Mecklenburg-Vorpommern

Landesforschungsanstalt für
Landwirtschaft und Fischerei

ZWISCHENBERICHT

N-Effizienz in Fruchtfolgen

Reduzierung der N-Düngermenge ohne Fruchtfolgeänderung









IMPRESSUM

Titel
N-Effizienz in Fruchtfolgen. Reduzierte N-Düngermenge ohne Fruchtfolgeänderung.

Forschungs-Nr.
2/97

Berichtzeitraum
2016-2024

Herausgeber
Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft
Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen
Telefon: 0385/588 60-001
Fax: 0385/588 60-011
poststelle@lfa.mvnet.de
www.lfamv.de

Autoren
Ines Bull • Telefon: 0385 58860-210
Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern
Dorfplatz 1/OT Gülzow • 18276 Gülzow-Prüzen • www.lfamv.de

Mitarbeiter
Tobias Thiel

Titelfotos
Bestände der Kulturen Winterraps, Winterweizen, Winterweizen, Wintergerste im Versuch, Tobias Thiel

Gülzow, 31. Juli 2024

INHALT

1 Zusammenfassung 6

2 Zielstellung 6

3 Material und Methoden 6
3.1 Versuchsdurchführung 6
3.2 Standort, Witterung und allgemeine Bestandesentwicklung 9

4 Ergebnisse und Diskussion 11
4.1 Parameter der N-Düngewirkung im Mittel der Fruchtfolge 11
4.2 Kornertrag 14
4.3 Qualitätsparameter im Erntegut 18
4.4 Rohproteinertrag 22
4.5 N-Nutzungseffizienz 24
4.6 N-Saldo 24
4.7 Humus 25

5 Fazit 26

6 Überleitung 27

7 Literaturverzeichnis 29

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zu Winterraps 7
Tabelle 2: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zum Rapsweizen 8
Tabelle 3: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zum Stoppelweizen 8
Tabelle 4: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zur Wintergerste 8
Tabelle 5: Verwendete Sorten im Versuch 9
Tabelle 6: Ergebnisse im Mittel der Fruchtfolge und der Versuchsjahre 12
Tabelle 7: Vergleich der realen N-Düngungshöhe der Variante „100 % DüV“ im Versuch mit der nach DüV zulässigen N-Düngungshöhe bei verschiedenen Berechnungsansätzen 15
Tabelle 8: Rohproteinertrag von Winterraps in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau ... 22
Tabelle 9: Rohproteinertrag von Rapsweizen in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau .. 23
Tabelle 10: Rohproteinertrag von Stoppelweizen in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau23
Tabelle 11: Rohproteinertrag von Wintergerste in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau 23

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: N_{min}-Gehalte 0-60 cm vor Düngung in Abhängigkeit von Düngungshöhe, Kulturart und Jahr 13
Abbildung 2: Ertragserwartung zur Berechnung der 100 %-N-Düngehöhe und mittlere Kornerträge 14
Abbildung 3: Relativer Kornertragsunterschied im Vergleich zum Versuchsmittelwert des Erntejahres in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau nach Kulturart, ... 17
Abbildung 4: Unterschiede im Rohproteingehalt im Korn während des Versuchszeitraumes in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe 19
Abbildung 5: Kumulierter N-Saldo einer vierfeldrigen Fruchtfolge im statischen N-Düngungsversuch in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe 20
Abbildung 6: Unterschiede im Rohproteingehalt beim Winterweizen (Vorfrucht Winterraps) im statischen N-Düngungsversuch in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe 21
Abbildung 7: N-Nutzungseffizienz in Abhängigkeit von Kulturart und N-Düngungshöhe, Gülzow 2015-2023 (100 % beziehen sich über den gesamten Versuchszeitraum auf die 100 % der DüV von 2017) 24
Abbildung 8: Kumulierter N-Saldo in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe im Versuchszeitraum 25
Abbildung 9: Gehalt an organischem Kohlenstoff in der Ackerkrume (0-30 cm) zu Vegetationsbeginn in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe 25
Abbildung 10: Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff in der Ackerkrume (0-30 cm) zu Vegetationsbeginn in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe 26
Abbildung 11: N-Saldo und N-Nutzungseffizienz in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe im Mittel der Fruchtfolge Winterraps – Winterweizen – Winterweizen - Wintergerste, Gülzow 2015-2023 27

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

DüV	Düngeverordnung
MV	Mecklenburg-Vorpommern
PG	Prüfglied
RP	Rohprotein
WG	Wintergerste
WRa	Winterraps
WW	Winterweizen
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns bei den Kollegen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für wertvolle Unterstützung bei der Untersuchung der Bodenproben.

1 Zusammenfassung

Eine Reduzierung der N-Düngungshöhe erhöht die N-Nutzungseffizienz des Düngers und führt so schon kurzfristig zur Verringerung des N-Saldos. Mehrjährige Wirkungen auf Ertrag, Ertragsqualität und Boden durch Veränderung der N-Prozesse im Boden wurden über neun Jahre in einer engen praxisüblichen Winterungs-Fruchtfolge mit Raps und Weizen untersucht. Die kurzfristige N-Düngewirkung auf Ertrag, Ertragsqualität und Humus wurde für N-Düngemengen in der Spanne von 85 bis 115 %, berechnet nach Düngeverordnung, quantifiziert. Eine langfristige Veränderung dieser Wirkung ist unwahrscheinlich und/oder nur bei stark negativen N-Salden und über sehr lange Zeiträume zu erwarten. Überraschend und entgegen den ursprünglichen Erwartungen ist vor allem das Fehlen eines mit der Versuchsdauer zunehmend absinkenden Rohproteingehaltes im Korn aller untersuchten Kulturarten bei reduziertem N-Düngungsniveau.

2 Zielstellung

Mit den Planungen zur Novellierung der Düngeverordnung traten ab 2014 alte Fragen der Stickstoffdüngewirkung wieder in den Vordergrund. Diese schließen neben der kurzfristigen Düngewirkung langfristige Effekte ein. Besonders bedeutsam sind dabei die Auswirkungen auf den Humushaushalt und die Nährstoffnachlieferung aus dem Boden-Pool. Es ist vorauszusetzen, dass diese Boden-/Humus-Wirkungen sich über mehrere Jahre akkumulieren und in einjährigen Beobachtungen nicht erkannt werden können. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, sind Änderungen in der Stickstoffaufnahme der Pflanzenbestände und daraus folgend bei Ertrag und Qualität des Erntegutes zu erwarten. In MV gab es keine aktuellen Versuchsergebnisse zur Wirkung der Stickstoffdüngungshöhe bei Mähdruschfrüchten über einen mehrjährigen Zeitraum.

Zur Untersuchung dieser Fragen unter den aktuellen Bedingungen in MV wurde 2015 am Versuchsstandort Gülzow ein stationärer Stickstoffdüngungs-Dauerversuch angelegt, dessen Ergebnisse mit diesem Forschungsbericht vorgestellt werden. Mit den Versuchsergebnissen sollten die folgenden Fragen beantwortet werden.

- Welchen Einfluss hat eine reduzierte N-Düngung auf die N-Nutzungseffizienz des eingesetzten Düngers?
  - These 1: Eine Düngung unterhalb der 2015 gültigen Empfehlung nach Stickstoffbedarfsanalyse führt zu geringeren Erträgen/ Qualitäten aber besserer N-Nutzungseffizienz.
  - These 2: Eine Düngung unterhalb der 2015 gültigen Empfehlung nach Stickstoffbedarfsanalyse führt langfristig zum Humusabbau und dadurch zu sinkendem Ertragsniveau und schlechterer N-Nutzungseffizienz.
- Wie hoch sind diese Effekte unter den Bedingungen in MV?

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsdurchführung

Die Versuchsfläche war bis zum Jahr 2013 langjährig in ökologischer Bewirtschaftung ohne bzw. mit nur marginaler Düngung. Es folgte eine einjährige Übergangsphase mit einheitlichem Anbau und ebenfalls geringer N-Düngung. Der stationäre Dauerversuch wurde erstmalig im Herbst 2014 angelegt und mit dem Erntejahr 2023 beendet. Damit liegen Ergebnisse aus einem Zeitraum von neun Versuchsjahren vor.

Der Versuch nutzte eine für MV typische enge Winterungsfruchtfolge. Alle Kulturarten der vierfeldrigen Fruchtfolge Winterraps – Winterweizen – Winterweizen – Wintergerste wurden in jedem Jahr angebaut. In jedem dieser vier Felder lagen als ortsfeste einfaktorielle Blockanlage drei Düngungsvarianten mit je drei Wiederholungen in jeweils unterschiedlich randomisierter Anordnung. Jede Versuchsparzelle war jeweils

links und rechts von einer Randparzelle mit identischer Behandlung umgeben, um auch mehrjährig Randeffekte durch Dünger- oder Bodenverschleppung auszugleichen. Für die Bodenprobenahme zur Bestimmung der N_{min}-Gehalte wurden diese Randparzellen genutzt. Die Düngungsabstufung 85 % - 100 % - 115 % erfolgte für alle Kulturarten der Fruchtfolge. 115 % entsprechen in etwa dem bis 2017 nach Stickstoffbedarfsanalyse durch die Landesforschungsanstalt empfohlenen Düngungsniveau.

Ab dem zweiten Versuchsjahr wurde die N-Düngemenge in Abstufung zur Düngeverordnung 2017 berechnet. Dabei wurde für alle Prüfvarianten der N_{min}-Wert der 100 %-Variante genutzt und erst anschießend prozentual abgestuft. So sollten kumulative Effekte über den N_{min}-Wert vermieden werden (Tabelle 1, Tabelle 3, Tabelle 4). Unabhängig davon wurden N_{min}-Werte für alle Düngungsvarianten bestimmt. Die Düngemenge wurde unter fachlichen Gesichtspunkten auf zwei bis drei Termine aufgeteilt. Die Mengen-Abstufung erfolgte nur in der 1. und 2. N-Gabe. Eine abschließende dritte Gabe erhielt nur Winterweizen und zwar in jedem Jahr in einheitlicher Höhe für alle Prüfvarianten, um den Einfluss der Gabenverteilung auf den Rohproteingehalt im Korn zu minimieren.

Die Ertragserwartung für die Düngungsberechnung wurde entsprechend der vorhandenen Standorterfahrungen mit folgenden Werten angenommen: 40 dt/ha für Winterraps, 80 dt/ha für Rapsweizen, 80 dt/ha für Stoppelweizen, 70 dt/ha für Wintergerste. Abweichend dazu erfolgte aufgrund der schlechten Bestandesentwicklung zu Vegetationsbeginn im Jahr 2020 für Winterraps eine Reduzierung der Ertragserwartung um 10 dt/ha und beim Stoppelweizen eine Reduzierung der 3. N-Gabe um 20 kg/ha. Beim Stoppelweizen wurde die Ertragserwartung ab 2020 bis Versuchsende auf 75 dt/ha korrigiert (Abbildung 2, S. 14). Für die N-Düngung wurde Kalkammonsalpeter eingesetzt. Alle anderen Nährstoffe wurden einheitlich und mit dem Ziel der optimalen Nährstoffversorgung gedüngt.

Tabelle 1: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zu Winterraps

Jahr	N_{min} (100%)	115 %	100 %	85 %
	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
2015	26	200	170	140
2016	25	206	175	144
2017	27	204	173	143
2018	19	211	181	151
2019	25	205	175	145
2020	20	171	146	120
2021	13	218	188	158
2022	10	220	190	160
2023	20	210	180	150

Tabelle 2: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zum Rapsweizen

Jahr	N_{min} (100%)	115 %	100 %	85 %
	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
2015	16	212	183	150
2016	30	224	190	157
2017	28	226	192	158
2018	21	234	199	165
2019	30	225	191	156
2020	17	238	204	169
2021	23	231	197	162
2022	10	245	211	176
2023	21	233	199	164

Tabelle 3: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zum Stoppelweizen

Jahr	N_{min} (100%)	115 %	100 %	85 %
	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
2015	20	212	183	150
2016	30	235	200	165
2017	30	235	200	165
2018	25	240	205	171
2019	50	215	180	146
2020	25	211	178	144
2021	27	229	196	162
2022	23	233	200	166
2023	19	236	203	170

Tabelle 4: Angerechneter N_{min}-Wert und N-Düngermengen der Prüfvarianten zur Wintergerste

Jahr	N_{min} (100%)	115 %	100 %	85 %
	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
2015	29	152	128	109
2016	25	182	155	120
2017	24	184	156	129
2018	19	188	161	134
2019	45	162	135	108
2020	20	187	160	132
2021	23	184	157	130
2022	14	193	166	139
2023	23	184	157	130

In allen Jahren blieb das Stroh auf dem Feld. Es wurden aus Kapazitätsgründen weder die Strohmenge noch der N-Gehalt im Stroh bestimmt. Da die Nährstoffmengen mit dem Stroh auf dem Feld blieben erscheint dies zulässig. Eine vollständige Berechnung der N-Aufnahme durch die Pflanzen ist damit jedoch ausgeschlossen. Zum Stoppelweizen und zur Wintergerste erfolgte die Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug, in den anderen Jahren wurde nichtwendend gearbeitet. Eine Ausnahme bildete hier die Bodenbearbeitung im Herbst 2022. Aufgrund des stark ausgetrockneten Bodens war Pflügen nicht möglich. Stattdessen wurde zweimal gegrubbert. Alle Maßnahmen bis auf die N-Düngung wurden konventionell ortsüblich und einheitlich durchgeführt. Es wurden für den Standort empfohlene Sorten aus den Landessortenversuchen ausgewählt und über den Versuchszeitraum angepasst. Beim Weizen wurden A-Sorten mit hohem Ertragspotenzial und bekannter Proteinschwäche angebaut, um Effekte auf den Rohproteingehalt leichter erkennen zu können (Tabelle 5).

Tabelle 5: Verwendete Sorten im Versuch

Jahr	Winterraps	Rapsweizen	Stoppelweizen	Wintergerste
2015	Visby	Julius	Pionier	Anja
2016	Visby	Julius	RGT-Reform	Anja
2017	Visby	Julius	RGT-Reform	Anja
2018	Arsenal	Julius	RGT-Reform	Anja
2019	Arsenal	Julius	RGT-Reform	Anja
2020	Arsenal	Julius	RGT-Reform	Anja
2021	Ludger	RGT-Reform	RGT-Reform	SU Jule
2022	Ludger	RGT-Reform	RGT-Reform	SU Jule
2023	Ludger	RGT-Reform	RGT-Reform	SU Jule

Die Ertragserfassung erfolgte auf mit einem Parzellenmähdrescher. Zusätzlich zum Korngewicht wurden während der Ernte Trockensubstanz- und Rohproteingehalt des Korns per NIRS-Messung bestimmt. Um die Kernparzellen möglichst wenig zu stören, wurden die Bodenproben aus den gelichbehandelten Randparzellen entnommen. Die Bodenprobenahme erfolgte einmal jährlich zu Vegetationsbeginn vor der Düngung jeweils als Mischprobe zur Prüfvariante.

Die statistische Auswertung der jährlichen Ertragsergebnisse erfolgte für jede Kulturart separat mit dem PIAFStat-Verfahren „EVA - Einfaktorielle Versuchs-Auswertung Standard M-V 8/2020“. Die Prüfung auf Signifikanz der Unterschiede erfolgte mittels t-Test bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$. Die in Tabelle 6 dargestellten Ertrags- und Kornqualitätswerte sind arithmetische Mittelwerte der vorangegangenen Einzelversuchsauswertung. N-Saldo und N-Nutzungseffizienz wurden aus den Ergebnissen der Einzeljahresauswertung abgeleitet und anschließend als arithmetischer Mittelwert über die Kulturarten und den Versuchszeitraum zusammengefasst. Der N_{min}-Wert wurde kulturartspezifisch als Mischprobe aus allen Parzellen einer Prüfvariante ermittelt und als arithmetischer Mittelwert über die Kulturarten und den Versuchszeitraum berechnet. Zum fruchtartenübergreifenden Vergleich wurden die Erträge zusätzlich in Getreideeinheiten nach SCHULZE MÖNKING & KLAPP (2010) umgerechnet.

3.2 Standort, Witterung und allgemeine Bestandesentwicklung

Der Versuchsstandort Gülzow, Mecklenburg-Vorpommern, befindet sich im vergleichsweise niederschlagsarmen Güstrower Becken inmitten der jungpleistozänen Grundmoränenlandschaft. Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur (1991 - 2020) beträgt 9,1 °C und die Jahresniederschlagssumme 552 mm. In einem Bo-

denprofil in der Nähe der Versuchsfläche ist als Bodenform eine Humusparabraunerde aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm (LLh: pky-Is(Sp)/gm-sI(Lg)) angesprochen worden (IDLER 2017). Die Versuchsfläche ist vollständig drainiert.

Klimaänderungen sind auch am Versuchsstandort Gülzow zu beobachten. Insgesamt waren die Versuchsjahre Herbst 2014 – Sommer 2023 durch für die Landwirtschaft ungewöhnlich schwierige Witterungsperioden geprägt. In der Tendenz bestätigen sie die regionalen Prognosen zum Klimawandel mit milden Wintern, später Vegetationsruhe, länger andauernden Trocken- und Hitzeperioden im Frühjahr/Sommer sowie vermehrten Starkniederschlägen. Die außergewöhnlich starke Trockenheit im Jahr 2018 beeinflusste aufgrund des weit ausgetrockneten Bodens auch die beiden folgenden Erntejahre. Insgesamt lag die Jahresdurchschnittstemperatur immer um 1 - 2 K über dem langjährigen Mittelwert. Besonders heiß waren die Sommer 2018 und 2019.

2014/15
Der Versuch startete durch den langen warmen Herbst 2014 mit gut entwickelten Beständen vor Winter. Trockene Witterung im Frühjahr und im Juni wurde durch ein Unwetter mit Starkregen unterbrochen. Dadurch blieben die Bestände am Standort von Trockenschäden verschont (In der nahen Stadt Bützow wurden währenddessen vom Tornado mehrere Dächer sowie der Kirchturm abgedeckt). Alle vier Kulturarten erbrachten Erträge, die die angenommene Ertragserwartung erreichten bzw. übertrafen.

2015/16
Nach guten Bestellbedingungen im September/Oktober dauerte die milde Witterung bis Ende Dezember an. Ein extremer Temperaturabsturz Anfang Januar traf dadurch auf kaum abgehärtete Bestände. Der Kahlfrost verursachte an allen Kulturen und besonders am schon vom hohen Kohlfliegenbefall vorgeschädigten Winterraps Auswinterungsschäden. Die trocken-heiße Witterung im Juni beschleunigte die Abreife und trug ihren Teil zu einer insgesamt deutlich unterdurchschnittlichen Ernte bei.

2016/17
Zu Bodenbearbeitung und Aussaat waren die Böden noch stark ausgetrocknet. Die Aussaat von Raps verspätete sich deshalb und sowohl Raps als auch Getreide liefen verzögert auf. Die spät erst im Januar einsetzende Vegetationsruhe, das Ausbleiben von größeren Frostschäden, kühle Witterung im April und in der Summe ausreichende Niederschläge glichen die Herbstprobleme aus. Die Erträge lagen wieder zufriedenstellend über Ertragserwartung und Landesmittelwert.

2017/18
Nach der Aussaat entwickelten sich die Bestände gut, durch den nassen Herbst/Winter blieb jedoch die Wurzelentwicklung zurück. Entsprechend dramatisch waren die Auswirkungen einer extrem langen Trocken- und Hitzeperiode im Frühjahr/Sommer. Die Erträge sowohl im Versuch als auch im Landesdurchschnitt blieben gering, verbunden mit überdurchschnittlich hohen N-Salden.

2018/19
Die Aussaatbedingungen der Winterungen waren durch die ausgetrockneten Böden problematisch. Ein sehr milder Winter führte jedoch bis zum Frühjahr zu ausreichend entwickelten Beständen. Trotz höherer Niederschläge als im Vorjahr blieb 2019 die Wasserversorgung der Kulturen aufgrund des tief ausgetrockneten Bodens angespannt. Dadurch und durch eine frühsommerliche Hitzeperiode ausgelöste schnelle Abreife lagen die Getreide-Erträge auf niedrigem Niveau. Halmbasiserkrankungen wurden im Winterweizen beobachtet, blieben aber ohne nachweisbare Ertragswirkung.

2019/20
Im Herbst 2019 kam es aufgrund der Trockenheit und dem entsprechend verzögerten Abbau der Stroh- und Ernterückstände zu einem sehr langsamen Auflaufen des Raps bis in den Oktober hinein. Außerdem war der

Erdflohbefall im Herbst besonders hoch. Das Frühjahr 2020 war wiederum durch Vorsommertrockenheit gekennzeichnet. Die Ertragssituation gestaltete sich ähnlich wie im Vorjahr aber mit zusätzlich besonders geringen Wintergerstenerträgen.

2020/21
Im Herbst bis zur Winterruhe entwickelten sich die Kulturen gut, so dass in Abhängigkeit von der Kulturart die N-Aufnahme im Herbst 2020 als optimal eingeschätzt werden kann. Die Vegetationsruhe begann spät, kurze Frostperioden führten dank leichter Schneebedeckung nicht zu Pflanzenausfällen. Das folgende Frühjahr war deutlich kühler als der Durchschnitt der letzten Jahre. Bodenerwärmung und Pflanzenwachstum setzten dadurch später und langsamer als üblich ein. Bis Ende Mai war für alle Winterkulturen ein mittleres bis hohes Ertragspotenzial zur Ernte 2021 vorhanden. Eine starke Hitzeperiode Mitte-Ende Juni führte zur schnellen Abreife der Bestände. Anschließende Niederschläge beförderten einen Befall mit Schwärzepilzen an den Getreideähren.

2021/22
Starkregenereignisse im August und September schränkten die Befahrbarkeit stark ein und verursachten teilweise Verschlämmungen im Oberboden. Das Vegetationsende wurde mit einem ersten Frost Ende November erreicht. Die Monate Januar und Februar waren ungewöhnlich mild. Die Entwicklung des Winterrapses blieb im Herbst unzureichend, glich sich aber bis zum Frühjahr aus.

2022/23
Durch starke Trockenheit im Herbst nach der Ernte war anders als geplant, kein Pflügen vor Stoppelweizen und Wintergerste möglich. Stattdessen wurde die Fläche zweimal so tief wie möglich gegrubbert. Nach der inzwischen fast üblichen Trockenperiode im Frühsommer (Mai/Juni) wechselte die Wetterlage zur Ernte. Die folgenden regnerisch Wochen erschwerten und verzögerten die Ernte. Ein Düngefehler veranlasste 2023 die Entscheidung, den Wintergersten-Ertrag in diesem Jahr nicht zu ermitteln.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Parameter der N-Düngewirkung im Mittel der Fruchtfolge

Zur Beschreibung der Stickstoff-Düngewirkung auf Ertragsbildung und Umwelt werden verschiedene Parameter genutzt. Die Stickstoff-Auswaschung oder **N-Fracht** ist die N-Menge, die mit dem Sickerwasser aus der Ackerfläche verloren geht. Anzustreben sind möglichst geringe Mengen. Eine direkte Erfassung der N-Fracht ist im Feldversuch kaum möglich. Der **N-Saldo** als Differenz zwischen eingesetztem Dünge-Stickstoff und Stickstoff im Erntegut beschreibt das der N-Düngung zuzuschreibende N-Auswaschungsrisiko. Der N-Saldo sollte mittel- bis langfristig möglichst auf der Höhe der standortabhängigen unvermeidbaren Stickstoffverluste liegen. Für die **N-Nutzungseffizienz** (oder kurz N-Effizienz) sind verschiedene Definitionen bekannt (CONGREVES 2021). In der vorliegenden Arbeit wird das einfache Verhältnis von Stickstoff im Erntegut zum eingesetztem Dünge-Stickstoff als N-Nutzungseffizienz bezeichnet. Im Ackerbau gilt zum Ausgleich zwischen den teils konkurrierenden Zielen geringes N-Auswaschungsrisiko und Vermeidung von Humusabbau ein möglichst hoher Wert, aber bis maximal 90 % als erstrebenswert (OENEMA et al. 2015).

Es besteht die Erwartung, mit Reduzierung der N-Düngungsmenge die N-Nutzungseffizienz der Düngung zu erhöhen und den verbleibenden N-Saldo zu verringern. Für die Ergebnisbewertung ist wichtig, dass der N-Saldo nicht mit N-Auswaschung aus der landwirtschaftlichen Fläche gleichzusetzen ist. Gleichwohl verringert sich mit abnehmendem N-Saldo das N-Auswaschungsrisiko. Dieser Zusammenhang entspricht nicht einer 1:1-Beziehung und verläuft oberhalb eines fachlich empfohlenen Niveaus der Düngungshöhe nicht linear (BULL 2023, KAGE et al. 2022). Eine Reduzierung der N-Düngungshöhe unterhalb einer fachlich begründeten Empfehlung ist mit geringeren Erträgen und geringeren Rohproteingehalten verbunden. Es besteht ein Zielkonflikt zwischen Ertrags-/Qualitätshöhe und N-Auswaschung. Im vorgestellten Versuch konnte im Mittel der geprüften Fruchtfolge je Kilogramm N-Düngerreduzierung der N-Saldo um ca. 0,75 kg verringert werden. Die

N-Nutzungseffizienz stieg um ca. 0,25 Prozentpunkte je eingespartem Kilogramm N-Dünger. Setzt man die höchste Düngungsstufe im Versuch auf 100 %, da sie bis 2017 der fachlich begründeten Empfehlung entsprach, so wurden durch eine Düngungsreduzierung um 30 %, die 63 kg/ha weniger ausgebrachtem N-Dünger bedeuten, die N-Nutzungseffizienz um 18 Prozentpunkte erhöht und der N-Saldo um 47 kg/ha verringert. Aufgrund der bekannt nichtlinearen Beziehung der gezeigten Parameter zueinander ist eine Übertragung dieser Werte auf N-Düngungshöhen außerhalb der geprüften Spannweite nicht zulässig (Tabelle 6).

Die Verbesserung der Umweltwirkung, die durch N-Saldo und N-Nutzungseffizienz beschrieben werden, wurden, wie erwartet, mit Rückgängen bei den Kornerträgen und den Rohproteingehalten erkauft. Im Mittel der geprüften Fruchtfolge führte ein N-Düngerreduzierung um 1 Kilogramm zu einem Ertragsrückgang von 5 kg Getreideeinheiten (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ergebnisse im Mittel der Fruchtfolge und der Versuchsjahre

	Einheit	**85%**	**100%**	**115%**
$N_{min,\ 0\text{-}60\ cm}$ vor Düngung	kg/ha	18	18	20
N-Düngung	kg/ha	149	181	212
N-Saldo	kg/ha	26	50	73
N-Nutzungseffizienz	%	84	73	66
Kornertrag Winterraps	dt/ha bei 91 % TS	38,2	39,8	40,8
Kornertrag Rapsweizen	dt/ha bei 86 % TS	74,4	75,6	76,5
Kornertrag Stoppelweizen	dt/ha bei 86 % TS	62,7	65,4	67,2
Kornertrag Wintergerste	dt/ha bei 86 % TS	74,2	73,9	75,6
Getreideeinheiten	dt/ha	66,6	68,1	69,5
RP-Gehalt Rapsweizen	% TM	13,5	13,9	14,3
RP-Gehalt Stoppelweizen	% TM	12,7	13,4	13,8
RP-Gehalt Wintergerste	% TM	11,8	12,5	13,1
Rohfettgehalt Winterraps	% bei 91 % TS	43,4	43,0	42,8
Rohfettertrag Winterraps	dt/ha	16,6	17,2	17,6

Ein Einfluss der Düngungshöhe auf die N_{min}-Werte im Frühjahr vor Düngung konnte in keiner Kultur und weder kurz- noch mittelfristig nachgewiesen werden. In wenigen einzelnen Jahren scheint eine Abhängigkeit zu bestehen, zumindest entspricht die gemessene Werte-Rangfolge der Düngungshöhe. In darauffolgenden Jahren lässt sich dies jedoch nicht mehr erkennen, bzw. kehrt sich sogar um. Eine akkumulierende Wirkung ist demnach nicht vorhanden, die gemessene Werterangfolge nicht auf die Düngungshöhe zurückzuführen. Die Höhe der N_{min}-Werte zeigt dagegen ganz eindeutig eine starke Jahresabhängigkeit. Nach dem Trockenjahr 2018, in dem hohe N-Salden und fehlende Sickerwasserbildung im folgenden Winter aufeinandertrafen, waren die N_{min}-Werte im Frühjahr 2019 vor allem beim Stoppelweizen und der Wintergerste besonders hoch (Abbildung 1).

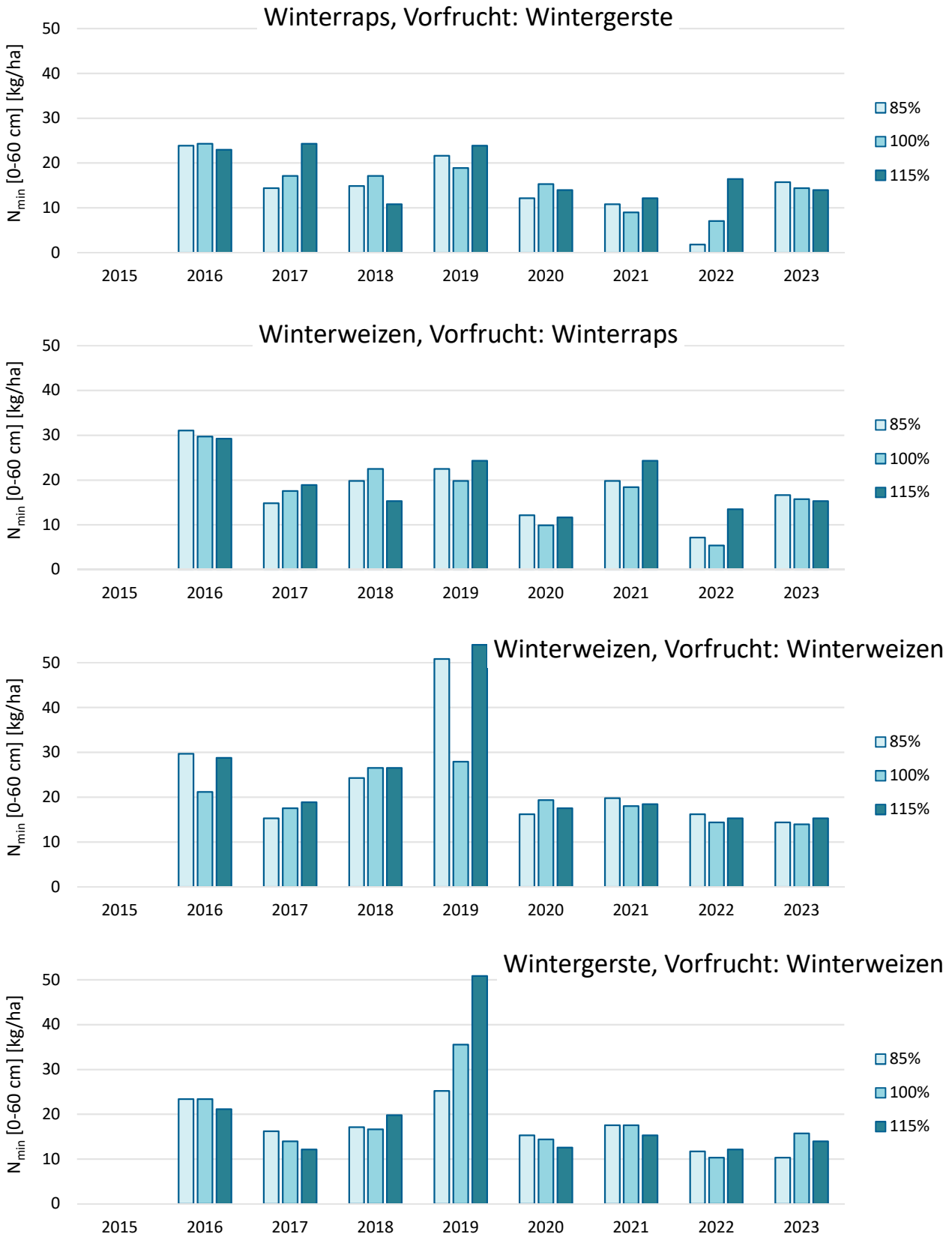


Abbildung 1: N_{min}*-Gehalte 0-60 cm vor Düngung in Abhängigkeit von Düngungshöhe, Kulturart und Jahr*

4.2 Kornertrag

Beim Winterraps lagen die Erträge im Mittel des Versuchszeitraums um 4,6 dt/ha über dem entsprechenden Landesmittelwert von 35 dt/ha, beim Weizen im Mittel von Raps- und Stoppelweizen um 6 dt/ha unter dem Landesmittelwert von 76,3 dt/ha. Der Gerstenertrag bewegte sich mit 74,6 dt/ha auf dem Landesniveau (Abbildung 2). Im Nachhinein wurde also das Ertragsniveau des Standortes für Winterraps und Wintergerste leicht unter- und für beide Winterweizen überschätzt.

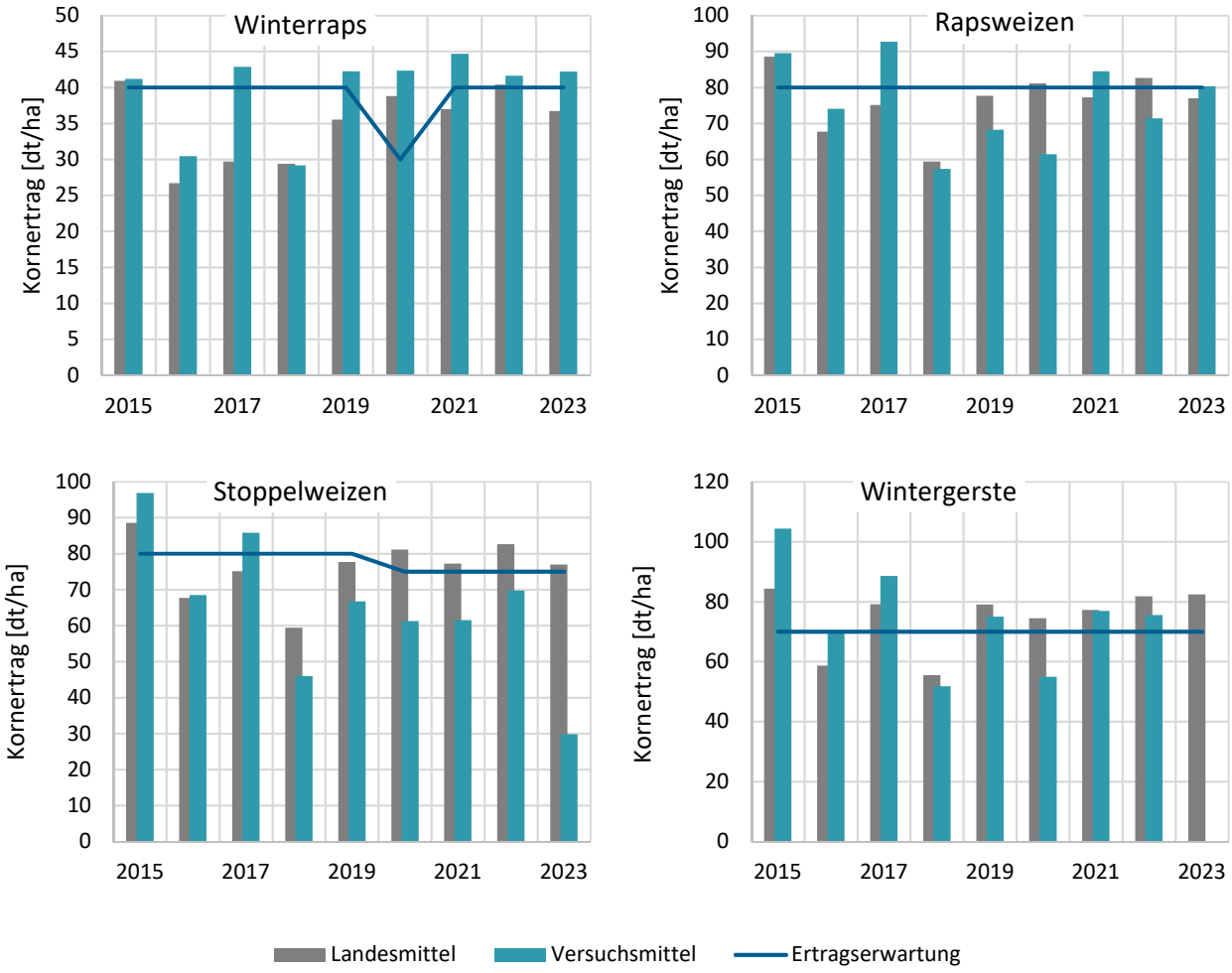


Abbildung 2: Ertragserwartung zur Berechnung der 100 %-N-Düngehöhe und mittlere Kornerträge im Versuch im Vergleich zum Landes-Mittelwert MV (STATISTISCHES AMT MV 2015 – 2023)

Um einzuschätzen, inwieweit die ermittelten Ergebnisse trotzdem zu den geplanten N-Düngungshöhen (85, 100 und 115 % nach DüV) passen, lohnt ein Vergleich mit den nach DüV zulässigen N-Düngungshöhen, die nach Abschluss des Versuches mit den erst nachträglich bekannten Ertragshöhen berechnet werden können. Für diesen Vergleich wurden die N-Düngungsmenge mit drei leicht unterschiedlichen Berechnungsansätzen neu kalkuliert DüV (A), DüV (B) und DüV (C) durchgeführt. Dabei sind

- die reale N-Düngungshöhe die mittlere tatsächlich im Versuch ausgebrachte N-Düngungsmenge,
- die zulässige N-Düngungshöhe nach DüV (A), die N-Düngermenge, die auf der Grundlage der Ertragsmittelwerte der einzelnen Kulturarten im Versuchszeitraum nachträglich berechnet wurde,
- die zulässige N-Düngungshöhe nach DüV (B) wurde, wie die zulässige N-Düngungshöhe nach DüV (A) berechnet. Allerdings wurden hier in der Berechnung, wie in der DüV vorgesehen, die Erträge des Jahres 2018 (Minimumwerte, Dürrejahr entsprechend DüV, Tabelle 3 „Zu- und Abschläge auf

Grund von abweichendem Ertragsniveau bei Ackerkulturen“) durch die Werte des Vorjahres ersetzt.

- Für die zulässige N-Düngungshöhe nach DüV (C) wurde ein flexibler Berechnungsansatz gewählt, der der Praxis am nächsten kommt. In den ersten drei Jahren (2015 – 2017) wurden mangels Standortkenntnis Standarderträge (40, 80, 80, 70 dt/ha) angenommen. Für die Jahre 2018 und 2019 wurden die zurückliegenden drei- bzw. vier- und ab 2020 die fünfjährigen Ertragsmittelwerte in Ansatz gebracht. Auch bei dieser Berechnung wurden die Werte des Jahres 2018 durch die des Vorjahres ersetzt.

Der Vergleich zeigt nur beim Berechnungsansatz (A) eine sehr geringe Überdüngung im Versuch auf. Nach den praxisnäheren Vergleichen (B) und (C) hätten sogar ca. 10 kg/ha mehr Stickstoff gedüngt werden können. Es ist also durch die im Vergleich zum Planansatz geringeren erzielten Erträge nicht zu viel gedüngt wurden. Also sind mögliche Unterschiede keinesfalls mit fälschlich zu hohen Düngermengen überdeckt worden. Die Ergebnisse können daher für die Bewertung einer entsprechenden Düngungsreduzierung verwendet werden (Tabelle 7).

Tabelle 7: Vergleich der realen N-Düngungshöhe der Variante „100 % DüV“ im Versuch mit der nach DüV zulässigen N-Düngungshöhe bei verschiedenen Berechnungsansätzen (Mittelwerte im Versuchszeitraum 2015 – 2023)

	mittlere reale N-Düngungshöhe	**zulässige N-Düngungshöhe nach DüV (A)**	**zulässige N-Düngungshöhe nach DüV (B)**	**zulässige N-Düngungshöhe nach DüV (C)**
	[kg/ha und Jahr]	[kg/ha und Jahr]	[kg/ha und Jahr]	[kg/ha und Jahr]
Winterraps	175	179	183	181
Rapsweizen	196	202	207	209
Stoppelweizen	194	180	187	200
Wintergerste	153	151	168	167
Differenz zur realen N-Düngungshöhe im Mittel der Fruchtfolge	-	-1	7	10

In der überwiegenden Mehrzahl der Einzelversuche wurden keine signifikanten Unterschiede beim Kornertrag festgestellt. Nur bei acht von 35 Ergebnissen ist ein Einfluss der N-Düngungshöhe nachweisbar, die meisten (drei) beim Stoppelweizen. Allerdings entspricht die Rangfolge der Kornerträge im letzten Drittel des Versuchszeitraumes überwiegend der Rangfolge der N-Düngungshöhe, wobei diese Beobachtung für den Rapsweizen weniger und für den Stoppelweizen fast immer zutrifft. Hier könnte sich ein über mehrere Jahre kumulierter Effekt andeuten, der bei langfristig unterschiedlichen N-Salden erwartet wird. Da die witterungsbedingten jährlichen Ertragsunterschiede die düngungsverursachten Unterschiede im Versuchszeitraum weit übertreffen, ist jedoch die N-Abstufung zu gering und ist selbst der neunjährige Dauerversuch für eine Regressionsprüfung noch zu kurz. Im langjährigen Dauerversuch Rothamsted werden allerdings solche kumulierenden Effekte ebenfalls nicht oder - wenn überhaupt - nur bei geringeren Düngemengen (N < 100 kg/ha und Jahr) ermittelt (ROTHAMSTED RESEARCH 2022, GLENDINING & POULTON 2022). Es ist außerdem wahrscheinlich, dass Wurzelausbildung, Nährstoffaneignung und -verwertung sowie Nährstoffumlagerungsprozesse während der Abreife vom Nährstoffangebot beeinflusst werden, was sich auf die mittel- und langfristigen Effekte auswirken wird. Erste Untersuchungsergebnisse einer überregionalen Studie des Thünen-Institutes, in die auch Messungen des hier vorgestellten Versuches eingeflossen sind, weisen in diese Richtung (REINELT et al. 2024).

Die Abhängigkeit der N-Düngewirkung von der Kulturart und der Vorfrucht ist bekannt und wird beim Vergleich der Raps- und Stoppelweizenerträge im Versuch sichtbar (Abbildung 2, S. 14). Die Ertragswirkung der N-Düngung auf den Kornertrag ist, wie die Einzeljahresergebnisse mit signifikanten Unterschieden belegen, nichtdestotrotz vorhanden (Abbildung 3). In der geprüften Spanne der N-Düngung war mit einer Änderung des N-Düngungsniveaus um 10 % im Mittel eine Änderung des Kornertrags bei Winterraps um 0,9 dt/ha, bei Rapsweizen um 0,7 dt/ha, bei Stoppelweizen um 1,5 dt/ha und bei Wintergerste um 0,5 dt/ha verbunden (Tabelle 6, S. 12). Der Unterschied zwischen den beiden Weizenergebnissen ist mit Sicherheit den Vorfrüchten zuzuschreiben. Der gute Vorfruchteffekt des Rapses für Weizen ist bekannt und ist nicht nur, aber auch der hohen N-Nachlieferung nach Raps zuzuschreiben. Entsprechend ist der jährliche N-Düngungseffekt gering. Der gegenteilige negative Vorfruchteffekt von Weizen für Weizen wurde im Versuch an der zunehmenden Belastung mit Fußkrankheiten im Stoppelweizen sichtbar. Diese führten im letzten Versuchsjahr zu einem Ertragseinbruch um mehr als 50 %. Aufgrund der bekannten negativen Korrelation zwischen N-Düngungshöhe und Rohfettgehalt fallen, bezogen auf den Rohfettertrag, die N-Düngungseffekte beim Winterraps geringer als beim einfachen Kornertragsvergleich aus. Eine zusammenfassende Serienauswertung aller Ertragsparameter über den gesamten Versuchszeitraum ist noch geplant.

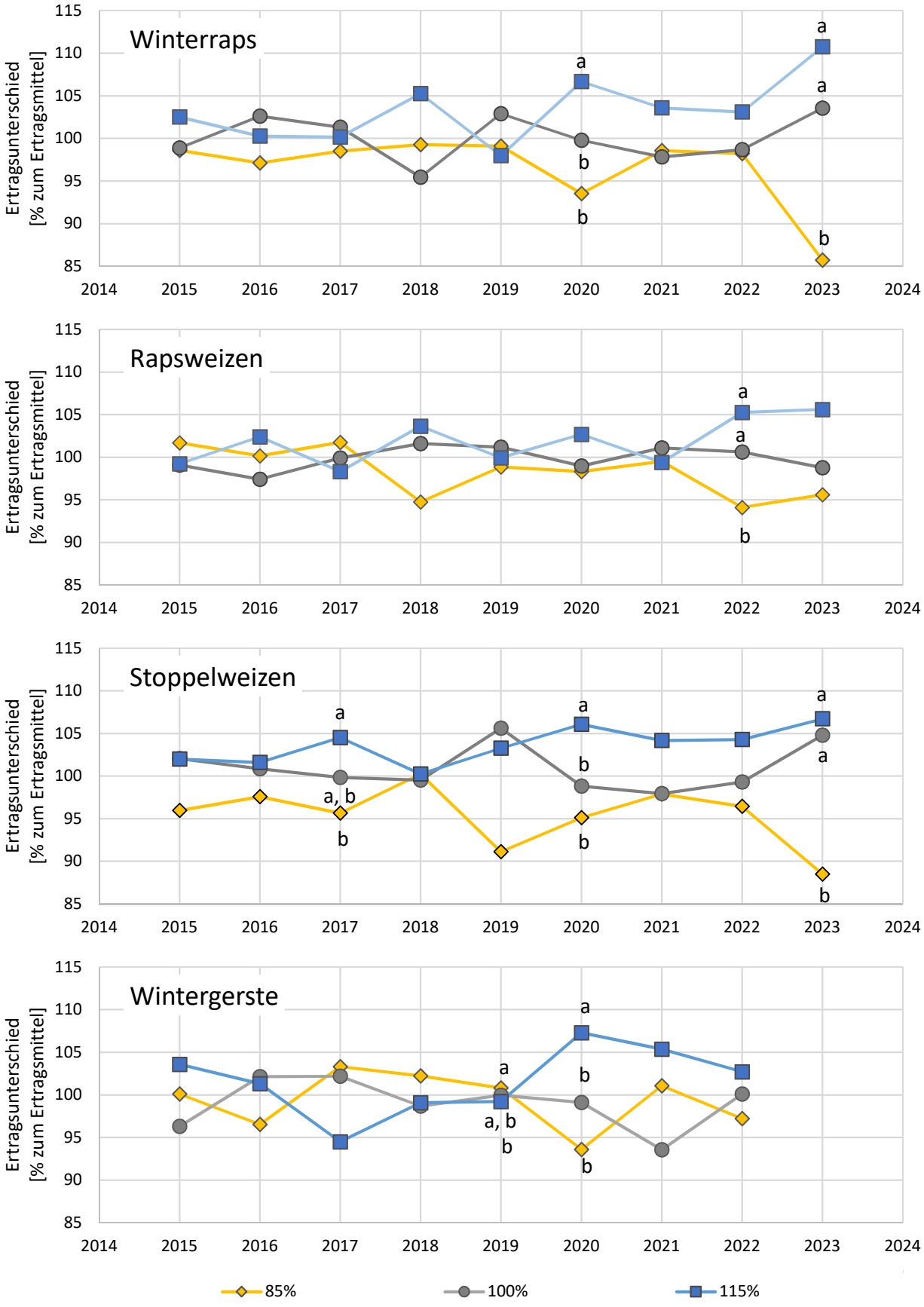


Abbildung 3: *Relativer Kornertragsunterschied im Vergleich zum Versuchsmittelwert des Erntejahres in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau nach Kulturart, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb eines Jahres (t-Test, α = 0,05)*

4.3 Qualitätsparameter im Erntegut

Bei den Weizensorten wurden A-Sorten mit hohem Ertragspotenzial, wie sie in der Region häufig angebaut werden, gewählt. Praktiker befürchten gerade bei diesen in der Regel rohproteinschwachen Sorten eine immer stärkere Abnahme der Rohproteingehalte bei mehrjährig reduziertem N-Düngeniveau.

Eine Veränderung der Düngungshöhe um 15 % führte beim Winterweizen zu einer Rohproteinab- bzw. -zunahme von jeweils ca. 0,5 Prozentpunkten. Dabei wirkte sich die Vorfrucht auf das Niveau des Rohproteingehaltes im Korn, nicht aber auf die N-Düngewirkung aus. Rapsweizen hatte im Mittel der Versuchsjahre einen um 0,6 Prozentpunkte höheren Rohproteingehalt als Stoppelweizen. Beim Rapsweizen wurde mit einer um 15 % reduzierten Düngung nur im dritten Versuchsjahr der Zielwert von 12,5 % Rohprotein unterschritten, beim Stoppelweizen im 1., 2., 3., 8. und 9. Jahr. Mit einer 100 %-Düngung gelang die Einhaltung dieses Wertes nach beiden Vorfrüchten in allen acht Jahren (Abbildung 4).

Eine immer stärkere Abnahme der Rohproteingehalte im Laufe der Versuchsdauer ist nicht erkennbar, die Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten werden nicht größer. Auch die absolute Ertragshöhe scheint hier keinen oder nur einen nicht erkennbaren Einfluss zu haben. Zu erwarten wäre ein größerer Unterschied im Rohproteingehalt zwischen den Düngungsvarianten in ertragsstarken Jahren (bei Winterraps 2021, bei Rapsweizen 2015, 2017 und 2021, bei Stoppelweizen 2015 und 2017, bei Wintergerste 2015 und 2017), während in ertragsschwachen Jahren (bei Winterraps 2016 und 2018, bei Rapsweizen 2018, 2019 und 2020, bei Stoppelweizen 2018 und 2023, bei Wintergerste 2018 und 2020) ein geringerer Einfluss plausibel erscheint. Diese Erwartung ist aber mit den erhobenen Daten nicht zu begründen, da unterschiedliche und auch gegenläufige Werte festgestellt wurden (Abbildung 2 S. 14, Abbildung 4).

Bei der Einordnung dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass die mit der DüV seit 2017 maximal zulässige N-Düngungshöhe (100 %) bei Winterraps und Winterweizen gegenüber der bis 2017 ausgesprochenen fachlichen Empfehlung der Landesforschungsanstalt schon eine Reduzierung um ca. 20 % bedeutet. Dazu lag das N-Düngeniveau in Praxisbetrieben in MV vor 2017 teils über dieser Empfehlung. Ein Absenken der N-Düngungshöhe um ca. 40 %, wie es jetzt also in den nach § 13a DüV ausgewiesenen „roten Gebieten“ ohne Berücksichtigung einer Umverteilung zwischen den Kulturarten in der Praxis umzusetzen wäre, führt natürlich zu einer stärkeren Abnahme der Rohproteingehalte. Die Wahrnehmung in den Praxisbetrieben, dass die bei ihnen erzielten Rohproteingehalte nach Umsetzung der DüV in den „roten Gebieten“ um mehr als einen Prozentpunkt geringer ausfallen, widerspricht also den hier vorgestellten Ergebnissen nicht.

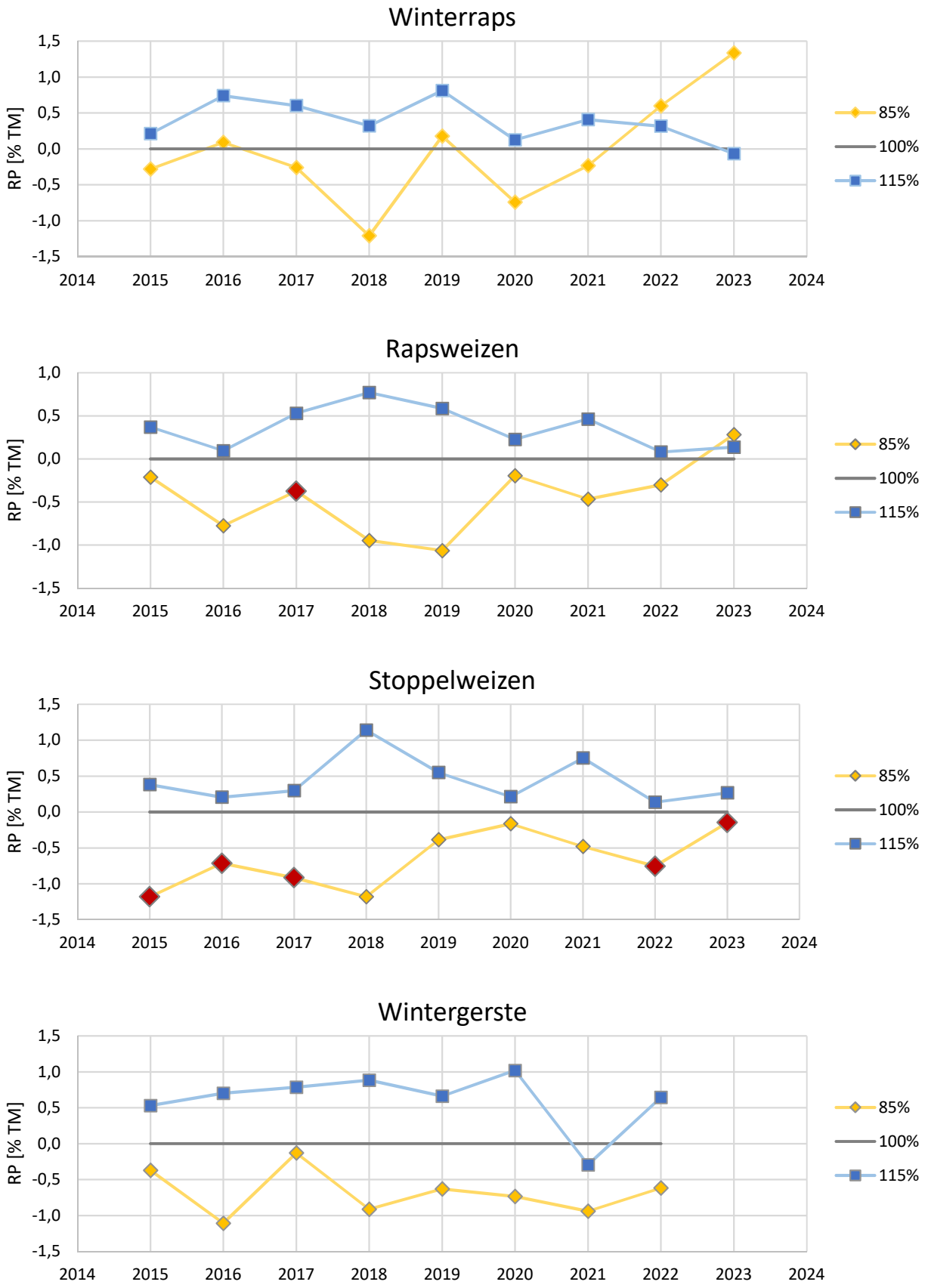


Abbildung 4: *Unterschiede im Rohproteingehalt im Korn während des Versuchszeitraumes in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe, Vergleichsgröße = 100 % nach DüV, Absolutwerte < 12,5 % TM = rot und größer markiert, besonders ertragsstarke Jahre grün umkreist, besonders ertragsschwache Jahre mit roter Raute markiert*

Zur Überprüfung der unerwarteten Beobachtung einer fehlenden kumulierenden Wirkung auf den Rohproteingehalt im Dauerversuch sollen hier Ergebnisse aus einem benachbarten statischen N-Düngungsversuch erstmals in derselben Form dargestellt werden. In diesem Dauerversuch wird Winterweizen nur nach Winterraps, also Rapsweizen, angebaut. Die vierfeldrige Fruchtfolge Winterraps – Winterweizen (Zwischenfrucht) – Silomais – Wintertriticale-Ganzpflanze enthält dort mit Silomais eine sehr N-effiziente Kultur, wodurch die kumulierten N-Salden geringer ausfallen. Da hier außerdem auch weit geringere N-Düngungshöhen geprüft werden, können Ergebnisse bei mehrjährig negativen N-Salden ausgewertet werden, die einen mehrjährig verstärkten Effekt wahrscheinlicher machen müssten (Abbildung 5). Jedoch ist auch hier der erwartete mehrjährig verstärkte Effekt abnehmender Rohproteingehalte im Winterweizenkorn bei mehrjährig negativem N-Saldo nicht zu erkennen. Nur in der Variante ganz ohne N-Düngung nehmen in einer Folge von Jahren (2017 – 2022) die Unterschiede im Rohproteingehalt zu den höheren N-Düngungsniveaus zu. 2023 ist allerdings wieder ein geringerer Unterschied gemessen worden. Die anderen N-Düngungsvarianten (60, 80, 100, 120% mineralische N-Düngungshöhe nach DüV) zeigen dagegen trotz starker Differenzierung der N-Salden zwar eine Abhängigkeit des Rohproteingehaltes von der Düngungshöhe, aber keinen über mehrere Jahre verstärkten Effekt (Abbildung 6). Diese Ergebnisse bestätigen also die vorherigen Beobachtungen.

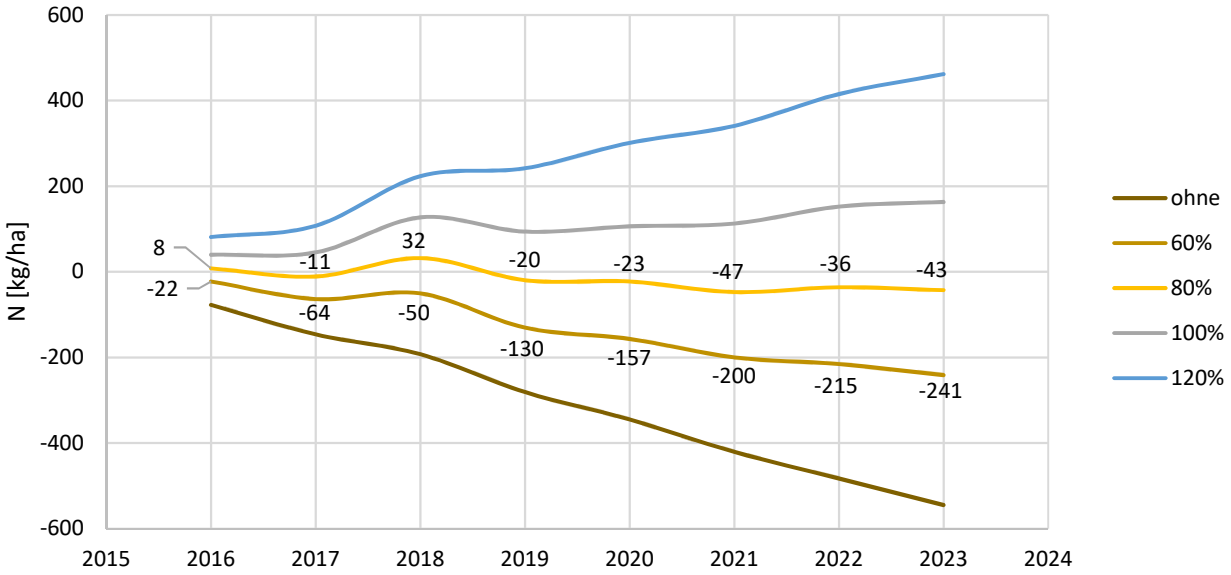


Abbildung 5: Kumulierter N-Saldo einer vierfeldrigen Fruchtfolge im statischen N-Düngungsversuch in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe im Versuchszeitraum, Vergleichsgröße = 100 % nach DüV, (nach BUGLOWSKI 2023)

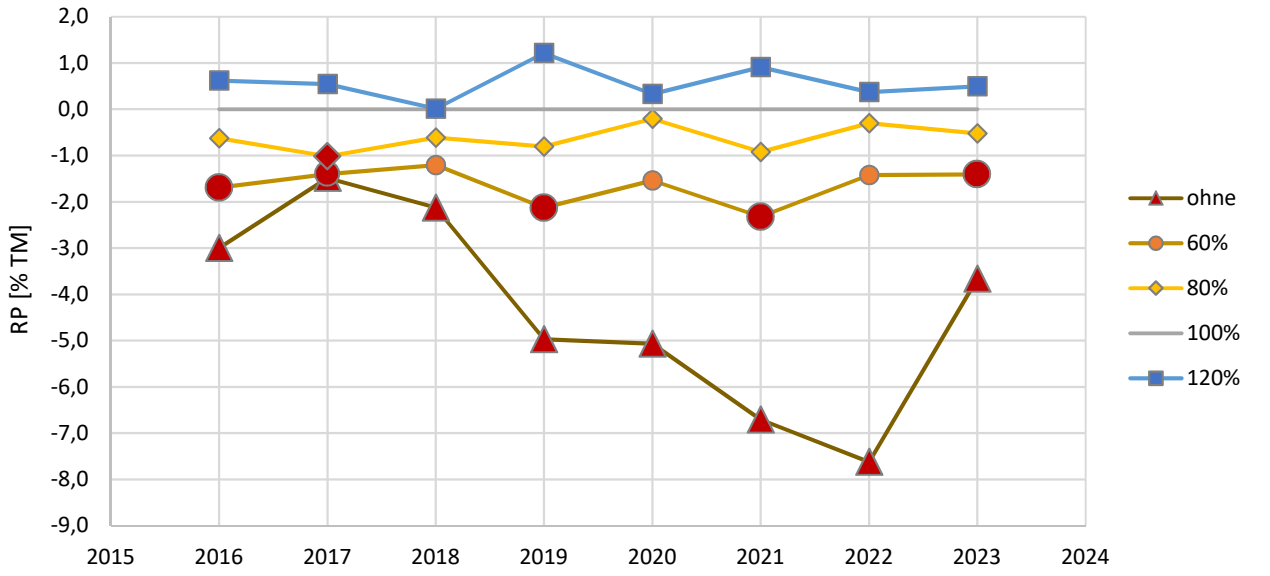


Abbildung 6: Unterschiede im Rohproteingehalt beim Winterweizen (Vorfrucht Winterraps) im statischen N-Düngungsversuch in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe im Versuchszeitraum, Vergleichsgröße = 100 % nach DüV, Absolutwerte < 12,5 % TM = rot und größer markiert (nach BUGLOWSKI 2023)

In der Literatur werden meist nur Ertragsergebnisse aus statischen N-Düngungsversuchen publiziert, so dass wenig Vergleiche mit anderen Standorten möglich sind (z. B. HLISNIKOVSKÝ ET AL. 2024, KUNZOVA & HEJCMAN 2009, KÜHN et al. 2009, THI HUYEN 2022). Aus Rothamsted, Großbritannien, sind Stickstoffgehalte im Weizenkorn eines Stickstoffdauerversuches publiziert, die, ähnlich wie in Gülzow, wenig Veränderung trotz langjährig negativer N-Salden zeigen (JOHNSTON & POULTON 2009, PERRYMAN & WILMER 2021). Genauso wie dort sind in Gülzow die Unterschiede der N-Gehalte zwischen einzelnen Jahren weitaus größer als die zwischen den Düngungsvarianten (in Gülzow: 2 - 3 gegenüber 0 - 2 Prozentpunkten), wobei die Unterschiede in der Regel beim Stoppelweizen größer als beim Rapsweizen sind. Auch diese Beobachtungen sind keine neuen Erkenntnisse und wurden in ähnlicher Weise schon von DYKE et al. 1983 aus Rothamsted berichtet.

Die Erwartung sinkender Rohproteingehalte bei mehrjährig reduzierter, aber gleichbleibender Düngungshöhe fußt auf Berichten aus Dänemark, nach denen die N-Düngungsrestriktionen bis 2017 zu abfallenden Rohproteingehalten im Weizen bis unter 9 % führten (z. B. LAUSEN 2016). Unsere Auswertung deutet jetzt darauf hin, dass diese eher auf eine mehrfach verringerte N-Quote, verbunden mit einer auf hohe Erträge ausgerichteten Anbaustrategie, als auf eine verringerte N-Nachlieferung zunehmend nährstoffverarmter Böden zurückzuführen ist. Die N-Quote zur Begrenzung der N-Düngehöhe wurde in Dänemark von 1994 bis 2016 immer weiter reduziert. Da die Gesamt-N-Menge im hier relevanten Bereich nur einen vergleichsweise geringen Effekt auf die Ertragshöhe, aber in der Regel einen starken, fast linearen Einfluss auf den Rohproteingehalt im Korn hat, führte die Absenkung der N-Düngemenge in Dänemark so zu einem starken Abfall der Rohproteingehalte.

Auch Winterraps und Wintergerste zeigen die Abhängigkeit des Rohproteingehaltes im Korn von der N-Düngungshöhe, aber ebenfalls ohne Einfluss der Versuchsdauer. Bei Wintergerste sind die mittleren Veränderungen etwas größer als beim Weizen und betragen in Bezug zur 100 % Düngungshöhe - 0,7 bzw. + 0,6 Prozentpunkte Rohprotein bei 85 % bzw. 115 % Düngungsniveau (Abbildung 4). Bei Winterraps sinkt der Rohfettgehalt mit steigender N-Düngung. Bei um 15 % reduzierter Düngung wurden im Mittel 0,4 Prozentpunkte mehr und bei um 15 % erhöhter Düngung 0,2 Prozentpunkte weniger als bei 100 % erreicht (Tabelle 6, S. 12).

Eine mit der Versuchsdauer erwartete verstärkte Abnahme der N-Gehalte im Korn und den damit verbundenen Änderungen der Qualitätsparameter Rohprotein- und Rohfettgehalt ist im Laufe der neunjährigen Versuchsdauer also bei keiner der geprüften Kulturarten zu erkennen. Diese überraschende Beobachtung passt zu Ergebnissen in dem schon benannten benachbarten statischen N-Düngungsversuch, in dem auch bei mehrjährig negativen N-Salden und sogar ohne N-Düngung Nitratauswaschung mit dem Sickerwasser in relevanter Höhe stattfindet (BULL 2023). Für beide Beobachtungen sind die natürlichen Gesamt-Stickstoffmengen und die Mineralisationsprozesse im Boden ursächlich. Nitratauswaschung und Stickstoffeinlagerung im Korn spiegeln hier die sprichwörtlichen zwei Seiten einer Medaille wider. Außerdem wird, angenommen, die im Versuch gefundenen Tendenzen zunehmend verstärkter Ertragsabnahme bei geringen N-Düngungshöhen sind real (siehe 4.2), die gegenläufige Beeinflussung von Ertragshöhe und N-Gehalt die einfache N-Düngewirkung auf den N-Gehalt im Korn überlagern.

4.4 Rohproteinertrag

Im Rohproteinertrag bzw. parallel dazu in der N-Abfuhr mit dem Korn kombinieren sich die Düngungseffekte auf Ertrag und Rohprotein in einem Parameter. Deshalb verwundert nicht, dass hier insgesamt mehr signifikante Ergebnisse erzielt wurden. Es lässt sich also ganz deutlich, wenn auch nicht in jedem Jahr in gleichem Umfang, ein steigender Rohproteinertrag/N-Abfuhr mit Korn mit zunehmendem Düngungsniveau nachweisen. Aber genau wie beim Rohproteingehalt ist hier ein sich mehrjährig verstärkender zunehmender oder abnehmender Effekt nicht zu erkennen (Tabelle 8, Tabelle 10, Tabelle 11). Auch im oben benannten Nachbarversuch ist dieser sich mehrjährig verstärkende Effekt nicht oder noch nicht nachweisbar. Dort findet sich allerdings bei Winterweizen, anders als im hier vorgestellten Versuch, ein Zusammenhang zur mittleren Ertragshöhe im Jahr. D. h. die Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten sind dort in ertragsstarken Jahren größer als in ertragsschwachen (Ergebnisse hier nicht dargestellt). Dass sich dieser Effekt im hier vorgestellten Versuch nicht zeigt, mag an der geringeren Spannweite der geprüften N-Düngungsvarianten und den höheren und ausschließlich positiven N-Salden liegen.

Tabelle 8: Rohproteinertrag von Winterraps in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau, unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede je Zeile, t-Test bei α = 0,05

	85 %		100 %		115 %	
2015	7,1	b	7,2	b	7,7	a
2016	5,3	a	5,6	a	5,7	a
2017	7,6	a	7,9	a	8,1	a
2018	5,0	a	5,1	a	5,7	a
2019	8,2	a	8,5	a	8,4	a
2020	7,4	b	8,0	a, b	8,3	a
2021	7,4	b	7,4	b	8,0	a
2022	6,6	a	6,8	a	7,0	a
2023	5,6	b	7,2	a	7,7	a
Mittelwert						

Tabelle 9: Rohproteinertrag von Rapsweizen in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau, unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede je Zeile, t-Test bei α = 0,05

	85 %		100 %		115 %	
2015	10,2	a	10,1	a	10,4	a
2016	8,4	a	8,6	a	9,2	a
2017	9,5	a	9,6	a	9,9	a
2018	6,7	c	7,7	b	8,2	a
2019	8,2	a	9,1	a	9,3	a
2020	7,4	a	7,5	a	7,9	a
2021	9,5	b	10,0	a	10,1	a
2022	7,8	b	8,5	a	8,9	a
2023	8,9	a	9,0	a	9,8	a
Mittelwert	**8,4**	**c**	**8,9**	**b**	**9,3**	**a**

Tabelle 10: Rohproteinertrag von Stoppelweizen in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau, unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede je Zeile, t-Test bei α = 0,05

	85 %		100 %		115 %	
2015	9,6	b	11,2	a	11,5	a
2016	7,1	a	7,7	a	8,0	a
2017	8,2	b	9,2	a	10,0	a
2018	5,0	b	5,4	b	5,9	a
2019	7,7	a	9,2	a	9,3	a
2020	6,6	c	7,0	b	7,6	a
2021	6,6	a	6,8	a	7,7	a
2022	7,1	c	7,8	b	8,3	a
2023	2,8	b	3,4	a	3,5	a
Mittelwert	**6,9**		**7,5**		**7,9**	

Tabelle 11: Rohproteinertrag von Wintergerste in Abhängigkeit vom N-Düngungsniveau, unterschiedliche Buchstaben bezeichnen signifikante Unterschiede je Zeile, t-Test bei α = 0,05

	85 %		100 %		115 %	
2015	9,9	a	9,9	a	11,1	a
2016	6,4	b	7,5	a	7,8	a
2017	8,5	a	8,7	a	8,5	a
2018	6,1	a	6,3	a	6,7	a
2019	8,6	c	9,0	b	9,3	a
2020	5,5	b	6,1	b	7,1	a
2021	7,8	b	7,9	b	8,6	a
2022	6,9	b	7,5	a, b	8,1	a
2023	-	-	-	-	-	-
Mittelwert	**7,5**	**c**	**7,9**	**b**	**8,4**	**a**

4.5 N-Nutzungseffizienz

Insgesamt zeigen sich zwei Haupteinflussfaktoren auf die N-Nutzungseffizienz sehr deutlich. Mit steigender N-Düngungshöhe sinkt die N-Nutzungseffizienz. Im Mittel der Fruchtfolge wurde im Versuchszeitraum eine mittlere N-Nutzungseffizienz von leicht über 70 % erreicht. Die Kulturart in Verbindung mit der Vorfrucht ist der zweite wichtige Faktor, er beeinflusst im Versuch die N-Nutzungseffizienz um 10 - 20 %. Den in Abbildung 7 dargestellten fast linearen Zusammenhängen liegen Einzeljahreswerte mit einer sehr großen Spannweite zugrunde. Der Jahreseinfluss auf die N-Düngewirkung ist also, wie bekannt, sehr groß.

Die N-Nutzungseffizienz des Stoppelweizens ist im Vergleich zum Berichtszeitraum 2015 - 2017 deutlich gesunken und liegt jetzt mit dem Winterraps gleichauf. Grund sind die Zunahme der Halmbasiserkrankungen in dieser Fruchtfolgestellung, die in den letzten Versuchsjahren die Erträge verringerten. Das schlägt sich deutlich auf die Düngerausnutzung wider. Die Wintergerste weist dagegen selbst in der ungünstigen Fruchtfolgestellung nach zweimal Getreide die beste N-Nutzungseffizienz auf. Auch insgesamt ist das Niveau der N-Nutzungseffizienz im Vergleich zu 2015 - 2017 gesunken. Die Gründe dafür sind im Dürrejahr 2018 und den folgenden ebenfalls durch Trockenheit geprägten Jahren zu finden, wogegen die Jahre 2015 und 2017 zwei ertragsstarke Jahre waren (Abbildung 7).

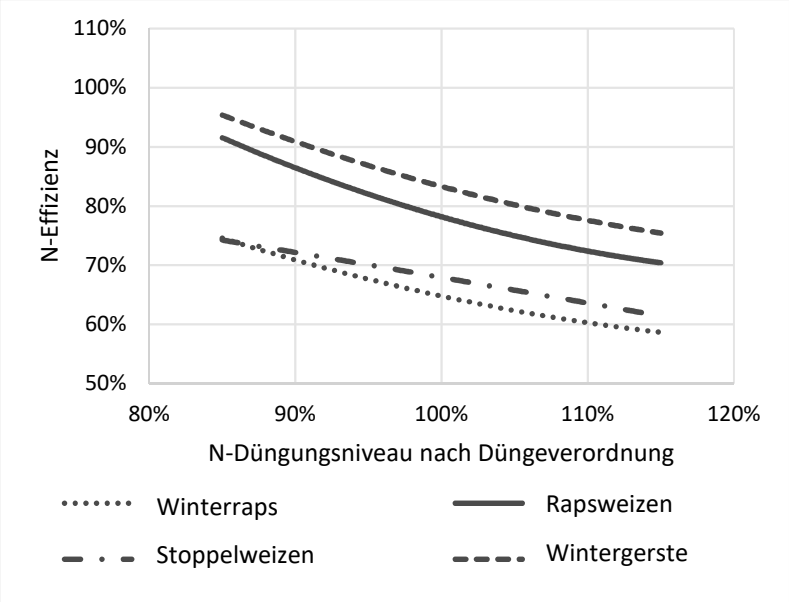


Abbildung 7: N-Nutzungseffizienz in Abhängigkeit von Kulturart und N-Düngungshöhe, Gülzow 2015-2023 (100 % beziehen sich über den gesamten Versuchszeitraum auf die 100 % der DüV von 2017)

4.6 N-Saldo

Der in Abbildung 8 über den Versuchszeitraum kumuliert dargestellte N-Saldo liegt für alle drei Düngungsvarianten über den Werten der in etwa vergleichbaren Düngungsstufen (80, 100 und 120 %) des Nachbarversuches (Abbildung 5). Ursache ist die hier in Bezug auf den N-Saldo ungünstigere Fruchtfolge. Dort wird mit einem Düngungsniveau von 100 % ein mittlerer jährlicher N-Saldo von ca. 20 kg/ha erreicht, was die mit 30 – 50 kg/ha von TETZLAFF et al. 2020 für die Region kalkulierten maximal zulässigen N-Bilanzsalden zur Erreichung einer Nitratkonzentration im Sickerwasser von maximal 50 mg NO_3/l unter jeder landwirtschaftlich genutzten Fläche unterschreitet. Die hier geprüfte Fruchtfolge erreicht nur mit dem Düngungsniveau von 85 % einen mittleren N-Saldo von 26 kg/ha und liegt bei 100% Düngung bei 50 kg/ha. Unter Beachtung eines Toleranzaufschlages von 20-25 kg/ha, der für eine Praxisübertragung der Ergebnisse aufgeschlagen werden müsste, wird klar, dass der N-Saldo-Zielwert < 30 – 50 kg/ha mit einer engen regionstypischen Winterungs-Fruchtfolge nur mit einem N-Düngungsniveau von ca. 80 % erreichbar ist (Abbildung 8, Abbildung 11, Tabelle

6). An dieser Stelle muss allerdings nochmals darauf hingewiesen werden, Nitratausträge im Ackerbau trotz geringer N-Salden auftreten (BULL 2023).

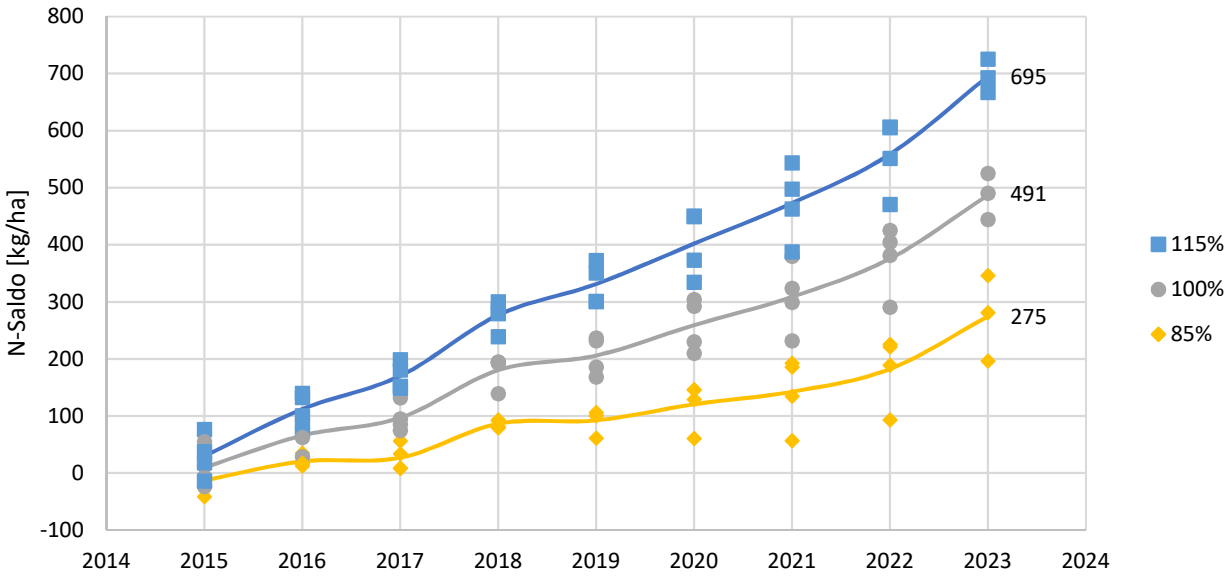


Abbildung 8: Kumulierter N-Saldo in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe im Versuchszeitraum

4.7 Humus

Eine Beeinflussung der Humusgehalte in der Ackerkrume ist im Versuch weder anhand des Parameters organischer Kohlenstoff noch am heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalt zu erkennen. Der organische Kohlenstoffgehalt der Versuchsflächen liegt bei 0,9 % TS, das entspricht mit einem üblichen Umrechnungsfaktor von 1,724 einem Humusgehalt von 1,6 (Spannweite 1,2 – 2,4) und ist typisch für die grundwasserfernen diluvialen Ackerböden mit geringem Tongehalt (ZIMMER et al. 2020; Abbildung 9).

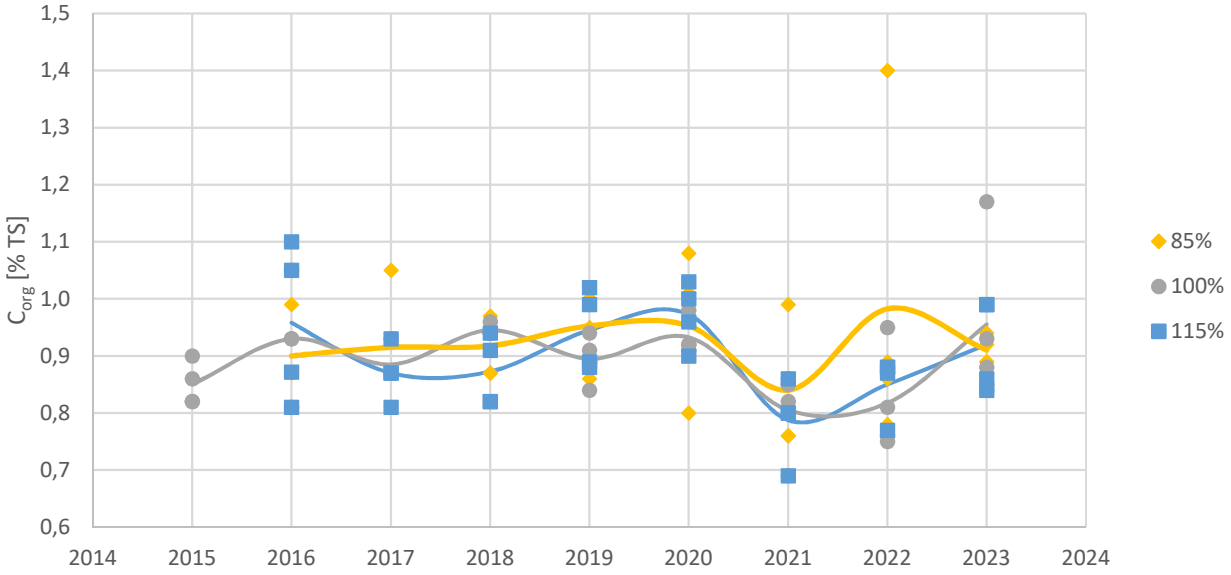


Abbildung 9: Gehalt an organischem Kohlenstoff in der Ackerkrume (0-30 cm) zu Vegetationsbeginn in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe

An den Werten des heißwasserlöslichen Kohlenstoffs, der zur Einschätzung der leichter umsetzbaren Anteile der organischen Substanzen im Boden dienen kann, fällt ein Anstieg der Werte innerhalb der ersten drei Versuchsjahre auf. Eine Erklärung dafür wäre der schlechte Kulturzustand dieser Fläche bis 2013, als sie unter

ökologischer Bewirtschaftung über mehrere Jahrzehnte ohne mineralische und im Prinzip auch ohne organische Düngung geführt wurden. In den anschließenden Jahren scheint sich ein ähnlicher Verlauf wie bei den Werten der Rohproteinerträge anzudeuten (geringere Werte 2018 und 2020). Dieser mögliche Zusammenhang lässt sich an den vorliegenden Ergebnissen aber weder prüfen noch erklären und könnte auch rein zufällig sein (Abbildung 10). Ein Zusammenhang zwischen N-Düngung und leicht umsetzbarer organischer Substanz im Boden erscheint interessant und sollte in anderen Versuchsanlagen weiter untersucht werden.

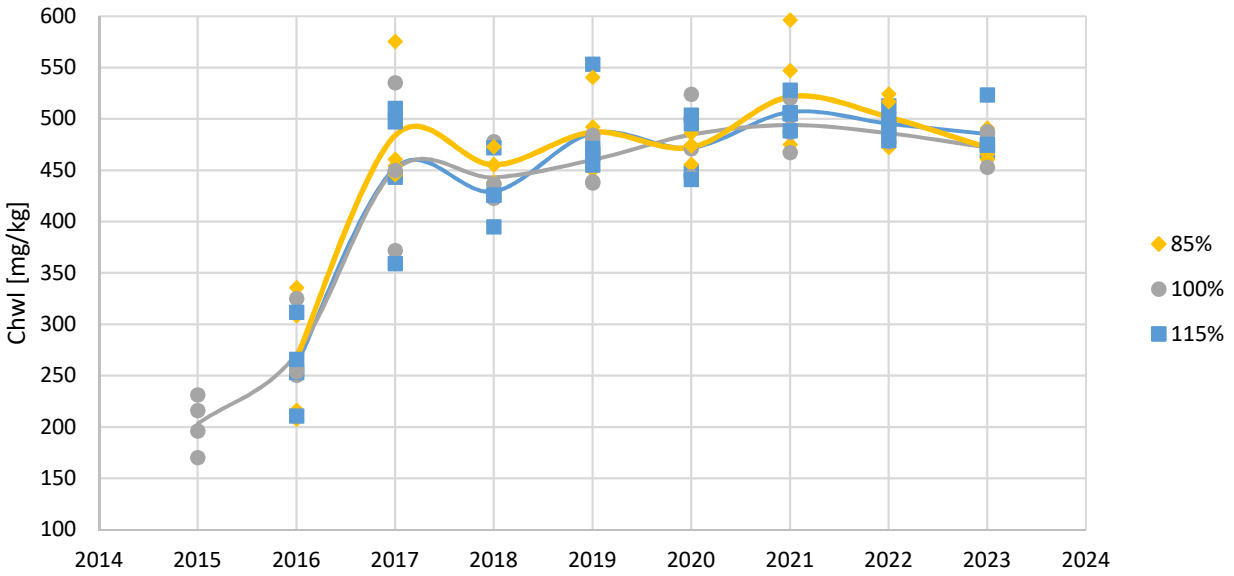


Abbildung 10: Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff in der Ackerkrume (0-30 cm) zu Vegetationsbeginn in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe

5 Fazit

Die Erhöhung der N-Nutzungseffizienz ist durch eine Reduzierung der N-Düngung erreichbar. Diese Strategie geht aber zulasten von Ertrag und Rohproteingehalt im Korn (Zielkonflikt). These 1 wird damit bestätigt (S. 6). Im Mittel der geprüften Fruchtfolge und der geprüften N-Düngungsspanne konnte **je 10 % N-Düngeniveau-Reduzierung der N-Saldo um ca. 15 kg/ha verringert werden. Die N-Nutzungseffizienz stieg dabei um ca. 5 Prozentpunkte**.

Die Verbesserung der Umweltwirkung wird mit Rückgängen bei den Kornerträgen und den Rohproteingehalten erkauft. Im Mittel der geprüften Fruchtfolge führte ein um **10 % reduziertes N-Düngeniveau** zu einem **Ertragsrückgang von 1 dt/ha in Getreideeinheiten und einem um 0,3 - 0,5 Prozentpunkten geringerem Rohproteingehalt beim Winterweizen**.

Die in den **Praxisbetrieben** in den nach **§ 13a DüV** ausgewiesenen „roten Gebieten“ wahrgenommenen Ertrags- und Rohproteinabfälle können diese Werte überschreiten. Diese Ergebnisse sind aber mit der größeren Differenz zwischen dem tatsächlichem betrieblichen N-Düngungsniveau vor 2017, welches z. T. über dem von offiziellen Stellen empfohlenen Niveau lag, und dem N-Düngungsniveau entsprechend 80 % DüV zu erklären.

Die **Vorfrucht** wirkt sich auf das Niveau des Rohproteingehaltes im Korn, nicht aber auf die N-Düngewirkung aus. Rapsweizen hatte im Mittel der Versuchsjahre einen um **0,6 Prozentpunkte** höheren **Rohprotein**gehalt als Stoppelweizen.

Die in These 2 formulierte Erwartung zu **langfristig sinkenden Erträgen** bei reduziertem Düngungsniveau kann mit der hier vorgestellten Versuchsreihe nicht vollständig sicher beantwortet werden. Wahrscheinlich tritt dieser Effekt **nur bei stark negativen N-Salden und über sehr lange Zeiträume** (>> 10 Jahre) auf (S. 6).

Ein **zunehmendes Absinken der Rohproteingehalte** aufgrund mehrjährig reduziertem, aber gleichbleibendem Düngungsniveau ist **sehr unwahrscheinlich**. Entsprechende Beobachtungen aus Dänemark sind sich verändernden Rahmenbedingungen (immer weitere Reduzierung des Düngeniveaus) zuzuschreiben.

Die zur Einhaltung der Wasserrahmenrichtlinienziele kalkulierten **maximal zulässigen N-Salden** können bei engen praxisüblichen Winterungs-Fruchtfolgen mit Raps und Weizen nicht mit dem in der Düngevorordnung 2017 festgelegten N-Düngungsniveau (100 %) erreicht werden. Dafür ist eine **Veränderung der Fruchtfolge oder** eine weitere Reduzierung um ca. 20 %, was **80 % DüV** entspricht, nötig (Abbildung 11). Zu beachten ist, dass trotz Einhaltung oder Unterschreitung dieser maximal zulässigen N-Salden Nitratauswaschung aus der Ackerfläche je nach angebauter Kulturart in relevanter Größenordnung stattfindet.

Veränderungen des Humusgehaltes im Boden sind aufgrund von N-Düngungsveränderungen im Bereich von +/- 15 % ebenfalls **weder** kurz- noch mittelfristig **zu erwarten**. Auf die $\mathbf{N_{min}}$-Gehalte zu Vegetationsbeginn hat eine Veränderung des Düngungsniveaus im Bereich von 115 - 85% DüV **keinen Einfluss**.

In den Versuchsergebnissen deutet sich ein Zusammenhang zwischen Bewirtschaftung, Witterung und **leicht umsetzbarer organischer Substanz im Boden** (heißwasserlöslicher Kohlenstoff) an. Diese Beobachtung könnte zum Verständnis des Stickstoff- und Kohlenstoffumsatzes im Boden bei sich ändernden klimatischen Bedingungen beitragen und sollte deshalb weiter verfolgt werden.

Der hier vorgestellte Versuch wurde mit der Ernte 2023 beendet, da die 2015 festgelegte Spannweite der N-Düngungshöhe zusammen mit der gewählten Fruchtfolge nur zu deutlich positiven N-Salden führt und ein Nachbarversuch mit einer größeren Düngungshöhen-Spannweite fortgeführt wird. Zusätzliche Erkenntnisse zu der hier vorgestellten Auswertung und zu den Ergebnissen des Nachbarversuches sind deshalb nicht zu erwarten.

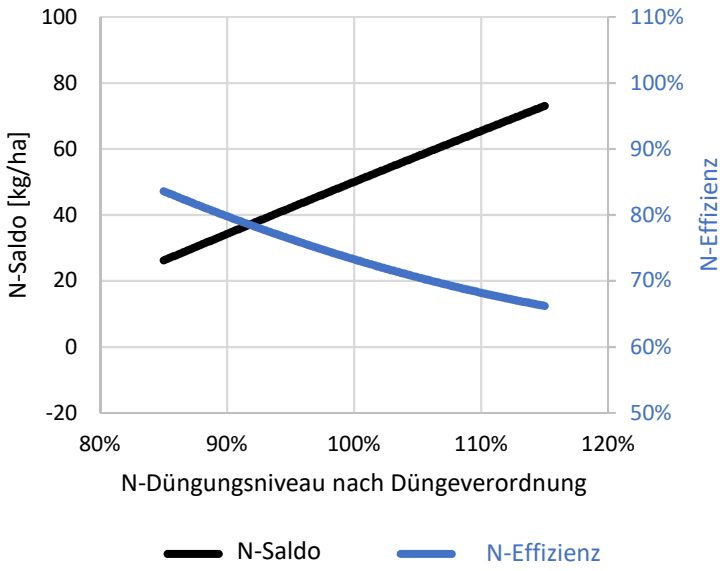


Abbildung 11: N-Saldo und N-Nutzungseffizienz in Abhängigkeit von der N-Düngungshöhe im Mittel der Fruchtfolge Winterraps – Winterweizen – Winterweizen - Wintergerste, Gülzow 2015-2023

6 Überleitung

Die Überleitung der im Rahmen dieses Forschungsthemas gewonnenen Ergebnisse erfolgte in Form nachfolgender Publikationen und Vorträge:

Reinelt, L.; Seidel, F.; Fechner, H.; Otten, L.; Möller, K.; Raible, S. et al. (2024): How does a 20% reduction in nitrogen fertilisation affect crop root biomass? In: VDLUFA-Kongressband. Geplant.

Bull, I. (2024): Nitratauswaschung und Düngung, N-Düngung Winterweizen, Humuserhalt. Vortrag. Fachschule Bockhorst. 13.02.2024.

Bull, I.; Heilmann, H. (2023): Stellungnahme zur Umsetzung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten (AVV Gebietsausweisung – AVV GeA). An LM. 25.04.2023

Heilmann, H.; Bull, I. (2023): Stellungnahme zur Kleinen Anfrage der FDP: Düngelandesverordnung - Nitratmessstellen und Kosten roter Gebiete. an LM. 30.03.2023.

Bull, I. (2020): N-Austräge vermeiden: Möglichkeiten und Grenzen. Mähdruschauswertung, Video auf Vimeo. 07.12.2020.

Bull, I. (2020): N-Düngung – aktuelle Forschungsergebnisse. Winterschulung des Bauernverbandes. 14.01.2020.

Bull, I.; Peters., J. (2019): Düngung mit begrenzten N-Mengen – Mähdruschauswertung. Vorträge am 26., 27., 28.11.19. Werder, Rom, Goldewin.

Peters, J.; Bull, I. (2019): Neujustierung der Stickstoffdüngung – Ein aktuelles Dauerthema. Eröffnungsveranstaltung der Winterschulungen für Agrargenossenschaften. Vortrag. 5.11.19. Paaren.

Bull, I. (2019): Stickstoffdüngung im Spannungsfeld von Wetterextremen und strengen Auflagen. Vortrag. Rosenow. 26.06.2019.

Bull, I. (2019): N-Düngung und N-Salden in der Fruchtfolge. Feldführung für Studenten der Fachhochschule Neubrandenburg. 14.5.19.

Bull, I. (2019): Auswirkung einer Reduzierung der Düngung um 20% unter den N-Bedarfswert der aktuell gültigen Düngeverordnung (2017). Zuarbeit für Artikel in der Bauernzeitung. An Gerd Rinas. 4.9.19.

Heilmann, H.; Bull., I.; Peters, J.; Michel, V.; Annen, T.; Ziesemer, A. (2019): Bewertung der geplanten Anpassungen der Düngeverordnung angefordert von Dr. K. Lorenz, LM/370 am 19.02.2019.

Peters, J..; Bull, I. (2018): Stand und Ergebnisse aus Versuchen zur Weizen-N-Düngung. 29.01.2018. Kolloquium IPB. Gülzow.

Bull, I. (2018): N-Effizienz in Fruchtfolgen. Zwischenbericht.

Bull, I. (2018): Fruchtfolge erweitern oder Düngung reduzieren – Was bringt es für die N-Bilanz? Ratgeber der Bauernzeitung. November 2018.

Bull, I.; Dehn. H. (2017): Neues auf den Versuchsfeldern. Versuchsfeld „An der Nebel“/ Frucht-folge „Am Krebssee“. 20.03.2017.Gülzow. Kolloquium IPB.

Bull, I. (2017): N-Effizienz in Fruchtfolgen. 13.06.2017. Gülzow. Mähdruschtag.

Ziesemer, A.; Bull, I. (2016): Mit der Stickstoff-Quote zurechtkommen. DLZ Agrarmagazin. März 2016. S. 2-5.

Bull, I. (16.06.2016): Zuarbeit - Bedeutung einer Herbst-N-Düngung für den Stoppelweizenanbau (Winterweizen). an: Dr. H.-E. Kape für Arbeitskreis Düngeberatung und Nährstoffhaushalt (VLK).

Bull, I. (2016): Düngung 2016. Empfehlungen auf der Grundlage von Versuchsergebnissen. Informationsveranstaltung Düngung 2016. Gotthun. 17.02.2016.

Bull, I. (2016): N-Düngung beim Weizen – Wo sind die Stellschrauben? 41. Weizentag. 22.06.2016. Köchelstorf.

Bull, I. (2016): aktuelle und geplante Düngungsversuche der LFA. Arbeitskreis Düngung des Landes MV. 29.06.2016. Gülzow.

Bull, I. (2015): Fruchtfolgeversuch Gülzow „N-Effizienz von Fruchtfolgen“. Kolloquium der LFA. Gülzow. 26.01.2015.

Bull, I. (2014): Fruchtfolgeversuche – bekannte Ergebnisse – Neue Fragen. Kolloquium LFA. Gülzow. 24.3.2014.

7 Literaturverzeichnis

Baxter, C.; Clarke, S. (2023): Analysis of the Yield Enhancement Network (YEN) database to investigate Nitrogen Use Efficiency (NUE) and influencing factors. Project No.: 1022333. revised version. Defra (ADAS General Notes).

Buglowski, D. (2023): Ertragsauswertung im Dauerversuch „organische Düngung in der Fruchtfolge“. Gülzow. unveröffentlicht.

Bull, I. (2023): Sickerwassermessungen: Aktuelles 2021/22 und Ausblick. In: Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei. 64/2023, 63-78. online unter: https://www.landwirtschaft-mv.de/Landesforschungsanstalt/LFA%E2%80%93Mitteilungen/Hefte/Heft64/

Congreves, K. A.; Otchere, O.; Ferland, D.; Farzadfar, S.; Williams, S.; Arcand, M. M. (2021): Nitrogen Use Efficiency Definitions of Today and Tomorrow. In: *Frontiers in plant science* 12, S. 637108. DOI: 10.3389/fpls.2021.637108.

Dyke, G. V.; George, B. J.; Johnston, A. E.; Poulton, P. R.; Todd, A. D. (1983): The Broadbalk wheat experiment 1968-78: yields and plant nutrients in crops grown continuously and in Rotation. Rothamsted Experimental Station Report for 1982 Part 2. Hg. v. Rothamsted Research, Lawes Agricultural Trust und E-RA Curator Team.

Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2020 (BGBl. I S. 846) geändert worden ist.

Glendining, M.; Poulton, P. (2023): Dataset: Broadbalk Wheat annual grain and straw yields 1968-2022 *Electronic Rothamsted Archive, Rothamsted Research* https://doi.org/10.23637/rbk1-yld6822-01

Idler, F. (2017): Bodenprofilaufnahme 18916. Geologischer Dienst Mecklenburg-Vorpommern, 25.09.2017. unveröffentlicht.

Johnston, A. E.; Poulton, P. R. (2009): Nitrogen in agriculture: an overview and definitions of nitrogen use efficiency. York: International Fertiliser Society (Proceedings / International Fertiliser Society, 651).

Kage, H.; Räbiger, T.; Sieling, K. (2022): Stickstoffdüngung zu Winterraps und Winterweizen. Eine Evaluierung der Düngeverordnung, methodischer Aspekte der Auswertung von Düngeversuchen sowie der Beziehung zwischen Düngungshöhe und Stickstoffauswaschung. In: *Berichte über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 100 (1), S. 1–38.

Kunzová, E.; Hejcman, M. (2009): Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. In: *Field Crops Research* 111 (3), S. 226–234. DOI: 10.1016/j.fcr.2008.12.008.

Kühn, D.; Zimmer, J.; Baumecker, M.; Ellmer, F.; Rühlmann, J.; Bauriegel, A. et al. (2009): Exkursionsbroschüre zur Tagung der Bodenspezialisten der Bundesländer vom 08. bis 10. Juni 2009 in Brandenburg. MLUV.

Lausen, P. (2016): Verminderte N-Intensität im Pflanzenbau - Modell Dänemark. In: 100 Jahre Düngerecht - Düngeintensität im Wandel. Tagung des Verbandes der Landwirtschaftskammern e. V. (VLK) und des Bundesarbeitskreises Düngung (BAD). Würzburg, 19., 20.04.2016. Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), S. 41–60. Online verfügbar unter https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/%25uid/publikationen/tb2016_final_low.pdf.

Oenema, O.; Brentrup, F.; Lammel, J.; Bascou, P.; Billen, G.; Dobermann, A. et al. (2015): Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems. EU Nitrogen Expert Panel. Wageningen University. Online verfügbar unter https://www.eunep.com/wp-content/uploads/2023/12/Report-NUE-Indicator-Nitrogen-Expert-Panel-18-12-2015.pdf.

Perryman, S.; Wilmer, W. (2021): Dataset: Broadbalk Crop Nutrient Content, Wheat 1968-2017 Electronic Rothamsted Archive, Rothamsted Research https://doi.org/10.23637/rbk1-BKNUTRW-01

Thi Huyen, Thai (2022): Cereal grain yield responses to fertilizer management in sandy soil in a long-term fertilizer experiment in Northeast Germany. Humboldt-Universität, Berlin. Online verfügbar unter https://e-doc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/28028/dissertation_thai_huyen.pdf;jsessionid=A6C6BF2BDDF7E38E0922380E7B81338C?sequence=5.

Reinelt, L.; Seidel, F.; Fechner, H.; Otten, L.; Möller, K.; Raible, S. et al. (2024): How does a 20% reduction in nitrogen fertilisation affect crop root biomass? In: VDLUFA-Kongressband 2024. geplant.

Rothamsted Research (2022). Broadbalk Wheat yields and N uptake Section 1, 2001-2015 Electronic Rothamsted Archive, Rothamsted Research 10.23637/rbk1-yldS10115-01

Schulze Mönking, S.; Klapp, C. (2010): Überarbeitung des Getreide- und Vieheinheitenschlüssels. Endbericht zum Forschungsprojekt 06HS030. Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften.

Statistisches Amt Mecklenburg-Vorpommern (2015 – 2023): Ernteberichterstattung über Feldfrüchte und Grünland in Mecklenburg-Vorpommern. Online unter https://www.laiv-mv.de/Statistik/Ver%C3%B6ffentlichungen/Statistische-Berichte/C/.

Tetzlaff, B.; Kunkel, R.; Ta, P.; Wendland, F.; Wolters, T.: Fortführung der Nährstoffmodellierung Mecklenburg-Vorpommern. Endbericht 2020. Jülich. Online verfügbar unter https://www.wrrl-mv.de/static/WRRL/Dateien/Dokumente/Service/Dokumente/2020_Naehrstoffmodellierung_Juelich.pdf.

Zimmer, J.; Bull, I.; Flaig, H.; Wiesmeier, Martin; Koch, D.; Schröter, H. et al. (2020): Humus - Humusgehalt. 2. Aufl. Arbeitsfeld "Pflanzenbauliche Aspekte der Humusreproduktion" im Verbund der Landesanstalten und Landesämter für Landwirtschaft (Grundsätze der Humuswirtschaft zur guten fachlichen Praxis der ackerbaulichen Bodennutzung (§ 17 BBodSchG)). Online verfügbar unter https://www.landwirtschaft-mv.de/serviceassistent/download?id=1633313.