

ABSCHLUSSBERICHT

Verbundvorhaben: „Angesäuerte Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen und in der Gärrestedüngung“

„Emissionsminderung bei der Ausbringung von Gärresten durch
Ansäuerung“



IMPRESSUM

Titel

Verbundvorhaben: „Angesäuerte Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen und in der Gärrestedüngung“

Teilvorhaben 2: „Emissionsminderung bei der Ausbringung von Gärresten durch Ansäuerung“

Forschungs-Nr.

1/51

Berichtszeitraum

01.11.2020 bis 31.01.2024

Herausgeber

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern

Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen

Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft, Sachgebiet Klimaschutz und Analytik

Telefon: 0385 / 588-60001

Fax: 0385 / 588-60011

poststelle@lfa.mvnet.de

www.lfamv.de

Autoren

Dr. Andreas Gurgel • Telefon: 0385 / 588-60220

Michael Dau • Telefon: 0385 / 588-60226

Titelfoto

Michael Dau

Gülzow, 28.02.2024

GEFÖRDERT DURCH

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht.....	4
1	Aufgabenstellung.....	4
2	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
3	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	5
a)	Arbeitspakete und Meilensteine	5
b)	Zusammenfassung	7
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse.....	8
1	Erzielte Ergebnisse	8
	Arbeitspaket 1: Feldversuche	8
	Arbeitspaket 2: Emissionsmessungen	14
	Arbeitspaket 3: Analytik	20
	Arbeitspaket 4: Öffentlichkeitsarbeit und Austausch	29
2	Verwertung	30
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	30
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	30
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	31
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	31
3	Erkenntnisse von Dritten.....	32
4	Veröffentlichungen.....	33
Literatur		34

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kurzcharakteristik des Versuchsstandortes.....	8
Tabelle 2: Stufenbeschreibung Düngung Winterweizen 2021-2023.....	9
Tabelle 3: Stufenbeschreibung Düngung Silomais 2021; 2022	12
Tabelle 4: Stufenbeschreibung Herstdüngung Winterraps 2021-2023.....	13

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Ausbringung der angesäuerten Gärreste mit Schleppschlauchtechnik zu Vegetationsbeginn 2021 im Winterweizen.....	10
Abbildung 2:	Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im Messzeitraum im Winterweizen nach der Gärrestdüngung im März/April im Mittel der Versuchsjahre.....	15
Abbildung 3:	Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum im Silomais nach der Gärrestdüngung zur Aussaat im Mittel der Versuchsjahre	16
Abbildung 4:	Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum im Silomais nach der Gärrestdüngung im 6-8-Blatt-Stadium im Mittel der Versuchsjahre	17
Abbildung 5:	Kumulierte Ammoniakverluste der Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum zum Winterraps im Mittel der Versuchsjahre.....	18
Abbildung 6:	Kumulierte Ammoniakverluste in Prozent des ausgebrachten Ammoniums zu unterschiedlichen Ausbringterminen in den untersuchten Fruchtarten im 7-tägigen Messzeitraum im Mittel der Versuchsjahre	19
Abbildung 7:	Adjustierte Mittelwerte des Kornertrages (dt/ha) und des Rohproteingehaltes (%TM) der Prüfglieder im Winterweizen im Mittel der Versuchsjahre	21
Abbildung 8:	Adjustierte Mittelwerte der Stickstoff-Abfuhr (kg/ha) der Prüfglieder im Winterweizen im Mittel der Versuchsjahre	22
Abbildung 9:	N _{min} und S _{min} Bodengehalte (kg/ha) der Prüfglieder nach der Winterweizenernte im Mittel der Versuchsjahre	23
Abbildung 10:	Stickstoff im System (kg/ha) der Prüfglieder im Winterweizen im Mittel der Versuchsjahre.....	24
Abbildung 11:	Adjustierte Mittelwerte des Trockenmasseertrages (dt/ha) und Rohproteingehaltes (%TM) der Prüfglieder im Silomais im Mittel der Versuchsjahre.....	25
Abbildung 12:	Stickstoff-Abfuhr (kg/ha) der Prüfglieder im Silomais im Mittel der Versuchsjahre.....	26
Abbildung 13:	Adjustierte Mittelwerte des Stärkeertrages (dt/ha) der Prüfglieder im Silomaisversuch im Mittel der Versuchsjahre.....	27
Abbildung 14:	Emissionsmessungen auf den Gerstenstopeln vor der Rapsaussaart im August 2023	28
Abbildung 15:	Demonstration der Ansäuerung und des Emissionsminderungserfolges auf einem Feldtag.....	29

Abkürzungsverzeichnis

ADS	AcidDigSoil
AZ	Ackerzahl
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
CAU	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
C _{org}	Gehalt des Bodens an organisch gebundenem Kohlenstoff
DÜV	Düngeverordnung
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
GR	Gärrest
ILV	Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik
K	Kalium
KAS	Kalkammonsalpeter
LFA	Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
MDÄ	Mineraldünger-Äquivalent
Mg	Magnesium
MV	Mecklenburg-Vorpommern
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NH ₃ -N	Ammoniak-Stickstoff
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
N _{min}	Gehalt eines Bodens an verfügbarem, mineralisiertem Stickstoff
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
NS	Niederschlag
P	Phosphor
PG	Prüfglied
Pfl.	Pflanzen
ü. NN	über Normal-Null
S _{min}	Gehalt des Bodens an mineralisiertem Schwefel
SI	anlehmiger Sand
ST	Steinhagen
THG	Treibhausgas
TS	Trockensubstanz

I. Kurzbericht

1 Aufgabenstellung

Mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes 2021 hat die Bundesregierung die Klimaschutzvorgaben verschärft und das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 verankert. Die Landwirtschaft soll bis 2030 mit einer THG-Minderung in Höhe von mindestens 65 Prozent gegenüber 1990 zur Zielerreichung beitragen (BMEL, 2021). Hier spielen nicht nur die Treibhausgase, sondern auch die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft eine wichtige Rolle. Ammoniak gilt als Luftschadstoff, der durch Erhöhung der Feinstaubbelastung, Eutrophierung und Lachgasbildung klimaschädigend wirkt.

Von 1990 bis 2019 sanken die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft in Deutschland um 18 Prozent. Die NEC-Richtlinie der EU sieht zusätzlich eine Minderung um 29 % bis 2030 gegenüber 2005 vor (Umweltbundesamt, 2021).

Ammoniak aus der Landwirtschaft entstammt vor allem der Tierhaltung sowie der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern. Bei der oberflächigen Ausbringung von Gülle bzw. Gärresten emittiert ein Großteil des als Ammonium gebundenen Stickstoffes in Form von flüchtigem Ammoniak in die Luft. Als emissionsmindernd haben sich die schnelle Einarbeitung der flüssigen Wirtschaftsdünger unmittelbar nach oder während deren Ausbringung und zumindest teilweise die Ausbringung mittels Schleppschläuchen herausgestellt.

Gärreste, die bei der Produktion von Biogas entstehen, sind wertvolle Wirtschaftsdünger, deren Nährstoffzusammensetzung sehr unterschiedlich sein kann. Ihnen gemein ist jedoch ein relativ hoher Anteil an Ammonium-Stickstoff bei neutralem bis leicht basischem pH-Wert. Dieser Umstand bedingt eine höhere Gefahr von gasförmigen Stickstoffverlusten, in Form von flüchtigem Ammoniak, im Vergleich zu Gülle.

Die Ansäuerung von Gülle und Gärresten bei der Ausbringung durch die Zugabe von Schwefelsäure auf pH-Werte um pH 6,4 hat sich in Dänemark als emissionsmindernde Maßnahme in der landwirtschaftlichen Praxis etabliert. Durch die pH-Wert-Absenkung verschiebt sich das Dissoziationsgleichgewicht zwischen Ammoniumion und Ammoniak in Richtung des Ammoniumions und der Dampfdruck des Ammoniaks sinkt, sodass gasförmige Ammoniakverluste stark reduziert werden.

Die Ansäuerung von flüssigen Wirtschaftsdüngern während der Ausbringung kann somit einen bedeutenden Beitrag zum Erreichen der hoch angesetzten deutschen Minderungsziele der Ammoniakemissionen leisten.

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

In einer dreijährigen Feldversuchsreihe am Versuchsstandort Gülzow in den Fruchtarten Winterweizen, Silomais und Winterraps sollte untersucht werden, unter welchen Bedingungen ein Ansäuern von flüssigen Wirtschaftsdüngern sinnvoll ist und welche positiven Wirkungen auf Emissionsminderung, Ertrag, Nährstoffeffizienz und die Qualität des Erntegutes entstehen. Die Messungen der Ammoniakemissionen begannen unmittelbar nach der Ausbringung der Wirtschaftsdünger und wurden für mindestens 5 Tage fortgeführt.

Aus den Ergebnissen sollten Handlungsempfehlungen zur Ansäuerung von flüssigen Wirtschaftsdüngern für die landwirtschaftliche Praxis erstellt werden.

Unser Kooperationspartner, das ILV Kiel, untersuchte den Einfluss von mit Schwefel- und Essigsäure angesäuerter Gülle in Verbindung mit verschiedenen Kosubstraten auf Prozessstabilität und Gasertrag des Biogasprozesses, sowie den Einfluss der Ansäuerung auf die Nährstoffverfügbarkeit und das Bodenmikrobiom.

3 Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag) *	Zielerreichung
AP 1 Feldversuche	09/2020 bis 08/2023	Die Feldversuche in den Fruchtarten Winterweizen, Silomais und Winterraps wurden in den drei Projektjahren wie geplant angelegt, durchgeführt und beerntet. Die Bodenprobennahmen erfolgten zu den geplanten Terminen.
AP 2 Emissionsmessungen	09/2020 bis 08/2023	Die Emissionsmessungen wurden in den 3 Anbaujahren zu den geplanten neun Terminen erfolgreich durchgeführt.
AP 3 Analytik	03/2021 bis 08/2023	Die Nährstoffanalysen der ausgebrachten Wirtschaftsdünger, Bodenanalysen und die Qualitätsanalysen des Erntegutes erfolgten wie geplant.
AP 4 Öffentlichkeitsarbeit und fachlicher Austausch	09/2020 bis 08/2023	Während der gesamten Projektlaufzeit wurde Öffentlichkeitsarbeit betrieben. Die Versuche und erste Ergebnisse wurden auf den Feldtagen und Vortragsveranstaltungen mit Beteiligung der LFA in MV vorgestellt. Auf drei institutsinternen Kolloquien wurden die Ergebnisse mit den Fachkollegen diskutiert.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit * (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung *
M 1.1 Feldversuche Winterweizen angelegt	09/2022	In jedem Versuchsjahr wie geplant fristgerecht durchgeführt
M 1.2 Feldversuche Silomais angelegt	04/2023	In jedem Versuchsjahr wie geplant fristgerecht durchgeführt
M 1.3 Feldversuche Winterraps angelegt	08/2023	In jedem Versuchsjahr wie geplant fristgerecht durchgeführt
M 1.4 Bodenprobenahme abgeschlossen	08/2023	Mit der Bodenprobenahme im Winterraps zu Vegetationsende 12/2023 abgeschlossen
M 2.1 Vergabeverfahren „Emissionsmessung“ abgeschlossen	09/2020	02/2021 abgeschlossen
M 2.2 Emissionsmessung Winterweizen abgeschlossen	04/2023	Für jedes Versuchsjahr wie geplant erreicht
M 2.3 Emissionsmessung Silomais abgeschlossen	06/2023	Für jedes Versuchsjahr wie geplant erreicht
M 2.4 Emissionsmessung Winterraps abgeschlossen	08/2023	Für jedes Versuchsjahr wie geplant erreicht
M 2.5 Messergebnisse aufbereitet und ausgewertet	08/2023	Fristgerecht erreicht
M 3.1 Vergabeverfahren „Analytik“ abgeschlossen	09/2020	Fristgerecht erreicht
M 3.2 Wirtschaftsdüngeranalysen abgeschlossen	08/2023	Fristgerecht erreicht
M 3.3 Analysen des Erntegutes abgeschlossen und ausgewertet	08/2023	11/2023 erreicht
M 4.1 Vorträge, Veröffentlichungen, Fachdiskussionen	08/2023	01/2024 mit Vortrag auf Projekttreffen „Säure+ im Feld“ innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen
M 4.2 Feldtage der LFA	07/2023	09/2023 mit Herbstfeldtag Gülzow abgeschlossen
M 5 Zwischenberichte und Abschlussbericht FNR	06/2023 10/2023	Fristgerecht erreicht

* Aufgrund des verspäteten Projektbeginns im Vergleich zum ursprünglichen Antrag und der Verlängerung der Projektlaufzeit um 3 Monate konnten die Bearbeitungszeiträume und Fälligkeiten lt. Balkenplan im Antrag nicht immer eingehalten werden.

b) Zusammenfassung

Am Versuchsstandort Gülzow wurde in einer dreijährigen Feldversuchsreihe in den Fruchtarten Winterweizen, Silomais und Winterraps untersucht, unter welchen Bedingungen eine Ansäuerung von flüssigen Wirtschaftsdüngern während der Ausbringung sinnvoll ist und welche positiven Wirkungen auf Emissionsminderung, Ertrag, Nährstoffeffizienz und die Qualität des Erntegutes entstehen.

Nach der Schleppschlauchausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern zu Vegetationsbeginn im Winterweizen wurden im 7-tägigen Messzeitraum bis zu 25 kg/ha Stickstoff in Form von flüchtigem Ammoniak in die Atmosphäre emittiert. Eine Absenkung des pH-Wertes der Substrate vor der Ausbringung auf pH 5,5 unter der Verwendung von Schwefelsäure reduzierte die Ammoniakemissionen deutlich um über 80 Prozent. In allen Versuchsjahren konnte ein positiver Effekt der Ansäuerung auf den Rohproteingehalt der Weizenkörner festgestellt werden. Eine Steigerung des Kornertrages konnte nicht in allen Versuchsjahren beobachtet werden. Ein positiver Ertragseffekt der Ansäuerung bleibt somit kaum planbar, da der Kornertrag maßgeblich durch die vorherrschenden Standort- und Witterungsbedingungen beeinflusst wird.

Die Feldansäuerung bietet die Möglichkeit einer emissionsarmen Gärrestausbringung in wachsende Silomaisbestände. Der Minderungseffekt auf die Ammoniakemissionen fällt jedoch aufgrund der höheren Tagestemperaturen geringer aus als zu Vegetationsbeginn im Winterweizen. Durch die zur pH-Wert-Absenkung der Substrate eingesetzte Schwefelsäure werden teils hohe Mengen an Schwefel mit ausgebracht, dieser ist in der Düngebilanz zu berücksichtigen und auf eine weitere mineralische Schwefeldüngung kann verzichtet werden. Besteht die Möglichkeit, die flüssigen Wirtschaftsdünger bereits vor der Maisaussaat auf der zu bestellenden Fläche direkt einzuarbeiten, sollte diese genutzt werden, denn auch die Ausbringung der Gärreste mit dem Güllegrubber reduzierte die Ammoniakemissionen im Vergleich zur unangesäuerten Schleppschlauchausbringung deutlich. Die Variante der direkt eingegrubberten Gärreste war zudem die ertragsstärkste Düngervariante im Silomaisversuch.

Auch im August zeigte die Ansäuerung von mittels Schleppschläuchen auf den Gerstenstoppelein ausgebrachten Gärresten vor der Winterrapsaussaat einen deutlichen Emissionsminderungseffekt. Die direkte Einarbeitung der Gärreste mit dem Güllegrubber reduzierte die Ammoniakemissionen noch effektiver und ist daher zu bevorzugen. Ein Einfluss der differenzierten Ausbringtechnik und pH-Wert-Absenkung bei der Stoppeldüngung auf den Rapsenertrag und die Erntegutqualität konnte, aufgrund des geringen Anteils der Herbsdüngung an der gedüngten Gesamtstickstoffmenge, nicht festgestellt werden.

Die Mehrkosten der Ansäuerung (Säurekosten, Ausbringtechnik, Säurelogistik) von flüssigen Wirtschaftsdüngern in der landwirtschaftlichen Praxis lassen sich bisher kaum durch die Einsparung an Mineraldünger und eventuelle Mehrerträge oder Qualitätssteigerungen der Ernteprodukte decken. Somit entsteht ein Förderbedarf für Ansäuerungsmaßnahmen, um die Wirtschaftlichkeit dieser Klimaschutz-Maßnahmen zu erhöhen und eine weitere Verbreitung in der Praxis zu ermöglichen.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1 Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Feldversuche

Im Arbeitspaket 1 werden zunächst die Standortcharakteristik des Versuchsstandortes, Material und Methoden, die Stufenbeschreibung und Versuchsdurchführung in den drei untersuchten Fruchtarten beschrieben. Der konkrete Einfluss der Ansäuerung auf die Ernteerträge und Qualitäten wird im Arbeitspaket 3 beschrieben.

Standortcharakteristik

Der Versuchsstandort Gülzow (Gülzow-Prüzen) liegt im Landkreis Rostock, ca. 5 km westlich von Güstrow in einer jungpleistozänen Grundmoränenlandschaft mit Geschiebemergel und Geschiebesanden als Ausgangssubstrat (Kahle et al. 2004). Der Norden der Gemeinde ist auf einer Höhe von 10 m ü. NN weitgehend flach, im Süden steigt das Gelände auf bis zu 70 m ü. NN an. Das Versuchsfeld liegt auf einer Höhe von 10 m ü. NN. Die Kurzcharakteristik des Versuchsstandortes Gülzow ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kurzcharakteristik des Versuchsstandortes

	Gülzow
Boden-Klima-Raum	101 (mittlere diluviale Böden MV und Uckermark)
Höhe ü. NN (m)	10
Bodenart	SI
Ackerzahl (AZ)	36-56
pH-Wert	6,6
Jahresmittel-Temperatur (°C)	9,1
Jahres-NS-Summe (mm)	552

Versuchsdurchführung

Winterweizen

Der Weizenversuch des ersten Versuchsjahres wurde als teilrandomisierte einfaktorielle Blockanlage mit 11 Prüfgliedern in vier Wiederholungen angelegt. Am 01.10.2020 wurde hier die Sorte Informer mit 280 keimfähigen Körnern/m² gedrillt. Pflanzenschutzmaßnahmen wurden analog zu den Landessortenversuchen der Stufe 2 durchgeführt. Die Anlage des Weizenversuches für das zweite Versuchsjahr erfolgte am 13.10.2021. Der Versuch wurde abweichend zum Vorjahr als Reaktion auf den späten Saattermin mit 320 keimfähigen Körnern/m² als randomisierte einfaktorielle Blockanlage ausgesät. Der Versuch für das dritte Versuchsjahr wurde am 26.09.2022 mit einer Saatstärke von 320 Körnern/m², ebenfalls als randomisierte einfaktorielle Blockanlage, angelegt.

Im Winterweizen erfolgte die Düngung mit flüssigen Wirtschaftsdüngern zu Vegetationsbeginn. Es wurden 80 kg/ha N (anrechenbarer Stickstoff, Anrechnungsfaktor MDÄ 0,6) mittels Schleppschauchtechnik in den wachsenden Bestand über Gülle/Gärreste in unterschiedlichen Ansäuerungsstufen ausgebracht (Abbildung 1). Zwei Gärreste und eine Rohgülle aus einem Jungrinderstall wurden in unterschiedlichen Ansäuerungsstu-

fen verglichen. Als Referenz diente eine Steigerung von mineralischem Stickstoffdünger (hier Kalkammonsalpeter). Im weiteren Vegetationsverlauf wurden alle Varianten, außer den mineralischen Steigerungen, mit 80 kg N (KAS) auf eine Gesamtstickstoffmenge von 160 kg/ha N aufgedüngt. Auf eine Ährengabe wurde bewusst verzichtet, um Düngungs- und Ansäuerungseffekte auf den Rohproteingehalt des Erntegutes nicht zu überdecken. Um Ertragseffekte des durch die Ansäuerung mit Schwefelsäure ausgebrachten Schwefels auszuschließen, wurde über den gesamten Versuch ein Schwefelausgleich von 25 kg/ha S in Form von Kieserit vorgenommen.

Tabelle 2 zeigt die Stufenbeschreibung der Düngung der Winterweizenversuche im Projekt. Eine Besonderheit stellten die Prüfglieder 10 und 11 dar. Hier handelte es sich um Gärreste, welche aus einer Praxisanlage in Niedersachsen stammten. Als Inputsubstrat der Biogasanlage kam hier unter anderem bereits im Stall mit Essigsäure angesäuerte Rindergülle zum Einsatz. Diese im Stall angesäuerte Rindergülle und die daraus resultierenden Gärreste wurden auch von unserem Kooperationspartner der Universität Kiel in ihren Gefäß-, Batch- und Grünlandversuchen zur Prozessstabilität, Methanertrag und Nährstoffverfügbarkeit eingesetzt. Alle weiteren im Gülzower Projektteil eingesetzten Güllen/Gärreste entstammten einem milchrinderhaltenden Landwirtschaftsbetrieb mit Biogasanlage in der Nähe von Gülzow.

Tabelle 2: Stufenbeschreibung Düngung Winterweizen 2021-2023

PG-Nr.	Technologie	Dünger	Ansäuerung	Menge kg/ha N		Emissionsmessung
				Gärrest MDÄ	Mineralisch	
1	Düngerstreuer	KAS	-	0	40 + 40	-
2	Düngerstreuer	KAS	-	0	60 + 60	-
3	Düngerstreuer	KAS	-	0	80 + 80	x
4	Schleppschlauch	Gärrest A	Nein	80	80	x
5	Schleppschlauch	Gärrest A	pH 5,5	80	80	x
6	Schleppschlauch	Gärrest A	pH 6,0	80	80	-
7	Schleppschlauch	Gärrest A	pH 6,5	80	80	x
8	Schleppschlauch	Rohgülle	Nein	80	80	x
9	Schleppschlauch	Rohgülle	pH 5,5	80	80	x
10	Schleppschlauch	Gärrest B	Nein	80	80	x
11	Schleppschlauch	Gärrest B	pH 5,5	80	80	x



Abbildung 1: Ausbringung der angesäuerten Gärreste mit Schleppschlauchtechnik zu Vegetationsbeginn 2021 im Winterweizen

An der Universität Kiel wurden auch die Auswirkungen der bei der Düngung eingesetzten, angesäuerten flüssigen Wirtschaftsdünger auf das Bodenmikrobiom untersucht. Hierzu wurden auch in Gülzow parzellenweise Bodenproben der Winterweizenversuche in den ersten beiden Anbauperioden genommen und sequenziert. Die Beprobung des Bodenmikrobioms erfolgte zu vier Terminen: zu Vegetationsbeginn, 4 Wochen und 8 Wochen nach Ausbringung der flüssigen Wirtschaftsdünger sowie nach der Ernte.

Silomais

Die Versuche im Silomais wurden Ende April des jeweiligen Versuchsjahres ausgesät. Als Versuchsdesign wurde ein lateinisches Rechteck mit 8 Prüfgliedern in 4 Wiederholungen gewählt. Dazu wurde, abweichend vom ursprünglichen Projektantrag, ein zusätzliches Prüfglied (PG 8) eingefügt. Es kam die Sorte KWS Benedictio in einer Saatstärke von 18 Körnern/m² zum Einsatz. Eine Vereinzellung auf 9 Pflanzen/m² erfolgte nach Aufgang.

In den Silomaisversuchen erfolgte die Düngung mit Gärresten entweder direkt zur Aussaat oder im 6-8-Blatt-Stadium etwa 7 Wochen nach dem Legen (Mitte Juni). Zur Aussaat wurden zwei Prüfglieder mit unangesäuerten Gärresten, ausgebracht mittels Schleppschauchtechnik bzw. Güllegrubber, gedüngt. Ein Prüfglied wurde vor der Aussaat ausschließlich mineralisch gedüngt, ein weiteres verblieb als Nullvariante ohne Düngung. Die verbliebenen 4 Prüfglieder erhielten ihre Stickstoffgabe über Gärreste in unterschiedlichen Ansäuerungsstufen zum zweiten Düngetermin.

Tabelle 3 sind die Düngetechnologie, Düngetermin und Ansäuerungsgrad der einzelnen Prüfglieder des Silomaisversuches zu entnehmen. Der Stickstoffbedarf beträgt hier laut Düngeverordnung 170 kg/ha, wobei in den ersten beiden Versuchsjahren je 40 kg/ha N_{min} anzurechnen waren, sodass eine Stickstoffmenge von 130 kg/ha N (anrechenbarer Stickstoff) ausgebracht wurde. Analog zum Winterweizenversuch wurde hier ein Anrechnungsfaktor von 0,6 (MDÄ) zur Bestimmung der auszubringenden Gärrestmenge genutzt. Die Ammoniak-Emissionsmessungen zu den jeweiligen Düngeterminen begannen direkt nach der Gärrestausbringung und wurden mindestens 5 Tage ununterbrochen fortgeführt.

Tabelle 3: Stufenbeschreibung Düngung Silomais 2021; 2022

PG-Nr.	Technologie	Dünger	Termin	Ansäuerung	Menge kg/ha N MDÄ	Emissionsmessung
1	ohne	-	-	-	0	x
2	Düngerstreuer	KAS	zur Aussaat	-	130	x
3	direkte Einarbeitung	Gärrest	zur Aussaat	Nein	130	x
4	Schleppschlauch	Gärrest	im 6-8-Blatt-Stadium	Nein	130	x
5	Schleppschlauch	Gärrest	im 6-8-Blatt-Stadium	pH 5,5	130	x
6	Schleppschlauch	Gärrest	im 6-8-Blatt-Stadium	pH 6,0	130	x
7	Schleppschlauch	Gärrest	im 6-8-Blatt-Stadium	pH 6,5	130	x
8	Schleppschlauch	Gärrest	zur Aussaat	Nein	130	x

Im Frühjahr des dritten Versuchsjahres ergab die Bodenuntersuchung der Fläche für den Silomaisversuch einen $N_{\min}$ -Wert von 60 kg/ha. Um diesen hohen $N_{\min}$ -Wert zu berücksichtigen wurde die zu düngende Stickstoffmenge (abweichend zu Tab. 3) auf 110 kg/ha anrechenbaren Stickstoff reduziert. Aufgrund der trockenen Witterung und schlechtem Aufgang des Silomaises wurde der Bestand im Versuchsjahr 2023 auf 8 Pfl./m² vereinzelt.

Winterraps

Die Gärrestedüngung zum Winterraps erfolgte am 16.08.2021 auf die Stoppeln der Vorfrucht (Wintergerste). Nach Beendigung der Emissionsmessungen wurde der Winterrapsversuch für die Anbauperiode 2021/22 am 26.08.2021 angelegt. Hier wurden 60 Körner/m² der Sorte Ludger gedrillt. Starkregen kurz nach dem Drillen und anschließende Trockenheit führte zur Verkrustung der Bodenoberfläche und einem schlechten Feldaufgang des Rapses, sodass der gesamte Versuch am 07.09. nochmals gedrillt werden musste.

Die vorgesehene Stickstoffmenge des ersten Düngetermins (Stoppel der Vorfrucht), Düngetechnologie, Ansäuerungsgrad und Einarbeitungszeit der Gärreste der einzelnen Prüfglieder sind Tabelle 4 zu entnehmen. Der Versuchsplanung liegt die Höchstmenge an Ammoniumstickstoff für die Herbstgabe zu Winterraps laut DÜV zugrunde. Zur Verbesserung der statistischen Auswertbarkeit des Versuches ist auch im Winterrapsversuch die Versuchsanlage als lateinisches Rechteck umgesetzt worden, was durch die Erweiterung um ein zusätzliches Prüfglied erreicht werden konnte.

Tabelle 4: Stufenbeschreibung Herstdüngung Winterraps 2021-2023

PG-Nr.	Technologie	Dünger	Ansäuerung	Menge kg/ha N	Emissionsmessung
1	ohne	-	-	0	x
2	Düngerstreuer	KAS	-	40	x
3	direkte Einarbeitung	Gärrest	Nein	30 NH ₄ -N	x
4	Schleppschlauch, Einarbeitung nach 4 Stunden	Gärrest	Nein	30 NH ₄ -N	x
5	Schleppschlauch	Gärrest	Nein	30 NH ₄ -N	x
6	Schleppschlauch	Gärrest	pH 5,5	30 NH ₄ -N	x
7	Schleppschlauch	Gärrest	pH 6,0	30 NH ₄ -N	x
8	direkte Einarbeitung	Gärrest	Nein	30 NH ₄ -N	x

Als Düngenniveau für den Winterraps wurden 210 kg/ha N festgelegt. Es erfolgte eine Anrechnung von 50 kg/ha N aus dem Herbst, sodass im Frühjahr alle Prüfglieder mit 100 kg N aus Ammonsulfatsalpeter (ASS) angedüngt wurden. Als zweite Gabe wurden 60 kg/ha N aus KAS gestreut. Eine Ausnahme bildet Prüfglied 8, hier wurde auf eine zweite Stickstoffgabe in Frühjahr verzichtet. Der Schwefelausgleich ließ sich über die erste Gabe mit ASS realisieren, somit musste kein zusätzlicher Schwefeldünger eingesetzt werden.

In der Anbauperiode 2022/23 erfolgte die Gärrestedüngung auf den Getreidestoppeln am 14.08.2022. Nach Beendigung der Emissionsmessungen wurde der Raps am 24.08.2022 gedrillt. Bei gleichem Düngenniveau wie im Vorjahr wurde der Rapsbestand zu Vegetationsbeginn mit YaraBela Sulfan (100 kg/ha N) angedüngt. Aufgrund höherer N_{min}-Werte im Boden im Vergleich zum Vorjahr, wurde die zweite Gabe mit KAS auf 40 kg/ha N reduziert. Ein zusätzlicher Schwefelausgleich war wiederum aufgrund des Schwefelgehaltes des Düngers YaraBela Sulfan nicht nötig.

Planmäßig erfolgten Mitte August 2023 die letzten Emissionsmessungen im Projekt nach der Gärrestdüngung auf den Gerstenstoppeln in Vorbereitung auf die Winterrapsaussaat. Mit der Beprobung des Boden-N_{min} zu Vegetationsende 2023 wurde der Versuch beendet. Eine Beerntung des Versuches war nicht vorgesehen.

Ansäuerung

Die Ansäuerung der Gülle/Gärreste auf den gewünschten pH-Wert erfolgte unmittelbar vor der Ausbringung durch schrittweise Zugabe von 37- bzw. 50-prozentiger Schwefelsäure, unter ständigem Umpumpen mittels der Güllepumpe des Ausbringers in einem separaten Container. Probleme bereitet generell die starke Schaumbildung und Volumenerhöhung beim Ansäuerungsprozess infolge der CO₂-Freisetzung bei Erreichen des Karbonatpuffers. Zudem machte die hohe Pufferkapazität der Gärreste die Säuredosierung zum Erreichen des Ziel-pH-Wertes aufwändig.

Eine praxisnahe Ansäuerung der Gärreste direkt im Verteiler zu den einzelnen Schleppschläuchen des Ausbringfahrzeuges, wie im System SyreN von BioCover A/S, ließ sich im Versuch nicht realisieren. Zum einen ist die Fahrstrecke in den Versuchspartzen zu kurz um den gewünschten Ziel-pH-Wert sicher einstellen zu können, zum anderen lagen die Kosten einer solche Ausbringtechnik für das Versuchswesen weit über dem Projektbudget.

Arbeitspaket 2: Emissionsmessungen

Die Messungen der Ammoniak-Emissionen wurden durch den Unterauftragnehmer A.F.E.R. e.V. Hohen Luckow realisiert. Diese wurden unter Verwendung von Dräger Polytron C300 Sensoren in der „closed-chamber-Methode“ durchgeführt. Die Messfühler zeichneten alle 10 Sekunden die Konzentration des Ammoniaks unter der, unmittelbar nach der Düngerapplikation in der Kernparzelle aufgesetzten, Messhaube auf. Die Messungen wurden ununterbrochen über mindestens 5 Tage ausgeführt.

Die Auswertung der Rohdaten erfolgte anschließend am PC. Positive Anstiege, außerhalb der erhobenen Blindwerte der einzelnen Sensoren, wurden aufsummiert, mit dem Ergebnis einer Summenkurve der Ammoniakkonzentration über den gesamten Messverlauf. Diese aufsummierten Gehalte ließen sich dann unter Einbeziehung von Temperatur, Luftdruck, Gaskonstante und molarer Masse des Ammoniaks in einen Ammoniakverlust in kg/ha NH₃-N umrechnen.

In folgenden Abbildungen werden für die jeweilige Variante jeweils die Mittelwerte des kumulierten Ammoniakstickstoffverlustes der drei Messverläufe dargestellt.

Emissionsmessungen zu Vegetationsbeginn im Winterweizen

Die Düngung mit flüssigen Wirtschaftsdüngern im Winterweizen erfolgte zu Vegetationsbeginn, sobald die Befahrbarkeit der Versuchsfläche im jeweiligen Versuchsjahr gegeben war. Abbildung 2 zeigt die kumulierten Ammoniakverluste ($\text{NH}_3\text{-N}$ kg/ha) im Messzeitraum (bis 168 h nach Ausbringung) im Mittel der drei Versuchsjahre. Trotz noch kühler Witterung und teils Nachtfrost im Zeitraum der Ausbringung zwischen Anfang März und Anfang April in den jeweiligen Versuchsjahren zeigten die Emissionsmessungen der unbehandelt mittels Schleppschläuchen ausgebrachten Substrate (pH 7,5 bis 7,8) Ammoniakstickstoff-Verluste von bis zu 25 kg/ha. Vor allem die pH-Wert-Absenkung der beiden ausgebrachten Gärreste auf pH 5,5 resultierte in deutlichen Minderungen der Ammoniakemissionen um über 80 %. Dieser sehr deutliche Effekt lässt sich dadurch erklären, dass sich das Dissoziationsgleichgewicht, welches in wässrigen Lösungen zwischen Ammoniumion und Ammoniak vorliegt, bei einer Absenkung des pH-Wertes auf unter pH 6,0 so deutlich in Richtung des Ammoniumions verschiebt, dass kein flüchtiges Ammoniak mehr nachgebildet wird, welches gasförmig entweichen kann. In zwei der drei Versuchsjahre zeigte die Ansäuerung der eingesetzten Rohgülle auf pH 5,5 einen ähnlichen Effekt wie bei den Gärresten. Lediglich im Versuchsjahr 2022 konnte bei der Ansäuerung der Rohgülle kein Emissionsminderungseffekt festgestellt werden. Da die Gründe hierfür nicht ermittelt werden konnten, wurden die 2022 erhobenen Messwerte bei der Mittelwertberechnung mit einbezogen, was den Emissionsminderungseffekt der Ansäuerung der Rohgülle im Mittel der drei Versuchsjahre abschwächt. Eine Ansäuerung des Gärrestes A auf pH 6,5 zeigte im Mittel der Jahre keinen Emissionsminderungseffekt. Auch unter den Messhauben des mit KAS gedüngten Prüfgliebes stieg die Ammoniakkonzentration im Messverlauf geringfügig an, sobald sich der mineralische Stickstoffdünger löste.

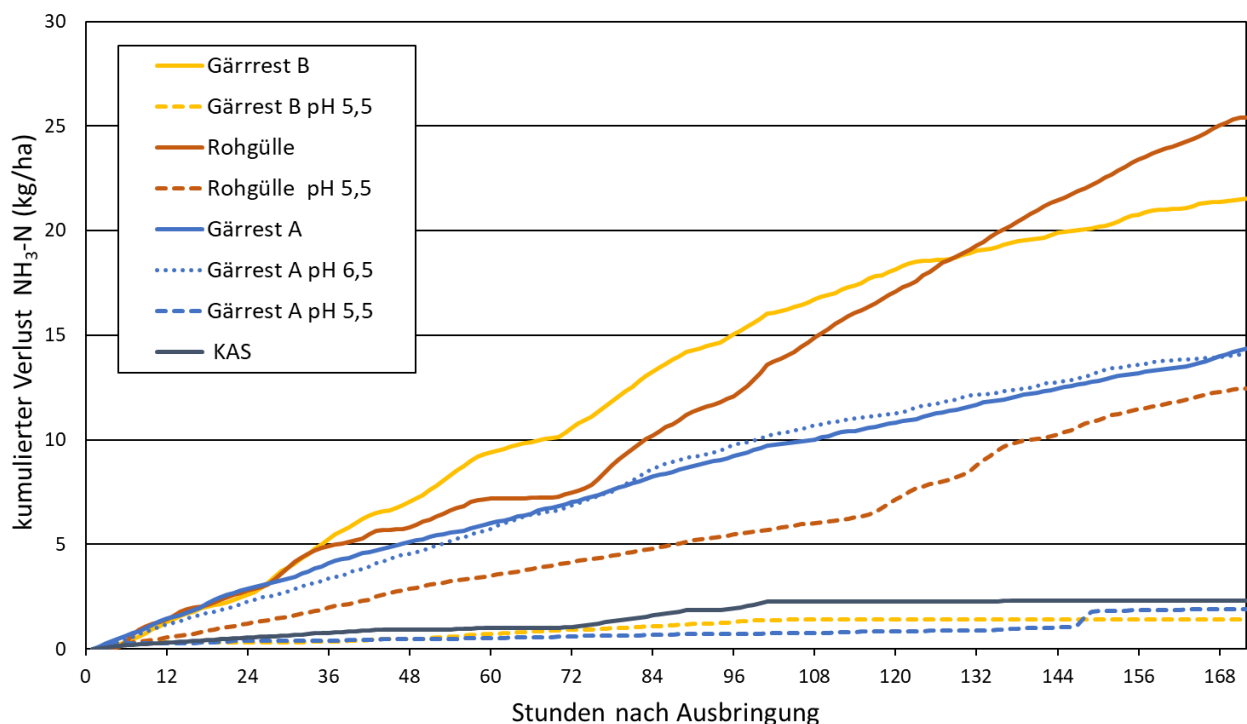


Abbildung 2: Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im Messzeitraum im Winterweizen nach der Gärrestdüngung im März/April im Mittel der Versuchsjahre

Emissionsmessungen im Silomais zur Aussaat

Im ersten Düngetermin im Silomais direkt zur Aussaat Ende April fand keine Ansäuerung des ausgebrachten Gärrestes statt. Hier wurden die Ammoniakemissionen einer ungedüngten Nullvariante, einer mineralisch gedüngten KAS-Variante, direkt eingegrubberten Gärresten und mittels Schleppschläuchen ausgebrachten Gärresten in zwei Wiederholungen gemessen. In Abbildung 3 sind die Mittelwerte des kumulierten Ammoniakstickstoff-Verlustes der beiden Messwiederholungen der Jahre 2021 bis 2023 über die Messdauer von 7 Tagen darstellt. Die direkte Einarbeitung der Gärreste reduzierte hier die Ammoniakemissionen ($\text{NH}_3\text{-N}$) um 20 kg/ha im Vergleich zur Schleppschlauchausbringung. In den drei Versuchsjahren zeigte sich, dass kaum Emissionen auftreten, sobald das gesamte Substrat nach der Einarbeitung mit Boden bedeckt ist. Tritt Substrat an der Bodenoberfläche aus steigen die Ammoniakemissionen sogleich wieder an. Die ungedüngte Nullvariante sowie die mit KAS mineralisch gedüngte Variante wiesen kaum Emissionen auf.

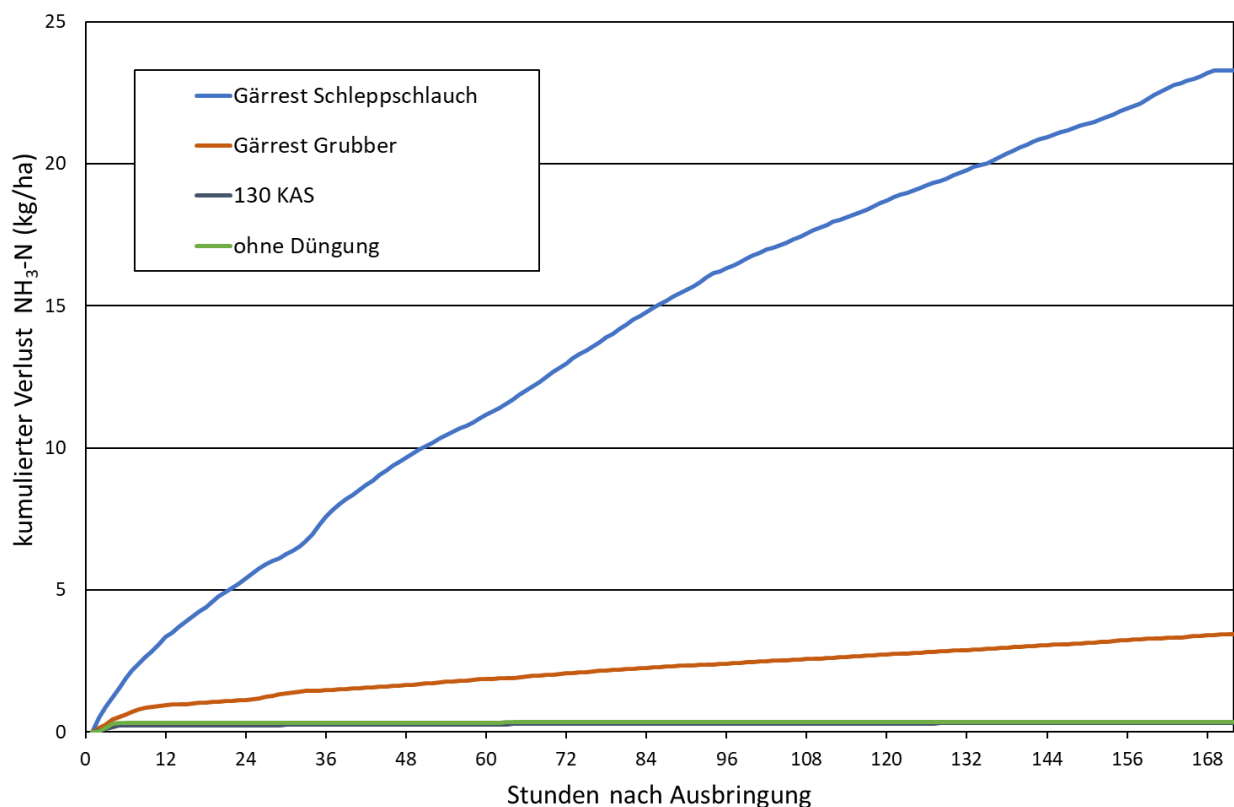


Abbildung 3: Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum im Silomais nach der Gärrestdüngung zur Aussaat im Mittel der Versuchsjahre

Emissionsmessungen im Silomais im 6-8-Blatt-Stadium

Abbildung 4 zeigt die Emissionen der auf unterschiedliche pH-Werte angesäuerte Gärreste der Messungen im 6-8-Blatt Stadium der Silomaisversuche im Projekt. Die unbehandelten Gärreste mit einem Ausgangswert von pH 7,7 emittierten zum zweiten Düngezeitpunkt ähnlich viel Ammoniak wie beim ersten Düngetermin nach der Aussaat Ende April. Im Gegensatz zu den Messungen im Winterweizen konnte hier im Messzeitraum durch die Ansäuerung auf pH 6,5 eine Emissionsreduktion von etwa 4 kg/ha Ammoniakstickstoff beobachtet werden. Eine Herabsetzung des pH-Wertes auf pH 6,0 und pH 5,5 reduzierte die Ammoniakemissionen noch weiter. Der größte Emissionsminderungseffekt, mit einer durchschnittlichen Minderung von über 60 % im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, konnte bei der Ansäuerungsstufe pH 5,5 festgestellt werden.

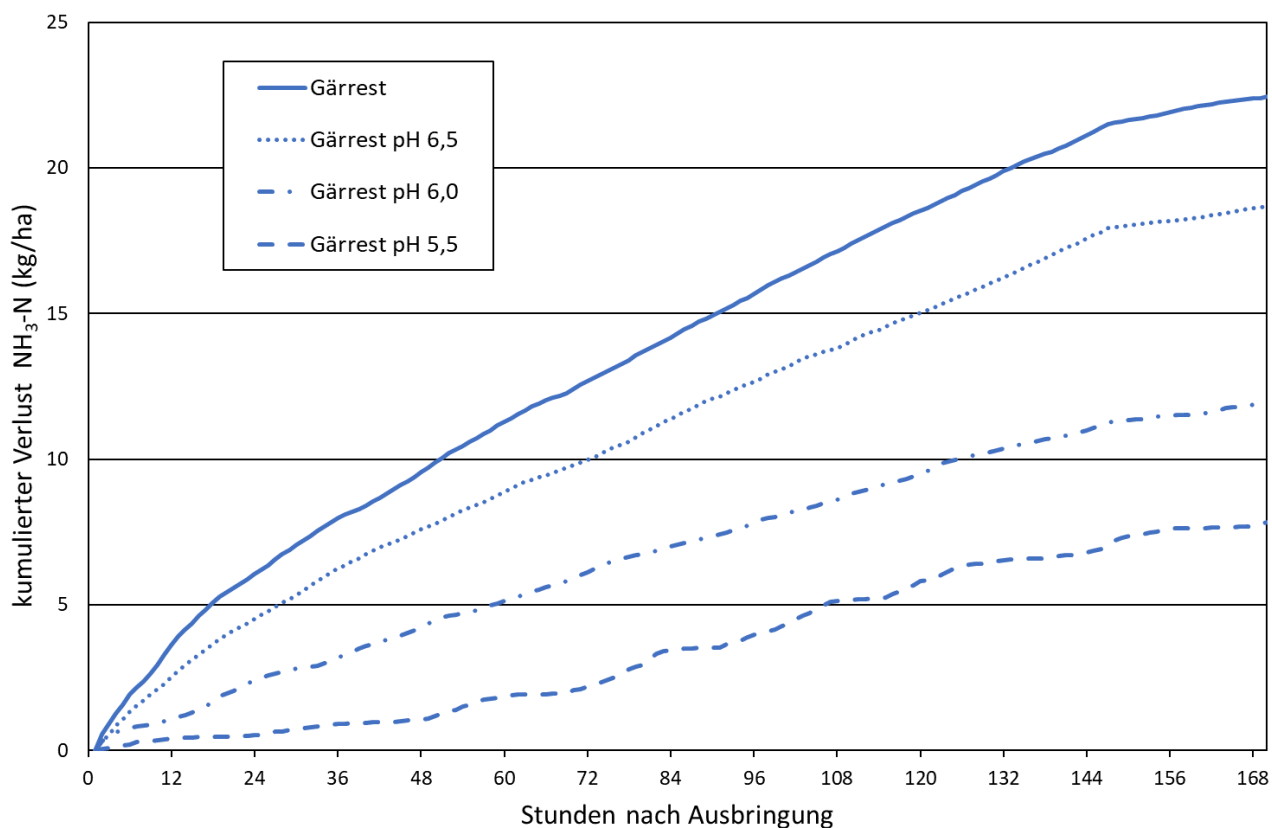


Abbildung 4: Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum im Silomais nach der Gärrestdüngung im 6-8-Blatt-Stadium im Mittel der Versuchsjahre

Emissionsmessungen zum Winterraps

Die Emissionsmessungen auf den Gerstenstoppen, welche in Vorbereitung auf die Rapsaussaat mit Gärresten gedüngt wurden, sind in Abbildung 5 dargestellt. Aufgrund der im Vergleich zum Winterweizen und Silomais geringeren Gärrestmenge (30 kg/ha Ammonium-N) bewegen sich auch die absoluten Stickstoffverluste in Form von emittiertem Ammoniak auf geringerem Niveau. Es ist unabhängig von der Ansäuerungsstufe festzustellen, dass 72 Stunden nach Ausbringung ein Großteil des Ammoniaks festgelegt oder in flüchtiges Ammoniak umgewandelt wurde, da die Emissionskurven ab diesem Zeitpunkt deutlich abflachten. Im Mittel der 3 Versuchsjahre emittierten die mit Schleppschlauchtechnik ausgebrachten unbehandelten Gärreste im Messzeitraum 6 kg/ha Ammoniakstickstoff. Sowohl eine Ansäuerung der Substrate auf pH 6,0 und pH 5,5 vor der Ausbringung, als auch die Einarbeitung einer unangesäuerten Variante vier Stunden nach der Schleppschlauchausbringung mittels Scheibenegge, reduzierten die Emissionen deutlich um über 50 %. Der stufenförmige Emissionsverlauf der Variante pH 6,0 resultiert aus einem deutlichen Tag-Nacht-Gang dieser Ansäuerungsstufe im zweiten Versuchsjahr. Dies bestätigt die Annahme, dass an dieser „kritischen Grenze“ um pH 6 eine besondere Temperaturabhängigkeit des Dissoziationsgleichgewichtes zwischen Ammoniumion und Ammoniak im Substrat vorhanden ist. Die mit dem Güllegrubber ausgebrachten Gärreste sowie die mineralische Stickstoffdüngung ließen kaum Ammoniakemissionen entstehen. Die Emissionen der ungedüngten Nullvariante lassen sich damit begründen, dass die Messhauben nicht hundertprozentig luftdicht auf der Bodenoberfläche abschließen und hier zum Teil die Emissionen der benachbarten organisch gedüngten Parzellen gemessen wurden.

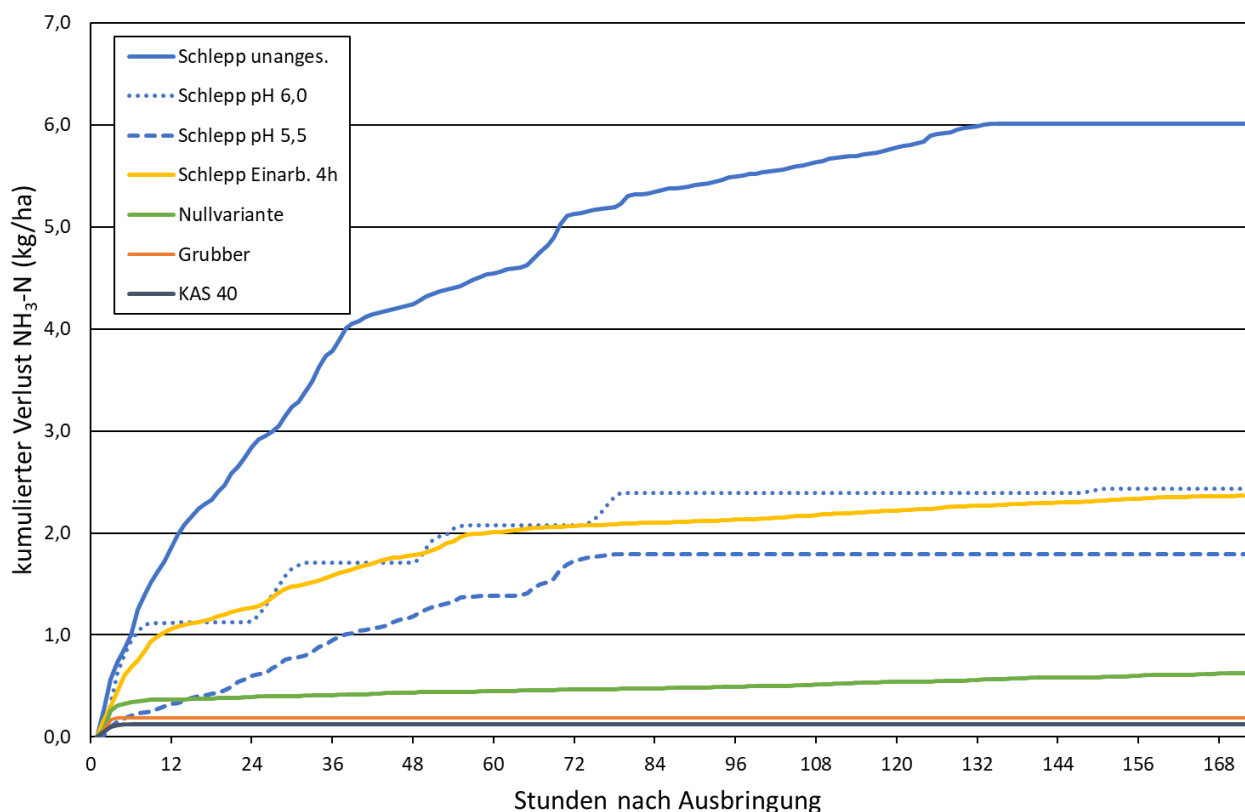


Abbildung 5: Kumulierte Ammoniakverluste der Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum zum Winterraps im Mittel der Versuchsjahre

Emissionen – Vergleich der Ausbringzeitpunkte

Um die Höhe der gemessenen Ammoniakemissionen trotz unterschiedlicher Ausbringmengen des Gärrestes A zu den verschiedenen Fruchtarten vergleichen zu können, wurde in Abbildung 6 nicht der absolute Verlust an Ammoniakstickstoff, sondern der Verlust von Ammoniakstickstoff in Prozent des ausgebrachten Ammoniums über den Messzeitraum im Mittel der drei Versuchsjahre dargestellt. Die Emissionsverläufe der unbehandelten Gärreste bei der Düngung im Winterweizen Ende März und beim Düngetermin zum Legen des Silomais Ende April sind nahezu identisch. Im 7-tägigen Messzeitraum gingen 20 Prozent des gedüngten Ammoniums in Form von flüchtigem Ammoniak verloren. Die Temperaturabhängigkeit des Dissoziationsgleichgewichtes zwischen Ammoniumion und Ammoniak in den Gärresten kam hier augenscheinlich kaum zum Tragen, da sich die mittleren Monatstemperaturen von März und April auch nur um 2 °Celsius unterschieden. Der Anstieg der Emissionskurve der Schleppschlauchausbringung von unangesäuerten Gärresten zum Raps, welche in den 3 Untersuchungsjahren jeweils Ende August stattfand, ist im Vergleich zu den Emissionskurven im Weizen und zum Mais deutlich steiler. Der steilere Anstieg scheint den hohen Umgebungstemperaturen im August geschuldet zu sein. Die Kurve flacht nach 48 Stunden deutlich ab. Die unangesäuerten mittels Schleppschlauchtechnik ausgebrachten Gärreste emittierten sowohl bei der Stoppeldüngung zum Raps als auch zu Vegetationsbeginn im Winterweizen und zum ersten Düngetermin zum Mais etwa 20 % des ausgebrachten Ammonium-N in Form von Ammoniak im Messzeitraum in die Luft. Der Emissionsminderungserfolg der Ansäuerung auf pH 5,5 fiel bei den deutlich höheren Temperaturen bei der Gärrestdüngung im Silomais Mitte Juni etwas geringer aus als bei der Düngung zu Vegetationsbeginn im Winterweizen. Die durchschnittlichen Tagestemperaturen lagen im Juni um über 13°C höher als im März, dennoch verringerten sich im Silomais die Ammoniakemissionen durch die Ansäuerung auf pH 5,5 deutlich auf unter 7 % des ausgebrachten Ammonium-N.

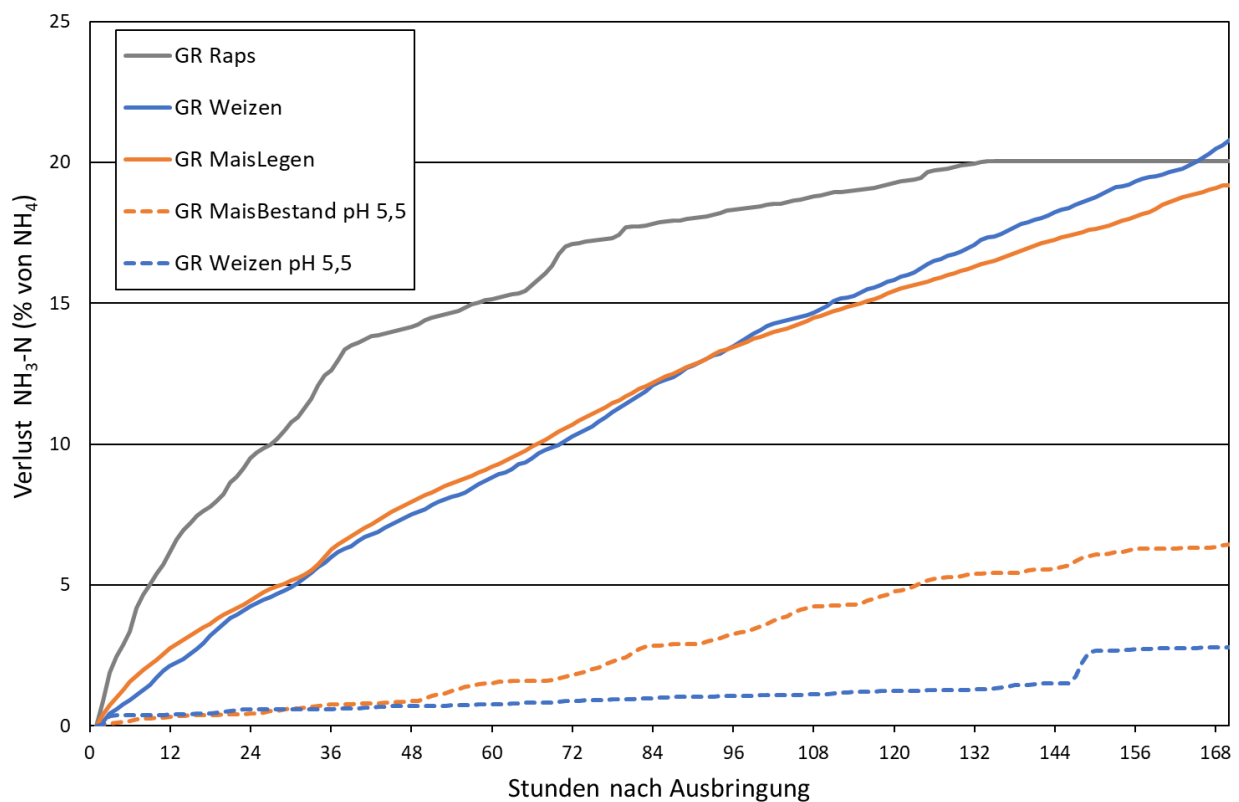


Abbildung 6: Kumulierte Ammoniakverluste in Prozent des ausgebrachten Ammoniums zu unterschiedlichen Ausbringterminen in den untersuchten Fruchtarten im 7-tägigen Messzeitraum im Mittel der Versuchsjahre

Arbeitspaket 3: Analytik

Laboranalysen

Die Laboranalysen der Gülzower Versuche im Projekt wurden überwiegend durch den Unterauftragnehmer LUFA Rostock realisiert und teilten sich in die Blöcke: Bodenuntersuchungen, Gülle-/Gärrestuntersuchungen und Qualitätsanalysen des Erntegutes.

In den drei zu untersuchenden Fruchtarten wurde der jeweilige Feldversuch zu Versuchsbeginn auf $N_{\min}$ (0-90 cm), $S_{\min}$ (0-60 cm), C_{org} , pH-Wert, P, K, und Mg beprobt und untersucht, um die Ausgangssituation der Nährstoffversorgung zu Versuchsbeginn festzustellen.

Nach der Beerntung der Versuche wurden dann prüfgliedweise Bodenproben gezogen. Hier wurden die Parameter $N_{\min}$ (0-90 cm), $S_{\min}$ (0-60 cm), C_{org} , P, K, Mg und pH-Wert analysiert, um die Auswirkungen der Düngevarianten und Ansäuerungsstufen auf die Nährstoffgehalte im Boden zu untersuchen.

Eine Ausnahme bildete die Fruchtart Winterraps. Aufgrund der hohen Auswaschungsgefahr von Nitrat über Winter im Raps wurden hier zusätzliche prüfgliedweise Untersuchungen auf $N_{\min}$ (0-90 cm) im Herbst und Frühjahr vorgenommen.

Die eingesetzten Güllen/Gärreste wurden vor der Ausbringung auf die Parameter: TS-Gehalt, pH-Wert, Gesamtstickstoff, Ammoniumstickstoff, P, K und Mg untersucht. Über den jeweiligen Gehalt an Gesamtstickstoff wurde anschließend die auszubringende Düngermenge je Flächeneinheit laut Versuchsplan bzw. DÜV bestimmt. Beim Winterraps erfolgte die Bemessung nach der im Herbst maximal zulässigen Höhe der Ammonium-N-Gabe von 30 kg/ha. Eine zusätzliche Bestimmung des Säurebedarfes zur Einstellung unterschiedlicher pH-Werte, durch die Mitarbeiter des Labors der LFA, erleichterte später auf dem Feld die Säuredosierung bei der Ansäuerung der Substrate erheblich.

Bei den Qualitätsanalysen des Erntegutes kamen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Die Bestimmung des Rohproteingehaltes der Weizenkörner war über das NIRS-Verfahren im Parzellenmähdrescher geplant. Leider zeigte diese Methode im ersten Versuchsjahr eine hohe Streuung der Messwerte, sodass, abweichend von der ursprünglichen Planung, zusätzliche Stickstoffanalysen des Erntegutes mittels der Kjeldahl-Methode bei der LUFA Rostock in Auftrag gegeben wurden. Der Rohproteingehalt der Rapskörner wurde prüfgliedweise im Labor mittels NIRS-Verfahren bestimmt. Für die Bestimmung des Stickstoffgehaltes des gehäckselten Silomaises erfolgte eine parzellenweise Untersuchung des Erntegutes mittels NIRS-Verfahren bei der LUFA Rostock.

Die folgend dargestellten Grafiken resultieren aus den Ernteerträgen und den o.g. Analyseergebnissen. Die dargestellten adjustierten Mittelwerte beruhen auf einer statistischen Serienauswertung der drei Versuchsjahre mit der Software pifstat.

Winterweizen

Abbildung 7 zeigt die adjustierten Mittelwerte des Kornertrages (Säulen) und den Rohproteingehalt im Korn (Rauten) der Serienauswertung der durchgeführten Winterweizenversuche. Unterschiedliche Säulenfarben stellen die verschiedenen ausgebrachten Substrate dar. Die graublauen Säulen bilden hier die mineralische Stickstoffsteigerung ab, mit zunehmender Stickstoffgabe steigen hier Kornerträge und Rohproteingehalte im Korn. Durch die Ansäuerung der Wirtschaftsdünger mit Schwefelsäure konnte eine signifikante Steigerung des Rohproteingehaltes im Korn festgestellt werden. Im Mittel der Jahre betrug diese 0,7 Prozentpunkte. Auch die Kornerträge ließen sich durch die Ansäuerung in zwei der drei Versuchsjahre geringfügig, aber den-

noch signifikant steigern. Es handelte sich 2022 und 2023 aber um Jahre mit ausgesprochener Vorsommertrockenheit und niedrigen Erträgen und es ist davon auszugehen, dass ein positiver Ertragseffekt vor allem dann auftritt, wenn andere Faktoren als die Düngung, hier die Trockenheit, ertragsbegrenzend wirken.

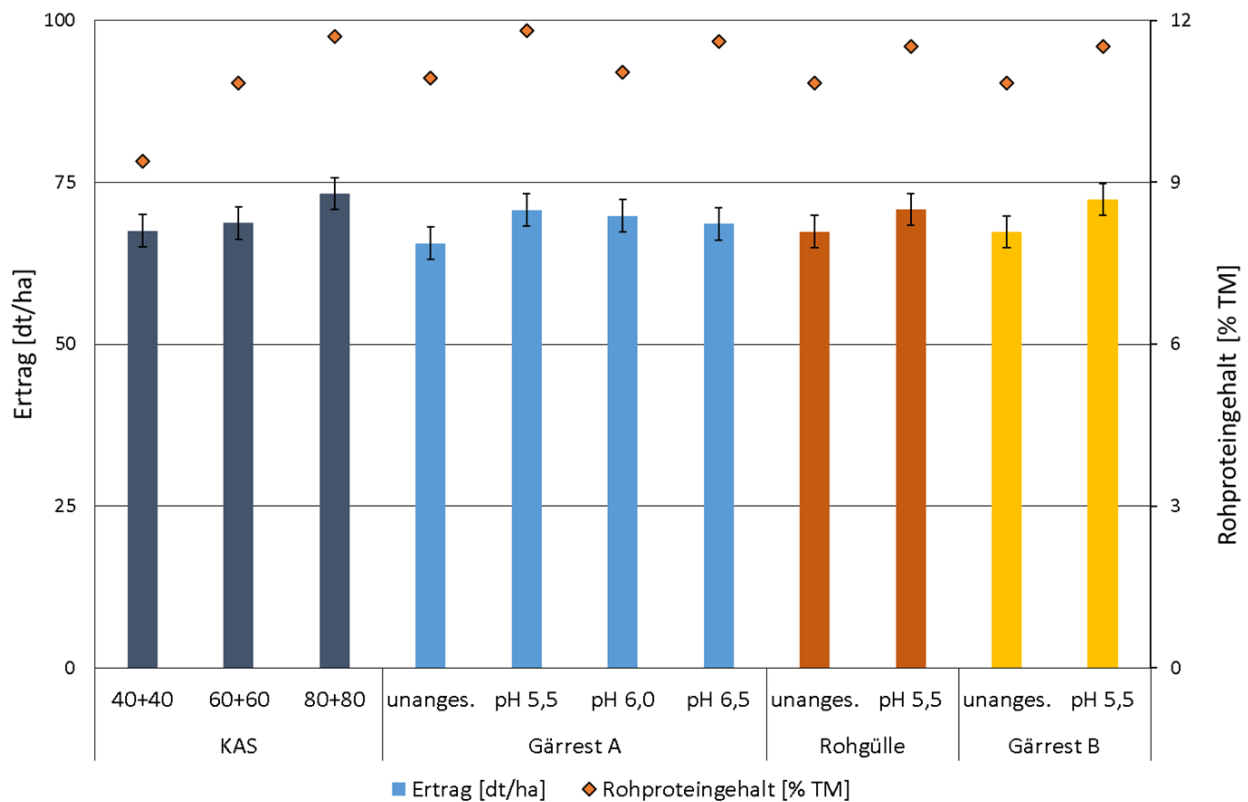


Abbildung 7: Adjustierte Mittelwerte des Kornertrages (dt/ha) und des Rohproteingehaltes (% TM) der Prüfglieder im Winterweizen im Mittel der Versuchsjahre

Bei der Darstellung der Stickstoffabfuhr als Produkt aus Kornertrag und Stickstoffgehalt im Korn (Abbildung 8) ist der positive Effekt der Ansäuerung deutlich sichtbar. Eine höhere N-Abfuhr in kg/ha bedeutet hier bei gleicher Düngemenge eine bessere Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs und ist in allen Ansäuerungsstufen im Vergleich zur unangesäuerten Variante des jeweiligen Substrates zu beobachten.

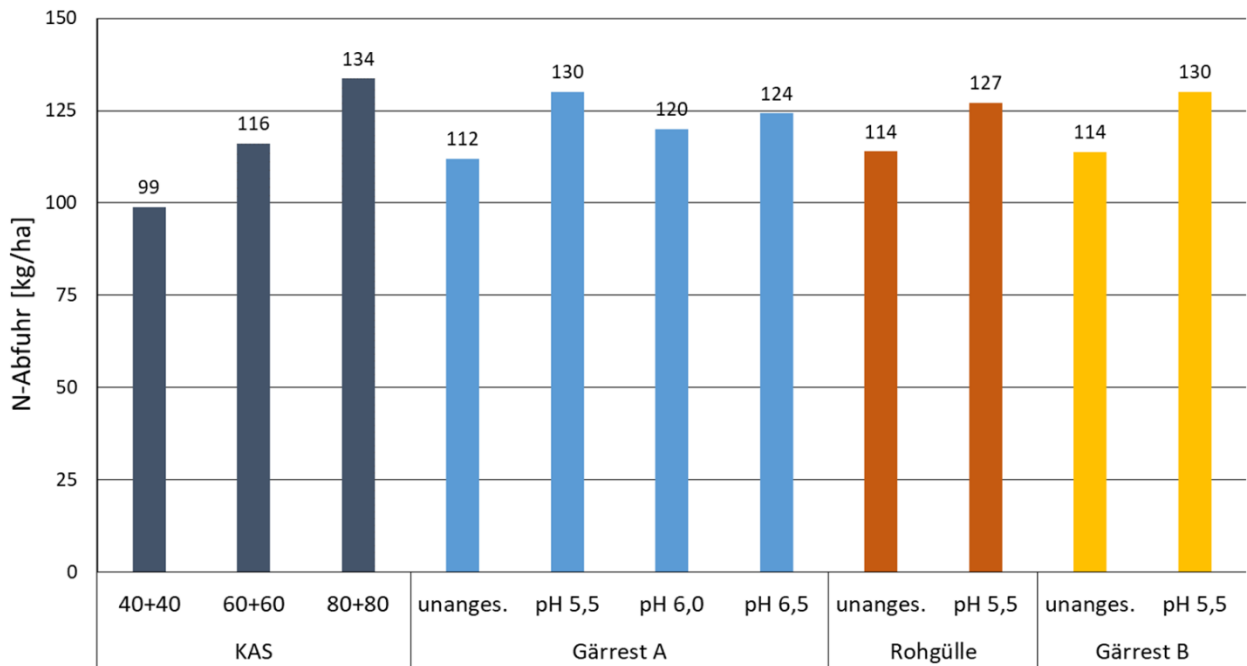


Abbildung 8: Adjustierte Mittelwerte der Stickstoff-Abfuhr (kg/ha) der Prüfglieder im Winterweizen im Mittel der Versuchsjahre

In Abbildung 9 sind die $N_{\min}$ - und $S_{\min}$ Gehalte im Boden unmittelbar nach der Weizenernte dargestellt. Zur Erreichung der Ziel-pH-Werte laut Versuchsplanung wurden zum Teil bis zu 10 Liter Schwefelsäure je Kubikmeter Substrat benötigt. Je Liter eingesetzter 96 prozentiger Schwefelsäure werden 0,6 kg Schwefel ausgebracht. Die dargestellten hohen $S_{\min}$ -Werte resultierten aus den hohen, praxisunüblichen Säuremengen, welche für die Ansäuerung auf pH-Werte von 6,0 und niedriger eingesetzt werden mussten. Trotz dieser hohen eingesetzten Säuremengen veränderten sich die Boden-pH-Werte durch die Ansäuerung nur marginal und verringerten sich im Vergleich zur Ausbringung unbehandelter Substrate nur um 0,1 bis 0,2 pH-Einheiten. Von einer bodenversauernden Wirkung der Ansäuerung kann somit nicht ausgegangen werden, wobei dieser durch einen Ausgleichskalkung begegnet werden könnte. Mineralische Stickstoffdünger wirken ähnlich versauernd.

Vor allem im zweiten Versuchsjahr waren deutliche Unterschiede in den $N_{\min}$ -Werten zwischen den Ansäuerungsstufen erkennbar. Fehlende Niederschläge ließen nicht die gesamte gedüngte Stickstoffmenge ertragswirksam werden und ein Teil des gedüngten Stickstoffs verblieb als $N_{\min}$ im Boden.

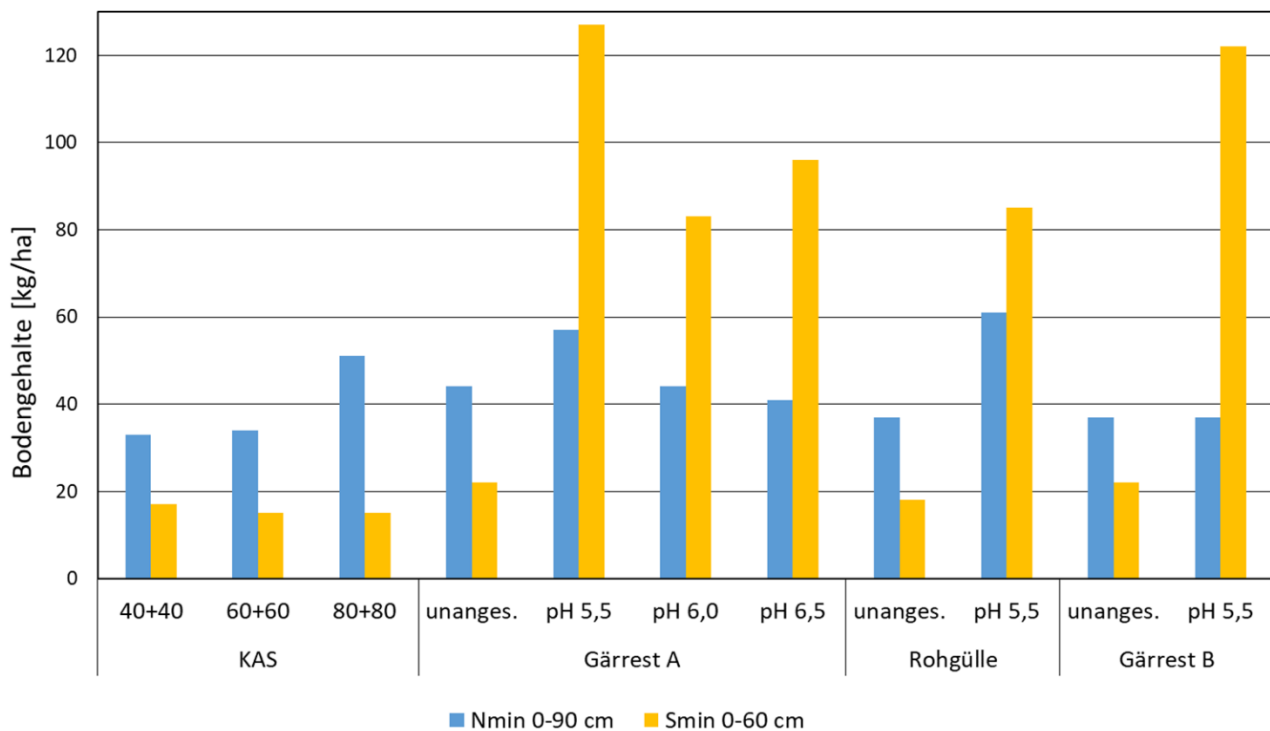


Abbildung 9: N_{min} und S_{min} Bodengehalte (kg/ha) der Prüfglieder nach der Winterweizenernte im Mittel der Versuchsjahre

Um auch die Unterschiede im Boden- N_{min} nach der Ernte zwischen den Prüfgliedern zu berücksichtigen, wurde der Parameter Stickstoff im System herangezogen (Abbildung 10). Dieser Parameter setzt sich aus der N-Abfuhr und dem Boden- N_{min} (0-90cm) nach der Ernte in kg/ha zusammen. Es ist ein klarer positiver Effekt der Ansäuerung zu erkennen, wobei die Prüfglieder, welche auf pH 5,5 angesäuert wurden, teils größere Mengen Stickstoff im System vorweisen als die rein mineralisch gedüngte Variante 80+80.

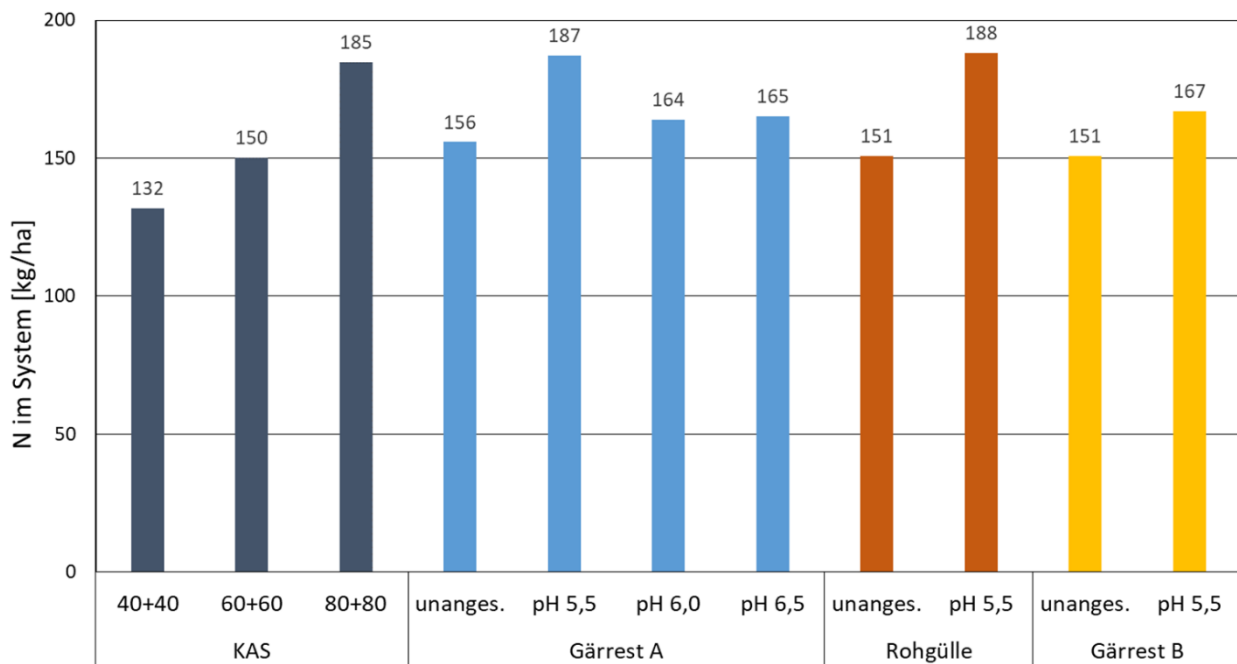


Abbildung 10: Stickstoff im System (kg/ha) der Prüfglieder im Winterweizen im Mittel der Versuchsjahre

Silomais

In Abbildung 11 sind die adjustierten Mittelwerte der Trockenmasseerträge (Säulen) und Rohproteingehalte (Rauten) des Silomaisversuches im Mittel der drei Versuchsjahre dargestellt. Unter den vier Prüfgliedern, welche ihre Stickstoffgabe zur Saat zum ersten Düngetermin erhalten haben, wies die Variante, bei der die Gärreste mittels Güllegrubber ausgebracht wurden, die höchsten Erträge auf. Mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnete Säulen weisen signifikante Ertragsunterschiede auf. Bei annähernd gleich hohen Rohproteingehalten in der Trockenmasse des Erntegutes war Grubber-Variante im Hinblick auf den Trockenmasseertrag auch der Variante mit rein mineralischer Stickstoffdüngung überlegen. Zum zweiten Düngetermin im 6-8-Blatt-Stadium wurde eine unbehandelte Schleppschlauchvariante mit drei Ansäuerungsstufen verglichen. Sowohl die Trockenmasseerträge als auch die Rohproteingehalte stiegen mit zunehmender Absenkung des pH-Wertes an. Das Ertragsniveau der Grubbervariante konnte mit der Ansäuerung der Gärreste jedoch nicht erreicht werden. Hierfür wird aber auch die relativ große Zeitspanne zwischen den beiden Düngeterminen und die damit verbundene langsamere Jugendentwicklung der Maispflanzen in den Varianten, welche ihre gesamte Stickstoffdüngung erst im 6-8 Blatt-Stadium erhalten haben, verantwortlich sein.

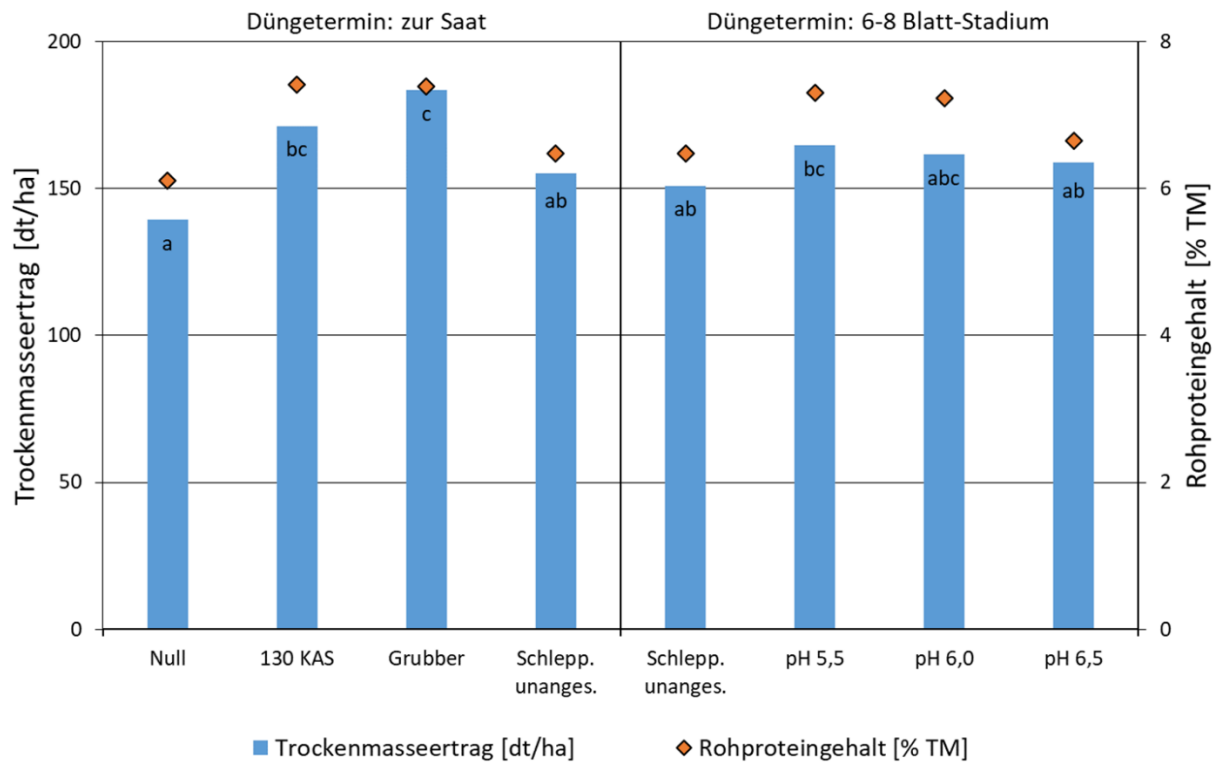


Abbildung 11: Adjustierte Mittelwerte des Trockenmasseertrages (dt/ha) und Rohproteingehaltes (% TM) der Prüfglieder im Silomais im Mittel der Versuchsjahre

Die adjustierten Mittelwerte der N-Abfuhr (Abbildung 12), welche aus dem Produkt von Trockenmasseertrag und Stickstoffgehalt im Erntegut gebildet wurden, visualisiert den eingangs genannten positiven Effekt der Ansäuerung noch deutlicher.

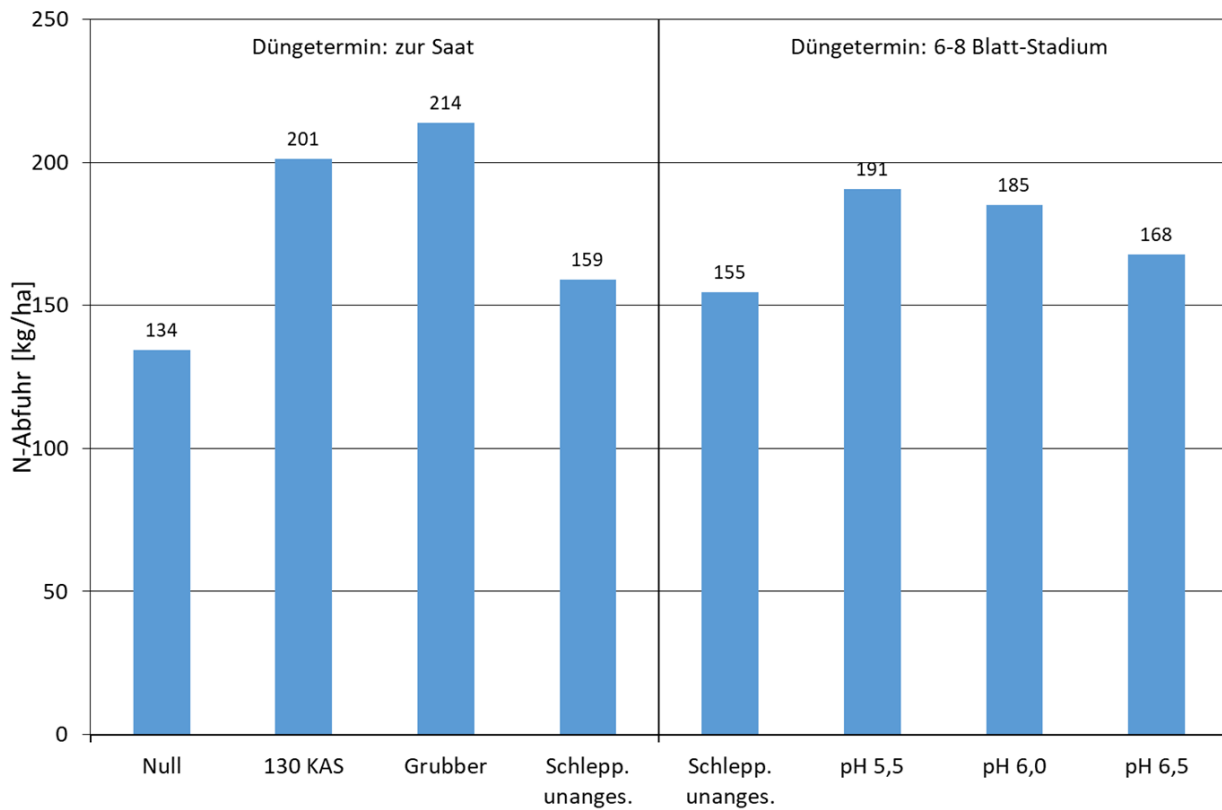


Abbildung 12: Stickstoff-Abfuhr (kg/ha) der Prüfglieder im Silomais im Mittel der Versuchsjahre

Auch auf den Stärkeertrag war ein positiver Effekt der Ansäuerung zu beobachten (Abbildung 13). Dieser fiel jedoch nicht ganz so deutlich aus wie der Effekt auf den Trockenmasseertrag. Eine effizientere Stickstoffdungung hat kaum Einfluss auf den Stärkegehalt der Maispflanzen. Stickstoffdungung und Stärkegehalt in der Gesamtpflanze sind sogar negativ korreliert. Eine Steigerung des Strkeertrages je Hektar resultierte demnach hauptsächlich aus der Steigerung des Trockenmasseertrages der angesäuert organisch gedüngten Varianten.

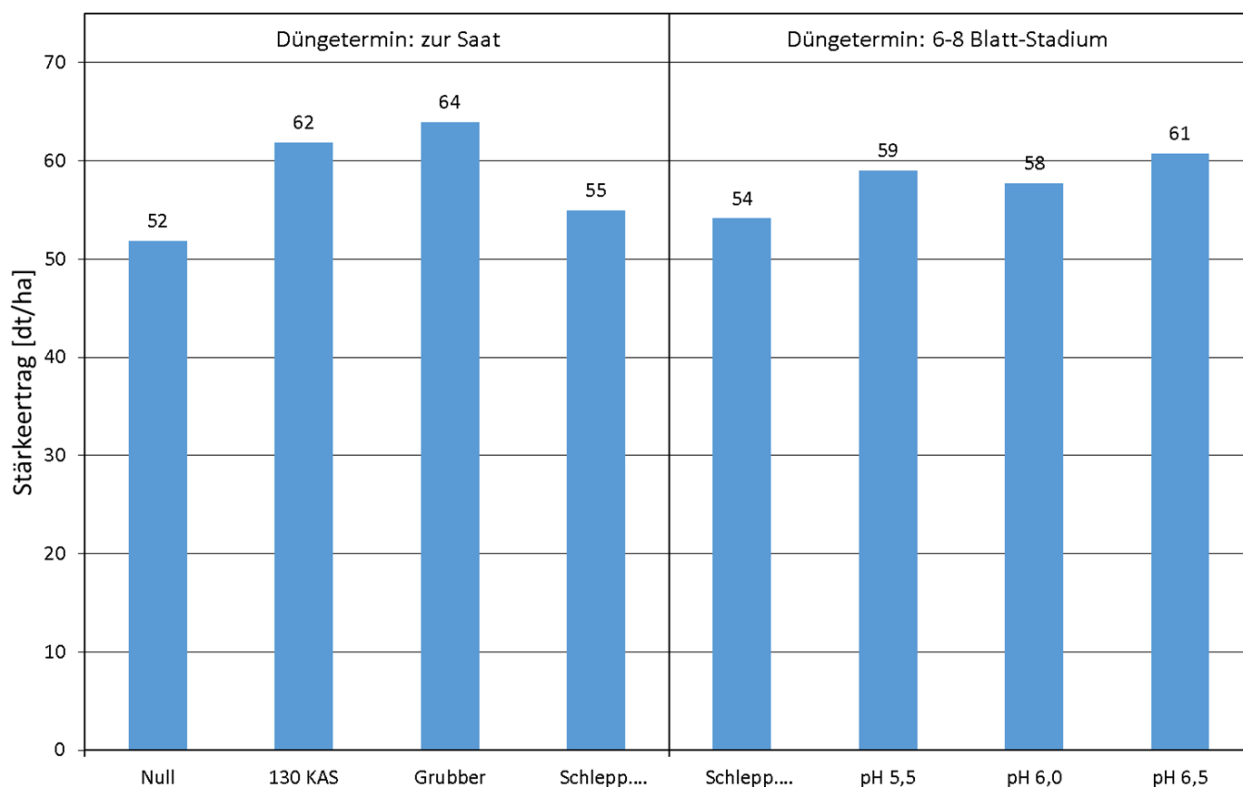


Abbildung 13: Adjustierte Mittelwerte des Strkeertrages (dt/ha) der Prüfglieder im Silomaisversuch im Mittel der Versuchsjahre

Winterraps

Eine differenzierte Dngerform, Ausbringtechnik und die Ansäuerung der mit Schleppschlauchtechnik ausgebrachten Gärreste vor der Aussaat des Winterrapses auf die Gerstenstoppeln (Abbildung 14) hatte keinen signifikanten Effekt auf den Kornertrag, Ölgehalt und Rohproteingehalt der einzelnen Prüfglieder im Winterraps. Die ausbleibenden Ertrags- und Qualittseffekte können im geringen Anteil der Herbstdüngung an der gedüngten Gesamtstickstoffmenge im Winterraps und der langen Zeitspanne von variierter Düngung im Herbst bis zur Rapsernte im darauffolgenden Jahr begründet sein. Auch in den N_{min} -Werten zu Vegetationsende, Vegetationsbeginn und nach der Ernte der einzelnen Prüfglieder konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Der mit der eingesetzten Schwefelsäure ausgebrachte Schwefel führte, wie auch

bei den anderen untersuchten Fruchtarten, zu einer Erhöhung der $S_{\min}$ -Werte in den angesäuerten Prüfgliedern bei den Bodenuntersuchungen nach der Ernte.



Abbildung 14: Emissionsmessungen auf den Gerstenstoppeln vor der Rapsaussaat im August 2023

Arbeitspaket 4: Öffentlichkeitsarbeit und Austausch

Die Öffentlichkeitsarbeit war und ist ein wichtiger Bestandteil des Projektes. Bereits kurz nach Projektbeginn wurde mit einem Artikel in der Bauernzeitung (51. Woche 2020) über das Verbundprojekt AcidDigSoil und dessen Inhalte und Forschungsfragen, sowie den bisherigen Wissensstand informiert. Das Projekt und erste Ergebnisse der Emissionsmessungen in Gülzow wurden pandemiebedingt einem kleineren Kreis von Besuchern auf den Mähdruschtagen in Gülzow im Juni 2021, sowie als Podcast auf der Internetseite der LFA vorgestellt. LFA-intern wurden die Versuchsergebnisse jährlich auf den Institutskolloquien vorgestellt und beraten. Die Bauernzeitung berichtete in einem kurzen Beitrag in der Rubrik „Neues aus der Landesforschung“ in der 9. Woche 2022 über die Ergebnisse des ersten Versuchsjahres. Auch in den Jahren 2022 und 2023 wurden ausgewählte Versuche und Ergebnisse auf insgesamt 10 Feldtagen unter Beteiligung der LFA einem breiten Besucherpublikum vorgestellt. An zwei separaten Feldtagen in Gülzow für Studenten der Hochschule Neubrandenburg und Schüler der Fachschule für Agrarwirtschaft Bockhorst wurde unter anderem auch das Projekt AcidDigSoil vorgestellt. Mit der Betreuung der „Modellregion Mecklenburg-Vorpommern“ des Modell- und Demonstrationsvorhabens „Säure⁺ im Feld“ ist die LFA seit September 2022 Teil eines deutschlandweiten Verbundprojektes in dem das Verfahren der Ansäuerung von Gülle und Gärresten mit Großtechnik auf Praxisbetrieben eingesetzt und demonstriert wird. Bereits bei der Antragstellung zu diesem Projekt und bei der Praxispartnersuche konnten die Ergebnisse aus den Feldversuchen des Projektes AcidDigSoil genutzt werden. Auf den Projekttreffen des o.g. Verbundvorhabens „Säure⁺ im Feld“ konnten die Ergebnisse aus den Gülzower Exaktversuchen den Verbundpartnern vorgestellt werden.

Auf den Feldtagen in 2023 wurde neben einer Postervorstellung auch die emissionsmindernde Wirkung der Ansäuerung während der Ausbringung demonstriert. Hierzu wurden geringe Teilmengen Gärreste im Becherglas angesäuert, oberflächlich auf dem Boden verteilt und mit einer transparenten Haube abgedeckt. Mobile Ammoniakmessgeräte visualisierten den Emissionsminderungserfolg durch deutlich geringere Ammoniakgehalte unter der Haube mit angesäuerten Gärresten (Abbildung 15).



Abbildung 15: Demonstration der Ansäuerung und des Emissionsminderungserfolges auf einem Feldtag

Der Austausch mit Kollegen von der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel erfolgte regelmäßig sowohl über Telefonate, Präsenztreffen oder Onlinemeetings.

2 Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Es wurden keine Schutzrechte von der LFA oder anderen am Vorhaben Beteiligter gemacht oder in Anspruch genommen.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Kurzfristig:

Durch die Senkung der gasförmigen Stickstoffverluste erhöht sich die Stickstoffdüngeneffizienz der angesäuert ausgebrachten Wirtschaftsdünger, somit lassen sich zum Teil die Erträge steigern und Erntegutqualitäten der angebauten Kulturen verbessern. Durch die Erhöhung des Stickstoffausnutzungsgrades der Gärreste als Wirtschaftsdünger können mineralische Stickstoffdünger entsprechend eingespart werden.

Eine Steigerung der Effizienz des ausgebrachten Stickstoffs kann dazu beitragen den Ertragsabfall auf Flächen mit Düngere restriktionen (mit Nitrat belastete Gebiete) zu reduzieren oder sogar zu kompensieren.

Die Ansäuerung während der Schleppschlauchausbringung verbindet ein hohes Emissionsminderungspotential mit arbeitswirtschaftlichen Vorteilen. Verfahren, mit denen ähnliche Effekte erreicht werden können (Schlitztechnik, Güllegrubber) haben geringere Arbeitsbreiten und sind somit mit höherem Kraftstoffbedarf und Arbeitszeitaufwand verbunden.

Die emissionsarme Ausbringung von angesäuerten Gärresten mittels Schleppschlauchtechnik bei Witterungsbedingungen mit hohem Emissionspotenzial (hohe Temperaturen, hohe Windgeschwindigkeiten), ohne diese in den Boden einarbeiten zu müssen, ermöglicht den Landwirten eine Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern in die wachsenden Bestände, somit können Arbeitsspitzen bspw. zur Maisaussaat gebrochen werden.

Durch die Ansäuerung mit Schwefelsäure werden auch erhebliche Mengen an Schwefel auf die Fläche ausgebracht. Der Schwefelbedarf der Kultur ist somit meist gedeckt, eine zusätzliche Schwefeldüngung wird eingespart. Die Schwefelzufuhr ist in der Düngebilanz zu berücksichtigen.

Mittel- und langfristig:

Obwohl Ammoniak kein direktes Klimagas ist, wird ca. 1 % des emittierten Ammoniaks in der Atmosphäre zu Lachgas umgesetzt und besitzt dort die entsprechende Treibhauswirkung. Eine Verringerung der Ammoniakemissionen bei der Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern hat somit auch positive Effekte auf den Klimaschutz zur Folge.

Durch die Einsparung von mineralischen Stickstoffdüngern werden die erheblichen Treibhausgasemissionen aus der Mineraldüngerproduktion reduziert. Nach der angesäuerten Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger ist keine zusätzliche Schwefeldüngung der Kulturen nötig, somit werden die Herstellungsemissionen zusätzlichen Schwefeldüngers vermieden.

Die Minderung der Ammoniakemissionen aus der Wirtschaftsdüngerausbringung kann einen erheblichen Beitrag zur Einhaltung der Minderungsziele der NEC-Richtlinie leisten und somit die Höhe der Strafzahlungen bei Nichteinhaltung verringern. Jede Tonne nicht emittiertes Ammoniak senkt zudem die extrem hohen Umweltkosten der Luftverschmutzung durch Ammoniakemissionen, welche vor allem durch Kosten für Gesundheitsschäden und Biodiversitätsverluste hervorgerufen werden (Umweltbundesamt, 2020).

Im Vergleich zur herkömmlichen Schleppschlauchausbringung entstehen für die angesäuerte Ausbringung zusätzliche Kosten. Lohnunternehmer berechnen derzeit einen Mehraufwand der Ausbringung von zirka 0,50 € je Kubikmeter ausgebrachtem Substrat, zuzüglich der Säurekosten von 0,50 € je Liter eingesetzter Säure und einer Pauschale für die Säurelogistik. So entstehen durch die angesäuerte Ausbringung oft Mehrkosten von 50 €/ha und mehr, welche sich nicht sicher durch Mineraldüngereinsparung, eventuelle Ertragssteigerungen und verbesserte Erntegutqualitäten kompensieren lassen. Eine Förderung der emissionsarmen Ausbringung seitens der Politik und die Honorierung der Reduktion der deutschen Ammoniakemissionen, welche hohe Umweltkosten verursachen, bleibt wünschenswert.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse können mit deren Veröffentlichung kurz- und mittelfristig dazu beitragen, die Akzeptanz des Ansäuerungsverfahrens in der landwirtschaftlichen Praxis zu erhöhen. Eine Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Gärrestdüngung auch unter Einbeziehung der Ansäuerung während der Ausbringung für Landwirte ist von der LFA beabsichtigt.

Die technische Lösung der Feldansäuerung ist durch das bereits bekannte Ansäuerungssystem SyreN aus Dänemark gegeben. Mittlerweile wird dieses System in Deutschland über die Firma Vogelsang vertrieben und stetig weiterentwickelt.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zur Minderung der Ammoniakemissionen, Steigerung der Stickstoffeffizienz und die Widerlegung der Bedenken einer stark bodenversauernden Wirkung der Ansäuerung wurden und werden im Verbundprojekt „Säure+ im Feld“ genutzt um Praxispartner für dieses Modell- und Demonstrationsvorhaben zu gewinnen und die positiven Effekte der Ansäuerung darzustellen. Ziel des Modell- und Demonstrationsvorhabens ist die Steigerung der Bekanntheit der Ansäuerung von flüssigen Wirtschaftsdüngern während der Ausbringung und die Einführung der Feldansäuerung in der landwirtschaftlichen Praxis in Deutschland.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Eine weitere Differenzierung des zur deutlichen Ammoniakemissionsreduktion nötigen Ansäuerungsgrades von flüssigen Wirtschaftsdüngern mit praxisüblichen Säuremengen zu unterschiedlichen Ausbringungsbedingungen ist wünschenswert. Zudem sollte untersucht werden, wie sich eine reduzierte Stickstoffdüngung in Verbindung mit der angesäuerten Ausbringung von Wirtschaftsdüngern auf Erträge und Qualitäten auswirken, um die Ansäuerung als Möglichkeit der Ertragssicherung in Gebieten mit Düngerestriktionen zu prüfen.

Durch die LFA und die CAU zu Kiel wurde, angeregt durch die „Bekanntmachung über die Förderung von Vorhaben zur Minderung von Treibhausgasemissionen und zur Energieeinsparung durch Verfahren und technische Ansätze in der Pflanzenproduktion und Verarbeitung“ der BLE, eine Projektskizze mit dem Arbeitstitel „Reduzierung der Säuremengen durch Low-Dose Acidification im Vergleich mit Ansäuerung der Diffusions-

oberflächen bei der Ansäuerung von Wirtschaftsdüngern“ eingereicht. Im Projektteil der LFA stehen Emissionsmessungen und die Verfahrensentwicklung im Vordergrund. Die Skizze wurde positiv bewertet und eine Aufforderung zur Antragstellung liegt bereits vor.

Wie bereits unter a) beschrieben, lassen sich die Mehrkosten der Ansäuerung (Säurekosten, Ausbringtechnik, Säurelogistik) von flüssigen Wirtschaftsdüngern in der landwirtschaftlichen Praxis kaum durch die Einsparung an Mineraldünger und eventuelle Mehrerträge oder Qualitätssteigerungen der Ernteprodukte decken. Somit entsteht zumindest in der Pilotphase ein Förderbedarf für Ansäuerungsmaßnahmen, um die Wirtschaftlichkeit dieser Klimaschutz-Maßnahmen zu erhöhen und eine weitere Verbreitung in der Praxis zu ermöglichen.

Die Etablierung von Ansäuerungsmaßnahmen bei der Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger kann so einen erheblichen Beitrag zur Einhaltung der Ziele der NEC-Richtlinie und somit zum Klimaschutz leisten.

Eine Anerkennung der Ansäuerung als emissionsmindernde Ausbringungstechnik seitens der Fachbehörden in Mecklenburg-Vorpommern und anderen Bundesländern ist zu diskutieren.

3 Erkenntnisse von Dritten

Im Austausch mit den im „Projekt Säure⁺ im Feld“ tätigen Projektpartnern und den dänischen Entwicklern der technischen Lösungen der angesäuerten Schleppschlauchausbringung wurde klar, dass in der landwirtschaftlichen Praxis kaum größere Säuremengen als 4 Liter 98-prozentige Schwefelsäure je m³ ausgebrachten Gärrestes eingesetzt werden. In Dänemark beschränkt man sich aufgrund wirtschaftlicher Gesichtspunkte sogar auf maximal 3 Liter Säure/m³ Substrat und erreicht damit Emissionsminderungen von 30 bis 40 Prozent (Toft, 2023).

Versuchsergebnisse des EU-Projektes der Ostseeanrainerstaaten „baltic slurry acidification“ zeigen, dass die Ansäuerung von Gärresten mit Schwefelsäure eine effektive Möglichkeit darstellt, Ammoniakemissionen bei der Ausbringung zu reduzieren. Die Trockenmasseerträge der angesäuerten Düngevarianten des ersten Versuchsjahres des Dauergrünlandversuches lagen hier signifikant über denen der nicht angesäuerten. Im betreffenden Versuch konnten die Ammoniak-Emissionen durch eine Ansäuerung des Substrates auf einen pH-Wert von 5,5 bis 6 um etwa 10 kg/ha NH₃-N reduziert werden (Neumann et al., 2018).

Untersuchungen zur Effizienz der Stickstoffausnutzung bei der Düngung mit Gärresten zeigen große Jahreseffekte. Um den Einfluss des Bodens und die Auswirkungen und Effizienz der Düngung mit Gärresten auf das Pflanzenwachstum besser zu verstehen und standortspezifische Effekte von Witterungsbedingungen und Ausbringungstechnik sowie deren Interaktion auszuschließen, wurden im Südosten Deutschlands zweijährige Versuche in Winter- und Sommerweizen angelegt. Hierzu wurden auf einem Versuchsfeld Gruben ausgehoben und mit Böden aus sieben Regionen Bayerns wieder verfüllt. Der Bodeneinfluss auf die Kulturparameter war hier im ersten Versuchsjahr im Vergleich zum zweiten Versuchsjahr ausgeprägter. Im zweiten Versuchsjahr hingegen war der Einfluss unterschiedlicher Stickstoffquellen (mineralisch und organisch-mineralisch) auf den Kornertrag und die Kornzahl pro Ähre deutlicher und ein trendmäßig höherer Effekt der Umweltbedingungen zu erkennen. Insgesamt war die Ausbringung von angesäuerten Gärresten in Kombination mit mineralischen Stickstoffdüngern ebenso effektiv wie die alleinige mineralische Düngung der Bestände (de França et al., 2021).

Auch im Verbundprojekt „GülleBest“ konnten in den Untersuchungsjahren 2019 und 2020 nicht an allen Standorten signifikante Effekte der Ansäuerung auf den Kornertrag des Winterweizens beobachtet werden. Ein Ertragseffekt der Ansäuerung bleibt somit kaum planbar, da der Effekt maßgeblich durch Standortbedin-

gungen und durch die vorherrschende Witterung im jeweiligen Jahr beeinflusst wird. Auch im Projekt „Güllebest“ erfolgte eine pH-Wert-Absenkung der Substrate auf pH 5,5. Die Höhe der kumulierten Verluste an Ammoniak-Stickstoff im 7-tägigen Messzeitraum, sowie die durch die Ansäuerung erreichte Emissionsminderung sind mit den in Gülzow erzielten Ergebnissen vergleichbar und unterlagen einem klaren Standort- und Jahreseffekt. Die Ergebnisse aus „GülleBest“ zeigen auch, dass zur optimalen NH_3 -Minderung die Reduktion des pH-Wertes der Substrate auf unter pH 6,5 essentiell ist. Die bei der Ausbringung der Substrate vorherrschenden Witterungsbedingungen wie Temperatur, Niederschläge und vor allem die Windgeschwindigkeit beeinflussten die Höhe der Ammoniakemissionen bedeutend (Buchen-Tschiskale et al., 2022).

4 Veröffentlichungen

Teilergebnisse zur Emissionsminderung der Ansäuerung zu unterschiedlichen Ausbringzeitpunkten und zum Ertrags- und Qualitätseffekt im Winterweizen wurden bereits auf einer Vielzahl von Feldtagen in Mecklenburg-Vorpommern unter der Beteiligung der LFA und auf den Vortragsveranstaltungen der Mähdruschauswertung 2022 vorgestellt. Teilergebnisse des ersten Versuchsjahres wurden in einem kurzen Beitrag der Bauernzeitung (9. Woche 2022) in der Rubrik „Neues aus der Landesforschung“ dargestellt.

Eine Veröffentlichung der zusammengefassten Versuchsergebnisse ist durch einen Vortrag auf dem 18. Rostocker Biomasseforum im Juni 2024 angemeldet.

Literatur

- BMEL (2021): Bundeskabinett beschließt neues Klimaschutzgesetz, Pressemitteilung Nr. 86/2021, 12.05.2021 URL: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/086-neues-klimaschutz-gesetz.html;jsessionid=8A203A72F563B5F28D8F2298A8236E0C.live852>, zuletzt aufgerufen am 21.06.2021.
- Buchen-Tschiskale C., Fuß R., Well R., Reinsch T., Taube F., Nyameasem J., Zutz M., Kluß C., Ruser R., Müller T., Essich C., Olfs H-W., ten Huf M., Recke G., Jorisson T., Cordes L., Kühne J., Kemmann B., Mejlstrup Jensen S., Flessa H. (2022): Minderung von Ammoniak- und Treibhausgasemissionen und Optimierung der Stickstoffproduktivität durch innovative Techniken der Gülle- und Gärrestausbringung in wachsende Bestände (GülleBest).
- de França, A.; von Tucher, S.; Schmidhalter, U. (2021): Effects of combined application of acidified biogas slurry and chemical fertilizer on crop production and N soil fertility, European Journal of Agronomy, Volume 123, 2021, 126224, ISSN 1161-0301.
- Kahle, P.; Baum, C.; Borchwardt, M. (2004): Auswirkungen mehrjähriger ökologischer Bewirtschaftung auf ausgewählte Bodeneigenschaften, dargestellt am Beispiel des Versuchsfeldes Gülzow. In: Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 33: 15-20.
- Neumann, S.; Reinsch, T.; Kluß, C.; Hermann, A.; Taube, F. (2018): Potentiale der Ansäuerung von Wirtschaftsdüngern zur Emissionsminderung von Ammoniak: Erste Ergebnisse aus dem EU-Projekt Baltic Slurry Acidification.
- Toft, M. (2023): Mündliche Mitteilung auf dem Projekttreffen der Projektes „Säure⁺ im Feld“, Haus Düsse, 07.02.2023.
- Umweltbundesamt (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>, ISSN 1862-4804
- Umweltbundesamt (2021): Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/ammoniak-emissionen#entwicklung-seit-1990>, zuletzt aufgerufen am 21.06.2021.