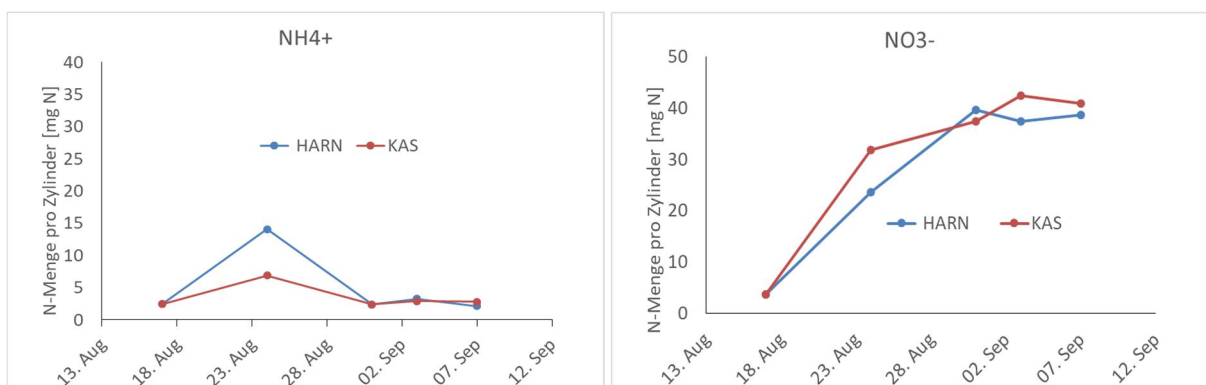


Abb. ZALF-8: Veränderungen in den NH_4^+ -N (links) und NO_3^- -N-Konzentrationen (rechts) im Substrat von Standort Bernburg im Verlauf der Inkubation bei KAS- oder Harnstoffapplikation unter aeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (WFPS = %tueler Anteil wassergefüllter Poren, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

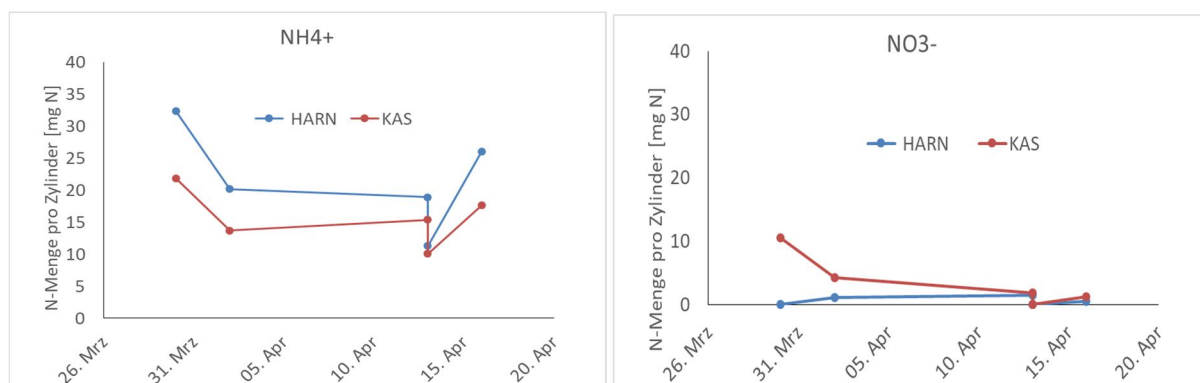


Abb. ZALF-9: Veränderungen in den NH_4^+ -N (links) und NO_3^- -N-Konzentrationen (rechts) im Substrat von Standort Cunnersdorf im Verlauf der Inkubation bei KAS- oder Harnstoffapplikation unter aeroben Bedingungen und bei einer Bodenfeuchte von 70 % WFPS (WFPS = %tualer Anteil wassergefüllter Poren, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff)

Im Fall der über den Zeitraum der Inkubation kumulierten N-Gasverluste ergab sich, dass die N_2 -Gasflüsse auf allen drei Standorten bei allen Varianten immer viel höher waren als die N_2O -Gasflüsse. Die Wirkungen des Bodenwassergehaltes und der N-Düngung fielen differenziert aus. In den meisten Fällen führte die Erhöhung des Bodenwassergehaltes zu einer Reduktion der N-Gasverluste. Eine Ausnahme bildete das unter aeroben Bedingungen inkubierte Substrat vom Standort Bernburg. Dort war ein Anstieg der N-Gasverluste bei erhöhter Bodenfeuchte festzustellen. Die Applikation von Dünger-N führte nur im Fall des Substrates vom Standort Cunnersdorf unter aeroben Bedingungen zu einem Anstieg der N-Gasverluste. Bei den Substraten von den Standorten Bernburg und Roggenstein war das nur bei anaeroben Bedingungen und der Applikation von KAS der Fall. KAS bewirkte im Übrigen in den meisten Fällen deutliche höhere kumulierte N_2O und N_2 -Emissionen als Harnstoff. Das galt für alle Varianten mit dem Cunnersdorfer und dem Roggensteiner Substrat; beim Substrat von Standort Bernburg traf das nur für die anaeroben Varianten zu. Hier bewirkte die Harnstoffapplikation höhere N-Gasverluste als die KAS-Applikation, allerdings in einem wesentlich niedrigeren Umfang als unter anaeroben Bedingungen (Abb. ZALF-10 bis ZALF-12).

Ähnliche Unterschiede hinsichtlich der Wirkung der N-Düngerformen ergaben sich auch bei der Höhe der düngerbürtigen N-Gasverluste. Bei Harnstoff betrugen die Verluste bis zu 3 % und bei Kalkammonsalpeter bis zu 25 %. Während unter aeroben Verhältnissen das Substrat vom Standort Cunnersdorf die höchsten N-Gasverluste aufwies, zeichnete sich unter anaeroben Verhältnissen das Substrat vom Standort Bernburg durch die höchsten Verluste aus (Abb. ZALF-15). Die Spannweite der düngerbürtigen N_2O -Verluste fiel mit 0-7 % insgesamt deutlich niedriger aus als die Spannweite der N_2 -Verluste, welche zwischen 2 und 20 % lag (Abb. ZALF-13 und ZALF-14). Anaerobe Bedingungen bewirkten bei KAS in vielen Fällen eine Erhöhung und bei Harnstoff eine Verminderung der N-Gasverluste (Abb. ZALF-15). Das ist wahrscheinlich auf die unterschiedlich schnelle Bereitstellung von Nitrat-N für die N-Gasbildung im Zuge der Denitrifikation durch die beiden N-Düngerformen zurückzuführen. So blieb der NO_3^- -N-Gehalt unter anaeroben Bedingungen nach Harnstoffapplikation während der gesamten Inkubationszeit bei allen Substraten sehr niedrig (Daten nicht dargestellt).

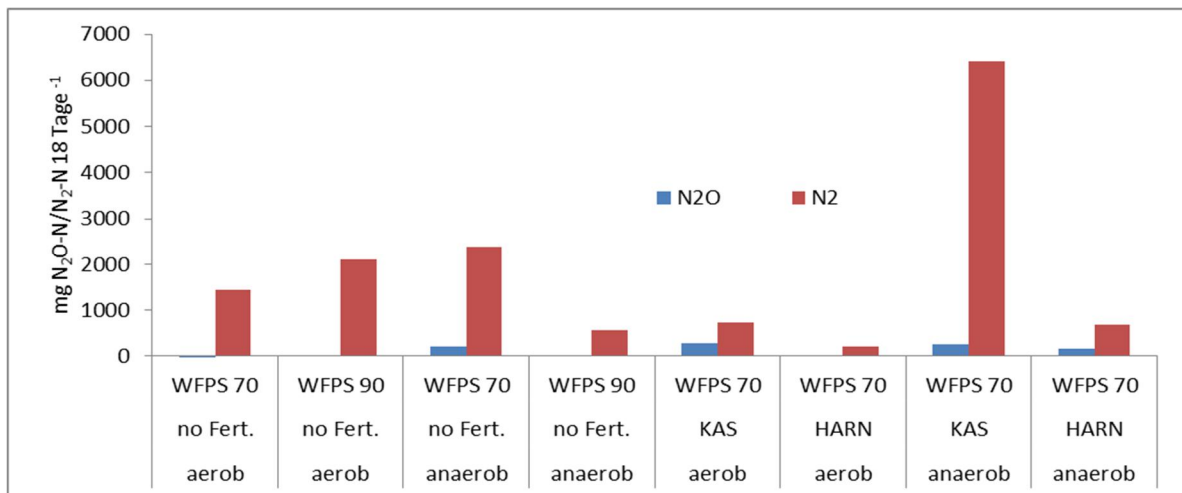


Abb. ZALF-10: Kumulative N₂O- und N₂-Verluste in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit, Verfügbarkeit von Sauerstoff bei der Inkubation (aerob vs. anaerob) und der N-Düngung (no Fert. = ungedüngt, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff), für das Bodensubstrat vom Standort Roggenstein

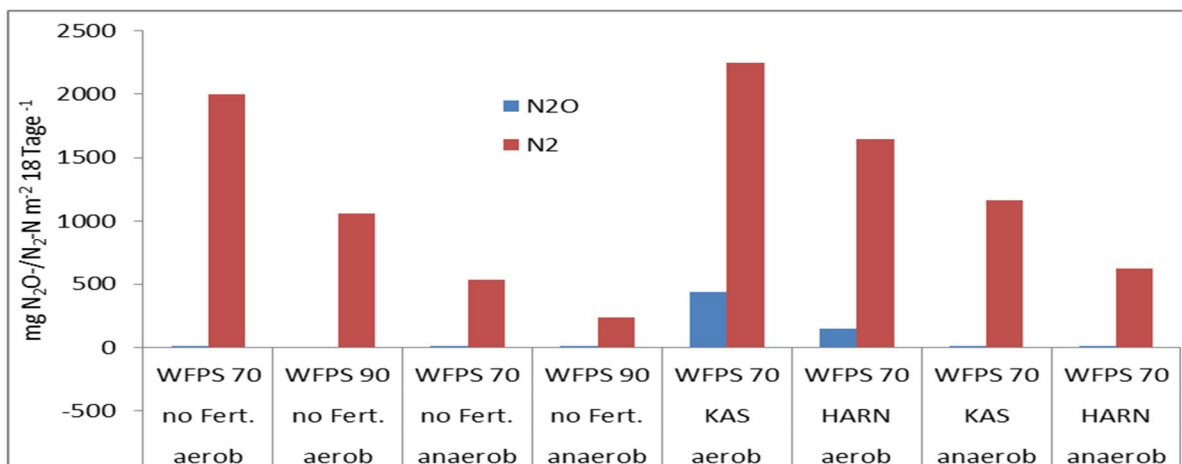


Abb. ZALF-11: Kumulative N₂O- und N₂-Verluste in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit, Verfügbarkeit von Sauerstoff bei der Inkubation und der N-Düngung (no Fert. = ungedüngt, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff), für das Bodensubstrat vom Standort Cunnersdorf

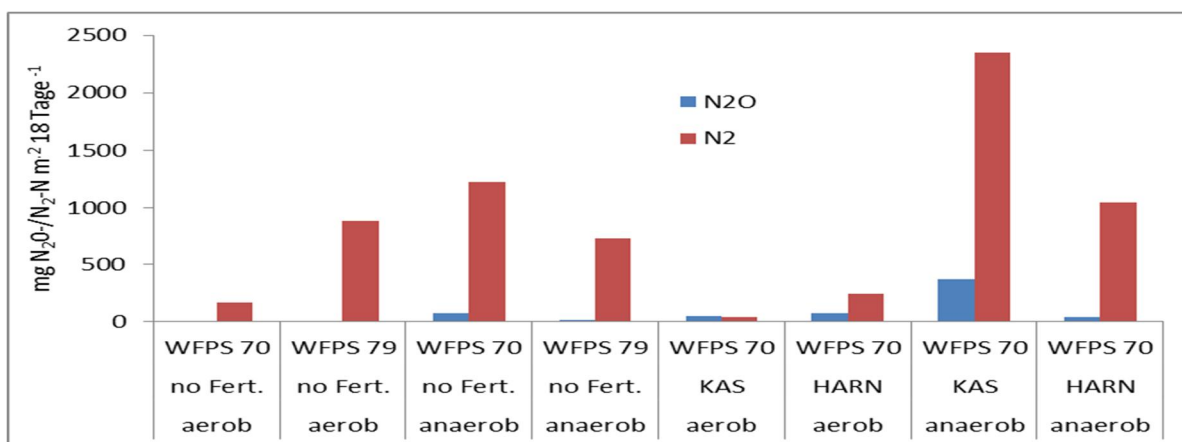


Abb. ZALF-12: Kumulative N₂O- und N₂-Verluste in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit, Verfügbarkeit von Sauerstoff bei der Inkubation und der N-Düngung (no Fert. = ungedüngt, KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff), für das Bodensubstrat vom Standort Bernburg

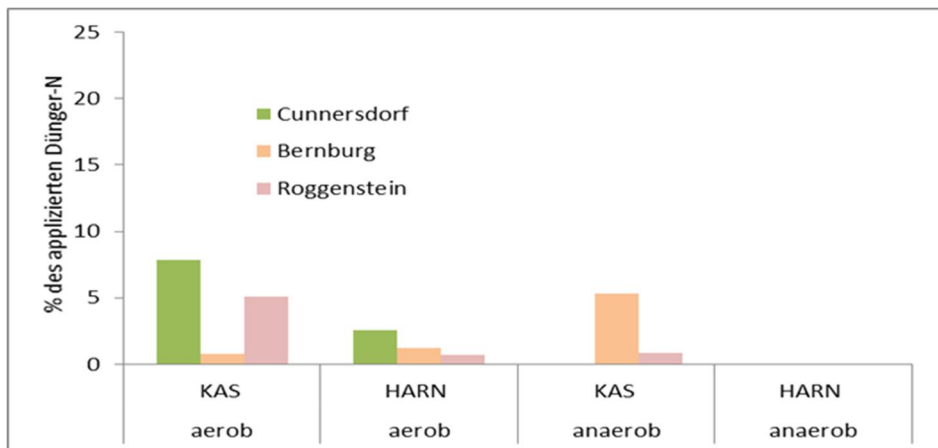


Abb. ZALF-13: %tualer Anteil der N_2O -Emissionen an der applizierten Dünger-N-Menge in Abhängigkeit von der N-Düngerform (KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff) und der O_2 -Verfügbarkeit bei der Inkubation (aerob vs. Anaerob) im Zeitraum der Inkubation bei allen drei untersuchten Standorten

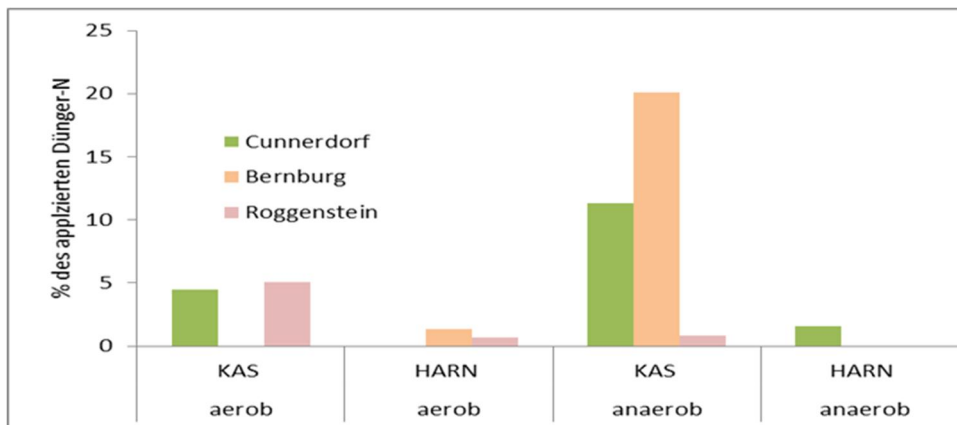


Abb. ZALF-14: %tualer Anteil der N_2 -Emissionen an der applizierten Dünger-N-Menge in Abhängigkeit von der N-Düngerform (KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff) und der O_2 -Verfügbarkeit bei der Inkubation (aerob vs. Anaerob) im Zeitraum der Inkubation bei allen drei untersuchten Standorten

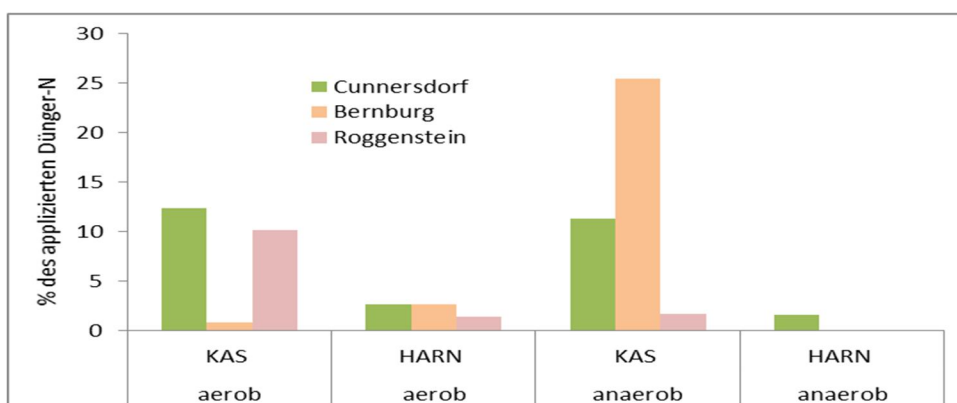


Abb. ZALF-15: %tualer Anteil aller gasförmigen N-Emissionen an der applizierten Dünger-N-Menge in Abhängigkeit von der N-Düngerform (KAS = Kalkammonsalpeter, HARN = Harnstoff) und der O_2 -Verfügbarkeit bei der Inkubation (aerob vs. Anaerob) im Zeitraum der Inkubation bei allen drei untersuchten Standorten

Schlussfolgerungen:

Der Sachverhalt, dass alle untersuchten Bodensubstrate bereits ohne Düngung hohe N_2O - und N_2 -Freisetzungsraten aufwiesen, lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit mit der schon oft gemachten Beobachtung erklären, dass nach dem Anbau von Raps ein sehr hoher Vorrat an mikrobiell leicht umsetzbaren N-Verbindungen im Boden vorliegt. Unter diesen Umständen ist eine zusätzliche N-Düngung der nachfolgenden Fruchtart im Herbst an sich weder sinnvoll noch notwendig. Aus den Inkubationsexperimenten ergab sich zum einen die komplexe Beeinflussung der Dynamik der N_2O - und N_2 -Flüsse und des Umfangs der kumulierten N_2O - und N_2 -Verluste durch das Bodensubstrat, das Sauerstoffangebot im Boden sowie die Höhe und Form des N-Angebotes. Zum anderen konnte gezeigt werden, dass die Nichtberücksichtigung der N_2 -Emissionen zu einer drastischen Unterschätzung des Nitrifikations/Denitrifikationspotenzials ackerbaulicher Böden führen würde. Als ähnlich bedeutsam hat sich unter den gegebenen Bedingungen aber auch die Form des applizierten synthetischen N-Düngers erwiesen.

Angesichts dieser Befunde muss es daher ein wichtiger Schwerpunkt nachfolgender Untersuchungen sein, Methoden zu entwickeln, die simultan zur Messung der N_2O -Verluste auch eine zuverlässige Erfassung der düngerbürtigen N_2 -Verluste unter Feldbedingungen gestatten.

Zusammenfassung:

In Rahmen des TP 4.2 erfolgten zunächst Voruntersuchungen, die die Erhöhung der Präzision und der Zuverlässigkeit zur Ermittlung der N-Gasflüsse der im Labor eingesetzten Heliuminkubationsmethode zum Ziel hatten. Im Anschluss daran wurde der Einfluss ausgewählter Bodenfeuchtestufen, der synthetischen N-Düngerformen Kalkammonsalpeter und Harnstoff sowie des O_2 -Angebotes (aerob vs. anaerob) auf die potenzielle Denitrifikation (N_2O und N_2 -Freisetzung) der Oberbodensubstrate von den StaPlaRes-Flächen Cunnersdorf, Bernburg und Roggenstein nach der Rapsernte bestimmt.

Die Dynamik der N_2O - und N_2 -Flüsse und der Umfang der kumulierten N_2O - und N_2 -Verluste wurden in komplexer Weise simultan vom Bodensubstrat, dem Sauerstoffangebot im Boden sowie der Höhe und Form des N-Angebotes beeinflusst. Die kumulierten N_2 -Gasverluste fielen jedoch immer viel höher als die kumulierten N_2O -Gasverluste aus. Kalkammonsalpeter bewirkte in den meisten Fällen deutliche höhere kumulierte N_2O und N_2 -Emissionen als Harnstoff.

Bei Harnstoff betrugen die summarischen Verluste an düngerbürtigen N_2O und N_2 bis zu 3 % und bei Kalkammonsalpeter bis zu 25 % der applizierten N-Menge. Während unter aeroben Verhältnissen das Substrat vom Standort Cunnersdorf die höchsten N-Gasverluste aufwies, zeichnete sich unter anaeroben Verhältnissen das Substrat vom Standort Bernburg durch die höchsten N-Verlustraten aus. Alle untersuchten Bodensubstrate zeigten aber auch ohne N-Düngung bereits hohe N_2O - und N_2 -Freisetzungsraten. Das ist wahrscheinlich auf einem offenbar infolge des Rapsanbaus stark erhöhten Vorrat an mikrobiell leicht umsetzbaren N-Verbindungen im Boden zurückzuführen.

Anhand der Resultate ist deutlich geworden, dass die Nichtberücksichtigung von N_2 -Emissionen zu einer drastischen Unterschätzung des Nitrifikations/Denitrifikationspotenzials ackerbaulicher Böden führen kann.

1.5. TI (Thünen Institut) – Abschlussbericht (AP-5)

Entsprechend der Aufgabenstellung im Projektverbund widmete sich der Projektpartner TI vor allem dem Arbeitspaket 5 (Bewertung). Die Bewertung der innovativen Technologien bei der Harnstoffdüngung gliedert sich in die folgenden Teilpakete:

1. Datenbank
2. Stickstoffnutzungseffizienz (NUE)
3. Gasförmige N-Verluste (NH_3 und N_2O)
4. N-Bilanz und Nitratauswaschung
5. Ökobilanzen
6. Ökoeffizienzanalyse und Vermeidungskosten

1.5.1. Projektdatenbank (AP-5.1)

Die relationale Datenbank „StaPlaRes-DB-Thuenen“ führt die im StaPlaRes-Projekt erhobenen Daten zusammen und enthält sowohl Emissionsdaten als auch agronomische Messgrößen sowie Managementmaßnahmen, die an drei Feldversuchsstandorten in Deutschland in einem Zeitraum von drei Jahren (2016/17-2018/19) erhoben wurden. Die multivariablen Daten bestehen aus Gasflüssen (CO_2 , N_2O , CH_4 und NH_3), Ertragsdaten (Pflanzenentwicklung, oberirdische Biomasse, Korn- und Strohertrag, Stickstoffgehalt, etc.), Bodenparametern ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, etc.), kontinuierlich gemessene Wetterdaten (Luft- und Bodentemperatur, Strahlung, Niederschlag, etc.), Managementmaßnahmen (Aussaat, Ernte, Bodenbearbeitung, Düngung, etc.) und die dazugehörigen Metadaten (Methoden, weiterführende Informationen zu den Messgrößen, etc.). In Ergänzung wurden N_2 -Daten in einem Inkubationsversuch erhoben und analysiert. In der Datenbank wurden die Daten in insgesamt 34 Tabellen gespeichert. Neben den Daten enthält die Datenbank auch Standardabfragen. Diese wurden zur Erleichterung für die Anwendung in der Datenbank erstellt und können somit als Vorlagen genutzt werden um individuelle Abfragen zu gestalten. Zur StaPlaRes-DB-Thuenen steht eine vollständige Dokumentation der Datenbank zur Verfügung. Die mit Microsoft Access Database 2007-2016 entwickelte Datenbank umfasst mehr als 2,5 Millionen Datensätze und erleichtert die projektinterne sowie übergreifende Auswertung der Daten. Die StaPlaRes-DB-Thuenen wird nach einer angemessenen Sperrfrist veröffentlicht werden und so für zukünftige Studien und Metaanalysen nicht nur den Projektbeteiligten, sondern allen Interessierten zur Verfügung stehen. Die StaPlaRes-DB-Thuenen wird nach Ablauf eines Embargos in zwei Formen veröffentlicht: (1) Im Datenrepositorium sowie Publikationsserver OpenAgrar (www.openagrar.de) stehen zukünftig die Datenbank sowie die beschreibende Datenbank-Dokumentation und die zugehörigen Dokumente zur Verfügung. (2) Die peer-reviewed Publikation im Open Data Journal for Agricultural Research (ODJAR) beschreibt die in der Datenbank verfügbaren Daten. Beide Veröffentlichungen dienen der Nachnutzung der Daten durch andere Wissenschaftler.

Konzept:

Durch ein einheitliches Datenbankkonzept sowie Datenmodell werden die Daten nun redundanzfrei und konsistent gespeichert und archiviert (siehe Datenbankdokumentation ab Seite 11). Dies ermöglicht eine flexible Datenverarbeitung durch Abfragen für verschiedene Auswertungen wie z.B. standortübergreifende Fragestellungen. Die Konzeptionierung der Datenbank basiert auf der Analyse des Versuchsdesigns von Feldversuchen sowie Gefäß-, Labor- und Lysimeterversuchen.

Die vereinfachte Datenstruktur und das detaillierte Datenbankkonzept mit den Verknüpfungen der Daten sind in der Datenbankdokumentation dargestellt. Durch das Datenmodell werden die Informationen zum experimentellen Design der Versuche, die Messungen, die Daten der Treiber (Witterung, Management, Bodenprofil), die statistischen Daten und die Metadaten redundanzfrei und konsistent in der StaPlaRes-Datenbank gespeichert und archiviert.

Datenmanagement und Datenqualität:

Mit standortangepassten Templates wurde die Datenlieferung der Projektpartner vorgenommen. In einem iterativen Prozess wurde für die Messdaten (Pflanzendaten, Bodendaten, Gaskonzentrationen und Flussraten), Standort- und Bodenprofilinformationen in mehrere Templates erarbeitet. Für das Datenmanagement wurden verschiedene Prüfmechanismen (Gültigkeitsregeln) bei der Datenkonvertierung und -integration angewendet. Zur Sicherung der Qualität der Messdaten und der damit verbundenen Informationen wurde eine zweistufige Kontrolle ausgearbeitet (Flussdiagramm für Prozedur der Datenlieferung und -prüfung sowie Vorgehensweise). Bei fehlenden Daten oder Metadaten sowie bei auftretenden Unstimmigkeiten an den Daten wurde dies schriftlich innerhalb als auch außerhalb der Datenbank dokumentiert. So konnten fehlende Daten, Korrekturen bzw. Klärungsbedarf bei Datensätzen leicht durch Projektpartner identifiziert werden. Durch die erläuterte Dokumentation konnten die Projektpartner die notwendigen Fälle klären und/oder ergänzen. Durch die Erstellung von R-Skripten (Zugriff auf die Daten in der Datenbank) konnten Graphiken zu den Messwerten erzeugt werden. Die Visualisierung der Messungen diente ebenso der Plausibilitätsprüfung der Daten aller Projektbeteiligten.

Standardabfragen:

Für die Datenaufbereitung und zur Vervollständigung der Datenbank wurden Standardabfragen für Datenprüfung, -korrektur und -ergänzung genutzt. Für das Handling der StaPlaRes-Datenbank, für die Analyse der Messwerte und für die projektinterne Auswertung wurden Standardabfragen erarbeitet. In der Datenbankdokumentation (ab Seite 23) werden die Standardabfragen ausführlich durch mehrere Beispiele detailliert erläutert. Diese können als Vorlagen genutzt werden um individuelle Abfragen zu gestalten um die Nutzung der Datenbank für den Anwender zu erleichtern.

Datenbankdokumentation:

Im ersten Teil der Dokumentation werden allgemeine Informationen zum StaPlaRes-Projekt gegeben. D.h. drei Standorte und das Versuchsdesign werden beschrieben. Zudem sind alle Daten und deren Messzeiträume widergegeben (DB-Dokumentation ab Seite 9).

Die Dokumentation erläutert im zweiten Teil das Datenmodell der StaPlaRes-DB-Thuenen (DB-Dokumentation ab Seite 11). Dieser Abschnitt beinhaltet auch das Ordnungsprinzip der Datenbank und den allgemeinen Aufbau der Tabellen der Datenbank sowie eine Kurzbeschreibung jeder Datenbanktabelle aufgeteilt in die fünf Kategorien (Experimentelles Design, Messungen – Rohdaten und Prozessierte Daten, Treiber, Metadaten und Spezifische Statistik).

Der Anhang der Datendokumentation enthält das detaillierte Datenbankkonzept mit den Verknüpfungen der Daten (DB-Dokumentation siehe Seite 45) sowie die Erläuterung jeder einzelnen Tabellenspalte der Datenbank (DB-Dokumentation Seite 46 in Tabelle 16).

Die angestrebte Veröffentlichung der Datenbank nach Ablauf der Sperrfrist erfolgt zusammen mit der Dokumentation sowie der Beschreibung der Standardabfragen.

Wesentliche Erfahrungen bei der Erstellung einer Projekt-Datenbank:

Eine Datenbank für die Messwerte des Projektes StaPlaRes wurde bereits mit der Projektplanung vereinbart. Mit dem Projektbeginn wurde die Erstellung der Datenbank für das Projekt StaPlaRes gestartet. Zudem konnten Vorerfahrungen aus vorangegangenen Projekten einfließen. Durch diese Realisierung einer Projektdatenbank wurde die Möglichkeit einer projektinternen sowie projektübergreifenden Auswertungen geschaffen und die Datenqualitätskontrolle gewährleistet. Ein weiterer wichtiger Punkt, um verwertbare Messwerte in einer Datenbank zu speichern und archivieren, stellt die Datenlieferung dar. Insbesondere die Datenqualität konnte durch die Entwicklung von Templates für die Sammlung und Lieferung von Daten erleichtert werden und mit großer Wahrscheinlichkeit verbessert werden. Die Prozedur der Datenlieferung mithilfe der Datentemplates mit der „Vorstrukturierung“ wirkte sich positiv auf die Zusammenstellung der Datenbank auf. Entsprechend der zunehmenden Erfahrung wurden die Datentemplates in einem iterativen Prozess nochmals angepasst, vor allem die Variablen/Messgrößen, um Missverständnisse bei der Berechnung und Interpretation von Daten vorzubeugen. Insbesondere die Datenqualität konnte durch die Templates auf einem hohen Niveau gesichert werden. Durch die zeitnahe Datenprüfung, -korrektur und -ergänzung wurden nachfolgende Fehler (Datenerhebungs- und Datenübertragungsfehler) durch das zweistufige Verfahren (Flussdiagramm für Prozedur der Datenlieferung und -prüfung sowie Vorgehensweise) ausgemerzt.

Verzögerungen bei der Datenlieferung stehen der zeitnahen Bearbeitung der Daten für die Datenbank entgegen. Daher sollten bereits bei der Planung z.B. die Schnelligkeit der Analyse der Proben berücksichtigt werden. Da nach der Integration der Daten in die Datenbank die standortübergreifende integrierte Bewertung vorgenommen werden sollte, wurden die Daten priorisiert, welche dafür benötigt wurden. Messdaten, die für die integrierte Bewertung nicht essentiell sind, wurden am Ende der Verlängerungszeit in die Datenbank eingepflegt.

Neben den Messwerten sind die Metadaten in einer Datenbank entscheidend, daher wurde auf die Sammlung dieser Informationen so frühzeitig wie möglich hingewiesen. Mit der fortschreitenden Sammlung der Messdaten wurden auch die dazugehörigen Metadaten gesammelt und zusammengestellt. Die vorhandene Methodenliste aus bekannten Standardwerken, welche mit Projektbeginn erstellt wurde (Ergänzungen der Liste wurde jederzeit im Bedarfsfall vorgenommen) stellte eine große Erleichterung für die Projektteilnehmer / Datenerheber dar. Die Vereinheitlichung von Einheiten gewährleistet eine projektinterne sowie übergreifende Auswertung der Daten.

Alle nachfolgenden Berechnungen/ Analysen beziehen sich auf Daten aus der StaPlaRes-DB-Thuenen 3. Version.

1.5.2. Stickstoffnutzungseffizienz (AP-5.2)

Zur Bewertung der N-Nutzeneffizienz (NUE) und der jährlichen Variabilität der zugrundeliegenden Erträge und N-Entzüge werden die Mess- und Analyseergebnisse aus den drei parallelen Feldversuchen (Großparzellenversuch GPV mit Gasmessungen, Parzellenversuche PVI und PVII) herangezogen. Dabei wurde jede Frucht der Fruchtfolge (FF) Winterraps-Winterweizen-Wintergerste in jedem Jahr in vierfacher Wiederholung (n=4) angebaut.

Die in den drei Versuchsjahren (2017 – 2019) im jeweiligen Versuch angebaute Frucht ist in Tab. 5.1 aufgeführt. Für die übrige Bewertung sind die Ergebnisse der N-Emissionsmessung erforderlich. Diese fokussiert daher auf den Mess- und Analyseergebnissen des GPV.

Tab. 5.1 Anbauplan für den Fruchtfolgeversuch und durchgeführte Messungen

Versuch (n = 4)	Versuchsjahr			Messung	
	2017	2018	2019	Ertrag, Qualität	NH ₃ , N ₂ O; (N ₂ *) * berechnet aus N ₂ O:N ₂
GPV	Raps (WR)	Weizen (WW)	Gerste (WG)	X	X
PVI	Gerste (WG)	Raps (WR)	Weizen (WW)	X	
PVII	Weizen (WW)	Gerste (WG)	Raps (WR)	X	

Für die Berechnung der N-Mengen in den Ernterückständen (Stroh + Wurzel) wurden nicht gemessene Parameter (Menge und N-Gehalt von Rapsstroh, Menge und N-Gehalte der Wurzeln) einheitlich durch Literaturwerte von Rösemann et al. (2019) und DüV (2017) ersetzt.

Bei der Durchführung der Feldversuche waren teilweise Abweichungen vom geplanten Düngeregime erforderlich. Dies betraf insbesondere den Standort Cunnersdorf (CUN), bei dem in der Variante Platziert eine Zusammenfassung der Teilgaben und/oder eine teilweise manuelle Streuung anstelle der wurzelnahen Platzierung vorgenommen werden musste.

Für die Stickstoffnutzeneffizienz (nitrogen use efficiency, NUE) gibt es verschiedene Definitionen und betrachtete Teilaspekte, die sich je nach Fragestellung und Datenverfügbarkeit unterscheiden (Dobermann 2005, Dobermann 2007, Fixen et al. 2015, Reetz 2016). Grundsätzlich beschreibt eine N-Effizienz eine Antwortgröße (Output) im Verhältnis zu einem N-Input.

Die düngerinduzierte N-Entzugseffizienz für die gesamte FF ergibt sich aus den entsprechenden Summen der Einzelfrüchte:

$$NUE_{DN-Entzug, FF} = \frac{S(N\text{-Korn}_{gedüngt} - N\text{-Korn}_{ungedüngt})}{S(N\text{-Dünger})} \quad \text{Gl. 5.1}$$

Unter der Annahme, dass sich der Boden-N-Vorrat nicht ändert, entspricht die in der ungedüngten Kontrolle entzogene N-Menge (N-Korn_{ungedüngt}) dem Anteil des Düngers, der unter den gleichen Randbedingungen auch ohne zusätzliche N-Düngung allein aus dem Boden-N-Vorrat stammt, und ist gleichbedeutend mit dem Anteil vom N-Dünger, der im Bodenpool verbleibt. Ein hoher N-Korn-Entzug in der ungedüngten Kontrolle weist auf eine hohe Netto-Mineralisationsrate hin.

Die düngerinduzierte N-Entzugseffizienz ($NUE_{DN-Entzug}$) nach der Differenzmethode beschreibt die Nutzeneffizienzsteigerung durch die Düngerzugabe und ist daher geringer als der tatsächliche N-Korn-Entzug in einer gedüngten Variante ($N\text{-Korn}_{gedüngt}$) erwarten lässt und mit dem agronomischen Indikator PNB (Partial Nutrient Balance, $N\text{-Korn}_{gedüngt}/N\text{-Dünger}$) berechnet wird.

Die zeitliche Variabilität der Erträge und N-Gehalte wird durch das Versuchsdesign (jede Frucht in jedem Jahr in den parallelen GPV, PVI und PVII) abgedeckt (Tab. 5.1).

In Tab. 5.2 sind die über die drei Versuchsjahre gemittelten N-Korn-Entzüge je Frucht und Standort für die ungedüngte Kontrolle und die gedüngten Varianten Gestreut, Stabilisiert und Platziert aufgeführt.

Tab. 5.2 Mittlerer N-Korn-Entzug, Mittelwert je Frucht über die Versuchsjahre (2017-2019) bzw. Parzellenversuche (GPV, PVI, PVII), inklusive Standardabweichung ()

Variante	MW ₂₀₁₇₋₂₀₁₉ _N-Korn-Entzug (kg N ha ⁻¹)								
	Raps			Weizen			Gerste		
	BER	CUN	ROG	BER	CUN	ROG	BER	CUN	ROG
Kontrolle	32 (4)	76 (9)	55 (2)	37 (4)	73 (9)	58 (6)	39 (1)	54 (4)	46 (4)
Gestreut	79 (4)	126 (7)	120 (4)	114 (5)	180 (8)	160 (5)	126 (5)	148 (7)	160 (7)
Stabilisiert	88 (3)	130 (6)	127 (4)	109 (5)	182 (8)	167 (8)	120 (6)	141 (7)	152 (7)
Platziert	82 (6)	123 (5)	131 (5)	109 (4)	177 (5)	177 (7)	119 (3)	140 (5)	168 (7)

Der N-Korn-Entzug in der Kontrolle ist im Mittel über die drei Versuchsjahre (Tab. 5.2) in CUN stets am höchsten. Der Standort CUN zeichnet sich daher gegenüber den anderen Standorten durch eine hohe Mineralisierungsrate im Boden aus.

Hinsichtlich der Benchmark-Variante Gestreut ergeben sich im Mittel über die drei Versuchsjahre für alle Früchte in Roggenstein (ROG) die höchsten und in Bernburg (BER) die geringsten Erträge ($BER < CUN < ROG$). Jedoch sind die für Gestreut gemessenen mittleren N-Gehalte im Korn für Raps und Weizen am Standort ROG geringer als in BER und CUN. Damit ergibt sich für den N-Korn-Entzug der Benchmark-Variante im 3-jährigen Mittel eine fruchtartabhängige Rangfolge der Standorte:

Raps, Weizen: $BER < ROG < CUN$

Gerste: $BER < CUN < ROG$

Für die Einordnung der Erträge und N-Korn-Entzüge im GPV im Vergleich zum Mittelwert aller Versuche (Tab. 5.2) ist zu erkennen, dass bei Gestreut die Ergebnisse im GPV für Raps-2017 in BER um rund 50% geringer und in CUN um rund 20% höher liegen als im 3-jährigen Mittel. Für Weizen-2018 beträgt die Abweichung im GPV vom mittleren N-Korn-Entzug maximal 10%, für Gerste-2019 liegen die N-Entzüge im GPV mit der Variante Gestreut an allen Versuchsstandorten nah am 3-jährigen Mittelwert. Raps-2017 in BER zeigt infolge der Trockenheit starke Ertragseinbußen und hat einen signifikanten Einfluss auf die Bewertung der FF an diesem Standort.

Auf Basis dieser gemessenen N-Korn-Entzüge wurden die düngerinduzierten N-Entzugseffizienzen nach der Differenzmethode für die gesamte FF ($NUE_{DN-Entzug, FF}$) je Standort berechnet. Die Ergebnisse sind inklusive Standardabweichung in Abb. 5.1 für die FF dargestellt. Durch die Versuchsanordnung rotiert die Startfrucht, wodurch die Fruchtfolgen in den drei Parzellenversuchen auch die zeitliche Variabilität der N-Entzüge der Einzelfrüchte abbilden.

Am Standort ROG wurden für alle Früchte und Varianten die höchste düngerinduzierte N-Entzugseffizienz erzielt (Ausnahme: Weizen-2017). ROG zeigt überwiegend eine zunehmende NUE_{EF} mit der Variante Platziert gegenüber Gestreut, die in 2018 und 2019 statistisch signifikant ist.

Dagegen bewirkt die Variante Platziert in BER eine tendenzielle Abnahme der NUE_{EF} gegenüber Gestreut. Die Variante Stabilisiert verhält sich in BER genau wie die Variante Platziert, mit Ausnahme von Raps im ersten Versuchsjahr. Hier gab es starke Ertragseinbußen aufgrund der Trockenheit, die sich in den Varianten Gestreut und Platziert stärker ausgewirkt haben als in der Variante Stabilisiert. Allerdings sind in diesem Fall auch die Standardabweichungen sehr hoch.

In CUN bewirkt die Variante Stabilisiert teils eine signifikante NUE -Zunahme (Raps-2017, Gerste-2019), teils eine NUE -Abnahme (Gerste-2017). Gleiches gilt für ROG (NUE -Zunahme mit Raps-2019 und Weizen-2017, NUE -Abnahme mit Gerste-2017). Insgesamt zeigt die Variante Stabilisiert an allen Standorten besonders im Raps einen tendenziell positiven Effekt auf die NUE .

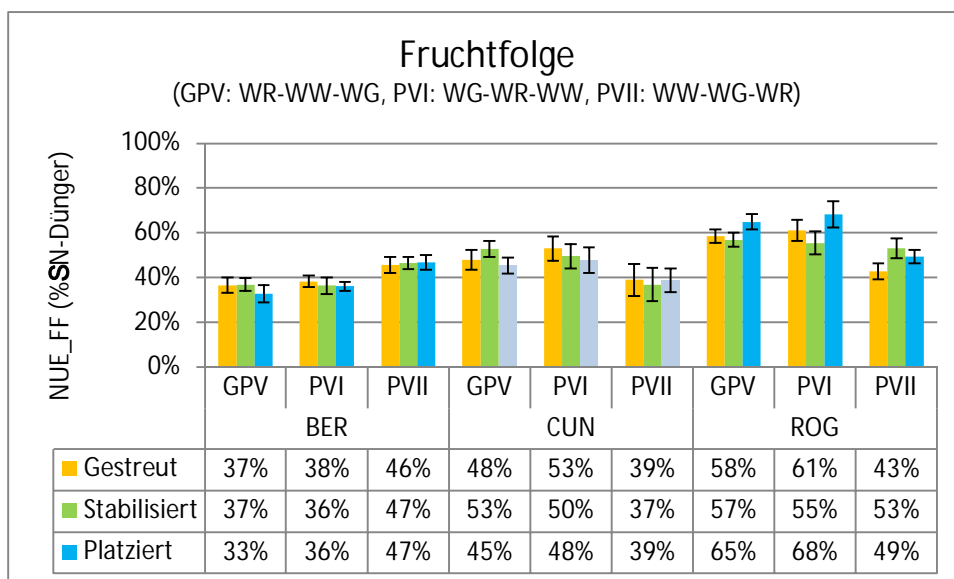


Abb. 5.1 Düngerinduzierte N-Entzugseffizienz bei der FF Raps-Weizen-Gerste

Ergänzend dazu ist die N-Aufnahmeeffizienz in die Pflanze (Korn + Stroh + Wurzel) ein geeigneter Indikator sowohl für die Abschätzung des potentiellen N-Verlusts als auch für die Berücksichtigung von Fruchtfolgeeffekten durch einen N-Transfer. Die im Ernterest (Stroh + Wurzel) aufgenommene N-Menge (N-ER) kann im Anwendungsjahr nicht verloren gehen und stellt als potentieller N-Lieferant einen indirekten Nutzen des N-Düngers für die Folgefrucht dar.

Die düngerinduzierte N-Aufnahmeeffizienz wird auf Basis der Differenzmethode berechnet und entspricht für die Einzelfrucht der nach Dobermann (2005) definierten *Recovery Efficiency* (RE):

$$\begin{aligned}
 \text{NUE}_{\text{DN-Aufnahme,EF}} = \text{RE}_{\text{EF}} &= (\text{N-Pflanze}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Pflanze}_{\text{ungedüngt}}) / \text{N-Dünger} & \text{Gl. 5.2} \\
 &= ((\text{N-Korn} + \text{N-ER})_{\text{gedüngt}} - (\text{N-Korn} + \text{N-ER})_{\text{ungedüngt}}) / \text{N-Dünger} \\
 &= ((\text{N-Korn}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Korn}_{\text{ungedüngt}}) + (\text{N-ER}_{\text{gedüngt}} - \text{N-ER}_{\text{ungedüngt}})) / \text{N-Dünger} \\
 &= \text{NUE}_{\text{DN-Entzug,EF}} + ((\text{N-ER}_{\text{gedüngt}} - \text{N-ER}_{\text{ungedüngt}}) / \text{N-Dünger})
 \end{aligned}$$

Damit erhöht sich die N-Entzugseffizienz um den Beitrag des N-Ernterückstands (DN-ER/N-Dünger) und beschreibt die Summe aus direktem und indirektem Nutzen des N-Düngers. Gleichzeitig wird das Gesamt-Verlustpotential ($1 - \text{NUE}_{\text{DN-Entzug}}$) differenziert in ein Transferpotential (DN-ER/N-Dünger) und ein verbleibendes Verlustpotential ($1 - \text{RE}_{\text{EF}}$).

Die Getreidestrohmenge sowie die N-Gehalte im Getreidestroh wurden an allen Standorten vermessen. Für Raps liegen die entsprechenden Werte nur für BER vor, für CUN und ROG wurden sie anhand von Standardwerten für das Stroh:Korn-Verhältnis und den Stroh-N-Gehalt nach Rösemann et al. (2019) berechnet. In ROG lagen die gemessenen N-ER-Werte i.d.R. über den Standardwerten, in CUN meist darunter. Insgesamt ergibt sich dadurch ein unterschiedliches N-Aufnahmeverhalten an den Standorten CUN und ROG in der Variante Gestreut. Wie in Tab. 5.3 gezeigt, ist in CUN für Raps und Weizen der mittlere N-Korn-Entzug um 6 bzw. 20 kg N ha⁻¹ größer als in ROG, dagegen ist die entsprechende mittlere N-ER-Menge um 9 bzw. 20 kg N ha⁻¹ in ROG höher als in CUN. Dadurch gleicht sich die absolute N-Aufnahme in die ganze Pflanze für Raps und Weizen an diesen beiden Standorten an, ist aber innerhalb der Pflanze unterschiedlich verteilt. Bei der Berechnung der N-Aufnahmeeffizienz nach der Differenzmethode kommt wiederum der hohe Boden-N-Beitrag am Standort CUN zum Tragen.

Das Ergebnis für die düngerinduzierte N-Aufnahmeeffizienz (RE) ist als Mittelwert über die drei Versuchsjahre in Tab. 5.3 zusammengestellt.

Tab. 5.3 Mittlere N-Aufnahmeeffizienz (MW-RE) für die Einzelfrüchte Raps, Weizen und Gerste an den Versuchsstandorten (BER, CUN, ROG) in den Versuchsjahren 2017-2019

Variante	MW ₂₀₁₇₋₂₀₁₉ _RE (% N-Dünger)								
	Raps			Weizen			Gerste		
	BER	CUN	ROG	BER	CUN	ROG	BER	CUN	ROG
Gestreut	42 (4)	39 (9)	59 (4)	54 (5)	67 (8)	79 (8)	76 (4)	80 (6)	105 (8)
Stabilisiert	46 (4)	42 (9)	64 (4)	52 (4)	69 (8)	80 (10)	71 (5)	76 (7)	101 (8)
Platziert	42 (6)	37 (9)	66 (5)	51 (4)	66 (8)	89 (8)	70 (4)	68 (6)	112 (8)

Die mittlere N-Aufnahmeeffizienz ist in ROG im Vergleich zu den anderen Standorten für alle Früchte und Varianten am größten. Im Variantenvergleich ergibt sich in ROG, wie bei der N-Entzugseffizienz, auch eine höhere N-Aufnahmeeffizienz mit der Variante Platziert gegenüber Gestreut für alle Früchte. Zudem zeigt sich im Raps eine signifikante N-Aufnahmesteigerung mit der Variante Stabilisiert gegenüber Gestreut.

In ROG ergeben sich bei der Gerste mittlere RE-Werte, die über 100% liegen. Dies deutet darauf hin, dass eine größere N-Menge aus dem Boden entnommen wurde, als über die N-Aufnahme in der ungedüngten Kontrolle abgeschätzt wurde. Unter der Annahme, dass in diesem Fall das N-Verlustpotential gleich Null ist, ergibt sich eine theoretische N-Transferleistung aus der verbleibenden Differenz, die von der Vorfrucht stammen muss. Zudem ist dies ein Hinweis darauf, dass in der Praxis die hier getroffene Annahme eines konstanten Boden-N-Vorrats für den kurzen Bilanzzeitraum einer Einzelfrucht nicht immer zutreffend ist. Über einen längeren Zeitraum, wie z.B. eine ganze Periode der FF, gleichen sich die dynamischen N-Umsetzungsprozesse im Boden annähernd wieder aus, so dass eher auf der Ebene der FF von einem konstanten Boden-N-Vorrat ausgegangen werden kann. Ein Prüfkriterium hierfür ist eine mindestens ausgeglichene Humusbilanz.

Die düngerinduzierte N-Aufnahmeeffizienz einer ganzen FF ergibt sich aus dem Verhältnis der Summen der N-Aufnahmen in die einzelnen Pflanzen und der Summe des N-Dünger-Inputs.

$$\begin{aligned}
 RE_{FF} &= S((N\text{-Korn} + N\text{-ER})_{\text{gedüngt}} - (N\text{-Korn} + N\text{-ER})_{\text{ungedüngt}}) / S(N\text{-Dünger}) & \text{Gl. 5.3} \\
 &= S(N\text{-Korn}_{\text{gedüngt}} - N\text{-Korn}_{\text{ungedüngt}}) / S(N\text{-Dünger}) + S(N\text{-ER}_{\text{gedüngt}} - N\text{-ER}_{\text{ungedüngt}}) / S(N\text{-Dünger}) \\
 &= S(DN\text{-Korn}) / S(N\text{-Dünger}) + S(DN\text{-ER}) / S(N\text{-Dünger}) \\
 &= NUE_{DN\text{-Entzug,FF}} + S(DN\text{-ER}) / S(N\text{-Dünger})
 \end{aligned}$$

Die Berechnung und Bedeutung der einzelnen N-Effizienzterme für die Einzelfrüchte und die FF ist in Tab. 5.4 an einem Beispiel für den Standort ROG im GPV aufgezeigt.

Tab. 5.4 Düngerinduzierte N-Entzugseffizienz (NUE) und N-Aufnahmeeffizienz (RE) am Beispiel der FF Raps-Weizen-Gerste im Großversuch (GPV) am Standort ROG, für die Einzelfrüchte und die FF

Parameter	Einheit	Variante	Raps-2017	Weizen-2018	Gerste-2019	FF
N-Dünger	kg N ha ⁻¹		180	180	160	520
DN-Korn	kg N ha ⁻¹	Gestreut	70	122	111	304
		Stabilisiert	73	115	107	296
		Platziert	73	146	119	337
NUE	kg N kg N ⁻¹	Gestreut	39%	68%	70%	58%
		Stabilisiert	41%	64%	67%	57%
		Platziert	40%	81%	74%	65%
DN-ER	kg N ha ⁻¹	Gestreut	47	41	41	130
		Stabilisiert	50	33	55	138
		Platziert	48	52	38	138
RE	kg N kg N ⁻¹	Gestreut	65%	91%	96%	83%
		Stabilisiert	68%	82%	102%	83%
		Platziert	67%	110%	98%	91%

Damit wird deutlich, dass sich N-Defizite für eine Einzelfrucht ($RE_{FF} > 100\%$) durch den N-Transfer innerhalb der FF ausgleichen. Am gezeigten Beispiel für ROG lässt sich anhand der einzelnen Terme der N-Aufnahmeeffizienz für die FF (RE_{FF}) das Nutzen- und Verlustpotential des Gesamt-N-Düngerinputs für die FF bestimmen (Tab. 5.5).

Tab. 5.5 Düngerinduzierten N-Aufnahmeeffizienz (RE_{FF}) am Beispiel der FF Raps-Weizen-Gerste im GPV am Standort ROG

Parameter		Gestreut	Stabilisiert	Platziert
Direkter Nutzen N-Entzugseffizienz	NUE_{FF}	58%	57%	65%
Gesamt- Verlustpotential	$1 - NUE_{FF}$	42%	43%	35%
Indirekter Nutzen Transferpotential	$S(DN-ER) / S(N-Dünger)$	25%	27%	27%
Verbleibendes Verlustpotential	$1 - RE_{FF}$	17%	17%	9%

1.5.3. Gasförmige N-Verluste (AP-5.3)

Auf Basis der in AP 2 und AP 3 an den Standorten BER, CUN und ROG im GPV erfassten Ammoniak- und Lachgasverluste wurden standort- und jahresspezifische Verlustraten berechnet.

Der über die drei Versuchsjahre und die drei Früchte gemittelte NH_3 -N-Emissionsfaktor für die Benchmark-Variante Gestreut ist in CUN am höchsten ($0,032 \text{ kg } NH_3\text{-N kg N}^{-1}$) und in ROG am geringsten ($0,012 \text{ kg } NH_3\text{-N kg N}^{-1}$).

Insgesamt liegen die spezifisch gemessenen NH_3 -N-Emissionsfaktoren deutlich unterhalb der Standardwerte für Harnstoff nach EMEP/EEA (2019) bzw. Rösemann et al. (2019) und nach IPCC Refinement (2019) ($0,142 \text{ kg } NH_3\text{-N kg N}^{-1}$, Unsicherheitsbereich 0,03-0,43), wie in Abb. 5.2 dargestellt.

Unter der Annahme, dass die Landnutzungshistorie der gedüngten und ungedüngten Plots gleich ist, können die düngerinduzierten N_2O -Emissionen durch Abzug der Kontrolle gemäß Gl. 5.4 berechnet werden.

$$EF_{N_2O-N} = (N_2O-N_{\text{gedüngt}} - N_2O-N_{\text{ungedüngt}}) / N\text{-Dünger} \quad \text{Gl. 5.4}$$

Das Ergebnis ist inklusive der Standardabweichung in Abb. 5.3 dargestellt. Die beiden nicht repräsentativen Werte für die Variante Platziert in CUN, die auf der teilweise manuellen Harnstoff-Streuung anstelle der maschinellen Schlitztechnik beruhen, sind farblich (hellblau) gekennzeichnet.

Die versuchsspezifischen Emissionsfaktoren liegen insgesamt im Bereich von -0,06% bis 0,54%. Diese EFs sind sowohl geringer als die EFs gemäß GNOC (Stehfest and Bouwman 2006) an den Standorten (EF 0,67 – 0,77%) als auch deutlich geringer als der Standardwert von 1,0% nach IPCC Refinement (2019). Die versuchsspezifischen EFs fallen in den unteren Unsicherheitsbereich des aggregierten N_2O -N-EF gemäß IPCC Refinement (2019), der insgesamt mit 0,1-1,8% angegeben ist.

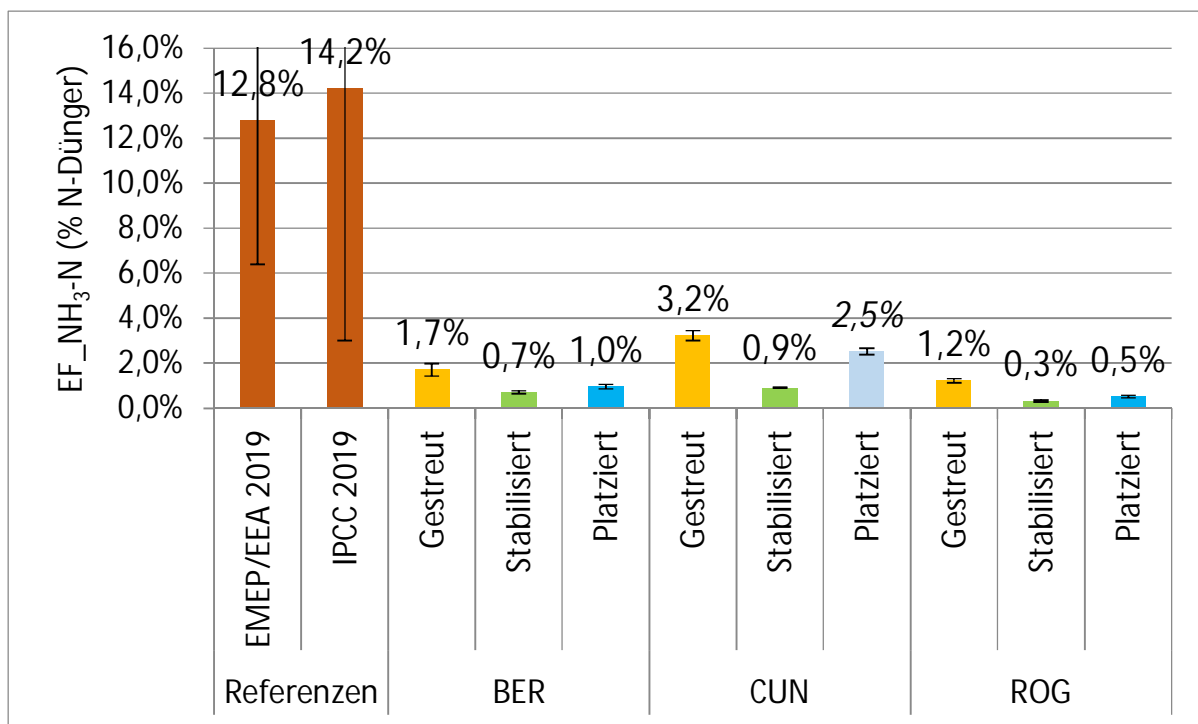


Abb. 5.2 Mittlere standortspezifische $\text{NH}_3\text{-N}$ -Emissionsfaktoren je Standort und Variante im Vergleich zu Standardwerten nach EMEP/EEA (2019) und IPCC (2019)

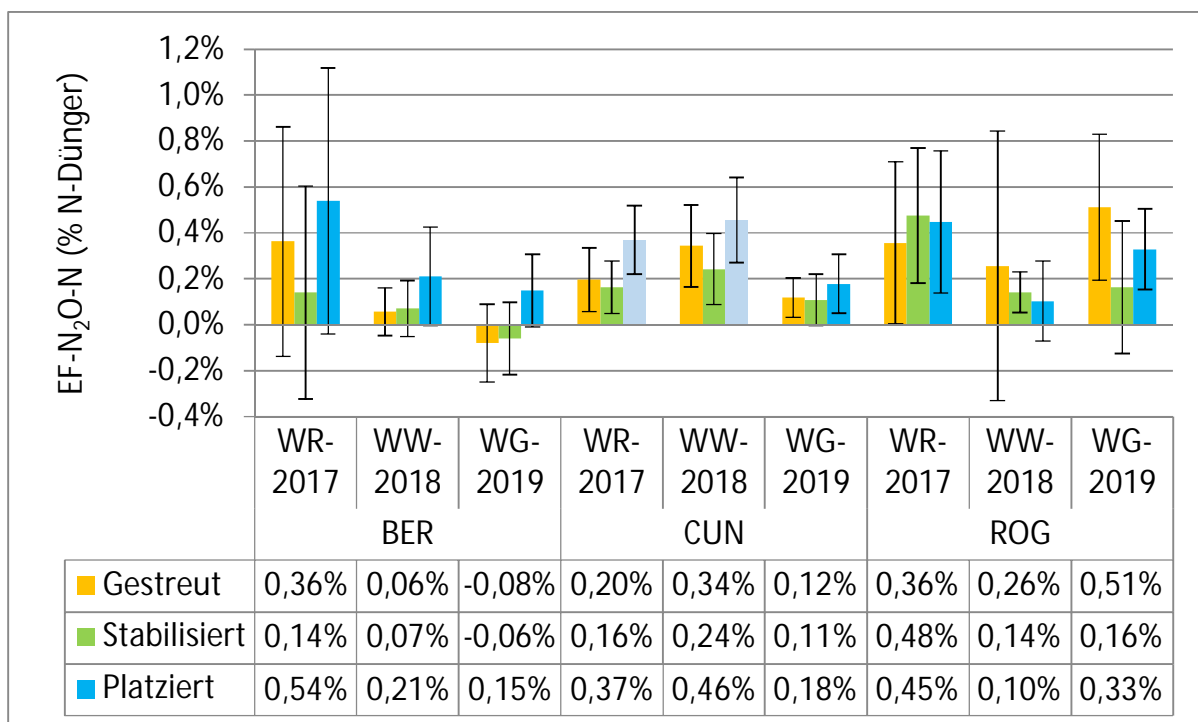


Abb. 5.3 Versuchsspezifische $\text{N}_2\text{O-N}$ -Emissionsfaktoren für die Standorte BER, CUN, ROG in der FF Raps-Weizen-Gerste in den Jahren 2017-2019 bei Harnstoffdüngung mit den Technologie-Varianten Gestreut, Stabilisiert und Platziert

1.5.4. N-Bilanz und Nitratauswaschung (Ap-5.4)

Für die Bilanz wird der Zeitraum Ernte-bis-Ernte festgelegt. Dies gilt sowohl für die Bilanz der Einzelfrüchte als auch für die Bilanz der gesamten FF. Die N-Bilanz wird definiert als:

$$DN = N_{\text{Input}} - N_{\text{Output}}, \text{ Änderung des N-Gehaltes des Bodens} \quad \text{Gl. 5.5}$$

$$N_{\text{Input}} = N_{\text{Dünger}} + N_{\text{atmos. Deposition}} + N_{\text{Ernterück_VF}} \quad \text{Gl. 5.5}$$

$$N_{\text{Output}} = N_{\text{Entzug_Korn}} + N_{\text{Ernterück_HF}} + N_{\text{Emissionen}} \quad \text{Gl. 5.7}$$

$$N_{\text{Emissionen}} = S_{\text{NH}_3\text{-N}} + S_{\text{N}_2\text{O-N}} + S_{\text{NO-N}} + S_{\text{N}_2\text{-N}} + S_{\text{NO}_3\text{-N}} \quad \text{Gl. 5.8}$$

Die NH_3 - sowie N_2O -Emissionen wurden im GPV gemessen, für die N_2 -Emissionenmessungen wurden an den Standorten Bodenproben entnommen und mittels der He-Inkubationsmethode im Labor durchgeführt. Für die N-Bilanz wird ein standortspezifischer Faktor $\text{N}_2:\text{N}_2\text{O}$ für alle Varianten verwendet. Die NO -Emissionen werden gemäß dem IPCC-Ansatz mittels eines standort-unabhängigen Emissionsfaktors berechnet.

Die Werte der jährlichen N-Deposition betragen laut UBA (<https://gis.uba.de/website/depo1/>) $12 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für CUN und BER sowie $13 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für den Standort ROG.

Die (potentielle) Nitratauswaschung kann aus der N-Bilanz berechnet werden unter der Annahme, dass sich der Boden-N nicht ändert. Diese Annahme ist über die FF bei langjähriger gleichbleibender Bodenbearbeitung robust, jedoch für die Einzelfruchtbetrachtung eine starke Vereinfachung. Daher wird im ersten Schritt die gesamte FF betrachtet. Im vorliegenden Fall wurde an allen Standorten Hafer als Vorfrucht (VF) angebaut, damit haben alle Standorte annähernd den gleichen Startpunkt/Vorgeschichte. Beim Vergleich der Standorte kann man davon ausgehen, dass die Unterschiede standortbedingt sind und kaum noch abhängig von der unterschiedlichen Vorgeschichte. Um eine geschlossene FF zu analysieren, muss die N-Bilanz um die Differenz der N-Menge der Ernterückstände (Gerste – Hafer) korrigiert werden.

Frage: Ist der Boden-N-Gehalt über die gesamte FF ansatzweise konstant?

Um die Annahme einer weitgehend konstanten N-Bilanz der FF zu überprüfen, wurde anhand der Ertragsdaten eine Humusbilanz mit dem VDLUFA-Ansatz (VDLUFA 2004) für die FF an den Versuchsstandorten berechnet.

Aus dem Humussaldo folgt, nach Umrechnung von C_{org} in N_t , die niedrigste Stickstoffänderung im Boden in BER mit $43 \text{ bis } 52 \text{ kg N ha}^{-1}$ und die höchste in ROG mit $85 \text{ bis } 92 \text{ kg N ha}^{-1}$ über die gesamte FF. Die Ergebnisse für alle Varianten und Standorte sind in Tab. 5.6 aufgeführt. Die gedüngten Varianten an den Standorten liegen sehr nah beieinander und liegen im Rahmen der natürlichen Variabilität, d.h. sie sind in dieser Betrachtung nicht unterscheidbar.

Tab. 5.6 Humusbilanz und die daraus abgeleitete N-Bodenänderung für die FF (HRB = Humusreproduktionsbedarf, HRL = Humusreproduktionsleistung, HS = Humussaldo)

Kurzname	Versuch	Variante	HRB $H_{aq} \text{ ha}^{-1}$	HRL $H_{aq} \text{ ha}^{-1}$	HS $H_{aq} \text{ ha}^{-1}$	N kg ha^{-1}
BER	GPV	Kontrolle	1200	981,11	-218,89	-18,76
BER	GPV	Gestreut	1200	1810,79	610,79	52,35
BER	GPV	Stabilisiert	1200	1727,48	527,48	45,21
BER	GPV	Platziert	1200	1706,77	506,77	43,44
CUN	GPV	Kontrolle	1200	1020,84	-179,16	-18,66
CUN	GPV	Gestreut	1200	1743,95	543,95	56,66
CUN	GPV	Stabilisiert	1200	1880,68	680,68	70,90
CUN	GPV	Platziert	1200	1589,61	389,61	40,58
ROG	GPV	Kontrolle	1200	1152,57	-47,43	-4,67
ROG	GPV	Gestreut	1200	2064,06	864,06	84,99
ROG	GPV	Stabilisiert	1200	2132,56	932,56	91,73
ROG	GPV	Platziert	1200	2065,01	865,01	85,08

Die Humussalden sind bei den gedüngten Varianten an allen Standorten ausgeglichen bis hoch, d.h. die Annahme, dass die Bodenqualität in der FF ansatzweise konstant bleibt bzw. eher erhöht wird, wurde bestätigt. Unter der Annahme eines konstanten C:N-Verhältnisses nimmt der Bodenstickstoffgehalt gemäß des VDLUFA-Ansatzes auch bei einem hohen HRB von $1560 H_{aq} \text{ ha}^{-1}$ eher zu.

Frage: Wie hoch ist das Nitrat-Auswaschungspotential?

Das N-Saldo der FF spiegelt somit die maximal auswaschbare Menge an Nitrat wider; jedoch kann daraus erst mit der Sickerwassermenge die Nitratauswaschung quantifiziert oder zumindest abgeschätzt werden. Unter der Annahme, dass sich der Boden-N nicht ändert, sind alle N-Inputs und N-Outputs mit Ausnahme von Nitrat bekannt, dann kann das Nitrat-Auswaschungspotential aus der N-Bilanz bzw. Gl. 5.7 und Gl. 5.8 für die offene und geschlossene FF abgeschätzt werden.

Aus der N-Bilanz ergibt sich ein hohes Auswaschungspotential mit 215 bis 237 kg N ha^{-1} FF für den Standort BER unabhängig von der betrachteten Variante. Die Standorte CUN und ROG zeigen hingegen ein geringes Potenzial (10 bis 86 kg N ha^{-1} FF) für eine Nitratauswaschung in der FF. ROG und CUN zeigen eine höhere Varianz zwischen den Varianten in der FF als BER. Die Werte sind in Tab. 5.7 sowohl für die offene als auch für die geschlossene FF¹ aufgeführt. In diesem Unterkapitel wird lediglich die offene FF betrachtet, da diese durch Messungen belegt ist und nicht wie die geschlossene FF auf einem theoretischen Rechenkonzept beruht.

¹ „offene“ FF = spezifische FF-Sequenz (Vorfrucht vor erstem FF-Glied ist nicht gleich dem letzten FF-Glied); „geschlossene“ FF = zyklische Wiederholung der FF-Sequenz (letztes FF-Glied ist gleichzeitig Vorfrucht vor erstem FF-Glied)

Tab. 5.7 Berechnetes NO_3 -Auswaschungspotenzial für die Varianten an den Versuchsstandorten für die gesamte FF (alle Größen sind in kg N ha^{-1} angegeben)

Kurzname	Variante	NO_3 -Auswaschpot. (offene FF)	N-Input FF	N-Output FF	NO_3 -Auswaschpot. (geschlossene FF)
BER	Gestreut	214,85	496,74	281,90	244,2
BER	Stabilisiert	225,12	502,86	277,74	249,4
BER	Platziert	236,81	499,04	214,89	263,7
CUN	Gestreut	57,90	561,24	430,64	72,7
CUN	Stabilisiert	39,94	553,82	513,88	62,1
CUN	Platziert	86,20	577,24	491,05	85,0
ROG	Gestreut	32,53	523,55	491,02	68,0
ROG	Stabilisiert	37,06	510,38	473,32	85,7
ROG	Platziert	10,28	527,58	517,30	41,7

Werden nicht nur die Mittelwerte der potentiellen Nitratauswaschung, sondern auch die Wiederholungen betrachtet, wird diese Aussage dahingehend erweitert, dass das sich die Varianten an den Standorten nicht signifikant unterscheiden und somit lediglich Tendenzen abgeleitet werden können, wie in Abb. 5.4 dargestellt. Auffällig ist jedoch, dass die Bandbreite des Auswaschungspotentials an den Standorten BER (40 – 60 kg N) und CUN (66 – 80 kg) deutlich höher ist als am Standort ROG mit 25 – 50 kg N .

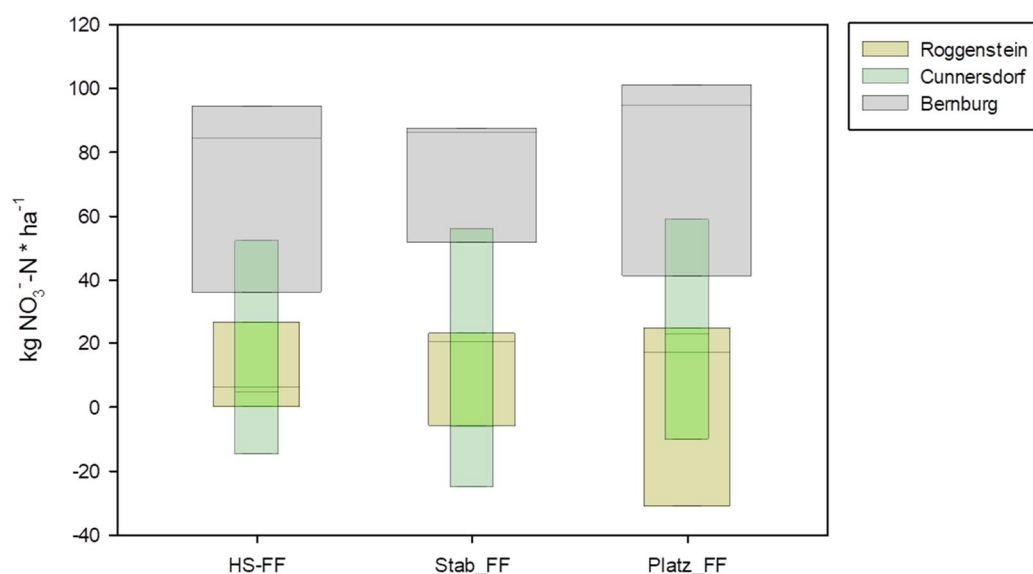


Abb. 5.4 Potentielle Nitratauswaschung innerhalb der FF an den Versuchsstandorten

Frage: Wie kann die Auswaschung mit den vorliegenden Daten genauer quantifiziert werden?

Die Nitratauswaschung kann auch auf Basis des IPCC Refinement (2019) berechnet werden. Dafür wird das Verhältnis des Niederschlages (PREC) zur potentiellen Evapotranspiration (PET) benötigt. Liegt das Verhältnis bei < 1 , ist das Klima trocken und es gibt keine Auswaschung von Nitrat. Bei einem Verhältnis > 1 , wird das Klima als nass gewertet und eine Nitratauswaschung findet statt. Zur Berechnung der Nitratauswaschung wird davon ausgegangen, dass 24% der Summe aus Ernterückstand-N und N-Mineraldünger ausgewaschen werden, eine Abstufung ist dabei nicht vorgesehen.

Im ersten Schritt wurde daher die Summe des Niederschlages in der FF aus den vorliegenden Wetterdaten berechnet und im zweiten Schritt die Summe der potentiellen Evapotranspiration nach Penman/Monteith (Monteith 1965) in der FF berechnet. Die PET-Methode nach Penman/Monteith wurde gewählt, da dies ein Verfahren ist, das von der FAO für landwirtschaftliche Zwecke empfohlen wird (Allen et al. 1998).

Demnach tritt in BER keine Nitratauswaschung über die gesamte FF auf, da das Verhältnis von PREC/PET zwischen 0,77 und 0,81 liegt. Im Gegensatz dazu beträgt das PREC/PET-Verhältnis in ROG zwischen 1,17 und 1,60 in der gesamten FF, d.h.es wird in jedem Jahr Nitrat ausgewaschen. In den ersten beiden Versuchsjahren tritt in CUN ebenfalls Nitratauswaschung auf (PREC/PET 1,21 und 1,32), während im letzten Versuchsjahr das PREC/PET-Verhältnis bei 0,85 liegt und demnach keine Nitratauswaschung auftritt.

Tab. 5.8 Nitratauswaschung in der FF

Kurzname	Versuch	Variante	FF	NO ₃ -IPCC	NO ₃ Pot. aus N-Bilanz	Einheit
BER	GPV	Kontrolle	FF	0		kg N ha ⁻¹ FF
BER	GPV	Gestreut	FF	0	214,85	kg N ha ⁻¹ FF
BER	GPV	Stabilisiert	FF	0	225,12	kg N ha ⁻¹ FF
BER	GPV	Platziert	FF	0	236,81	kg N ha ⁻¹ FF
CUN	GPV	Kontrolle	FF	22,12		kg N ha ⁻¹ FF
CUN	GPV	Gestreut	FF	124,49	57,90	kg N ha ⁻¹ FF
CUN	GPV	Stabilisiert	FF	127,16	39,94	kg N ha ⁻¹ FF
CUN	GPV	Platziert	FF	124,54	86,20	kg N ha ⁻¹ FF
ROG	GPV	Kontrolle	FF	26,17		kg N ha ⁻¹ FF
ROG	GPV	Gestreut	FF	182,21	32,53	kg N ha ⁻¹ FF
ROG	GPV	Stabilisiert	FF	184,10	37,06	kg N ha ⁻¹ FF
ROG	GPV	Platziert	FF	184,15	10,28	kg N ha ⁻¹ FF

Aus der oben beschriebenen Methode ergibt sich für BER keine N-Auswaschung. Für CUN wird ein Auswaschungspotential in den ersten zwei Versuchsjahren von ca. 125 kg N ha⁻¹ FF berechnet. In ROG könnte gemäß IPCC eine Menge von ca. 185 kg N ha⁻¹ in der FF ausgewaschen werden, während auf Basis der N-Bilanz maximal 37 kg NO₃-N für die Auswaschung zur Verfügung steht (Tab. 5.8).

Frage: Wie kann die Nitratauswaschung für die Ökobilanz präziser berechnet werden als mit dem IPCC-Ansatz?

Es gibt verschiedene Ansätze, davon werden die Folgenden auf die Versuchsstandorte angewandt:

- Übertragung auf Basis der Lysimeterergebnisse in Nossen
- Modifizierter Ansatz nach Roy (Faist Emmenegger et al. 2009),
- Brentrup-Ansatz (Brentrup et al. 2000),
- METVER (Böttcher et al. 2010) und Herbst-N_{min}-Methode (NLWKN 2012).

Die verschiedenen Ansätze werden kurz vorgestellt und dann deren Ergebnisse in Tab. 5.9 gemeinsam dargestellt.

I. Übertragung der Ergebnisse aus den Lysimeterversuchen in Nossen

Die Lysimeter Nossen liegen in drei verschiedenen Böden (Sand-, Lehm- und Verwitterungsboden) vor. Die Messwerte zum Sickerwasser und die Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen im Sickerwasser wurden jeweils nach dem Winter (Ende März/April), nach der Ernte (Anfang August) und im Spätherbst (November) für die Varianten Gestreut und Stabilisiert erhoben. Es stehen Sickerwasser- sowie NO_3 -Messwerte von Spätherbst 2016 bis nach der Ernte 2019 zur Verfügung. Nach dem Winter (Ende März / Anfang April) treten bei allen Lysimetern (Gestreut und Stabilisiert) die höchsten Sickerwassermengen auf. In Abb. 5.5 sind alle Termine (nach dem Winter (Ende März/April), nach der Ernte (Anfang August) und im Spätherbst (November) von Ende 2016 bis Ernte 2019 enthalten.

Es bilden sich zwei Gruppen (blauer Kreis und oranges Trapez) bei der Korrelation von Sickerwassermenge und Niederschlag. Nur die Sickerwassermengen nach dem Winter (oranges Trapez) korrelieren sehr gut ($r^2 = 0,9$) mit Niederschlag über den gleichen Zeitraum. Die beiden kumulativen Verläufe der Sickerwassermengen zeigen, dass bei der Beprobung nach dem Winter große Mengen (90 bis zu 240 mm) gemessen werden. Die beiden anderen Messtermine weisen sehr viel geringere Werte auf. Nach den Lysimeterversuchen käme es bei einer Bodentiefe von 1 m zu einer erheblichen Nitratauswaschung an allen Standorten. Es ist jedoch fraglich, ob die Lysimeter mit einem 1 m Bodentiefe die Nitratauswaschung hinreichend gut widerspiegeln. Die Lysimeter liefern für die N-Verlagerung wertvolle Ergebnisse, die jedoch nicht unbedingt der Nitratauswaschung entsprechen.

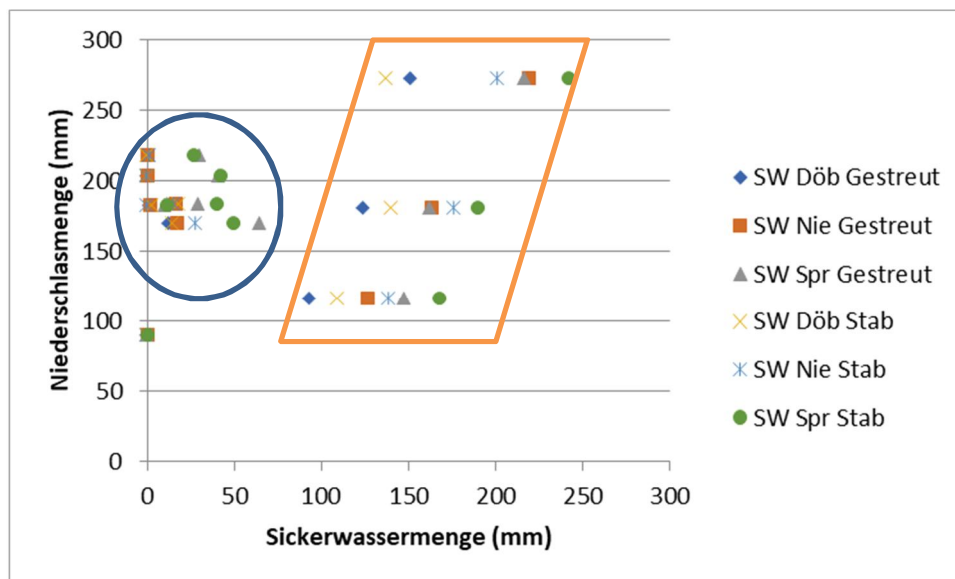


Abb. 5.5 Gesammelte Sickerwassermenge der Lysimeter Nossen und die Niederschlagsmenge in der gleichen Zeitspanne

II. Modifizierter Roy-Ansatz

Für den modifizierten Roy-Ansatz (Faist Emmenegger et al. 2009) wurden die Niederschläge, die N-Düngemenge, die Stickstoffaufnahme, die Erträge und der Tongehalt sowie C_{org} mit Messwerten der Versuchsstandorte berechnet. Die Wurzeltiefe der drei Feldfrüchte wurde aus der Literatur entnommen (Klimanek 1987).

$$N = \left[21,37 + \frac{P}{c \cdot L} * \left[0,0037 * S + 0,0000601 * C_{org} - 0,00362 * U \right] * \frac{1}{Y} * \frac{1}{1000} \right] \quad \text{Gl. 5.9}$$

Die Nitratauswaschung nach Roy wurde ebenfalls mit den Niederschlägen in der Bilanzgrenze Ernte-bis-Ernte für alle Standorte berechnet.

III. Brentrup-Ansatz

Der Brentrup-Ansatz (Brentrup et al. 2000) basiert auf landwirtschaftlichen Parametern (hier wird das N-Saldo aus der N-Bilanz herangezogen), bodenrelevante Parameter (hier werden die Feldkapazität und effektive Wurzelzone verrechnet) sowie klima- bzw. wetterbezogene Parameter (hier der Jahresniederschlag, das Verhältnis aus dem hydrologischen Sommer- und Winterniederschlägen). Das berechnete Sickerwasser und die Feldkapazität der effektiven Wurzelzone ergibt eine Austauschfrequenz, welche zusammen mit dem N-Saldo die Nitratauswaschung beschreibt.

IV. METVER-Ansatz mit Herbst- N_{min} -Methode

Der METVER-Ansatz (Böttcher et al. 2010) ist eine empirische Bodenwassermodellierung und liefert die modellierte Sickerwassermenge über die Bodentiefe von 0 bis 90 cm. Die Grundlagen zu den Modellberechnungen befinden sich in (Müller and Müller 1988a, Müller and Müller 1988b, Müller and Müller 1989). Dieser Ansatz liefert die Sickerwassermenge, aber nicht deren Konzentration. Die Konzentration des Nitrats im Sickerwasser kann jedoch nach der Herbst- N_{min} -Methode (NLWKN 2012) abgeschätzt werden. Für die Prognose wurden die N_{min} -Messwerte der Versuchsstandorte herangezogen, die in der Herbstbeprobung bestimmt wurden. Da nur die N_{min} -Messwerte für die Bodentiefe von 0-30 cm vorliegen, wurden die Werte auf 90 cm Bodentiefe berechnet. Für 30-60 cm wurden die Werte von 0-30 cm angenommen.

Für die Bodentiefe 60-90 cm wurde die Werte nach Grunert (2018) berechnet (Gl. 5.10).

$$N_{min\ 60-90\ cm} = Ackerzahl \times 0,15 - \frac{N_{min\ 0-30\ cm}}{N_{min\ 30-60}} + 0,7 \times N_{min\ 30-60\ cm} - 0,3 \times \text{Feinanteil} + 8 \quad \text{Gl. 5.10}^2$$

Die Ergebnisse der Nitratauswaschung aller Ansätze sind in Tab. 5.9 aufgeführt. Hierbei müssen zwei Gruppen bezüglich der Harmonisierung unterschieden werden. Die Ansätze IPCC, Roy, Brentrup sind in der Bilanzgrenze Ernte-bis-Ernte berechnet. Zur zweiten Gruppe gehören der Brentrup-Ansatz und die Kombination aus METVER und Prognose mit Herbst- N_{min} . Beide basieren auf der Einteilung nach dem Hydrologischen Jahr / Halbjahren (durch # gekennzeichnet).

Die PREC/PET-Ansätze (IPCC, METVER) zeichnen tendenziell ein ähnliches Bild für die Standorte ROG und BER. Am Standort BER wird, mit Ausnahme von 2018 nach METVER, keine Auswaschung ausgewiesen. Während in ROG in allen Jahren substantielle Nitratmengen ausgewaschen werden, die weit über dem N-Saldo liegen. Am Standort CUN ergeben sich jedoch für die ersten beiden Versuchsjahre erhebliche Unterschiede, lediglich im dritten Jahr findet in beiden PREC/PET-Ansätzen so gut wie keine Auswaschung statt.

Der Roy-Ansatz berechnet NO_3 -Auswaschung für jedes Jahr, nur sind die Ergebnisse für die einzelnen Jahre etwas differenzierter. 2018 hat eine Auswaschungsmenge von 50 kg N ha^{-1} , da CUN die höchste Niederschlagsmenge und mit 200 kg N ha^{-1} den höchsten N-Input hat. Das dritte Versuchsjahr fällt mit 36 kg N ha^{-1} etwas geringer aus, da die geringste Niederschlags- und Düngemenge in Kombination auftreten.

Der modifizierte Brentrup-Ansatz, d.h. Verwendung der N-Saldi der erweiterten N-Bilanz in der Bilanzgrenze Ernte-bis-Ernte aus den Versuchsdaten, zeigt meist geringere NO_3 -Auswaschung als der Brentrup-Ansatz im Original. Die Unterschiede ergeben sich aus den unterschiedlichen Bilanzansätzen (letzterer berücksichtigt NO und $N_{Ernterück}$ nicht).

² Ackerzahl (BER 90, CUN, 50, ROG 50; Feinanteil = Ton + Feinschluff ($\leq 6,3\ \mu\text{m}$) BER 42,5%, CUN 28%, ROG 33 %)

Tab. 5.9 Nitratauswaschung (kg ha^{-1}) aus verschiedenen Ansätzen³ und der N-Saldo

Kurz-name	Variante	Frucht	Jahr	IPCC PM	IPCC MT	Roy	N-Saldo erw. MW	N-Saldo erw. Staw	Brentrup N-Saldo erw.	Brentrup N-Saldo erw. #	MET-VER+ Herbst Nmin#
BER	Gestreut	WR	2017	0	0	27,37	94,32	±6,12	62,8	75,5	0,00
		WW	2018	0	0	30,38	84,39	±3,45	33,8	42,3	32,98
		WG	2019	0	0	29,03	36,13	±14,11	18,4	14,2	0,00
	Stabilisiert	WR	2017	0	0	28,43	86,62	±8,89	57,7	69,3	0,00
		WW	2018	0	0	30,40	87,42	±6,10	35,0	43,8	30,83
		WG	2019	0	0	29,11	51,58	±1,96	26,3	20,3	0,00
	Platziert	WR	2017	0	0	27,51	101,06	±15,81	67,3	80,9	0,00
		WW	2018	0	0	30,39	94,53	±8,33	37,9	47,3	33,5
		WG	2019	0	0	28,97	41,21	±9,33	21,0	16,2	0,00
CUN	Gestreut	WR	2017	63,67	63,67	48,04	0 (-14,78)	±13,59	0	0	14,57
		WW	2018	60,82	60,82	50,76	52,30	±13,37	52,3	52,3	29,40
		WG	2019	0	0	36,88	20,38	±15,68	10,2	20,4	0,06
	Stabilisiert	WR	2017	65,04	65,04	48,00	0 (-25,16)	±8,58	0	0	14,57
		WW	2018	62,12	62,12	50,73	55,99	±9,99	56,0	56,0	34,51
		WG	2019	0	0	36,76	9,11	±8,26	4,6	9,1	0,06
	Platziert	WR	2017	63,59	63,59	48,27	0 (-10,18)	±12,07	0	0	14,80
		WW	2018	60,95	60,95	50,85	58,92	±8,83	58,9	58,9	30,80
		WG	2019	0	0	36,55	37,46	±8,93	18,7	37,5	0,08
ROG	Gestreut	WR	2017	62,01	0	46,12	26,43	±4,58	26,4	26,4	48,27
		WW	2018	63,06	63,06	62,52	0 (-0,07)	±21,53	0	0	48,76
		WG	2019	57,14	0	50,15	6,17	±15,68	6,2	6,2	42,12
	Stabilisiert	WR	2017	62,66	0	46,18	22,92	±5,81	22,9	22,9	51,25
		WW	2018	61,13	61,13	62,90	20,13	±18,16	20,1	20,1	52,75
		WG	2019	60,30	0	50,24	0 (-5,99)	±12,63	0	0	54,56
	Platziert	WR	2017	62,19	0	46,07	24,64	±17,02	24,6	24,6	52,27
		WW	2018	65,78	65,78	62,25	0 (-31,20)	±18,61	0	0	51,98
		WG	2019	56,18	0	49,97	16,83	±22,87	16,8	16,8	46,87

Das Auswaschungspotential kann auch aus der N-Recovery-Efficiency (Tab. 5.5) abgeschätzt werden. Im Gegensatz zu den bisherigen Berechnungen wurden hier für RE alle Parzellenversuche (GPV, PVI, PVII) verwendet und das RE als $N\text{-Aufnahme} / (N\text{-Dünger} + N\text{-depos.} + NER_{VF})$ berechnet. So können die N-Effizienzen unabhängig von der Stellung in der FF berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 5.10 dargestellt:

Tab. 5.10 N-Recovery-Efficiency Mittelwerte über alle Jahre und Varianten

	Raps	WW	WG	Gesamt
ROG	0,76	0,97	1,0	0,93
CUN	0,81	0,88	0,89	0,86
BER	0,52	0,67	0,83	0,67

³ IPCC Refinement (2019) PM mit PET nach Penman/Monteith oder MT mit PET nach modifiziertem Turc-Ansatz; N-Saldo aus der erweiterten N-Bilanz als Nitratauswaschungspotenzial (MW = Mittelwert und Staw = Standardabweichung); modifizierter Brentrup-Ansatz mit der erweiterten N-Bilanz

Die Differenz (1-RE) ergibt bei konstantem Boden-N die Summe der N-Emissionsverluste. Die Tendenzen sind an allen Standorten gleich. Raps hat das höchste Verlustrisiko, gefolgt von WW und WG. Berücksichtigt man die gemessenen gasförmigen N-Emissionen (s. Kap. 1.5.3) ergibt sich daraus über die gesamte FF gemittelt ein variantenabhängiges Auswaschpotential von 3-5% in ROG, 7 - 11% in CUN und ca. 30% in BER. Ob dieses Potential aber wirklich ausgewaschen wird, hängt von der Sickerwassermenge ab, die mit anderen Methoden berechnet werden muss, dafür eignen sich PREC/PET-Ansätze oder die Bodenwasseraustauschfrequenz nach Brentrup et al. (2000).

1.5.5. Ökobilanz (AP-5.5)

Die standortspezifische und technikabhängige Ökobilanz wurde in Anlehnung an ISO 14040/44 (2006) durchgeführt. Das Ziel dieser Studie ist die vergleichende Bewertung der Umweltwirkungen bei der Harnstoffdüngung unter Einsatz der untersuchten innovativen Düngetechnologie-Varianten Stabilisiert und Platziert gegenüber der Benchmark-Variante Gestreut.

Die zu bewertenden Harnstoff-Düngetechnologie-Varianten wurden in einer 3-gliedrigen FF (Raps-Weizen-Gerste) eingesetzt. Die Systemgrenze wird festgelegt von der Wiege-bis-Feldrand und der verwendete Bilanzzeitraum ist definiert von Ernte-bis-Ernte. Ecoinvent 3.6⁴ wird als LCI-Datenbank für alle nicht im Projekt gemessenen bzw. modellierten Daten verwendet. Die Wirkungsabschätzung basiert auf den besonders für N-Emissionen relevanten Wirkungsabschätzungsindikatoren der ReCiPe 2008-Methode (Goedkoop et al. 2009). Als die Wirkungskategorien, an denen die Feldemissionen einen substantiellen Anteil an der gesamten Umweltwirkung bei Harnstoffdüngung haben, wurden Treibhauseffekt (THE), Versauerung, Eutrophierung, stratosphärischer Ozonabbau und photochemische Oxidantienbildung identifiziert. Die drei erstgenannten sind am bedeutsamsten und werden daher im diesem Unterkapitel eingehender diskutiert.

Aufgrund der besonderen Relevanz der energetischen Nutzung von Raps und Getreide stellt zunächst die EU-RED (EU 2009) mit dem aktuellen JRC-Bericht (Edwards et al. 2019) ein geeignetes Referenzsystem dar und gibt gleichzeitig einen harmonisierten, methodischen Rahmen vor. Die Berechnung der Feldemissionen basiert auf generischen Emissionsfaktoren nach IPCC (2006), Tier 1. Eine Ausnahme bilden die direkten düngerinduzierten N₂O-Emissionen, die seit 2012 (Edwards et al. 2012) auf GNOC⁵-Daten beruhen, welche zusätzlich Fruchtartklassen und Standorteigenschaften berücksichtigen. Damit steht für die Berechnung der düngerinduzierten N₂O-Emissionen neben einem generischen Emissionsfaktor nach IPCC (2006) Tier 1 auch ein Tier 2-Verfahren für die Berechnung von standort- und fruchtclassenbezogenen düngerinduzierten N₂O-Emissionen zur Verfügung.

⁴ <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-36/ecoinvent-36.html>

⁵ <https://gnoc.jrc.ec.europa.eu/>

A) Ökobilanz: Harnstoff

Die Carbon Footprint (CF) Analyse von Harnstoff der SKW Piesteritz wurde auf Basis der Produktions- und Emissionsdaten aus dem ersten Halbjahr 2018 erstellt. Die erforderlichen Daten wurden durch die Stickstoffwerke (SKWP) in Piesteritz zur Verfügung gestellt.

Der CF von Ammoniak beim vorliegenden Design der SKW-Anlage entspricht $1,6 \text{ kg CO}_{2\text{Äq}} \text{ t NH}_3^{-1}$ und wird daher für die folgenden Berechnungen der anderen Produkte verwendet. Dies entspricht in etwa auch dem EU-ETS Benchmark für Ammoniakanlagen, der auf den 10% der besten Ammoniakanlagen in Europa basiert. Damit ergibt sich für den geprüllten-Harnstoff ein CF von $1,21 \text{ kg CO}_{2\text{Äq}} \text{ kg Produkt}^{-1}$ und für den granulierten Harnstoff (Piagran® 46) ein CF von $1,23 \text{ kg CO}_{2\text{Äq}} \text{ kg Produkt}^{-1}$ oder $2,59 \text{ kg CO}_{2\text{Äq}} \text{ kg N}^{-1}$ bzw. $2,63 \text{ kg CO}_{2\text{Äq}} \text{ kg N}^{-1}$.

B) Ökobilanz: Inhibitoren

Für den doppelt-stabilisierten Harnstoff in der Düngetechnologie-Variante Stabilisiert wurden als Ureaseinhibitor (UI): 2-NPT (N-(2-Nitrophenyl)phosphorsäuretriamid) und als Nitrifikationsinhibitor (NI): MPA (N-((3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1-yl)methyl)acetamid) eingesetzt.

Die Anteile an UI und NI, bezogen auf N-Harnstoff, liegen jeweils innerhalb der nach DüMV (2012) zulässigen Grenzwerte von 0,04-0,15% bezogen auf Carbamid-N für 2-NPT bzw. 0,05-0,4% bezogen auf den Gesamtgehalt an Ammonium- und Carbamid-N für MPA. Die Daten und Informationen für die Herstellungsprozesse der Inhibitoren einschließlich der Formulierung des fertigen Produkts (inhibierter Harnstoff-Dünger) wurden beim Projektpartner SKW erhoben und von ihnen als aggregierte Daten für die jeweiligen Gesamtherstellungsprozesse zur Verfügung gestellt.

Gegenüber einem konventionellen Harnstoff-Dünger ohne Stabilisierung fallen durch die Herstellung der Urease- und Nitrifikationsinhibitoren und die finale Produktherstellung zusätzliche Umweltwirkungen an, die jedoch insbesondere für die N-dominierten Wirkungskategorien mit Ausnahme des Ozonabbaus gering sind.

Im Hinblick auf die Umweltwirkungen für den gesamten Pflanzenanbauprozess spielt der zusätzliche Beitrag durch die Inhibierung (Herstellung von UI und NI sowie des Formulierungshilfsmittels und der Energiebereitstellung) für die betrachteten Wirkungskategorien eine untergeordnete Rolle, wie in Abb. 5.6 am Beispiel ROG, WG, Gestreut, generisch berechnete Feldemissionen gezeigt.

C) Ökobilanz: Vergleich des Referenzsystems (generische Emissionsfaktoren) mit dem vorliegenden Versuchssystem (Messdaten)

Im Vergleich zum Referenzsystem ergeben sich beim Versuchssystem auf Basis der gemessenen NH_3 - und N_2O -Emissionen mit der Benchmark-Variante Gestreut an allen Versuchsstandorten geringere Umweltwirkungen (THE, Versauerung und Marine Eutrophierung). Das alternative Referenzsystem, das die Boden- und Klimabedingungen an einem Standort für die Berechnung der düngerinduzierten N_2O -Emissionen berücksichtigt (auf Basis GNOC), ordnet sich hinsichtlich des THE zwischen dem Referenzsystem und dem Versuchssystem ein. Der nach GNOC berechnete THE zeigt für die Standorte eine Rangfolge (CUN < BER < ROG), die durch das Versuchssystem jedoch nicht widerspiegelt wird. Die im Referenzsystem berechneten direkten N_2O -Emissionen via N-Ernterückstand der Vorfrucht (N-ER-VF) sind ebenso wie die indirekten höher als die im Versuchssystem gemessenen N_2O -Emissionen.

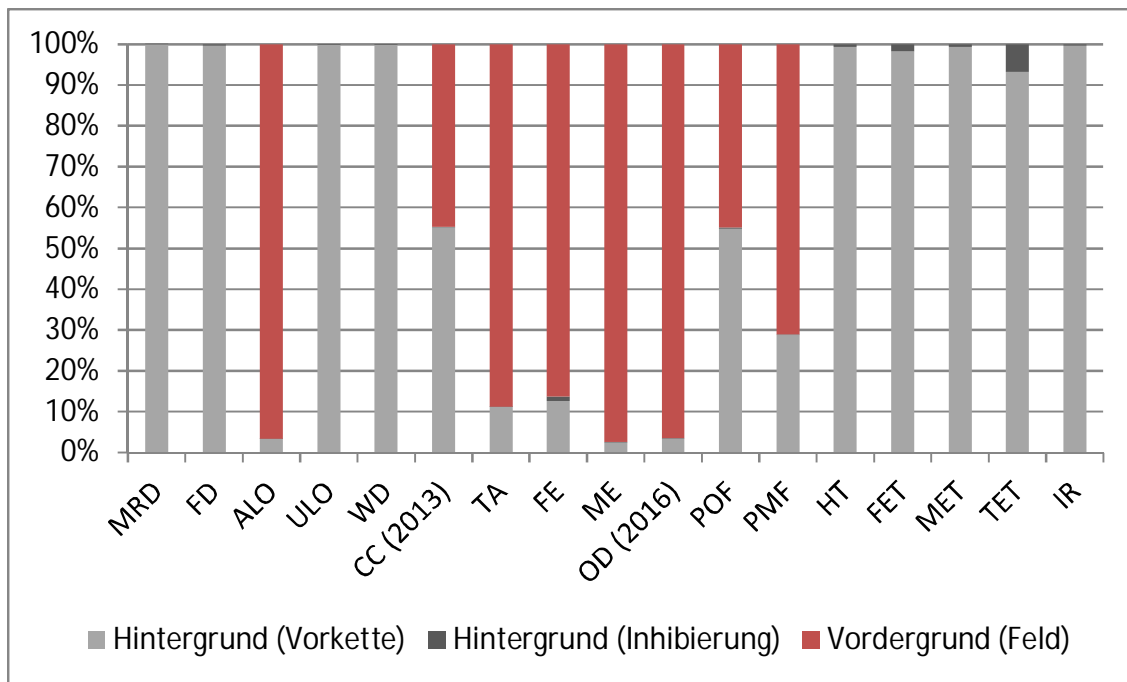


Abb. 5.6 Anteile von Vorder- und Hintergrundprozessen sowie der zusätzlichen Inhibierung von Harnstoff an den jeweiligen Wirkungskategorien nach ReCiPe 2008(H) (Goedkoop et al. 2009) am Beispiel einer flächenbezogenen Ökobilanz für den Pflanzenanbau mit Harnstoffdüngung (Beispiel ROG, WG, Gestreut, plus Inhibierung, generisch berechnete Feldemissionen) (MRD = mineral resource depletion, FD = fossil depletion, ALO = agricultural land occupation, ULO = urban land occupation, WD = water depletion, CC (2013) = climate change (nach IPCC (2013), TA = terrestrial acidification, FE = freshwater eutrophication, ME = marine eutrophication, OD (2016) = ozone depletion (nach ReCiPe 2016 (Huijbregts et al. 2016)), POF = photochemical oxidant formation, PMF = particulate matter formation, HT = human toxicity, FET = freshwater ecotoxicity, MET = marine ecotoxicity, TET = terrestrial ecotoxicity, IR = ionising radiation)

D) Ökobilanz: Vergleich der Düngetechnologie-Varianten

Die potentiellen Umweltwirkungen, die bei Anwendung der innovativen Harnstoff-Düngetechnologie-Varianten (Stabilisiert und Platziert) entstehen, werden im Vergleich zur Benchmark-Variante Gestreut bewertet. Die Ergebnisse sind in Tab. 5.11 für den flächenbezogenen THE zusammengestellt. Durch die Einführung der innovativen Düngetechnologie-Varianten Stabilisiert und Platziert ändern sich die Vorkettenemissionen insgesamt um -5 bis +31 kg CO_{2Aq} ha⁻¹ gegenüber Gestreut. Das entspricht einer Änderung von -0,3% bis +1,4% des THE-gesamt der Benchmark-Variante. Mit dem stabilisierten Harnstoff ergibt sich eine THE-Zunahme durch die zusätzliche Herstellung der Inhibitoren und eine THE-Abnahme durch die Zusammenfassung von N-Gaben (geringerer Bedarf an Arbeitsmaschinen und Diesel), so dass in der Regel eine Netto-Reduktion von -3 bis -5 kg CO_{2Aq} ha⁻¹ resultiert. Mit der Variante Platziert ist durch die Schlitztechnik in der Regel eine Netto-Zunahme der Vorkettenemissionen von +10 bis +31 kg CO_{2Aq} ha⁻¹ verbunden.

Bei den Feldemissionen führen die Varianten Stabilisiert und Platziert zu deutlich größeren Änderungen gegenüber Gestreut. In BER und CUN führt Stabilisiert im Mittel zu einer Abnahme von ca. 49 kg CO_{2Aq} ha⁻¹ und Platziert zu einer Zunahme von ca. 77 - 115 kg CO_{2Aq} ha⁻¹. In ROG führen beide Variante zu einer Abnahme Stabilisiert ca. 80 kg CO_{2Aq} ha⁻¹ und Platziert ca. 58 kg CO_{2Aq} ha⁻¹; die THE-Minderung ist bei Stabilisiert höher als bei Platziert.

Der größte Beitrag im Hinblick auf die Feldemissionen geht auf die gemessenen direkten N₂O-Emissionen zurück. Diese sind jedoch aufgrund des witterungsbedingt niedrigen N₂O-Emissionsniveaus in den drei Versuchsjahren und der damit verbundenen Varianz der Messwerte (je vier Wiederholungen) nicht immer signifikant unterscheidbar (vergl. Abb. 5.3).

Tab. 5.11 Treibhauseffekt, flächenbezogen; ANOVA/Tukey-Test ($\alpha = 0,05$)⁶

Standort	Frucht-Jahr Variante	N-Input		Ertrag	Vorkettenemissionen				Feldemissionen				THE gesamt pro Fläche	
		N_Dünger	N-ER-VF		BM ¹⁾	N-Dünger ²⁾	Diesel ³⁾	AM ⁴⁾	N ₂ O_direkt	N ₂ O_indir.				
										via NH ₃	via NO	via Nitrat		
		kg N ha ⁻¹		dt ha ⁻¹	kg CO ₂ Aq ha ⁻¹					kg CO ₂ Aq ha ⁻¹			kg CO ₂ Aq ha ⁻¹	
BER														
Raps-2017 (WR)														
	Kontrolle	0	26 b	6,6 c	260	0	199	185	-7 ba			28		665 c
	Gestreut	130	67 a	12,9 b	260	647	204	192	189 a	0 a	6	216		1714 a
	Stabilisiert	130	61 a	18,7 a	260	654	204	192	68 a	0 a	6	209		1594 ba
	Platziert	130	65 a	12,0 b	260	647	210	196	284 a	0 a	6	214		1818 a
Weizen-2018 (WW)														
	Kontrolle	0	20 b	25,1 b	350	0	211	165	92 ba			21		839 c
	Gestreut	200	40 a	51,0 a	350	996	226	188	140 ba	27 a	9	263		2198 b
	Stabilisiert	200	30 a	49,2 a	350	1005	221	180	151 a	6 c	9	253		2175 b
	Platziert	200	34 a	47,4 a	350	996	245	200	268 a	10 b	9	258		2335 a
Gerste-2019 (WG)														
	Kontrolle	0	27 b	36,2 d	268	0	234	184	75 b			30		790 c
	Gestreut	160	63 a	71,5 a	268	796	244	199	21 b	13 a	7	245		1794 b
	Stabilisiert	160	61 a	68,4 b	268	804	239	191	35 b	12 a	7	242		1799 b
	Platziert	160	58 a	64,8 c	268	796	256	207	173 a	11 ba	7	239		1959 a
CUN														
Raps-2017 (WR)														
	Kontrolle	0	18 d	37,34 c	262	0	256	191	205 c			19		932 c
	Gestreut	180	62 b	49,83 b	262	896	266	206	352 b	25 a	8	265		2280 b
	Stabilisiert	180	69 a	53,2 a	262	905	261	198	327 b	0 c	8	273		2235 b
	Platziert	180	46 c	49,6 b	262	896	272	210	481 a	22 b	8	248		2399 a
Weizen-2018 (WW)														
	Kontrolle	0	64 c	54,79 b	286	0	286	166	233 c			70		1041 c
	Gestreut	200	85 b	82,34 a	286	996	301	189	519 a	43 a	9	313		2656 a
	Stabilisiert	200	91 a	84,8 a	286	1005	296	181	435 ba	22 c	9	320		2554 ba
	Platziert	200	85 b	81,1 a	286	996	302	186	613 a	38 b	9	313		2742 a
Gerste-2019 (WG)														
	Kontrolle	0	28 c	38,46 c	233	0	230	120	24 cb			31		638 b
	Gestreut	160	53 b	96,16 a	233	796	240	135	103 b	8 a	7	234		1757 a
	Stabilisiert	160	59 a	99,8 a	233	804	235	127	97 b	1 b	7	240		1745 a
	Platziert	160	54 b	79,7 b	233	796	241	132	144 a	1 b	7	235		1789 a
ROG														
Raps-2017 (WR)														
	Kontrolle	0	36 c	18,2 b	322	0	202	187	74 b			40		825 b
	Gestreut	180	78 b	45,8 a	322	896	213	202	341 a	20 a	8	284		2285 a
	Stabilisiert	180	91 a	47,4 a	322	905	208	195	430 a	5 c	8	298		2370 a
	Platziert	180	74 b	46,2 a	322	896	225	211	409 a	8 b	8	279		2359 a
Weizen-2018 (WW)														
	Kontrolle	0	31 b	49,2 c	329	0	235	192	206 a			34		996 b
	Gestreut	180	78 a	107,2 b	329	896	250	215	398 a	6 a	8	284		2386 a
	Stabilisiert	180	81 a	107,9 b	329	905	245	207	312 a	2 b	8	287		2295 a
	Platziert	180	79 a	116,9 a	329	896	269	227	284 a	3 b	8	285		2300 a
Gerste-2019 (WG)														
	Kontrolle	0	42 b	35,7 b	357	0	224	191	174 b			46		992 c
	Gestreut	160	83 a	98,2 a	357	796	235	206	515 a	1 a	7	267		2384 a
	Stabilisiert	160	75 a	101,7 a	357	804	229	199	282 ba	0 c	7	258		2137 ba
	Platziert	160	94 a	97,5 a	357	796	247	215	393 a	1 b	7	279		2294 a

¹⁾ BM = Betriebsmittel ohne N-Dünger (Saatgut, PSM, P-, K-Dünger, sonstige Mineraldünger, Kalk)

²⁾ inkl. CO₂ aus Hydrolyse und Neutralisation

³⁾ inkl. Verbrennung

⁴⁾ AM = Arbeitsmaschinen ohne Diesel

⁶ In CUN ist Platziert in 2017 und 2018 nur eingeschränkt repräsentativ für diese Variante, da die wurzelnahe Platzierung teilweise durch eine manuelle Streuung ersetzt werden musste (hellgraue Schriftfarbe).

Für den Gesamt-THE, der sich aus der Summe der Vorketten- und Feldemissionen zusammensetzt, ergibt sich mit der Variante Stabilisiert i.d.R. eine Netto-Reduktion von -248 bis -12 kg CO_{2Aq} ha⁻¹ gegenüber Gestreut. Eine Ausnahme bilden, wie bei den Feldemissionen, der Standort BER mit Gerste-2019 (+5 kg CO_{2Aq} ha⁻¹) und ROG mit Raps-2017 (+85 kg CO_{2Aq} ha⁻¹). Bezogen auf die Variante Gestreut entspricht dies einer THE-Netto-Reduktion von bis zu 10%.

Die Variante Platziert führt dagegen in der Regel zu einer Netto-Zunahme von +31 bis +165 kg CO_{2Aq} ha⁻¹. Dies entspricht einer THE-Netto-Zunahme von 1,8% bis 9,2% bezogen auf die Benchmark-Variante. Einzig am Standort ROG ergibt sich für den Gesamt-THE, wie bei den Feldemissionen, eine Netto-Reduktion gegenüber Gestreut mit Weizen-2018 und Gerste-2019 (-86 bzw. -90 kg CO_{2Aq} ha⁻¹), dies entspricht einer THE-Minderung um rund 4%.

Im jährlichen Mittel der gesamten Fruchtfolge zeigt sich an allen Standorten die gleiche Tendenz, dass die Variante Stabilisiert zu einer THE-Minderung um -2% bis -4% gegenüber dem Benchmark Gestreut führt. Dagegen ist der Effekt mit der Variante Platziert an den Standorten unterschiedlich. In CUN und BER (Standorte mit weniger Niederschlägen und einem geringeren N₂O-Verlustpotential) resultiert in der FF eine THE-Zunahme um +4% bis +7% gegenüber Gestreut, während sich in ROG (höheres N₂O-Verlustpotential) eine tendenzielle THE-Minderung um -1,5% abzeichnet. Da die drei Versuchsjahre durch eine überwiegende Trockenheit und ein insgesamt geringes N-Emissionsniveau geprägt waren, bleibt offen, ob diese gegenläufigen Tendenzen auch unter anderen Witterungsbedingungen bestätigt werden können.

Ergänzend zum THE werden auch die Wirkungskategorien VP und MEP untersucht, um eventuell auftretende Zielkonflikte zu identifizieren. Hinsichtlich der Versauerung resultiert bei den Feldemissionen mit beiden Varianten eine deutliche Reduktion des VP gegenüber Gestreut (-0,6 bis -17,8 kg SO_{2Aq} ha⁻¹). Im Fall sehr geringer NH₃-Emissionen überwiegt der Beitrag durch die berechneten NO-Emissionen, der jedoch für alle Varianten am Standort gleich ist, da NO-Emissionen auf Basis der N-Düngermenge berechnet ist. Die Änderung bei den Feldemissionen ist stets größer als bei den Vorkettenemissionen (Ausnahme BER-Raps-2017, da dort für alle Varianten keine NH₃-Verluste nachgewiesen werden konnten). Insgesamt kann gezeigt werden, dass beide Varianten (Stabilisiert und Platziert) die Versauerung gegenüber dem Benchmark Gestreut eindeutig reduzieren (Stabilisiert: -4,4% bis -65,5%, Platziert: -4,5% bis -35,8%). Die Wirksamkeit der Variante Stabilisiert ist meist höher als von Platziert, mindestens aber genauso hoch.

Über die gesamte FF ergibt sich eine Minderung des VP durch die Varianten Stabilisiert und Platziert gegenüber Gestreut, wie in Abb. 5.7 gezeigt. Für die FF ergibt sich stets ein tendenziell stärkeres Minderungspotential durch die Variante Stabilisiert (-29% bis -46%) als durch die Variante Platziert (-13% bis -23%), wobei die Platziert in CUN nicht immer wie geplant durchgeführt werden konnte und somit auch nur bedingt mit den anderen Varianten verglichen werden kann.

Zu der Wirkungskategorie Marine Eutrophierung (MEP) tragen neben den NH₃- und NO-Emissionen vor allem die Nitratverluste bei. Da die potentiellen Nitratausträge im Basisszenario des Versuchssystems anhand eines generischen Faktors aus dem N-Input (N-Dünger + N-ER-VF) berechnet werden, macht sich ein Varianteneinfluss nur durch die gemessenen NH₃-Emissionen und über die ertragsabhängigen Ernterestmengen (N-ER-VF) bemerkbar. Je geringer der Ertrag (bzw. N-ER-VF) gegenüber dem Benchmark Gestreut, umso geringer wird das berechnete Nitrat-Austragspotential und führt zu einer entsprechenden MEP-Minderung.

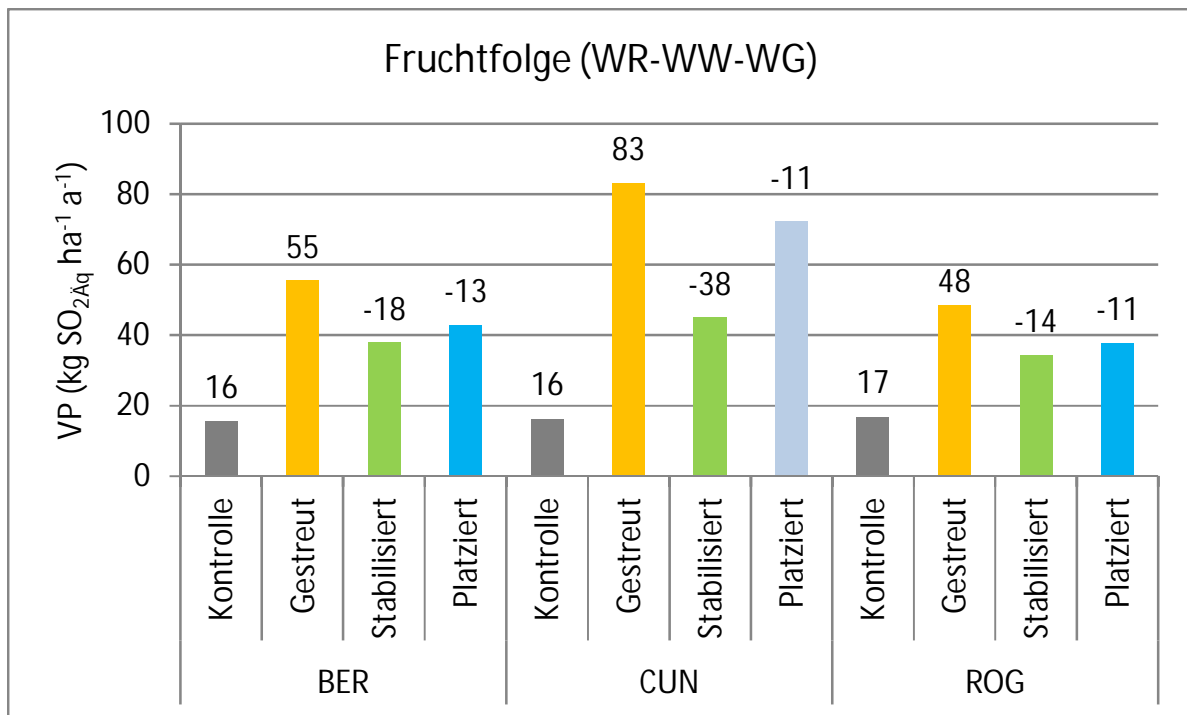


Abb. 5.7 Versauerung (VP), je Fläche und Jahr, für die FF Raps-Weizen-Gerste an den Standorten BER, CUN, ROG

Gerade im Hinblick auf die Eutrophierung wird die Wichtigkeit der Quantifizierung des Nitrataustrags deutlich. Aber auch zum THE leistet das Nitrat einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag in Form indirekter N_2O -Emissionen. Daher wurde eine Szenarioanalyse durchgeführt und ein alternativer Ansatz zur Abschätzung des Nitrataustrags verwendet. Im Basisszenario des Versuchssystems wird der Nitrataustrag wie im Referenzsystem nach IPCC Refinement (2019) berechnet. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Bedingungen für eine Auswaschung (Niederschlag > potentielle Evapotranspiration) erfüllt sind und die berechnete Nitrat-N-Menge (24% vom N-Input) vollständig ausgetragen wird und somit umweltrelevant ist. In einem alternativen Szenario soll die Nitrat-N-Menge über die N-Bilanz der FF abgeschätzt werden. Für die FF kann angenommen werden, dass sich der Boden-N-Gehalt nicht ändert und sich zwischenzeitliche Schwankungen bei den einzelnen Fruchtfolgegliedern über die gesamte Periode der FF wieder ausgleichen.

Das Ergebnis für die Berechnung des potentiellen Nitrataustrags entsprechend dem Basisszenario (Basis) und dem alternativen Szenario (Szenario_N-Saldo) sind beispielhaft für den Standort ROG in Abb. 5.8 gezeigt. Nitrat trägt direkt oder indirekt zum MEP und THE bei, d.h. verminderte Nitratemissionen führen auch zu geringerem THE und MEP. Gegenüber dem Basisszenario ergibt sich für den THE eine variantenabhängige Minderung um 7% bis 9% und für MEP von 52% bis 76%.

Mit dem N-Saldo-Ansatz lässt sich die potentiell auswaschbare Nitrat-N-Menge für eine FF unter der Annahme eines konstanten Boden-N-Gehalts abschätzen und führt zu realitätsnäheren Ergebnissen als der Berechnungsansatz auf Basis eines konstanten Anteils vom N-Input wie beim IPCC- und darauf basierenden Ansätzen. Die Zuordnung zu den einzelnen Fruchtfolgegliedern bedarf jedoch weiterer Annahmen und Festlegungen, da sich beim rein rechnerischen Verfahren auch negative N-Salden für eine Einzelfrucht ergeben können.

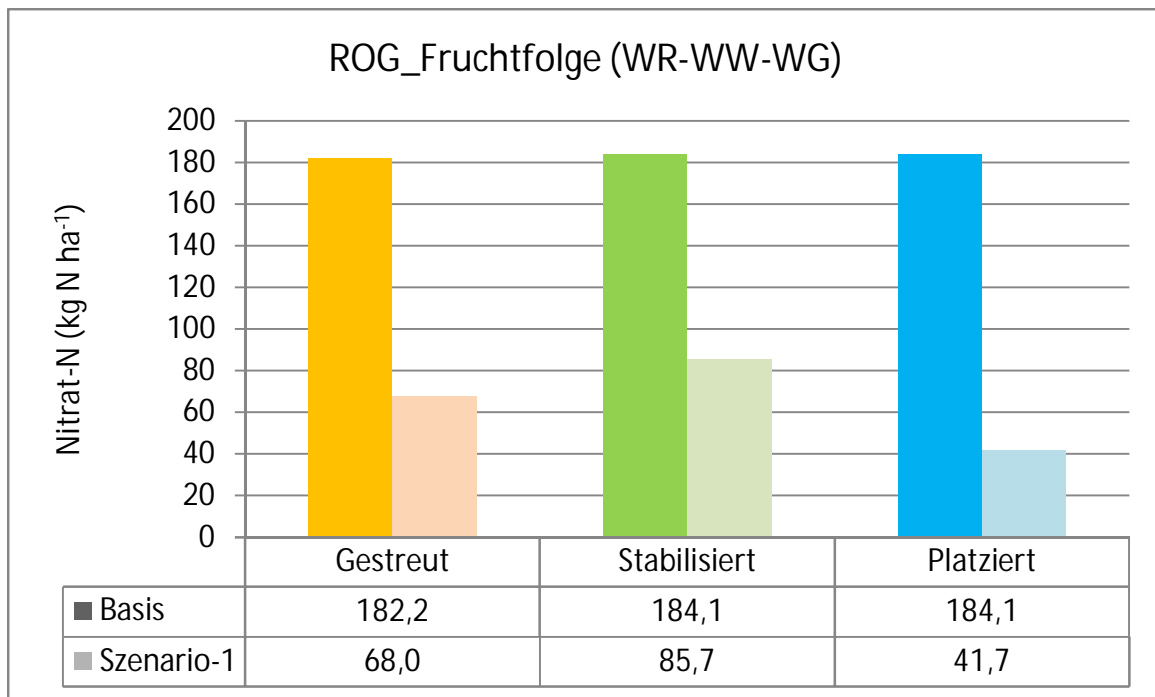


Abb. 5.8 Potentieller Nitrat-N-Austrag über die gesamte Fruchtfolgeperiode, je Fläche, berechnet im Basisszenario (IPCC 2019) und alternativen Szenario_N-Saldo am Beispiel ROG

1.5.6. Ökoeffizienzanalyse und Vermeidungskosten (AP-5.6)

Um neben der Umweltwirkung, die beim Pflanzenanbau unter Einsatz der verschiedenen Harnstoff-Düngetechnologievarianten entstehen, auch die ökonomische Wirkung zu berücksichtigen, werden zwei Aspekte der Ökoeffizienz untersucht. Zum einen wird eine Ökoeffizienzanalyse durchgeführt, die den ökonomischen Nutzen (P) für den Landwirt im Verhältnis zur Umweltwirkung (E) betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Bewertung der Nutzensteigerung bei gleicher Umweltwirkung. Und zum anderen wird mit einer Berechnung der Umweltwirkungs-Vermeidungskosten (U-VK) untersucht, mit welchen zusätzlichen Kosten (DK) eine Umweltwirkungsminderung (DE) verbunden ist. Der Fokus liegt hierbei auf der Bewertung der Verbesserung der Umweltwirkung.

In der Ökoeffizienzanalyse ist der Ökoeffizienz-Indikator (ÖEI) für ein Produktsystem definiert als Quotient aus Nutzen und Umweltwirkung ($\text{ÖEI} = P/E$). Für die Bewertung der relativen Ökoeffizienz werden die Ökoeffizienzindikatoren der zu vergleichenden Produktsysteme (Variante_i gegenüber Benchmark-Variante_G) ins Verhältnis gesetzt (Faktor $X = \text{ÖEI}_i / \text{ÖEI}_G$). Ist der Faktor $X > 1$, so ist die Variante_i gegenüber der Benchmark-Variante_G ökoeffizienter. Zur Prüfung, ob eine bessere Ökoeffizienz auf einer relativen Steigerung des Nutzens ($P_i/P_G > 1$) und/oder einer relativen Minderung der Umweltwirkung ($E_G/E_i > 1$) beruht, kann der Faktor X auch in diese beiden anschaulichen Komponenten zerlegt werden:

$$\text{Faktor } X = \text{ÖEI}_i / \text{ÖEI}_G = (P_i/E_i) / (P_G/E_G) = (P_i/P_G) * (E_G/E_i) \quad \text{Gl. 5.10}$$

Die Bedeutung des resultierenden X-Wertes ist im Bewertungsschema für die relative Ökoeffizienz (Abb. 5.9) dargestellt. Eine relative Steigerung des Nutzens ($QP > 1$) und eine gleichzeitige relative Umweltwirkungs-Minderung ($QE > 1$) führt zu einer eindeutigen Ökoeffizienzsteigerung (Faktor $X > 1$).

Faktor $X = QP * QE$

$P_i < 0$ nicht sinnvoll

		$QP = P_i/P_G$			
		> 1	< 1		
$QE = E_G/E_i$	> 1	ökoeffizienter $X > 1$	$X > 1$ $X < 1$	$E_G > E_i$	E-Minderung
	< 1	$X > 1$ $X < 1$	$X < 1$ weniger ökoeffizient	$E_G < E_i$	E-Zunahme
		$P_i > P_G$	$P_i < P_G$		
		P-Zunahme	P-Abnahme		

Abb. 5.9 Bewertungsschema in der Ökoeffizienzanalyse für die relative Ökoeffizienz (Faktor X)

Die Bewertung der relativen Ökoeffizienz wurde für alle Versuchsstandorte getrennt für die einzelnen Wirkungskategorien durchgeführt. Hinsichtlich der Wirkungskategorie Versauerung liegt stets eine Umweltwirkungsminderung ($QE > 1$) vor. Am Standort BER (und auch im Fall ROG-Gerste-Platziert) kann diese jedoch nicht die deutliche Nutzenminderung ($QP < 1$) kompensieren. Mit der Variante Stabilisiert ist die Ökoeffizienz stets höher als mit dem Benchmark Gestreut und in der Regel auch höher als mit der Variante Platziert. Hinsichtlich des THE konnte am Standort BER mit keiner Variante eine höhere Ökoeffizienz als mit Gestreut erreicht werden, da der Nutzen (P) entweder negativ oder deutlich geringer als der Benchmark war ($P_i/P_G < 1$). An den Standorten CUN und ROG erwies sich die Variante Stabilisiert immer als (tendenziell) ökoeffizienter als der Benchmark Gestreut ($X > 1$). Dabei beruht das Ergebnis stets auf einer Nutzensteigerung ($P_i/P_G > 1$) und mit Ausnahme von ROG-Raps auch auf einer THE-Minderung ($QE > 1$). Die Variante Platziert ist (tendenziell) weniger ökoeffizient als Gestreut, selbst wenn sich wie bei ROG-Gerste eine tendenzielle THE-Minderung abzeichnet. Einzige Ausnahme stellt ROG-Weizen dar, da durch den signifikant höheren Ertrag eine deutliche Nutzensteigerung ($QP > 1$) erreicht wird.

Ein wichtiges Ziel beim Einsatz der Harnstoff-Düngetechnologie-Varianten ist, die N-Verluste auf dem Feld zu mindern. Daher sollen im ersten Schritt die Vermeidungskosten nur in Bezug auf die Summe der im Feldversuch gemessenen N-Emissionen (NH_3 , N_2O) und die sich daraus zusammensetzende N-Emissionsdifferenz ($DN_S = DN_{NH_3-N} + DN_{N_2O-N}$) im Vergleich zum Benchmark Gestreut betrachtet werden. Das Basisszenario basiert auf den Messwerten für NH_3-N und N_2O-N und entspricht aufgrund des vorherrschenden geringen N-Emissionsniveaus in den drei Versuchsjahren einem worst-case hinsichtlich der Vermeidungskosten (DK/DN_S). Daher wurden zwei Szenarien ergänzt, die beide auf Basis der jeweiligen Emissionsfaktoren nach IPCC 2019 (NH_3-N : 14,2%, N_2O-N : 1% berechnet werden.

Im Szenario-1 werden die gemessenen N-Emissionen in den Varianten Stabilisiert und Platziert den berechneten Werten von Gestreut gemäß der nationalen Emissionsberichterstattung gegenübergestellt, so dass ein best-case für die N-Emissions-Vermeidungskosten abgeschätzt werden kann. Im Szenario-2 werden die N-Emissionen für Stabilisiert und Platziert auf Basis des im Versuch ermittelten prozentualen Reduktionspotentials gegenüber Gestreut berechnet. Die Kostendifferenz (DK) ist für alle Szenarien gleich, die Emissionsreduktion jedoch unterschiedlich. Die Ergebnisse für die flächenbezogenen N-Emissions-Vermeidungskosten sind für den Standort ROG in Tab. 5.12 dargestellt.

Tab. 5.12 N-Emissions-Vermeidungskosten am Beispiel ROG

ROG	Basisszenario					Szenario-1				Szenario-2			
Frucht	DK	DNH ₃ -N	DN ₂ O-N	DN _S	DK/DN _S	DNH ₃ -N	DN ₂ O-N	DN _S	DK/DN _S	DNH ₃ -N	DN ₂ O-N	DN _S	DK/DN _S
Variante _i	= K _i - K _G	= N _G - N _i	= N _G - N _i	= N _G - N _i		= N _G - N _i	= N _G - N _i	= N _G - N _i		= N _G - N _i	= N _G - N _i	= N _G - N _i	
	€ ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	€ kg ⁻¹ N	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	€ kg ⁻¹ N	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	kg N ha ⁻¹	€ kg ⁻¹ N
Raps													
Stabilisiert	-2	3,5	-0,2	3,3	-0,8	24,3	0,9	25,3	-0,1	18,9	-0,5	18,4	-0,1
Platziert	39	2,7	-0,2	2,6	15	23,5	1,0	24,5	1,6	14,6	-0,4	14,2	2,7
Weizen													
Stabilisiert	-2	0,9	0,2	1,1	-2,2	25,0	1,5	26,6	-0,1	16,1	0,5	16,6	-0,1
Platziert	58	0,8	0,3	1,1	53	25,0	1,6	26,6	2,2	14,8	0,7	15,5	3,8
Gerste													
Stabilisiert	-3	0,3	0,6	0,9	-3,7	22,7	1,3	24,0	-0,1	21,4	0,9	22,3	-0,1
Platziert	39	0,2	0,3	0,5	78	22,6	1,1	23,6	1,6	13,0	0,5	13,4	2,9
FF													
Stabilisiert	-8	4,8	0,6	5,3	-1,6	72,1	3,8	75,9	-0,1	56,4	0,9	57,3	-0,1
Platziert	136	3,7	0,4	4,2	33	71,1	3,7	74,7	1,8	42,4	0,7	43,1	3,2

Im gezeigten Beispiel von ROG (Tab. 5.12) ergeben sich für Stabilisiert gegenüber Gestreut keine Mehrkosten pro ha für den gesamten Pflanzenanbau bis zur Ernte ($DK < 0$). Die zusätzlichen Kosten für den doppelt-inhibierten Harnstoff (ALZON neo-N) werden durch die Kosteneinsparung für Diesel und Arbeitsmaschinen aufgrund des Zusammenfassens der N-Gaben nivelliert.

Mit der Variante Platziert fallen dagegen stets höhere Kosten an als bei Gestreut ($DK > 0$), da durch die Schlitztechnik der Dieselverbrauch und die Arbeitsmittelnutzung höher sind. Im Basisszenario schwanken die N-Vermeidungskosten für Platziert im Versuchszeitraum zwischen 15 – 78 € kg⁻¹ N für die Einzelfrüchte und 33 € kg⁻¹ N für die gesamte Fruchtfolge. Im Szenario-1 und -2 ergeben sich deutlich geringere N-Vermeidungskosten im Bereich von 1,6 bis 3,8 € kg⁻¹ N. Die N_S-Vermeidungskosten können prozentual auf die einzelnen N-Emissionen (DNH₃-N, DN₂O-N) aufgeteilt werden. Werden die NH₃-Emissionen gesenkt und gleichzeitig die N₂O-Emissionen erhöht, ändern sich die Kosten im Falle einer THG-Bepreisung. I.d.R. ist die NH₃-N-Minderung gegenüber Gestreut deutlich höher als eine N₂O-N-Minderung oder -Zunahme, so dass stets eine Netto-N-Emissionsminderung gegenüber dem Benchmark erreicht wird.

1.5.7. Zusammenfassung

Fruchtfolgen haben eine inhärente Variabilität, die sich im Wesentlichen aus den wechselnden Witterungsbedingungen ableitet. Die Versuchsjahre waren durch ungewöhnliche Trockenheit gekennzeichnet und wiesen an allen Standorten ein unterdurchschnittliches N-Emissionsniveau aus. Unabhängig davon führen Platziert und Stabilisiert zu verminderten N-Emissionen, insbesondere in Bezug auf NH₃.

Im Vergleich von Stabilisiert und Platziert gegenüber Gestreut zeichnet sich weder für einen Standort noch für eine Fruchtart ein einheitlicher Effekt auf den N-Entzug oder den Ertrag ab. Im Hinblick auf den mittleren N- Korn-Entzug in den drei Versuchsjahren (MW N-Korn) lässt sich jedoch ableiten, dass in ROG für alle Früchte der höchste N-Entzug mit der Variante Platziert erzielt wird. Ein höherer mittlerer N-Korn-Entzug gegenüber Gestreut zeigt sich in ROG auch mit der Variante Stabilisiert im Raps und Weizen. In der Gerste dagegen bewirken die Variante Stabilisiert an allen Standorten und die Variante Platziert in BER und CUN eine Minderung des mittleren N-Korn-Entzugs.

Im GPV ergaben sich in ROG die höchsten und in BER die geringsten N-Entzugseffizienzen, sowohl in Bezug auf die Einzelfrüchte als auch die gesamte FF. Ein Trend für die Vorteilhaftigkeit von Platziert gegenüber Stabilisiert lässt sich für die N-Nutzeneffizienz nicht ableiten. Über die gesamte FF betrachtet zeigt sich jedoch am Standort ROG mit der Variante Platziert gegenüber Gestreut in allen drei Versuchen (GPV, PVI, PVII) eine statistisch signifikante Zunahme der NUE_{FF} und der düngerinduzierten N-Aufnahmeeffizienz (RE).

Bei der Verwendung von Emissionsfaktoren gemäß IPCC in der Ökobilanz werden die Umweltwirkungen Treibhauseffekt, Versauerung und Eutrophierung beim Pflanzenanbau überschätzt. Eine Berücksichtigung von Standorteigenschaften für die Berechnung der düngerinduzierten N_2O -Emissionen mit dem GNOC-Ansatz kommt den Messdaten näher, übersteigt jedoch den in den Versuchsjahren ermittelten Treibhauseffekt um durchschnittlich 25%. Wobei hervorzuheben ist, dass die N_2O -Emissionen in den Versuchsjahren außergewöhnlich niedrig waren, was auch ein Vergleich mit Ergebnissen aus vorangegangenen Projekten zeigt (Flessa et al. 2017, Ruser et al. 2017).

Stabilisiert und Platziert sind geeignete Optionen für eine Reduktion von NH_3 -Emissionen, jedoch besteht bei der Option Platziert das Risiko erhöhter N_2O -Emissionen. Der aus Messdaten abgeleitete mittlere EF für NH_3 -N aus Harnstoff betrug 2,4% und war somit signifikant geringer als der EF gemäß EMEP (12,8%), aber auch als EFs für Harnstoff aus wissenschaftlicher Literatur (Pacholski et al. 2018, Ti et al. 2019). Die Versuchsjahre waren jedoch durch ungewöhnliche Trockenheit, insbesondere sehr geringe Frühjahrsniederschläge, gekennzeichnet, daher ist der in diesem Projekt abgeleitete EF für Ammoniak nur bedingt repräsentativ.

Für die Standorte CUN und ROG weisen die Ergebnisse nach der IPCC-Methodik eine Nitrat-Auswaschung aus, die die potentiell verfügbare N-Menge gemäß der N-Bilanz um ein Vielfaches übersteigt. Am Standort ROG steht auf Basis der N-Bilanz max. 20% der N-Menge für die Auswaschung zur Verfügung, die gemäß IPCC ausgewaschen worden wäre. Für den Standort BER wird nach IPCC aufgrund von Trockenheit keine N-Auswaschung stattfinden. Die N_{min} -Werte in 0 bis 30 cm Bodentiefe vor der Düngung nach dem Jahr der Mindererträge zeigen in BER keine Auffälligkeiten. Es ist daher anzunehmen, dass der mineralische Stickstoff in tiefere Bodenschichten verlagert wurde. Mit der N-Bilanz oder der Differenz (RE - gasförmige N-Emissionen) kann das Nitrat-Auswaschungspotential besser abgeschätzt werden als mit dem IPCC-Ansatz.

Stabilisiert erweist sich stets als ökoeffizienter als der Benchmark Gestreut und i.d.R. auch als die Variante Platziert, sowohl hinsichtlich der Versauerung als auch des Treibhauseffekts. Platziert ist hinsichtlich der Versauerung ökoeffizienter als Gestreut.

Mit beiden Varianten (Stabilisiert und Platziert) wird eine Netto-N-Emissionsminderung gegenüber dem Benchmark Gestreut erreicht. Die entsprechenden N-Vermeidungskosten sind bei einem geringen N-Emissionsniveau um etwa den Faktor 10 höher als bei den Szenarien auf Basis von N-Emissions-Standardwerten. Die NH_3 -N-Vermeidungskosten betragen beim Beispiel ROG im Basisszenario 15 – 32 € $kg^{-1}N$ und im Szenario-1 ca. 2 € $kg^{-1}N$. Die N_2O -N-Vermeidungskosten liegen im Basisszenario bei 13 – 46 € $kg^{-1}N$ und im Szenario-1 bei etwa 0,1 € $kg^{-1}N$. Bei einem Trade-off (NH_3 -N-Abnahme vs. N_2O -N-Zunahme) können sich die N-Vermeidungskosten in Abhängigkeit von ggf. berücksichtigten CO_2 -Kosten ändern. Die Variante Stabilisiert erweist sich als kostengünstiger als die Variante Platziert.

1.5.8. Literatur / Referenzen zum Abschlussbericht des TI

- Allen, R. G., L. S. Pereira, L. S. Raes and M. Smith (1998). "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56." FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Böttcher, F., J. Müller and M. Schmidt (2010). "Das agrarmeteorologische Bodenwasserhaushaltsmodell METVER. Arbeitspapier." Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, Germany.
- Brentrup, F., J. Küsters, J. Lammel and H. Kuhlmann (2000). "Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 5(6): 349-357.
- Dobermann, A. (2007). "Nutrient use efficiency-measurement and management." *Fertilizer best management practices* 1.
- Dobermann, A. R. (2005). "Nitrogen use efficiency-state of the art." *Agronomy--Faculty Publications*: 316.
- DüMV (2012). "Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), Düngemittelverordnung vom 16. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2524), zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 23. April 2012 (BGBl. I S. 611) geändert."
- DüV (2017). "Düngeverordnung, Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Düngeverordnung vom 26. Mai 2017, BGBl. I S. 1305."
- Edwards, R., D. Mulligan, J. Giuntoli, A. Agostini, B. Aikaterini, R. Koeble, L. Marelli, A. Moro and M. Padella (2012). "Assessing GHG default emissions from biofuels in the EU legislation. Review of input database to calculate "Default GHG emissions", following expert consultation, 22-23 November 2011, Ispra (Italy)."
- Edwards, R., A. O'Connell, M. Padella, J. Giuntoli, R. Koeble, C. Bulgheroni, L. Marelli and L. Lonza (2019). "Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation, Version 1d -2019, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC115952."
- EMEP/EEA (2019). *Air pollutant emission inventory guidebook*. Luxembourg, Office of the European Union.
- EU (2009). *DIRECTIVE 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*. EU-Parlament.
- Faist Emmenegger, M., J. Reinhard and R. Zah (2009). "Sustainability Quick Check for Biofuels - intermediate background report." *Agroscope Reckenholz-Tänikon*.
- Fixen, P., F. Brentrup, T. Bruulsema, F. Garcia, R. Norton and S. Zingore (2015). "Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends." *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification* 270.
- Flessa, H., R. Fuß, M. Andres, J. Augustin, O. Christen, K. Dittert, H. Hegewald, H. Heilmann, V. Huth, H. Kage, J. Kern, K. Kesenheimer, A. Knieß, S. Köbke, I. Lewandowski, J. Mallast, A. Moffat, K. Mühling, G. Öhlschläger and H. Stichnothe (2017). "Minderung von Treibhausgasemissionen im Rapsanbau unter besonderer Berücksichtigung der Stickstoffdüngung." *Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut*, 174 p.
- Goedkoop, M., R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs and R. Van Zelm (2009). "ReCiPe 2008." *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level 1*: 1-126.
- Grunert, M. (2018). "Aktuelle Hinweise zur Frühjahrsdüngung 2018, Pflanzenbautagung, Groitzsch, 23.02.2018." *LfULG*.
- Huijbregts, M., Z. Steinmann, P. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, A. Hollander, M. Zijp and R. Van Zelm (2016). "ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization."

- IPCC (2006). Guidelines for integration greenhouse gas inventories. IPCC. Available at: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_1_Overview.pdf; 2006
- IPCC (2013). "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp."
- IPCC Refinement (2019). "Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories."
- ISO 14040/44 (2006). Life Cycle Assessment - Principles and Framework. Environmental Management.
- Klimanek, E.-M. (1987). Ernte-und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Fruchtarten: wissenschaftl. Einzelveröff, Akad. d. Landwirtschaftswiss. d. DDR, Forschungszentrum für
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. Symposia of the society for experimental biology, Cambridge University Press (CUP) Cambridge.
- Müller, J. and G. Müller (1988a). "Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete: 1. Beschreibung des zur Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration von Kulturpflanzen erarbeiteten Modells." Z. Meteorol. 38: 332–336.
- Müller, J. and G. Müller (1988b). "Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete: 2. Überprüfung des Modells von J. u. G. Müller am Beispiel Kartoffel auf lehmigem Sand." Z. Meteorol. 38: 361–365.
- Müller, J. and G. Müller (1989). "Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete: 3. Ermittlung gebietsbezogener Verdunstungswerte durch Anwendung des Modells von J. Müller und G. Müller." Z. Meteorol. 39: 142-149.
- NLWKN (2012). "Untersuchung des mineralischen Stickstoffs im Boden " Band 8 Grundwasser(Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz).
- Pacholski, A., J. Doehler, U. Schmidhalter and T. Kreuter (2018). "Scenario modeling of ammonia emissions from surface applied urea under temperate conditions: application effects and model comparison." Nutrient cycling in agroecosystems 110(1): 177-193.
- Reetz, H., F. Jr. (2016). "Fertilizer and their Efficient Use, IFA International Fertilizer Industry Association."
- Rösemann, C., H.-D. Haenel, U. Dämmgen, U. Döring, S. Wulf, B. Eurich-Menden, A. Freibauer, H. Döhler, C. Schreiner and B. Osterburg (2019). Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990-2017: Report on methods and data (RMD) Submission 2019, Thünen Report.
- Ruser, R., R. Fuß, M. Andres, H. Hegewald, K. Kesenheimer, S. Köbke, T. Rübiger, T. S. Quinones, J. Augustin, O. Christen, K. Dittert, H. Kage, I. Lewandowski, A. Prochnow, H. Stichnothe and H. Flessa (2017). "Nitrous oxide emissions from winter oilseed rape cultivation." Agriculture, Ecosystems & Environment 249: 57-69.
- Stehfest, E. and L. Bouwman (2006). "N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions." Nutrient cycling in agroecosystems 74(3): 207-228.
- Ti, C., L. Xia, S. X. Chang and X. Yan (2019). "Potential for mitigating global agricultural ammonia emission: a meta-analysis." Environmental Pollution 245: 141-148.
- VDLUFA (2004). VDLUFA-Standpunkt: Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. E. V. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Speyer.

1.6. LLG – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.6.1. Arbeiten im Fruchtfolge-Versuch Bernburg; LLG/MLU (AP-1)

Witterung

Alle 3 Versuchsjahre (2017 bis 2019) wiesen im Vergleich zum langjährigen Mittel (LJM; 1981-2010) geringere Niederschläge auf (Abb. LLG-1). Insbesondere die Hauptvegetationszeiten (April bis September) der Jahre 2018 und 2019 waren durch sehr niedrige Niederschlagsmengen geprägt. Die Temperaturen waren im Jahresmittel um 0,7 °C (2017), 1,6 °C (2018) und 1,7 °C (2019) höher als das LJM (Abb. LLG-2). Die klimatische Wasserbilanz (KWB) war in den Monaten Mai bis Juli 2018 und Juni bis Juli 2019 mit einem Wasserdefizit von bis zu 118 mm (Juli 2018) stark negativ (Abb. LLG-1).

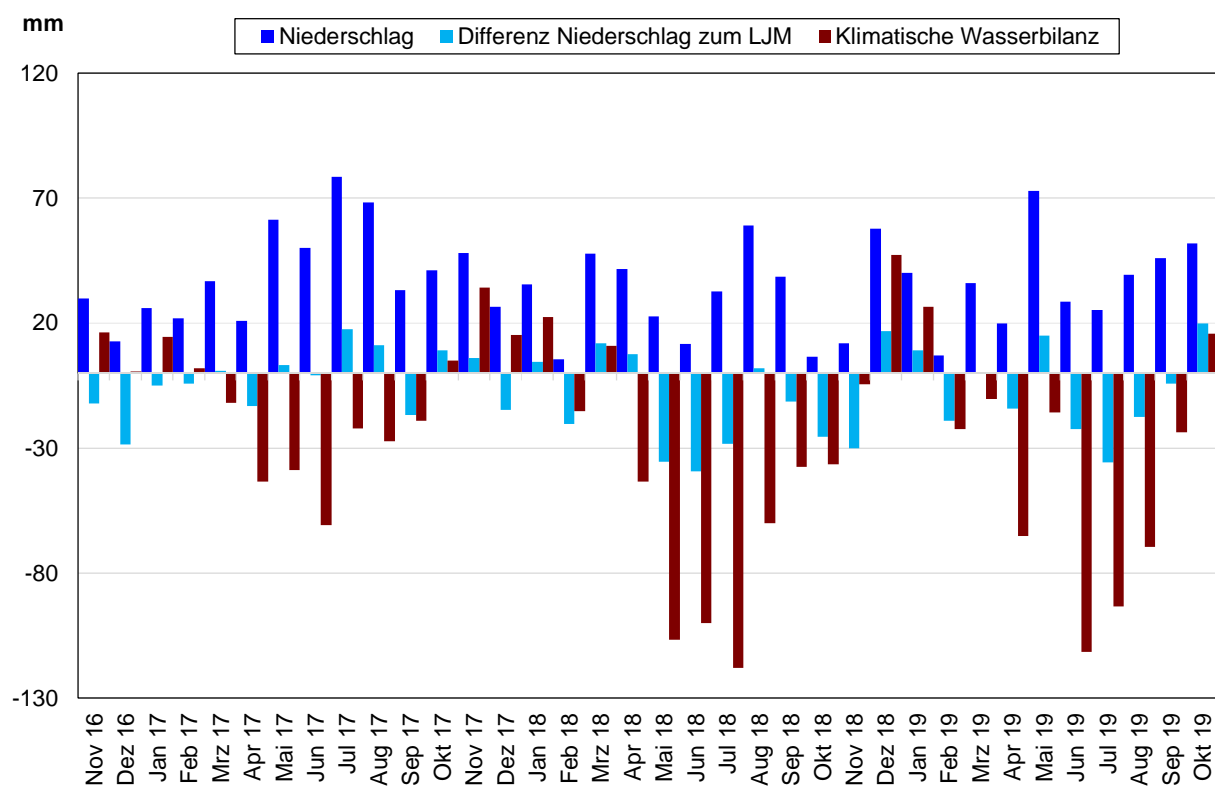


Abb. LLG-1: Niederschlag im Versuchszeitraum und Abweichung zum Langjährigen Mittel (LJM; 1981-2010) sowie Klimatische Wasserbilanz am Standort Bernburg (Daten des DWD)

Die im Versuchszeitraum wöchentlich gravimetrisch gemessenen Bodenwassergehalte zeigten eine Schwankungsbreite von 9 bis 24 M%. In den Wintermonaten waren hohe Bodenwassergehalte mit zum Teil wassergesättigten Verhältnissen (100 % nFK) zu beobachten (Abb. LLG-3). Demgegenüber waren insbesondere die Monate Juni und Juli 2018 und 2019 durch ein deutliches Wasserdefizit (unterhalb der Dürregrenze) mit teilweise nur 10 % nFK geprägt. Diese extreme Trockenheit war auch die Ursache für die ermittelten geringen Erträge (siehe 1.3.1, MLU).

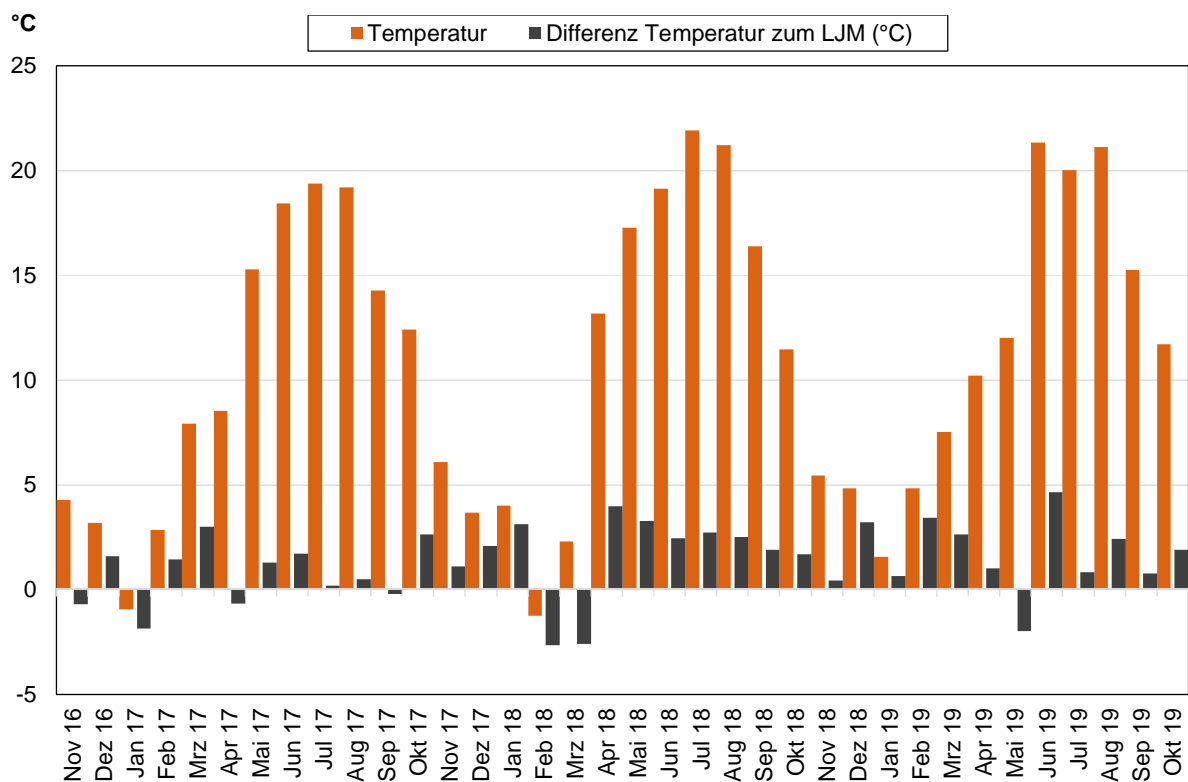


Abb. LLG-2: Temperatur im Versuchszeitraum und Abweichung zum Langjährigen Mittel (LJM; 1981-2010) am Standort Bernburg (Daten des DWD)

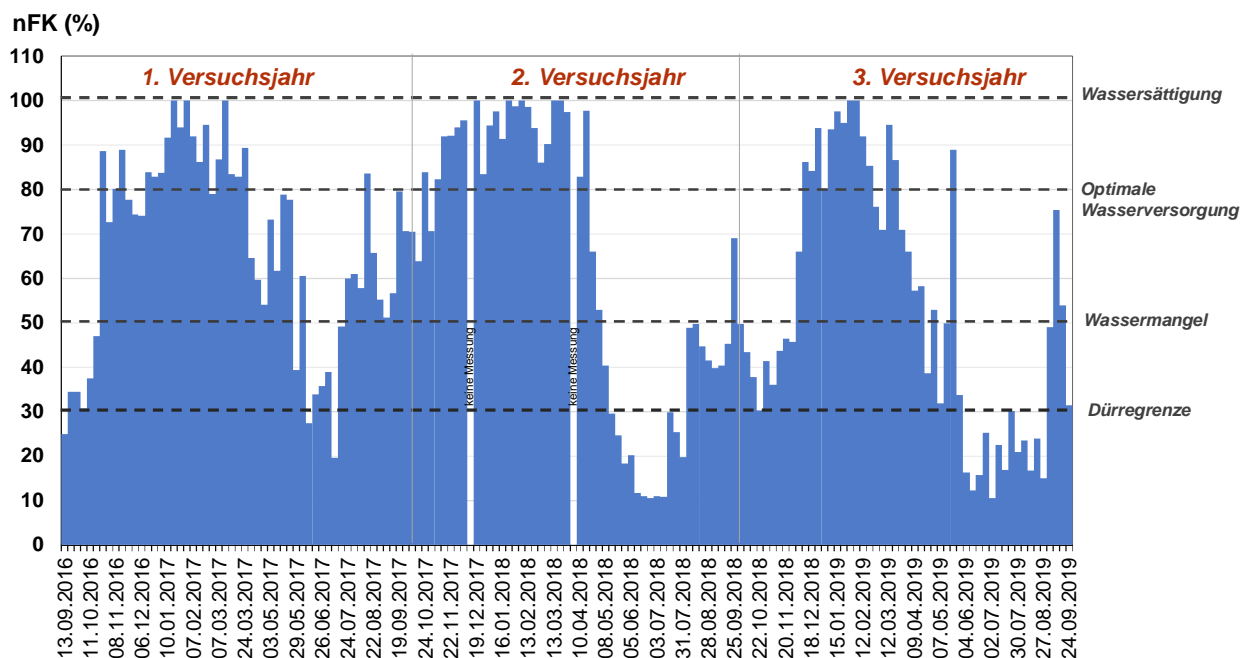


Abb. LLG-3: Nutzbare Feldkapazität (nFK) im Versuchszeitraum (Berechnung anhand wöchentlich gravimetrisch in 0-30 cm Tiefe ermittelter Bodenwassergehalte)

Versuchsdurchführung

Die Versuchsarbeiten liefen in allen 3 Versuchsjahren planmäßig und ohne größere Probleme, mit Ausnahme des ersten Versuchsjahres. Hier war aufgrund der Trockenheit im Spätsommer/Herbst die Aussaat des Winterrapses auf dem Großparzellenversuch erst sehr spät möglich, so dass sich die Bestände bis zum Winter nicht optimal entwickelten. Das zeigte sich auch in den geringen Rapsenerträgen in 2017 (siehe 1.3.1, MLU). Alle agrotechnischen Maßnahmen (Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, Pflanzenschutz, etc.) wurden termingerecht durch die LLG durchgeführt (siehe Zwischenberichte). Die angebauten Kulturen auf den 3 Versuchsteilflächen sowie N-Düngegaben sind aus Tab. LLG-1 und die Versuchsanlage aus Abb. LLG-4 ersichtlich.

Tab. LLG-1: N-Düngung im Fruchtfolge-Versuch am Standort Bernburg

Versuchsjahr	Versuch	Kultur	Variante	N-Düngung [kg N/ha] (Termin)		
2017	GPV	W-Raps	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	130 (27.03.17)	-	-
			stabilisiert	130 (03.03.17)	-	-
			platziert	130 (27.03.17)	-	-
	PV I	W-Gerste	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	80 (28.03.17)	80 (28.03.17)	-
			stabilisiert	160 (28.03.17)	-	-
			platziert	80 (28.03.17)	80 (28.03.17)	-
	PV II	W-Weizen	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	70 (28.03.17)	70 (20.04.17)	60 (23.05.17)
			stabilisiert	100 (28.03.17)	100 (16.05.17)	-
			platziert	70 (28.03.17)	70 (20.04.17)	60 (23.05.17)
2018	GPV	W-Weizen	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	70 (09.04.18)	70 (20.04.18)	60 (22.05.18)
			stabilisiert	100 (09.04.18)	-	100 (09.05.18)
			platziert	70 (09.04.18)	70 (20.04.18)	60 (22.05.18)
	PV I	W-Raps	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	100 (20.04.18)	100 (09.05.18)	-
			stabilisiert	180 (09.04.18)	-	-
			platziert	100 (20.04.18)	100 (09.05.18)	-
	PV II	W-Gerste	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	80 (09.04.18)	80 (20.04.18)	-
			stabilisiert	160 (09.04.18)	-	-
			platziert	80 (09.04.18)	80 (20.04.18)	-
2019	GPV	W-Gerste	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	80 (22.03.19)	80 (23.04.19)	-
			stabilisiert	160 (22.03.19)	-	-
			platziert	80 (22.03.19)	80 (23.04.19)	-
	PV I	W-Weizen	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	70 (22.03.19)	70 (23.04.19)	60 (08.05.19)
			stabilisiert	100 (22.03.19)	100 (30.04.19)	-
			platziert	70 (22.03.19)	70 (23.04.19)	60 (08.05.19)
	PV II	W-Raps	Kontrolle	-	-	-
			gestreut	-	100 (26.03.19)	80 (25.04.19)
			stabilisiert	180 (26.02.19)	-	-
			platziert	-	100 (26.03.19)	80 (25.04.19)

GPV: Großparzellenversuch (Gasmessungen), PV: Parzellenversuch (ohne Gasmessungen), W: Winter



Abb. LLG-4: Versuchsanlage im April 2018 mit Großparzellenversuch und Gassammelhauben (Bild oben) und im April 2019 mit allen 3 Teilflächen (Bild unten)

Bewertung des eingesetzten Side-Dressing-Verfahrens

Side-Dressing ist ein spezielles Düngeverfahren zur Zwischenreihendüngung und wurzelnahen Stickstoffplatzierung in einen wachsenden Pflanzenbestand (Abb. LLG-5).



Abb. LLG-5: Side-Dressing-Technik im Einsatz

Im Rahmen des StaPlaRes-Projektes hat die LLG zusammen mit der Rauch Landmaschinenfabrik GmbH das Verfahren zur platzierten Harnstoffdüngung entwickelt. Beim Side-Dressing wird im Frühjahr granulierter Harnstoffdünger (46 % N) 5 bis 7 cm tief in den Reihenzwischenraum eingeschlitzt. Der genutzte RAUCH-Düngerstreuer verwendet eine Schlitztechnik mit Doppelscheibenscharen und Andruckrollen. Selbst unter schwierigen Bodenverhältnissen war es problemlos möglich, den granulierten Harnstoff in 5-7 cm Bodentiefe einzuschlitzen, mit Erde zu bedecken und im Boden anzudrücken. Das Side-Dressing-Verfahren unterscheidet sich hinsichtlich räumlicher Ablage und Düngerkonzentration in einem Linien-Depot vom klassischen CULTAN-Verfahren, bei dem flüssige harnstoff- und ammoniumhaltige Dünger in Punkt-Depots platziert werden.

1.6.2. NH_3 -Messungen am Standort Bernburg; LLG/MLU (AP-2)

Die Ermittlung der NH_3 -Emissionen erfolgte unmittelbar nach der Harnstoffdüngung in den Kulturarten Winterraps (2017), Winterweizen (2018) und Wintergerste (2019) (Abb. LLG-6).



Abb. LLG-6: NH_3 -Messungen mit kombinierter Dräger-Tube-Messung (Bild oben und unten rechts) und Säurefallen als Passivsammler (Bild unten links)

Die Messperioden umfassten in 2017 insgesamt 33 Tage (1 Düngetermin), in 2018 63 Tage (2 Düngetermine) und in 2019 42 Tage (2 Düngetermine). Die NH_3 -Emissionen am Standort Bernburg waren insgesamt auf einem niedrigen Niveau (Tab. LLG-2).

Tab. LLG-2: NH_3 -Emissionen im Fruchtfolge-Versuch am Standort Bernburg

Versuchsjahr	Kultur	Variante	NH_3 -Emission (kg N/ha)
2017	W-Raps	gestreut	0,00
		stabilisiert	0,00
		platziert	0,00
2018	W-Weizen	gestreut	6,37
		stabilisiert	0,72
		platziert	2,38
2019	W-Gerste	gestreut	3,14
		stabilisiert	2,89
		platziert	2,74

W: Winter

Die höchsten Emissionen (6,4 kg NH_3 -N/ha) wurden im zweiten Versuchsjahr im Winterweizen bei der gestreuten Harnstoffvariante erfasst. Eine detaillierte Auswertung zum zeitlichen Verlauf der NH_3 -Emissionen und den Variantenunterschieden wurde in Kap. 1.3.2 (MLU) vorgenommen.

1.6.3. N_2O -Messungen am Standort Bernburg; LLG/MLU (AP-3)

Die N_2O -Messungen erfolgten im Großparzellenversuch in wöchentlichen Abständen und in den Zeiträumen nach der Düngung zweimal wöchentlich im Versuchszeitraum vom 13.09.2016 bis 24.09.2019 (insgesamt 186 Messungen) mit Hilfe von Gassammelhauben (Abb. LLG-7).



Abb. LLG-7: N_2O -Messungen mit Hilfe geschlossener Gassammelhauben im Winterraps- (links) und Winterweizenbestand (rechts)

Die kumulativen N_2O -Emissionen waren im gesamten Versuchszeitraum auf einem sehr geringen Niveau (Tab. LLG-3). Eine detaillierte Auswertung der Einzeljahre und der Unterschiede zwischen den geprüften Versuchsvarianten ist aus Kap. 1.3.3 (MLU) ersichtlich.

Tab. LLG-3: Kumulative N_2O -Emissionen im Fruchtfolge-Versuch am Standort Bernburg

Versuchsjahre	Kulturen	Variante	N_2O -Emission (kg N/ha) Aussaat bis Aussaat
2017 - 2019	W-Raps-	Kontrolle	0,29
	W-Weizen-	gestreut	0,90
	W-Gerste	stabilisiert	0,59
		platziert	1,48

W: Winter

Zur Interpretation der N_2O -Flüsse wurden parallel zur N_2O -Probenahme die Bodenwassergehalte (0-30 cm Tiefe), die Bodentemperaturen (1 cm, 5 cm und 10 cm Tiefe) sowie die N_{min} -Gehalte des Bodens (0-30 cm Tiefe) bestimmt.

Das auf Grundlage der gemessenen Bodenwassergehalte berechnete wassergefüllte Porenvolumen (WFPS) ist ein wichtiger Indikator dafür, ob die Voraussetzungen für eine signifikante N_2O -Bildung gegeben sind. Nach Davidson (1991) wird als Voraussetzung für die N_2O -Bildung im Boden ein Bereich von 50 bis 70 % WFPS angegeben. Im Versuchszeitraum zeigte das WFPS eine Schwankungsbreite von 26 bis 70% (Abb. LLG-8). Eine hohe Wassersättigung und damit optimale Voraussetzungen für die N_2O -Bildung war größtenteils nur in den Wintermonaten gegeben.

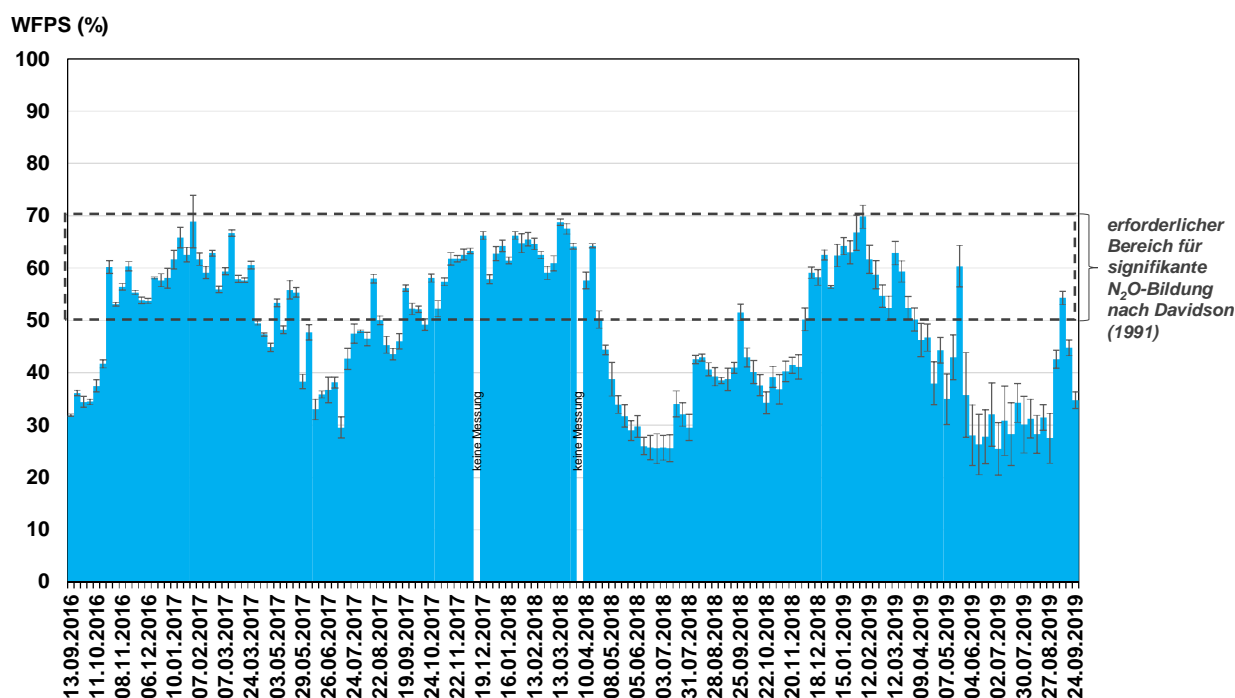
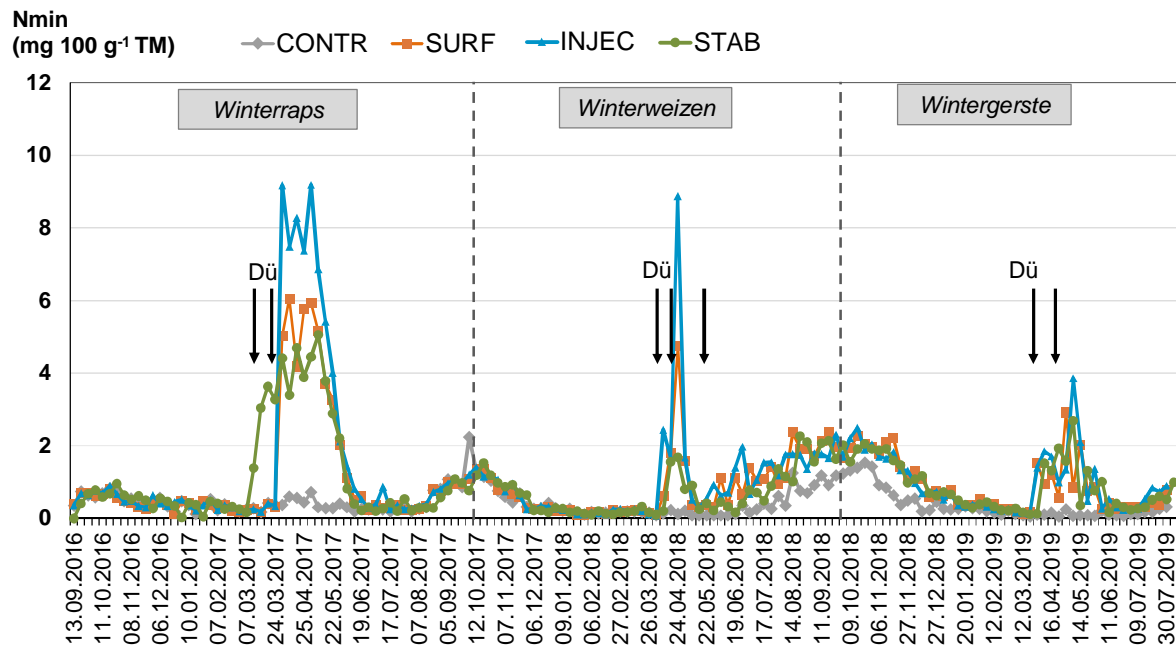


Abb. LLG-8: Wassergefülltes Porenvolumen (WFPS) im Versuchszeitraum

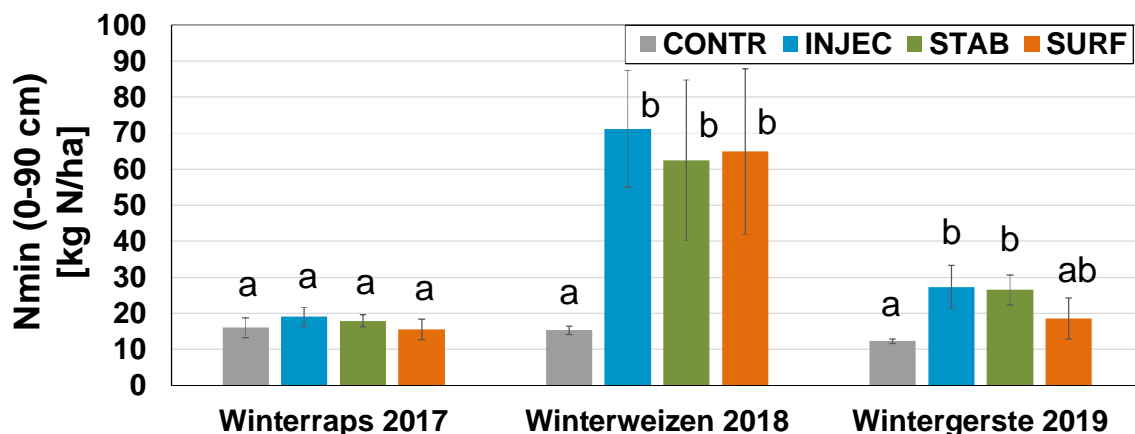
Die N_{min} -Gehalte im Oberboden zeigten das höchste Niveau nach der Düngung im ersten Versuchsjahr (Abb. LLG-9). Die höchsten Gehalte von max. 9,2 mg/100 g wurden bei der platzierten Variante erfasst. Die Nachernte- N_{min} -Gehalte (0-90 cm Tiefe) waren im zweiten Versuchsjahr mit 63 bis maximal 71 kg N/ha bei den gedüngten Varianten auf einem vergleichsweise hohen Niveau (Abb. LLG-10).

Die Ursache hierfür sind die trockenheitsbedingten geringen Erträge und N-Entzüge in 2018, die zu erheblichen N-Überschüssen geführt haben (Tab. LLG-4). Signifikante Unterschiede der Nachernte-Nmin-Gehalte zwischen den Düngewarianten waren in allen 3 Versuchsvarianten nicht nachweisbar.



CONTR: Kontrolle, SURF: gestreut, INJEC: platziert, STAB: stabilisiert, Dü: Düngung

Abb. LLG-9: Nmin-Gehalte im Oberboden (0-30 cm) auf dem Großparzellenversuch in allen 3 Versuchsjahren



CONTR: Kontrolle, SURF: gestreut, INJEC: platziert, STAB: stabilisiert, Dü: Düngung

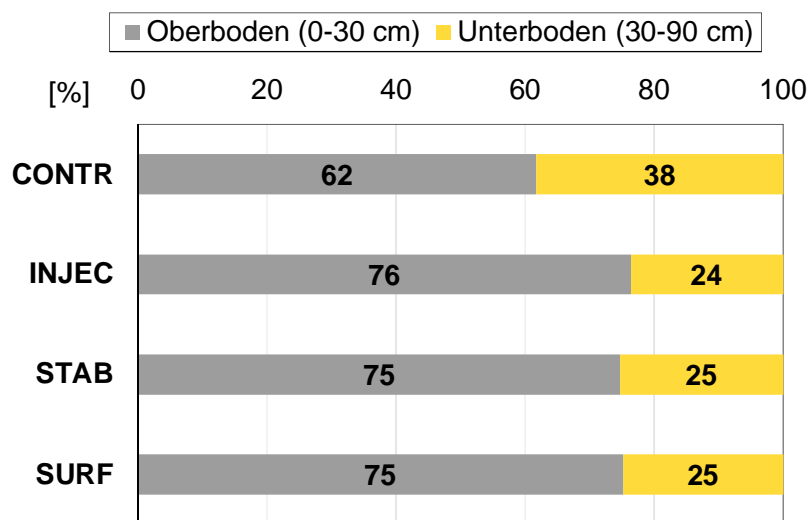
Abb. LLG-10: Nachernte-Nmin-Gehalte (0-90 cm) im Großparzellenversuch, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (ANOVA, Tukey, $p < 0.05$, $n=4$)

Tab. LLG-4: N-Zufuhr, N-Entzug und N-Salden im Großparzellenversuch

Versuchsjahr	Kultur	Variante	N-Zufuhr (kg N/ha)	N-Entzug (kg N/ha)	N-Saldo
2017	W-Raps	Kontrolle	0	20	-20
		gestreut	130	42	+88
		stabilisiert	130	61	+69
		platziert	130	40	+90
2018	W-Weizen	Kontrolle	0	28	-28
		gestreut	200	95	+105
		stabilisiert	200	89	+111
		platziert	200	87	+113
2019	W-Gerste	Kontrolle	0	37	-37
		gestreut	160	127	+33
		stabilisiert	160	115	+45
		platziert	160	118	+42

W: Winter

Aufgrund der Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum mit niedrigen Niederschlägen und teilweise hohen Verdunstungsraten (negative Wasserbilanz, siehe 1.6.1) war nur eine geringe Verlagerung des Nmin in den Unterboden zu beobachten (Abb. LLG-11). Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den getesteten Düngewarianten nachgewiesen.



CONTR: Kontrolle, INJEC: platziert, SURF: gestreut, STAB: stabilisiert

Abb. LLG-11: Nmin-Tiefenverlagerung im Boden

Mit dem Ziel, die Haupteinflussfaktoren auf die N₂O-Emissionen zu ermitteln, wurde eine multiple Regressionsanalyse berechnet. Im Ergebnis zeigte sich, dass die N₂O-Flüsse signifikant durch die Prädiktoren wassergefülltes Porenvolumen (WFPS), Nitrat- bzw. Nmin-Gehalte (0-30 cm Tiefe) sowie Bodentemperaturen in 1 cm Tiefe bestimmt werden (Tab. LLG-5).

Tab. LLG-5: Ergebnisse multiple Regressionsanalyse mit Prädiktoren wassergefülltes Porenvolumen (WFPS), Bodentemperatur in 1 cm Tiefe, Nitrat- bzw. Nmin-Gehalte (0-30 cm), * < p 0.05, ** < p 0.01

Abhängige Variable	Model	R ²	p	Prädiktoren
N ₂ O -CONTR	2.017 * Nmin + 0.183 * WFPS + 0.17 * T1cm	0.12	0.004*	1.WFPS 2. T1cm 3. Nmin
N ₂ O -SURF	1.903 * NO ₃ ⁻ + 0.186 * WFPS + 0.386 * T1cm	0.30	0.000**	1. T1cm 2. WFPS 3. NO ₃ ⁻
N ₂ O -INJEC	2.493 * NO ₃ ⁻ + 0.205 * WFPS + 0.292 * T1cm	0.48	0.000**	1. NO ₃ ⁻ 2. WFPS 3. T1cm
N ₂ O -STAB	0.2328 * WFPS + 0.3541 * T1cm + 0.7611 * Nmin	0.16	0.000**	1. WFPS 2. T1cm 3. Nmin

CONTR: Kontrolle, SURF: gestreut, INJEC: platziert, STAB: stabilisiert

Begleitend zum Projekt wurden weiterführende ergänzende Untersuchungen zum besseren Verständnis der ablaufenden N-Umsetzungsprozesse durchgeführt. Diese beinhalteten folgende Schwerpunkte:

- Untersuchungen zur Humusqualität (Dichtefraktionierung, Biomarkeranalyse) (Masterarbeit A. Kroner, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Prof. B. Glaser)
- Bestimmung des N-Nachlieferungspotentials, Inkubationsversuch zur Ermittlung der Mineralisations- und Nitratabbauraten, laboranalytische Ermittlung der heißwasserlöslichen N- und C-Fractionen
- Prozessidentifikation (Nitrifikation, Denitrifikation), Herkunftsnachweis N (Dünger, organischer N-Pool) - Ermittlung der Stabilisotopenverhältnisse von N ($\delta^{15}\text{N}$) und Sauerstoff ($\delta^{18}\text{O}$) (BGD Ecosax GmbH, TU Dresden) (Abb. LLG-12)



Abb. LLG-12: Bodensättigungsextraktversuche (BSE) im Labor der BGD Ecosax GmbH

Die Laboruntersuchungen zeigten hohe Mineralisations- und Nitratabbauraten des untersuchten Bodens. Die ermittelten täglichen Mineralisationsraten von 0,10 (5 °C) und 0,13 (10 °C) mg NO₃-N/kg TM sind als hoch einzuschätzen und würden einer Nachlieferung von etwa 67 kg N/ha in der Nacherntezeit bis zum Vegetationsende entsprechen. Die im Labor unter anaeroben Bedingungen nachgewiesenen NO₃⁻-Abbauraten von 0,21 mg NO₃-N/kg TM (10 °C) zeigen, dass der untersuchte Boden ein hohes Abbaupotential besitzt, wenn die entsprechenden Voraussetzungen (d.h. eine hohe Bodenfeuchte) gegeben sind. Die Analysen der Stabilisotopenverhältnisse im NO₃⁻ des Porenwassers (Bodenprobe) ergaben Werte von +2,9 ‰ für δ¹⁵N und + 4,5 ‰ für δ¹⁸O (Tab. LLG-6). Diese Werte liegen genau in einem Überlappungsbereich der beiden Quellen: Düngung und organischer N-Pool (Zhang et al., 2019).

Somit kann nicht eindeutig die Herkunft des nach der Ernte im Boden befindlichen NO₃⁻ bestimmt werden. Die δ¹⁵N-Werte des Gesamt-N in den Feststoffproben von Dünger und Boden unterschieden sich deutlich. Hieraus kann abgeleitet werden, dass der Dünger-N vollständig umgesetzt wurde. Die begleitenden Analysen zeigten, dass etwa 92 % des Gesamt-N im organischen Pool gebunden vorliegt. Eine in der Literatur diskutierte hohe Fixierung von Dünger-NH₄ in den Kationenaustauschern im Boden (Russow et al., 2008) kann somit anhand vorliegender Untersuchungen nicht bestätigt werden. Der Anteil des austauschbar gebundenen NH₄⁺ am Gesamt-N war mit 0,7 % sehr gering.

Tab. LLG-6: Ergebnisse der Stabilisotopenanalyse von Boden und Dünger

	Parameter	Boden	Dünger
Porenwasser (Eluat)	NH₄⁺ (mg/L)	<0,01	
	NO₃⁻ (mg/L)	33,6	
	‰δ¹⁵N (NO ₃ ⁻)	+2,9 (± 0,1)	
	‰δ¹⁸O (NO ₃ ⁻)	+4,5 (± 0,3)	
Feststoff	NH₄⁺ (g kg ⁻¹) (BaCl ₂)	0,01	
	NO₃⁻ (g kg ⁻¹)	0,11	
	Gesamt-N (g kg ⁻¹)	1,4	46,3
	‰δ¹⁵N (Gesamt-N)	+6,5	-0,4

Die Dichtefraktionierung des Bodens ergab, dass 99,8 % der organischen Bodensubstanz (OBS) in der schweren mineral-assoziierten Fraktion (MOM), 0,07 % in der mittelschweren okkludierten partikulären Fraktion (OPOM) und 0,1 % in der leichten partikulären Fraktion (FPOM) vorliegen (Kroner, 2019). Unterschiede zwischen den Fraktionsanteilen an der OBS bei langfristig mineralischer und organischer Düngung waren nicht nachweisbar. Die langfristig organische gedüngte Variante wies allerdings einen höheren N-Anteil und ein engeres C/N-Verhältnis in der FPOM-Fraktion auf, was auf bessere N-Mineralisationsbedingungen hindeutet.

1.6.4. AP 4 nicht bearbeitet (gemäß Vorhabenbeschreibung)

1.6.5. Bewertung; LLG/MLU (AP-5)

In den 3 Versuchsjahren konnte kein ertragswirksamer Vorteil der angewandten neuen Technologie des Side-Dressing-Verfahrens nachgewiesen werden. Die Auswertung zeigte bei allen Kulturen keine signifikanten Mehrerträge bei der wurzelnahen Applikation des Harnstoff-Düngers im Vergleich zu den anderen geprüften Düngevarianten (gestreut, stabilisiert). Im Hinblick auf die N-Verluste konnte einerseits eine Tendenz geringerer NH_3 -Emissionen bei der wurzelnahen Platzierung des Düngers im Vergleich zur gestreuten Variante beobachtet werden. Andererseits führte die wurzelnah Applikation des Düngers zu leicht höheren N_2O -Emissionen, vermutlich aufgrund von günstigeren Denitrifikationsbedingungen (tiefere Ablage) und höherer Nmin-Gehalte. Das Risiko der N-Verlagerung (Nachernte-Nmin, Nmin-Tiefenverlagerung) war bei allen Düngevarianten aufgrund der geringen Niederschläge als gering einzuschätzen. Dabei waren keine signifikanten Unterschiede der N-Verlagerung zwischen den Varianten feststellbar. Als Ursache dafür, dass sich die wurzelnah Applikation des Düngers nicht in Mehrerträgen und einer höheren N-Effizienz widerspiegelte, werden die extremen Witterungsbedingungen mit der ausgeprägten Trockenheit in den ertragswirksamen Monaten der 3 Versuchsjahre angesehen. Bedingt durch die extreme Trockenheit war eher noch ein negativer Effekt auf das Pflanzenwachstum durch die konzentrierte N-Düngerablage zu beobachten.

Praxistest des eingesetzten Side-Dressing-Verfahrens

In Fortsetzung des BMEL-Projektes wurden im Frühjahr 2020 an der LLG Praxistests auf Großparzellen mit dem RAUCH-StaPlaRes-Düngerstreuer durchgeführt. Dazu wurde von der Rauch Landmaschinenfabrik GmbH die Bandkopf-Dosiertechnik auf ein Standard-Dosiergerät mit pneumatischer Düngedosierung und aufgebautem 600 Liter Kunststofftank (Typ: AirGreen 6.1) umgerüstet.

Aufgrund der Corona-Situation waren zu den Praxistests keine Besucher anwesend nur die Versuchstechniker der LLG und der Uni Halle:

- | | |
|------------|--|
| 02.04.2020 | Zwischenreihendüngung (Side-Dressing) in Winterweizen und Wintergerste zu EC 29/30 mit granuliertem Harnstoffdünger. |
| 21.04.2020 | Zwischenreihendüngung (Side-Dressing) in Sommergerste zu EC 12/13 mit Phytogran-Granulat. |
| 21.04.2020 | Zwischenreihendüngung (Side-Dressing) in Sommerweizen zu EC 12/13 mit Gärrestpellets (1000 kg/ha Ausbringmenge). |

Insbesondere für den Ökolandbau mit eher kleineren Betrieben und Flächen (Leistungen) ist das Side-Dressing-Verfahren interessant und hätte Neuigkeitswert. Einen wesentlichen Erkenntniszuwachs sehen wir in der Durchführung von Praxisversuchen mit Ziel einer Optimierung der organischen Düngung im Ökolandbau durch das Side-Dressing-Verfahren:

- Side-Dressing vs. oberflächige Düngung mit Phytogran Granulat, Vinassedünger für den kontrollierten biologischen Anbau nach EU-Öko-Verordnung 834/2007.
- Side-Dressing vs. oberflächige Düngung mit Gärrestgranulat/ Gärrestpellets.

1.6.6. Verwertung; LLG/MLU (AP-6)

Im Rahmen des Wissenstransfers wurden in Zusammenarbeit mit der MLU zahlreiche Aktivitäten, wie beispielsweise Feldtage, Tagungen, Fachseminare, etc. (Abb. LLG-13, LLG-14) durchgeführt. Zudem wurden die Projektergebnisse in unterschiedlicher Form veröffentlicht (Vorträge, Flyer, Poster, Publikationen, etc.) und damit einem breiten Publikum (Landwirte, Fachleute, Behörden, Politikvertreter, Wissenschaftler, etc.) zugänglich gemacht und aktiv in die Facharbeit der LLG einbezogen.



Abb. LLG-13: Feldtage am Standort Bernburg mit Vorstellung von Düngetechnik und Gasmessungen im StaPlaRes-Projekt



Abb. LLG-14: Vorstellung der Projektergebnisse auf der Ackerbautagung in Bernburg im November 2017

Im Rahmen des Projektes wurden folgende öffentlichkeitswirksame Aktivitäten geleistet:

§ Vorträge

- Ackerbautagung in Iden/Bernburg, 22./23.11.2017: „Differenzierte quantitative Erfassung von Stickstoff(N)-Verlustquellen und Strategien zur Reduzierung der N-Verluste im Pflanzenbau.“
- DLG-Technikertagung in Hannover, 30. -31.01.2018: Vorstellung STAPLARES- Versuch und eingesetzten Versuchstechnik
- 130. VDLUFA-Kongress in Münster, 18.-21.09.2018: „Lachgasemissionen auf einem Schwarzerdestandort bei Harnstoffdüngung“
- Ackerbautagung in Bernburg/Iden, 27.11./28.11.2018: Vorstellung des STAPLARES-Projektes und bisheriger Ergebnisse
- Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft in Bern, 24.08.-29.08.2019: „Stickstoff (N)-Dynamik und N-Verlustquellen bei der Harnstoff-Düngung auf einem Norm-Tschernosem“
- 131. VDLUFA-Kongress in Giessen, 10.-13.09.2019: „Stickstoff(N)-Dynamik und Mineralisationspotential eines Norm-Tschernosems bei Harnstoff-Düngung“
- Ackerbautagung in Bernburg/Iden, 26.11.-27.11.2019: „Stickstoff(N)-Dynamik und N-Verlustquellen bei Mineral-N und organischer Düngung“, „Reduzierte Bodenbearbeitung und reduzierte N-Düngung im Side-Dressing-Verfahren“

§ Feldtage

- Bernburger Getreide- und Rapsfeldtag am 21.06.2019: Vorstellung der StaPlaRes-Versuchsfläche und Gasmessungen
- Agra, Messe in Leipzig, 04.-07.05.2017: Vorstellung des StaPlaRes-Projektes (Poster, flyer)
- DLG-Feldtage in Bernburg-Strenzfeld, 12.-14.06.2018: Präsentation im Fachforum, Demoparzellen und Maschinenpräsentation, Informationsmaterial (Poster, flyer)
- Bernburger Getreide- und Rapsfeldtag am 19.06.2019: Vorstellung der StaPlaRes-Versuchsfläche und Gasmessungen

§ Tagungen

- Ackerbautagung am 26.11.2019 in Bernburg und am 27.11.2019 in Iden: Organisation eines gemeinsamen Vortragsblocks zum STAPLARES-Projekt mit Vorträgen aller beteiligten Verbundpartner (ca. 200 Besucher)

1.6.7. Literatur / Referenzen zum Abschlussbericht der LLG

- Davidson, E.A., 1991: Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In: Rogers, J.E., Whitman, W.B. (eds.): Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Me-thane, Nitrogen Oxides and Halomethanes. Washington (DC), American Society for Microbiology.
- Kroner, A., 2019: Humusqualität eines Normtschernosems bei differenzierter Düngung (mineralisch und organisch). Masterarbeit. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Russow, R., Spott, O., Stange, C.F., 2008: Evaluation of nitrate and ammonium as sources of NO and N₂O emissions from black earth soils (Haplic Chernozem) based on ¹⁵N field experiments. Soil Biol. Biochem. 40, 380-391.
- Zhang, Y., Shi, P., Song, J., Li, Q., 2019: Application of Nitrogen and Oxygen Isotopes for Source and Fate Identification of Nitrate Pollution in Surface Water: A Review. Appl. Sci. 9, 18.

1.7. Rauch – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum (AP-1, AP 6)

Die im Verbundvorhaben StaPlaRes definierten Projektaufgaben des Verbundpartners Rauch Landmaschinenfabrik GmbH wurden planmäßig und vollumfänglich erfüllt. Nachfolgend wird ein Überblick über Meilensteine und Kernarbeiten während der Projektlaufzeit gegeben.

a) Erarbeitung eines Lösungsansatzes – 2. und 3. Quartal 2016

Das Konzept mit zentralem Anbaurahmen mit Rädern, Säeinheit (Tank, Gebläse, Dosierung, Wellrohr, Verteilerkopf und Leitungen) und Plattform sowie Säschiene mit Scheibenscharen und Striegelzinken wurde entwickelt und optimiert (Abb. Rauch-1).

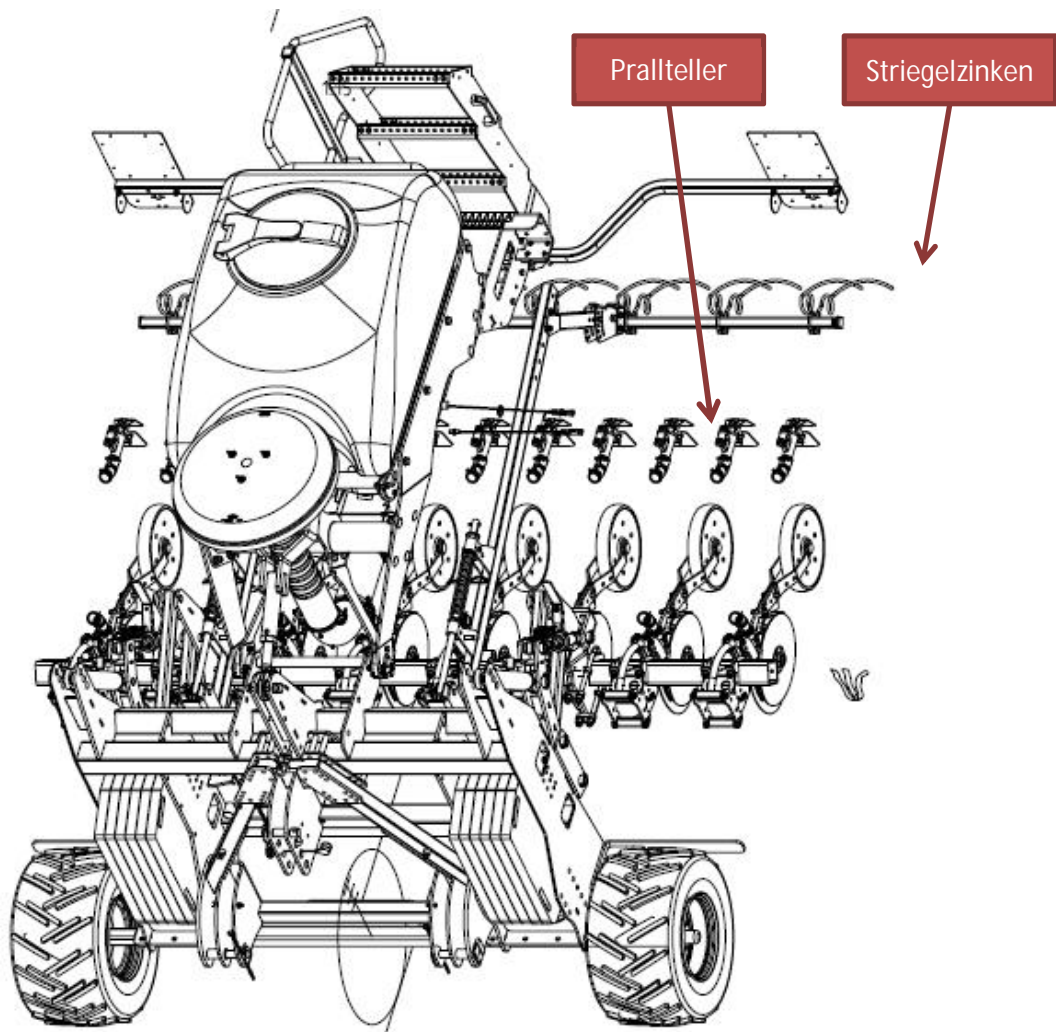


Abb. Rauch-1: Zweiter Entwurf mit integrierten Pralltellern für die Oberflächenapplikation und Striegelzinken für die Pflegemaßnahme

Das Konzept bot die Möglichkeit, verschiedene Anzahlen an Scharen und Scharabständen einzustellen. Zudem ermöglicht es die oberflächige Düngerausbringung mittels Pralltellern (Anzahl ebenfalls variabel). Im hinteren Abschnitt befinden sich die Striegelzinken für die Zuschaltung der Pflegemaßnahme. Sämtliche Funktionen sind miteinander kombinierbar.

b) 2016 - Planung und konstruktive Umsetzung in 3D-CAD – 4. Quartal 2016

Nachfolgend ist ein CAD-Bild (Abb. Rauch-2) der ausgearbeiteten und in Fertigung gegebenen Maschinenkonfiguration dargestellt.

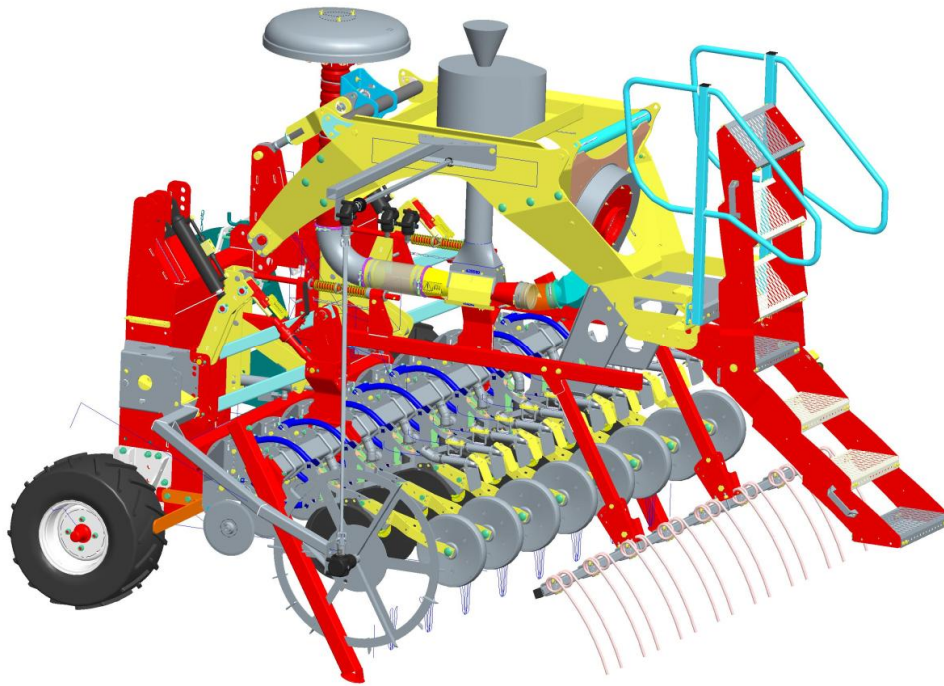


Abb. Rauch-2: CAD-Ansicht der weitestgehend finalen Maschinenkonfiguration

Nach diversen Entwicklungs- und Besprechungsschleifen mit den Feldtechnikern wies die Konstruktion nun folgende Merkmale auf:

- § Optimierte Schwerpunktlage mit kompakter Maschinlänge für ausreichend Gewicht zur Schardruckerzeugung bei minimalem Transportgewicht
- § Dreipunkt-Anbaurahmen mit optionalen Zusatzgewichten
- § Reifenabstützung für Feldfahrt inkl. variabel einstellbarer Spur (Transportbreite unter 3 m)
- § Hydraulisch aushebende Scharschiene mit erreichbarer Bodenfreiheit von 300 mm
- § Doppelscheiben-Schare mit variabel einstellbarem Abstand(!), Arbeitstiefe und Schardruck (bis 100 kg), inkl. Andruckrollen für Schlitzverschluss und exakte Tiefenführung
- § Vor den Scharen sind Sechsscheiben vorgesehen, die bei Bedarf montiert werden können und dazu dienen sollen, den erforderlichen Schardruck zu reduzieren.
- § Variabler Anzahl von Pralltellern für die oberflächige Düngerapplikation (langjährig erprobtes Konzept des Rauch AGT)
- § Striegelzinken zur Realisierung der Pflegemaßnahmen inkl. hydraulischer Aushebung
- § Variable Kombinier- und Umschaltbarkeit zwischen den Tiefen- und Oberflächendüngung sowie Striegel-Pflegemaßnahme
- § Luftführung inkl. hydraulisch angetriebenem Gebläse (Drehzahl variabel)
- § Treppe und Plattform inkl. Sitz für Bedienung der Maschine während Feldfahrt
- § Bandkopfdosierung (*siehe weitere Informationen in nächstem Abschnitt*) mit manueller Betätigung und manueller Niveau-Justierung
- § Mechanischer Bodenradantrieb für die Dosierung mit fester Übersetzung für Parzellenlänge 9 m

c) Montage, Probelauf, Qualitätsprüfung – 1. Quartal 2017

Der Zusammenbau der ersten von zwei Maschinen erfolgte im Januar 2017. Es wurden die verschiedenen Einstellparameter und Funktionen getestet, wie z.B. das Erreichen des gewünschten Ziel-Schardruckes, den Streuwinkel der Prallbleche für die oberflächige Düngerapplikation, die sichere Sitzposition auf der Maschine und die Bedienbarkeit der Bandkopfdosierung.

Am 15. Februar 2017 wurde die erste Testmaschine im Rahmen der DLG-Tagung „Landtechnik für Profis“ bei der Fa. Rauch dem Projektträger (vertreten durch Herrn Küpper) sowie den Projektpartnern auf dem Feld vorgeführt (Abb. Rauch-3). Hierdurch konnten bereits viele Funktionen erläutert aber auch bestimmte Änderungswünsche aufgenommen werden, bevor die Maschinen auf den eigentlichen Testfeldern zum Einsatz kamen.



Abb. Rauch-3: Vorführung der ersten Testmaschine am 15. Februar 2017 in Sinzheim

d) Feldeinsatz, Einweisung der Versuchstechniker, Technische Begleitung

Im Frühjahr 2017 wurden die beiden Testmaschinen an den jeweiligen Versuchsstandorten in Betrieb genommen und die erforderlichen Konfigurationen (Schardruck, Ablagetiefe, etc.) entsprechend im Detail eingestellt (Abb. Rauch-4). Aufgrund der Bodenverhältnisse an den Versuchsstandorten, wurde neben großen Zusatzgewichten am Maschinenrahmen sofort gefederte Sechsscheiben vorgesehen, welche den Scharscheiben vorweglaufen. Hierdurch konnte erreicht werden, dass der von den Federarmen erzeugte Schardruck und das Eigengewicht der Schare zum Erreichen der Ablagetiefe ausreichten.

Die Qualität der Düngerapplikation wurde während der Inbetriebnahme und den ersten Einsätzen ständig untersucht und Maßnahmen definiert, welche im Laufe des Jahres 2017 mittels weiterer Bauteile und Anpassungen umgesetzt wurden.

In diesem Kontext wurden weitere konstruktive Lösungen umgesetzt oder optimiert, darunter Abstreifer an den Scharscheiben, Adapterbleche zur Einstellung der Höhen-Position der Sech-Scheiben zum Schar und die Bandkopfdosierung

Maschine Nr. 1 – Roggenstein:



Maschine Nr. 2 – Bernburg & Cunnersdorf:



Abb. Rauch-4: Impressionen der Inbetriebnahmen an den Versuchsstandorten

e) Vermittlung der Projekterfahrungen in die Landwirtschaftliche Praxis – 2017 – 2018

Von Beginn an wurde das Konzept der Platzierung sowie alle praxisrelevanten Entwicklungen und Optimierungen auf Praktiker-Foren und in der Fachpresse kommuniziert.

Zur Verwertung der Ergebnisse im Sinne der Pflege, Vergrößerung oder auch erst Schaffung eines Marktes für innovative Injektions- und Platzierungstechnologien wurden Beiträgen in folgenden Fachzeitschriften platziert:

Badische Bauern Zeitung (DE); Est Agricole (FR); La France agricole (FR); Top Agrar Südplus (DE); Top Agrar (AUT). Öffentlichkeitswirksame Auftritte erfolgten u.a. mit dem Video „Depotdüngung“ auf Youtube, auf der Fachtagung Tiefendüngung bei Fa. Rauch (2018), auf dem Fachforum der Agritechnika 2017 und bei den BLE-Innovationstage in Bonn (2018)

f) Anpassung der Platzierungstechnik an Versuche mit Gärrest-Pellets: 1. und 2. Quartal 2020

Im Jahr 2020 wurden wie geplant auf Großparzellen pelletierte Gärreste ausgebracht. Um dies zu ermöglichen, wurde die Bandkopf-Dosiertechnik Maschine der Platzierungsmaschine in Sinzheim auf ein Standard-Dosiergerät mit 600 Liter Kunststofftank umgerüstet (siehe Abb. Rauch-5).

Die Pellets sind deutlich größer als z.B. Ackerbohnen, welche die maximale Größe an üblicherweise pneumatisch ausgebrachtem Saatgut darstellen. Eine Analyse der stabförmigen Pellets hat eine Stärke von 6,1 bis 8,2 mm bei einer Länge von bis zu 70 mm ergeben (siehe Abb. Rauch-6).



Abb. Rauch-5: Maschine mit Kunststofftank



Abb. Rauch-6: Gärrest-Muster

Für die Düngefunktion hat die Gestalt der Pellets keinen Einfluss. Die Zerkleinerung der Pellets mittels des Dosiergeräts (als Voraussetzung für eine pneumatische Förderung) erbrachte im Rahmen von Ausbringversuchen mit einer Nockenraddosierwalze (Abb. Rauch-7) keine ausreichende Zerkleinerung (Abb. Rauch-8). Daher kam es sowohl während des Transports im Schlauch (Abb. Rauch-9) als auch im Übergang am Verteilerkopf (Abb. Rauch-10) zu Verstopfungen.



Abb. Rauch-7: *Dosiereinheit während des Betriebs*



Abb. Rauch-8: *Pellets nach Dosierung mit maximaler Dosiergerätdrehzahl von 80 rpm*



Abb. Rauch-9: *Verstopfte Schläuche*



Abb. Rauch-10: *Verstopfter Verteilerkopf*

Nach Änderungsmaßnahmen an der Fördertechnik, wie z.B. die Verwendung von Schläuchen mit größeren Durchmessern, wurden ab Februar 2020 weitere Versuche durchgeführt, in deren Ergebnis es gelang, die Maschine für den Feldeinsatz zur Düngesaison 2020 fit zu machen.

In Ergänzung und Fortsetzung des Verbundprojektes StaPlaRes wurden im Frühjahr 2020 an der LLG umfangreiche Praxistests auf Großparzellen mit dem im Projekt verwendeten RAUCH-Düngerstreuer durchgeführt.

Die Praxiseinsätze wurden von Versuchstechnikern der Verbundpartner LLG und MLU beobachtet und begleitet. Die ursprünglich geplante Einbindung der Tests in Praxisseminare bzw. Feldtage für Praktiker und Stakeholder des Agrarsektors mussten aufgrund der Einschränkungen im Zuge der Corona-Pandemie entfallen. Detailliertere Angaben dazu finden sich im vorangegangenen Kap. 1.6 (LLG).

1.8. LfULG – Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.8.1. Lysimeterversuche in Nossen; LfULG (AP-1 / AP-4)

In der Lysimeteranlage in Nossen (Jahresmitteltemperatur 9,9°C, Jahresniederschlag 609 mm; Foto in Abb. LfULG-1) wurden auf Lysimetern (1m tief, 1m²) die StaPlaRes-Varianten Harnstoff (HS) gestreut (ohne UI+NI) und HS-Stabilisiert (HS+UI+NI) auf 3 verschiedenen Böden und in 3 Bodenbearbeitungsvarianten verglichen.



Abb. LfULG-1: Lysimeter-Versuche in Nossen: Ansicht im Juli 2017

(A) Methodik

Der Aufbau dieses mehrfaktoriellen randomisierten Kleinstparzellen-Versuchs (n = 3 bzw. 4) ist dem Anlageschema in Abb. LfULG-2 zu entnehmen. Bestimmt wurden die Parameter Kornertrag, N-Aufnahme, N-Bilanz sowie die Nitratverlagerung in > 1 m Bodentiefe (gemessen als N-Austrag aus den 1-m-Bodensäulen des Lysimeters).

Die N-Düngung zu Winterweizen (Ernte 2017) und Wintergerste (Ernte 2018) erfolgte entsprechend des folgenden Versuchsplans:

	Applikation am	Harnstoff	Harnstoff stabilisiert (HS + UI + NI)
Winterweizen 2017	20.03.2017 (Veg.-Beginn)	50 kg/ha	75 kg/ha
	24.05.2017 (BBCH 39)	50 kg/ha	75 kg/ha
	02.06.2017 (BBCH 55)	50 kg/ha	---
N-Input insgesamt zu Winterweizen		150 kg/ha	150 kg/ha
Wintergerste 2018	16.03.2018 (Veg.Beginn)	60 kg/ha	110 kg/ha
	02.05.2018 (BBCH 39)	50 kg/ha	---
N-Input insgesamt zu Wintergerste		110 kg/ha	110 kg/ha

- einheitliche P/K-Düngung und PSM-Einsatz; Ernte: 31.7. und 1.8.2017 sowie am 02.07.2018



Sandboden (D2 SI 26)

Lössboden (Lö4b L 64)

Verwitterungsboden (V7 sL 36)

Abb. LfULG-2: Lysimeter-Versuche in Nossen: Anlageschema

(B) Witterung

Die Witterungsbedingungen des Jahres 2017 werden im Vergleich zu den langjährigen Daten in den Abb. LfULG-3 dargestellt. Auffällig waren insbesondere der trockene Winter, ein feuchter und sehr warmer März sowie die extreme Trockenheit im Mai.

Die Witterungsbedingungen des Jahres 2018 werden im Vergleich zu den langjährigen Daten in den Abbildungen LfULG-4 dargestellt. 2018 war durch extrem hohe Temperaturen und Trockenheit mit einem Starkniederschlagsereignis am 01.06. (60 mm) gekennzeichnet.

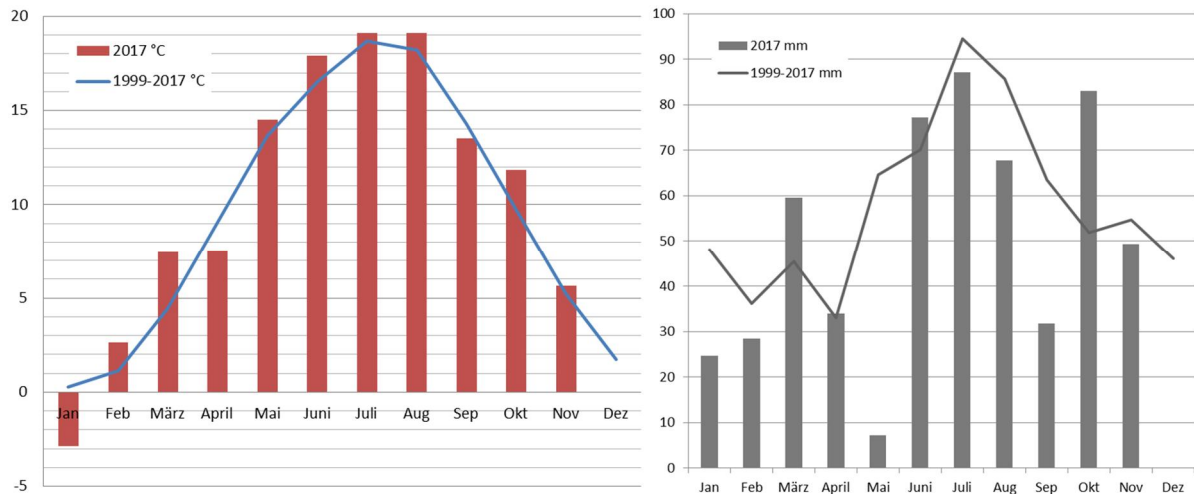


Abb. LfULG-3: Monatliche mittlere Temperatur (links) und Niederschlagssumme (rechts) am Standort Nossen im Jahr 2017 jeweils im Vergleich zum langjährigen Mittel

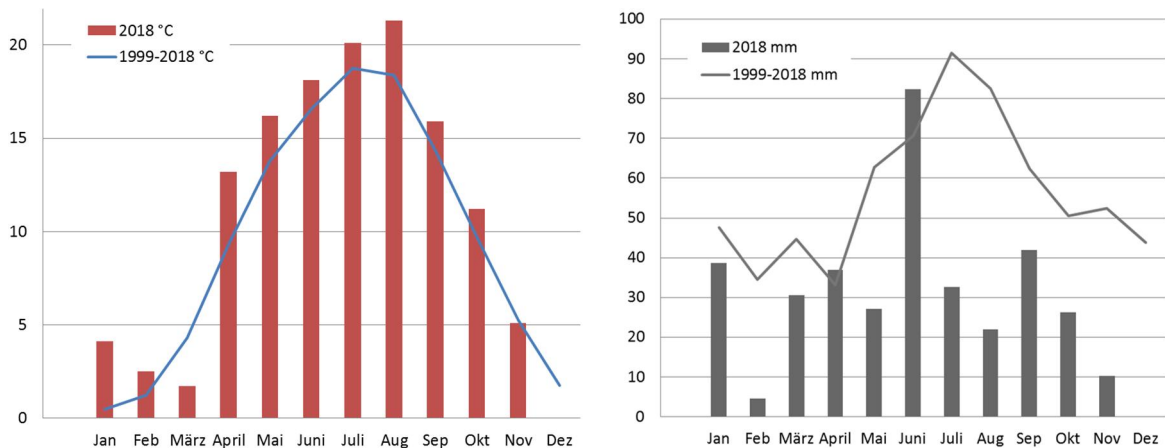


Abb. LfULG-4: Monatliche mittlere Temperatur (links) und Niederschlagssumme (rechts) am Standort Nossen im Jahr 2018 jeweils im Vergleich zum langjährigen Mittel

(C) Ergebnisse

Sickerwasser

Sickerwasser wurde je Lysimeterbehälter am 5.5., 8.8. und 28.11.2017 sowie am 28.03., 31.07. und 13.11.2018 entnommen. Auf dem D-Boden waren die höchsten Sickerwassermengen zu verzeichnen. Die Sickerwassermengen nahmen mit zunehmender Bodenbearbeitungsintensität ab. Im Jahr 2018 waren diese Unterschiede auf Grund der insgesamt geringen Sickerwassermengen weniger ausgeprägt. Zwischen den Düngungsvarianten (Harnstoff bzw. doppelt stabilisierter Harnstoff) sind keine Unterschiede nachweisbar. Die Ergebnisse (nicht dargestellt) entsprechen den fachlichen Erwartungen.

N-Verlagerung in > 1 m Tiefe

Die mit dem Sickerwasser in die Auffangbehälter ausgetragenen Stickstoffmengen 2017 und 2018 sind Abb. LfULG-5 zu entnehmen. Die N-Austragsmengen liegen auf dem D-Boden deutlich am höchsten. Dies ist mit der höheren Sickerwassermenge bei geringeren Erträgen und höherer N-Bilanz (siehe unten) zu begründen. Unter dem Lö-Boden sind die geringsten N-Austräge zu verzeichnen. Beim Vergleich der N-Düngungsvarianten zeigt sich insgesamt kein eindeutiger Trend. Auf dem Lö-Boden sind mit stabilisiertem Harnstoff durchgängig geringere, allerdings statistisch nicht abzusichernde Werte zu verzeichnen.

Zu beachten ist unbedingt, dass diese N-Verlagerung aus einem Meter Bodentiefe nicht mit einem Eintrag in das Grundwasser gleichgesetzt werden kann. Durch kapillaren Wiederaufstieg und tiefere Durchwurzelung kann auf Praxisflächen auch Stickstoff aus größerer Tiefe wieder genutzt, andererseits auch Nitrat durch Denitrifizierung umgesetzt werden.

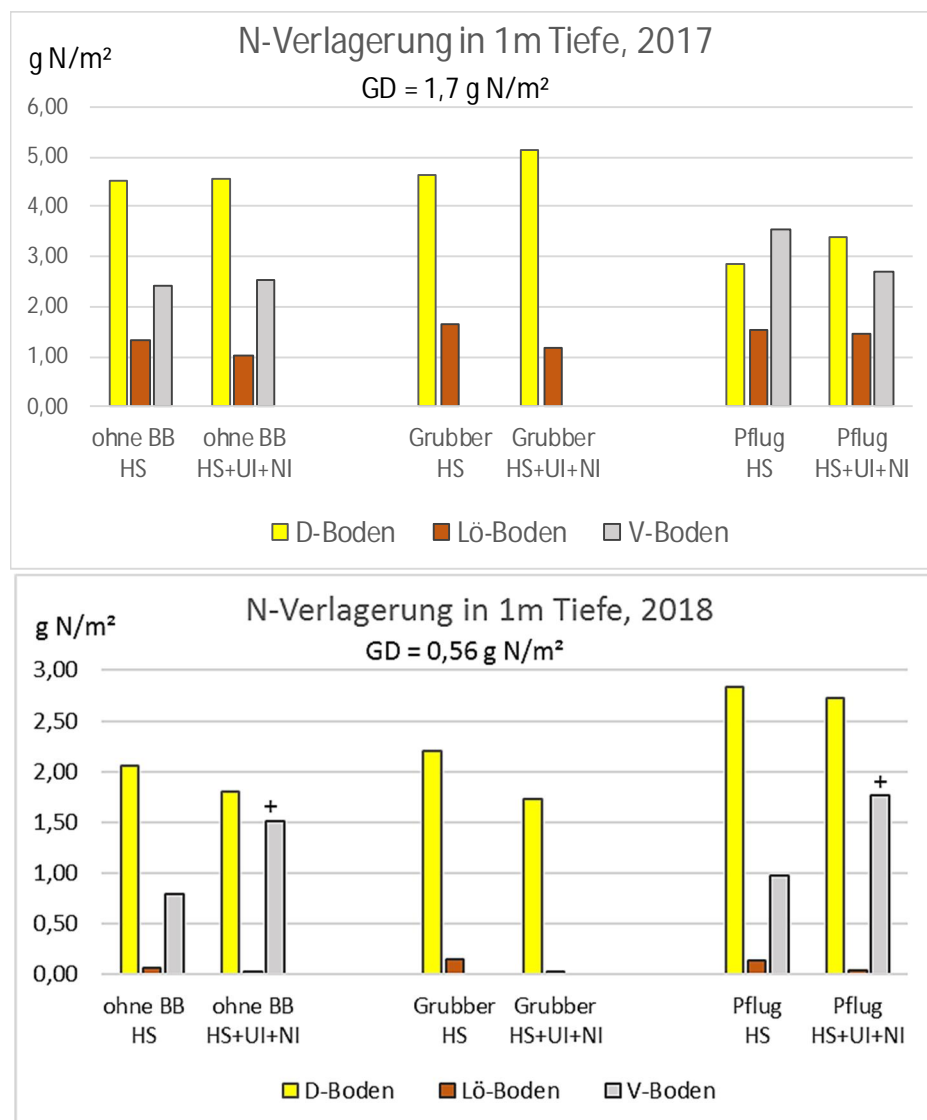


Abb. LfULG-5: N-Verlagerung in 1 m Bodentiefe 2017 (oben) bzw. 2018 (unten)

+ / - = signifikaner Mehr- bzw. Minderertrag der Variante HS+UI+NI gegenüber HS (ohne UI+NI)

Kornertrag

Die Ertragsergebnisse für Winterweizen (2017) und Wintergerste (2018) im Mittel der Wiederholungen sind Abb. LfULG-6 zu entnehmen. In beiden Jahren sind klare Ertragsunterschiede zwischen den geprüften Böden erkennbar, wobei der D-Boden erwartungsgemäß am schlechtesten abschneidet. In 2018 streuen die Ergebnisse auf Grund der extremen Witterungsbedingungen wesentlich mehr als in 2017. Auf dem D-Boden mit seiner geringen nutzbaren Feldkapazität könnte der Wassermangel 2018 infolge der extremen Witterungsbedingungen limitierend gewirkt haben.

Die Variante Harnstoff-Stabilisiert (HS+UI+NI) erbrachte im Weizen auf allen drei Böden und bei allen Bodenbearbeitungsvarianten deutlich höhere Kornerträge gegenüber der Variante HS (ohne UI+NI). In der Gerste, wo die Ergebnisse viel stärker streuten, traf das im Falle des Lößbodens und des Verwitterungsbodens ebenfalls zu. Lediglich auf den leichten Böden blieben dort die N-stabilisierten Varianten unter dem Ertragsniveau des Prüfglied Harnstoff.

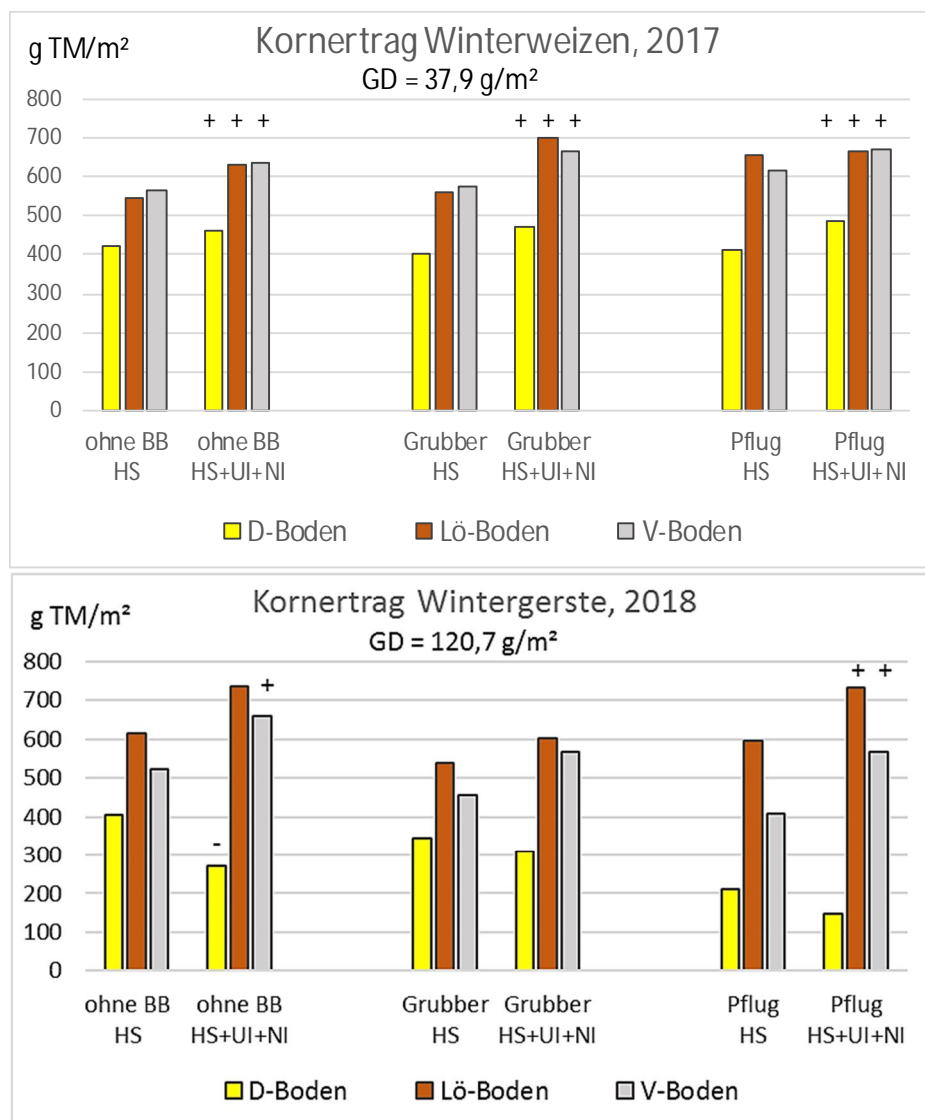


Abb. LfULG-6: Kornertrag von Winterweizen 2017 (oben) und Wintergerste 2018 (unten)

+ / - = signifikanter Mehr- bzw. Minderertrag der Variante HS+UI+NI gegenüber HS (ohne UI+NI)

Auf Steigerungsmöglichkeiten im Rahmen stabilisierter Strategien gerade bezüglich der Wintergerste wurde im vorherigen Kapitel eingegangen. Insgesamt belegen die Prüfungen in der Lysimeteranlage Nossen das beträchtliche Potenzial der stabilisierten Variante HS+UI+NI auf verschiedenen Böden und unter diversen Bodenbearbeitungssystemen. Die schwereren Böden (Löß und V-Standort) erreichen ein insgesamt höheres Ertragspotenzial als der sandige D-Standort.

N-Bilanzen

Die N-Bilanzen der Jahre 2017 und 2018 sind Abb. LfULG-7 zu entnehmen. Die deutlich schlechtesten (höchsten) Bilanzwerte sind auf dem D-Boden zu verzeichnen. Die teilweise großen Ertragsunterschiede spiegeln sich weder quantitativ, noch im Hinblick auf das Ranking der verglichenen Varianten konsistent in den Parametern N-Entzug und N-Bilanz wider.

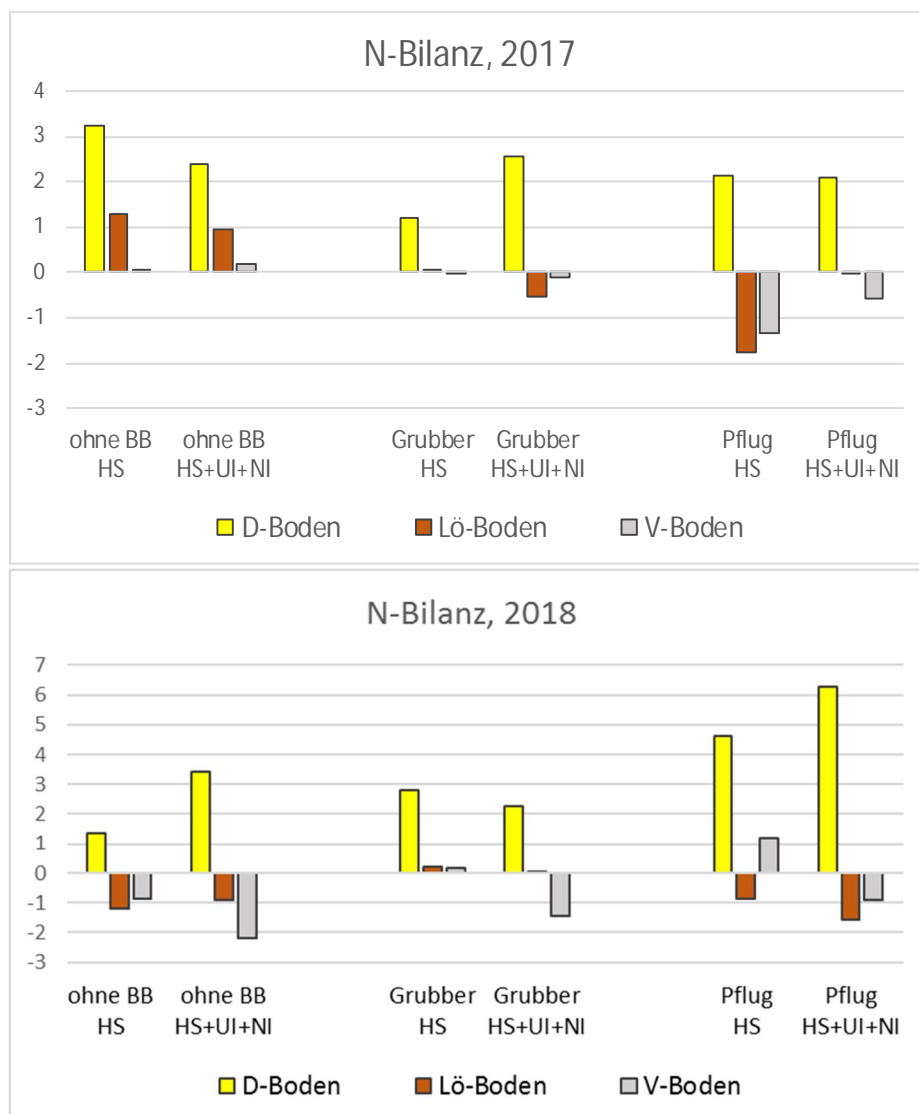


Abb. LfULG-7: N-Bilanz des Anbaus von Winterweizen 2017 (oben) und Wintergerste 2018 (unten)

+ / - = signifikaner Mehr- bzw. Minderertrag der Variante HS+UI+NI gegenüber HS (ohne UI+NI)

Vorteile des doppelt stabilisierten Harnstoffs sind zwar in beiden Erntejahren erkennbar, jedoch nicht in allen Böden/Bodenbearbeitungsvarianten. Konkret weisen die Werte für 11 der 18 Einzelvergleiche eine verbesserte N-Bilanz für das Prüfglied HS+UI+NI (Stabilisiert) aus. Allerdings streuen die N-Aufnahme-Werte sehr stark, so dass sämtliche Unterschiede außerhalb der üblichen statistischen Signifikanzschwellen liegen. Die höchsten Bilanzüberschüsse weist erwartungsgemäß der leichte D-Boden auf.

Zusammenfassung

Die Prüfung auf der Lysimeteranlage in Nossen in den Jahren 2017 (Winterweizen) und 2018 (Wintergerste) ergab insgesamt bei Kornertrag und N-Bilanz Vorteile für den doppelt stabilisierten Harnstoff gegenüber unstabilisiertem Harnstoff. Ob die positive Wirkung auf geringere gasförmige N-Verluste oder eine insgesamt bessere Verwertung durch die Pflanzen zurückzuführen ist, kann auf der Grundlage des ausgewerteten Versuchs nicht beantwortet werden. Bei der N-Verlagerung aus 1m Bodentiefe ist kein Trend erkennbar. Der Einsatz von stabilisiertem Harnstoff ist unter den gegebenen Bedingungen eine zu empfehlende Option für die Landwirtschaft.

1.8.2. Fachliche Erweiterung des Bausteins "Stabilisierte N-Düngung"; LfULG (AP-6)

Grundlage dieser Arbeiten sind die Ergebnisse der Parzellenversuche der verschiedenen Beteiligten Partner im Projekt. Am 30.10.2019 wurden auf einer Projektberatung Vorgehensweise und Zeitplan festgelegt. Aus den Projektergebnissen abgeleitete Empfehlungen für den Einsatz stabilisierten Harnstoffs werden in das „Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung“ BESyD integriert. Dies wird im Rahmen des im Dezember 2020 anstehenden Programm-Updates umgesetzt.

Die Umsetzung im aktuellen Programm BESyD wird für die Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen und Winterraps vorgenommen. Als Kriterien für die Empfehlung von N-Gabenanzahl, -höhe und -termin sollen berücksichtigt werden:

- beabsichtigte N-Düngestrategie des Landwirts (nur NI-stabilisierte N-Dünger oder Kombination mit nicht stabilisierten mineralischen N-Düngemitteln),
- Qualitätsziel bei Weizenanbau (E, A, B, C),
- Höhe des ermittelten N-Düngebedarfs (Stabilisierung ist erst ab einer N-Mindestgabe sinnvoll),
- Anbau in Trockenregion ja/nein (Abgrenzung erfolgt mit den im Programm hinterlegten und bereits bei N_{min}-Ermittlung und P-Düngebedarfsermittlung verwendeten Boden-Klima-Räumen - siehe Abb. LfULG-8),
- Bodenfeuchte vor abschließender N-Gabe.

Das Programm BESyD steht seit 2017 im Internet kostenfrei zur Verfügung (in Sachsen unter: www.landwirtschaft.sachsen.de/besyd). BESyD wird von den Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg als offizielles Programm genutzt. In ihm sind die Rahmenbedingungen dieser Bundesländer hinterlegt. Das Programm wird regelmäßig aktualisiert, zuletzt am 06.07.2020.

Die programmtechnische Update-Einarbeitung ist Corona-bedingt verzögert angelaufen. Sie wird voraussichtlich - in Abhängigkeit von der epidemiologischen und personellen Situation am Standort Nossen - im 2. Quartal 2021 erfolgreich abgeschlossen werden.

Auf das begonnene Projekt wurde in verschiedenen Vorträgen und fachlichen Diskussionen hingewiesen. Eine umfassende Ergebnisvorstellung erfolgte dabei bisher noch nicht.

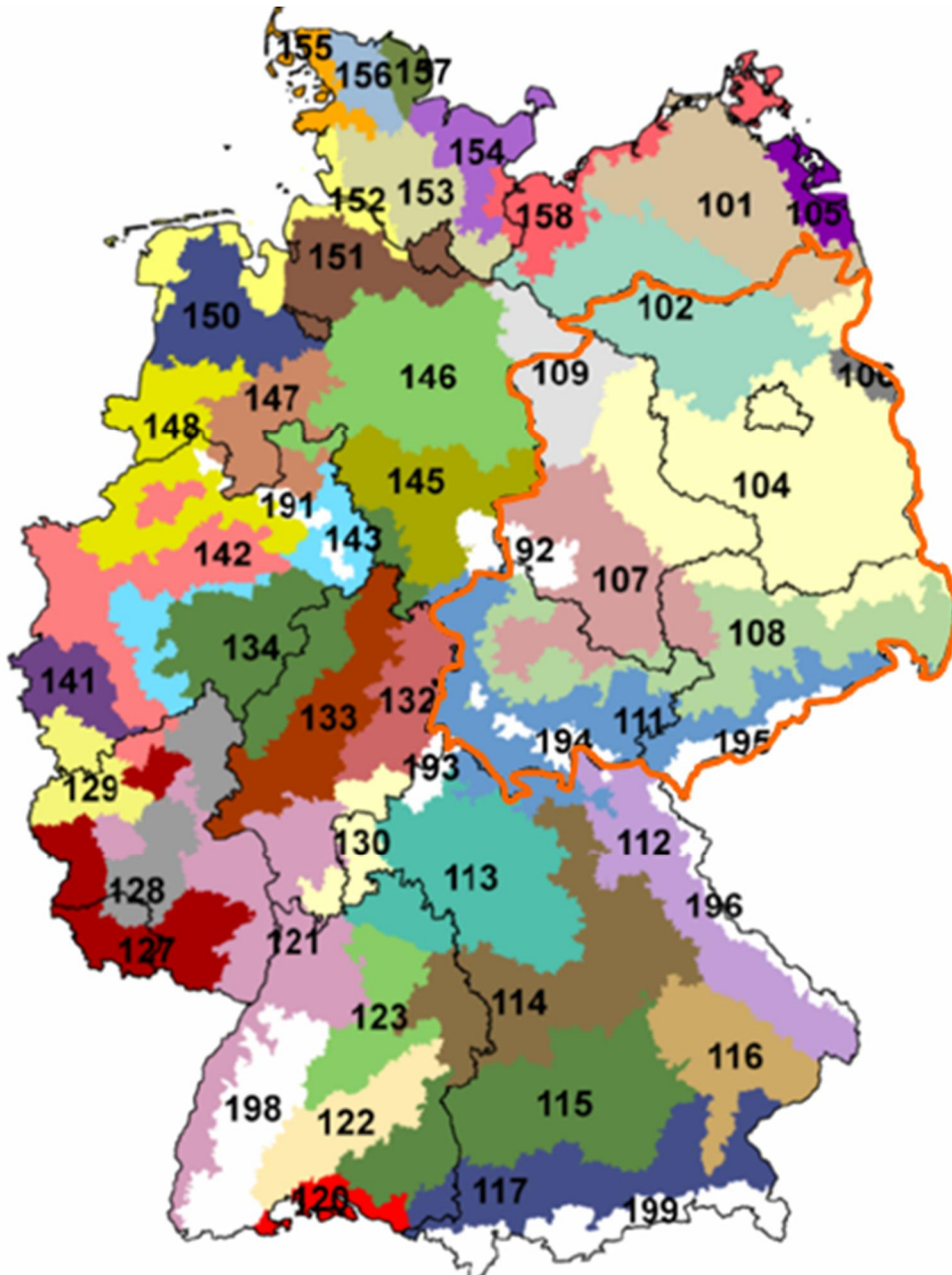


Abb. LfULG-8: Boden-Klima-Räume (BKR) der Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg (rot umrandet) im Programm BESyD: - trockene BKR: 101, 102, 104, 106, 107, 108, 109
- nicht trockene BKR: 111, 192, 193, 194, 195

Quelle der Karte: Roßberg, D., Michel, V., Graf, R., Neukampf, R., (2007): Boden-Klima-Räume und Anbauggebiete als Basis des regionalisierten Sortenwesens in Deutschland. In: Beiträge zum Sorten- und Versuchswesen und zur Biostatistik LFA, Heft 37, S. 26-32, ISSN 1618-7938

2. Abweichungen zwischen dem Stand der Arbeiten und der abschließend bewilligten Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung (mit Begründung)

2.1. SKWP

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde eingehalten. Die anvisierten Meilensteine wurden erreicht. Es erfolgte auf Antrag und Bewilligung eine Umwidmung von gewährten Mitteln (NH₃-Modellierung in Dienstleistungsauftrag durch Dr. Pacholski, Eurochem agro) für die Erstellung einer interaktiven Wetter- und Düngungswand plus Virtual-Reality-Animation zur Wirkungsweise und zu den Potenzialen der N-Stabilisierung und der auf dieser Basis entwickelten Dünger-Innovation ALZON® neo-N.

2.2. TUM

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr 2019 eingehalten und die anvisierten Meilensteine erreicht.

2.3. MLU

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr 2019 eingehalten und die anvisierten Meilensteine erreicht.

2.4. ZALF

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr 2019 eingehalten und die anvisierten Meilensteine erreicht.

2.5. TI

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr 2019 eingehalten und die anvisierten Meilensteine erreicht.

2.6. LLG

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr 2019 eingehalten und die anvisierten Meilensteine erreicht.

2.7. Rauch

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr 2019 eingehalten und die anvisierten Meilensteine erreicht. Durch die Verlängerung des Projektzeitraumes bis 30.06.2020 war es möglich, die großflächigen Versuche mit pelletierten Gärresten durch Bereitstellung einer geeigneten Technik zu unterstützen.

2.8. LfULG

(A) Ausfall des Lysimeters im Jahr 2019

Auf Grund fraglicher Ergebnisse in einzelnen Lysimetern konnten im Jahr 2019 keine Untersuchungsergebnisse im Vorhaben StaPlaRes generiert werden. Sämtliche Lysimeter mussten herausgehoben, auf Beschädigungen untersucht und ggf. repariert werden.

Für alle Behälter wurden zusätzliche umhüllende Plastebehälter angefertigt, in die die Lysimeter hineingestellt wurden. Sämtliche Absaugrohre wurden neu installiert. Schließlich konnte Ende 2019 die Einordnung der restaurierten Lysimeter in die Anlage eingeordnet, die Verfüllung und der Aufbau des Käfigs über der Anlage realisiert werden. In Folge dessen konnten im Jahr 2019 leider keine Versuchsthemen bearbeitet werden. Diese umfangreichen Reparaturarbeiten an der Lysimeteranlage waren zum Zeitpunkt des Einreichens des Verlängerungsantrages nicht vorhersehbar.

Auswirkungen auf das Projekt:

Die fachlichen Auswirkungen halten sich aus den folgenden Gründen in engen Grenzen:

- Mit den Daten zu W-Weizen und W-Gerste liegen zweijährige hochwertige Ergebnisse vor,
- Damit sind die mit dem Gesamtvorhaben StaPlaRes übereinstimmenden Kulturen abgedeckt (Mais wäre auf Grund des bestehenden Lysimeterversuches die dritte Kulturart gewesen, die aber nicht in den umfangreichen StaPlaRes-Parzellenversuchen stand),
- Es wäre fraglich gewesen, ob aus der Prüfung von Mais in 2019 ähnlich belastbare Ergebnisse entstanden wären. N-Versuche zu Mais liefern selten statistisch gesicherte Ergebnisse (und wenn, erst nach mehrjährigen Untersuchungen). Grund: lange Standzeit, umfangreiche Nutzung von aus Boden mineralisiertem N und vergleichsweise geringe N-Düngung.
- Die eigentlichen Arbeiten im Lysimeter wurden ausschließlich aus Eigenmitteln finanziert. Weitere Kosten (Analyse, Personal usw.) wurden für 2019 nicht abgerechnet.

Insofern kann der Entfall des dritten Versuchsjahres mit Silomais als fachlich verkraftbar eingeschätzt werden.

(B) BESyD-Aktivitäten erst ab 2020

Da die Schlussfolgerungen aus den Projektergebnissen erst Ende 2019 erfolgen konnten, begann die Einarbeitung der Empfehlungen zur stabilisierten Harnstoff-Düngung in das Programm BESyD erst im Jahr 2020.

Aufgrund Corona-bedingter Verzögerungen im IT-Bereich konnte die programmtechnische Update-Einarbeitung erst im 3. Quartal 2020 anlaufen. Mit dem erfolgreichen Abschluss der Implementierung ist - in Abhängigkeit von der epidemiologischen und personellen Situation am Standort Nossen - voraussichtlich im 2. Quartal 2021 zu rechnen.

3. Erreichung der gesteckten Ziele im Berichtszeitraum (Einschätzung / ggf. Begründung)

3.1. SKWP

Die Durchführung der Feld- und Gasmessversuche verlief wie geplant. Die Arbeiten konnten bis Jahresende 2019 abgeschlossen werden. Darauf aufbauend erfolgte planmäßig die Berechnung von N-Bilanzen und N-Effizienzen. Auch AP 4 wurde planmäßig abgeschlossen. Die Ergebnisaufbereitung und Weitergabe der Daten in die TI-Datenbank zu Gefäßversuchen, Modelltests und Lysimeterversuchen wurde im 1. Quartal 2020 beendet und bis zum 3. Quartal 2020 eingehend geprüft. Alle Ergebnisse wurden in die laufende Öffentlichkeitsarbeit der SKWP integriert (siehe Kap. 6 und 7).

TUM

Die Durchführung des Feldversuchs sowie die Messungen von N_2O , NH_3 , N_{min} und Erfassung von Ertragsdaten verlief wie geplant und wurden im 2. Quartal 2020 abgeschlossen. Darauf aufbauend kann die Berechnung von N-Bilanzen und N-Effizienzen sowie die Darstellung der N-Kreisläufe mit „REPRO“ erfolgen. Es sind zwei wissenschaftliche Publikationen in Arbeit, in welche die Ergebnisse der Messreihe in 2019 integriert werden sollen. Coronabedingt konnten die finalen Bewertungen (N-Bilanzen) der drei Versuchsjahre nicht bis zum 30.06.20 fertiggestellt werden. Dadurch kam es auch zu einer Verzögerung bei der Fertigstellung der geplanten Publikationen. Mit einer kurzfristigen 6-monatigen Laufzeitverlängerung wurde seitens der BLE auf diese Ausnahmesituation reagiert.

MLU

Die gesteckten Ziele wurden für den Berichtszeitraum im vollen Umfang erreicht. Die Durchführung und Auswertung der Feld- und Gasmessversuche verlief wie geplant. Die Arbeiten konnten bis Jahresende 2019 abgeschlossen werden. Darauf aufbauend wurden N-Bilanzen und die N-Effizienz berechnet.

ZALF

Die gesteckten Ziele wurden für den Berichtszeitraum im vollen Umfang erreicht. Alle laut Plan vorgesehenen Arbeiten im Projekt wurden bis Ende 2019 abgeschlossen.

TI

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde eingehalten. Die für den vorliegenden Projektzeitraum gesetzten Ziele wurden erreicht. Die projektinterne Datenbank wurde implementiert und den Projektpartner zur Verfügung gestellt. Die standortspezifische und technikabhängige Ökobilanzierung wurde, ergänzt mit den Daten des 3. Versuchsjahres, planmäßig durchgeführt, ebenso die ökologisch-ökonomische Bewertung anhand der Ökoeffizienzanalyse. Die Arbeiten der anderen Teilprojekte des AP5 sind wie geplant weitergeführt worden. Es wurde ein fruchtfolgebasiertes Referenzsystem unter Berücksichtigung der Daten aus allen drei Versuchsjahren erstellt und bewertet.

LLG

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde eingehalten. Die anvisierten Meilensteine wurden erreicht. Mit der Veröffentlichung des neuen „Bilanzierungs- und Empfehlungssystems Düngung“ BESyD und der aktualisierten und erweiterten Programmversion BESyD2020 am 9.12.2019 wurden die Voraussetzungen für die Integration der Projektergebnisse in den Baustein „stabilisierte Düngung“ geschaffen.

Rauch

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr eingehalten und die anvisierten Meilensteine erreicht. Für den Berichtszeitraum waren ursprünglich keine Umbaumaßnahmen an der Technik vorgesehen. Die neu hinzugekommenen Ziele bezüglich der Ausbringung pelletierter Gärreste auf großflächigen Parzellen konnten durch eine Anpassung der Technik im 4. Quartal 2019 und 1. Quartal 2020 in Angriff genommen werden (siehe Kap. 6).

LfULG

Der vorgesehene Arbeitsplan wurde für das Versuchsjahr 2019 im Wesentlichen eingehalten. Die anvisierten Meilensteine wurden erreicht. Aufgrund Corona-bedingter Verzögerungen im IT-Bereich ist die programmtechnische Update-Einarbeitung erst im 3. Quartal 2020 erfolgreich angelaufen. Mit dem erfolgreichen Abschluss der Implementierung ist - in Abhängigkeit von der epidemiologischen und personellen Situation am Standort Nossen - voraussichtlich im 2. Quartal 2021 zu rechnen.

4. Entwicklungen außerhalb des Verbunds mit Projekt-Relevanz

Die Wissens- und Datenlage hat sich im Vergleich zur Beantragungsphase nicht verändert. Die Verschärfung der agrar- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen im Hinblick auf die Ureaseinhibitor-Pflicht beim traditionellen Streuen von Harnstoff war nicht das Resultat eines Wissenszuwachses zu Fragen des N-Verlustgeschehens bzw. der N-Effizienz der Harnstoffdüngung. Dieser Wissenszuwachs wurde durch das Projekt StaPlaRes erbracht.

SKWP: Es wurden keine weiteren substanziellen Entwicklungen mit Projektrelevanz festgestellt. Es ergaben sich keine Änderungen oder Anpassungen.

TUM: Es wurden keine substanziellen Entwicklungen mit Projektrelevanz festgestellt. Es ergaben sich keine Änderungen oder Anpassungen.

MLU: Es wurden keine substanziellen Entwicklungen mit Projektrelevanz festgestellt. Es ergaben sich keine Änderungen oder Anpassungen.

ZALF: Es wurden keine substanziellen Entwicklungen mit Projektrelevanz festgestellt. Es ergaben sich keine Änderungen oder Anpassungen.

TI: Es wurden keine substanziellen Entwicklungen mit Projektrelevanz festgestellt. Es ergaben sich keine Änderungen oder Anpassungen.

LLG: Es wurden keine substanziellen Entwicklungen mit Projektrelevanz festgestellt. Es ergeben sich keine Änderungen oder Anpassungen.

Rauch

Das parallel bearbeitet Projekt Depotdüngung sowie der Kontakt zu Testkunden und den Agritechnica-Besuchern hat gezeigt, dass das Interesse an einem alternativen Düngeverfahren zur Reduktion der Stickstoffproblematik groß ist. Die Zahl an interessierten Landwirten und Interessensbekundungen für einen Test der Technik nehmen stetig zu. Jedoch sind sehr viele Landwirte stark verunsichert, welche Vorschriften und Reglementierungen in Zukunft kommen werden. Die Investitionsbereitschaft - auch und gerade in unkonventionelle Technologien – ist dadurch gehemmt. Eine Analyse des Wettbewerbs auf der Agritechnica hat keine Technologie gezeigt, welche in Konkurrenz oder als Alternative zur angestrebten Depotdüngung zu sehen ist.

LfULG

Es wurden keine substanziellen Entwicklungen mit Projektrelevanz festgestellt.

Es ergeben sich diesbezüglich keine Änderungen oder Anpassungen.

5. Fortschreibung des Verwertungsplans – Gesamtschau

Insgesamt ergeben sich zu dem im Projektantrag spezifizierten Verwertungsplan keine substanziellen Änderungen. Die nachfolgende Übersicht weist gemeinsame Ansätze zur Fortschreibung des Verwertungsplans im Gesamtverbund aus, die sukzessive umgesetzt werden.

Spezielle Ergänzungen zu Verwertungsaktivitäten einzelner Verbundpartner finden sich gegebenenfalls in den Unterkapiteln 6.1 bis 6.8.

Fortschreibung des Verwertungsplans - Gesamtverbund		
FKZ:	2818102115; 2818102215; 2818102315; 2818102415; 2818102615; 2818102715; 2818102815; 2818102915	
Projekttitel:	Verbundprojekt: N-Stabilisierung und wurzelnahe Platzierung als innovative Technologien zur Optimierung der Ressourceneffizienz bei der Harnstoff-Düngung (StaPlaRes)	
5.1. Angestrebte Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und bereits erteilte Schutzrechte		
	Nicht relevant	-
5.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende		
	Sukzessive wachsender Erfolg der Innovationen durch wissenschaftliche Analyse und Integration von Ergebnissen in die Anwendungssysteme; Integration bodenkundlicher und agrarmeteorologischer Standortanalysen in ein regionalisiertes Düngungsberatungssystem (Projekt StaPrax-Regio); Umsatzfördernde Unterstützung diverser Vermarktungs- und Beratungsinstrumente; dadurch Sicherung von Marktanteilen in einem angespannten (kleiner werdenden) Harnstoffdüngermarkt und wirtschaftliche Standortsicherung; Steigerung der politischen Akzeptanz und Unterstützung für stabilisierte Düngungssysteme als nachhaltige Option der komplexen Verlustminderung	Zeithorizont: fortlaufend; unmittelbar nach Projektende bis ins Jahr 2024

Fortsetzung: Fortschreibung des Verwertungsplans - Gesamtverbund		
FKZ:	2818102115; 2818102215; 2818102315; 2818102415; 2818102615; 2818102715; 2818102815; 2818102915	
Projekttitel:	Verbundprojekt: N-Stabilisierung und wurzelnahe Platzierung als innovative Technologien zur Optimierung der Ressourceneffizienz bei der Harnstoff-Düngung (StaPlaRes)	
5.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende		
	Stärkung der konventionellen Landwirtschaft in Deutschland durch Umsetzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse; Aufzeigen ökonomischer Entwicklungsmöglichkeiten; Empfehlungen zur Ausbringung von stabilisierten Harnstoffdünger in Hinblick auf die Minimierung von NH ₃ -Verlusten, klimarelevanten N ₂ O-Freisetzungen, weiteren Denitrifikations- sowie N-Auswaschungsverlusten nach der N-Düngung; Erzielung indirekte ökonomische Effekte durch mehr Ressourceneffizienz und verbesserte gesellschaftliche Akzeptanz	Zeithorizont: fortlaufend; unmittelbar nach Projektende
	Veröffentlichung der Ergebnisse und Erkenntnisse in renommierten Fachjournalen; Vorstellung der Ergebnisse auf Fachtagungen, z.B. auf der Ackerbautagung der LLG (m November 2019, auf der Abschlusstagung der TUM 2020 und auf den Fachtagungen Düngung der SKWP (2019, 2020)	Zeithorizont: fortlaufend; unmittelbar nach Projektende
	Nutzung der im Teilprojekt gewonnenen Daten für die Düngeberatung und Düngung in der landwirtschaftlichen Praxis Präzisierung von N-Bilanzierungsansätzen und für die Erhöhung der Präzision und Zuverlässigkeit von praxisorientierte N-Simulationsmodellen (gemeinsam mit Projektpartnern) Nutzung der im Teilprojekt gewonnenen Daten für die Präzisierung von N-Bilanzansätzen und für die Erhöhung der Präzision und Zuverlässigkeit von praxisorientierte N-Simulationsmodellen	Zeithorizont: fortlaufend; unmittelbar nach Projektende
5.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit		
	Nutzung der im Vorhaben „StaPlaRes“ gewonnenen Erkenntnisse und Resultate für die Beratung und Dialog (Wissenschaft / Praxis / Politik); fortlaufende Planung und Umsetzung von Publikationen und Fachveranstaltungen; Generierung von Folgeprojekten zu offenen Fragen (siehe Unterkapitel)	Zeithorizont: fortlaufend; unmittelbar nach Projektende

6. Fortschreibung des Verwertungsplans – Maßnahmen der einzelnen Partner

6.1. SKWP - Fortschreibung des Verwertungsplans / Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Produkteinführung ALZON® neo-N; SKWP:

SKWP hat im Herbst 2017 (also zum Düngjahr 2018) die Dünger-Innovationen ALZON® neo-N und PIAGRAN® pro am deutschen Markt eingeführt. Das Produkt ALZON® neo-N enthält eine Kombination von Urease- und Nitrifikationsinhibitoren und ähnelt damit hinsichtlich seiner Komponenten und prinzipiellen Wirkung dem Prüfdünger, der Forschungsgegenstand des Verbundprojektes StaPlaRes ist. Dieser Schritt erfolgte zwangsweise vor dem Hintergrund verschärfter politischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen für die Vermarktung von Harnstoff (DüV, direkte Aufforderung in Gesprächen am BMEL).

Als Basis für die Produktion und Vermarktung von Harnstoff mit dem Ureaseinhibitor 2-NPT und dem Nitrifikationsinhibitor MPA wurden Grundlagen- und Herstellungsverfahren patentiert. Dazu zählen u.a. folgende Patente:

- DE 10 2004 035 742 A1 (*N-Phenylphosphoric Acid Triamides, Method for the Production Thereof and Their Use as Agents for Regulating or Inhibiting Enzymatic Urea Hydrolysis*)
- DE 10 2009 034 433 A1 (*a, bestehend aus einem harnstoffbasierten Düngemittel und einem Ureaseinhibitor, sowie Verfahren zu dessen Herstellung*)
- DE 10 2016 106 592 A1 (*Verfahren zur Herstellung von N-((3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1-yl)methyl)acetamid (MPA)*)
- DE 10 2016 111 537 A1 (*Verfahren zur Herstellung von N-(2-Nitrophenyl)- Phosphorsäuretriamid*)
- DE 10 2013 022 031 B3 (*Lösungsmittelsysteme für N-((3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1-yl)methyl)acetamid und deren Verwendung zur Behandlung von harnstoffbasierten/ammoniumhaltigen Düngemitteln*)
- DE 10 2017 005 463 A1 (*Zusammensetzungen mit N-((3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1-yl)methyl)acetamid und deren Verwendung zur Herstellung von lagerfähigen Fertigdüngemitteln mit dualer Stickstoffstabilisierung*)

Diese Patente werden aktuell in Form der Vermarktung der Produkte ALZON® neo-N und PIAGRAN® pro verwertet. In Verbindung mit den im geplanten Projekt StaPrax-Regio angestrebten Ergebnissen wird diese Verwertung ausgeweitet.

Die Produkteinführung von ALZON® neo-N hatte keine Auswirkungen auf das Verbundprojekt StaPlaRes. Die wissenschaftliche Datenlage hat sich im Vergleich zur Beantragungsphase nicht verändert. Die Verschärfung der agrar- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen ist nicht das Resultat eines entsprechenden Wissenszuwachses zu Fragen des N-Verlustgeschehens bzw. der verminderten N-Effizienz der Harnstoffdüngung.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten - aktuell und nach Projektende; SKWP:

Aufgrund der spezifischen politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen durchschreitet der Harnstoff-Düngermarkt in Deutschland aktuell eine schwere Krise.

Von der Düngerverkaufssaison 2015/2016 (vor Beginn des Projektes StaPlaRes) bis zur Saison 2018/19 (Abschluss der experimentellen Arbeiten im Projekt) brach der Absatz um ca. 46 % ein (siehe Abb. SKWP-13). Auch dank der erfolgreichen Projektarbeit im Verbund StaPlaRes konnte der Agrochemie-Markt der SKWP ungeachtet dieser dramatischen Situation behauptet werden (Abb. SKWP-13).

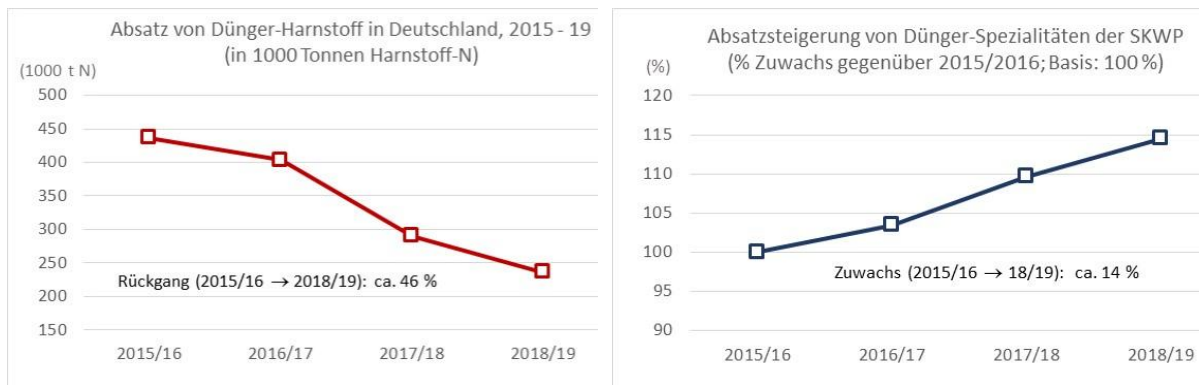


Abb. SKWP-13: Entwicklung des Absatzes von Harnstoff und harnstoffbasierten Düngern in Deutschland (linkes Bild) und bei SKWP (rechts Bild) während der StaPlaRes-Projektlaufzeit

Aktuell wird die Vermarktung N-stabilsierter Dünger durch die Integration von Projektergebnissen in diverse Vermarktungselemente bereits kontinuierlich unterstützt. Repräsentative Beispiele sind:

- Veröffentlichung auf der online-Plattform „Düngerfuchs“ der SKW-Stickstoffwerke: <https://www.duengerfuchs.de/fachberatung/anwendungsforschung/erklaerung-lachgas-und-ammoniakmessung/>
- Feldtage der SKW Stickstoffwerke Piesteritz, jeweils 1. Juni-Dekade (jeweils ca. 1.000 Besucher); Station mit Anschauungsmaterial und interaktive Schauwand Wetter und Düngung
- Ammoniak-Seminare (im April, Mai, August, Oktober und November 2019 sowie im Februar 2020) mit Handelshäusern, Pressevertretern und Landwirten
- Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen (siehe Kap. 7)
- erfolgreiche Einreichung von zwei Tagungsbeiträgen für die 8th Global N Conference (2020, Berlin): Stabilized Urea – Innovative fertilization strategies for the 21st century (Vortrag); Minimizing ammonia loss due to urea application – Benefits of twin-stabilization (Poster). Die Tagung wurde Corona-bedingt auf 2021 verschoben.

Diese Unterstützung von Marketing und marketingbegleitender Beratung muss nach Projektende dringend intensiviert werden, da sich die Situation auf dem Mineraldünger-Markt weiterhin dramatisch verschlechtert. Im Zuge agrar- und umweltpolitischer Auflagen und Initiativen (Ausweisung von Roten- Gebieten, Initiative Farm-to-Fork, Ackerbaustrategie 2035) ist der Mineraldüngereinsatz bereits im letzten Jahr um 19 % zurückgegangen. Ein weiterer Rückgang um bis zu 15 % wird vom Verband Fertilizers Europe für 2020/21 prognostiziert. Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für die Innovation Harnstoff+UI+NI und den Agrochemie-Standort SKWP hängt in entscheidendem Maße vom Erfolg praxisorientierter Anschluss-F&E-Projekte ab.

In diesem Kontext kommt dem anvisierten Verbundprojekt StaPrax-Regio (geplante Laufzeit 2021 bis 2024) eine Schlüsselposition zu. Mit ihm sollen die nachgewiesenen komplexen Vorteilspotenziale der N-Stabilisierung (Verlustminderung, Optimierung von N-Umsatz und N-Bereitstellung im Wurzelraum, Nebeneffekte der ammoniumbetonten Pflanzenernährung) besser als bislang in entsprechenden Ertrags- und Effizienzgewinne umgesetzt werden.

Weiterentwicklung des regionalen Fachberatungsnetzes:

In der Endphase des Projektes StaPlaRes wurden auf Basis der Erkenntnisse aus den Forschungstätigkeiten im Verbundvorhaben zukunftsweisende Verwertungstool entwickelt und in die landwirtschaftliche Beratungspraxis eingeführt.

Dabei wurde auf eine Verbindung traditioneller Weiterbildungsformen (hier: eine Magnet-Tafel zur Düngung im Winterweizen) mit modernen Kommunikationsformen (hier eine VR-Animation zum Einsatz des kombiniert-stabilisierten Harnstoffs ALZON® neo-N) in ein neuartiges Marketing- und Beratungssystem integriert. Die folgende Abbildung (Abb. SKWP-14) zeigt die Magnettafel in Aktion.

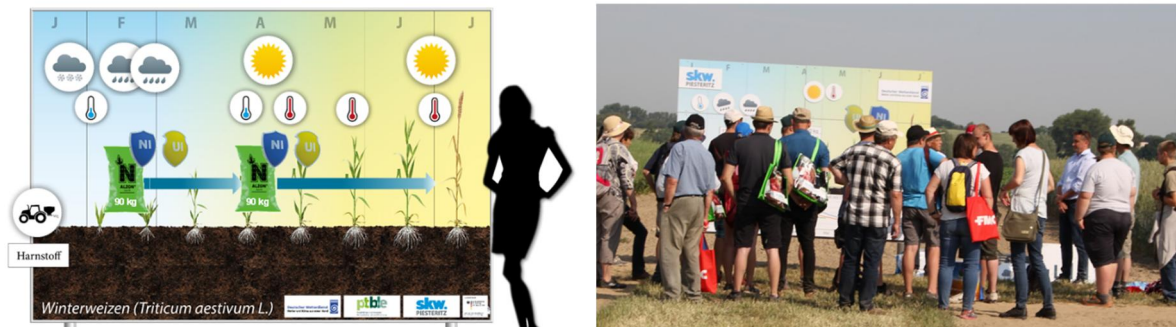


Abb. SKWP-14: Wetter- und Düngungswand zur Vermittlung innovativer Düngungsstrategien: Schema (oberes Bild) und Magnet-Wand in Aktion auf dem Feldtag 2019

Der folgende Link führt zu einem Video-Clip zur SKWP-Düngerspezialität ALZON® neo-N:

<https://www.youtube.com/watch?v=oiCoZa2F8ug>

Auf diesem Video basiert eine im Zusammenhang mit der Magnettafel erstellte interaktiv VR-Animation, in der wesentliche Fakten zur Funktionsweise von Urease- und Nitrifikationsinhibierung und zu den Besonderheiten und Eigenschaften von ALZON neo-N vermittelt werden.

Gesellschaftliche Akzeptanz:

Publikationen, Öffentlichkeitsarbeit und eine möglichst offene, konstruktive und transparente Kommunikation sind für SKWP die Tools, um eine möglichst hohe gesellschaftliche Akzeptanz sowohl der Forschungs- und Entwicklungsarbeit des Unternehmens als auch der innovativen Agrochemie-Produkte, Anwendungsempfehlungen und Marketingstrategien zu gewährleisten.

Diese Akzeptanz stellt mittel- und langfristig eine essentielle Voraussetzung für die Standortsicherung und positive Entwicklung der SKWP dar. Auf wissenschaftlicher und politischer Ebene konnte dieses Ziel erreicht werden.

Im Herbst 2018 wurde dem Unternehmen für die erfolgreiche Entwicklung und Praxiseinführung der Produkte ALZON® neo-N und PIAGRAN® pro der Sonderpreis der Umweltallianz Sachsen-Anhalt verliehen (Abb. SKWP-15). Die Jury würdigte nach eingehender Prüfung die Bemühungen um die energie- und ressourceneffizient Produktion und Anwendung beider Produkte und dabei insbesondere die ökologisch nachhaltige Performance im Praxiseinsatz.

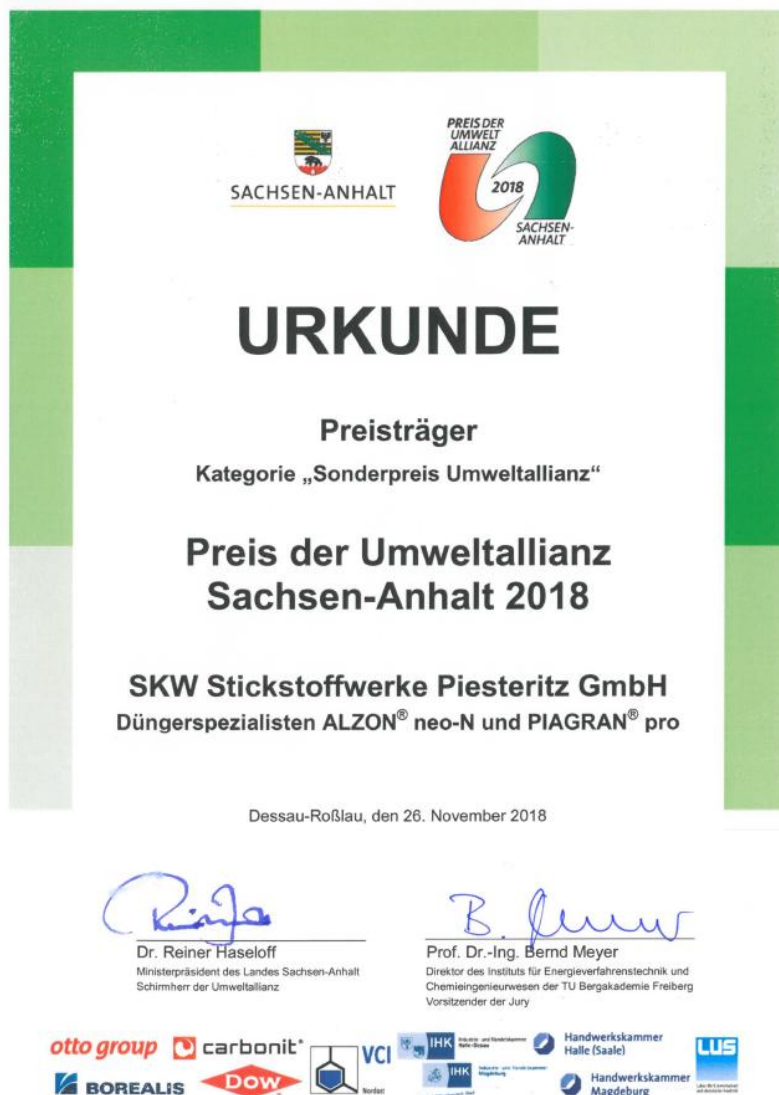


Abb. SKWP-15: Urkunde zum Sonderpreis der Umweltallianz Sachsen-Anhalt für die Düngerspezialitäten ALZON® neo-N und PIAGRAN® pro

Anschluss-Projekt StaPrax-Regio; SKWP:

SKWP ist maßgeblich an der Erstellung der Projektskizze StaPrax-Regio (N-Stabilisierung in der Düngepraxis: Optimierung durch Regionalisierung auf Basis meteorologisch-edaphischer Parameter) beteiligt, die im 1. Quartal 2020 bei der Deutschen Innovationspartnerschaft Agrar des BMEL eingereicht worden ist. Im Rahmen dieses F&E-Vorhabens sollen die im Projekt StaPlaRes gewonnenen Erkenntnisse zur agrarmeteorologischen Dynamik und Entwicklung in ihrer Bedeutung für das Stickstoffverlustgeschehen und die Effizienz der N-Düngung im Rahmen standortangepasster stabiler Düngungssysteme umgesetzt werden. Damit kann nach aktuellem Wissensstand erreicht werden, dass sich die nachweislich vorhandenen komplexen Vorteilspotenziale der N-Stabilisierung (Verlustminderung, Optimierung von N-Umsatz und N-Bereitstellung im Wurzelraum, Nebeneffekte der ammoniumbetonten Pflanzenernährung) besser als bislang in entsprechenden Ertrags- und Effizienzgewinnen widerspiegeln. Drei Arbeitsschwerpunkte sollen ineinandergreifen:

- (I) wissenschaftlich fundierte edaphisch-meteorologische Standortdifferenzierung auf Basis vorhandener Karten und Geoinformationssysteme
- (II) Prüfung entsprechend differenzierter Düngungsempfehlungen im Rahmen praxisnaher Freilandversuche auf charakteristischen Ackerstandorten in ganz Deutschland
- (III) Übernahme der regionalisierten, standortangepassten Düngungsstrategien in vorhandene Tools der amtlichen Düngungsberatung und des Wissenstransfers als Basis einer erfolgreichen Verwertung der in StaPlaRes und StaPrax-Regio gewonnenen Erkenntnisse

Die eingereichte Projektskizze wurde als förderwürdig eingeschätzt. An das Konsortium (SKWP, DWD, LfULG, HS Harz) ging die Aufforderung zur Antragstellung. Diese erfolgte im Oktober 2020. Der Beginn des Vorhabens ist für den 01. Februar 2021 geplant.

Das Vorhaben StaPrax-Regio wird entscheidend dazu beitragen, die wirtschaftlich erfolgreiche und ökologisch nachhaltige Vermarktung N-stabilsierter Düngerspezialitäten auch unter schwierigsten Rahmenbedingungen Marktumfeld aufrechtzuerhalten und weiterzuentwickeln.

Publikationen, Vorträge und Poster; SKWP:

Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen sind in Kap. 7 aufgelistet.

6.2. TUM - Fortschreibung des Verwertungsplans / Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die TUM strebt die Einreichung von zwei Beiträgen in internationalen Zeitschriften bis Mitte 2021 an.

a) eine Publikation, in der vorhandene Bilanzierungsmodelle und Emissionsfaktoren zur Berechnung von bodenbürtigen N₂O-Emissionen anhand der im StaPlaRes-Projekt gewonnenen Messergebnisse validiert werden sollen, sowie b) eine Publikation, die N₂O- und NH₃-Emissionsfaktoren (z. B. Niederschlag, Bodenfeuchte, Temperatur, Düngezeitpunkt, Bodenbearbeitungsintensität etc.) im StaPlaRes-Versuch bestimmt und bewertet.

Corona-bedingt konnten die finalen Bewertungen (N-Bilanzen) der drei Versuchsjahre nicht bis zum 30.06.20 fertiggestellt werden. Dadurch kam es zu Verzögerungen bei der Fertigstellung der geplanten Publikationen.

Weitere Ausführungen zur Verwertung finden sich in Kap. 1.2.6 dieses Abschlussberichtes. Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen sind in Kap. 7 aufgelistet.

6.3. MLU - Fortschreibung des Verwertungsplans / Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Detaillierte Informationen zu den Verwertungsaktivitäten in der letzten Projektphase werden im Kapitel 1.3.6 im Rahmen des fachlichen Abschlussberichtes des StaPlaRes-Partners MLU gegeben.

Darüber hinaus ergeben sich zu den in den Zwischenberichten spezifizierten Verwertungsplänen und Aktivitäten keine weiteren Ergänzungen (siehe auch Verbundpartner LLG). Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen sind in Kap. 7 aufgelistet.

6.4. ZALF - Fortschreibung des Verwertungsplans / Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Es erfolgte die Nutzung der im Vorhaben StaPlaRes gewonnenen Erkenntnisse und Resultate für die Konzipierung des Projektes „Verwertung landwirtschaftlicher Nebenprodukte als wertvolle Ressource durch optimierte Ausbringung von Gärresten: Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Verbesserung des lokalen Nährstoffkreislaufs“ (REGAIN-C, beantragt und bewilligt im Rahmen des BMBF-Programms „Pilotmaßnahmen für Partnerschaften in Wissenschaft, Forschung und Bildung mit Belarus“). Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen sind in Kap. 7 aufgelistet.

6.5. TI - Fortschreibung des Verwertungsplans / Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Juni 2018 wurde das Projekt RekoRT begonnen. Dieses Projekt basiert auf einer reinen Nachnutzung von Daten. Es beschäftigt sich mit Ableitung von regionalspezifischen Maßnahmen als praxisrelevante Handlungsempfehlungen für eine kosteneffiziente Reduktion von THG-Emissionen unter Berücksichtigung anderer gekoppelter Umweltwirkungen.

Für die erforderliche Regionalisierung der Maßnahmen werden bereits vorhandene Ergebnisse und Erkenntnisse aus Vorgängerprojekten der Antragsteller, unter anderem die Daten des StaPlaRes-Projektes, harmonisiert, analysiert und ausgewertet. Detaillierte Informationen zu den Verwertungsaktivitäten in der letzten Projektphase werden im Kapitel 1.2.6 im Rahmen des fachlichen Abschlussberichtes des StaPlaRes-Partners TUM gegeben. Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen sind in Kap. 7 aufgelistet.

6.6. LLG - Fortschreibung des Verwertungsplan / Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Neben den im Gesamtverbund fortlaufend erfolgenden Verwertungsaktivitäten oblag der LLG die Durchführung und Organisation der Ackerbautagungen am 26.11.2019 in Bernburg und am 27.11.2019 in Iden: Organisation eines gemeinsamen Vortragsblocks zum STAPLARES-Projekt mit Vorträgen aller beteiligten Verbundpartner (ca. 200 Besucher).

Ferner erfolgte eine Vorstellung des StaPlaRes-Versuches und der Gasmessungen Bernburger Getreide- und Rapsfeldtag am 19.06.2019 (ca. 50 Besucher).

Detaillierte Informationen zu den Verwertungsaktivitäten in der letzten Projektphase werden im Kapitel 1.6.6 im Rahmen des fachlichen Abschlussberichtes des StaPlaRes-Partners LLG gegeben. Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen sind in Kap. 7 aufgelistet.

6.7. Rauch - Fortschreibung des Verwertungsplans / Wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Zum Jahreswechsel 2019/2020 wurden Änderungsmaßnahmen an der Fördertechnik, wie z.B. die Verwendung von Schläuchen mit größeren Durchmessern, definiert und die Teilebeschaffung angestoßen. Ende Januar/Anfang Februar 2020 erfolgten weitere Versuche, um die Maschine für den Feldeinsatz zur Düngesaison 2020 fit zu machen.

Es wurde die wirtschaftliche Relevanz für die Ausbringung von Gärresten ermittelt, um die Eignung der vergleichsweise teuren Pneumatik-Technik für diesen Anwendungsfall zu prüfen. Im Frühjahr 2020 wurden in diesem Kontext 2020 pelletierte Gärreste auf Großparzellen ausgebracht.

Aus technischer Sicht stellt die Ausbringung von Gärresten mit Bruttomengen bis zu 1000 kg/ha einen neuen Aspekt dar, der zu Projektbeginn noch nicht im Raum stand. Die Anforderungsparameter stellen eine gewisse Herausforderung dar, welche jedoch durch Anpassung der Granulat-Form sowie der Fördertechnik in Griff zu bekommen sein sollten. Für die Konzeptionierung einer zukünftigen Maschine sind entsprechend große Tanks zu berücksichtigen.

In Auswertung der Haupt- und Begleitversuche des Projektes StaPlaRes ist aus aktueller Sicht das Fazit zu ziehen, dass die Platzierung gekörnter / granulierter / pelletierter Düngemittel in erster Linie für den Ökolandbau mit eher kleineren Betrieben und Flächen interessant wäre und damit auf diesem Sektor auch ein Marktpotenzial hat.

6.8. LfULG - Fortschreibung des Verwertungsplans / Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit:

Fachliche Erweiterung des Bausteins "stabilisierte N-Düngung": Grundlage dieser Arbeiten sind die Ergebnisse der Parzellenversuche der verschiedenen beteiligten Partner im Projekt. Am 30.10.2019 wurden auf einer Projektberatung Vorgehensweise und Zeitplan festgelegt.

Aus den Projektergebnissen abgeleitete Empfehlungen für den Einsatz stabilisierten Harnstoffs werden in das „Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung“ BESyD integriert. Dies wird im Rahmen eines Programm-updates umgesetzt. Detaillierte Informationen dazu werden im Kapitel 1.8.2 im Rahmen des fachlichen Abschlussberichtes des StaPlaRes-Partners LfULG gegeben.

Je nach Erfordernis werden weitere Anpassungen im Programm sukzessive erfolgen. Die programmtechnische Update-Einarbeitung ist im 3. Quartal 2020 erfolgreich angelaufen. Mit dem erfolgreichen Abschluss der Implementierung ist voraussichtlich im 2. Quartal 2021 zu rechnen.

Das Programm BESyD steht seit 2017 im Internet kostenfrei zur Verfügung (in Sachsen unter: www.landwirtschaft.sachsen.de/besyd). In ihm sind die Rahmenbedingungen für die Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Brandenburg hinterlegt. Das Programm wird laufend aktualisiert – zuletzt am 06.07.2020.

BESyD wird von diesen Bundesländern als offizielles Beratungsprogramm genutzt.

Beteiligung am Projektentwurf „StaPrax-Regio“:

Das LfULG ist maßgeblich an der Erstellung der Projektskizze StaPrax-Regio (N-Stabilisierung in der Düngepraxis: Optimierung durch Regionalisierung auf Basis meteorologisch-edaphischer Parameter) beteiligt, die im 1. Quartal 2020 bei der Deutschen Innovationspartnerschaft Agrar (dip agrar) des BMEL eingereicht worden ist.

In dem geplanten Projekt sollen die in StaPlaRes gewonnenen Erkenntnisse zur agrarmeteorologischen Dynamik und Entwicklung in ihrer Bedeutung für das Stickstoffverlustgeschehen und die Effizienz der N-Düngung im Rahmen standortangepasster stabilisierter Düngungssysteme umgesetzt werden.

Unabhängig davon werden die agrarmeteorologischen Analysen und Ableitungen des DWD auch aktuell bereits in die aktuellen Düngeempfehlungen und Beratungsmodule der SKWP integriert.

Erkenntnistransfer: Über das Projekt StaPlaRes wurde in verschiedenen Vorträgen und fachlichen Diskussionen hingewiesen, ebenso auch auf der Messe „Agra 2019“ 25. bis 28.04.2019 im Rahmen der LfULG-Standbetreuung. Im letzten aktiven Projektjahr des LfULG (2019) wurde das Projekt StaPlaRes auf folgenden Feldtagen thematisiert:

Feldtag Getreide, Öl- Eiweißpflanzen am 23.05.2019 in Baruth

Feldtag Getreide, Öl- Eiweißpflanzen am 06.06.2019 in Pommritz

Feldtag Düngung und Pflanzenschutz am 21.06.2019 in Nossen

Feldtag Getreide, Öl- Eiweißpflanzen am 27.06.2019 in Christgrün

Feldtag Getreide, Öl- Eiweißpflanzen am 02.07.2019 in Forchheim

Publikationen, Vorträge und Poster auf Fachtagungen sind in Kap. 7 aufgelistet.

7. Publikationen und Vorträge in der Endphase des F&E-Vorhabens StaPlaRes

- Augustin, J., Lück, M., Hoffmann, M., 2019: Importance of the ebullition pathway for accurate estimates of fertilization induced N₂ emissions on wet arable soils. Poster auf der DASIM-conference "TRACING DENITRIFICATION", March 12 -14 2019 in Giessen, Germany und der EGU General Assembly 2019, Vienna 7-12 April
- Augustin, J., 2019: Bedeutung von Ackerbausystemen als Quelle und Senke klimarelevanter Spurengase. Vortrag auf Ackerbautagung der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau (LLG) Sachsen-Anhalt, 26. November und 27. November 2019.
- Bischoff, J., Tauchnitz, N. 2019: Mit Side-Dressing direkt an die Wurzel. Top Agrar Spezial, 24-25.
- Bischoff, J., 2019: Reduzierte Bodenbearbeitung und reduzierte N-Düngung im Side-Dressing-Verfahren - Ackerbautagung am 26.11.2019 in Bernburg und am 27.11.2019 in Iden: Vortrag
- Eißner F, Bischoff J, Rauch N, Rücknagel J, Kühling I, Kreuter T, Schuster C, Schäfer F, Tauchnitz N, Simon A, Maidl FX, Hülsbergen KJ, Augustin J, Stichnothe H, Grunert M, Böttcher F, Christen, O., 2019: Wurzelnahe Platzierung von mineralischen Harnstoffdünger im Side-Dressing Verfahren – eine ackerbauliche und umweltseitige Verfahrensbewertung. Jahrestagung der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz und der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft.
- Eißner F, Bischoff J, Rauch N, Rücknagel J, Kühling I, Kreuter T, Schuster C, Schäfer F, Tauchnitz N, Simon A, Maidl FX, Hülsbergen KJ, Augustin J, Stichnothe H, Grunert M, Böttcher F, Christen, O., 2019: Vortrag auf Ackerbautagung der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau (LLG) Sachsen-Anhalt, 26. November (Bernburg) und 27. November (Iden) 2019.
- Glaser, B., Kroner, A., Tauchnitz, N., Schrödter, M., 2019: Humusqualität und Stickstoff(N)-Nachlieferungspotential eines Normtschernosems bei differenzierter Düngung (organisch und mineralisch) - Jahrestagung der DBG, Bern, 24.08.-29.08.2019: Poster
- Grunert, M., 2019: Düngerecht und Frühjahrsdüngung - Aktuelle Hinweise. Vortrag auf der Pflanzenbautagung des LfULG am 22.02.2019 in Groitzsch
- Grunert, M., 2019: Aktuelle Informationen zum Düngerecht und zum Programm BESyD. Vortrag auf der Weiterbildungsveranstaltung des Genossenschaftsverbands am 26.03.2019 in Groitzsch
- Grunert, M., 2019: Aktuelles zur Umsetzung des Düngerechts in Sachsen und zur Düngung. Vortrag auf der Fachinformationsveranstaltung am 27.11.2019 in Zwickau
- Hahn H, Böning A, Kirschke T, Kreuter T (2019): Effects of urea combined with nitrification inhibitor on root growth in early growth stages of spring barley, Jahrestagung Deutschen Gesellschaft für Pflanzenernährung, 25.-27. September, Berlin; Abstract & Poster
- Kirschke T, Spott O, Vetterlein D (2019): Impact of urease and nitrification inhibitor on NH₄⁺ and NO₃⁻ dynamic in soil after urea spring application under field conditions evaluated by soil extraction and soil solution sampling Journal of Plant Nutrition and Soil Science 182 (3), 441-450
- Kreuter T (2019): Landwirtschaft 2030 – Zur Zukunft von Pflanzenbau und N-Düngung. 1. Sitzung der Leipziger Ökonomischen Societät / AG Landwirtschaft, Leipzig, 8. Januar 2019; Vortrag.
- Kreuter T (2019): StaPlaRes – Ein Verbundprojekt zur Düngungsoptimierung. 15. Tag der Agrarmeteorologie, Leipzig, 9. Januar 2019; Vortrag
- Kreuter T (2019) Stabilisierte N-Düngung im Klimawandel – Lehren aus dem außergewöhnlichen Düngejahr 2018; Fachtagungen Düngung der SKWP; Wittenberg-Ziegenhagen-Radeberg-Machern-Bösleben-Altlandsberg-Linstow; Januar 2019; Vortrag
- Kreuter T (2019): Beratertag der Agro-In-Form Agrarberatung / Raiffeisen Waren GmbH, Alsfeld (Hessen), 12. Februar 2019; Vortrag

- Kreuter T (2019): Stellschrauben zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz im Ackerbau. Beratertag der LUB Ostholstein, Lehmkuhlen, 5. März 2019; Vortrag
- Kreuter, T., Thiel, E., 2020: F&E-Verbundprojekt StaPlaRes: N-Stabilisierung und wurzelnahe Platzierung im Wettbewerb um die optimale Ressourceneffizienz bei der Harnstoff-Düngung. Thünen-Institut Braunschweig, AG Agrarklimaschutz, Vortrag
- Kreuter, T., 2020: F&E-Verbundprojekt StaPlaRes: Effekte der N-Stabilisierung auf Stickstoffverluste, Ertrags- und Effizienzparameter in der Fruchtfolge Winterraps -> Winterweizen -> Wintergerste. Fachtagungen Düngung der SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH; 10 Standorte; Vortrag und online-Auftritt
- Simon, A., Maidl F. X., Kreuter, T., Hülshagen, K. J., 2019: Innovative Fertilization Technologies to Face Climate Change Impacts and to Reduce Further GHG Emissions from Agriculture, ARC Resilience Conference 2019, 11.11. – 12.11.2019, Korea University, Seoul, Korea.
- Simon, A., 2019: Wirkungen von N-Düngungssystemen auf Bodenfruchtbarkeit, gasförmige N-Verluste, Ertrag und Produktqualität unter den Bedingungen des konventionellen und ökologischen Landbaus, Ackerbautagung in Bernburg und Iden, 26.11. – 27.11.2019
- Simon, A., 2019: Optimierung der N-Effizienz bei Harnstoffdüngung durch Stabilisierung und wurzelnahe Platzierung - Projekt „StaPlaRes“, Feldtag am 18.06.2019 in Roggenstein
- Stichnothe, H., 2019: Das Verbundprojekt StaPlaRes – Ziele, Verbund, bisherige Ergebnisse. Vortrag zum Fachgespräch „Ammoniak-Emissionen aus Harnstoff und harnstoffhaltigen Düngern“. Bonn, BMEL, 27. März 2019
- Tauchnitz, N., Eißner, F., Bischoff, J., Christen, O., Kreuter, T., 2018: Lachgasemissionen auf einem Schwarzerdestandort bei Harnstoffdüngung. VDLUFA-Schriftenreihe, 75, 171-179.
- Tauchnitz, N., Eissner, F., Bischoff, J., Kurzius, F., Christen, O., Kreuter, T., 2019: Stickstoff (N)-Dynamik und N-Verlustquellen bei der Harnstoff-Düngung auf einem Norm-Tschernosem, Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG, Berichte der DBG (e-prints), <http://eprints.dbges.de/id/eprint/1821>.
- Tauchnitz, N., Eissner, F., Bischoff, J., Schrödter, M., Kurzius, F., Christen, O., Kreuter, T., 2019: Stickstoff(N)-Dynamik und Mineralisationspotential eines Norm-Tschernosems bei Harnstoffdüngung, VDLUFA-Schriftenreihe, 76, 148 – 155.
- Tauchnitz, N., 2019: Stickstoff(N)-Dynamik und N-Verlustquellen bei Mineral-N und organischer Düngung - Ackerbautagung am 26.11.2019 in Bernburg und am 27.11.2019 in Iden: Vortrag
- Thiel, E., 2020: Anpassung N-stabilsierter Düngungssysteme an standortspezifische bodenkundliche und agrarmeteorologische Kenngrößen. 16. Tag der Agrarmeteorologie, Leipzig, 8. Januar 2020; Vortrag
- Thiel, E., 2020: Ansätze zur N-Düngungsoptimierung – Das Verbundprojekt StaPlaRes. Universität Leipzig, 17. Januar 2020; Vortrag
- Ohnemus, T., 2019: Regionalisierung von Ammoniak-Verlustpotentialen zur Optimierung der Harnstoff-Düngung in Deutschland. Bachelorarbeit (Betreuung: SKWP), Universität Leipzig, Institut für Geographie
- Ohnemus, T., Spott, O., Thiel, E., 2020: Spatial distribution of urea induced ammonia loss potentials of German cropland soils. GEODERMA (submitted 2020)
- Weiß, J., 2019: Hydrologische Modellierung des Bodenwasserhaushalts auf der Basis multipler Sondenparameter am Standort Cunnersdorf, Sachsen. Masterarbeit (Betreuung: SKWP), Universität Leipzig, Institut für Geographie