



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Studiengang Agrarwirtschaft M.Sc.

Prof. Dr. E. S. Dobers

Prof. Dr. B. Seggewiß

Masterthesis

Auswirkung einer verringerten N-Düngung auf
Ertrag und Qualität von Winterweizen unter
Berücksichtigung von feldinternen
Bodenunterschieden auf einem
Grundmoränenstandort in Westmecklenburg

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2020-0623-6

vorgelegt von:

Lars Brüggemann

Neubrandenburg

März 2021

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Stand des Wissens	2
2.1 Winterweizen	2
2.2 Stickstoff (N) und N-Düngung	4
2.2.1 N-Strom im Weizenanbau.....	4
2.2.2 Düngeverordnung	5
2.2.3 Ziele der N-Düngung	7
2.2.4 N-Bedarf und Aufnahme	8
2.2.5 Reduzierte und teilflächenangepasste N-Düngung	9
2.3 On Farm Research	11
2.3.1 Bedeutung und Beispiele	12
2.3.2 Werkzeuge im On Farm Research.....	13
3 Material und Methoden	16
3.1 Versuchsstandort.....	16
3.1.1 Klima	16
3.1.2 Boden.....	18
3.2 Versuchsanordnung.....	19
3.2.1 Düngungsvarianten.....	19
3.2.2 Untersuchungsorte	22
3.3 Datenerfassung	22
3.3.1 Allgemeines Anbausystem und Anbau zur Ernte 2020	23
3.3.2 Felderhebungen	23
3.3.3 Versuchsbeerntung.....	24
3.4 Laboranalyse und Datenauswertung	25
4 Ergebnisse.....	28
4.1 Ergebnisse des Kerndruschs	29

4.1.1	Kornertrag und Proteingehalt.....	29
4.1.2	Proteinertrag und N-Effizienz.....	30
4.1.3	Anzahl der Wiederholungen.....	31
4.2	Einfluss des Standorts auf N-Tester Werte und Ertragskartierung	32
4.2.1	N-Tester	32
4.2.2	Ertragskartierung	34
4.2.3	Zusammenhänge von N-Tester und Ertragskartierung	36
4.3	Einfluss des Standorts und Zusammenhänge von Untersuchungsergebnissen	37
4.3.1	Einfluss des Standorts auf die Ertragsparameter, Kornertrag und Qualität	37
4.3.2	Zusammenhang von Ertrag und Ertragsparametern	41
4.3.3	Zusammenhang von Ertrag und Qualität	42
4.3.4	Zusammenhang der N-Tester Werte sowie NDVI und Ertrag bzw. Proteingehalt 44	
4.3.5	Zusammenhang von Ertrag und Ertragskartierung	47
4.4	Einfluss der Düngung auf einzelne Standorte und Zusammenhänge von Untersuchungsergebnissen auf einzelnen Standorten.....	48
4.4.1	Ertrag	49
4.4.2	Qualität und N-Effizienz	53
4.4.3	Zusammenhänge der Untersuchungsparameter in standortspezifischer Betrachtung	57
5	Diskussion	63
5.1	Parzellenkerndrusch.....	63
5.2	N-Tester und Ertragskartierung.....	64
5.3	Ergebnisse der Laboranalyse	67
5.3.1	Einfluss der N-Düngung.....	67
5.3.2	Einfluss des Standorts.....	69
5.4	Schlussfolgerungen	72
6	Zusammenfassung	75
	Literaturverzeichnis.....	77
	Anhang.....	81
	Eidesstattliche Erklärung.....	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der N-Düngung auf dem Versuchsfeld.....	21
Tabelle 2: Mittelwert und Standardabweichung der ausgezählten Feldaufgänge an den Standorten Kuppe, Senke und Ebene	28
Tabelle 3: Ergebnisse der Varianzanalyse des Einflusses vom Standort auf die Ergebnisse der Schnittprobenuntersuchung. Der p-Wert kennzeichnet signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	37
Tabelle 4: Übersicht der p-Werte aus der Varianzanalyse für Einfluss der N-Düngung auf die Standorte Kuppe, Ebene und Senke. Ergebnisse Differenziert nach dem gesamten Probenumfang und dem vernachlässigen von Parzelle 1 u. 2. Fettgedruckte p-Werte zeigen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	49
Tabelle 5: Übersicht der p-Werte aus dem Post-Hoc-Test der Unterschiede zwischen den Standorten bezogen auf den Ertrag, unterschieden nach N-Variante und differenziert zwischen allen Proben und dem Ausschluss von Parzelle 1 u. 2. Fett gedruckte Werte zeigen signifikante und kursiv gedruckte tendenzielle Unterschiede zwischen den Standorten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	50
Tabelle 6: Übersicht der p-Werte aus dem Post-Hoc-Tests von den N-Varianten bü 100 % und N_{red} 80% der Varianzanalyse vom Standort, bezogen auf die Qualität. Differenzierung zwischen allen Proben und dem Ausschluss von Parzelle 1 u. 2. Fett gedruckte Werte zeigen signifikante und kursiv gedruckte tendenzielle Unterschiede zwischen den Standorten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	55
Tabelle 7: Übersicht der Korrelationsanalyse der einzelnen Standorte Kuppe, Ebene und Senke. Ergebnisse der Zusammenhänge von Trockenmasseertrag und Proteingehalt mit Ertragsparametern, Ertrag und Protein. $\alpha=0,05$	58
Tabelle A 1: Ergebnisse des Post-Hoc-Tests zur Unterscheidung der N-Tester Werte nach Standort an den fünf Untersuchungstagen ($\alpha=0,05$).....	88
Tabelle A 2: Übersicht der Korrelationsanalyse der Ertrags- und Qualitätseigenschaften zu den Werten der Laboranalyse. Differenzierung zwischen allen Proben und dem Ausschluss der Proben aus Parzelle 1 u. 2.	93
Tabelle A 3: Übersicht der Korrelationsanalyse des Ertrags und Proteingehalts mit den N-Tester Werten sowie dem NDVI. Differenzierung der Proben zwischen allen Proben und dem Ausschluss der Proben aus Parzelle 1 u.2.	95
Tabelle A 4: Übersicht der Regressionsanalyse der N-Tester Werte und Ertragsparameter bei Unterscheidung der N-Varianten bezüglich Trockenmasseertrag und Proteingehalt. $\alpha=0,05$	98

Tabelle A 5: Übersicht der Regressionsanalyse der N-Tester-Werte, unterteilt nach Standort
Kuppe, Ebene und Senke, mit Trockenmasseertrag und Proteingehalt ($\alpha=0,05$)
..... 99

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: N-Strom im Qualitätsweizenanbau, vereinfacht dargestellt.....	5
Abbildung 2: Übersicht der §13 Gebiete in MV.....	6
Abbildung 3: Ertragsfunktionen für die Böden sandiger Lehm (40 Bodenpunkte) und schluffiger Lehm (80 Bodenpunkte).....	9
Abbildung 4: Ertrag in Abhängigkeit von der N-Düngung sowie die zugehörige N-Effizienz in $\text{kg} \cdot (\text{kg N})^{-1}$ im Vergleich zwischen Hang (links) und Ebene (rechts).....	11
Abbildung 5: Klimadiagramm von 19205 Pokrent.....	17
Abbildung 6: Tägliche Niederschlagsmengen in Schwerin im Frühjahr 2020 in mm.....	18
Abbildung 7: Versuchsanlage mit sechs Wiederholungen in zwölf Parzellen. Grün= 100 % N; Weiß= 80 % N (Eigene Darstellung).....	20
Abbildung 8: Applikationskarte für die N-Düngung. Grün= 100 %; Braun= 80 %.....	21
Abbildung 9: Anordnung der Untersuchungsorte. Gelb= Kuppe; Rot= Ebene; Blau= Senke (eigene Darstellung).....	22
Abbildung 10: Gewogener Kornertrag aus dem Kerndrusch der Parzellen, aufgeteilt in die zwei N-Varianten.....	29
Abbildung 11: Ermittelter Proteingehalt aus Korntankproben des Kerndrusches der Parzellen, differenziert zwischen den zwei N-Varianten.....	30
Abbildung 12: Berechnete N-Effizienz aus dem Kerndrusch der Parzellen, Differenzierung zwischen den zwei N-Varianten.....	31
Abbildung 13: Einfluss der N-Düngung auf die N-Effizienz. Der p-Wert zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($\alpha=0,05$).....	31
Abbildung 14: Einfluss der Variante auf die Werte des N-Testers an den fünf Untersuchungstagen im Frühjahr 2020. Die p-Werte zeigen die Irrtumswahrscheinlichkeit für signifikante Unterschiede zwischen den N-Varianten ($\alpha=0,05$); n.s. = nicht signifikant.....	33
Abbildung 15: N-Tester Wert in Abhängigkeit von dem Untersuchungsdatum, Unterscheidung der Standorte Kuppe, Ebene und Senke. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Untersuchungsorte aus dem Post-hoc-Test ($\alpha=0,05$).....	34
Abbildung 16: Ertrag nach Ertragskartierung des Mähdeschers aus dem Kerndrusch der Parzellen, aufgeteilt in die zwei N-Varianten.....	35
Abbildung 17: Zusammenhang der Werte aus Ertragskartierung mit den gewogenen Kornerträgen aus dem Parzellen-Kerndrusch. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	35

Abbildung 18: Einfluss des Standorts, aufgeteilt in Kuppe, Ebene und Senke, auf die Werte der Ertragskartierung. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede aus dem Post-Hoc-Test. ($\alpha=0,05$)	36
Abbildung 19: Einfluss des Standorts auf den Trockenmasseertrag der Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$).....	39
Abbildung 20: Einfluss des Standorts auf den Proteingehalt der Untersuchungsorte. Betrachtung aller Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)	40
Abbildung 21: Einfluss des Standorts auf den Proteingehalt der Untersuchungsorte. Betrachtung der Schnittproben ohne Parzelle 1 u. 2. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)	40
Abbildung 22: Einfluss des Standorts auf den Proteinertrag der Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$).....	41
Abbildung 23: Zusammenhang von der ausgezählten Ährendichte und des Trockenmassenertrags der Untersuchungsorte kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	42
Abbildung 24: Zusammenhang des feuchtebereinigten Kornertrags der Untersuchungsorte und des Proteingehalts kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	43
Abbildung 25: Zusammenhang des Proteingehalts und der Ährendichte der Untersuchungsorte, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	44
Abbildung 26: Zusammenhang des N-Tester Werts vom 17.06. und dem Proteingehalt der Untersuchungsorte, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	46
Abbildung 27: Zusammenhang des NDVI vom 23.07. und dem Proteingehalt der Ernteprobe vom Untersuchungsort, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	47
Abbildung 28: Zusammenhang von dem interpolierten Wert der Ertragskartierung in dem gewogenen Kornertrag bei differenzierung der Standorte. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	48
Abbildung 29: Einfluss der einer Reduzierten N-Düngung auf die Trockenmasseerträge an einzelnen Standorten. Der p-Wert zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den N-Varianten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	49

Abbildung 30: Einfluss des Standorts auf die Halmlänge, unterschieden nach den Düngevarianten bü 100% und N _{red} 80 %. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Halmlängen bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	51
Abbildung 31: Einfluss des Standorts auf die Ährendichte, unterschieden nach den Düngevarianten. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Ährendichte bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	52
Abbildung 32: Einfluss des Standorts auf den Trockenmasseertrag der Untersuchungsorte, unterteilt nach N-Variante. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten einer N-Variante bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	53
Abbildung 33: Einfluss der Düngevariante auf den Proteingehalt an den Untersuchungsorten, unterteilt nach Standort. Die p-Werte zeigen Signifikanzen bezüglich der Unterschiede zwischen den Düngevarianten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$.	54
Abbildung 34: Einfluss des N-Reduzierung auf die N-Effizienz an den Untersuchungsorten, unterteilt nach Standort. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der N-Variante bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	55
Abbildung 35: Einfluss des Standorts auf den Proteingehalt an den jeweiligen Untersuchungsorten, aufgeteilt nach den N-Varianten. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	56
Abbildung 36: Einfluss des Standorts auf den Proteinertrags an den jeweiligen Untersuchungsorten, aufgeteilt nach den N-Varianten. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	57
Abbildung 37: Standortdifferenzierter Zusammenhang des feuchtebereinigten Kornertrages und der Ährendichte. Linien kennzeichnen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation beim Niveau von $\alpha=0,05$	59
Abbildung 38: Standortdifferenzierter Zusammenhang des feuchtebereinigten Kornertrages und der Halmlänge. Linien Kennzeichnen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	60
Abbildung 39: Standortdifferenzierter Zusammenhang des Proteingehalts und der Werte des N--Testers vom 20.05. Linien kennzeichnen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	61

Abbildung 40: Standortdifferenzierte Zusammenhänge der Proteingehalte und der feuchtebereinigten Erträge. Linien zeigen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	62
Abbildung A 1: Zusammenhang der Wellenlänge des Lichts und der relativen Reflektion, unterteilt in sichtbares, nahinfrarotes und kurzwelleninfrarotes Licht	81
Abbildung A 2: Gegenüberstellung des Zusammenhangs der Wellenlänge des Lichts und der relativen Reflektion in Bezug auf vitale und gestresste Vegetation/Pflanzen	81
Abbildung A 3: Monatliche Niederschläge im Vergleich zum langjährigen Mittelwert an der Wetterstation Schwerin	82
Abbildung A 4: Monatsmitteltemperatur im Vergleich zum langjährigen Mittelwert an der Wetterstation Schwein.....	82
Abbildung A 5: Bruker MPA II NIR-Sensor	83
Abbildung A 6: Übersicht der pH-Werte innerhalb der einzelnen Beprobungszonen (Ergebnisse der Bodenuntersuchungen aus dem Jahr 2016)	83
Abbildung A 7: Übersicht der K-Versorgung [$\text{mg K}_2\text{O} \cdot 100 \text{ g Boden}^{-1}$] in den Beprobungszonen, die sich mit den Versuchspartellen schneiden (Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus dem Jahr 2016). Farblich unterschiedene Versorgungsstufen: Weiß = B; Grün = C	84
Abbildung A 8: Übersicht der P-Versorgung [$\text{mg P}_2\text{O}_5 \cdot 100 \text{ g Boden}^{-1}$] in den einzelnen Beprobungszonen, die sich mit den Versuchspartellen schneiden (Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus dem Jahr 2016). Farbe Weiß = Versorgungsstufe B	84
Abbildung A 9: Übersicht der Mg-Versorgung [$\text{mg Mg} \cdot 100 \text{ g Boden}^{-1}$] in den einzelnen Beprobungszonen, die sich mit den Versuchspartellen schneiden (Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus dem Jahr 2016). Farblich unterschiedene Versorgungsstufen: Weiß = B; Hellrot = C; Rot = D.....	85
Abbildung A 10: Einfluss der Düngevariante auf den Kornertrag der Partellen. Der p-Wert zeigt keine signifikanten Ertragsunterschiede ($\alpha=0,05$).....	85
Abbildung A 11: Einfluss der N-Variante auf den Proteingehalt in den Partellen. Der p-Wert zeigt tendenzielle Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	86
Abbildung A 12: Errechneter Proteintrag des Partellenkerndruschs, Differenzierung zwischen den zwei N-Varianten	86
Abbildung A 13: Einfluss der N-Variante auf den Proteintrag des Partellenkerndruschs. Der p-Wert zeigt keine signifikanten Unterschiede ($\alpha=0,05$).....	87

Abbildung A 14: Zusammenhang des N-Tester Werts vom 20.05. mit dem Wert der Ertragskartierung an den 36 Untersuchungsorten der zwölf Parzellen. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	89
Abbildung A 15: Zusammenhang des N-Tester Werts vom 17.06. mit dem Wert der Ertragskartierung an den 36 Untersuchungsorten der 12 Parzellen. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	89
Abbildung A 16: Einfluss des Standorts, aufgeteilt in Kuppe, Ebene und Senke auf die Ährendichte. Berücksichtigung aller Proben Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	90
Abbildung A 17: Einfluss des Standorts, aufgeteilt in Kuppe, Senke und Ebene auf die Ährendichte. Berücksichtigung der Schnittproben ohne die Parzelle 1 u. 2. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede aus dem Post-Hoc-Test ($\alpha=0,05$)	90
Abbildung A 18: Einfluss des Standorts auf die Halmlänge. Betrachtung aller Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$).....	91
Abbildung A 19: Einfluss des Standorts auf die Halmlänge. Betrachtung der Schnittproben ohne die Parzelle 1 u. 2. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)	91
Abbildung A 20: Einfluss des Standorts auf den Kornertrag (trocken) der Schnittproben (ohne Parzelle 1 u. 2). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$).....	92
Abbildung A 21: Einfluss des Standorts auf den Proteinertrag der Untersuchungsorte. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	92
Abbildung A 22: Zusammenhang des Trockemasseertrags und der Halmlänge kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	94
Abbildung A 23: Zusammenhang der N-tester Werte vom 13.04. mit dem Proteingehalt am Untersuchungsort, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	96
Abbildung A 24: Zusammenhang des NDVI vom 29.05. mit dem Proteingehalt der Ernteprobe, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$	97
Abbildung A 25: Drohnenbild der Versuchsanlage vom 16.07.2020. Parzellen 1-10. Fotografiert Richtung Norden.	100
Abbildung A 26: Drohnenbild der Versuchsanlage vom 16.07.2020. Parzellen 3-12. Fotografiert Richtung Süden.....	100

Abkürzungsverzeichnis

Ä	Ähre(n) als Einheit (im Text nur mit Flächenbezug m ⁻²)
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie – Code für das Morphologische Entwicklungsstadium einer Pflanze
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
bü 100 %	Düngung des ermittelten N-Bedarfs
C	Kohlenstoff
DBE	Düngebedarfsermittlung
DGM	Digitales Geländemodell
dt	Dezitonne
DüVO	Düngeverordnung
GIS	Geografische Informationssysteme
H	Wasserstoff
ha	Hektar
KAS	Kalkammonsalpeter
MLUV	Ministerium für Ländliche Entwicklung Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg
N	Stickstoff
n.s.	Nicht signifikant
NH ₄ ⁺	Ammonium
NIR	Nahes Infrarot
NIRS	Nahinfrarotspektroskopie
NO ₃ ⁻	Nitrat
N _{red} 80 %	Düngung des Bedarfs, abzüglich 20 %
O	Sauerstoff
OFR	On Farm Research
t	Tonne (metrisch)
TKM	Tausendkornmasse

1 Einleitung

Ressourcenschonung ist heutzutage ein allgegenwärtiges Thema. Ein Teil der natürlichen Ressourcen sind Luft, Wasser und Boden. Die Landwirtschaft steht mit jeder dieser drei Ressourcen in Verbindung und kann sie sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Der Anbau von Zwischenfrüchten bietet etwa die Möglichkeit, CO₂ aus der Luft zu binden und im Boden Humus zu mehren. Die Höhe der Stickstoff-Düngung (kurz N-Düngung) bei z.B. Winterweizen hat nicht nur einen Einfluss auf Ertrag und Qualität der Ernteware, sondern erhöht das Risiko, dass ungenutzte N-Mengen mit dem Niederschlagswasser aus der durchwurzelten Zone ausgewaschen und ins Grundwasser eingetragen werden. Dies hätte eine nachhaltige Schädigung für das Grundwasser zur Folge. Der Ackerbau in Mecklenburg-Vorpommern ist aufgrund von standort- sowie wirtschaftlicher Vorteile gegenüber anderen Getreidearten und Anbausystemen relativ stark auf den Anbau von Qualitätsweizen ausgerichtet. Eine wertvolle Vorfrucht stellt hierbei der Winterraps dar (ZIESEMER UND LEHMANN 2009). Im Anbau von Qualitätsweizen steigt das Risiko der N-Auswaschung durch höhere N-Salden aufgrund einer späten Qualitätsdüngung (BULL et al. 2015, S. 45). Aber auch im Anbau von Winterraps besteht eine Gefahr, positive N-Salden zu erreichen (HEYN 2006, S. 13). Tatsächlich wurden für den Zeitraum 2003-2011 N-Überschüsse aus der Flächenbilanz landwirtschaftlicher Nutzflächen von 72 kg·ha⁻¹ für gesamt Deutschland und 56 kg·ha⁻¹ für MV ermittelt, die potenziell verlagert werden können (BACH et al. 2014, S. 24). Das Grundwasser wird in Deutschland mithilfe von Messstellen überprüft und es gibt Messstellen, die einen erhöhten Nitratwert aufzeigen. Die aktuelle Düngeverordnung (DüVo) weist nun Gebiete aus, deren Grundwasser sich in einem chemisch schlechten Zustand befindet (DÜLVO M-V 2019, Anlage 2). Innerhalb dieser Gebiete ist ab dem Jahr 2021 die N-Düngung um 20 % zu reduzieren (DÜVO 2020, §13a). Die gesamte Thematik hat eine große Debatte ausgelöst (AWATER-ESPER 2020). Landwirte innerhalb dieser Gebiete sehen sich stark eingeschränkt. Darüber hinaus werden nachhaltige Verluste des Ertrags und der Qualität befürchtet (BAUERNVERBAND M-V 2020; BOCKHOLT 2020).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der reduzierten N-Düngung und stellt sich die Frage, welche Auswirkungen auf den Ertrag und die Qualität in der landwirtschaftlichen Praxis in einem Einzeljahr zu erwarten sind. Es soll außerdem herausgefunden werden, wie in einem Praxisbetrieb mit der reduzierten Düngung umgegangen werden kann und ob es nicht gleichzeitig als Chance gesehen werden kann, einen effizienteren N-Einsatz zu erreichen. Hohe Einsparpotenziale in der Düngung ergeben sich z.B. durch den Einsatz von Precision Farming Technologien (JKI 2021). Die Ackerbaustrategie des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sieht ebenfalls den Einsatz von Precision Farming als Maßnahme zur Erhöhung der Düngeeffizienz vor (BMEL 2019, S. 29). Außerdem wird die Digitalisierung im Allgemeinen als eines der grundlegenden Handlungsfelder der

Ackerbaustrategie 2035 des BMEL (2019, S. 38 ff.) gesehen und soll maßgeblich zu einem optimierten Einsatz von u.a. Düngemitteln beitragen. Neben den roten Gebieten scheint es ebenfalls im Sinne einer zukunftsorientierten Landwirtschaft, sich mit der Thematik auseinanderzusetzen und Ansätze für die Ressourcenschonung zu erlangen.

Für die Untersuchung der Fragestellung wurde ein Feldversuch in einem Praxisbetrieb angelegt, welcher auf einem Grundmoränenstandort in Westmecklenburg wirtschaftet. Die Versuchsanlage fand nach dem Vorbild des *On Farm Research* statt. Es wurden zwei N-Varianten miteinander verglichen: 100 % und 80 % des veranschlagten Bedarfs. Der Untersuchungsansatz berücksichtigt die Unterschiede, welche aufgrund des hügeligen Reliefs auftreten: es wurden in Kuppen, Senken sowie Ebenen unterschieden und geprüft, ob erwartete Effekte eintreten. Um die stark heterogenen Bedingungen angemessen zu berücksichtigen, wurden insgesamt sechs Wiederholungen realisiert. Für die Datensammlung wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt: Zum einen wurde mithilfe von praxisüblichen Methoden, wie dem Einsatz des N-Testers und der Ertragskartierung, Daten erhoben. Zum anderen wurde in einem wissenschaftlichen Ansatz Laboranalysen an Schnittproben durchgeführt. In Summe soll untersucht werden, welche Rolle On Farm Research bei dem Erlangen neuer Erkenntnisse hinsichtlich der N-Düngung im Praxisbetrieb spielt und abgeleitet werden, wie auf variablen Standorten bei reduzierter Düngung vorgegangen werden kann.

2 Stand des Wissens

Im Voraus der Analysen wird eine Literaturübersicht gegeben. Diese ist von Bedeutung für den Ansatz des Versuchs sowie für die Einordnung der Versuchsergebnisse. Insbesondere wird sich den Themengebieten Winterweizen, N und N-Düngung sowie On Farm Research gewidmet.

2.1 Winterweizen

Der Weizen hat in Deutschland und auf der Welt die größte Anbaubedeutung (MIEDANER 2014, S. 2 f.). In Deutschland wird europaweit die zweithöchste Menge Weizen produziert. Durch wesentliche Fortschritte in der Pflanzenzüchtung Anfang des 20. Jahrhunderts wurde der Weizen weit in Europa verbreitet. Gerade die Züchtung der Winterformen war langwierig, ermöglichten aber den Anbau im damaligen Osten von Deutschland. Heutzutage ist Weichweizen die mit Abstand bedeutendste Art in Deutschland. Die Kornerträge des Weizens wurden innerhalb der letzten 130 Jahre versechsfacht. Neben der Pflanzenzüchtung ist die Intensivierung der Landwirtschaft über Pflanzenschutz und Mineraldüngung als Grund für die Ertragssteigerung zu nennen. In den letzten 15 Jahren sind nahezu keine Ertragssteigerungen mehr zu verzeichnen. Diskutierte Gründe hierfür sind die Ausdehnung der Anbaufläche auf weniger geeignete Böden, Trockenstressperioden und Klimawandel. Des Weiteren wurden

mithilfe der Pflanzenzüchtung kürzere Sorten bei leicht steigendem Kornertrag erstellt. Die Toleranzen sowie Resistenzen gegen wichtige Pilzkrankheiten wurden ebenfalls gezüchtet (MIEDANER 2014, S. 50-55).

Im Weizenanbau hat die Sortenwahl eine große Bedeutung. Die Sorten lassen sich in vier Typen einteilen: Bestandesdichte-, Ähren-, Korndichten- und Kompensationstyp. Die einzelnen Typen unterscheiden sich in ihrem Ertragsaufbau. Grundsätzlich setzt sich der Ertrag aus Ähren je m², Kornzahl je Ähre und Tausendkornmasse zusammen. Außerdem hängt es vom Saatzeitpunkt ab, welcher Sortentyp am ehesten geeignet ist. Ein guter Saatzeitpunkt ist etwa Mitte bis Ende September. Die zu drillende Saatstärke ergibt sich aus der Zielährenzahl, der möglichen Bestockung um dem Feldaufgang. Die Saat sollte bei 2 cm abgelegt werden, um dem Weizen zum einen die Verankerung und zum anderen die Bestockung zu begünstigen (KROPF 2012, S. 8-11). Nach dem Winter sind die Entwicklungen der Bestände festzustellen und Abweichungen vom Soll sind mit Maßnahmen auszugleichen. Diese Maßnahmen sind im Wesentlichen die Anpassung N-Düngungsstrategie und der Einsatz von Wachstumsreglern. Weiterhin haben Wachstumsregler Einfluss auf das Längenwachstum der Bestände (KROPF 2012, S. 20-33). Mit dem Schossen beginnen die wesentlichen Reduktionsprozesse der Ertragsanlagen. Bei BBCH 30 reduziert die Pflanze schwache Nebentriebe und legt die Ährendichte fest. Die Triebreduktion kann durch die Bereitstellung von Nährstoffen beeinflusst werden. Dünne Bestände erhalten rechtzeitig eher erhöhte Mengen und zu dichte Bestände werden zeitlich verzögert angedüngt, da durch die Reduktion der Triebe ebenfalls eine Umverlagerung der Nährstoffe innerhalb der Pflanze stattfindet. Um genügend Assimilate bilden zu können, benötigen Weizenpflanzen grüne Blattflächen. Die Blätter sollten so groß wie nötig sein, da zu große Blätter einen zu hohen Wasserverbrauch aufweisen, der in entscheidenden Wachstumsphasen erheblich Ertrag kosten kann. Die vom Doppelring-Stadium bis zum Beginn der Großen Periode angelegten Ährchen und Blüten werden ab dieser reduziert. Mit dieser Reduktion wird die Korndichte festgelegt. Eine hohe Korndichte wird begünstigt durch eine gute Wasserversorgung, optimale Nährstoffversorgung und Kühle Temperaturen von BBCH 30-37. Während der Kornfüllung werden Speicherzellen für die Assimilate in den Körnern gebildet. Begünstigt wird der Vorgang erneut durch gute Versorgungen und einer moderaten Temperatur. Die Zellen sowie die Einlagerung wirken sich direkt auf die Tausendkornmasse (TKM) aus. Die Qualität wird weiterhin durch Sonnenenergie gefördert (KROPF 2012, S. 38-42). Das Protein im Korn wird aus Aminosäuren zusammengesetzt. Der größte Teil wird bereits während des Schossens gebildet und in den Blättern gespeichert. Zur Kornfüllung werden diese dann umverlagert. Die züchterische Ertragssteigerung der letzten 30 Jahre ist eine Herausforderung für den Proteingehalt. Wenn viel Stärke eingelagert wird, kann nicht mehr so viel Protein eingelagert werden, trotzdem kann ein höherer Proteinertrag erreicht werden (KROPF 2012, S. 48 f.). Auf

den Proteingehalt sowie auf die Ertragsbildung hat die N-Versorgung einen Einfluss. Im folgenden Abschnitt wird sich dem N gewidmet und u.a. diese Einflüsse genauer betrachtet.

2.2 Stickstoff (N) und N-Düngung

Im Folgenden wird die N-Düngung dargestellt. Angefangen mit dem Grundlegenden über N-Kreislauf und -Bedarf sowie die in der Praxis übliche Düngung und Teilflächenspezifische Düngung.

N ist das wichtigste Element in der pflanzlichen Trockenmasse nach Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H). Daher ist es auch in der Pflanzenernährung von hoher Bedeutung. Es gibt diverse unterschiedliche Verbindungen in denen N im Boden vorliegen kann (SCHUBERT 2018, S. 115). Welche Verbindungen das sind, und wie diese miteinander interagieren wird im Folgenden dargestellt.

2.2.1 N-Strom im Weizenanbau

Herkömmliche Ackerböden weisen etwa 2.000 bis 10.000 kg N·ha⁻¹ auf. Die Verfügbarkeit von N im Boden ist je nach Verbindung jedoch nur teilweise gegeben. Im Boden befindet sich überwiegend N_{org} (organisch gebundener Stickstoff), welcher nicht Pflanzenverfügbar ist. Durch Mineralisation findet eine Umwandlung in pflanzenverfügbare Formen statt. N in pflanzenverfügbarer Form ist zum einen NH₄⁺ (Ammonium) und zum anderen NO₃⁻ (Nitrat). Die Mineralisation hängt unter anderem stark von der Temperatur ab. Hohe Temperaturen in Verbindung mit guter Wasserversorgung begünstigen die Mineralisation. Im Frühjahr ist es in der Regel zu kalt, um den Bedarf an N zu decken. Zum Ausgleich ist z.B. eine Mineraldüngung erforderlich. (SCHUBERT 2018, S. 117 f.). Ein weiterer Eintrag von N ist die Deposition über die Luft, welche allerdings eine eher geringe Auswirkung hat. Eine Schwierigkeit besteht darin, die Mineralisation von N vorherzusagen und ausgleichend zu düngen, sodass die Pflanze optimal versorgt wird. Befindet sich nämlich ein zu hohes Angebot an mineralischem N im Boden, können vermehrt Verluste auftreten (HAWKESFORD 2014, S. 278). Zum einen kann NO₃⁻ verlagert (ausgewaschen) werden und zum anderen kann NH₃ (Ammoniak) in die Luft abgegeben werden. Diese Verluste haben neben einer ökonomischen Relevanz ebenfalls eine ökologische Auswirkung. Bei NO₃⁻ kommt es nach Verlagerung zum Eintrag in das Grundwasser. Ebenfalls sind diese Faktoren für die Bodenfruchtbarkeit und damit für einen hohen Pflanzenertrag sowie einer hohen Qualität von Bedeutung. Ein O₂-Mangel kann durch eine gute Bodenstruktur vermieden werden. (SCHUBERT 2018, S. 120 f.). Abbildung 1 stellt den Weg vom N im Qualitätsweizenanbau vereinfacht dar. Verdeutlicht wird, dass mindestens 80 % des von der Pflanze aufgenommenen N über das Korn von der Fläche entzogen werden. Weitere 10-20 % befinden sich im Stroh, welches entweder auf der Fläche verbleibt oder abgefahren wird.

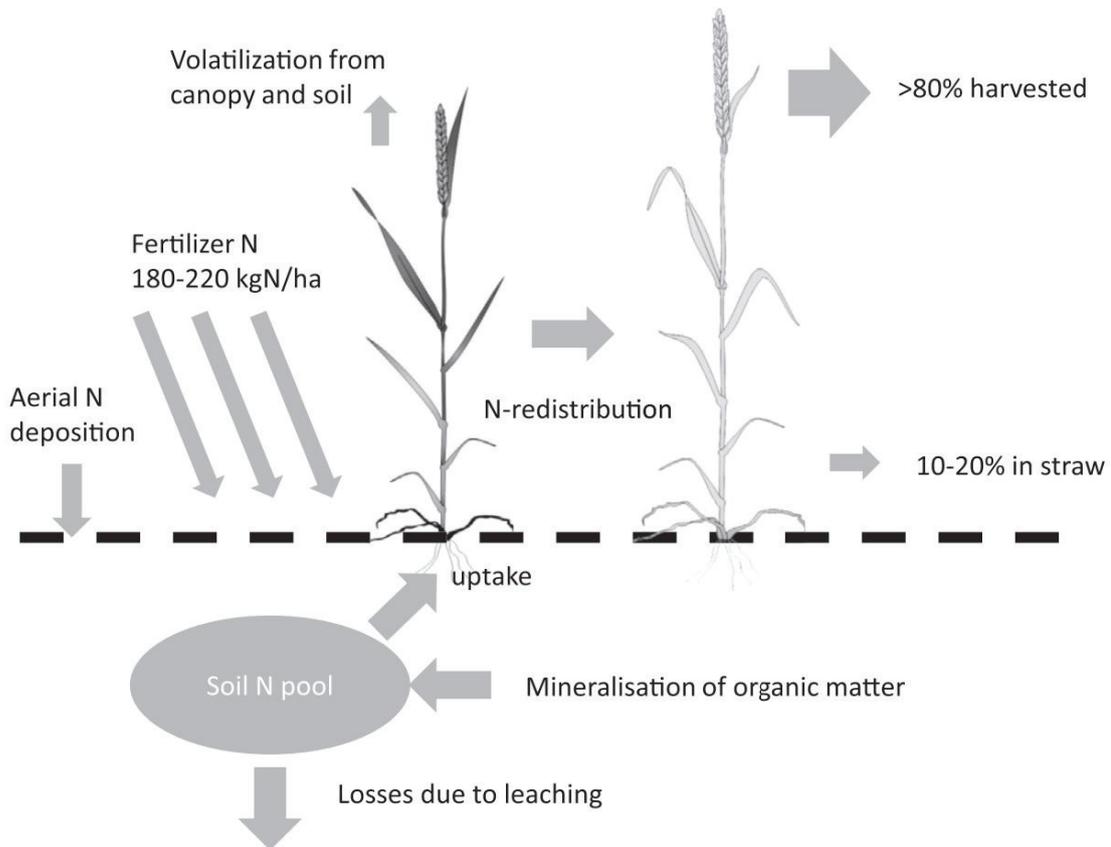


Abbildung 1: N-Strom im Qualitätsweizenanbau, vereinfacht dargestellt (HAWKESFORD 2014, S. 278)

2.2.2 Düngeverordnung

Angelehnt an den N-Strom existiert in Deutschland die Düngeverordnung, die im Einzelnen die allgemeine Düngung reguliert und hinsichtlich des N versucht, die Verluste zu minimieren. Ein kurzer Überblick wird im Folgenden gegeben, da die aktuelle DüVO Anlass zum Thema dieser Arbeit gegeben hat. Gesondert herausgestellt wird der §13.

In der DüVO wird geregelt, dass die gute fachliche Praxis bei Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen angewendet wird. Weiterhin sollen die sogenannten stofflichen Risiken durch den Einsatz von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen vermindert werden (DüVO 2020, §1).

Für die Düngung gilt es den Düngebedarf zu ermitteln. Dieser setzt sich zusammen aus der Kultur, der Ertragserwartung (gleitender Mittelwert der letzten fünf Jahre) und einem vor der Frühjahrsdüngung ermittelter N_{\min} -Wert. Dieser Wert kann durch die zuständige Stelle herausgegeben werden oder durch den Einsatz von wissenschaftlich anerkannten Messmethoden durch den Landwirt oder dessen Auftrag ermittelt werden (DüVO 2020, §4).

Nach DüVO (2020, §10) sind Düngungsmaßnahmen stets aufzuzeichnen und dabei einem Schlag eindeutig zuzuordnen. Diese Aufzeichnungen müssen dem ermittelten Düngebedarf entsprechen.

In der DüVO (2020, §13a) sind besondere Anforderungen zum Schutz der Gewässer verankert. Diese zielen auf Regionen, welche zu hohe Nitratwerte (NO_3^-) im Grundwasser aufweisen. Der Schwellenwert liegt hier bei $50 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1} \text{ NO}_3^-$. Ebenso ist ein steigender Trend und gleichzeitig eine Messung einer Konzentration von drei Vierteln des Schwellenwertes von Bedeutung.



Abbildung 2: Übersicht der §13 Gebiete in MV (DüLVO M-V 2019, Anlage 2)

In Abbildung 2 werden die fünf in §13 genannten Gebiete dargestellt. Für diese Flächen gilt eine Reduzierung des ermittelten N-Bedarfs um 20 %. Gegenüber der herkömmlichen Ermittlung des Ertragsniveaus, gilt in den Gebieten aus §13 der fixierte Zeitraum von 2015 bis einschließlich 2019. Ebenso wie bei der herkömmlichen Methode werden negative Ausreißer von mehr als 20 % unterhalb des Mittelwertes durch den Vorjahreswert ersetzt. Somit wird einer ertragsbezogenen Abwärtsspirale und einer Verringerung von Bodenfruchtbarkeit durch eine restriktive Düngung vorgebeugt (DüVO 2020, §13a; Anlage 04).

Der Versuchsstandort befindet sich seit der Ausweisung der §13-Gebiete ebenfalls darin. In der Versuchsanlage wird die herkömmliche Düngung mit einer restriktiven verglichen.

Die Bundesregierung hat eine allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausweisung von roten Gebieten erlassen. Hinzu kommt eine weitere Binnendifferenzierung innerhalb der roten Gebiete. Die §13-Gebiete wurden dadurch Ende des Jahres 2020 neu ausgewiesen, um eine verursachergerechte Abgrenzung und Differenzierung zu realisieren (WENDLAND 2020).

Mittlerweile gehört der Feldblock des Feldversuchs nicht mehr zur Gebietskulisse der §13-Gebiete. Unklar ist dennoch, wie sich die Gebietskulisse im Laufe der Zeit verändert.

2.2.3 Ziele der N-Düngung

Generell erfolgt eine N-Düngung im Weizen, um eine Ertragssteigerung zu erreichen. Pflanzenverfügbares N gilt im Frühjahr als Minimumfaktor im Boden (FINCK 2007, S. 100 ff.). Während der Bestockungsphase fördert eine N-Düngung die Triebbildung (HEYN 2006, S. 4). Generell ist eine höhere Bestandesdichte ertragssteigernd (HAWKESFORD 2014, S. 276). Durch die N-Düngung in dieser Wachstumsphase wird ebenfalls die Ausbildung zusätzlicher Wurzeln gefördert. Diese Wurzeln verankern die Pflanze stärker im Boden und verbessern die Aufnahme von Nährstoffen. Zum Teil erfolgt eine Weiterleitung der Nährstoffe an den Haupttrieb und fördert diesen dadurch (STURM et al. 1994, S. 279 f.). Eine zu geringe Pflanzenverfügbarkeit von N in dieser Phase wirkt sich negativ auf die Bestockung aus (FINCK 2007, S. 102). In Beständen mit hohen Triebdichten bestehen für die Einzelpflanzen stärkere Konkurrenzbeziehungen um die Wachstumsfaktoren. Dies hat in der weiteren Entwicklung einen negativen Einfluss auf die Anzahl und das Gewicht der Körner. Mithilfe der Düngung sollte je nach Standort eine Bestandesdichte von etwa 500-600 Ähren·m² erreicht werden (STURM et al. 1994, S. 281-289). Besonders vorsichtig sollten Einzelährentypen in der Bestockung gedüngt werden (N.N. 2016). Ist die N-Versorgung während des Schossens nicht ausreichend, kommt es zur Reduktion von Ährchen bzw. Blüten. Das hat bei einer relativ konstanten TKM einen direkten Einfluss auf den Ertrag (STURM et al. 1994, S. 281-289; HEYN 2006, S. 4). Ist die N-Versorgung in dieser Phase zu hoch, verringert es die Standfestigkeit der Bestände und die Anfälligkeit für Schaderreger steigt. Außerdem hat die N-Versorgung einen Einfluss auf den Abreifezeitpunkt. Unterschiede der Versorgungen innerhalb eines Schlages können zu einer heterogenen Abreife führen (FINCK 2007, S. 102) (Bsp. Abbildung A 25; Abbildung A 26).

Nach STURM et al. (1994, S. 289) trägt eine N-Spätgabe im Wesentlichen zur Kornfüllung bei. Dadurch wird die TKM beeinflusst. Im Vergleich zu den vorab beschriebenen Ertragsanlagen, lässt sich hier jedoch nur ein geringer Ertragseffekt erzielen, da die TKM überwiegend genetisch fixiert ist. Im Laufe der Zeit wurde allerdings festgestellt, dass die N-Aufnahme in dieser Entwicklungsphase nur noch einen geringen Teil der Gesamtaufnahme ausmacht. Wesentlicher ist N, der bereits von der Pflanze aufgenommen wurde und entsprechend umgelagert wird. Hinsichtlich der TKM ist eine weitere Düngergabe weniger von Bedeutung (BROWN et al. 2005, S. 4). Dagegen wird die Qualität von Weizen deutlich gefördert. Insbesondere erhöht sich der Proteingehalt. Bereits mit Erhöhung der N-Konzentration während der vegetativen Wachstumsphase wird neben Kornertrag auch der Proteingehalt gefördert (BROWN et al. 2005, S. 6 ff.). Wie STURM et al. (1994, S. 298 ff.) in einem

mehrfährigen Versuch herausstellt, verringert sich der zu erreichende Proteingehalt stetig, wenn kontinuierlich erheblich zu wenig N gedüngt wird, was auf eine verringerte N-Mineralisierung zurückzuführen ist. Kornertrag und Proteingehalt beeinflussen sich gegenseitig. Um den Bezug zwischen Kornertrag und Proteingehalt herzustellen, ist der Proteinertrag je ha heranzuziehen.

Die gesamte Menge an einem Zeitpunkt zu düngen ist hinsichtlich der ertragsanlagenreduzierenden Bestandesentwicklung nicht sinnvoll. Eine Aufteilung der Düngung sollte im Voraus überlegt werden und von der Ertragsfähigkeit des Standorts sowie den vorhandenen bzw. erwarteten Ertragsfaktoren abhängig gemacht werden. Aufgrund der verschiedenen Anlage- und Reduktionsprozesse können mehrere Aufteilungsstrategien dasselbe Ertragsziel erreichen (STURM et al. 1994, S. 298 ff.; BROWN et al. 2005, S. 7 f.).

Ziel der N-Düngung ist somit gleichermaßen die Steigerung des Kornertrags als auch des Proteingehalts. In der Literatur wird häufig betrachtet, dass es einen sogenannten Verdünnungseffekt gibt. Genauer gesagt, wird angenommen, dass Ertragsschwankungen bei gleicher Düngung mit Schwankungen des Proteingehalt einher gehen. Dieser Zusammenhang ist negativ korreliert (FEIL UND BÄNZIGER 1999, S. 4; MÖLLERS 2000, S. 103 f.; HAWKESFORD 2014). MÖLLERS (2000, S. 103 f.) beschreibt weiterhin, dass sich der Zusammenhang bei unterschiedlichen Ertragsniveaus, die entsprechend unterschiedlich gedüngt wurden, ändert. Die Korrelation der N-Menge und des Proteingehalts sowie des Ertrags ist folglich positiv. Wird der Zusammenhang auf demselben Düngenniveau betrachtet und die Niveaus miteinander verglichen, zeigt sich: Je niedriger das Ertragsniveau, desto größer ist der Verdünnungseffekt. RECKLEBEN UND ISENSEE (2004, S. 145) beschreiben eine ähnliche Beobachtung. Bei den höheren N-Mengen konnten sowohl die höchsten Erträge als auch die mit Abstand höchsten Proteingehalte erzielt werden. Weiterhin wird beschrieben, dass die Unterschiede sehr eng mit der Heterogenität des Bodens verknüpft sind.

2.2.4 N-Bedarf und Aufnahme

Je nach Ertragsniveau ergibt sich ein N-Bedarfswert für Winterweizen. Dieser Bedarf wird aus verschiedenen Quellen gedeckt. Zu Vegetationsbeginn liegt im Boden eine Menge an N_{\min} vor, die mithilfe von Bodenuntersuchungen ermittelt wird und nach den Düngerichtlinien zu berücksichtigen ist. Des Weiteren findet während der Vegetationsperiode Mineralisation von N_{org} zu N_{\min} und etwas N-Deposition statt, wie im Kapitel 2.2.1 beschrieben wurde. Zuletzt dient die mineralische und organische N-Düngung als steuerbare Größe für die Deckung des N-Bedarfs. Generell ist für die Ermittlung des N-Düngebedarfs der Beitrag des Boden-N zur Pflanzenversorgung möglichst genau abzuschätzen, da nur die Differenz gedüngt werden muss und so eine bedarfsgerechte Düngung erfolgen kann. Des Weiteren könnte durch gezielte Züchtung die N-Effizienz erhöht werden, sodass der N-Bedarf bei gleichem Ertrag

nachhaltig sinkt. Das führt zu ökonomischen als auch ökologischen Vorteilen (MÖLLERS 2000, S. 103 f.; HAWKESFORD 2014, S. 277; APEL UND FECHNER 2020).

Das N-Aufnahmepotential des Weizens hängt mit dem Entwicklungsstadium zusammen. Es steigt mit zunehmender Bestockung an und hat den höchsten Anstieg während des Schossens. Unter optimalen Bedingungen werden in dieser Phase täglich 2-3 kg N·ha⁻¹ aufgenommen. Zum Ährenschieben flacht die N-Aufnahme deutlich ab, wobei bis zur Kornfüllungsphase N aufgenommen wird. Generell wirkt sich eine spätere N-Aufnahme stärker auf den Proteingehalt als auf den Ertrag aus. Die Wasserversorgung während der Kornfüllung hat einen großen Einfluss auf den Proteingehalt (BROWN et al. 2005, S. 4).

Die Wirkung der N-Düngung kann in einer sogenannten Ertragsfunktion dargestellt werden, die als quadratisches Modell geschätzt wird. Somit wird angenommen, dass der Ertrag auf die N-Düngung reagiert und bis zum Maximalertrag mit abnehmender Zuwachsrate steigt und dort verbleibt. Die weitere Steigerung der N-Düngung führt ab einer bestimmten Menge zu einer Abnahme des Ertrags (KARATAY et al. 2019, S. 109). Ertragsfunktionen können je nach Ertragsfähigkeit des Bodens unterschiedlich aussehen (ISENSEE et al. 2003, S. 58 f.). Böden mit geringeren Ackerzahlen haben eine eher flache Ertragsfunktion. Die Düngung hat somit geringere Auswirkungen als bei höheren Ackerzahlen und eine Überdüngung hat geringere negative Auswirkungen (ENGELN et al. 1999, S.82 f.). In Abbildung 3 wird dieser Zusammenhang dargestellt. Ausgewiesen ist ebenfalls die jeweilige N-Effizienz in kg Korn·kg N⁻¹, die bei einheitlicher Düngung um mehr als 33 % schwanken kann.

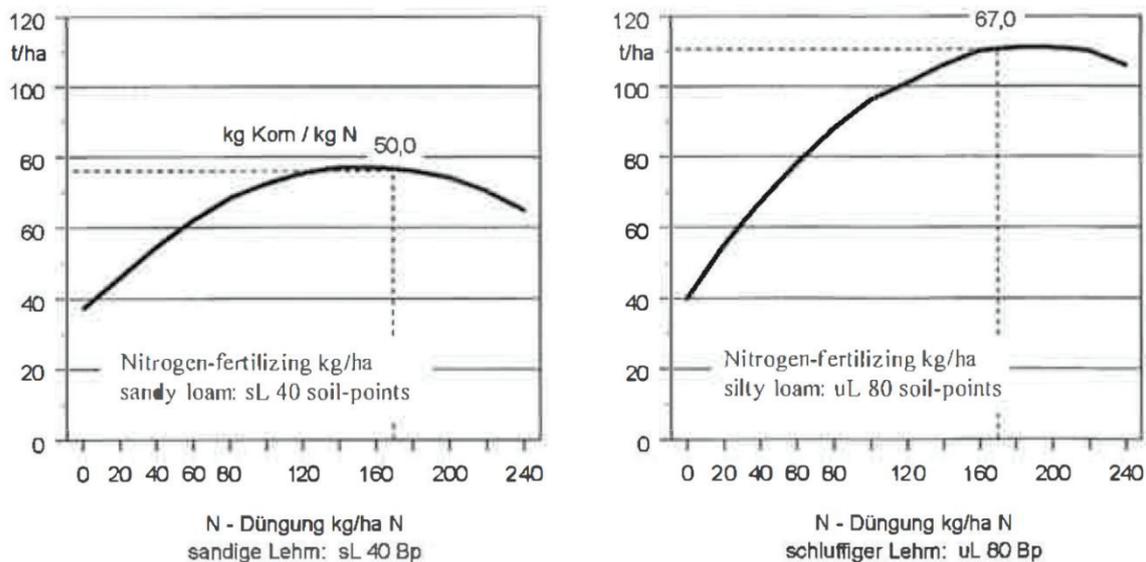


Abbildung 3: Ertragsfunktionen für die Böden sandiger Lehm (40 Bodenpunkte) und schluffiger Lehm (80 Bodenpunkte) (ENGELN et al. 1999, S. 82)

2.2.5 Reduzierte und teilflächenangepasste N-Düngung

In Versuchsreihen zu einer differenzierten Stickstoffdüngung von EREKUL et al. (2005, S. 529 ff.) sind die Einflüsse auf den Kornertrag, die Ertragsstruktur sowie den Proteingehalt

untersucht worden. Die Kornerträge wurden innerhalb der Jahre als stark schwankend eingeordnet und hingen stärker von der Jahreswitterung ab, als von den ausgebrachten N-Mengen (ISENSEE et al. 2003, S. 59). Dieser Effekt wurde ebenfalls bei der Bestandesdichte beobachtet. In einem Jahr mit einem günstigen Witterungsverlauf konnte allerdings ein positiver Zusammenhang zwischen N-Düngung und Bestandesdichte festgestellt werden. Hinsichtlich der TKM wurde eine positive Korrelation zwischen keiner bzw. einer geringen N-Düngeintensität und der Erhöhung der Düngermenge festgestellt. Die höchsten N-Düngermengen führten in der Regel zu einer leichten Abnahme der TKM. Auch hier hatte die Jahreswitterung einen stärkeren Einfluss als die Düngungsintensität (EREKUL et al. 2005). TREUE (2002, S. 14) unterscheidet in dem Untersuchungsansatz Standorte reliefbedingt nach Kuppe, Senke, Hang und Ebene. Eine reduzierte Düngung bewirkt, dass Ertragsunterschiede zwischen den Standorten eher geringer ausfallen. Hingegen gibt es größere Ertragsschwankungen innerhalb der gleich definierten Teilflächen. Generell hat die Reduzierung der N-Düngung einen positiven Effekt auf die N-Effizienz (HAWKESFORD UND RICHE 2020, S. 6 ff.). Die N-Effizienz bei sehr geringer oder gar keiner Düngung ist immer überlegen, jedoch nicht nachhaltig bezogen auf die Bodenfruchtbarkeit und damit auch nicht auf den Ertrag (HAWKESFORD 2014, S. 278).

Der Rohproteingehalt wurde relativ stark von der mineralischen N-Düngung beeinflusst. Eine geringere N-Düngung resultiert in einem Proteingehalt. (EREKUL et al. 2005, S. 533 f.; HEYN 2006, S. 5). In Dänemark ist der Proteingehalt von Weizen in den letzten drei Jahrzehnten jährlich um 2,4-2,9 % gesunken. Zu 50-70 % ist diese Entwicklung auf eine Kontingentierung von N zurückzuführen (STYCZEN et al. 2020). Im Jahr 2014 wurde in Dänemark Weizen produziert, welcher im Durchschnitt einen Proteingehalt von lediglich 8,4 % erreichte. Die Folge dessen ist auf der einen Seite die abnehmende Wettbewerbsfähigkeit der Weizenpartien und auf der anderen Seite die steigenden Importe von proteinreicherem Weizen und Proteinfuttermittel. Beide Seiten wirken sich negativ auf die Einnahmen der dänischen Landwirtschaft aus (AGRARHEUTE 2015).

TREUE (2002, S. 14 f.) und SCHMIDHALTER et al. (2003, S. 110) sehen Potenziale bzw. Notwendigkeit in einer teilflächenbezogenen N-Düngung, da Ertragsunterschiede auftreten, die nicht durch eine einheitliche Düngung abgebildet werden können. Das Resultat ist eine hohe Variabilität der N-Salden, wodurch teilflächenspezifische Auswaschungsverluste entstehen können (MITTERMAYER et al. 2020, S. 185). Es gibt somit ein hohes Einsparpotenzial, wenn teilflächenspezifische N-Düngung praktiziert wird. KARATAY UND MEYER-AURICH (2019, S. 101) schließen sich den Aussagen der Teilflächendüngung an und berichten, dass die Mineralisierung von Jahr zu Jahr ebenfalls deutlich stärker schwankt. Wenn Mineralisierung durch technischen Fortschritt besser vorhergesagt werden könnte, würde der ökonomische sowie der ökologische Vorteil zusätzlich verstärkt werden und

trotzdem könnten die Qualitäten gesichert werden (KARATAY UND MEYER-AURICH 2019, S. 105).

In der Versuchsreihe von ISENSEE et al. (2003, S. 51 f.) wurden verschiedene Herangehensweisen für eine Einteilung in Teilflächen ausprobiert.. Unter anderem wurde durch den Standort im östlichen Hügelland von Schleswig-Holstein das Relief herangezogen. Eine Einteilung erfolgte in Ebene, Hang, Kuppe und Senke. Es ergab kein eindeutiges Ergebnis, sondern die Tendenz, dass auf Kuppen eher geringere Erträge erzielt werden und die Senken, je nach Realisierung des natürlichen N-Vorrats, relativ großen Ertragsschwankungen unterliegen. Die Ursache wird in den unterschiedlichen Anteilen der einzelnen Teilflächen vermutet. (ISENSEE et al. 2003, S. 58 f.).

In den Versuchen von ENGELN et al. (1999, S. 82 f.) wurden in einem Praxisbetrieb deutliche Unterschiede zwischen der betriebsüblichen Düngungsvariante und einer teilflächenangepassten Variante gemessen. Die Teilflächen wurden in Hang, Kuppe, Senke und Ebene eingeteilt. Aufgrund der unterschiedlichen Ertragsfunktionen sollte jede Teilfläche die optimale N-Menge erhalten. Der Ertrag blieb in beiden Varianten relativ gleich. Die N-Effizienz stieg bei der teilflächenspezifischen Methode jedoch erheblich. Besonders in den Senken wurde durch eine N-Reduzierung die N-Effizienz mehr als verdoppelt. In Abbildung 4 wird ein Hang mit einer Ebene mit derselben Ackerzahl gegenübergestellt und die Unterschiede hinsichtlich der N-Effizienz herausgestellt. Die Steigerung der N-Menge von 167 auf 217 kg brachte in der Ebene eine überproportionale Ertragssteigerung und damit eine Erhöhung der N-Effizienz. Dieselbe Steigerung der N-Menge an einem Hang führte zu einer Stagnation des Ertrags und damit zu einer Verschlechterung der Effizienz.

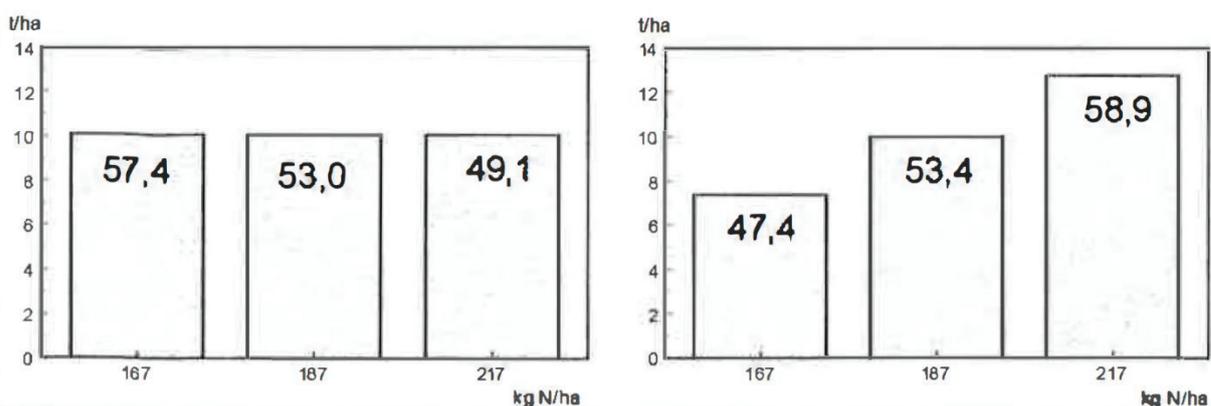


Abbildung 4: Ertrag in Abhängigkeit von der N-Düngung sowie die zugehörige N-Effizienz in $\text{kg} \cdot (\text{kg N})^{-1}$ im Vergleich zwischen Hang (links) und Ebene (rechts) (ENGELN et al. 1999, S. 83)

2.3 On Farm Research

Die zuletzt aufgeführten Versuche sowie der durchgeführte Versuch dieser Ausarbeitung fallen in die Kategorie On Farm Research (OFR). Dieser Abschnitt widmet sich der Erläuterung von OFR und einigen Werkzeugen des OFR.

2.3.1 Bedeutung und Beispiele

Mithilfe von Precision Farming Technologien können mit relativ geringem Aufwand praxisnahe, großflächige Feldversuche geplant, angelegt und durchgeführt werden. Im Gegensatz zu dem „klassischen Versuchswesen“ findet die Durchführung in landwirtschaftlichen Unternehmen statt. OFR gilt dabei als Ergänzung und nicht als neuer Standard im Versuchswesen. Es kann sich neuer Versuchsfragen gewidmet werden. Während das „klassische“ Versuchswesen möglichst homogene Bedingungen verlangt, kann im OFR auf Heterogenität eingegangen werden (GRABO 2006, S. 85). Nach GANDORFER (2005, S. 134) bietet OFR eine größere Praxisnähe und verfolgt eine schnellere Verbreitung von Versuchsergebnissen in der Praxis.

Beispiele für Versuchsanlagen sind etwa die Ertragswirksamkeit von zwei Unterschiedlichen Herbiziden, der Ertragsunterschied zwischen zwei Aussaatstärken einer Sorte und zwei Düngestrategien und deren Einfluss auf den Ertrag (WAGNER 2004, S. 41 f.).

Für die Durchführung des Versuchs kann sowohl der Landwirt selbst als auch ein Dienstleister zuständig sein. Investitionen in Precision Farming Technologien können mithilfe von Umsätzen aus OFR zusätzlich abgesichert werden, da die Technologien im eigenen Betrieb und unter individuellen Voraussetzungen getestet werden können. Herstellerangaben und externe Versuchsergebnisse sind somit nicht mehr alleinige Bewertungsgrundlage hinsichtlich der Funktionalität o.ä. (GANDORFER 2005, S. 135).

GRABO (2006, S. 86) stellt am Beispiel einer differenzierten N-Düngung mit dem Yara N-Sensor die Planung und Durchführung von OFR dar. Anfänglich werden Versuchsglieder aus der Versuchsfrage abgeleitet. In diesem Fall drei Düngevarianten: Betriebsüblich (BÜ); N-Sensor nach N-Tester kalibriert und reduzierte Sensordüngung. Die sogenannte Standortinventur liefert Daten über die Heterogenität des Bodens und kann verschiedene Aussagen treffen, wie z.B. zum Feinerdeanteil im Oberboden oder zum Relief. Die Inventurdaten können zu einer Karte verarbeitet werden und zur Planung sowie Auswertung des Versuchs herangezogen werden. Die Parzellengröße ist abhängig von den verfügbaren Ertragspunkten je Flächeneinheit. Eine Parzelle sollte mindestens 250 Ertragspunkte beinhalten, damit die gebildeten Mittelwerte robust sind und die Ertragseffekte in Größenordnung von $1 \text{ dt}\cdot\text{ha}^{-1}$ abgesichert sind.

Von 2008 bis 2017 wurde OFR auf *Gut Helmstorf* durchgeführt. Es wurden auf 14 Schlägen mit insgesamt ca. 300 ha verschiedene Versuche angelegt. Dabei standen zwei Versuchsfragen im Vordergrund: Bodenbearbeitung und N-Düngung. Hinsichtlich der Bodenbearbeitung wurden Pflugsaat, Mulchsaat und Direktsaat miteinander verglichen. Die betriebsübliche N-Düngung wurde mit einer Einmal- bzw. Zweimaldüngung sowie einer Sensordüngung verglichen. Außerdem wurden Versuche zur teilflächenspezifischen Aussaat

und Grunddüngung sowie Praxiserprobungen mit Parallelfahrssystemen durchgeführt (BORCHART et al. 2018, S 19 f.).

Auf *Gut Helmstorf* wurde das Projekt als sogenannten On-Farm-Experiment durchgeführt. Somit ist es möglich, auf Großflächen Anbauverfahren unter Praxisbedingungen zu vergleichen. Wiederholungen werden hierbei über Schläge und Jahre generiert. Teilflächen werden über Zonen mit gleichen Bedingungen gebildet, welche z.B. dieselben Bodeneigenschaften aufweisen.

Zur Dokumentation der Bestandesentwicklung auf unterschiedlichen Teilflächen wurden sogenannte Beprobungspunkte festgelegt und eingemessen, die sich über die Projektlaufzeit nicht veränderten. An diesen Orten wurden verschiedene Werte erhoben, wie z.B. Feldaufgang, Anzahl Ähren (Ä) je m². Außerdem wurden händisch Ernteproben an den Beprobungspunkten zur Ermittlung des Kornertrags, TKM und Proteingehalts gezogen. Die Versuchsbeerntung erfolgte mit dem betriebseigenen Mähdrescher. Die einzelnen Großteilflächen wurden separat gedroschen und gewogen. Mithilfe von Ertragskartierung wurden die Ertragsunterschiede erfasst. Angewandt wurde ein angepasstes Kerndruschverfahren, das die Vorgewende und Übergänge zwischen den Teilflächen bei der Auswertung vernachlässigte. Außerdem wurde von jedem Teilstück eine Mischprobe gezogen und wie die Handproben untersucht (BORCHART et al. 2018, S. 23).

Hinsichtlich der N-Bilanz wurden keine Vorteile einer Variante festgestellt. (BORCHART et al. 2018, S. 105 ff.). Neben der reinen Sensor-Variante gab es eine kombinierte Variante aus Sensor und Applikationskarte. Die kombinierte Variante brachte im Mittel über den Betrieb keinen Vorteil. Die marginal höheren Erträge wurden von den höheren Arbeitserledigungskosten ausgeglichen. Im Rapsweizen wurden sogar 50 €·ha⁻¹ geringere Leistungen als BÜ erzielt (BORCHART et al. 2018, S. 128 f.). Durch die teilflächenspezifische Aussaat wird bereits ein an die Anbaubedingungen angepasster Bestand erreicht, der für einen Sensor nicht mehr viel Regelbedarf aufzeigt (BORCHART et al. 2018, S. 148 f.).

2.3.2 Werkzeuge im On Farm Research

Optische Fernerkundung und NDVI

Fernerkundung ist ein indirektes Beobachtungsverfahren, bei der sich das Messgerät in einiger Entfernung zum Ort befindet. Gemessen wird die Reflektion oder Emission elektromagnetischer Strahlung. Die Strahlung wird vor allem über Flugzeuge oder Satelliten gemessen und können als Luftbild oder Satellitenbild interpretiert werden. Für die erfolgreiche Interpretation von Luft- und Satellitenbildern sind die notwendigen Sachkenntnisse des Interpretationsgegenstands unabdingbar. Ebenfalls sind Kenntnisse über die Entstehung der Bilder und deren Eigenschaften notwendig. Nur so ist eine maximale

Informationsausschöpfung möglich und eine Fehlinterpretation unwahrscheinlich (ALBERTZ 2007, S. 1 ff.).

Dem sichtbaren Licht benachbart ist der Bereich des nahen Infrarots (0,7-3,0 µm) (NIR). Neben der Reflektion grünen Lichts, reflektieren vitale Pflanzen auch einen hohen Anteil von NIR. Ein Wassermangel im Schwammparenchym von Pflanzenzellen setzt den Reflexionsgrad von NIR herab. Krankheiten können denselben Effekt bewirken. Ein Reflexionsverlust im NIR-Bereich kann bereits Tage oder Wochen vor dem sichtbaren Ändern der Blattfarbe (Welken) festgestellt werden (LÖFFLER et al. 2005, S. 173 ff.).

CAMPBELL (2002, S. 461 ff.) beschreibt ebenfalls die hohe Reflexion des NIR sowie die besser messbaren Stresssymptome im Vergleich zu dem sichtbaren Spektrum. In Abbildung A 1 wird grafisch dargestellt, wie der Verlauf der Reflexion über die verschiedenen Spektren des Lichts sich verhält und wie sich gesunde von gestressten Pflanzen unterscheiden. Ebenfalls zu sehen ist der sogenannte „Red shift“, welcher sich im Bereich von ca. 0,69 und 0,74 µm befindet (CAMPBELL 2002, S. 464 ff.). Das unterschiedliche Reflexionsverhalten von gesunden und nicht gesunden Pflanzen im Roten bzw. NIR-Bereich bietet die Möglichkeit eine Verhältnisgleichung aufzustellen. Oberbegriff für die Art von Verhältnisgleichung ist Vegetationsindex. Der am häufigsten eingesetzte Vegetationsindex ist der „Normalized difference vegetation index“ (NDVI):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rot}}{\text{NIR} + \text{Rot}}$$

Solche Indizes sind sehr hilfreiche Werkzeuge, um die Vegetation von Pflanzen zu verfolgen. Viele externe Effekte können allerdings das Ergebnis beeinflussen, wie z.B. die Farbe des Bodens oder der Beobachtungswinkel. In jedem Pixel der Bildaufnahme (aus z.B. Drohnenbildern oder Satellitenbilder vom Sentinel II) kann über den Index die photosynthetische Aktivität und Biomasse ermittelt werden.

BORGOGNO-MONDINO et al. (2018, S. 209-215) stellen heraus, dass ein Ermitteln des NDVIs mithilfe von Drohnen genauer ist, allerdings Satellitenbilder ebenfalls eine große Hilfe darstellen. Die Abweichungen in den Ergebnissen sind umso größer, desto höher die Heterogenität des Bestandes (und/oder des Bodens) ist. Für die in dieser Arbeit beschriebenen Versuchsaufstellung werden mithilfe der Satellitenbilder NDVIs berechnet.

Geodaten und Datenquellen mit Bezug zum Pflanzenbau

Erhalten Daten Raumbezug, können sie als Geodaten bezeichnet werden. Dieses gilt ebenfalls für die NDVI-Daten. Diese Geodaten können mithilfe von geografischen Informationssystemen (GIS) erfasst, verwaltet sowie verarbeitet werden und für verschiedenste Aufgabenstellungen genutzt werden. Gegenüber herkömmlichen

Datenbanken werden im GIS zur Bearbeitung und Nutzung der Daten häufig grafische Möglichkeiten gewählt. Ein GIS besteht aus den drei Komponenten Hardware, Software und Datenbestand. Letzterer besteht aus den raumbezogenen Daten verschiedener Art, welche in einzelnen Ebenen (Layern) strukturiert sind. Unterschieden wird hierbei zwischen Daten in Vektorform und Rasterdaten. Beide Datenformen haben gewisse Vor- und Nachteile. Das GIS ermöglicht eine Kombination der Datenformate und eine effektive Nutzung großer Datenmengen für diverse Zwecke. Der Einsatz vom GIS hat durch den Raumbezug den Vorteil der einfachen Wiederholbarkeit und in Kombination mit der Fernerkundung einen flächendeckenden Datenstamm, der stetig aktualisiert werden kann. Es können allerdings auch Daten einfließen, welche durch Fernerkundung nicht erhoben werden, und im GIS schließlich gemeinsam ausgewertet werden (ALBERTZ 2007, S. 171 f.). Beispiele für solche Daten sind der Inhalt von geologischen Karten, Bodeneigenschaften, Niederschlagswerte. Die Aufbereitung und Verwendung der Daten sind sehr verschieden und auf den jeweiligen Zweck abzustimmen (ALBERTZ 2007, S. 165).

Digitales Geländemodell (DGM)

Die Geländehöhe kann über mehrere Wege ermittelt werden, wie z.B. durch die GPS-Aufzeichnung des Schleppers bei der Aussaat. Die Geländeform kann Hinweise zu Unterschieden in der Sonneneinstrahlung, Wasserhaushalt, und Dynamik mobiler Pflanzennährstoffe auf verschiedenen Standorten geben. Daraus können Rückschlüsse auf Ertragsunterschiede gezogen werden und eine Einteilung von sogenannten Managementzonen abgeleitet werden (LUDOWICY et al. 2002, S. 59). Aus dem Geländemodell kann der topografische Feuchtigkeitsindex berechnet werden. Er stellt dar, wie der Zu- und Abfluss von Wasser auf einer Fläche geprägt ist. Die potenzielle Bodenfeuchte kann hieraus abgeleitet werden sowie Rückschlüsse auf die Bodeneigenschaften gemacht werden. Der topografische Feuchtigkeitsindex zeigt somit Heterogenität eines Schlates auf und kann diese gegebenenfalls erklären (LORENZ UND MÜNCHHOFF 2015, S. 53).

N-Tester

Mithilfe des N-Testers kann die Chlorophyll-Konzentration im Getreideblatt gemessen werden, welche vom N-Gehalt der Pflanze abhängt. Insgesamt werden für einen Wert des N-Testers 30 Messungen am jüngsten, vollentwickelten Blatt benötigt. Der N-Tester Wert ist eine dreistellige Zahl, welche früher anhand von Tabellenwerten in eine Düngempfehlung umgewandelt werden konnte. Mittlerweile unterstützt hierbei eine Smartphone-App, die u.a. Sorteneffekte mit einbezieht (YARA 2020).

Yara empfiehlt die 30 Werte über den Schlag verteilt zu messen, um einen Schlagdurchschnitt zu bilden. Ein anderer Ansatz (u.a. in dieser Arbeit) ist, 30 Pflanzen an einem Ort zu messen

und dann die Orte miteinander zu vergleichen. Die Orte können ebenfalls in einem GIS verwaltet werden.

Ertragskarten

Für die Versuchsauswertung ist die Ertragskartierung von hoher Bedeutung. Der gewissenhafte Umgang und eine gute Kalibrierung sind unabdingbar. Durch sie ist eine Darstellung der im Ertrag feststellbaren Auswirkungen unterschiedlicher Pflanzenbaumaßnahmen oder Anbaubedingungen möglich. Mit zeitlichen Abständen wird der momentane Ertrag gemessen und durch einen GPS-Empfänger an der Erntemaschine einer Geokoordinate zugeordnet. Um ein realistisches Ergebnis zu erhalten sind z.B. Ausreißer und Vorgewende zu verwerfen. Die gesammelten Punktdaten können mithilfe von Interpolation im GIS in flächendeckende Rasterdaten umgewandelt werden. (LUDOWICY et al. 2002, S. 42; GRABO 2006, S. 87).

Die Aussagekraft der Ertragskarten schwankt zwischen Jahren und Standorten. In einem Jahr mit Wassermangel treten bodenbedingte Unterschiede stärker auf als in einem feuchteren Jahr. Generell kann ein Standort in einer Region, in der Wasser der ertragsbegrenzende Faktor ist, eher durch Ertragskarten profitieren. In anderen Regionen mit ausreichender Wasserversorgung werden ertragsbezogene Unterschiede häufig durch bewirtschaftungsbedingte Effekten, wie Qualität der Bodenbearbeitung, mangelhafte Unkraut- und Krankheitsbekämpfung, Hagel- oder Wildschaden oder Düngungsfehler, erzielt. (LORENZ UND MÜNCHHOFF 2015, S. 39-42)

3 Material und Methoden

In dem folgenden Abschnitt wird der Versuchsstandort, die Versuchsanordnung, die Datenerfassung sowie die -auswertung behandelt.

3.1 Versuchsstandort

3.1.1 Klima

Bezüglich des Klimas werden das langjährige Mittel sowie die Witterung in der Vegetationsperiode unterschieden und auf Unterschiede eingegangen.

Langjähriges Mittel

Nach N.N. (2020b) ist das Klima auf dem Versuchsstandort warm und gemäßigt. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 8,3 °C. Der wärmste Monat im Jahresverlauf ist mit 17,3 °C der Juli, wohingegen der Januar mit -0,3 °C der kälteste Monat ist. Im langjährigen Mittel fallen jährlich 639 mm Niederschlag. Wiederum ist es der Juli mit dem meisten

Niederschlag (69 mm), wohingegen der Februar mit 37 mm der Monat mit den geringsten Niederschlägen ist.

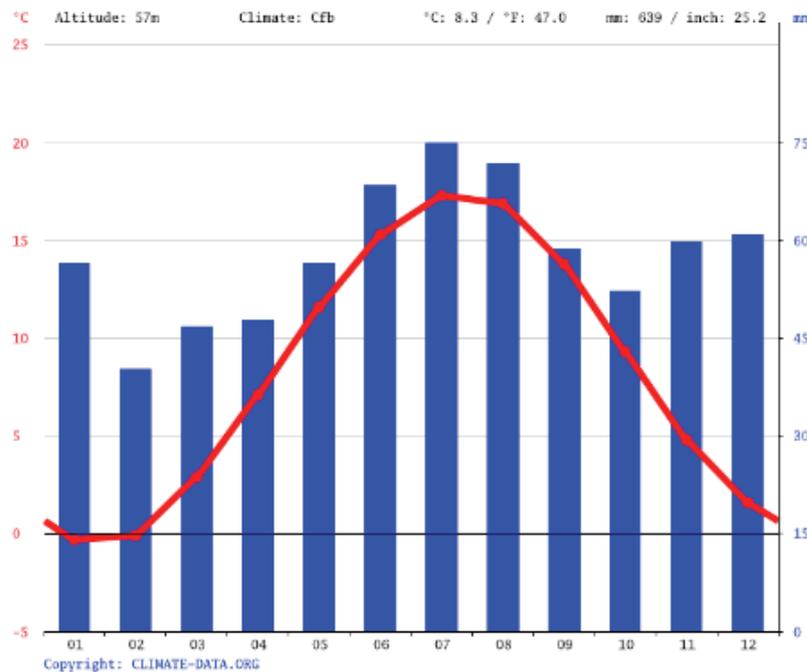


Abbildung 5: Klimadiagramm von 19205 Pokrent (N.N. 2020b)

Witterung in der Vegetationsperiode zur Ernte 2020

Nachdem der Oktober und November 2019 relativ feucht waren, kam es ebenfalls im Winter zu überdurchschnittlich viel Niederschlag. Der Februar als vermeintlich niederschlagsärmster Monat war in der ersten Jahreshälfte 2020 mit mehr als 100 mm der niederschlagsreichste Monat. Die monatliche Niederschlagsverteilung ist nachzusehen in Abbildung A 3. Im Frühjahr 2020 war vor allem der April besonders trocken mit Ausnahme der letzten zwei Tage. Die Abbildung 6 zeigt deutlich, dass seit Mitte März nur noch kleine Regenmengen fallen und dass es nur an den letzten beiden Tagen im April Niederschlag gab. Der Abbildung A 3 ist weiterhin zu entnehmen, dass der Mai 2020 im Vergleich zu den anderen Monaten relativ sowie absolut das höchste Wasserdefizit besaß. Durch die relativ großen Regenmengen am Ende des Aprils und die relativ breite Verteilung innerhalb des Monats, wie es in der Abbildung 6 zu erkennen ist, hatte der Mai 2020 entspannte sich die Wassersituation trotzdem. Außerdem ist der Abbildung A 4 zu entnehmen, dass die Monatsdurchschnittstemperatur leicht unter dem langjährigen Mittel liegt und somit auf eine geringere Verdunstung zurückgeschlossen werden kann. Der Abbildung A 4 ist ebenfalls zu entnehmen, dass die Durchschnittstemperatur im Winter mit +2,2 °C (Dezember), +3,6 °C (Januar) und +3,8 °C deutlich höher war als im langjährigen Mittel. Januar und Februar 2020 insgesamt sogar wärmer als der Dezember 2019. Der März und April waren ebenfalls etwas wärmer als im langjährigen Mittel. Der Juli war hingegen mit fast -2 °C deutlich kälter als im langjährigen Mittel (DWD 2020).

Weiterhin lag der Niederschlag von Juni bis August unter dem langjährigen Mittel. Absolut betrachtet fehlen in diesem Zeitraum mehr als 50 mm Niederschlag (Abbildung A 3). Dennoch gab es einige Niederschläge, welche relativ breit über den Zeitraum verteilt sind, wie es in der Abbildung 6 dargestellt wird.

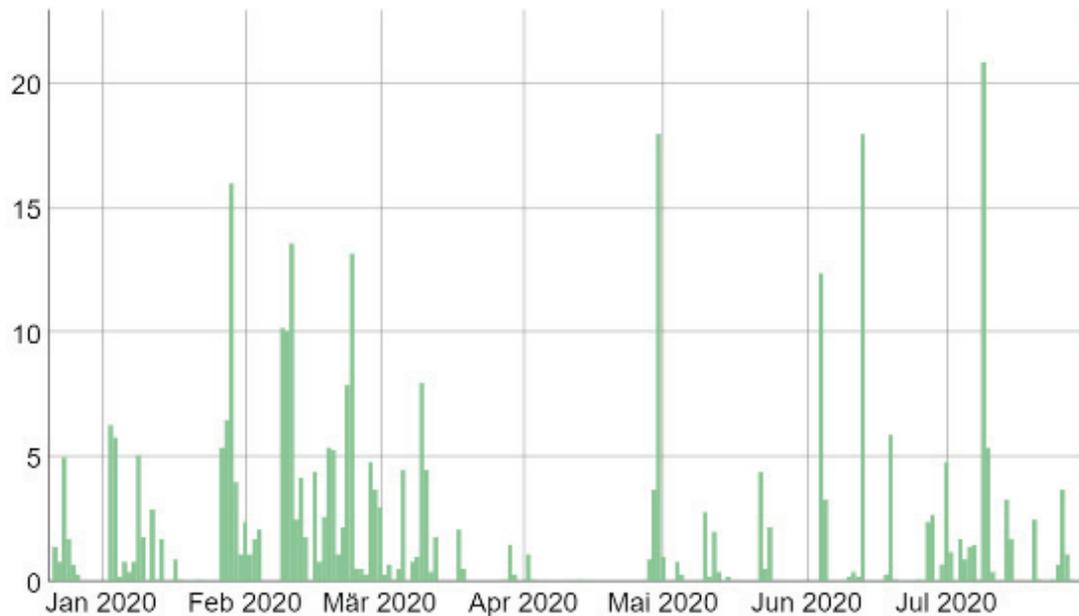


Abbildung 6: Tägliche Niederschlagsmengen in Schwerin im Frühjahr 2020 in mm (DWD 2020)

3.1.2 Boden

Der Standort des Feldversuchs ist Teil einer Bodengroßlandschaft, in der sich Grundmoränen sowie lehmige Endmoränen befinden. Erliegt im Jungmoränengebiet Norddeutschlands, welches aus der Weichseleiszeit hervorging (KLEINELÜMERN et al. 2020).

Im Folgenden wird speziell auf die Bodenform sowie die Bodenschätzung und den Bodenzustand eingegangen.

Bodenform

Der Boden am Versuchsstandort ist eine Parabraunerde, welche aus Geschiebelehm entstanden ist. Diese Form der Parabraunerden ist typischerweise durch Grundmoränen entstanden. Durch Entkalkung setzt eine Tonverlagerung in den Unterboden ein, was in einem tonverarmten Oberboden (Al-Horizont) und tonangereicherten Unterboden (Bt-Horizont) resultiert. Außerdem färbt sich dadurch der Oberboden braun. Der tonangereicherte Unterboden kann bereits während der Entstehung Verdichtungen hervorrufen, ist aber in jedem Fall verdichtungsgefährdet. Ist eine Verdichtung vorhanden, kann dies durch das Auftreten von Staunässe zu einer Weiterentwicklung zum Pseudogley führen. Ebenfalls ist der Versuchsstandort sehr kuppig. Besonders profilierte Kuppen zeichnen sich dadurch aus, dass der Al-Horizont vollständig erodiert ist und der tonreichere Bt-Horizont in den Pflughorizont

eingearbeitet ist. Daher unterscheiden sich Kuppen hinsichtlich der Bodenstruktur und sind typischerweise schwerer zu bearbeiten (MLUV 2005).

Wie bereits beschrieben, handelt es sich bei dem Ausgangsgestein um Geschiebelehm, der sich aus Geschiebemergel gebildet hat. Durch eine Verwitterung wird der Kalkanteil reduziert und die Färbung ändert sich von Grau bis Blau in Ockergelb bis Braun. Dieser ist Teil des Grundmoränenmaterials und besteht überwiegend aus Sand und Schluff. Weiterhin sind in dem ungeschichteten Sediment Gesteinsbruchstücke enthalten und es kann auch andere Geschiebekomponenten enthalten (N.N. 2020a).

Bodenschätzung und -zustand

Der Versuchsstandort ist ein lehmiger Sand mit einer Bodenzahl von etwa 55. Der Zustand ist als gut einzuschätzen. Durch die Bewirtschaftung ist stetig der Kalkgehalt kontrolliert und ausgeglichen worden. Der pH-Wert befindet sich somit in einem für den Standort angepassten Bereich von 6,3-6,7. Im Anhang ist die Übersicht der Beprobungspunkte, die sich mit dem Feldversuch überschneiden, einzusehen (Abbildung A 6). Der Gehalt an Grundnährstoffen ist ebenfalls seit Jahren anhand der Bodenuntersuchungen angeglichen worden. Die Werte von K_2O liegen zwischen 10 und über 16 $mg \cdot 100 g \text{ Boden}^{-1}$ und damit in den Versorgungsstufen B und C (Abbildung A 7). P_2O_5 befindet sich im Bereich der Versuchsanlage in Versorgungsstufe B. Im Minimum ist hier ein Wert von 3,8 und im Maximum 4,8 $mg P_2O_5 \cdot 100 g \text{ Boden}^{-1}$ gemessen worden (Abbildung A 8). Der Mg-Gehalt schwankt zwischen 7 und 13 $mg \cdot 100 g \text{ Boden}^{-1}$ Boden und befindet sich damit in B, C und D. Auch diese Übersicht findet sich im Anhang (Abbildung A 9). Die Bodenuntersuchung wurde im Jahr 2016 durchgeführt und seitdem gibt es noch keine aktuelleren Daten. Durch anschließende Düngungsmaßnahmen ist von leichten Abweichungen auszugehen. Ertragsunterschiede und dadurch bedingte variierende Nährstoffentzüge haben ebenfalls einen Einfluss auf die Bodenversorgung. In den Senken ist erfahrungsgemäß ein höheres Wasseraufkommen als in den Ebenen und auf den Kuppen. Dies geht einher mit der Verfügbarkeit von gelösten Nährstoffen aus dem Boden.

Durch eine langjährige, nichtwendende Grundbodenbearbeitung in ausreichender Tiefe gibt es keine scharf abgegrenzte Krume und ebenfalls keine Verdichtungen im Unterboden.

3.2 Versuchsanordnung

3.2.1 Düngungsvarianten

Insgesamt wurden zwölf Parzellen angelegt. In den Parzellen sind zwei unterschiedliche Düngungsintensitäten von N-Dünger appliziert worden. Zum einen war es die nach DBE ermittelte Menge (bü 100 %), der sogenannte Bedarf und zum anderen die Bedarfsmenge

abzüglich 20 % (N_{red} 80 %). Eine Parzelle hatte die Größe von 36 x 200 m. Die Abbildung 7 veranschaulicht die Versuchsanlage.

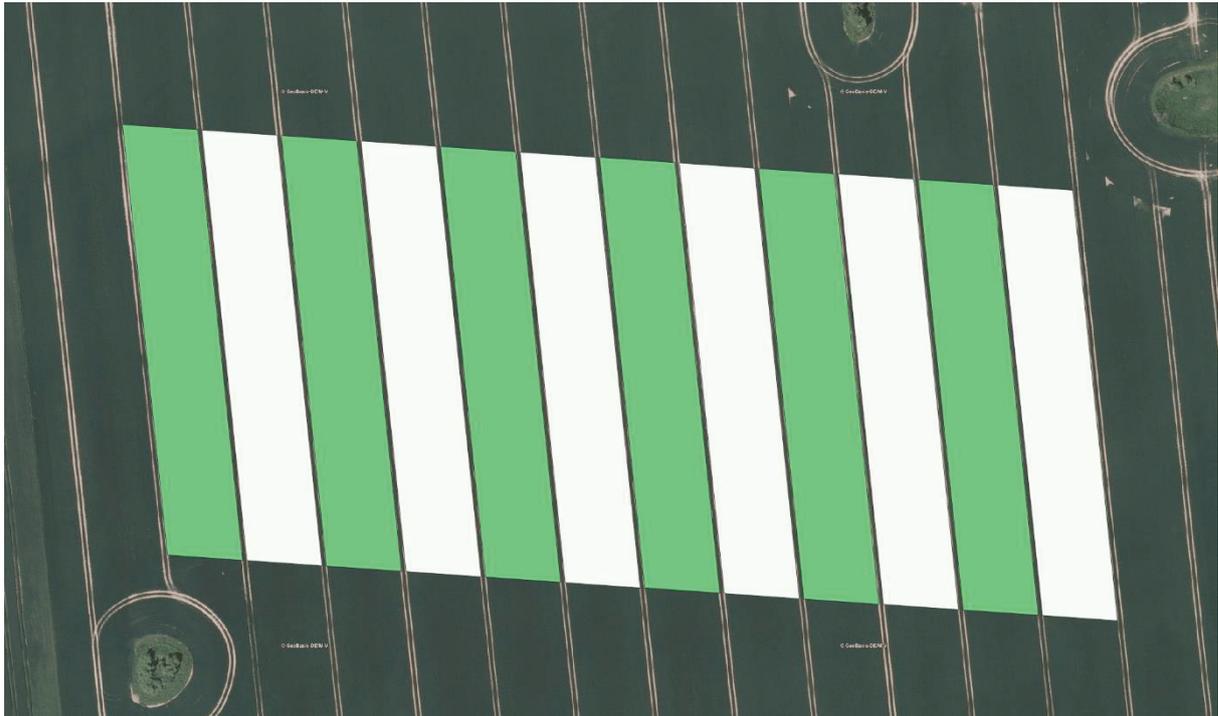


Abbildung 7: Versuchsanlage mit sechs Wiederholungen in zwölf Parzellen. Grün= 100 % N; Weiß= 80 % N (Eigene Darstellung)

Die N-Düngung wurde in diesem Jahr in drei Gaben aufgeteilt. In Tabelle 1 wird die N-Düngung im Frühjahr 2020 dargestellt. Die erste Gabe wurde als Harnstoff mit Ureaseinhibitor (Piagran Pro) am 26.02.2020 ausgebracht. Die 100 %-Parzellen erhielten $90 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, die 80 %-Parzellen hingegen $72 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Eine Woche später, am 04.03.2020, wurde mit SSA ein Schwefel und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Dünger ausgebracht. Die Ausbringungsmenge war $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ und wurde nicht zwischen den Parzellen variiert, um die Schwefelversorgung einheitlich zu halten. Hiermit wurden ca. $32 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ zugeführt. Am 19.03.2020 folgte die zweite Gabe. Erneut kam Harnstoff mit Ureaseinhibitor zum Einsatz. Die 100 %-Parzellen erhielten $30 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ und die 80 %-Parzellen $22 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Die letzte Gabe erfolgte am 29.04.2020. Hier wurde Kalkammonsalpeter (KAS) eingesetzt. Die 100 % Parzellen bekamen $50 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ und die 80 %-Parzellen $35 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Insgesamt sind somit 202 bzw. $161 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ im Frühjahr 2020 ausgebracht worden.

Tabelle 1: Übersicht der N-Düngung auf dem Versuchsfeld

N-Gabe	Datum	Düngemittel	kg N·ha ⁻¹		kg N·ha ⁻¹ gesamt	
			100%	80%	100%	80%
1. Gabe	26.02.2020	Piagran pro	90	72	90	72
	04.03.2020	SSA	32	32	122	104
2. Gabe	19.03.2020	Piagran pro	30	22	152	126
3. Gabe	29.04.2020	KAS	50	35	202	161

Ausgebracht wurde jede Gabe mit einem Zweiseiben-Zentrifugalstreuer. Die optimale Einstellung des Streubilds wurde im Vorfeld durch das Überfahren von Messschalen vorgenommen. Das Streubild bei diesen Streuern weist eine doppelte Überlappung auf. Das bedeutet, es entsteht erst ein gleichmäßig verteiltes Streubild, wenn die Parzelle jeweils von beiden Seiten abgefahren wurde. Während der Überfahrt der Versuchsfelder wurden somit abwechselnd die eine oder die andere Streuseite entsprechend reduziert. Um einer fehlerhaften Regelung vorzubeugen, wurde eine Applikationskarte für jede Gabe erstellt und zur Steuerung der Ausbringung eingesetzt. In Abbildung 8 wird die verwendete Applikationskarte dargestellt. Die Regelung am Beispiel erklärt: Sobald sich mehr als die Hälfte einer Streuseite in einem braunen Feld befindet, wird die Menge auf den darin vorgegebenen Wert reduziert.

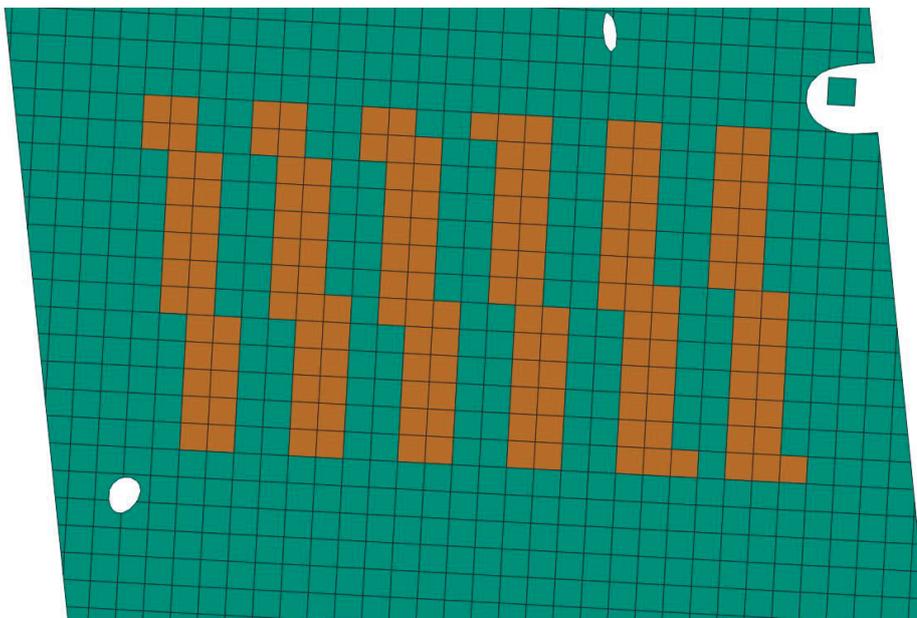


Abbildung 8: Applikationskarte für die N-Düngung. Grün= 100 %; Braun= 80 %

3.2.2 Untersuchungsorte

Neben den zwei Unterscheidungen zwischen den Parzellen, gab es ebenfalls innerhalb der Parzellen die Unterscheidung zwischen Standorten. Genauer wurde jeweils zwischen Kuppe, Senke und Ebene unterschieden. Die Untersuchungsorte wurden während des Ablaufens der Parzellen nach eigenem Ermessen ausgewählt. Eine weitere Unterteilung, wie z.B. eine spezielle Einordnung von Kuppen oder Senken, fand bei der Auswahl nicht statt. Somit wurden die Gegebenheiten gewissermaßen abstrahiert.

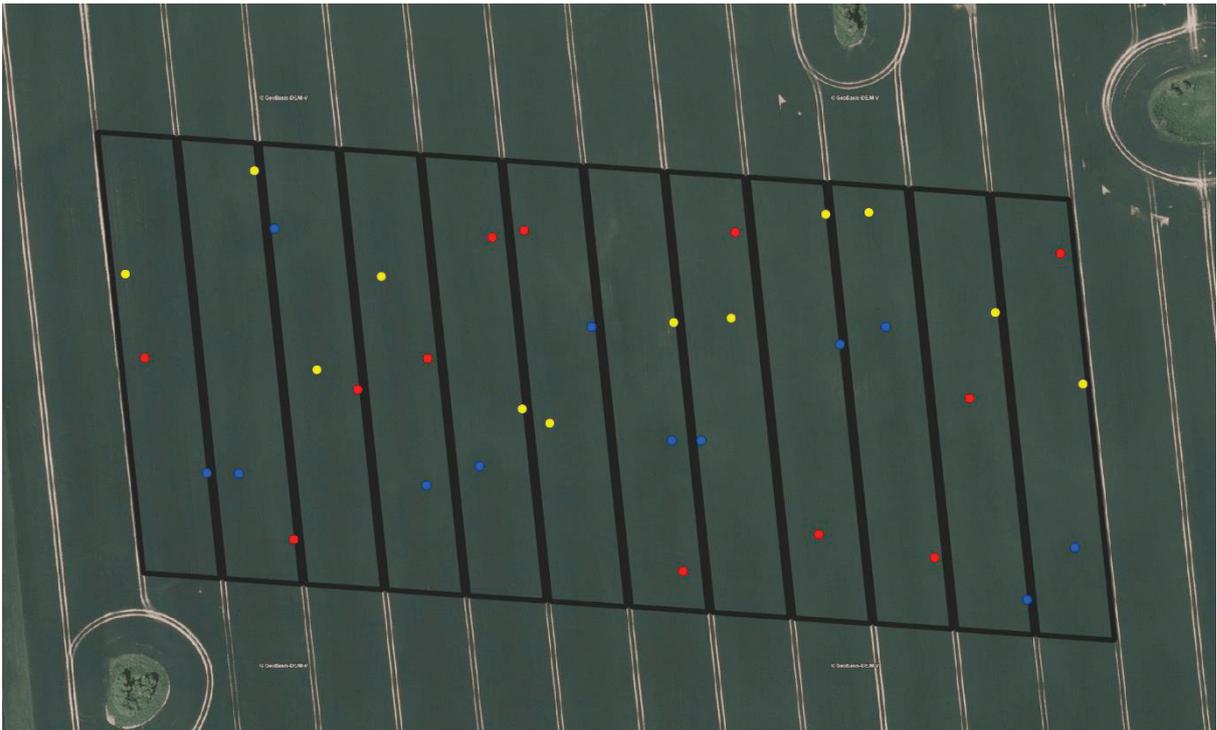


Abbildung 9: Anordnung der Untersuchungsorte. Gelb= Kuppe; Rot= Ebene; Blau= Senke (eigene Darstellung)

Diese Untersuchungsorte wurden mit einem GPS-Handgerät eingemessen, welches eine Genauigkeit von ca. 3 m aufweist. Die dadurch entstandene Punkt-Datei (Shape-Format) kann nun zur weiteren Datenerfassung verwendet werden, wie es im folgenden Kapitel 3.3 genauer erläutert wird. Anschließend wurde an jedem Ort ein Markierstab gesteckt, um diese wiederholbar anlaufen zu können. Abbildung 9 zeigt die Anordnung der Untersuchungsorte.

3.3 Datenerfassung

Der Versuchsauswertung vorangegangen ist das Sammeln von Daten. Die Daten wurden während der Vegetationsperiode im Frühjahr sowie während und nach der Ernte 2020 erhoben. Diese Daten werden mit den ausgezählten Feldaufgängen sowie mit der Bestandesdichte zum Erntezeitpunkt abgeglichen, um den Fehler zu minimieren. NDVI-Karten wurden ebenfalls ausgewertet.

3.3.1 Allgemeines Anbausystem und Anbau zur Ernte 2020

Auf der Versuchsfläche wirtschaftet der konventionelle Ackerbaubetrieb seit Beginn der 1990er Jahre. Die Fruchtfolge gestaltete sich stets aus Raps-Weizen-Gerste bzw. Triticale. Die Grundbodenbearbeitung ist seit 2007 konsequent nicht wendend. Variiert wird diesbezüglich in der Tiefe: Eine tiefere Lockerung (ca. 30 cm) wird vor dem Rapsanbau durchgeführt. Zu Getreide fällt die Grundbodenbearbeitung mit ca. 15 bis 20 cm generell flacher aus.

Nach dem Erntejahr 2019 (Winterraps) sind folgende Maßnahmen auf der Fläche durchgeführt worden: Der abgeerntete Raps wurde mit zwei Stoppelbearbeitungsgängen zum Auflaufen gebracht. Vor der Grundbodenbearbeitung wurde der Aufwuchs mit Glyphosat abgespritzt. Am 16.09.2019 wurde der *Reform* Winterweizen bestellt mit einer Saatstärke von durchschnittlich 227 Körnern·m². Eine variable Aussaatmenge wurde über eine Saatkarte realisiert. In Kuppenbereichen wurde die Aussaatstärke erhöht und teilweise in den Senken verringert. Ziel war es, Unterschiede im Feldaufgang aufgrund von Reliefeigenschaften auszugleichen und etwa 200 Keimpflanzen·m², gleichmäßig über die Fläche verteilt, zu etablieren.

Nach einer Herbizidmaßnahme und einer Spurenelementgabe am 07. bzw. 30.10.2020 waren die Feldarbeiten im Jahr 2019 beendet. Im Jahr 2020 war die erste Maßnahme, die im Kapitel 3.2.1 und in Tabelle 1 beschriebene Düngung der ersten Gabe. Die weitere Düngung ist ebenfalls der Tabelle 1 zu entnehmen. Eine weitere Herbizidmaßnahme fiel am 01.04.2020. Im Abstand von zweieinhalb Wochen sind am 08.04. und 26.04.2020 zwei Maßnahmen mit Wachstumsregler und Fungizid gefallen. Am 20.05.2020 wurde zum dritten Mal eine Wachstumsreglermaßnahme appliziert. Am 09.06.2020 fiel die letzte Maßnahme als Mischung aus Fungizid und Insektizid. Der Bestand kurz vor der Ernte vom 16.07.2020, kann den Drohnenbildern Abbildung A 25 und Abbildung A 26 entnommen werden

3.3.2 Felderhebungen

Bereits im Herbst wurde die erste Bonitur durchgeführt. Es handelte sich um die Erfassung der Feldaufgänge. Hierzu wurden die markanten Orte Kuppe, Senke und Ebene angelaufen. Mithilfe eines Zählrahmens ist die Fläche von einem viertel Quadratmeter ausgezählt worden. Am selben Ort wurde die Zählung vier Mal wiederholt. Die Werte wurden auf einen Quadratmeter hochgerechnet und es wurde der Mittelwert gebildet.

Vor der ersten Düngergabe wurde der N_{min}-Gehalt im Boden festgestellt. Eine Probe bildet jeweils drei Schichten von jeweils 30 cm Bodenprofil ab. Insgesamt wurde somit der Bereich von 0-90 cm abgedeckt. Für eine Probe wurde mit einem Probenstecher Boden an 15 Orten entnommen. Insgesamt wurden drei N_{min}-Proben gezogen, jeweils eine für Kuppen, Senken und Ebenen.

Der Yara N-Tester kam insgesamt fünf Mal zum Einsatz. Hierbei wurden zum selben Termin die 36 Untersuchungsorte angelaufen und 30 Messungen durchgeführt. Die Anzahl an Messungen war notwendig, um ein Ergebnis auf der Yara Irix App zu erhalten. Anhand vorab eingegebener Werte, wie Ertragserwartung und Sorte, wurde eine Düngeempfehlung ausgegeben, die nicht weiter beachtet wurde. Bedeutsamer waren die Werte der Einzelmessungen, die im Ergebnis hinterlegt waren. Da es keine andere Möglichkeit gab, wurden alle Einzelmessungen händisch in Excel eingegeben. Um gravierende Tippfehler ausschließen zu können, wurden die Ergebnisse in einem Histogramm visualisiert und gegebenenfalls korrigiert.

Mit den N-Tester-Untersuchungen einher gingen die Bonituren von BBCH und Krankheiten. Die Entwicklungsstadien wurden hierbei nicht bis auf die letzte Ziffer genau bestimmt. Es ging vorrangig um das Erkennen deutlicher Unterschiede. Bei den Krankheiten ist es ähnlich. Der gesamte Versuch wurde hinsichtlich der Fungizidmaßnahmen gleichbehandelt. Vorrangig ging es darum, die Einflüsse auszuschließen, welche die Versuchsauswertung verfälschen könnten.

NDVI-Karten

Die Erstellung der NDVI-Karten erfolgte nach Verfügbarkeit neuer Satellitenbilder der Copernicus Mission. Vor allem die Bewölkung während der Aufnahme der Bilder sorgte dafür, dass z.T. länger als ein Monat keine geeigneten Bilder verfügbar waren. Die Bilder wurden aus dem Internet heruntergeladen und im QGIS bearbeitet. Mithilfe des Rasterrechners wurden die Werte des NDVI im vorgegebenen Raster von 100 m² (10x10 m) ermittelt. Ein NDVI Wert konnte jedem Untersuchungsort zugeordnet werden, indem die Zonenstatistik angewendet wurde.

3.3.3 Versuchsbeerntung

Die Versuchsbeerntung erfolgte auf zwei verschiedene Arten. Zum einen wurden alle zwölf Parzellen als Kerndrusch beerntet und zum anderen sind insgesamt 24 Schnittproben genommen worden, welche insgesamt acht Parzellen repräsentieren (jeweils vier bei 100 % und N_{red} 80%).

Der Kerndrusch wurde folgendermaßen durchgeführt: Mit leerem Korntank begonnen, wurde die Parzelle 1 angefahren und insgesamt zwei Schneidwerksbreiten (ca. 21 m gesamt) auf der gesamten Parzellenlänge abgeerntet. Bei einem Fahrgassenabstand von 36 m wurde somit nie eine Fahrgasse mitbeerntet, die das Ergebnis verfälscht. Danach wurde auf einen Anhänger übergeladen, bis der Korntank leer war und der Anhänger wurde separat gewogen. Während des Überladens wurden Kornproben gezogen für spätere Analysen. Der Prozess wurde für die verbleibenden elf Parzellen wiederholt. Währenddessen wurde mithilfe der

Ertragskartierung separat die geerntete Menge aufgezeichnet, welche ebenfalls für die Auswertung herangezogen wird.

Die Schnittproben wurden in den acht Parzellen jeweils an den drei Untersuchungsorten entnommen. Hierfür wurden bei einem Reihenabstand von 12,5 cm 8 Reihen abgezählt und in der Länge von einem Meter abgeschnitten. Die Schnitthöhe betrug etwa 10 cm, was der normalen Stoppelhöhe des Mähdrusches entspricht. Die Schnittproben wurden separiert zusammengebunden und für die Analyse in Tüten ins Labor transportiert.

3.4 Laboranalyse und Datenauswertung

Die Kerndruschproben wurden hinsichtlich TKM und Proteingehalt untersucht. Für die TKM-Untersuchung wurden zwei Mal 500 Körner mit einem optischen Körnerzählgerät (Contador der Firma Pfeuffer) je Probe abgezählt und dann gewogen. Außerdem wurden die Proben mit einem Bruker MPA II auf den Proteingehalt untersucht. Dieses Gerät arbeitet mit Nahinfrarotspektroskopie (NIRS). Abbildung A 5 zeigt das Gerät, mit dem gearbeitet wurde. Ein Teil jeder Körnerprobe wird in eine Schale abgefüllt. Diese Schale hat einen Boden aus Kristallglas und wird vom Gerät durchleuchtet. Die Schale muss so weit gefüllt sein, dass kein Licht mehr durch die Körner hindurchscheint. Mithilfe des Steuerungsprogramms auf einem PC wird der Messvorgang gestartet und für etwa 45 Sekunden rotiert die Schale über das Licht. Hierbei wird die Reflexion der Körner gemessen, welche mithilfe einer entsprechenden Kalibrierung Rückschlüsse auf den Proteingehalt gibt. Danach wurde der Vorgang zweimal mit derselben Probe nach jeweils einem Mal Umrühren wiederholt und anschließend mit einer neuen Probe von Vorne angefangen. Die im Beispiel betrachteten sechs Messungen dauerten ca. 7 Minuten, was eine deutliche Zeitersparnis gegenüber nasschemischen Methoden bedeutet.

An den Schnittproben wurden über die Untersuchung von TKM und Proteingehalt hinaus die Halmlängen gemessen, die Anzahl der Ähren ausgezählt, der TM-Gehalt ermittelt und der Kornertrag gewogen. Für die Halmlänge wurden jeweils zehn Halme mit einem Zollstock gemessen und daraus der Mittelwert gebildet. Für jede Schnittprobe wurde dies vier Mal wiederholt. Für die Gewinnung der Körner mussten die Ähren von den Halmen abgeschnitten werden. Hierbei wurden die Ähren gezählt und als Ährendichte je m² festgesetzt. Die Ähren wurden mit dem Labordrescher der Firma Hege ausgedroschen. Die Spreu- und Spelzteil sowie die Spindeln wurden beseitigt.

Mit den Körnerproben wurde im Anschluss der Kornertrag der Schnittprobe ermittelt. Hierzu wurden die ausgedroschenen Körner mit einer Laborwaage gewogen und so der Kornertrag in Gramm je m² ermittelt. Da unterschiedliche Feuchtigkeit der Kornproben das Ergebnis verfälschen würde, ist die Kornfeuchte der Proben ermittelt worden. Hierfür wurde von jeder Probe ein Teil in je ein Glas gefüllt und eingewogen. Anschließend wurden die Gläser

mit den Körnern für 48 h bei 105 °C in den Trockenschrank gestellt, sodass das Wasser aus den Körnern entweicht. Durch die anschließende Rückwaage der Gläser konnte der TM-Gehalt ermittelt werden und daher der Trockenmasseertrag (feuchtebereinigter Kornertrag) in Gramm je m² errechnet werden.

Datenauswertung

Zur Datenauswertung wurden die Ergebnisse vorab in einer Excel-Tabelle gesammelt und sortiert. Anschließend wurde die Auswertung in SPSS vorgenommen. Neben errechneten Signifikanzen wurden Grafiken erzeugt, welche teilweise in Microsoft Word nachbearbeitet wurden. Tabellen mit Ergebnissen wurden von SPSS in Microsoft Excel übertragen und bearbeitet.

Zur Untersuchung der Unterschiede zwischen den Düngevarianten bzw. Standorten wurden die Mittelwerte der Wiederholungen mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) auf signifikante Unterschiede getestet. Vorrangig wurden die Erträge und Proteingehalte betrachtet. Weiterhin wurde der Proteinertrag und die untersuchten Eigenschaften der Schnittproben betrachtet. Daten aus der Vegetation wie z.B. die N-Tester Werte wurden ebenfalls berücksichtigt. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 0,05$ gewählt. Außerdem wurden tendenzielle Unterschiede ($0,05 < p \leq 0,10$) berücksichtigt und gekennzeichnet. Da der Standort drei Gruppen beinhaltet, wurde bei signifikanten Unterschieden zwischen den Standorten im Anschluss ein Post-Hoc-Test durchgeführt. Da hierbei alle Standorte miteinander verglichen werden, zeigt das Ergebnis dieses Tests auf, zwischen welchen Gruppen (Standorten) Unterschiede bestehen.

Die Auswertung wurde wie folgt durchgeführt. Zuerst wurde sich den Ergebnissen aus dem Kerndrusch gewidmet. Der Einfluss der Düngevariante wurde untersucht hinsichtlich Unterschiede der Gesamtparzellen. Aus dem Proteingehalt und dem Kornertrag wird der Proteinertrag errechnet.

$$\text{Proteinertrag [t} \cdot \text{ha}^{-1}] = \text{Kornertrag [t} \cdot \text{ha}^{-1}] \times \text{Proteingehalt [\%]}$$

Aus dem Proteinertrag und unter Einbezug der ausgebrachten N-Menge wurde die N-Effizienz berechnet. Nach KLAGES et al. (2017, S. 31) lautet im Weizen der Faktor für die Umrechnung von N in Rohprotein 5,7. Folgende Formel wurde zur Berechnung angewendet:

$$N - \text{Effizienz} = \frac{\text{Proteinertrag [t} \cdot \text{ha}^{-1}]}{5,7 \times N_{\text{ausgebracht [t} \cdot \text{ha}^{-1}]}}$$

Die N-Effizienz bildet in diesem Fall das Verhältnis zwischen ausgebrachtem und mit dem Korn abgefahrenen N ab. Ist die N-Effizienz = 1, wurde somit die ausgebrachte N-Menge mit dem Korn vom Feld abgefahren. Der im Stroh befindliche N wird somit nicht berücksichtigt.

Im Anschluss wurden die Komponenten Ertragskartierung und N-Tester mit einbezogen, als „praxisübliche“ Messmethode für Ertragsunterschiede an der Pflanze und im Erntegut. Hier wurde ebenfalls der Einfluss der N-Variante überprüft sowie die Unterschiede der Untersuchungsorte. Diese Werte wurden im weiteren Verlauf ebenfalls mit den im Labor ermittelten Werten verglichen. Jene Werte (TKM, Halmlänge, Kornertrag, Proteingehalt) wurden im dritten Teil der Auswertung beleuchtet. Erneut ist der Einfluss der N-Variante betrachtet worden und im Anschluss die Unterschiede zwischen den Untersuchungsorten. Aufgrund der N-Tester Werte vom 17.06. fand jeweils eine differenzierte Betrachtung statt. Die Werte der 1. Wiederholung (Parzelle 1 u. 2) waren nämlich entgegen der Erwartungen. Daher wurde jeweils geprüft, ob sich die Aussage ändert, wenn diese Proben vernachlässigt werden. Ebenfalls sind Zusammenhänge der Werte untersucht worden. Dazu wurde das jeweilige Bestimmtheitsmaß R^2 mit der Regressionsanalyse ermittelt. Das Signifikanzniveau lag erneut bei $\alpha = 0,05$. Im vierten Teil ist untersucht worden, welchen Einfluss die N-Variante auf den einzelnen Standort hat. Zum einen werden die N-Varianten an den Standorten verglichen und zum anderen werden die Standortunterschiede einer N-Variante herausgestellt. Die N-Effizienz der N-Varianten hinsichtlich der Standorte wird ebenfalls betrachtet. Im Vergleich zur Formel (siehe S. 25) wird zur Berechnung die Einheit $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ verwendet. Außerdem wurden die Zusammenhänge aus dem Teil 3 bezüglich der einzelnen Standorte betrachtet.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse können durch den Feldaufgang im Herbst und die N_{\min} -Werte vor der ersten Düngergabe sowie bonitierte Krankheiten, erhöhten Beikrautdruck oder Wildschäden beeinflusst werden. Daher wird vorab auf diese genannten Einflüsse eingegangen.

Hinsichtlich des Feldaufgangs wurden repräsentativ jeweils Werte von den verschiedenen Standorten Kuppe, Senke und Ebene erhoben. Tabelle 2 zeigt den Überblick über die Ergebnisse. Generell zeigen sich keine größeren Unterschiede, mit Ausnahme der Ebene von Wiederholung 1, welche im Vergleich eine hohe Standardabweichung aufzeigt. Daher wird dieser Einfluss bei der Ergebnisanalyse nicht weiter berücksichtigt. Auffällig ist jedoch, dass ein schlechter Feldaufgang realisiert wurde. Denn von den Rund 200 keimfähigen Körnern $\cdot m^{-2}$ sind nur etwa 70 % aufgelaufen. Das ist vor allem auf die Drilltechnik und teilweise auf trockene Bestellbedingungen zurückzuführen.

Tabelle 2: Mittelwert und Standardabweichung der ausgezählten Feldaufgänge an den Standorten Kuppe, Senke und Ebene

	Wdhlg. 1		Wdhlg. 2	
	Mittelwert	Std. Abw	Mittelwert	Std. Abw
Kuppe	135	8,9	151	16,5
Ebene	144	35,9	151	8,9
Senke	141	3,8	140	7,3

Die N_{\min} -Werte befinden sich grundsätzlich auf einem niedrigen Niveau. Auf der Kuppe wurden $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ gemessen, in der Senke $22 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Die Ebene befindet sich mit $20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ dazwischen. Da es sich zum einen um ein geringes Gesamtniveau handelt und die Abweichungen ebenfalls in Relation zur Düngungsmenge gering sind, werden die Werte im Folgenden vernachlässigt.

Die Bonituren der Krankheiten, die nur als Absicherung der Versuchsergebnisse dienten, zeigten keine Abweichungen. Die Pflanzen der einzelnen Untersuchungsorte zeigten durchgängig keine Blatt- oder Ährenkrankheiten, was auf eine erfolgreiche Fungizidstrategie und teilweise geringen Druck durch die Trockenperiode im April zurückzuführen ist.

Zu Beginn der Frühjahrsvegetation wurde in den Senken von Parzelle 9 und 10 Wildschaden gesichtet. In Parzelle 10 kam außerdem geringer Schaden durch Mäusefraß hinzu, der in der Senke von Parzelle 7 sowie auf der Kuppe von Parzelle 11 ebenfalls zu erkennen war. In der Senke von Parzelle 9 wurde außerdem Manganmangel festgestellt. Wiederum fand sich Manganmangel in Parzelle 6, allerdings nicht in unmittelbarer Nähe eines Untersuchungsortes. Ungewöhnlich viele Beikräuter wurden in den Senken der Parzellen 7, 9 und 10 gesichtet.

Vorrangig handelte es sich um Klettenlabkraut und Kamille. Mit einer Herbizidmaßnahme konnten die genannten Beikräuter erfolgreich reguliert werden.

4.1 Ergebnisse des Kerndruschs

4.1.1 Kornertrag und Proteingehalt

Durchschnittlich wurde ein Ertrag von $10,85 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ gemessen, welcher zwischen $10,17$ und $11,71 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ schwankt. Der niedrigste Ertrag wurde in Parzelle 1 (bü 100 %), der höchste in Parzelle 11 (bü 100 %) ermittelt. Der zweithöchste Ertrag wurde mit $11,61 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ in Parzelle 10, die reduziert gedüngt wurde, gemessen. In vier der sechs Wiederholungen erzielte die 100 % N-Düngung einen höheren Ertrag als die reduzierte Variante (Abbildung 10).

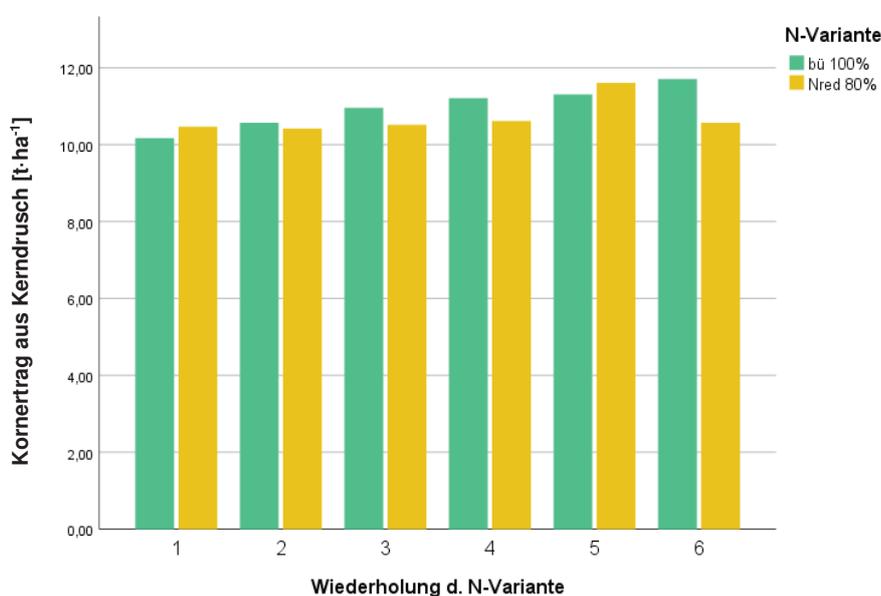


Abbildung 10: Gewogener Kornertrag aus dem Kerndrusch der Parzellen, aufgeteilt in die zwei N-Varianten

Die Varianzanalyse der Kerndruschergebnisse hat ergeben, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Düngungsvarianten gibt. Im Anhang (Abbildung A 10) wird die Übersicht als Boxplot einzusehen. In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass der Ertrag mit zunehmender Wiederholung steigt. Statistisch gibt es jedoch keine Tendenzen, dass sich die Wiederholungen voneinander unterscheiden.

Im Mittel über alle Proben befindet sich der Proteingehalt bei 9,94 % und schwankt zwischen 9,14 % in Parzelle 1 (bü 100 %) und 10,89 % in Parzelle 7 (bü 100%). Mit Ausnahme von Wiederholung 1 sind die Proteingehalte in den Parzellen der 100 % N Düngung höher als die der reduzierten Düngung, wie in der Abbildung 11 dargestellt. Die relativen Unterschiede der Wiederholungen schwanken sichtbar. Der Mittelwert der Proteingehalte über alle Parzellen ist 9,94 %. Der Mittelwert von bü 100 % liegt mit 10,07 % leicht darüber, N_{red} 80 % liegt mit 9,81 % leicht darunter.

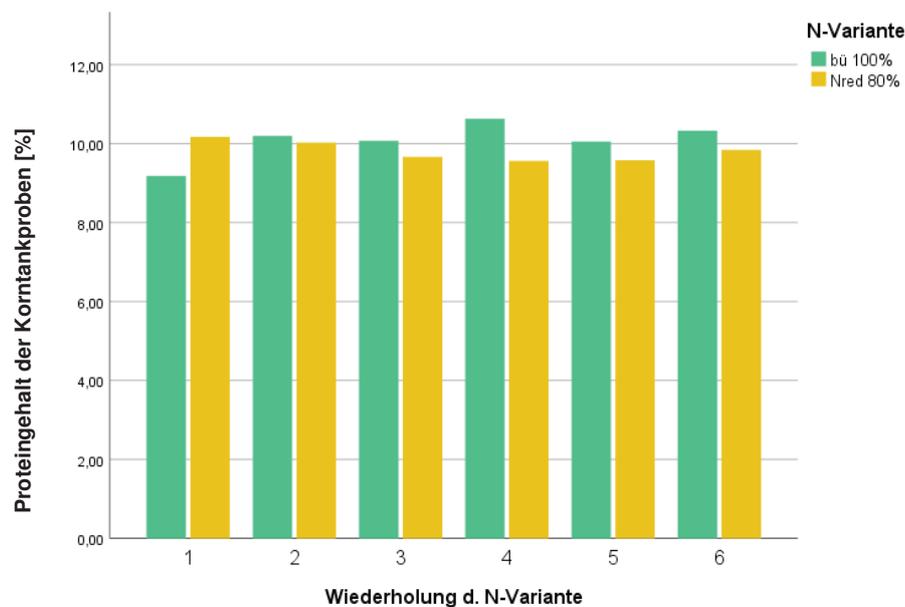


Abbildung 11: Ermittelter Proteingehalt aus Korntankproben des Kerndrusches der Parzellen, differenziert zwischen den zwei N-Varianten

Die einfaktorielle Varianzanalyse der zwei N-Varianten hinsichtlich des Proteingehalts ergab einen p-Wert von 0,054 und weist damit tendenzielle Unterschiede aus. Insgesamt sind die Schwankungen der Proteingehalte in den bü 100 % Parzellen größer, was vor allem aus Wiederholung 1 und 4 hervorgeht (Abbildung A 11).

4.1.2 Proteinertrag und N-Effizienz

Zwischen $0,93$ und $1,21 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ schwankt der Proteinertrag in den Parzellen. Im Durchschnitt wurde ein Proteinertrag von $1,08 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ geerntet. Die Wiederholung 1 bildet die Ausnahme der Regel, dass der Proteinertrag in bü 100 % höher ist als in den $N_{\text{red}} 80 \%$ Varianten. In Abbildung A 12 wird dieses verdeutlicht.

Das Ergebnis der einfaktoriellen Varianzanalyse zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Düngevarianten hinsichtlich des Proteinertrags gibt. Abbildung A 13 stellt dieses anhand des Boxplots dar. Höhere Schwankungen innerhalb der bü 100 % N-Variante zeichnen sich ab.

Aus dem Proteinertrag wurde unter Berücksichtigung der Düngermenge die relative N-Effizienz errechnet. Hierbei sind deutliche Unterschiede erkennbar. $N_{\text{red}} 80 \%$ erzielt mit einem Durchschnittswert von 1,05 in allen Parzellen eine höhere N-Effizienz. Die Effizienz von bü 100 % liegt bei 0,89. Besonders groß ist der Unterschied innerhalb der Wiederholung 1. Hier wird zum einen die geringste N-Effizienz von 0,75 und zum anderen die zweithöchste N-Effizienz von 1,07 ermittelt (Abbildung 12).

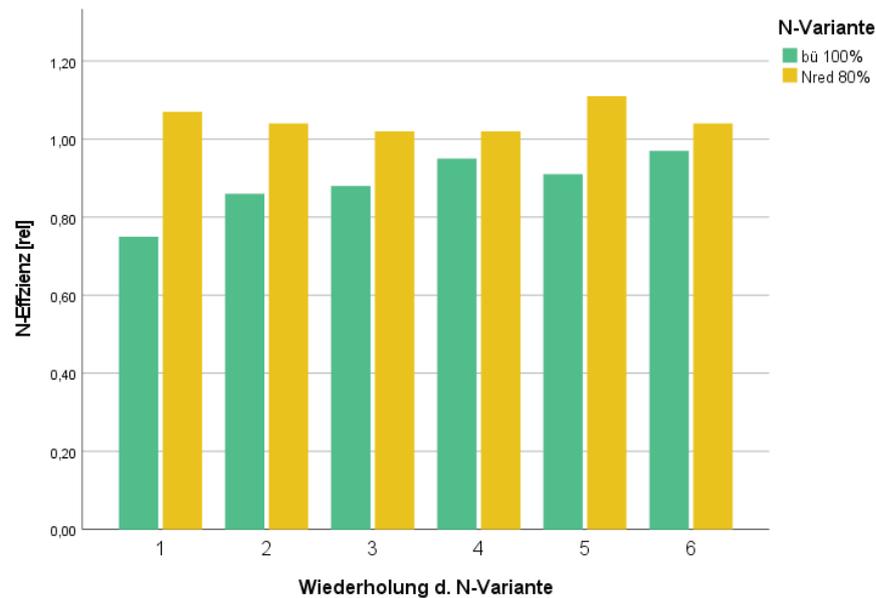


Abbildung 12: Berechnete N-Effizienz aus dem Kerndrusch der Parzellen, Differenzierung zwischen den zwei N-Varianten

Hinsichtlich der N-Effizienz gibt es einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$), wie es auch in Abbildung 13 gezeigt wird. Die verringerte N-Düngung erhöht die N-Effizienz, da sich die Erträge und Proteingehalte nicht signifikant bzw. tendenziell unterscheiden.

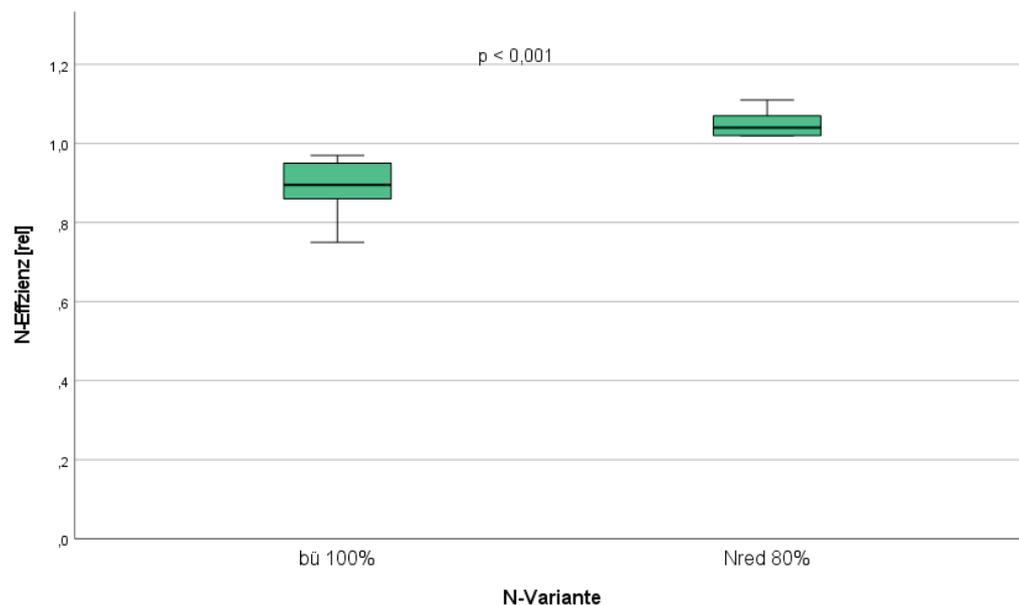


Abbildung 13: Einfluss der N-Düngung auf die N-Effizienz. Der p-Wert zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten ($\alpha=0,05$)

4.1.3 Anzahl der Wiederholungen

In dem Feldversuch wurden sechs Wiederholungen der zwei Düngungsintensitäten realisiert. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie sich die Ergebnisse verändern, sobald nur noch fünf Wiederholungen betrachtet werden.

Ergebnisse ohne Wiederholung 1

In den Balkendiagrammen der zwei vorangegangenen Kapitel wird jedes Mal ersichtlich, dass die Wiederholung 1 im Vergleich untypische Ergebnisse aufweist. Wird nun diese Wiederholung ausgeklammert, ändern sich die Aussagen bezüglich des Proteingehalts und -ertrags. Beide weisen dann nämlich signifikante Unterschiede auf (Proteingehalt $p = 0,027$; Proteinertrag $p = 0,013$). Der Einfluss der Düngevariante auf den Kornertrag bleibt nicht signifikant. Und ebenfalls bleibt der Einfluss auf die N-Effizienz signifikant ($p = 0,001$).

Ergebnisse ohne Wiederholung 6

Angenommen, es die letzte Wiederholung – Wiederholung 6 – sei nicht berücksichtigt worden: Die N-Effizienz ist weiterhin Signifikant ($p = 0,001$). Kornertrag, Proteingehalt und Proteinertrag sind nicht signifikant. In dieser Hinsicht gäbe es keine Änderungen der Ergebnisse.

4.2 Einfluss des Standorts auf N-Tester Werte und Ertragskartierung

4.2.1 N-Tester

Betrachtung der Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten

In den insgesamt fünf Messungen mit dem N-Tester wurde in jeder Parzelle drei Mal gemessen. Somit ergeben sich 36 Werte von jedem Messtermin.

In Abbildung 14 werden die Ergebnisse der jeweiligen Messungen nach N-Variante gegenübergestellt. Es zeichnet sich ab, dass sich die einzelnen Untersuchungsdaten voneinander unterscheiden. Die erste Messung vom 13.04. weist insgesamt die geringsten Werte auf, wohingegen am 20.05. die höchsten Werte gemessen wurden. In der ersten Messung vom 13.04. sind signifikante Unterschiede zu verzeichnen sowie am 01.06. und 17.06. Die anderen zwei Messungen weisen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Düngevarianten auf, was sich mit den Druschergebnissen in 4.1.1 deckt.

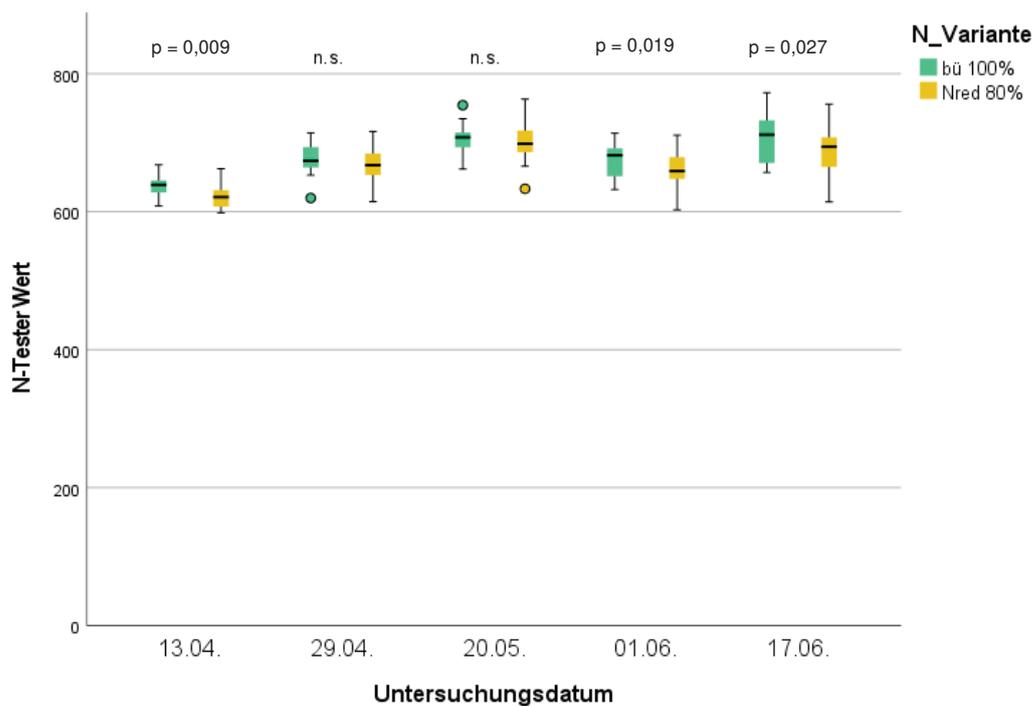


Abbildung 14: Einfluss der Variante auf die Werte des N-Testers an den fünf Untersuchungstagen im Frühjahr 2020. Die p-Werte zeigen die Irrtumswahrscheinlichkeit für signifikante Unterschiede zwischen den N-Varianten ($\alpha=0,05$); n.s. = nicht signifikant

Betrachtung der Unterschiede zwischen den Standorten

Die drei Wiederholungen in jeder Parzelle wurden jeweils an den Untersuchungsorten vorgenommen. Es ergibt sich demnach jeweils ein Wert für den Standort Kuppe, Ebene und Senke. Die Varianzanalyse ergab, dass es an jedem Untersuchungsdatum signifikante Unterschiede zwischen den Standorten gibt. Der anschließende Post-hoc-Test ergab, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten verschieden sind bzw. sich zwischen den Untersuchungstagen unterscheiden. In Tabelle A 1 werden die Ergebnisse des Post-Hoc-Tests zusammenfassend dargestellt. Senken und Kuppen sind an jedem Untersuchungstermin signifikant unterschiedlich. Kuppen und Ebenen hingegen weisen nur am 29.04. einen tendenziellen Unterschied auf ($p = 0,081$) und sind an den anderen Untersuchungstagen nicht signifikant. Zwischen den Ebenen und Senken werden an den Terminen 13.04.; 29.04. und 01.06. keine Unterschiede gemessen. Der dritte und der letzte Termin weisen hierbei hingegen signifikante Unterschiede auf ($p = 0,001$ bzw. $p < 0,001$) (Abbildung 15).

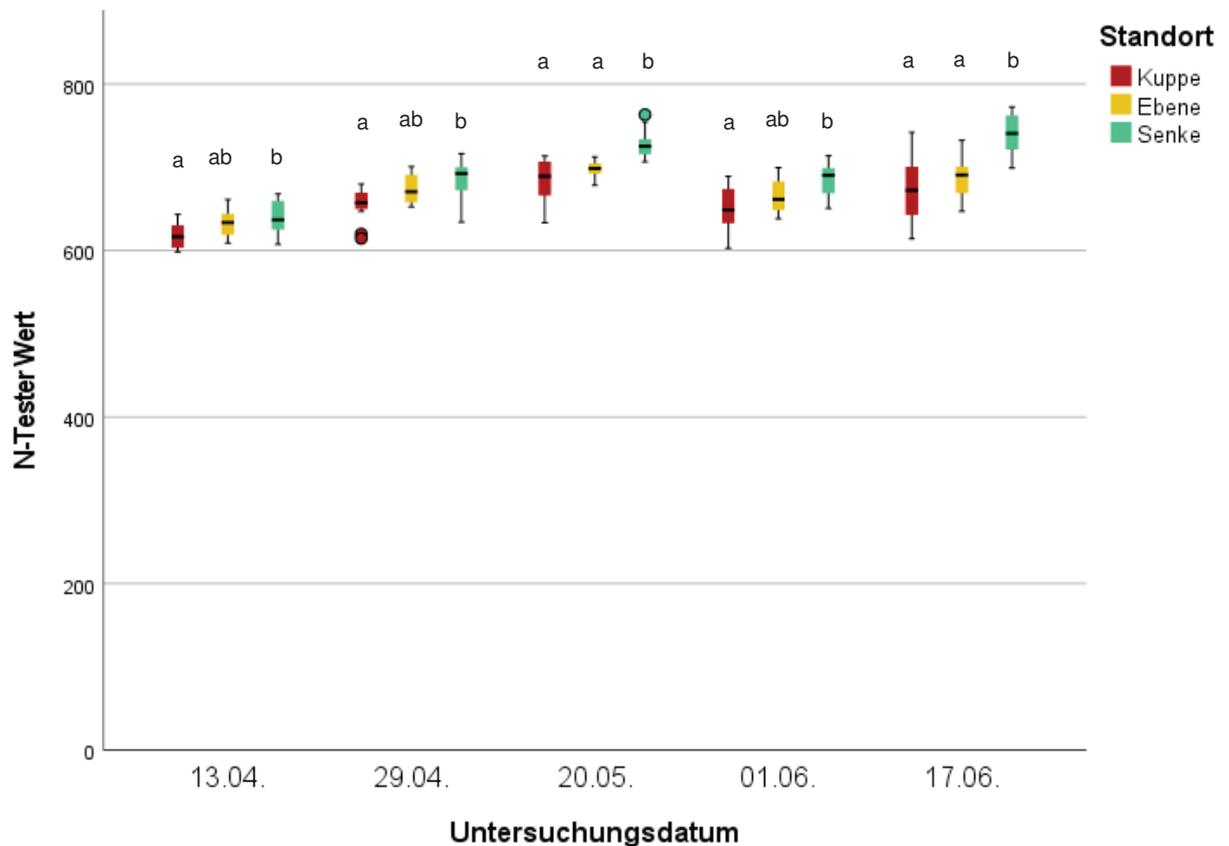


Abbildung 15: N-Tester Wert in Abhängigkeit von dem Untersuchungsdatum, Unterscheidung der Standorte Kuppe, Ebene und Senke. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Untersuchungsorte aus dem Post-hoc-Test ($\alpha=0,05$)

4.2.2 Ertragskartierung

Betrachtung der Unterschiede zwischen den Parzellen und Düngungsvarianten

Laut der Ertragskartierung lag der durchschnittliche Ertrag ($N = 3890$) bei $10,83 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Die Wiederholungen 3, 4 und 6 zeigen jeweils bei einer geringeren Düngung einen geringeren Ertrag. Der geringste Ertrag mit $9,89 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ wurde in Parzelle 3 (bü 100 %) gemessen. Der höchste Ertrag wurde mit $12,10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ in der Parzelle 10 (N_{red} 80 %) gemessen. Somit ergab sich in diesem Fall ein höherer Ertrag durch eine geringere Düngung. Dasselbe ist in der Wiederholung 1 zu beobachten. In der bü 100 % Parzelle ist der Wert mit $10,05 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ um fast $0,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ geringer als in der N_{red} Parzelle. Abbildung 16 zeigt als Säulendiagramm die vorangegangenen Informationen.

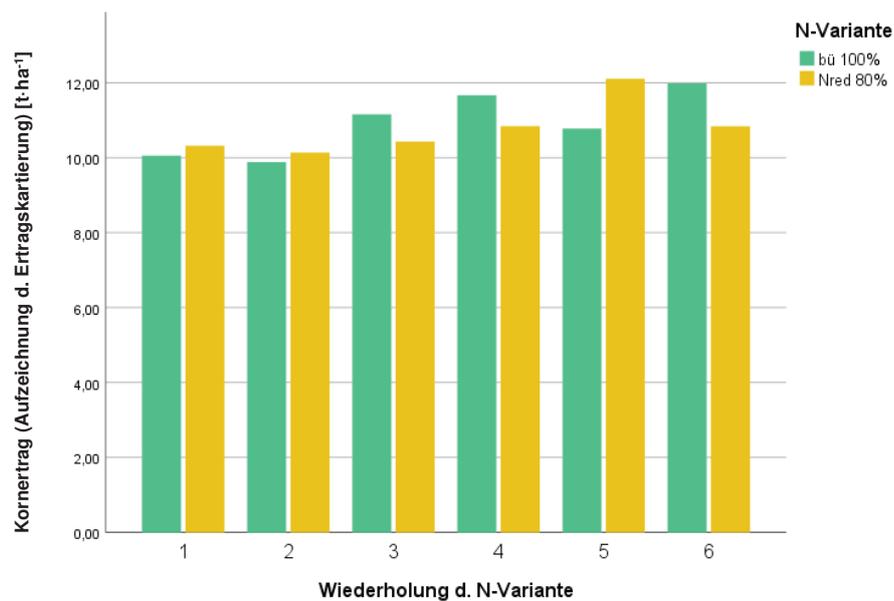


Abbildung 16: Ertrag nach Ertragskartierung des Mähreschers aus dem Kerndrusch der Parzellen, aufgeteilt in die zwei N-Varianten

Die Varianzanalyse der N-Varianten ergab, wie bereits für die gewogenen Ergebnisse in 4.1.1, keine signifikanten Unterschiede. Hingegen zeigt Abbildung 17, dass mit einer Übereinstimmung von fast 80 % die gemessenen Erträge des Kerndruschs mithilfe der Ertragskartierung abgebildet werden. Die Signifikanz der Korrelation ist geringer als 0,001. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die Kartierung relativ genau funktioniert, um Unterschiede festzustellen. Mit einer exakten Kalibrierung können sogar absolute Erträge mit hoher Genauigkeit gemessen werden.

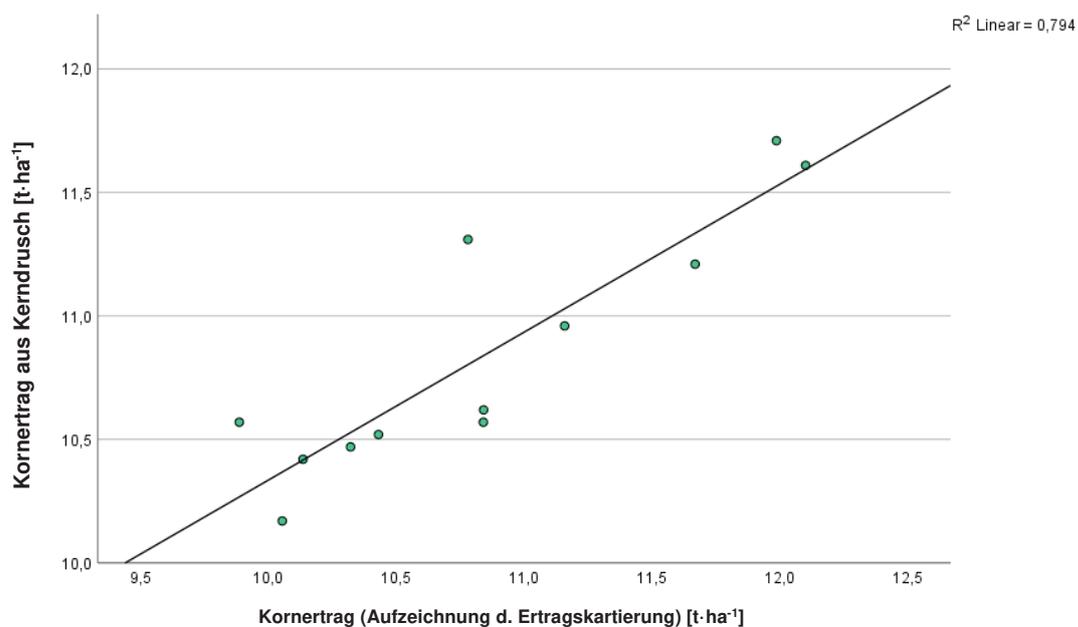


Abbildung 17: Zusammenhang der Werte aus Ertragskartierung mit den gewogenen Kornträgen aus dem Parzellen-Kerndrusch. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Betrachtung der Unterschiede zwischen den Standorten

An den Untersuchungsorten in den Parzellen wurden die jeweiligen Werte der Ertragskartierung betrachtet. Diese schwanken zwischen $8,76 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Kuppe Parzelle 1) und $13,78 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Ebene Parzelle 10). Die Berechnung des arithmetischen Mittels über die zwölf Parzellen ergibt für Kuppen $10,08 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, für Ebenen $11,04 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ und für Senken einen Ertrag von $11,76 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Eine Varianzanalyse wurde durchgeführt und ergab, dass die Standorte sich signifikant unterscheiden ($p = 0,01$). Der anschließende Post-Hoc-Test ergab, dass die Kuppe und die Ebene tendenziell unterschiedlich sind ($p = 0,078$). Der Unterschied zwischen der Ebene und der Senke ist nicht signifikant. Die Senke und die Kuppe hingegen zeigen sich als signifikant unterschiedlich ($p < 0,01$). Abbildung 18 stellt die Ergebnisse des Post-Hoc-Test dar.

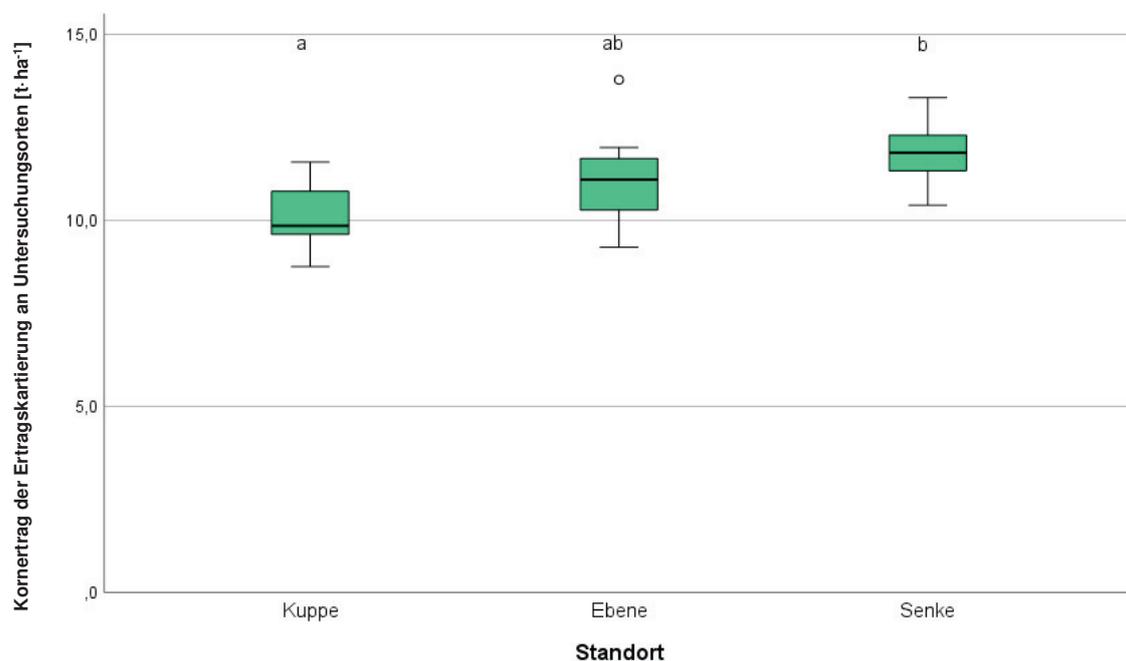


Abbildung 18: Einfluss des Standorts, aufgeteilt in Kuppe, Ebene und Senke, auf die Werte der Ertragskartierung. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede aus dem Post-Hoc-Test. ($\alpha=0,05$)

4.2.3 Zusammenhänge von N-Tester und Ertragskartierung

Die fünf Untersuchungen des N-Testers wurden mit den Ergebnissen der Ertragskartierung in Zusammenhang gesetzt und die jeweilige Korrelation berechnet. Die Termine 13.04., 29.04. und 01.06 sind hierbei nicht signifikant. Die übrigen Werte 20.05. und 17.06. korrelieren signifikant mit den Werten der Ertragskartierung und werden im Anhang unter Abbildung A 14 und Abbildung A 15 dargestellt. Trotz einer signifikanten Korrelation beschreiben die Werte des N-Testers nur 27,2 % (20.05.) bzw. 15,4 % der Varianz des Ertrags. Der größte Ausreißer ist jeweils die Ebene in Parzelle 10, welche einen Wert der Ertragskartierung von $13,78 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ hat, der N-Tester Wert in beiden Fällen sich jedoch im Mittelfeld befindet. Beobachtet wird, dass am 17.06. die N-Tester Werte der Ebene in Parzelle 10 geringer sind und wiederum die

geringsten Werte der Ertragskartierung (jeweils die Kuppe der Parzelle 1 und 10) einen höheren N-Tester-Wert aufzeigen. Das hat einen negativen Einfluss auf das R^2 in der Abbildung A 15.

4.3 Einfluss des Standorts und Zusammenhänge von Untersuchungsergebnissen

Bislang hat die N-Düngung keinen Effekt auf die Ergebnisse gehabt, mit Ausnahme von den N-Tester Werten vom 13.04., 01.06. und 17.06. sowie der N-Effizienz. Die Varianzanalyse ergab ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die im Labor analysierten Parametern TKM, Trockenmasseertrag, Halmlänge, Proteingehalt und Proteinertrag sowie der Ährendichte je m^2 . Daher wird in diesem Abschnitt der Einfluss der N-Düngung vernachlässigt und die Einflüsse der verschiedenen Standorte genauer betrachtet. Ergebnisse gibt es von den Parzellen 1-4, 7 u. 8 sowie 11 u. 12. Die Ergebnisse werden differenziert betrachtet. Ausgewählt wurden die Proben anhand der N-Tester Werte vom 17.06., welche als Prognose für die Ausprägung der Untersuchungsmerkmale angenommen wird. Die Differenzierung ist hierbei, dass die Parzellen 1 u. 2 keine erwarteten Werte beinhaltet. Hier tritt nämlich der Fall ein, dass die Kuppe höhere Werte hat als die Ebene. Die übrigen Parzellen weisen alle eine erwartete und jeweils ähnliche Verteilung der N-Tester Werte auf. Konkret haben Kuppen die geringsten Werte und Senken die höchsten. Ebenen liegen dazwischen.

4.3.1 Einfluss des Standorts auf die Ertragsparameter, Kornertrag und Qualität

Das Ergebnis der Varianzanalyse stellte heraus, dass der Standort einen hohen Einfluss auf fast alle Ertragsparameter, den Kornertrag, sowie die Qualität hat. Genauer ist nur die TKM nicht signifikant. Die entsprechenden p-Werte können Tabelle 3 entnommen werden. Insgesamt bestätigt sich die Annahme nicht, dass die differenzierte Betrachtung die Aussage der p-Werte verändert.

Tabelle 3: Ergebnisse der Varianzanalyse des Einflusses vom Standort auf die Ergebnisse der Schnittprobenuntersuchung. Der p-Wert kennzeichnet signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Untersuchter Wert der Schnittproben	p-Werte	
	Alle Prz.	Ohne Prz. 1&2
Ährendichte [$\text{Ä}\cdot\text{m}^{-2}$]	< 0,001	< 0,001
Halmlänge [mm]	< 0,001	0,009
TKM [g]	0,551	0,758
Trockenmasseertrag Schnittprobe [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	< 0,001	< 0,001
Proteingehalt Untersuchungsort [%]	< 0,001	< 0,001
Proteinertrag Untersuchungsort [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	< 0,001	< 0,001

Der anschließende Post-Hoc-Test gibt Auskunft über die Unterschiede zwischen den Standorten.

Ährendichte

Angefangen wird mit der Bestandesdichte. Diese zeigt signifikante Unterschiede zwischen der Senke und den anderen beiden Standorten Kuppe ($p < 0,001$) und Ebene ($p = 0,005$). Im Mittel über die Untersuchungsorte ist die Bestandesdichte $583 \text{ \AA} \cdot \text{m}^{-2}$. Die geringste Bestandesdichte ist mit $323 \text{ \AA} \cdot \text{m}^{-2}$ die Kuppe in Parzelle 1. Die Senke in Parzelle 12 hat mit $876 \text{ \AA} \cdot \text{m}^{-2}$ die höchste Ährendichte. Hinsichtlich der Senken stellt die Parzelle 8 einen größeren Ausreißer nach Unten dar. Im Anhang unter der Abbildung A 16 sind die Ergebnisse einsehbar. Die differenzierte Betrachtung (ohne Prz. 1 u. 2) wird in der darauffolgenden Abbildung A 17 dargestellt. Die Aussage hingegen ist dieselbe. Die p-Werte unterscheiden sich zwischen Kuppe bzw. Ebene und Senke nur leicht ($p = 0,033$ bzw. $< 0,001$).

Halmlänge

Die Halmlänge befindet sich im Mittel bei ca. 452 mm. Die geringsten Halmlängen wurden auf den Kuppen gemessen. Der geringste Wert liegt hier bei 373,5 mm. In den Senken hingegen wuchsen mit bis zu 537 mm die längsten Halme. Signifikante Unterschiede werden erneut zwischen der Senke und den anderen beiden Standorten ermittelt, wie es in Abbildung A 18 zu sehen ist. Die Kuppe und die Senke haben einen p-Wert $< 0,001$, die Ebene und Senke hingegen 0,041. Tendenziell unterschiedlich zeigen sich die Ebene und die Kuppe mit einem p-Wert von 0,65. Abbildung A 19 zeigt die differenzierte Betrachtung ohne die Parzellen 1 u. 2. Es ist ein geringfügiger Unterschied zur vorherigen Abbildung sichtbar: Ebene und Senke unterscheiden sich nicht signifikant.

Trockenmasseertrag

Der Post-Hoc-Test ergab, dass die Senke signifikant unterschiedlich gegenüber Kuppe ($p < 0,001$) und Ebene ($p = 0,011$) ist. Hingegen unterscheiden sich die Kuppe und die Ebene nicht. Die Kuppe zeigt die größten Schwankungen hinsichtlich des Kornertrags und beinhaltet mit $591 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ den niedrigsten Ertrag. Der höchste Ertrag wurde in den Senken gemessen und befindet sich im Maximum bei $1272,7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (Parzelle 12). Ebene und Senke zeigen jeweils einen Ausreißer nach oben bzw. unten. Genauer fällt die Senke in Parzelle 8 stark ab und von allen Ebenen zeigt die Ebene in Parzelle 11 den höchsten Ertrag. Jeweils weichen die Erträge nicht von der erwarteten Reihenfolge ab, dass die Senke den höchsten Ertrag hat und die Ebene den zweithöchsten. Die Parzelle 2 hingegen weicht von der Erwartung ab, indem dort die Kuppe deutlich mehr Ertrag brachte als die Ebene und beinahe auf dem Niveau der Senke lag (Abbildung 19).

Werden die Parzellen 1 u. 2 ausgeklammert, ändert sich das Ergebnis trotz der Abweichungen in Parzelle 2 nicht (Abbildung A 20).

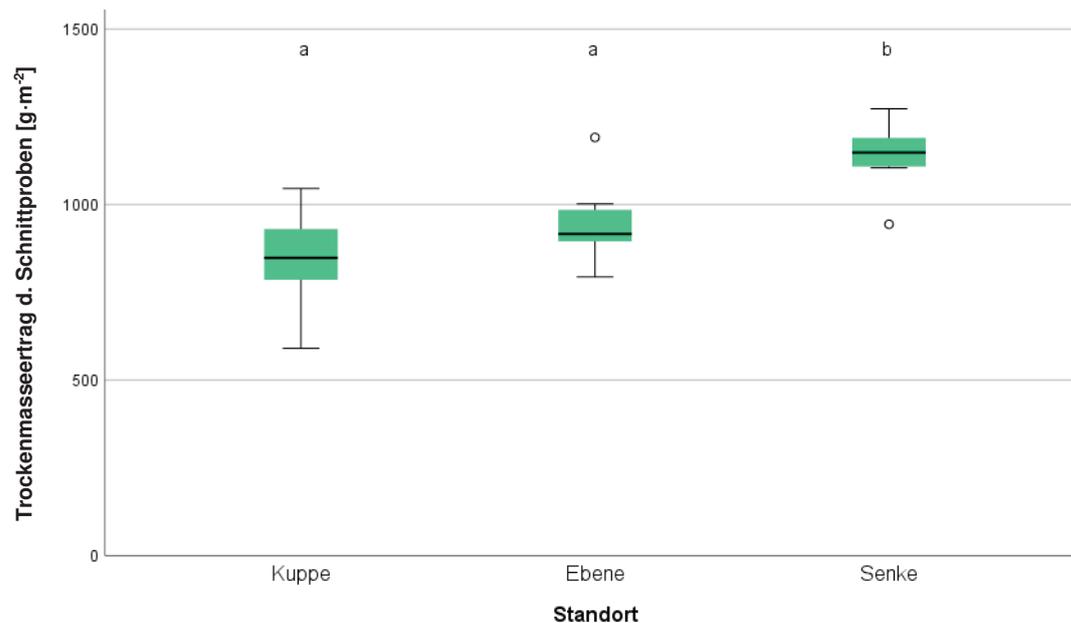


Abbildung 19: Einfluss des Standorts auf den Trockenmasseertrag der Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)

Proteingehalt

Alle Standorte unterscheiden sich hinsichtlich des Proteingehalts signifikant. Die Kuppe zur Ebene mit einem p-Wert von 0,045, die Kuppe zur Senke mit einem p-Wert $< 0,001$, ebenso wie die Ebene zur Senke mit einem p-Wert $< 0,001$. Durchschnittlich befindet sich der Proteingehalt bei 10,3 %. Die Proteinwerte der Ebene liegen leicht unter diesem Durchschnitt. Der geringste Wert wurde mit 8,6 % auf der Kuppe in Parzelle 12 gemessen. Der höchste Wert stammt aus der Senke der Parzelle 7 mit 12,2 % (Abbildung 20).

Ohne die Parzellen 1 u. 2 ergeben sich folgende Ergebnisse: Die Ebenen haben einen höheren Durchschnitt als die Kuppen, sind aber nicht signifikant unterschiedlich zu diesen. Die Senken hingegen zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Ebenen ($p < 0,001$) sowie zu den Kuppen ($p < 0,001$). Der Proteingehalt schwankt zwischen 8,86 % auf der Kuppe in Parzelle 12 und 12,01 % in der Senke von Parzelle 7. Die Kuppen haben mit 9,37 % ebenfalls im Durchschnitt einen deutlich geringeren Proteingehalt als die Senken mit 11,48 %. Im Mittel befindet sich der Proteingehalt bei 10,30 % (Abbildung 21).

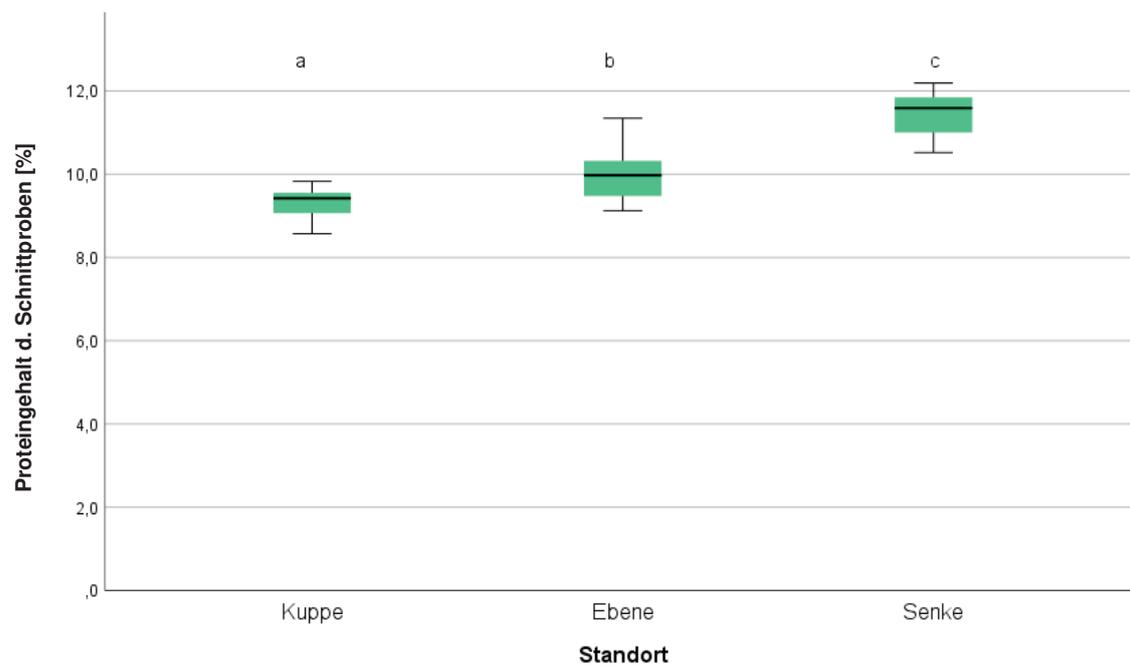


Abbildung 20: Einfluss des Standorts auf den Proteingehalt der Untersuchungsorte. Betrachtung aller Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)

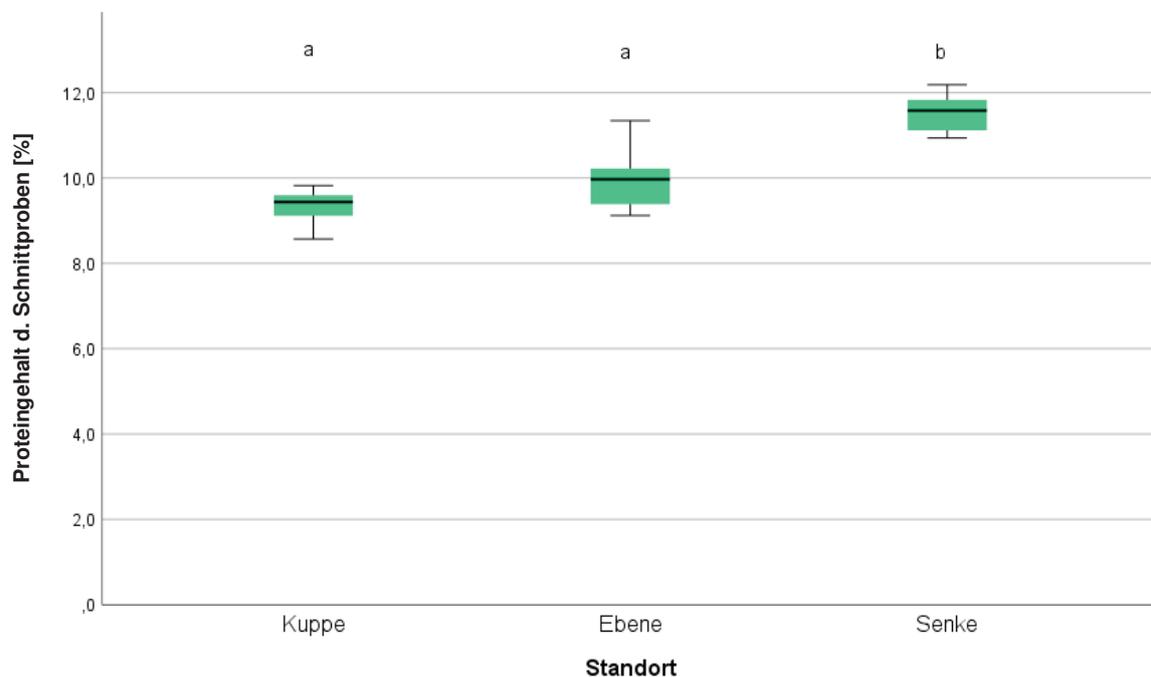


Abbildung 21: Einfluss des Standorts auf den Proteingehalt der Untersuchungsorte. Betrachtung der Schnittproben ohne Parzelle 1 u. 2. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)

Die Ergebnisse des Proteinetrags spiegeln die beiden vorangegangenen Ergebnisse des Trockenmasseertrags und des Proteingehaltes wider. Die Kuppe und die Ebene unterscheiden sich nicht signifikant. Hingegen ist die Senke signifikant unterschiedlich gegenüber der Ebene ($p = 0,005$) und der Kuppe ($p < 0,001$). Im Durchschnitt ist der Proteinetrug $101,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ und schwankt zwischen Kuppe ($80,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) und Senke ($132,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) um mehr als 50 %. Der

Proteinertrag ist in der Senke (Parzelle 12) mit $151,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ca. drei Mal so hoch wie auf der Kuppe (Parzelle 1) mit $53,7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Die Ebene in Parzelle 11 stellt mit $134,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ einen größeren Ausreißer nach oben dar (Abbildung 22).

Im Anhang (Abbildung A 21) ist die differenzierte Betrachtung ohne Parzelle 1 u. 2 einzusehen. Es gibt allerdings keine Unterschiede zwischen den Aussagen.

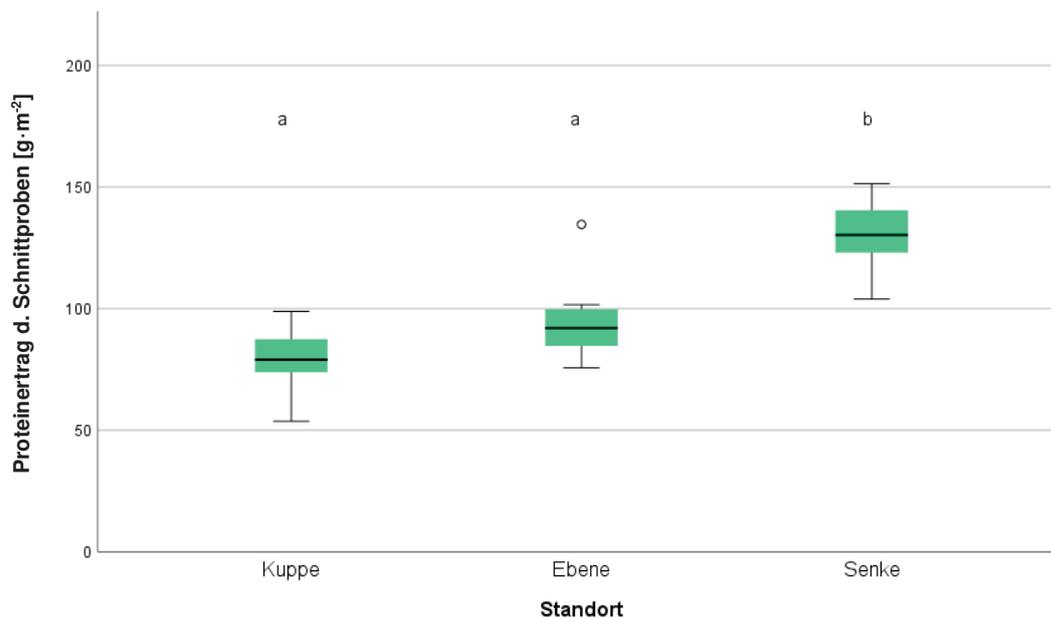


Abbildung 22: Einfluss des Standorts auf den Proteinertrag der Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)

4.3.2 Zusammenhang von Ertrag und Ertragsparametern

Da die Schnittproben jeweils an den Untersuchungsorten genommen wurden und jeweils signifikante Unterschiede herausgestellt wurden, ist es im Folgenden möglich, die Zusammenhänge darzustellen. Die jeweiligen Schwankungen gehen daher von dem Standort aus. Insgesamt gibt es hohe Korrelationen und vor allem Signifikanzen zwischen den Ertragsparametern aus der Laboranalyse. Die Tabelle A 2 im Anhang gibt einen Überblick über die Korrelationsanalyse. Die Ausnahme bildet hierbei die TKM. Diese korreliert hinsichtlich Trockenmasseertrag und Proteingehalt nicht signifikant. Insgesamt gibt es auch keine wesentlichen Unterschiede bei der Differenzierung der Ergebnisse zwischen ausschließlich erwarteten und dem Einfluss der unerwarteten Zusammenhänge (Ausschluss der Proben aus Parzelle 1 u. 2). Da es keine Unterschiede der Aussagen gibt, werden die Darstellungen jeweils anhand der größeren Zusammenhänge orientiert. Generell gilt die Aussage aber für beide Szenarien. Die höchste Korrelation geht von der Ährendichte aus. Diese gibt sogar gleichermaßen Auskunft über die Ertragschwankungen und Schwankungen des Proteingehalts Auskunft. Ähnlich, jedoch weniger deutlich, gilt das für die Halmlänge. Generell geben bereits diese Ergebnisse Auskunft darüber, dass ein großer Zusammenhang zwischen

dem Ertrag und dem Proteingehalt besteht. Nach der Ährendichte gibt es diesbezüglich die höchste Korrelation.

Ährendichte

Die Ährendichte zeigt einen signifikanten Zusammenhang mit dem Trockenmasseertrag auf. Die Schwankungen der Ährendichte beschreiben fast 91 % der Ertragsschwankungen. Sichtbar wird auch der Einfluss der Standorte, welcher ebenfalls signifikant ist. Die Kuppen zeigen die geringsten Dichten, wohingegen die Senken die meisten Ähren gezählt werden (Abbildung 23).

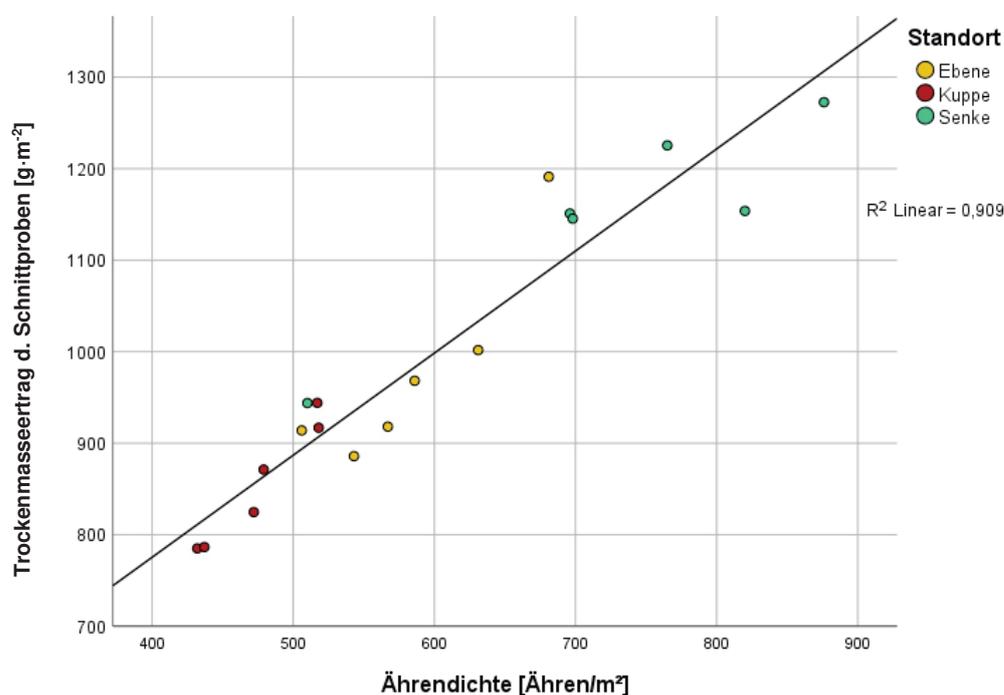


Abbildung 23: Zusammenhang von der ausgezählten Ährendichte und des Trockenmasseertrags der Untersuchungsorte kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Halmlänge

Die Halmlänge ist mit dem Ertrag positiv korreliert bei einem p-Wert $< 0,001$. Außerdem beschreibt die Halmlänge durch ein Bestimmtheitsmaß von 0,766 mehr als drei Viertel der Ertragsschwankungen. Die jeweiligen Ausreißer des Ertrags in der Ebene (Parzelle 11) und der Senke (Parzelle 8) werden durch die Regressionsfunktion relativ gut beschrieben, da sie nah an der Geraden liegen, wie es in Abbildung A 22 gezeigt wird.

4.3.3 Zusammenhang von Ertrag und Qualität

Der Proteingehalt korreliert positiv mit dem Trockenmasseertrag an den Untersuchungsorten. Darüber hinaus ist die Korrelation signifikant ($p < 0,001$). Die Werte der Kuppe scheinen jedoch einen anderen Zusammenhang aufzuweisen. Durch die hohen Proteingehalte in den Senken entsteht ein sogenannter Hebeleffekt, der die Korrelation beeinflusst. Genaueres wird

im weiteren Verlauf der Versuchsanalyse betrachtet. Durch das hohe R^2 können mit dem Kornertrag 81,3 % der Schwankungen des Proteingehalts beschrieben werden (Abbildung 24).

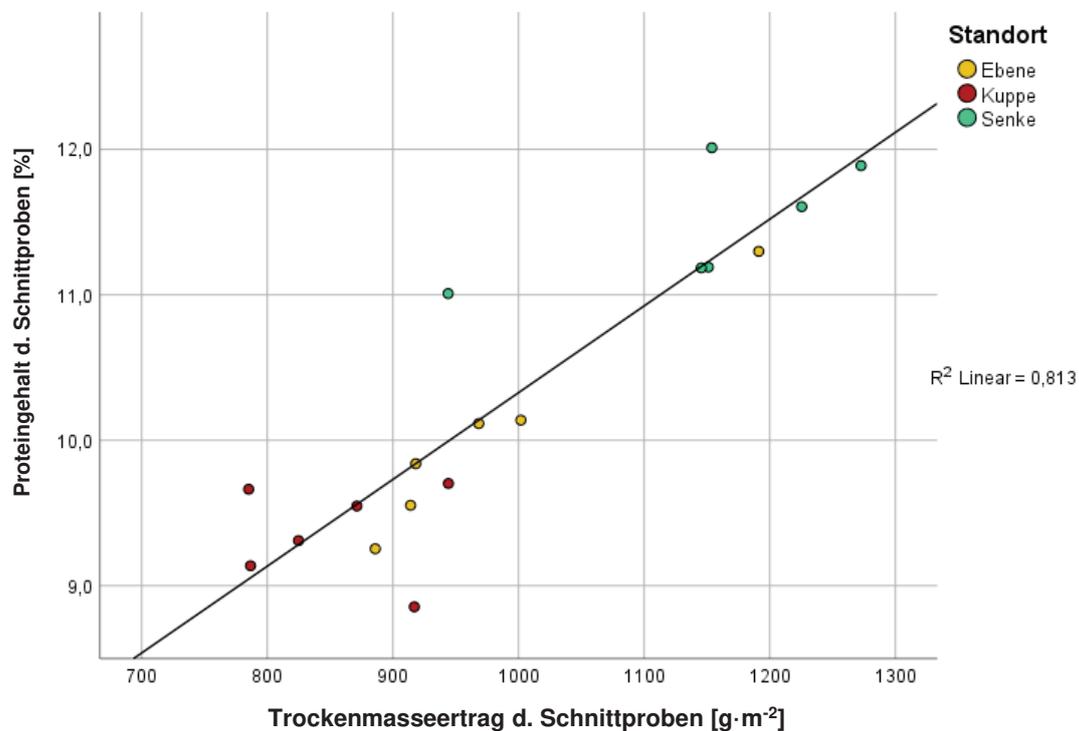


Abbildung 24: Zusammenhang des feuchtebereinigten Kornertrags der Untersuchungsorte und des Proteingehalts kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Die Ährendichte korreliert, wie in Abbildung 25 dargestellt, signifikant mit dem Proteingehalt ($p < 0,001$). Durch das Bestimmtheitsmaß von 0,781 werden mehr als drei Viertel der Schwankungen des Proteingehalts durch die Ährendichte beschrieben. Die Parzelle 8 zeigt hinsichtlich der Senken einen stärkeren Ausreißer in der Ährendichte, allerdings bleibt das Niveau des Proteingehalts mit $>11\%$ vergleichsweise hoch. Der Ausreißer der Ährendichte in der Ebene (Parzelle 11) zeigt auch den höchsten Proteingehalt aller Ebenen. Bei den Kuppen zeigt sich ein gegenteiliger Effekt: Die höchste Ährendichte der Kuppen weist den niedrigsten Proteingehalt auf und umgekehrt.

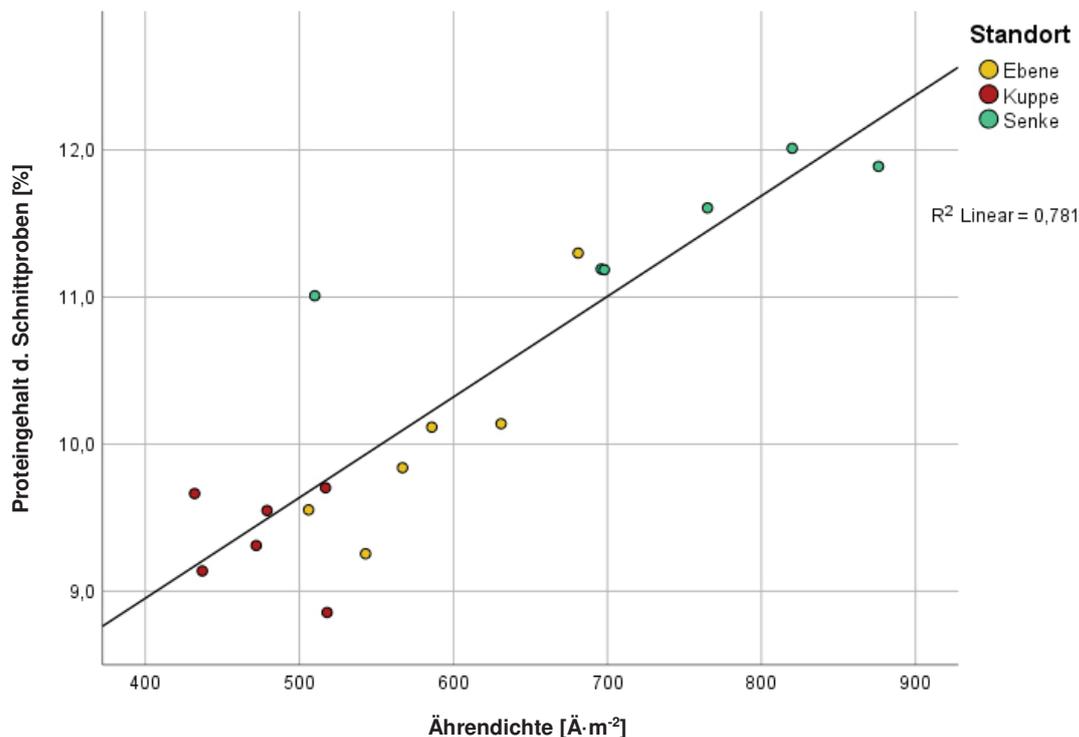


Abbildung 25: Zusammenhang des Proteingehalts und der Ährendichte der Untersuchungsorte, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

4.3.4 Zusammenhang der N-Tester Werte sowie NDVI und Ertrag bzw. Proteingehalt

An den Untersuchungsorten wurde neben dem Ertrag der Schnittprobe auch mit dem N-Tester an fünf verschiedenen Tagen gemessen. Außerdem wurde der NDVI mithilfe der Copernicus Satellitenbilder ermittelt und mit den Untersuchungsorten verschnitten. Im Folgenden wird die Korrelationsanalyse dieser Werte vorgestellt. Betrachtet wird neben dem Kornertrag ebenfalls der Proteingehalt. Obwohl bereits eine hohe Korrelation beider Werte festgestellt wurde, wird in diesem Abschnitt ermittelt, ob unterschiedliche Zusammenhänge bestehen, bezogen auf NDVI und N-Tester Werte. In Tabelle A 3 werden diese Zusammenhänge im Überblick aufgelistet. Erneut wird differenziert zwischen allen Proben und dem Ausschluss von Parzelle 1 u. 2.

Hinsichtlich der N-Tester Werte steigt der Zusammenhang mit Ertrag und Proteingehalt im Laufe der Vegetation. Mit Ausnahme des Trockenmasseertrag und der N-Tester Werte vom 13.04. zeigt sich zwischen allen Werten ein signifikanter Zusammenhang. Die p-Werte erscheinen hierbei umso niedriger, je weiter die Vegetation vorangeschritten ist. So hat der Trockenmasseertrag (ohne Parzelle 1 u. 2) vom 13.04. einen p-Wert von 0,044, wohingegen der 20.05. einen p-Wert von 0,003 aufweist. Generell zeigt der Proteingehalt eine höhere Korrelation als der Trockenmasseertrag mit Ausnahme der Werte vom 29.04. Ein wesentlicher

Unterschied zwischen allen Proben und dem Ausschluss der Parzellen 1 u. 2 lässt sich nicht ableiten.

Der NDVI wurde ebenso an fünf Terminen ermittelt. Diese Termine waren abhängig von der Bewölkung, da ein wolkenfreier Himmel zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahme notwendig ist. In dem Zeitraum vom 19.04. und 29.05. waren 40 Tage in Folge keine Daten verfügbar sowie 30 Tage von Ende Juni bis Ende Juli. Der überwiegende Teil der Korrelationen zeigt sich als signifikant. Ausnahmen bilden die ersten drei Termine und dort speziell die Daten ohne die Parzellen 1 u. 2. P-Werte befinden sich hier zwischen 0,053 (T) und 0,177 (n. s.). Generell zeigt die Betrachtung aller Proben eine größere Korrelation als der Ausschluss der „nicht erwarteten“ Ergebnisse in Parzelle 1 u. 2. Im direkten Vergleich ist das ausnahmslos zu beobachten. Außerdem scheinen die NDVI-Werte einen größeren Zusammenhang mit den Proteingehalten als mit dem Ertrag aufzuzeigen. Die Korrelationen hinsichtlich des Proteingehalts sind im Vergleich ohne Ausnahme höher. Ähnlich wie bei den N-Tester Werten sinken die p-Werte im Laufe der Vegetation. Die mit Abstand höchste Korrelation hinsichtlich der Proteingehalte zeigt sich am 23.07.

Die grafische Darstellung der Zusammenhänge erfolgte aufgrund der geringen Abweichung bei dem Ausschluss der Wiederholung 1 ausschließlich anhand aller Schnittproben bzw. Untersuchungsorten.

In Abbildung A 23 zeigt sich, dass eine zwar signifikante aber eher niedrige Korrelation noch nicht viel Aussagekraft hat. Das Bestimmtheitsmaß zeigt, dass durch den N-Tester vom 13.04. etwa 25 % der Schwankungen des Proteingehalts erklärt werden. Durch die Kategorisierung ist zu erkennen, dass es Senken gibt, welche geringe N-Tester Werte aufweisen, jedoch einen vergleichsweise hohen Proteingehalt haben. Das Gegenteil gilt für die Kuppen.

Die Abbildung 26 zeigt den größten Zusammenhang der N-Tester Werte mit dem Proteingehalt. Wie bereits thematisiert sind die N-Tester Werte vom 17.06. gleichzeitig die letzten gemessenen in der Versuchsdurchführung. Die N-Düngung war bereits seit über einem Monat abgeschlossen. Wie bei den vorangegangenen Streudiagrammen sind die Standorte, insbesondere Kuppe und Senke, voneinander abgegrenzt. Der geringste Wert bezüglich N-Tester und Proteingehalt wurde auf der Kuppe ermittelt, der jeweils höchste in der Senke.

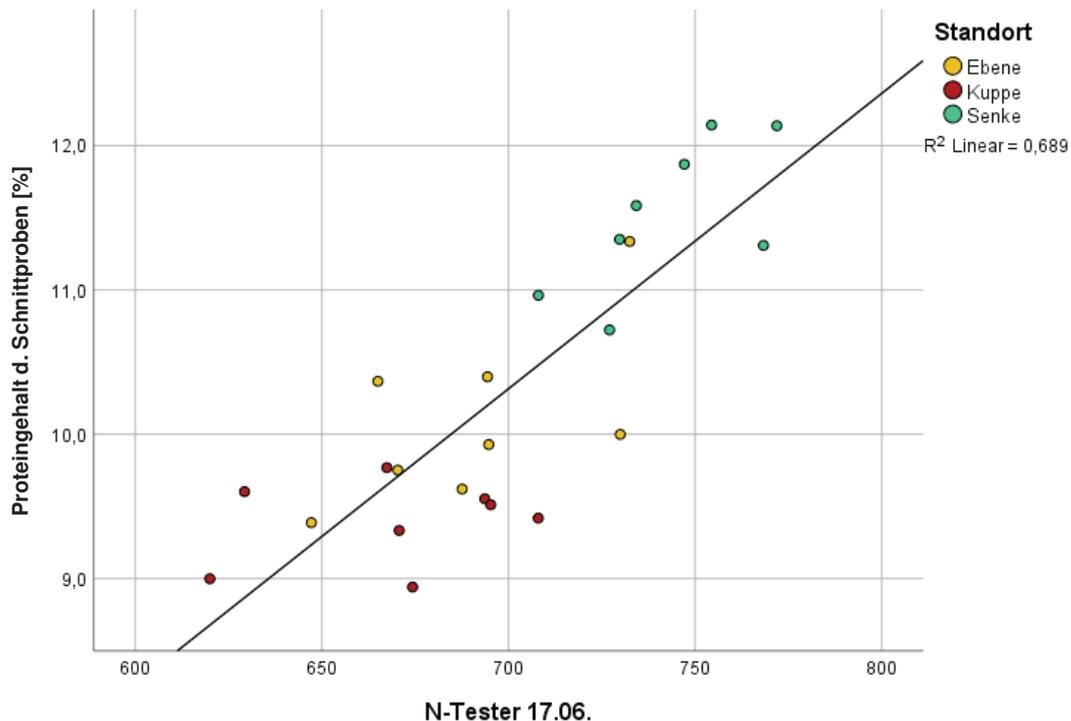


Abbildung 26: Zusammenhang des N-Tester Werts vom 17.06. und dem Proteingehalt der Untersuchungsorte, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Der Zusammenhang des NDVI vom 29.05. mit den Proteingehalten (Abbildung A 24) ist erheblich geringer als die Werte des N-Testers an einem vergleichbaren Datum. Dennoch handelt es sich um eine signifikante Korrelation. Das Bestimmtheitsmaß zeigt, dass mehr als 30 % der Schwankungen des Proteingehalts mit dem NDVI beschrieben werden können. Generell zeigt der NDVI hinsichtlich des Standortes deutliche Überschneidungen zwischen Kuppe und Senke. Die NDVI Werte schwanken zwischen knapp weniger als 0,8 und ca. 0,91. Insgesamt sind die Schwankungen des NDVI niedrig.

Der letzte ermittelte NDVI vor der Ernte – am 23.07. – zeigt deutlich größere Zusammenhänge. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,782 können mehr als drei Viertel der Unterschiede des Proteingehalts erklärt werden. Einen zeitlich vergleichbaren Wert des N-Testers gibt es nicht. Generell lässt sich jedoch ein Hebeleffekt feststellen. Die Senke weist deutlich höhere Proteingehalte auf und zeigt in diesem Zeitraum ebenfalls einen deutlich höheren NDVI. Im Vergleich mit den NDVI-Werten vom 29.05. fällt auf, dass es sich um eine deutlich geringere Skaleneinteilung handelt. Das Niveau vom NDVI ist insgesamt deutlich niedriger. Die Schwankungen des NDVI sind in diesem Fall erheblich stärker als am 29.05. Mit dem bloßen Auge konnten in dieser Zeit Unterschiede festgestellt werden, wie die Luftaufnahmen in Abbildung A 25 und Abbildung A 26 zeigen. Was dort sichtbar wird, ist eine heterogene Reifung des Bestandes. Besonders die Senken zeigen sich hierbei sehr zeitverzögert bzw. grüner, was anhand der Unterschiedlichen NDVI Werte ebenfalls erfasst wird.

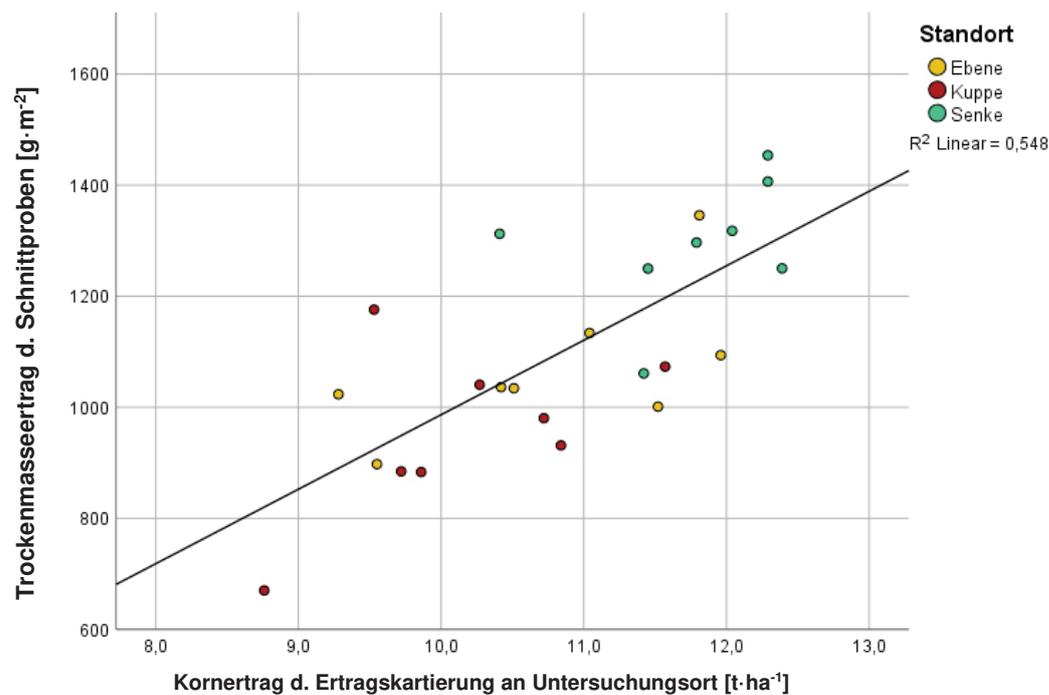


Abbildung 28: Zusammenhang von dem interpolierten Wert der Ertragskartierung in dem gewogenen Kornertrag bei Differenzierung der Standorte. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

4.4 Einfluss der Düngung auf einzelne Standorte und Zusammenhänge von Untersuchungsergebnissen auf einzelnen Standorten

Im vorherigen Abschnitt wurde festgestellt, dass es signifikante Unterschiede zwischen den Standorten gibt, jedoch keine Unterschiede zwischen den Düngevarianten. Somit wurden die Standorte der zwei Düngevarianten gleichgesetzt und auf Unterschiede sowie auf Zusammenhänge von u.a. Ertragsparametern und Ertrag untersucht. Bislang wurde angenommen, dass die Einteilung der Standorte nach Kuppe, Senke und Ebene allgemein gültig ist und die jeweiligen Standorte sich gleich verhalten. Zur Prüfung dieser Annahme ist erneut eine Varianzanalyse durchgeführt worden, in der untersucht wird, ob die Untersuchungsorte unterschiedlich auf die Düngevarianten reagieren. Tabelle 4 zeigt die Übersicht der Varianzanalyse. Es wird deutlich, dass die Düngung hinsichtlich der Ertragskomponenten keinen Einfluss auf die jeweiligen Standorte hat und somit gleiche Standorte mit unterschiedlicher Düngung trotzdem ertragsbezogen gleich sind. Anders zeigt sich das bei dem Proteingehalt. Hier zeigen sich Unterschiede bei gleichen Standorten. Genauer wird im Folgenden beschrieben und dargestellt.

Tabelle 4: Übersicht der p-Werte aus der Varianzanalyse für Einfluss der N-Düngung auf die Standorte Kuppe, Ebene und Senke. Ergebnisse Differenziert nach dem gesamten Probenumfang und dem vernachlässigen von Parzelle 1 u. 2. Fettgedruckte p-Werte zeigen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

	Alle Proben			Ohne Parzelle 1 u. 2		
	Kuppe	Ebene	Senke	Kuppe	Ebene	Senke
Halmlänge [mm]	0,900	0,917	0,523	0,975	0,954	0,241
Ährendichte [$\text{Ä}\cdot\text{m}^{-2}$]	0,226	0,354	0,616	0,904	0,372	0,588
Trockenmasseertrag [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	Schnittprobe					
	0,240	0,268	0,562	0,915	0,369	0,600
Proteingehalt Untersuchungsort [%]	0,126	0,001	0,642	0,010	0,012	0,165
Proteinertrag Untersuchungsort [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	0,371	0,184	0,789	0,688	0,308	0,572

4.4.1 Ertrag

Eine reduzierte N-Düngung wirkt sich an den einzelnen Standorten nicht signifikant auf den Ertrag aus. Das Ergebnis ändert sich auch nicht, wenn die Parzellen 1 u. 2 vernachlässigt werden. Somit wird die Aussage aus Abbildung A 10 ebenfalls für die Unterscheidung der Standorte gültig. Dennoch zeigt sich, dass die Erträge trotz einer höheren Düngung auf der Kuppe deutlich geringer ausfallen können. Ebene und Senke zeigen eher das Gegenteil. Die geringsten Erträge sind bei der reduzierten Düngung zu beobachten (Abbildung 29).

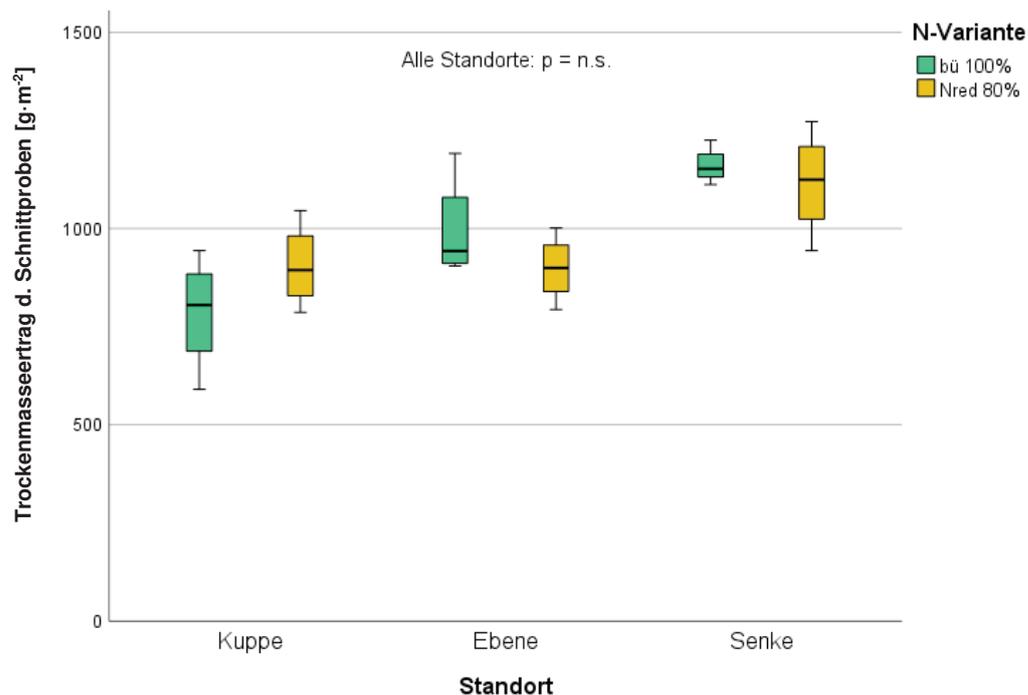


Abbildung 29: Einfluss der einer Reduzierten N-Düngung auf die Trockenmasseerträge an einzelnen Standorten. Der p-Wert zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den N-Varianten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Da zwischen den Düngevarianten keine ertraglichen Unterschiede festgestellt wurden, wird nun geprüft, ob sich die Unterschiede zwischen den Standorten ändern, wenn die N-Variante berücksichtigt wird. In Tabelle 5 wird die Übersicht über den Post-Hoc-Test zu den bedeutendsten Ertragskomponenten und dem Trockenmasseertrag abgebildet. Es stellt sich heraus, dass eine Reduzierung der N-Düngung zum Teil Einfluss auf die Unterschiede der Standorte hat. Außerdem zeigt sich, dass die Vernachlässigung der Parzellen 1 u. 2 die Ergebnisse nicht verbessert, sondern in diesem Fall eher verschlechtert. Daher werden in den Darstellungen generell alle Proben berücksichtigt und abgebildet.

Tabelle 5: Übersicht der p-Werte aus dem Post-Hoc-Test der Unterschiede zwischen den Standorten bezogen auf den Ertrag, unterschieden nach N-Variante und differenziert zwischen allen Proben und dem Ausschluss von Parzelle 1 u. 2. Fett gedruckte Werte zeigen signifikante und kursiv gedruckte tendenzielle Unterschiede zwischen den Standorten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

		bü 100 %		N _{red} 80 %		
		Alle Proben	Ohne Prz. 1 u. 2	Alle Proben	Ohne Prz. 1 u. 2	
Ährendichte [$\text{Ä}\cdot\text{m}^{-2}$]	Ebene	Kuppe	<i>0,059</i>	<i>0,071</i>	1,000	1,000
		Senke	0,045	<i>0,052</i>	0,157	0,598
	Kuppe Senke	0,001	0,002	0,107	0,178	
Halmlänge [mm]	Ebene	Kuppe	0,501	0,905	0,284	0,483
		Senke	0,235	0,568	0,457	1,000
	Kuppe Senke	0,020	0,120	0,023	0,177	
Trockenmasseertrag Schnittprobe [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	Ebene	Kuppe	<i>0,099</i>	0,226	1,000	1,000
		Senke	0,236	0,339	<i>0,067</i>	0,241
	Kuppe Senke	0,004	0,021	<i>0,076</i>	<i>0,076</i>	

Die Halmlänge zeigt sich im Vergleich der Düngevarianten signifikant unterschiedlich zwischen Kuppe und Senke ($p = 0,020$). Anders als in Abbildung A 18 unterscheidet sich die Ebene zu Beidem jedoch nicht signifikant. Auffällig ist die unterschiedliche Streuung der Werte, vor allem in Bezug auf die beiden Betrachtungen der Ebene. Die Aussage zwischen den beiden Düngevarianten bleibt allerdings gleich.

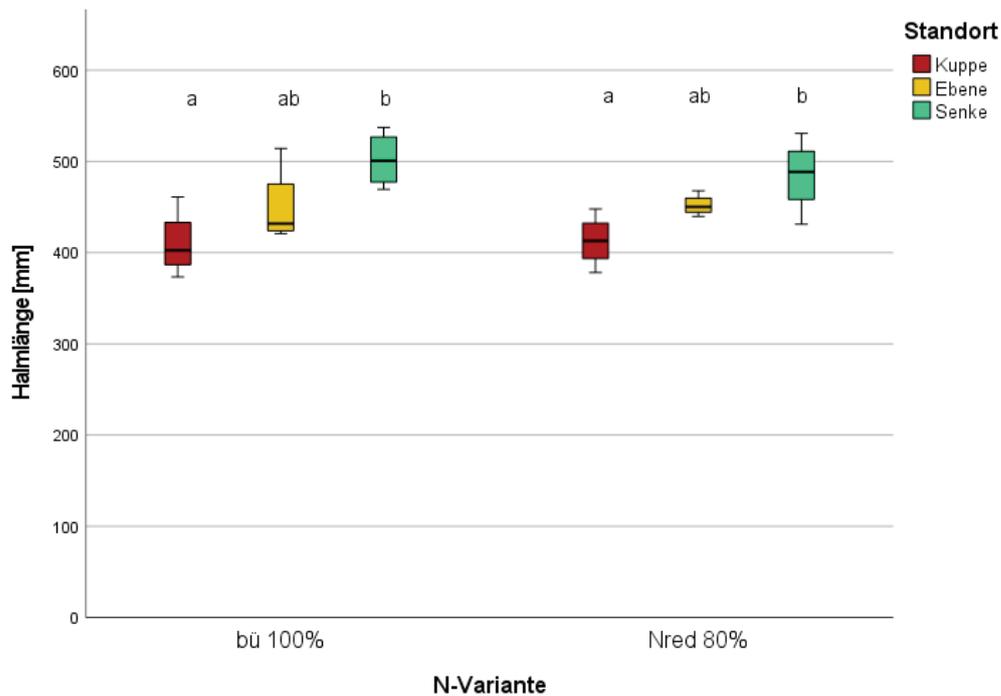


Abbildung 30: Einfluss des Standorts auf die Halmlänge, unterschieden nach den Düngevarianten bü 100% und N_{red} 80 %. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Halmlängen bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Die Ährendichte zeigt Unterschiede zwischen den N-Varianten. Während bei der bü 100 % die Senke einen Unterschied zu Kuppe zeigt ($p = 0,020$), zeigen sich in der N_{red} 80 % keine Unterschiede zwischen allen Standorten. Das ist in dem Fall auf die große Streuung der Senke zurückzuführen. Abbildung 31 zeigt dennoch deutlich, dass die Senken von N_{red} 80 % auch in der Spitze fast doppelt so viele $\ddot{A} \cdot m^{-2}$ aufzeigt als der Median der Kuppen aus derselben N-Variante.

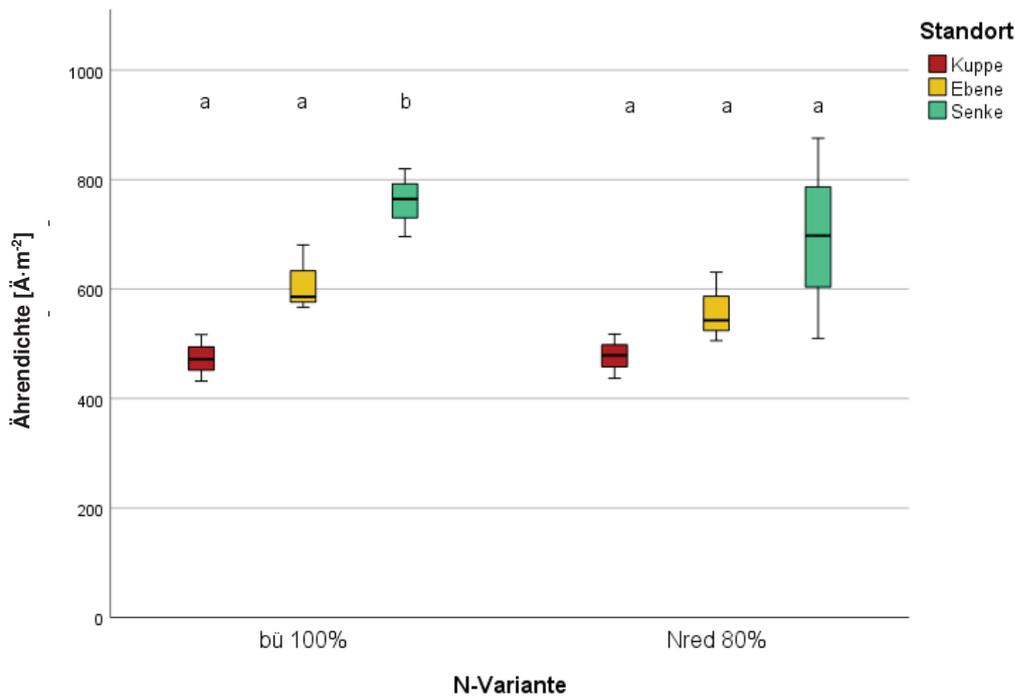


Abbildung 31: Einfluss des Standorts auf die Ährendichte, unterschieden nach den Düngevarianten. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der Ährendichte bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Ähnlich zu der Ährendichte zeigen sich auch die Ergebnisse des Trockenmasseertrags, bei Unterscheidung der N-Varianten. Die N_{red} 80 %-Variante zeigt keine signifikanten Unterschiede. Allerdings sind die Unterschiede zwischen Kuppe und Senke sowie Ebene und Senke tendenziell ($p = 0,076$ bzw. $0,067$). Hinsichtlich der bü 100 %-Variante zeigen sich deutlichere Unterschiede. Senke und Kuppe sind signifikant unterschiedlich ($p = 0,004$), wohingegen die Unterschiede von Kuppe und Ebene tendenziell sind ($p = 0,099$). Werden die Parzellen 1 u. 2 vernachlässigt, hebt sich dieser tendenzielle Unterschied auf, die Aussage bleibt jedoch gleich.

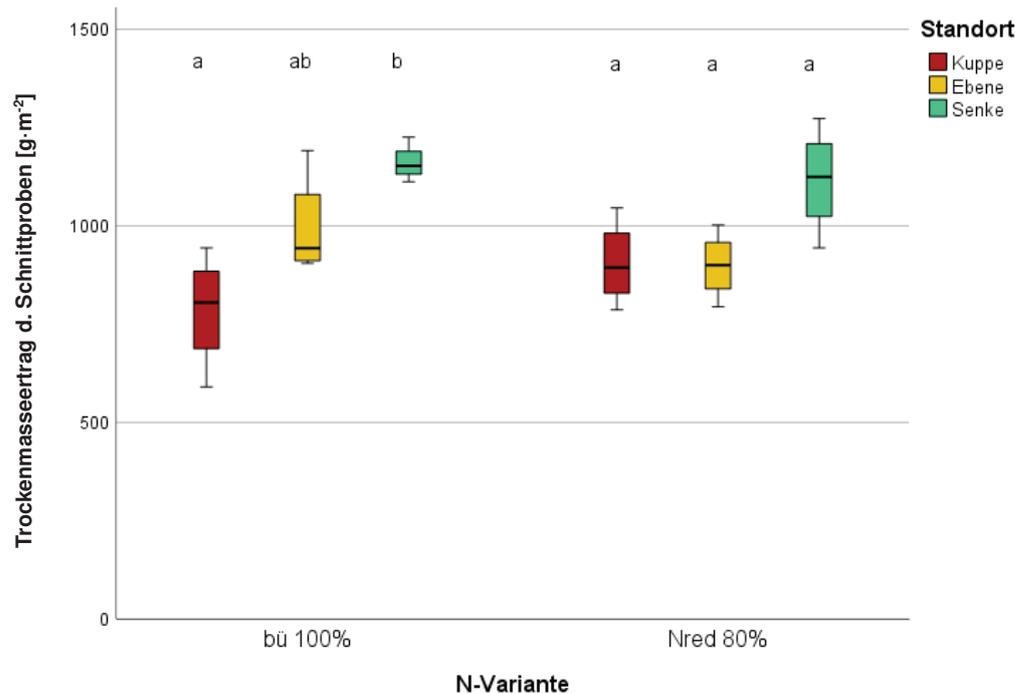


Abbildung 32: Einfluss des Standorts auf den Trockenmasseertrag der Untersuchungsorte, unterteilt nach N-Variante. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten einer N-Variante bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Insgesamt variieren die Unterschiede zwischen den Standorten im Vergleich der Düngevarianten. Bei den betrachteten Werten sind es vor allem die Ährendichte und der Trockenmasseertrag, die zeigen, dass ein statistischer Unterschied der Düngevarianten auf die Standorte vorliegt.

Angeknüpft an die Betrachtung des Ertrags werden im folgenden Kapitel die Auswirkungen auf die Qualität beleuchtet.

4.4.2 Qualität und N-Effizienz

Der Proteingehalt zeigt andere Unterschiede als der Ertrag. Wie in Abbildung 20 bereits herausgestellt wurde, ist bei der Betrachtung aller Standorte ein Unterschied hinsichtlich des Proteingehalt ermittelt worden. Im Allgemeinen hat die N-Variante somit einen Einfluss auf den Proteingehalt der Standorte, der für Kuppe unter „normalen“ Bedingungen und für die Ebene im Allgemeinen signifikant ist ($p = 0,010$ bzw. $p = 0,012$). Senken zeigen keine statistischen Unterschiede. Generell lässt sich jedoch erkennen, dass an jedem Standort die höchsten Proteingehalte in den bü 100 % Parzellen zu finden sind und die Niedrigsten in den N_{red} 80 % Parzellen.

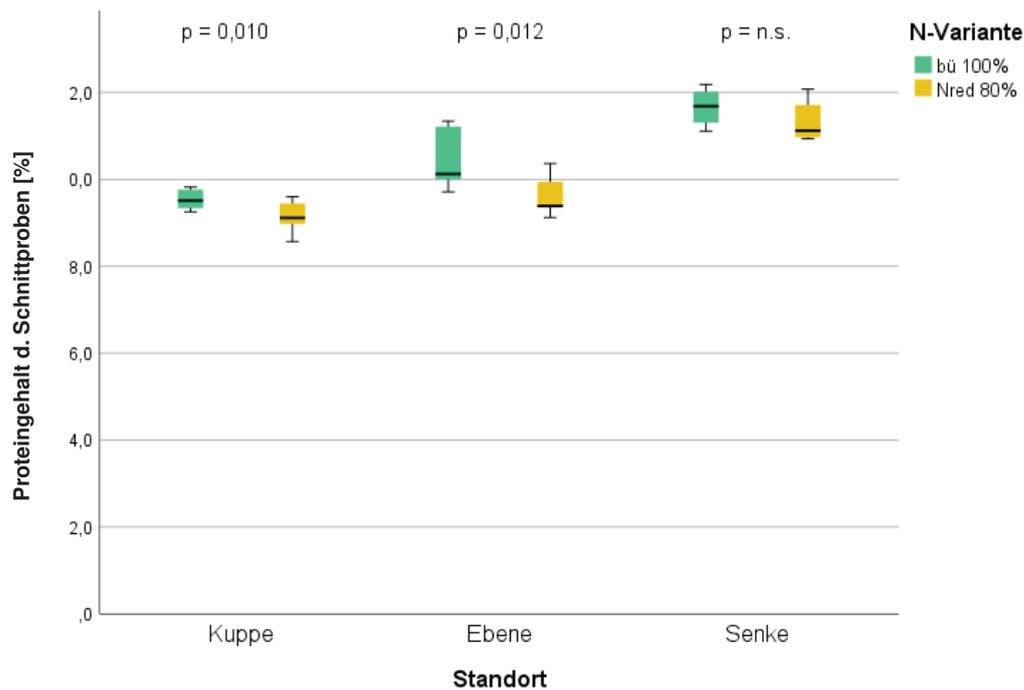


Abbildung 33: Einfluss der Düngevariante auf den Proteingehalt an den Untersuchungsorten, unterteilt nach Standort. Die p-Werte zeigen Signifikanzen bezüglich der Unterschiede zwischen den Düngevarianten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Die N-Effizienz zeigt eine große Bandbreite von bü 100 % Kuppe bis zur N_{red} 80 % Senke. Werden jene Mittelwerte (0,65 bzw. 1,41) miteinander verglichen, wird deutlich, dass im Durchschnitt die gering gedüngte Senke eine mehr als doppelt so hohe N-Effizienz aufzeigt. Die N-Effizienz hinsichtlich der Standorte unterscheidet sich auf der Kuppe signifikant hinsichtlich der N-Variante ($p = 0,028$). Die Senke zeigt tendenzielle Unterschiede auf ($p = 0,072$). Ebenen sind nicht unterschiedlich. Die N_{red} 80 % Senken haben im Durchschnitt einen deutlich höheren Wert der N-Effizienz als die bü 10 % Senken (1,16), schwanken allerdings auch am stärksten (1,14-1,66). Das Maximum der Senken zeigt umgerechnet, dass bei der Düngung je kg N ha^{-1} 1,66 kg N ha^{-1} geerntet werden. Hingegen wurde beim Minimum von der Kuppe (0,47) je kg N ha^{-1} Düngermenge weniger als 0,5 kg N ha^{-1} geerntet.

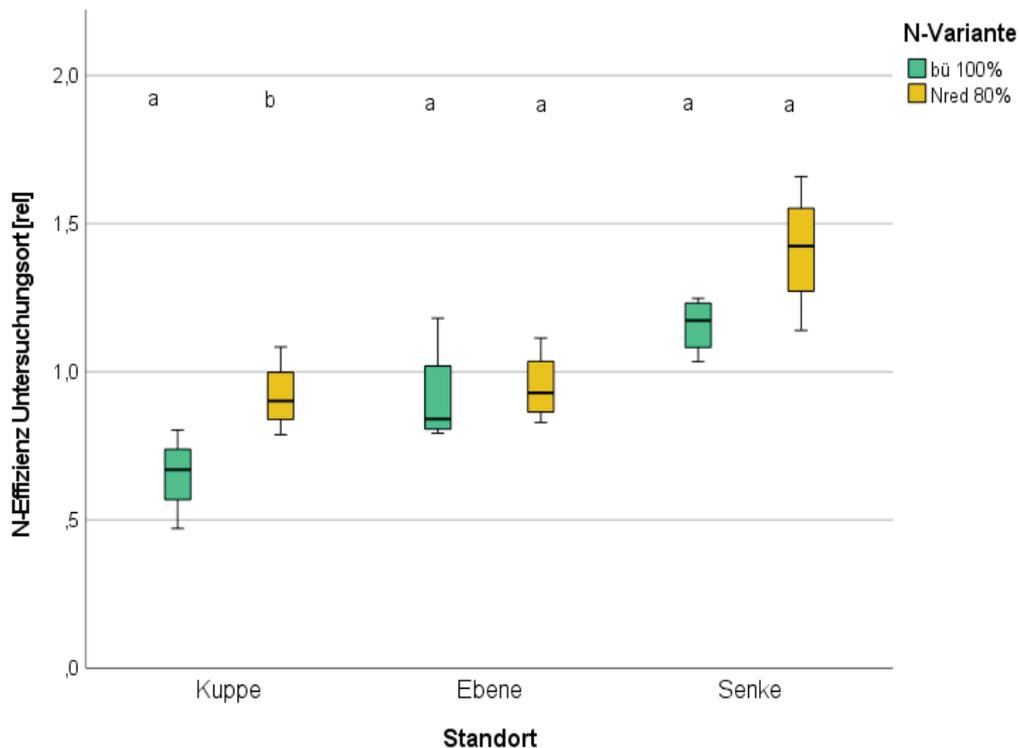


Abbildung 34: Einfluss des N-Reduzierung auf die N-Effizienz an den Untersuchungsorten, unterteilt nach Standort. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede der N-Variante bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Ähnlich zum vorherigen Kapitel wird ebenfalls mithilfe eines Post-Hoc-Test herausgestellt, wie sich die Qualität zwischen den Standorten ändert, wenn die Düngevariante berücksichtigt wird. Die Zusammenfassung der Ergebnisse veranschaulicht Tabelle 6. Erneut zeigt sich eine Verbesserung des Ergebnisses unter Berücksichtigung aller Proben. Daher wird hier ebenfalls die jeweils rechte Tabellenspalte einer N-Variante vernachlässigt.

Tabelle 6: Übersicht der p-Werte aus dem Post-Hoc-Tests von den N-Varianten bü 100 % und N_{red} 80% der Varianzanalyse vom Standort, bezogen auf die Qualität. Differenzierung zwischen allen Proben und dem Ausschluss von Parzelle 1 u. 2. Fett gedruckte Werte zeigen signifikante und kursiv gedruckte tendenzielle Unterschiede zwischen den Standorten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

			bü 100 %		N _{red} 80 %	
			Alle Proben	Ohne Prz. 1 u. 2	Alle Proben	Ohne Prz. 1 u. 2
Proteingehalt Untersuchungsort [%]	Ebene	Kuppe	<i>0,094</i>	0,271	0,647	0,676
		Senke	<i>0,098</i>	<i>0,096</i>	<0,001	0,008
	Kuppe	Senke	0,002	0,009	<0,001	0,002
	Proteinertrag Untersuchungsort [g·m ⁻²]	Ebene	Kuppe	<i>0,088</i>	0,234	1,000
Senke			0,115	0,173	0,008	<i>0,072</i>
Kuppe		Senke	0,002	0,013	0,005	0,023

Zwischen den N-Varianten scheinen sich die Standortunterschiede zu verändern. Die Ebene der bü 100 % zeigt keine signifikanten Unterschiede zur Senke, sondern tendenzielle ($p = 0,098$), außerdem gibt es tendenzielle Unterschiede zur Kuppe ($p = 0,094$). Senke und Kuppe zeigen sich signifikant unterschiedlich ($p = 0,002$). Anders zeigen sich die Standorte der $N_{red} 80\%$ Parzellen. Hier gibt es hinsichtlich des Proteingehalts keine Unterschiede zwischen Kuppe und Ebene. Die Senke zeigt sich hingegen zu beiden Standorten signifikant unterschiedlich mit p-Werten jeweils $< 0,001$. Die Aussage ändert sich nicht, wenn die Parzellen 1 u. 2 vernachlässigt werden, verringert die Signifikanzen jedoch leicht.

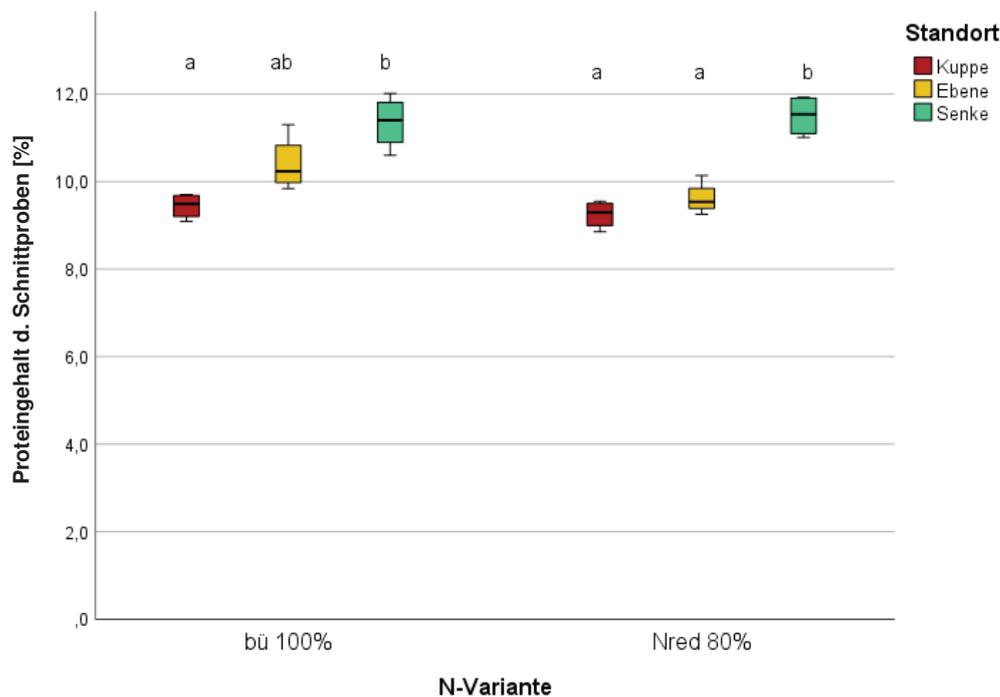


Abbildung 35: Einfluss des Standorts auf den Proteingehalt an den jeweiligen Untersuchungsorten, aufgeteilt nach den N-Varianten. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Der Proteinерtrag liefert vergleichbare Ergebnisse mit dem Proteingehalt. Ebenfalls differenzieren sich die Parzellen der unterschiedlichen N-Varianten verschieden. Bü 100 % zeigt signifikante Unterschiede zwischen Kuppe und Senke ($p = 0,002$) und tendenzielle Unterschiede zwischen Kuppe und Ebene ($p = 0,088$). Die Senke und Ebene sind statistisch nicht verschieden. Anders verhält es sich in den Parzellen mit $N_{red} 80\%$ Düngung. Kuppe und Ebene unterscheiden sich nicht, die Senke hingegen zeigt zu beiden Standorten signifikante Unterschiede ($p = 0,005$, bzw. $p = 0,008$). Werden die untypischen Parzellen 1 u. 2 vernachlässigt, bleiben Senke und Ebene noch tendenziell unterschiedlich ($p = 0,072$).

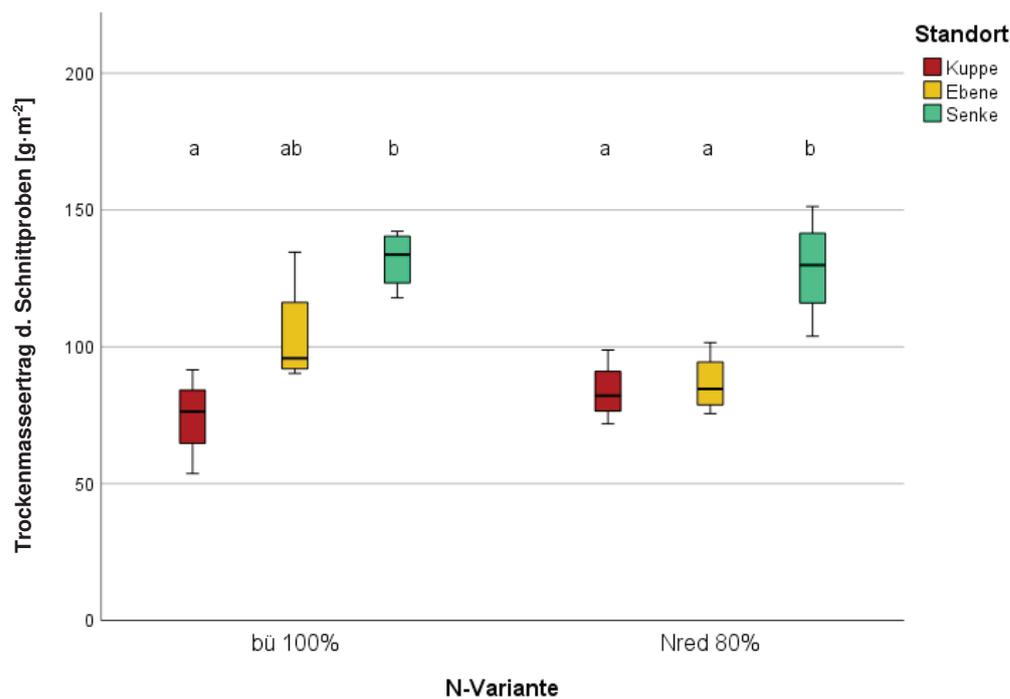


Abbildung 36: Einfluss des Standorts auf den Proteinertags an den jeweiligen Untersuchungsorten, aufgeteilt nach den N-Varianten. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Die Qualität zeigt sich stärker beeinflusst von der N-Variante als der Ertrag. Gerade in Betrachtung der einzelnen Standorte, werden Unterschiede sichtbar. Generell scheinen die Variationen in und zwischen den Standorten in der bü 100 % Variante größer zu sein.

4.4.3 Zusammenhänge der Untersuchungsparameter in standortspezifischer Betrachtung

Es wurde eine Korrelationsanalyse von Trockenmasseertrag und Proteingehalt mit N-Tester Werten sowie Ertragsparametern durchgeführt, die zwischen den beiden Düngevarianten unterscheidet (Tabelle A 4). Im Wesentlichen sind die Zusammenhänge zwischen den Düngevarianten auf einem vergleichbaren Niveau. Eine Ausnahme stellen die N-Tester-Werte vom 13.04. dar. Hinsichtlich des Proteingehaltes zeigen sie einen signifikanten Zusammenhang in den Parzellen der Variante N_{red} 80 %, in den Parzellen der bü 100 % Variante hingegen nicht. Aufgrund der geringen Aussage dieser Ergebnisse werden diese nicht näher erläutert und es werden nun die Zusammenhänge der Untersuchungsparameter standortspezifisch betrachtet. Besonderes Augenmerk liegt auf Zusammenhängen, die vorangegangen ein hohes Bestimmtheitsmaß aufzeigten. Dazu gehören die Halmlänge und die Ährendichte. Außerdem zeigten der Kornertrag und der Proteingehalt eine hohe Korrelation. Aus der Tabelle 7 geht hervor, dass es gewisse Unterschiede sowohl hinsichtlich der Korrelationen als auch der Signifikanzen auftreten. Weiterhin zeigt das TKM gegenüber den anderen Untersuchungsparametern keine Zusammenhänge mit Trockenmasseertrag oder Proteingehalt.

Tabelle 7: Übersicht der Korrelationsanalyse der einzelnen Standorte Kuppe, Ebene und Senke. Ergebnisse der Zusammenhänge von Trockenmasseertrag und Proteingehalt mit Ertragsparametern, Ertrag und Protein. $\alpha=0,05$

		Kuppe		Ebene		Senke	
		Trockenm.- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Untersuch- ungsort [%]	Trockenm.- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Untersuch- ungsort [%]	Trockenm.- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Untersuch- ungsort [%]
Tausendkorn- masse [g]	Korr.	0,157	-0,146	-0,237	-0,257	-0,306	-0,582
	Sig.	0,711	0,729	0,572	0,538	0,462	0,130
	N	8	8	8	8	8	8
Halmlänge [mm]	Korr.	0,406	0,487	,728*	0,651	0,558	,712*
	Sig.	0,318	0,220	0,041	0,081	0,151	0,047
	N	8	8	8	8	8	8
Ährendichte [Ä·m ⁻²]	Korr.	,992*	0,240	,921*	0,703	,923*	0,676
	Sig.	<0,001	0,567	0,001	0,052	0,001	0,066
	N	8	8	8	8	8	8
Trockenm.- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Korr.	1	0,299	1	,870*	1	0,487
	Sig.		0,472		0,005		0,221
	N	8	8	8	8	8	8
Proteingehalt Untersuch- ungsort [%]	Korr.	0,299	1	,870*	1	0,487	1
	Sig.	0,472		0,005		0,221	
	N	8	8	8	8	8	8

* markiert Signifikanz

Wird der Zusammenhang von Ährendichte und Trockenmasseertrag dargestellt, zeigen sich die einzelnen Zusammenhänge insgesamt, wie der Gesamtzusammenhang, signifikant ($p < 0,001$ bzw. $0,001$). Der Zusammenhang scheint allerdings je nach Standort etwas zu variieren. Der Ertragsanstieg mit steigender Ährendichte zeigt sich auf der Kuppe am steilsten, wohingegen die Ebene flacher und die Senke am flachsten steigt. Es zeichnet sich ab, dass der Gesamtzusammenhang nicht linear verläuft, sondern abflacht. Ein Anstieg der Ährendichte auf der Kuppe zeigt somit den höchsten Ertragszuwachs. In der Ebene ist der Zusammenhang allerdings nur unwesentlich geringer (Abbildung 37).

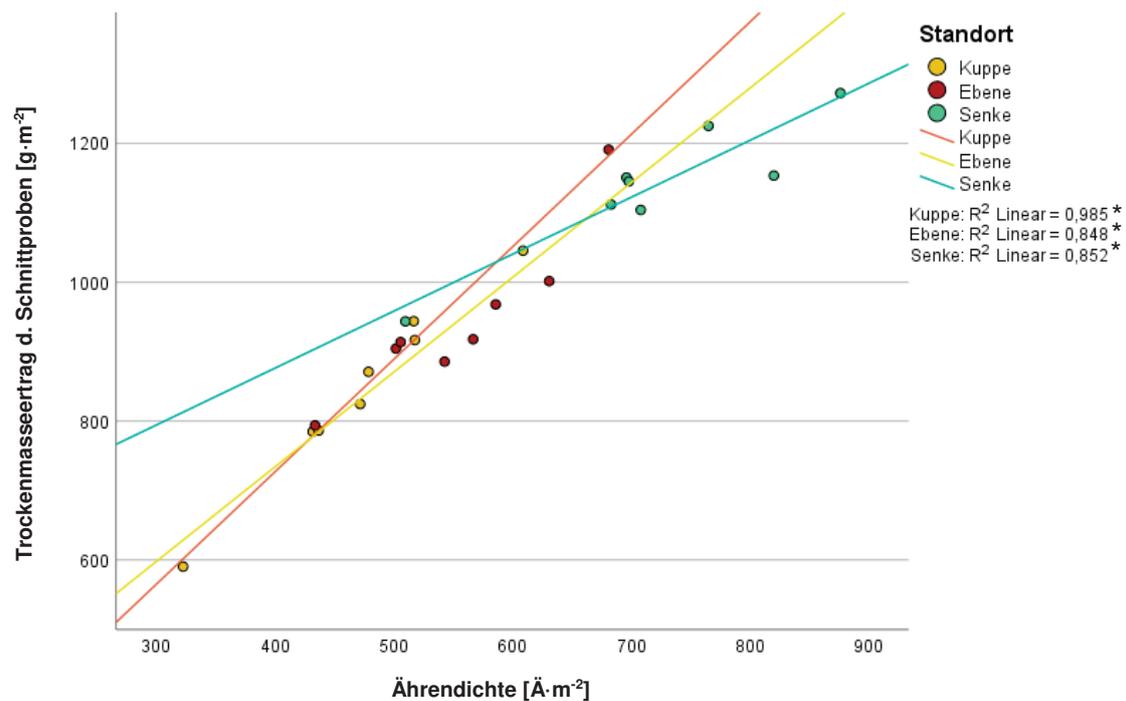


Abbildung 37: Standortdifferenzierter Zusammenhang des feuchtebereinigten Kornertrages und der Ährendichte. Linien kennzeichnen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation beim Niveau von $\alpha=0,05$

Die Ährendichte in Bezug zum Proteingehalt zeigt ein anderes Bild. Es gibt innerhalb der Standorte keine signifikanten Zusammenhänge. Die Kuppe hat mit Abstand die geringste Korrelation im Vergleich. Abbildung 25 zeigt hingegen einen hohen Zusammenhang, der signifikant ist.

Der Zusammenhang der Halmlänge mit dem Trockenmasseertrag variiert zwischen den Standorten nicht gravierend, wie in Abbildung 38 gezeigt. Allerdings sind die Korrelationen der Kuppen und Senken nicht signifikant. Lediglich die Ebene zeigt einen signifikanten Zusammenhang von Halmlänge und Ertrag ($p = 0,041$). Das Bestimmtheitsmaß der Ebene kann 53 % der Schwankungen des Ertrags über die Halmlänge beschreiben. Vor allem die Kuppen zeigen stärkere Abweichungen des Ertrags, die nicht mit der Halmlänge erklärt werden. Der Zusammenhang von Halmlänge und Proteingehalt ist in der Gesamtbetrachtung ebenfalls signifikant. Die standort-spezifische Betrachtung ergibt nur bei der Senke eine signifikante Korrelation.

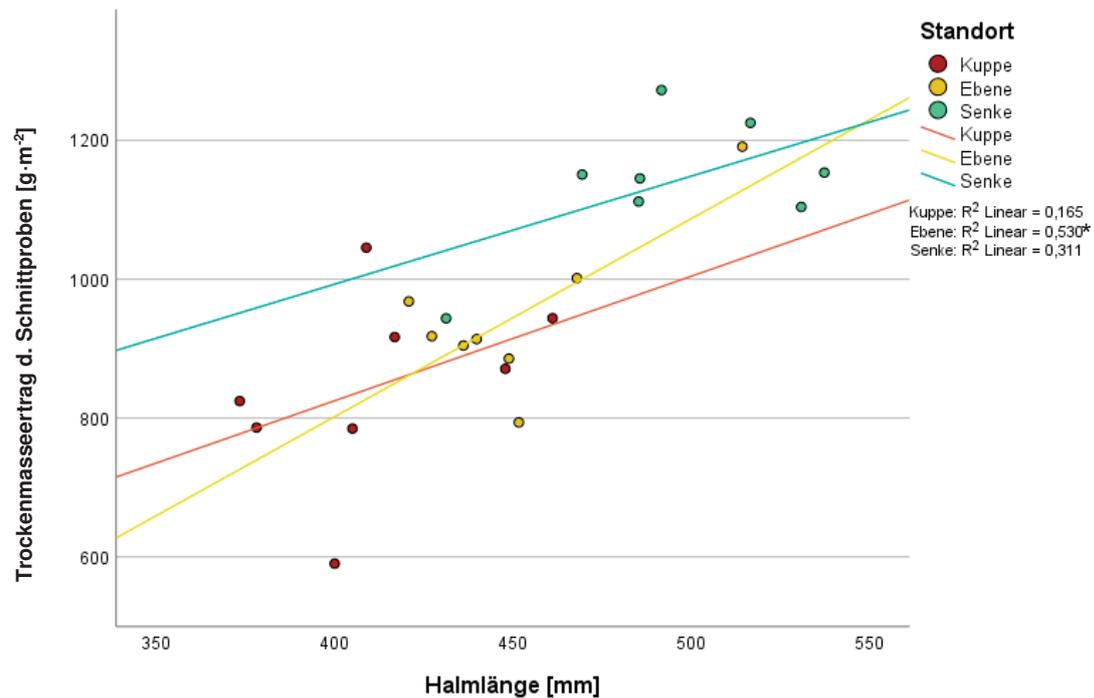


Abbildung 38: Standortdifferenzierter Zusammenhang des feuchtebereinigten Kornertrages und der Halmlänge. Linien Kennzeichnen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Im Kapitel 4.3.4 wurde bereits beschrieben, dass Zusammenhänge der N-Tester Werte mit dem Proteingehalt und dem Ertrag existieren und im Laufe der Vegetation größer werden. Die Werte vom 20.05. zeigen bereits eine hohe Korrelation. Werden nun die Standorte separat betrachtet, zeigt sich ein anderes Bild. Die Übersicht diesbezüglich und zu den anderen Zusammenhängen der N-Tester Werte ist in Tabelle A 5 zu finden. Vor allem die Kuppen zeigen anstatt eines positiven Zusammenhangs einen negativen, der nicht signifikant ist. Die anderen Zusammenhänge sind zwar positiv, aber dennoch nicht signifikant.

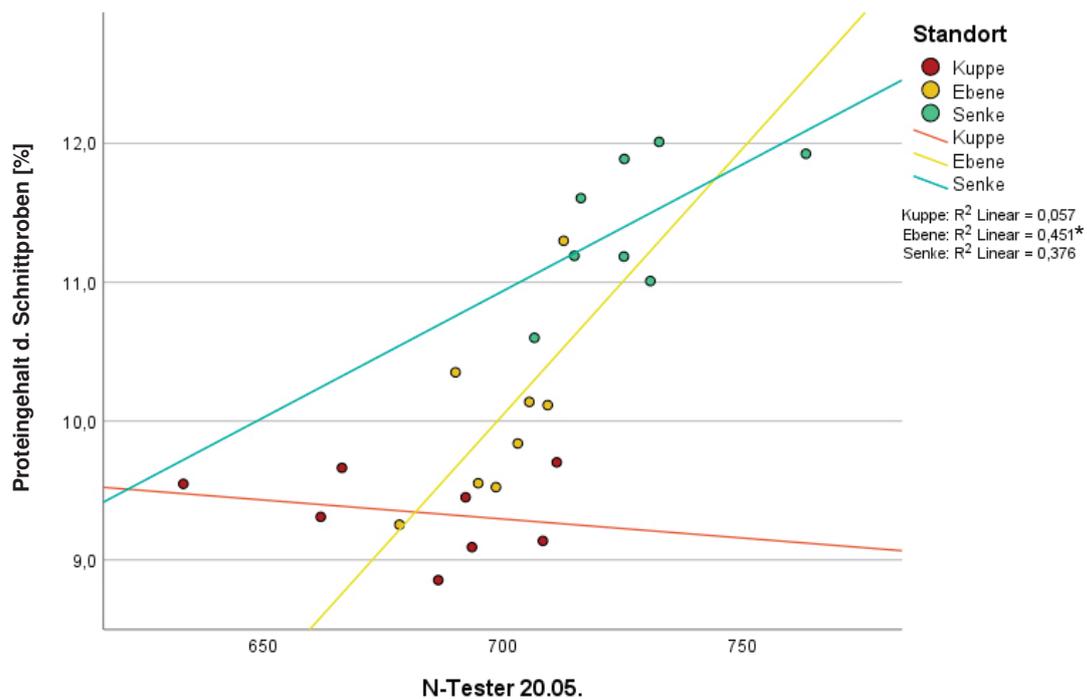


Abbildung 39: Standortdifferenzierter Zusammenhang des Proteingehalts und der Werte des N--Testers vom 20.05. Linien kennzeichnen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Der Zusammenhang von Proteingehalt und Ertrag ändert sich bei der Unterteilung nach Standorten, verglichen mit Abbildung 24. Diese stellte nämlich noch eine hohe Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,813 dar. Weiterhin zeigt die Ebene eine hohe Korrelation des Proteingehalts mit dem Kornertrag, was allerdings auch positiv durch einen Ausreißer beeinflusst wird. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls der einzig signifikante. Die Senke zeigt eine deutlich geringere Korrelation im Vergleich und die Kuppe so gut wie gar keinen Zusammenhang. Ein Anstieg des Kornertrags resultiert somit nicht per se in einem erhöhten Proteingehalt. Der Proteinhalt auf den Kuppen ist generell geringer als in den Senken. Die Linien der Zusammenhänge von Kuppe und Senke verlaufen annähernd parallel, was auf unterschiedliche Niveaus des Proteingehalts deutet.

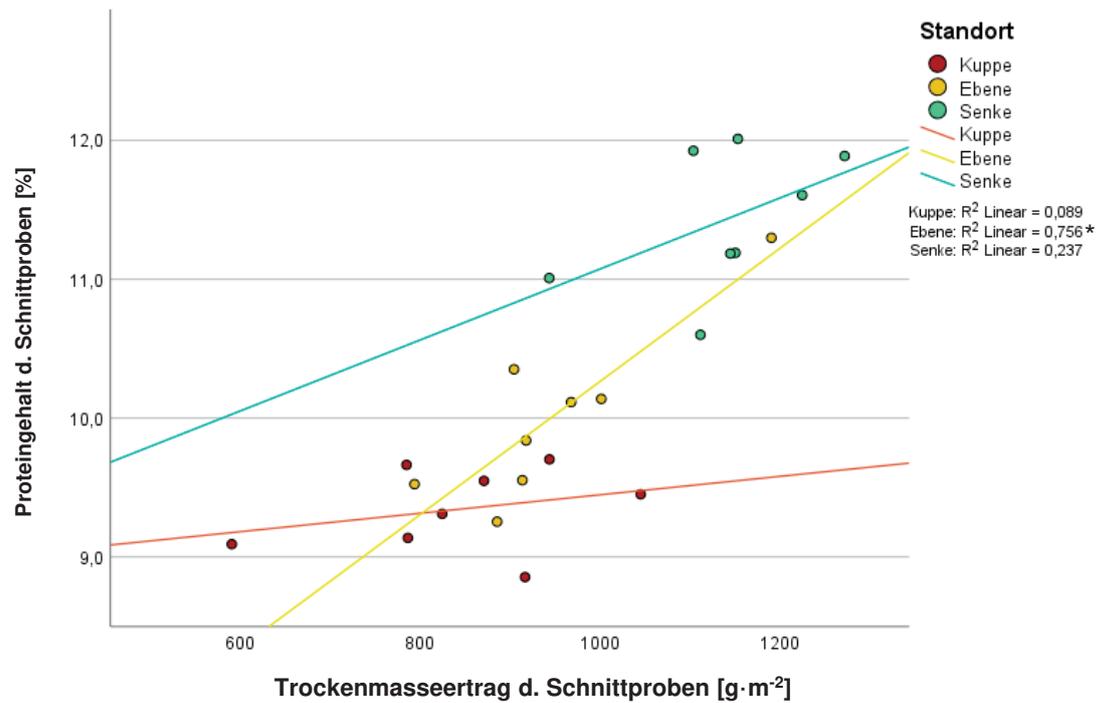


Abbildung 40: Standortdifferenzierte Zusammenhänge der Proteingehalte und der feuchtebereinigten Erträge. Linien zeigen jeweils die Zusammenhänge einzelner Standorte. * markiert eine Signifikanz der Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Dieses Kapitel zeigt, dass die Betrachtung der einzelnen Standorte die vorangegangenen Ergebnisse der Korrelationsanalysen aus den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 verändert. Teilweise ändert das sogar die Zusammenhänge komplett, wie es die Kuppe in Abbildung 39 zeigt.

Im Folgenden wird die Diskussion analysieren, welche Schlussfolgerungen anhand der vorgestellten Ergebnisse getroffen werden können. Außerdem werden Zusammenhänge zwischen Kapitel 2 Stand des Wissens hergestellt.

5 Diskussion

Durch den Kerndrusch, der zuerst in der Diskussion betrachtet wird, ist eine parzellenweise Unterscheidung möglich, jedoch können Unterschiede innerhalb der Parzellen nicht erfasst werden. Da der Mährescher mit einer Ertragskartierung ausgestattet ist und die Parzellen als Kerndrusch beerntet wurden (Einfluss der Fahrgassen wurde ausgeklammert), entstanden relativ exakte Ertragsdaten. Diese Ertragsdaten können hingegen heterogene Erträge innerhalb einer Parzelle beschreiben. Diesen Ergebnissen sowie den Werten des N-Testers wird sich im zweiten Abschnitt gewidmet. Im dritten Abschnitt der Diskussion geht es um die Schnittproben der Untersuchungsorte und wie dort Unterschiede hinsichtlich der N-Varianten bzw. Auswirkungen der Standorte einzuordnen sind. Abschließend werden Schlussfolgerungen gezogen.

5.1 Parzellenkerndrusch

Der Vergleich zwischen den N-Varianten konnte mit dem Kerndrusch der Parzellen am besten durchgeführt werden. Dank des Parallelfahrersystems der Erntemaschine gibt es keine Abweichungen der beernteten Fläche zwischen den Parzellen. Durch das separate Wiegen konnte der Ertrag aus dem Kerndrusch ziemlich exakt ermittelt werden. Bedingt durch die Größe der Parzellen, war die Erntemenge jeweils etwa 4 t. Bei einer Zuladung von mehr als 16 t ist ein Gespann vier Mal zum Wiegen gefahren, bevor es entladen wurde. Das hat den Ablauf der Ernte entschleunigt. Größere Parzellen hätten zwei Vorteile: Zum einen ist die Zeit, die ein Gespann beladen wird, deutlich länger und sorgt dafür, dass der Mährescher weniger Standzeiten hat und zum anderen wird weniger zwischen Feld und Waage gependelt. Eine Koordination während des Kerndrusches ist unabdingbar und bindet gegenüber des herkömmlichen Ernteablaufs eine zusätzliche Arbeitskraft. Dies dient der reibungslosen Durchführung und der Qualität der ermittelten Daten.

Auf Basis der Kerndruschergebnisse sind zwischen den N-Varianten keine gesicherten Unterschiede hinsichtlich des Kornertrags ermittelt worden. Es gibt allerdings Wiederholungen, in denen erwartete Unterschiede ermittelt werden. Im Einzelnen handelt es sich um die Wiederholungen 3, 4 und 6, in denen eine Differenz von ca. 5-15 % zwischen $bü$ 100 % und N_{red} 80 % ermittelt wurde. Die Wiederholungen 1 und 5 hingegen zeigen, dass N_{red} 80 % einen höheren Ertrag aufweist. Tatsächlich zeigen die Wiederholungen ähnliche Schwankungen wie die Düngevarianten. In Parzelle 1 ist der Ertrag mit 10,17 t am niedrigsten, in Parzelle 11 mit 11,71 t·ha⁻¹ am höchsten. Das sind mehr als 15 % Differenz trotz derselben N-Menge (Abbildung 10). In diesem Fall haben die 20 % weniger N keinen Einfluss auf den Kornertrag. Es ist jedoch unklar, welche Auswirkung eine weitere Reduktion der N-Menge auf den Ertrag hätte. Hinsichtlich des Proteingehalts wurde ein tendenzieller Unterschied zwischen den N-Varianten ermittelt. Mit Ausnahme der Wiederholung 1 hat in allen Wiederholungen die $bü$

100 % einen höheren Proteingehalt. Zum Teil sind die Unterschiede klein. Dennoch scheint die geringere N-Düngung im Untersuchungsjahr einen größeren Einfluss auf den Proteingehalt als auf den Ertrag gehabt zu haben.

Da sich die Varianten nicht wesentlich unterscheiden, aber das Ergebnis auf der einen Seite mit einer um 20 % reduzierten N-Menge erreicht wurde, ergeben sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der N-Effizienz. Bezogen auf die N-Bilanz ist dies als sehr positiv anzusehen. In Abbildung 12 ist deutlich zu erkennen, dass in jeder Wiederholung die N-Effizienz der N_{red} 80 % Parzellen deutlich höher ist. Die Erhöhung der N-Effizienz wurde bereits von HAWKESFORD UND RICHE (2020, S. 6 ff.) beschrieben. Die Effizienz würde bei geringerer Düngung weiter steigen, allerdings würde dies längerfristig betrachtet zu nachhaltig geringeren Erträgen durch geringere Bodenfruchtbarkeit führen (HAWKESFORD 2014, S. 278). In Dänemark zeigte sich, dass bei verminderter N-Düngung die Qualität von Getreide im Laufe der Jahre nachhaltig sinkt. Die in diesem Versuch herausgestellte Effizienzerhöhung durch geringere Düngung sollte nicht zu stark gewichtet werden, da ein Jahreseffekt gemessen wurde. Außerdem wird im weiteren Verlauf noch darauf eingegangen, dass der Standort einen größeren Einfluss auf den Ertrag hat als die N-Düngung.

Der markanteste Ausreißer ist in Wiederholung 1 zu finden. Die $bü$ 100 % Parzelle fällt in jeder Hinsicht stark ab und dadurch besonders stark bei der Betrachtung der N-Effizienz. Die Ursache liegt in der Heterogenität der Parzellen. Parzelle 1 zeichnet sich durch einen hohen Kuppenanteil aus, wohingegen die Parzelle 2 einen deutlich größeren Anteil an Ebene und Senke aufzeigt. Hierdurch wird deutlich, dass ohne die heterogenen Bedingungen vermutlich ein anderes Ergebnis erreicht würde. Ebenso zeigt der Teil 4.1.3, dass durch die heterogenen Bedingungen eine gewisse Anzahl an Wiederholungen notwendig ist, um belastbare Ergebnisse zu haben. Größere Parzellen würden in dieser Hinsicht zusätzlich vorteilhaft sein, da Standortunterschiede zunehmend ausgeglichen werden.

5.2 N-Tester und Ertragskartierung

In Abbildung 14 zeigt der erste Messtermin vom 13.04. signifikante Unterschiede mit dem geringsten p-Wert. Die beiden Termine im Anschluss zeigen keine signifikanten Unterschiede der N-Varianten. Die beiden letzten Termine wiederum zeigen Unterschiede zwischen den N-Varianten. Werden dann die Termine der N-Düngung herangezogen (Tabelle 1), zeigt sich, dass die Termine ohne Signifikanzen zeitlich weit von einem Düngungstermin entfernt sind. Der erste Termin liegt zeitlich zwar auch erst fast einen Monat nach der vorherigen Düngergabe, allerdings dauert die Umsetzung von Harnstoff ebenfalls eine gewisse Zeit und es ist vorangegangen drei Viertel der gesamten N-Menge appliziert worden ($152 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ $bü$ 100 % und $126 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ N_{red} 80 %). Dadurch könnte angenommen werden, dass die Düngung zeitweise den N-Gehalt in der Pflanze positiv beeinflusst, jedoch durch z.B. erhöhte

Mineralisation der Effekt ausgeglichen wird. Zu betonen ist, dass es sich hierbei um eine Annahme handelt und es nicht als wissenschaftlich erwiesen gilt.

Die Abbildung 15 zeigt, dass bereits am 13.04. mithilfe des N-Tester ein Unterschied zwischen Kuppe und Senke festzustellen ist, der sich in der Folge nicht mehr ändert. Am 20.05. und 17.06. kommt es zu den höchsten Zusammenhängen mit den Erträgen bzw. Proteingehalten (Tabelle A 3). Die N-Gaben waren zu beiden Zeitpunkten allerdings bereits ausgestreut. Um hohe Zusammenhänge von Proteingehalt bzw. Ertrag und den N-Tester Werten zu erreichen scheint eine eher spätere Messung sinnvoll. Abbildung A 23 stellt zwar einen signifikanten Zusammenhang der N-Tester Werte dar, allerdings liegen die Werte insgesamt dicht beisammen und schwanken in diesem Bereich stark, vor allem hinsichtlich der einzelnen Standorte. Senken weisen teilweise niedrige Werte auf, wohingegen Kuppen hohe Werte zeigen. Im Vergleich mit etwa Abbildung 26 wird deutlich, dass die Standorte sich deutlich stärker differenziert haben und es keine Überschneidungen der Werte von Kuppe und Senke gibt. Außerdem ist der Bereich der N-Tester Werte deutlich größer. Im Vergleich schwanken die Werte am 13.04. zwischen 600 und 660 sowie am 17.06. zwischen 620 und 770.

Für die Düngeplanung und die eventuelle Mengenanpassung geht aus diesem Versuch hervor, dass der N-Tester unmittelbar vor dem letzten Düngetermin am effektivsten eingesetzt werden kann. Der Vergleich von Abbildung 26 und Abbildung 39 zeigt, dass insgesamt eine hohe Korrelation erreicht wird, wenn z.B. Kuppen und Senken angelaufen werden. Würden ausschließlich Kuppen gemessen, hätte die Messung des N-Testers keine Aussage und in dem Beispiel der Abbildung 39 ergäbe sich sogar ein leicht negativer Zusammenhang (nicht signifikant), der aussagt, dass ein höherer Wert des N-Testers einen geringeren Ertrag bedingt. Je deutlicher die Heterogenität des Bestandes ist, desto bedeutender scheint die Aussagekraft des N-Tester Werts zu sein. Möglicherweise hätte eine stärkere Differenzierung der Düngemengen ebenfalls eine stärkere Unterscheidung der N-Tester Werte zur Folge. Zeigt der Bestand bereits optisch erkennbare Unterschiede, wird die Aussage des N-Testers vermutlich noch bedeutender. Eine Messung ist dann möglicherweise hinfällig, da die „optische“ Analyse einen deutlichen Zeitvorteil mit sich bringt, wie es z.B. Drohnensbilder ermöglichen (Abbildung A 25, Abbildung A 26). Die Untersuchungsorte wurden vorsätzlich als „markante“ Orte ausgewählt und zur Messung angelaufen. Es zeigt sich, dass mithilfe dieser Orte eine Bandbreite der N-Versorgung bzw. der Ertragserwartung abgebildet werden kann. Dieses Vorgehen unterscheidet sich wiederum von der Empfehlung des Herstellers, welcher das Messen eines Schlagmittelwerts beschreibt (YARA 2020). Wenn für eine Planung der abschließenden N-Düngungsmaßnahme die N-Tester Werte herangezogen werden, wäre folgendes Vorgehen an den untersuchten Standorten sinnvoll: Orte mit niedrigeren N-Tester Werten erhalten einen Abschlag und Orte mit höheren Werten einen Zuschlag. Abbildung 32 zeigt, dass die Senken in den bü 100 % Parzellen ein hohes Ertragsniveau aufweisen ohne

große Schwankungen. Hingegen zeigen die Kuppen derselben N-Variante relativ große Schwankungen und generell ein niedrigeres Ertragsniveau. Ebenfalls unterscheiden sich in Abbildung 35 die Ebenen nicht signifikant von den Senken bei der N-Variante \bar{b}_u 100 % hinsichtlich des Proteingehalts, was ein Unterschied zu der N_{red} 80 % Variante darstellt.

Mithilfe der Ertragskartierung lassen sich Schwankungen der Erträge grundsätzlich gut erklären. Vor allem in der Betrachtung der Gesamtparzellenerträge weist eine große Übereinstimmung auf: Der in Abbildung 17 dargestellte Zusammenhang zeigt, dass in diesem Versuch ein Wiegen des Kerndruschs nicht unbedingt nötig war. Neben den Schwankungen der Parzellenerträgen ist die Erfassung von heterogenen Erträgen innerhalb der Parzellen möglich. Abbildung 28 zeigt hierbei zwar eine signifikante Übereinstimmung, allerdings erklärt das Bestimmtheitsmaß in etwa die Hälfte der Ertragsschwankungen. Diese Abweichungen können auf die Interpolation zurückgeführt werden. Der Kerndrusch erfolgte jeweils in zwei zufälligen Schnittbreiten des Schneidwerks. Zum einen ist es möglich, dass Untersuchungsorte sich nicht im Bereich des Kerndrusches befanden und durch die Interpolationsmethode einen abweichenden Wert zugeordnet bekommen haben. Zum anderen misst die Ertragskartierung Erträge der gesamten Schnittbreite. Selbst wenn der Untersuchungsort sich im Bereich des Kerndrusches befand, kann es durch heterogene Einflüsse zu Abweichungen der Erträge kommen. Ein weiterer Grund für die Abweichung ist die deutlich größere Anzahl an Wiederholungen, die der Mähdröschler macht. Ein zeitlicher Abstand von einer viertel Sekunde je Messpunkt bedeutet, dass bei einer Erntegeschwindigkeit von $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ mehr als vier Wiederholungen pro gefahrenen Meter erreicht werden. Die Genauigkeit des einzelnen Messpunktes ist hierbei sicherlich infrage zu stellen, da auch eine technisch bedingte Verzögerung der Ernteerfassung vorliegt. Allerdings sollte durch eine Bildung von Mittelwerten eine hohe Genauigkeit erreicht werden. Die Genauigkeit ist auf die Schnittbreite von mehr als 10 m zu beziehen. Denn die Übereinstimmung der Parzellenerträge (Abbildung 17) zeigt deutlich, dass die Ertragskartierung die Erträge relativ genau erfassen kann.

Da es sich um ein relativ trockenes Frühjahr handelte und das Wasser als der Ertragsbegrenzende Faktor anzunehmen ist, sind die gemessenen Unterschiede nicht auf bewirtschaftungsbedingte Effekte zurückzuführen, wie es LORENZ UND MÜNCHHOFF (2015, S. 39-42) erwähnten. Dennoch ist durch eine sehr gute Niederschlagsverteilung ein hohes Ertragsniveau erreicht worden. Die Analyse der Schnittproben ist gegenüber der Ertragskartierung im Vorteil, bezogen auf die Erfassung kleinräumiger Unterschiede. Es bleibt allerdings einzuordnen, welche Größenordnung der Einteilung von Unterschieden sinnvoll und heutzutage praktikabel ist.

Im Anhang zeigen Abbildung A 14 und Abbildung A 15, dass ein Zusammenhang der N-Tester Werte mit den Werten der Ertragskartierung abzuleiten ist. Allerdings ist die Streuung groß.

Gewisse Abweichungen sind erneut auf die Interpolation zurückzuführen. Und wie bereits erläutert, stellt der N-Tester keine exakte Vorhersage der Erträge dar, sowie ist der Zusammenhang mit den Proteingehalten deutlich größer.

N-Tester und Ertragskartierung erweisen sich als recht einfache Methoden, um Daten zu generieren, die allerdings nicht absolut exakt sind. Für einen Erkenntnisgewinn sind sie dagegen gut geeignet. Des Weiteren ist der NDVI zu nennen, welcher im Rahmen dieser Arbeit mit den Satellitenbildern der Sentinel II Mission erstellt wurden. Vergleichsweise sind diese Daten ebenfalls kostengünstig und schnell zu erhalten. Für den Feldversuch stellte sich jedoch heraus, dass ein 10x10 m Raster z.T. nicht ausreicht, um Unterschiede im Wachstum ausreichend zu erfassen. Teilweisewaren die Untersuchungsorte zu nah an einer Fahrgasse, die den Wert des NDVI stark beeinflussen kann. Daher ergaben sich geringe Korrelationen mit den Erträgen aus den Schnittproben, wie es in Tabelle A 3 gezeigt wird. Zum Ende der Vegetation steigen die Zusammenhänge hingegen deutlich. Allerdings war die Düngung dann bereits abgeschlossen und der Nutzen ist gegenüber den Werten des N-Testers erheblich geringer. Vom 19.04. bis zum 29.05. war bedingt durch Bewölkung keine Berechnung von NDVI-Werten möglich. Die Bewölkung birgt daher zusätzlich ein hohes Risiko. Drohnen hingegen würden durch eine höhere Bildauflösung und einer Flughöhe unterhalb der Wolken die vorangegangenen Nachteile nicht aufweisen und wären dennoch praxistaugliche Möglichkeit zur flächigen Bestandsaufnahme. BORGOGNO-MONDINO et al. (2018, S. 209-215) stellte ebenfalls heraus, dass die Ermittlung des NDVI mithilfe von Drohnen genauer ist. Der Drohneneinsatz zur Ermittlung des NDVI würde eine sinnvolle Ergänzung zu den in diesem Versuch angeführten Untersuchungsmethoden darstellen.

5.3 Ergebnisse der Laboranalyse

Aus acht der zwölf Parzellen wurden an den Untersuchungsorten Schnittproben entnommen und nach einigen Eigenschaften untersucht. Unterteilt wird im Folgenden nach den Einflüssen der N-Düngung sowie den Einflüssen des Standorts.

5.3.1 Einfluss der N-Düngung

Im Vergleich aller Schnittproben konnten keine Unterschiede der N-Mengen hinsichtlich der im Labor untersuchten Parameter festgestellt werden. Das kann grundsätzlich auf die Jahreswitterung zurückgeführt werden, wie es ISENSEE et al. (2003, S. 59) und EREKUL et al. (2005, S. 529 ff.) beschrieben. Trotz eines eher trockenen Frühjahrsverlauf waren die Wasserreserven aus dem niederschlagsreichen Winter (Abbildung A 3) und eine gute Niederschlagsverteilung ab Ende April (Abbildung 6) zwei positive Faktoren für das insgesamt hohe Ertragsniveau. Die Reduzierung der N-Düngung spielt in dieser Konstellation offenbar eine eher untergeordnete Rolle. In anderen Jahren könnte die Versuchsanlage ein anderes

Ergebnis erzielen. Für ein Ausblenden des Jahreseffektes wären mehrjährige Versuchsanlagen notwendig.

In der Literatur wird insbesondere der Einfluss auf die Bestandesdichte, TKM und auf den Proteingehalt hervorgehoben (EREKUL et al. 2005, S. 531-534; HEYN 2006, S. 5). Keiner dieser Werte zeigt jedoch Unterschiede bei Betrachtung aller Standorte. Durch eine rechtzeitige erste N-Gabe wurde die Bestockung in beiden Varianten ähnlich angeregt. Aus den ausgezählten Feldaufgängen von durchschnittlich 145 Pflanzen·m⁻² ergab sich eine Ährendichte von 583 Ä·m⁻². Der errechnete Bestockungsfaktor liegt somit bei rund 4. Der *Reform* kommt damit seinen Sorteneigenschaften nach und kompensiert über eine erhöhte Bestockung einen eher schlechten Feldaufgang. Durch eine relativ frühe dritte N-Gabe ist zu erklären, dass sich der Proteingehalt nicht wesentlich voneinander unterscheidet, jedoch wäre dann zu erwarten, dass das TKM mit der N-Menge variiert (STURM et al. 1994, S. 289). Da dies hier nicht der Fall ist, entspricht der Zusammenhang eher den Aussagen von BROWN et al. (2005, S. 4-8). Somit hat die dritte N-Gabe weder einen großen Einfluss auf den Proteingehalt noch auf das TKM. Während der Wachstumsphase wurde in diesem Versuch demnach ein Großteil vom Gesamt-N aufgenommen und vor der Reife in das Korn umgelagert. Das TKM hingegen wurde hauptsächlich von den Sorteneigenschaften vorgegeben. Die Anlage und Reduktion von Ährchen und Blüten war in diesem Fall somit deutlich ertragswirksamer, wurde bei den Feldbonituren und in der Laboranalyse allerdings nicht untersucht.

Werden anstatt aller Standorte, einzelne Standorte betrachtet und auf einen Effekt der reduzierten N-Düngung untersucht, konnten immerhin hinsichtlich des Proteingehalts Unterschiede zwischen den Düngevarianten festgestellt werden (Abbildung 33). So zeigen die N_{red} 80 % Parzellen der Kuppen und Ebenen einen signifikant schlechteren Proteingehalt als die bü 100 % Parzellen. Senken zeigen sich in dieser Betrachtung gleich, was mit den Ergebnissen von ISENSEE et al. (2003, S. 59 f.) und ENGELN et al. (1999, S. 82 f.) übereinstimmt. Der Ertrag hingegen kann nicht signifikant unterschieden werden (Abbildung 29). Es werden allerdings unterschiedlich große Schwankungen des Ertrags beobachtet. Die Kuppe und Ebene der bü 100 % scheinen größere Schwankungen aufzuweisen als die N_{red} 80 % Parzellen. Hingegen weisen die bü 100 % relativ geringe Schwankungen auf. Zu erklären ist dies ebenfalls durch die Beobachtungen von ISENSEE et al. (2003, S. 58 f.). Im Fall der Senken scheinen die Schwankungen der N_{red} 80 % je nach Mineralisierung zu erfolgen, wohingegen die bü 100 % durch höhere Mineraldüngung generell genügend N zur Verfügung haben sollten. Anders erscheint das bei den Kuppen der bü 100 % Parzellen. Trotz der nicht signifikanten Unterschiede zeigen sich Ausreißer mit besonders geringen Erträgen in gegenüber der N_{red} 80 % Kuppen. Wird dieses auf die spezifischen Ertragsfunktionen aus Abbildung 3 bezogen, könnte abgeleitet werden, dass es bei den Ausreißern zu einer

Überdüngung gekommen ist, die sich negativ auf den Ertrag auswirkt. In jedem Fall sind diese Kuppen hinsichtlich der N-Effizienz mit Abstand am schlechtesten zu bewerten (Abbildung 34).

Die Betrachtung einzelner Untersuchungsorte zeigt, dass durch die Düngung Unterschiede unter homogenen Bedingungen erreicht werden können. Der Abschlag von 20 % ist allerdings hinsichtlich des Ertrags nicht ausreichend, um in dieser Versuchsanlage signifikante Unterschiede zu erreichen. Der Proteingehalt wiederum zeigt Unterschiede. Da die Schnittproben gezielt an heterogenen Orten gezogen wurden, ist die Gewichtung dieser Unterschiede offenbar größer als eine um 20 % verminderte N-Düngung. Allerdings sind die heterogenen Bedingungen aus dem hügeligen Relief des Versuchsstandorts allgegenwärtig. Die Parzellenlänge von 200 m wurde gewählt, um diese reliefbedingten Unterschiede auszublenden. Dennoch konnten keine Unterschiede zwischen den N-Varianten festgestellt werden. Die gezielte Bewirtschaftungsanpassung erscheint als sinnvoll, gerade vor dem Hintergrund einer reduzierten Düngung. Es ist daher zielführend eine möglichst hohe N-Effizienz an spezifischen Standorten zu erhalten, um je kg N einen optimalen Ertrag zu erhalten. In Abbildung 34 wird deutlich, wie unterschiedlich die N-Effizienz auf demselben Schlag sein kann und dass die Reduzierung der N-Menge an Orten mit geringerem Ertragsniveau neben der Effizienzsteigerung sogar einen negativen Ertragseffekt einer Überdüngung abwenden kann. Nachhaltig betrachtet, sollte die N-Zufuhr an den Verbrauch angepasst sein und nicht an die maximale Effizienz, da sonst zulasten der Bodenfruchtbarkeit gewirtschaftet werden könnte und die Möglichkeit besteht, dass Erträge sowie Qualitäten im Laufe der Jahre stetig sinken. In Dänemark wurden beispielhaft diese Effekte beobachtet (AGRARHEUTE 2015; STYCZEN et al. 2020).

Wie sich der Einfluss des Standorts auswirkt, wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

5.3.2 Einfluss des Standorts

Gegenüber der N-Düngung zeigt sich der Einfluss des Standorts als sehr bedeutsam für fast alle untersuchten Daten. Lediglich die TKM unterscheidet sich zwischen den Standorten nicht. Dies kann auf den Sorteneffekt zurückgeführt werden und es scheinen andere Parameter für die Ertragsdifferenzierung zuständig zu sein. Tabelle 3 zeigt, dass für alle anderen untersuchten Werte p Werte $< 0,001$ ermittelt wurden.

Nachdem die Feldaufgänge ausgezählt wurden und in Summe keine Unterschiede auftraten (Tabelle 2), gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Bestockung bzw. Triebreduktion. Die mittlere Bestandesdichte über alle Proben von $583 \text{ \AA} \cdot \text{m}^{-2}$ entspricht zwar dem Zielwert eines normalen Bestands (STURM et al. 1994, S. 279 f.), allerdings schwankt der Wert deutlich zwischen den Standorten (Abbildung A 16). Konkret setzt sich die Senke von den anderen zwei Standorten ab. Die starken Unterschiede der Bestandesdichte korrelieren sehr stark mit dem Kornertrag (Abbildung 23). Die Schwankungen der Ährendichte erklären über 90 % der

Schwankungen des Kornertrags. Es scheint daher sehr bedeutsam, überall eine möglichst hohe Ährendichte zu erzielen. Werden die Standorte separat betrachtet, ergibt dies ein leicht anderes Bild (Abbildung 37). Die Kuppe zeigt hierbei den steilsten Anstieg der Gerade. Hier bringt eine Erhöhung der Bestandesdichte den meisten Ertragszuwachs. Die Senke hingegen zeigt einen deutlich flacheren Anstieg der Gerade. Der absolute Ertragszuwachs steigt in diesem Fall nicht mehr so stark mit steigender Bestandesdichte. Daran kann abgeleitet werden, dass vor allem auf der Kuppe durch pflanzenbauliche Maßnahmen die Bestandesdichte so hoch wie möglich sein muss. Möglichkeiten für die Umsetzung sind z.B. die Erhöhung der Saatstärke oder die Förderung der Bestockung durch N-Düngung. Beide Maßnahmen wurden in dem Versuch durchgeführt. Zum einen wurde die Saatstärke insofern erhöht, dass der Feldaufgang der Kuppen an den restlichen Feldaufgang angeglichen wurde. Zum anderen zeigte die reduzierte Düngung keine Verringerung der Ährendichte auf den Kuppen (Abbildung 31). Offenbar lässt sich die Bestandesdichte, vor allem auf den Kuppen, nicht so leicht beeinflussen, wie angenommen. Der Haupteinfluss auf die Ertragsbildung scheint der Standort zu sein. Eine Erweiterung der Erkenntnisse würde eine breitere Abstufung der N-Mengen mit sich bringen. Es könnte z.B. fortführend beobachtet werden, wie sich eine 60 % N-Menge im Vergleich der 100 % Menge auf die Kuppe auswirken würde.

Die Halmlänge zeigt ebenso deutliche Unterschiede zwischen den Standorten. Statistisch abgesichert ist der Unterschied zwischen Senke und Kuppe, bzw. Ebene (Abbildung A 18 und Abbildung A 19). Die relative Streuung ist im Vergleich zu anderen Werten nicht so stark innerhalb der Standorte. Damit zeigen sich zum einen gewisse Sorteneigenschaften sowie die Einkürzung und Angleichung der Halme zur Vermeidung von Lagergetreide mithilfe von Wachstumsreglern. Dennoch ist in manchen Senken Lagergetreide entstanden, wie es z.B. in der Abbildung A 26 in Parzelle 10 zu sehen ist. Die Gründe hierfür können folgende sein: Wie bereits beschrieben, zeigt die Senke eine signifikant höhere Ährendichte, welche hauptsächlich durch eine höhere Bestockung hervorgerufen wurde. Die Bestandesdichte verstärkt das Längenwachstum aufgrund der Konkurrenz um das Licht. Außerdem scheint eine höhere Versorgung von Nährstoffen nicht ausschließlich während der Bestockung vorhanden zu sein, was deutlich bessere Wachstumsbedingungen im Vergleich zu den Kuppen hervorruft. An diesen Orten reicht die Wirkung des Wachstumsreglers nicht aus und es kommt zu Lagergetreide. Insgesamt kann durch die Halmlänge die Schwankung des Kornertrags gut bestimmt werden, wie es in Abbildung A 22 gezeigt wird. Mit dem Bestimmtheitsmaß werden mehr als drei Viertel der Schwankungen erklärt. Bei einer standortangepassten Bewirtschaftung können durch verschiedene Einflüsse die Halmlängen verfälscht werden. In diesem Feldversuch sind die Unterschiede der Halmlänge jedoch hauptsächlich auf die Heterogenität des Bodens zurückzuführen. Darüber hinaus ist die Halmlänge relativ einfach mithilfe eines Zollstocks zu ermitteln. In Abbildung 38 zeigt sich, dass die Halmlänge grundsätzlich positiv mit dem Ertrag korreliert. Die Kuppe zeigt allerdings starke

Schwankungen: bei einer Halmlänge von etwa 400 mm werden ca. 600, 800 und mehr als 1000 g·m⁻² Kornertrag gemessen. Daher ist dieser Zusammenhang nicht signifikant. Die Senke zeigt nicht so starke Abweichungen jedoch ebenfalls keine signifikante Korrelation, die Ebene hingegen schon. Ähnlich wie bei der Ährendichte kann durch das Messen an „Extrempunkten“ ein größerer Zusammenhang ermittelt werden. Die Extrempunkte zeigen in diesem Fall die Bandbreite. Werte dazwischen können zur Abstufung beitragen.

Die Untersuchungsorte unterscheiden sich, gegenüber der Betrachtung der N-Düngung, wesentlich hinsichtlich des Kornertrags. Die Kuppe zeigt größere Schwankungen, dennoch deutlich niedrigere Erträge als die Senke. Auch bei der Ebene sind geringere Erträge in der Senke zu verzeichnen (Abbildung 19 und Abbildung A 20). Es zeigt sich dadurch, dass die Auswahl und Einteilung der Untersuchungsorte einen erwarteten Effekt gebracht hat. Der Einfluss des Standorts auf den Ertrag ist dem Effekt der Düngung somit weit überlegen. Wie bereits beschrieben, liegt das an der Auswahl der Orte, in der gezielt die Kuppen, Ebenen und Senken ausgewählt werden. Wäre die Auswahl der Untersuchungsorte zufällig abgelaufen, könnte vermutlich kein Effekt festgestellt werden. Dass die Ergebnisse des Kerndrusches ebenfalls keine Unterschiede zeigten (Abbildung 10 und Abbildung A 10), ist auf die unterschiedliche Verteilung und Ausprägung der einzelnen Standorte zurückzuführen. Die Parzelle 1 zeigt den geringsten Gesamtertrag, hat allerdings auch den größten Anteil einer Kuppe, bezogen auf die Parzellenfläche. Hingegen zeigt die Nachbarparzelle, Parzelle 2, mit einem höheren Senkenanteil, deutlich höhere Erträge. Das in 2.3.2 beschriebene Geländemodell stellt eine effektive Lösung dar, reliefunterschiede zu quantifizieren und bildet eine sinnvolle Ergänzung zu der in diesem Versuch angewendeten Untersuchungsmethoden.

Einen unerwartet hohen Zusammenhang zeigen die Versuchsergebnisse hinsichtlich Proteingehalt und Kornertrag (Abbildung 24). Ein hohes Bestimmtheitsmaß von 0,81 ermöglichen in diesem Fall die Beschreibung der Proteingehaltsschwankungen durch den Ertrag. In der Literatur wurde hingegen häufig der sogenannte Verdünnungseffekt erwähnt, welcher einen negativen Zusammenhang von Proteingehalt und Kornertrag beschreibt (FEIL UND BÄNZIGER 1999, S. 4; MÖLLERS 2000, S. 103 f.; HAWKESFORD 2014). Der Verdünnungseffekt in dem Feldversuch äußert sich zur Ernte 2020 möglicherweise so, dass der Kornertrag generell hoch ist und das Niveau des Proteingehalts sich unterhalb der Backqualität von Weizen befindet, obwohl der *Reform* eine Qualitätsweizensorte ist. MÖLLERS (2000, S. 103) erwähnt weiterhin, dass der Verdünnungseffekt auf demselben Ertragsniveau zu beobachten ist, welches durch den verfügbaren N vorgegeben ist. Insgesamt sorgt die Erhöhung des verfügbaren N zur Steigerung von Kornertrag sowie Proteingehalt. Wird dieses auf die heterogenen Bedingungen bei der Betrachtung der Untersuchungsorte bezogen, kann diese Aussage bestätigt werden. Abbildung 40 zeigt in der standortdifferenzierten Betrachtung zwar trotzdem keinen Verdünnungseffekt, allerdings auch keinen bedeutenden

Zusammenhang von Proteingehalt und Trockenmasseertrag. Vor allem die Kuppe und die Senke zeigen eine eher kleine Korrelation sowie keine Signifikanz (Tabelle 7). Lediglich die Ebene zeigt weiterhin einen signifikanten Zusammenhang, was auf eine nicht eindeutige Standortabgrenzung zurückzuführen ist. RECKLEBEN UND ISENSEE (2004, S. 145) konnten ebenfalls keinen Verdünnungseffekt feststellen und erklärten eine enge Verknüpfung mit der Heterogenität des Bodens. Diese Schlussfolgerungen können durch die Versuchsergebnisse bestätigt werden. Wie Abbildung 20 zeigt, hat der Standort einen großen Einfluss auf den Proteingehalt. Senken zeigen somit die maximale N-Düngeeffizienz: bei gleicher Düngung werden dort die höchsten Kornerträge geerntet und die höchsten Proteingehalte erzielt.

Da sich bei der Betrachtung der Untersuchungsorte Kornertrag und Proteingehalt relativ gleich verhalten und kein Verdünnungseffekt festgestellt werden kann (Abbildung 24), zeigen die ermittelten Proteinerträge keine neuen Erkenntnisse auf. Abbildung 22 stellt denselben Einfluss des Standorts im Vergleich zu Kornertrag und Proteingehalt dar. Die Aussage von STURM et al. (1994, S. 298 ff.), dass ein Bezug von Kornertrag und Proteingehalt herzustellen ist, kann durch diese Versuchsanlage nicht bestätigt werden.

5.4 Schlussfolgerungen

Mithilfe von praxisüblichen Messmethoden wie dem N-Tester, die Fahrzeugwaage und die Ertragskartierung wurde versucht, in einem On Farm Research aussagekräftige Daten zu erzeugen. Bei ausreichender Parzellengröße und dem Ausblenden heterogener Bedingungen können mithilfe der Ertrags erfassung über Kartierung oder Fahrzeugwaage in diesem Versuch bestätigt werden, dass der Effekt eines Faktors (in diesem Fall die reduzierte N-Düngung) gut miteinander verglichen werden kann. Ein Kerndrusch blendet darüber hinaus den Einfluss von z.B. Randeffekten oder Fahrgassen aus, welche bei größeren Parzellen zunehmend zu vernachlässigen sind. Der N-Tester und die Ertragskartierung zeigten z.T. ähnliche Ergebnisse wie die Daten, die in der Laboranalyse ermittelt wurden. Vor allem Ertragsunterschiede können ausgewertet und z.T. sogar vorhergesagt werden. Der Vergleich von Schnittprobe und Ertragskartierung erweist sich allerdings als etwas schwierig. Die Schnittprobe bildet einen wesentlich kleineren Bereich ab als die Schnittbreite des Mähdreschers. Es stellt sich die Frage, ob ein Nutzen für diese kleinräumige Betrachtung vorhanden ist, da dem gegenüber eine wesentlich effektivere Ertragskartierung steht. Am Beispiel des Praxisbetriebs ist kein wesentlicher Nutzen dieser Beerntungsmethode abzuleiten, da die Fragestellungen zur N-Düngung eher bezüglich größerer Teilflächen bestehen und mit der Ausbringtechnik keine Genauigkeit von einem m² erreicht werden kann. Für den hügeligen Standort sollte das digitale Geländemodell in Zukunft ergänzend zur Vorhersage von Unterschieden herangezogen werden. Mithilfe der praxisüblichen Messmethoden kann der Proteingehalt, welcher in dieser Form stellvertretend für die Qualität des Weizens herangezogen wurde, nicht sicher ermittelt

werden. Für einen Vergleich von N-Varianten ist der Proteingehalt eine bedeutsame Eigenschaft. Im Labor wurde dieser mit einem NIR-Sensor ermittelt. Diese NIR Sensoren sind eine verhältnismäßig teure Messtechnologie, allerdings gibt es bereits Anwendungsfelder in der Landtechnik und möglicherweise werden diese irgendwann auf den Bereich des Mähdreschers ausgeweitet.

Der Feldversuch hat gezeigt, dass unter den Gegebenheiten eine Verringerung der N-Düngung um 20 % lediglich einen geringen Effekt zeigt. Der Haupteffekt ist in der Versuchsauswertung auf den Standort zurückzuführen. Hinzu kam ein im Frühjahr 2020 vergleichsweise guter Witterungsverlauf für den Weizen. Durch ein generelles Wasserdefizit, vor allem durch eine längere trockene Phase im April, haben sich die Standorte jedoch deutlich ausdifferenziert.

Abseits von Ertrag und Qualität hatte die in der DüVO beschriebene reduzierte N-Düngung einen Einfluss auf den „Betriebsleiterkopf“. Die erforderliche Reduzierung der Düngung führte zu einer intensiven Auseinandersetzung mit der Thematik. So wurde analysiert, wie ein größerer Schlag sinnvoll unterteilt werden kann – in diesem Fall nach Relief. Im Anschluss wurde gezielt beobachtet, wie unterschiedliche Düngungsvarianten wirken. Als Ergebnis zeigt sich, dass der Einfluss der Düngung wesentlich geringer ist als der des Standorts. Das ist dennoch als positive Erkenntnis zu sehen und bietet generell die Möglichkeit einer Anpassung in Form von differenzierten N-Mengen. Da die Aufzeichnung der N-Mengen schlagweise erfolgt, ist es legitim, innerhalb dieses Schlags die Mengen zu differenzieren. Bei der Betrachtung der Einzelstandorte wird deutlich, dass es unterschiedliche Ertragsniveaus gibt. Die Errechnung des N-Bedarfs beruht auf dem Durchschnittsertrag. Unter heterogenen Bedingungen basiert dieser wiederum auf vielen verschiedenen Einzelverträgen, die im Grunde genommen viele unterschiedliche N-Bedarfswerte aufzeigen. Die Kuppe erzielt generell einen geringeren Ertrag als die Senke. In den N_{red} -Parzellen zeigt die Kuppe sogar einen leicht höheren Ertrag (nicht statistisch belegt). Außerdem sind die Proteingehalte auf den Kuppen am geringsten. Die reduzierte Düngung wird der Kuppe generell gerecht. Die Senke hingegen zeigt keine Unterschiede im Ertrag und Proteingehalt zwischen den N-Varianten. Auch hier scheint eine geringere N-Düngung ohne Einschränkungen möglich zu sein und positiv hinsichtlich der N-Effizienz zu bewerten. Die Ebene zeigt Unterschiede hinsichtlich des Proteingehalts. Bei einer ausreichenden Bestandesdichte können hier mit der Senke vergleichbare Erträge erzielt werden. Außerdem ist der Zusammenhang von Ertrag und Proteingehalt hier am größten. Die Förderung des Ertrags erscheint somit am effektivsten. Eine Düngung des gesamten N-Bedarfs ist am ehesten beim Standort Ebene sinnvoll. Je nach räumlicher Aufteilung der Standorte könnten die N-Mengen entsprechend umverteilt werden. Diese Aufteilung der N-Mengen beruht auf den Erkenntnissen aus dem Erntejahr 2020. Zwischen mehreren Jahren können deutliche Schwankungen auftreten, die witterungsbedingt

sind, wie die Literaturrecherche gezeigt hat (ISENSEE et al. 2003; EREKUL et al. 2005; KARATAY UND MEYER-AURICH 2019). Nur durch einen mehrjährigen Versuch lässt sich eine generelle Strategie ableiten. Es ist jedoch zu hinterfragen, ob solch eine Strategie sinnvoll ist.

6 Zusammenfassung

Die aktuelle Düngeverordnung schreibt in Regionen mit einem Grundwasser von chemisch schlechtem Zustand eine N-Düngung von 20 % unterhalb des Bedarfs vor. Seitens der Landwirtschaft wurde dies scharf kritisiert und als Wettbewerbsnachteil angesehen. Erfahrungen aus dem Nachbarland Dänemark zeigen, dass nachhaltig Erträge und Qualitäten von Weizen zurückgehen können. Die vorliegende Masterarbeit widmete sich der Auswirkungen einer reduzierten N-Düngung im Winterweizen nach dem §13a der DüVO. Zusätzlich wurden feldinterne Bodenunterschiede berücksichtigt und eine Unterteilung in Kuppe, Ebene und Senke vorgenommen. Diese Unterteilung bietet sich aufgrund des Standorts als hügelige Grundmoräne an. Außerdem wird herausgestellt, wie sich ein Praxisbetrieb solchen Herausforderungen stellen kann und wie das Finden einer Lösung bzw. Anpassung ablaufen kann.

Für die Untersuchung wurde für das Erntejahr 2020 ein Feldversuch unter Praxisbedingungen angelegt und durchgeführt. Die Versuchsanlage fällt in die Kategorie *On Farm Research*. Das Frühjahr 2020 war trockener als der langjährige Mittelwert, jedoch kompensierte dies zum einen ein niederschlagsreicher Winter und zum anderen eine sehr gute Niederschlagsverteilung ab Ende April. Der Ertrag lag mit durchschnittlich $10,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ auf einem sehr hohen Niveau. Der Proteingehalt befand hingegen sich bei knapp über 10 %.

Es wurden in zwölf Parzellen zwei N-Variante gegenübergestellt: 1. 100 % und 2. 80 % des ermittelten N-Bedarf. Hinsichtlich der N_{red} 80 % Variante wurden jeweils die Mengen in den Gaben und nicht die Anzahl der Gaben reduziert. Eine Gabe wurde jeweils am selben Tag in allen Parzellen appliziert. In den zwölf Parzellen wurden jeweils drei Untersuchungsorte markiert und mit einem GPS Handgerät aufgezeichnet. Die Untersuchungsorte wurden nach Relief in Kuppe, Ebene und Senke unterschieden. An diesen Orten wurden Entwicklungsstadien und Krankheiten bonitiert, hauptsächlich wurden sie jedoch für die Messungen mit dem N-Tester genutzt. Zur Ernte wurden an den Untersuchungsorten Schnittproben gezogen, welche im Labor auf einige Eigenschaften untersucht wurden. Am bedeutendsten war der Kornertrag und der Proteingehalt, die beide mithilfe der N-Düngung beeinflusst werden können. Außerdem wurden die Parzellen mit einem Kerndrusch beerntet, in dem versucht wurde, Randeinflüsse und Einflüsse der Fahrgassen zu vernachlässigen. Der Ertrag wurde in jeder Parzelle erfasst. Darüber hinaus wurde die Ertragskartierung als Messmethode berücksichtigt.

Der Kerndrusch zeigte hinsichtlich des Ertrags keine Unterschiede. Der höchste und der niedrigste Ertrag wurde in einer $bü$ 100% Parzelle gemessen. Die Proteingehalte waren tendenziell in den $bü$ 100 %-Parzellen höher. Daraus ist abzuleiten, dass durch eine geringere Düngung eine erheblich größere N-Effizienz erreicht wird. Es ist allerdings zu hinterfragen, ob

diese Effizienz nachhaltig für die Bodenfruchtbarkeit ist und welcher Einfluss auf den Jahreseffekt zurückzuführen ist. Die geringen Unterschiede zwischen den N-Varianten können zum einen auf eine günstige Witterung und zum anderen auf den sehr heterogenen Versuchsstandort zurückzuführen.

Dieser heterogene Standort wurde durch die Untersuchsorte beschrieben. Diese zeigen einige Unterschiede auf. Mit Ausnahme des TKM sind alle Werte aus der Laboruntersuchung verschieden, auch Kornertrag und Proteingehalt. Hierbei zeigen Kuppe und Senke untereinander die größten Unterschiede. Wird hierbei der Düngungseffekt untersucht, zeigen sich kleine Unterschiede. Die Kuppen und Ebenen zeigen geringere Proteingehalte bei geringerer Düngung, Senken jedoch nicht. Der Einfluss des Standorts auf den Ertrag ändert sich bei Einbezug der Düngevarianten insofern, dass der Kornertrag der N_{red} 80 % Parzellen statistisch nicht unterschiedlich ist, jedoch trotzdem ein sichtbar höherer Ertrag in den Senken erreicht wurde. Neben den Unterschieden zwischen den Standorten konnten einige Zusammenhänge mit Ertrag und Proteingehalt festgestellt werden. Halmlänge und Ährendichte beschreiben die Ertragsunterschiede. Sogar der Kornertrag korreliert stark positiv mit dem Proteingehalt. Diese Zusammenhänge werden von dem hohen Einfluss der Standorte begünstigt. Wird dieser Einfluss ausgeblendet und die einzelnen Standorte betrachtet, verändern sich die Zusammenhänge zum Teil. Dennoch zeigt sich ein positiver Zusammenhang von Ertrag und Proteingehalt, was gegen einen Verdünnungseffekt spricht.

Mit praxisüblichen Messmethoden können aussagekräftige Ergebnisse im On Farm Research erreicht werden. Die Parzellenerträge wurden mithilfe einer im Betrieb befindlichen Fahrzeugwaage erfasst und zeigten den geringen Einfluss der reduzierten N-Düngung auf den Ertrag. Selbst ohne Waage können Unterschiede mithilfe einer Ertragskartierung erfasst werden. Diese Unterschiede können sogar kleinräumiger, auf Ebene der Untersuchungsorte, nachvollzogen werden. Ebenso zeigt der Einsatz des N-Testers an den Untersuchungsorten Unterschiede, die bereits weit vor der Ernte Schwankungen von Proteingehalten, bzw. Kornerträgen erklärt.

Der Einfluss der verringerten Düngung zeigt sich in diesem Versuch als nicht sehr bedeutsam auf Ertrag und Protein. Allerdings wurde sich durch die Herausforderung intensiv mit dem Thema N-Düngung beschäftigt und es zeigte sich, dass die Erhöhung der N-Effizienz möglich ist, auch wenn dem Grenzen gesetzt sind. Beide genannten Aspekte sind als positive Erkenntnis aus der vorliegenden Arbeit herauszunehmen und gerade letzteres trägt zu einer ressourcenschonenden Landwirtschaft bei.

Literaturverzeichnis

- AGRARHEUTE (2015): Weizen bei 8,4 Prozent Protein: Dänen dürfen wieder mehr Düngen. (online: <https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/weizen-84-prozent-protein-daenen-duerfen-mehr-duengen-517944>) (Stand: 10.11.2020).
- ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3., aktualisierte und erw. Aufl. . Darmstadt: Wiss. Buchges.
- APEL, B. UND FECHNER, H. (2020): Düngung. (Hrsg.), Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH. S. 88-139.
- AWATER-ESPER, S. (2020): Der Beschluss der Düngeverordnung polarisiert weiter. (online: <https://www.topagrar.com/acker/news/der-beschluss-der-duengeverordnung-polarisiert-weiter-12010822.html>) (Stand: 07.02.2021).
- BACH, M.; HILLEBRECHT, B.; HUNSAGER, E. A.; STEIN, M. (2014): Berechnung von Stickstoff-Flächenbilanzen für die Bundesländer - Jahre 2003 bis 2011. 2. überarbeitete Fassung (ohne Berücksichtigung Biogas). Gießen: Justus-Liebig-Universität Gießen; Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement.
- BAUERNVERBAND M-V (2020): Bauernpräsident Kurreck: "Es wird schwieriger Lebensmittel in der bisherigen Qualität und Menge zu produzieren". (online: <https://www.bauernverband-mv.de/index.php/aktuelles/bauernpraesident-kurreck-es-wird-schwieriger-lebensmittel-der-bisherigen-qualitaet-und>) (Stand: 07.02.2021).
- BMEL (2019): Ackerbaustrategie 2035. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- BOCKHOLT, K. (2020): Alarmstufe für Qualitätsweizen: Rotegebiete besser differenzieren. (online: https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/alarmstufe-fuer-qualitaetsweizen-rote-gebiete-besser-differenzieren-563756?content_hub=565951) (Stand: 07.02.2021).
- BORCHART, I.; LUBKOWITZ, C.; KOCK, C.; SCHÄFER, B.; MÜLLER, M. (2018): Abschlussbericht. On-Farm-Research-Projekt (2007 – 2017) in Zusammenarbeit mit der Gutsverwaltung Helmstorf. Rendsburg: Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein.
- BORGOGNO-MONDINO, E.; LESSIO, A.; TARRICONE, L.; NOVELLO, V.; DE PALMA, L. (2018): A comparison between multispectral aerial and satellite imagery in precision viticulture. in: Precision Agriculture 19, 2, S. 195-217.
- BROWN, B.; WESTCOTT, M.; CHRISTENSEN, N.; PAN, B.; STARK, J. (2005): Nitrogen management for hard wheat protein enhancement. in: Pacific Northwest Extension Publication 578, S. 1-14.
- BULL, I.; RAMP, C.; WEGNER, C.; KURECK, L.; PETERS, J. (2015): Qualitätsdüngung zu Winterweizen. in: Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Heft 55, Beiträge zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie, S. 39-45.
- CAMPBELL, J. B. (2002): Introduction to remote sensing. 3. Aufl. London [u.a.]: Taylor & Francis.

- DüLVO M-V (2019): Landesverordnung über besondere Anforderungen an die Düngung in belasteten Gebieten vom 23. Juli 2019. In: GVOBl. M-V 2019, S.226.
- DüVO (2020): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 26. Mai 2017. In BGBl. I S. 1305, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 28. April 2020 BGBl. I S. 846
- DWD (2020): Jahresrückblick für Schwerin (59 m). (online: https://isabel.dwd.de/DWD-ISABEL/DE/meinagrarwetter/rueckblicke/jahr/_node.html) (Stand: 06.10.2020).
- ENGELN, P.; HACKBARTH, S.; TREUE, P. (1999): Effizienz der teilflächenspezifischen Düngung. in: Landtechnik 54, 2, S. 82–83.
- EREKUL, O.; ELLMER, F.; KÖHN, W.; ÖNCAN, F. (2005): Einfluss differenzierter Stickstoffdüngung auf Kornertrag und Backqualität von Winterweizen. in: Archives of Agronomy and Soil Science 51, 5, S. 523-540.
- FEIL, B. UND BÄNZIGER, M. (1999): Beziehungen zwischen dem Kornertrag und den Konzentration von Protein, Phosphor und Kalium in den Körnern von Sommerweizensorten. in: Pflanzenbauwissenschaften 3, 1, S. 1-8.
- FINCK, A. (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. 6., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Borntraeger.
- GANDORFER, M. (2005): Bewertung von Precision Farming dargestellt am Beispiel der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Weihenstephan: Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt.
- GRABO, A. (2006): On farm research. in: Wenkel, K.-O.; Wagner, P.; Morgenstern, M.; Luzi, K.; Eisermann, P. (Hrsg.), Land-und Ernährungswirtschaft im Wandel: Aufgaben und Herausforderungen für die Agrar und Umweltinformatik. Referate der 26. GIL Jahrestagung, 06.-08. März 2006 in Potsdam. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. S. 85-88.
- HAWKESFORD, M. J. (2014): Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. in: Journal of cereal science 59, 3, S. 276-283.
- HAWKESFORD, M. J. UND RICHE, A. B. (2020): Impacts of G x E x M on nitrogen use efficiency in wheat and future prospects. in: Frontiers in Plant Science 11, S. 1157.
- HEYN, J. (2006): Ertrag, Ertragskomponenten, Qualitätseigenschaften, Rentabilität, N-Saldo und N-Ausnutzung bei steigender N-Düngung bei den wichtigsten Ackerfrüchten. Kassel: Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen - Fachgebiet Pflanzenproduktion.
- ISENSEE, E.; THIESSEN, E.; TREUE, P. (2003): Mehrjährige Erfahrungen mit der teilflächenspezifischen Düngung und Ernte. in: Agrartechnische Forschung 9, 5, S. 50-63.
- JKI (2021): Precision Farming. (online: <https://www.julius-kuehn.de/agrartechnik/precision-farming/>) (Stand: 08.02.2021).

- KARATAY, Y. N. UND MEYER-AURICH, A. (2019): Standortangepasstes N-Düngemanagement im Weizenanbau als Klimaanpassungsmaßnahme bei zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat. in: Meyer-Aurich, A.; Gandorfer, M.; Barta, N.; Gronauer, A.; Kantelhardt, J.; Floto, H. (Hrsg.), 39. GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für landwirtschaftliche Betriebe in kleinstrukturierten Regionen - ein Widerspruch in sich? Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. S. 101-106.
- KARATAY, Y. N.; MEYER-AURICH, A.; HUNSTOCK, U.; STELLA, T.; NENDEL, C. (2019): Kosteneffiziente Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch Düngereduktion: standortspezifische Analyse mit simulierten Ertragsfunktionen. in: Meyer-Aurich, A.; Gandorfer, M.; Barta, N.; Gronauer, A.; Kantelhardt, J.; Floto, H. (Hrsg.), 39. GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für landwirtschaftliche Betriebe in kleinstrukturierten Regionen-ein Widerspruch in sich? Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. S. 107-112.
- KLAGES, S.; OSTERBURG, B.; HANSEN, H. (2017): Betriebliche Stoffstrombilanzen für Stickstoff und Phosphor - Berechnung und Bewertung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut - Bundesforschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei.
- KLEINELÜMERN, U.; SCHNEIDER, M.; LEMKE, S. (2020): Mecklenburg-Vorpommern - Nordische Vereisungen. (online: <http://www.heimatundwelt.de/kartenansicht.xtp?artId=978-3-14-100265-2&stichwort=Saale&fs=1>) (Stand: 10.10.2020).
- KROPF, U. (2012): Getreide-Guide: Aussaat, Bestockung, Vegetationsstart, Schossen, Kornfüllung, Qualität Münster: Landwirtschaftsverlag.
- LÖFFLER, E.; HONECKER, U.; STABEL, E. (2005): Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten; mit 9 Tabellen. 3., neubearb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Borntraeger.
- LORENZ, F. UND MÜNCHHOFF, K. (2015): Teilflächen bewirtschaften. Schritt für Schritt. Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- LUDOWICY, C.; SCHWAIBERGER, R.; LEITHOLD, P. (2002): Precision farming. Handbuch für die Praxis. Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- MIEDANER, T. (2014): Kulturpflanzen. Botanik - Geschichte - Perspektiven. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum.
- MITTERMAYER, M.; GILG, A.; MAIDL, F.-X.; HÜLSBERGEN, K.-J. (2020): Erfassung der räumlichen Variabilität von Boden- und Pflanzenparametern: Grundlage für die teilflächenspezifische N-Bilanzierung. in: Gandorfer, M.; Meyer-Aurich, A.; Bernhardt, H.; Maidl, F.-X.; Fröhlich, G.; Floto, H. (Hrsg.), 40. GIL-Jahrestagung, Digitalisierung für Mensch, Umwelt und Tier. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. S. 181-186.
- MLUV (2005): Parabraunerde. Steckbriefe Brandenburger Böden. 2. erweiterte Auflage. Potsdam: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV).
- MÖLLERS, C. (2000): Stickstoffeffizienz landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Berlin: Schmidt.

- N.N. (2016): Ertragsstruktur und Bestandesaufbau bei Getreide. in: Österreichische beschreibende Sortenliste 2016.
- N.N. (2020a): Geschiebelehm. (online: <https://www.chemie.de/lexikon/Geschiebelehm.html>) (Stand:
- N.N. (2020b): Klima Pokrent. (online: <https://de.climate-data.org/europa/deutschland/mecklenburg-vorpommern/pokrent-319349/>) (Stand: 06.10.2020).
- RECKLEBEN, Y. UND ISENSEE, E. (2004): Einflüsse auf Proteingehalt und Ertrag bei Getreide. in: LANDTECHNIK 59, 3, S. 144-145.
- ROMAN, A. UND URSU, T. (2016): Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks. in: Opreanu, C. H. und Lăzărescu, V.-A. (Hrsg.), Landscape archaeology on the northern frontier of the roman empire at Porolissum. Cluj-Napoka: Romanian Academy - Institute of archaeology and history of art. S. 141-152.
- SCHMIDHALTER, U.; JUNGERT, S.; EBERTSEDER, T.; DUDA, R.; GUTSER, R.; GERL, G. (2003): Erfassung repräsentativer Kenngrößen der Wasserverfügbarkeit und des N-Haushaltes von Teilschlägen. in: Forschungsverbund Agrarökosysteme München Jahresbericht 2002, S. S. 109-116.
- SCHUBERT, S. (2018): Pflanzenernährung. 3., vollständig überarb. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- STURM, H.; BUCHNER, A.; ZERULLA, W. (1994): Gezielter düngen. Integriert - wirtschaftlich - umweltgerecht. 3., vollkommen neu überarb. Aufl. Frankfurt (Main): DLG-Verl. [u.a.].
- STYCZEN, M. E.; ABRAHAMSEN, P.; HANSEN, S.; KNUDSEN, L. (2020): Model analysis of the significant drop in protein content in Danish grain crops from 1990-2015. in: European Journal of Agronomy 118, S. 126068.
- TREUE, P. (2002): Erträge und N-Gabe nach mehrjähriger teilflächenspezifischer Bewirtschaftung. in: LANDTECHNIK 57, 1, S. 14–15.
- WAGNER, P. (2004): Wirtschaftlichkeit von Precision Farming- Methoden und Möglichkeiten der Wirtschaftlichkeitsprüfung im landwirtschaftlichen Unternehmen. in: Hufnagel, J.; Herbst, R.; Jarfe, A.; Werner, A. (Hrsg.), Precision Farming, Analyse, Planung, Umsetzung in der Praxis. Münster: KTBL-Schriften Vertrieb im Landwirtschaftsverlag. S. S. 31-53.
- WENDLAND, M. (2020): Neue Düngeverordnung: Die wichtigsten Änderungen im Überblick. (online: <https://www.agrarheute.com/pflanze/neue-duengeverordnung-wichtigsten-aenderungen-ueberblick-568064>) (Stand: 27.10.2020).
- YARA (2020): N-Tester. (online: <https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/tools-und-services/n-tester/>) (Stand: 29.11.2020).
- ZIESEMER, A. UND LEHMANN, E. (2009): Rentabler Weizenanbau - Entwicklung und Perspektiven: Weizen bleibt der Überflieger. in: Neue Landwirtschaft Heft 4, S. 22-25.

Anhang

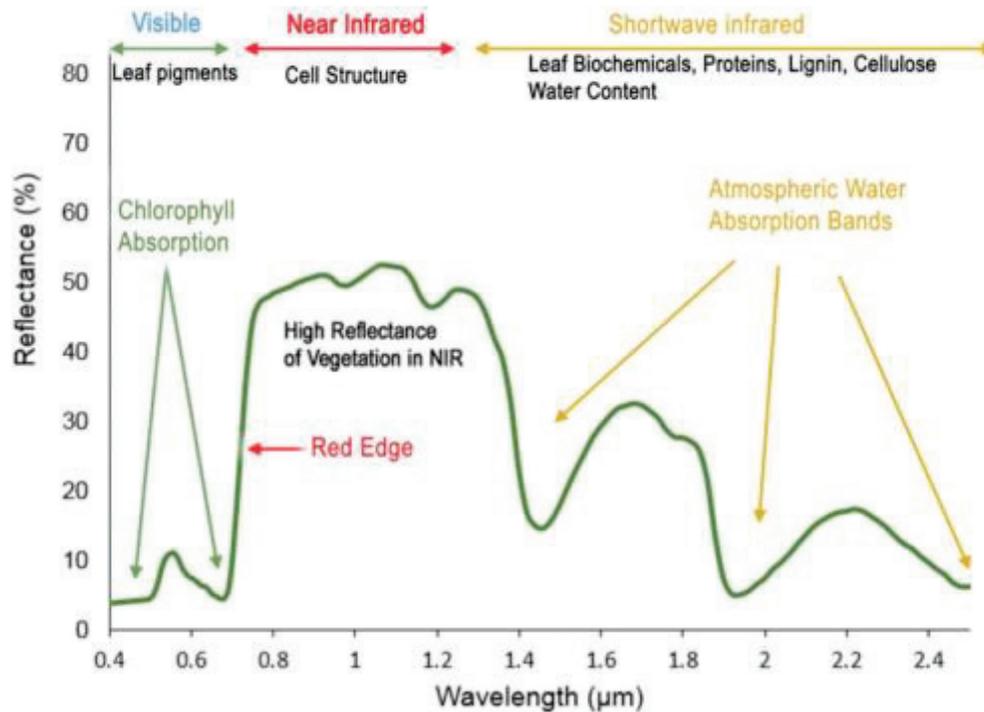


Abbildung A 1: Zusammenhang der Wellenlänge des Lichts und der relativen Reflektion, unterteilt in sichtbares, nahinfrarotes und kurzwelleninfrarotes Licht (ROMAN UND URSU 2016, S. 145)

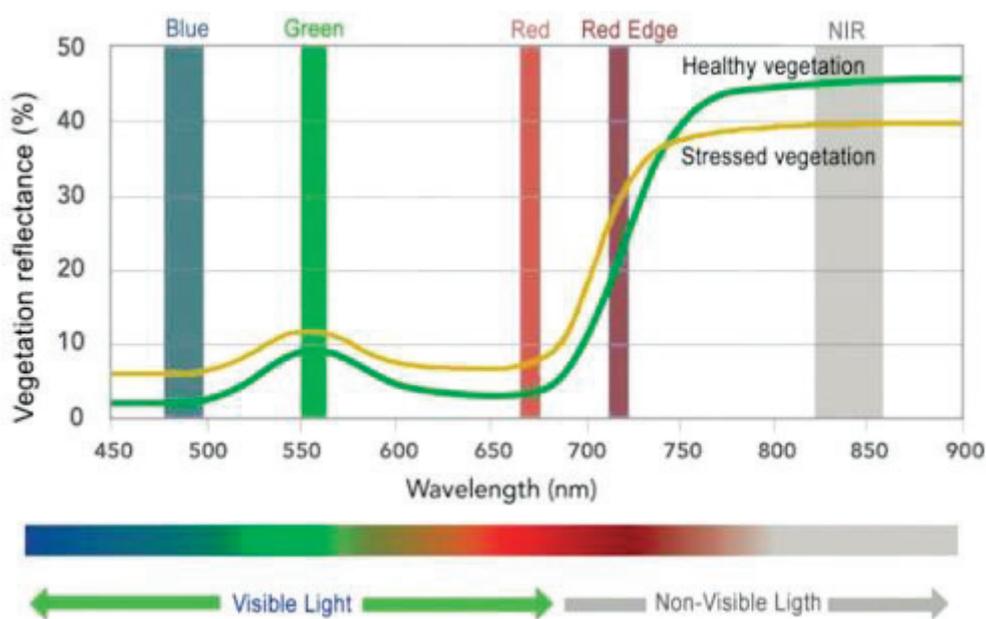


Abbildung A 2: Gegenüberstellung des Zusammenhangs der Wellenlänge des Lichts und der relativen Reflektion in Bezug auf vitale und gestresste Vegetation/Pflanzen (ROMAN UND URSU 2016, S. 145)

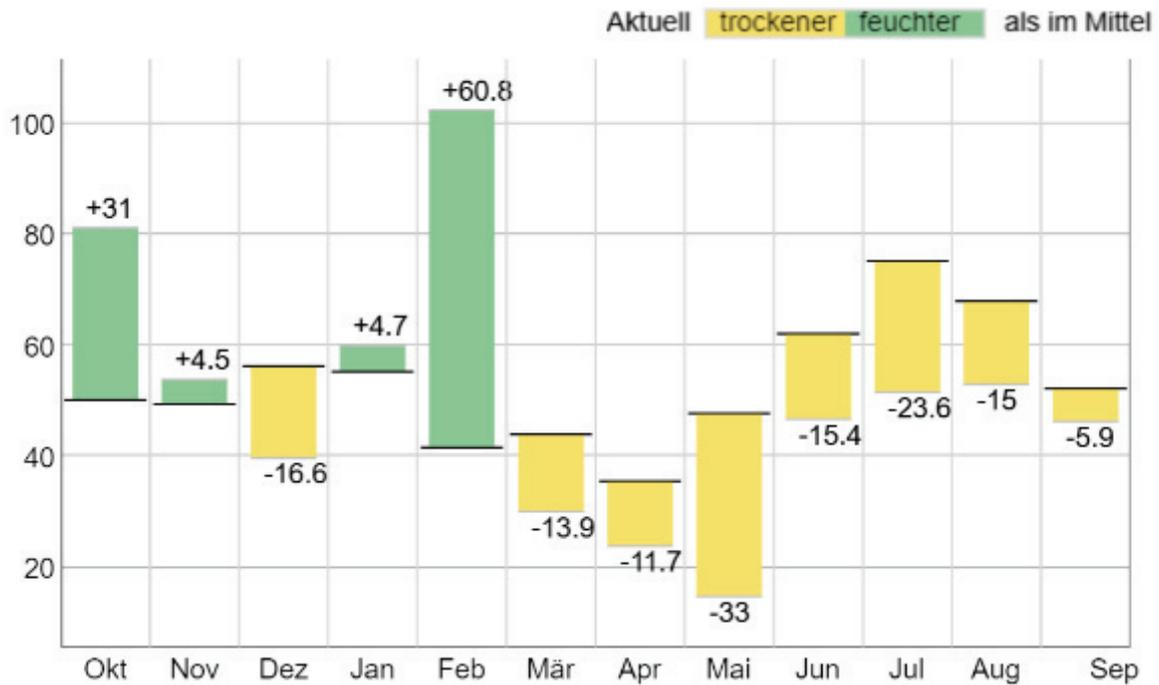


Abbildung A 3: Monatliche Niederschläge im Vergleich zum langjährigen Mittelwert an der Wetterstation Schwerin (DWD 2020)

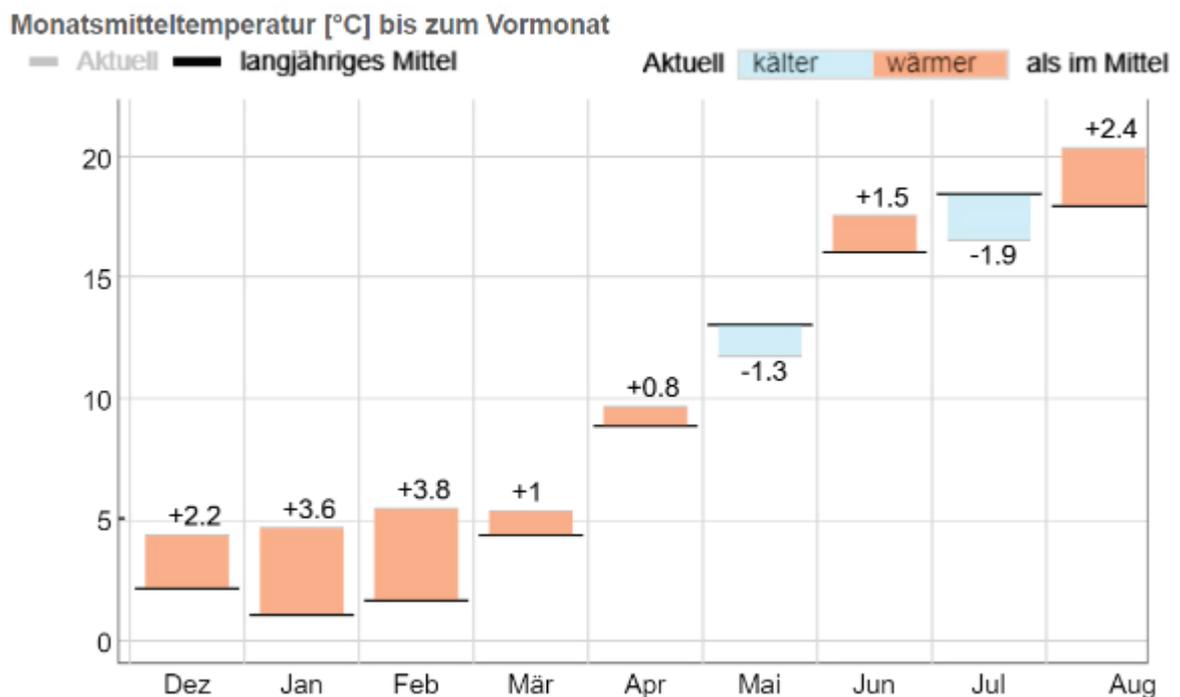


Abbildung A 4: Monatsmitteltemperatur im Vergleich zum langjährigen Mittelwert an der Wetterstation Schwein (DWD 2020)



Abbildung A 5: Bruker MPA II NIR-Sensor

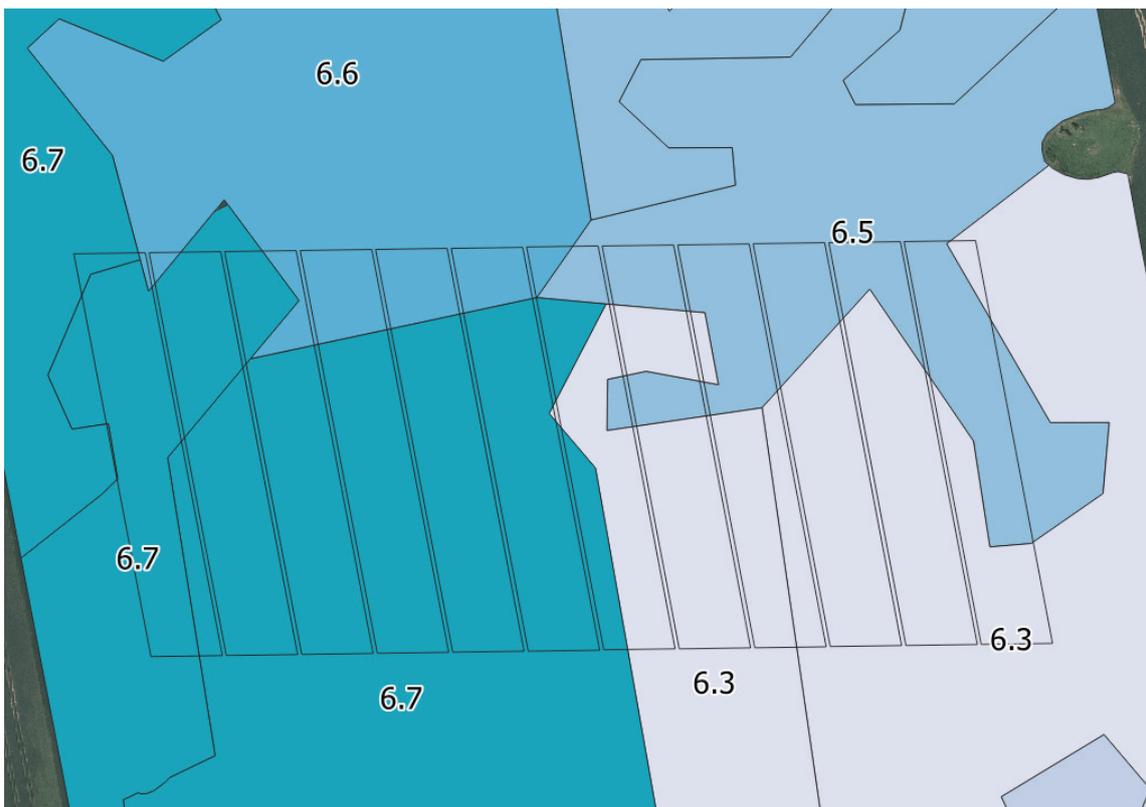


Abbildung A 6: Übersicht der pH-Werte innerhalb der einzelnen Beprobungszonen (Ergebnisse der Bodenuntersuchungen aus dem Jahr 2016)

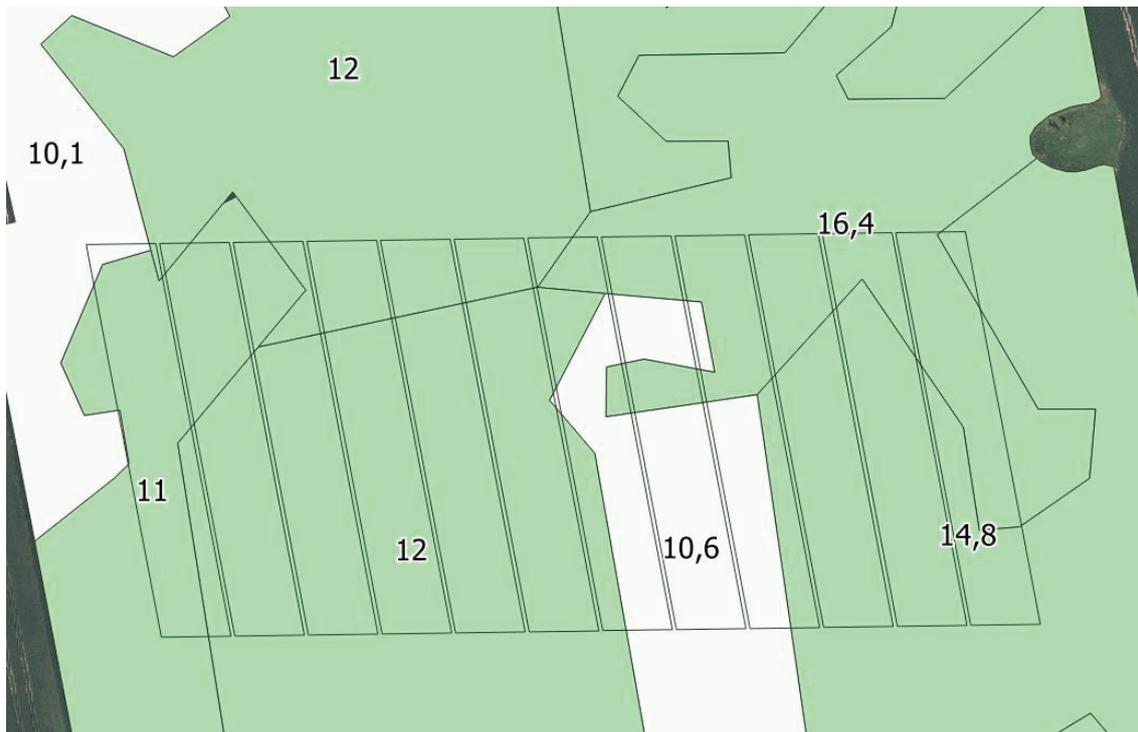


Abbildung A 7: Übersicht der K-Versorgung [mg K₂O-100 g Boden⁻¹] in den Beprobungszonen, die sich mit den Versuchspartellen schneiden (Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus dem Jahr 2016). Farblich unterschiedene Versorgungsstufen: Weiß = B; Grün = C

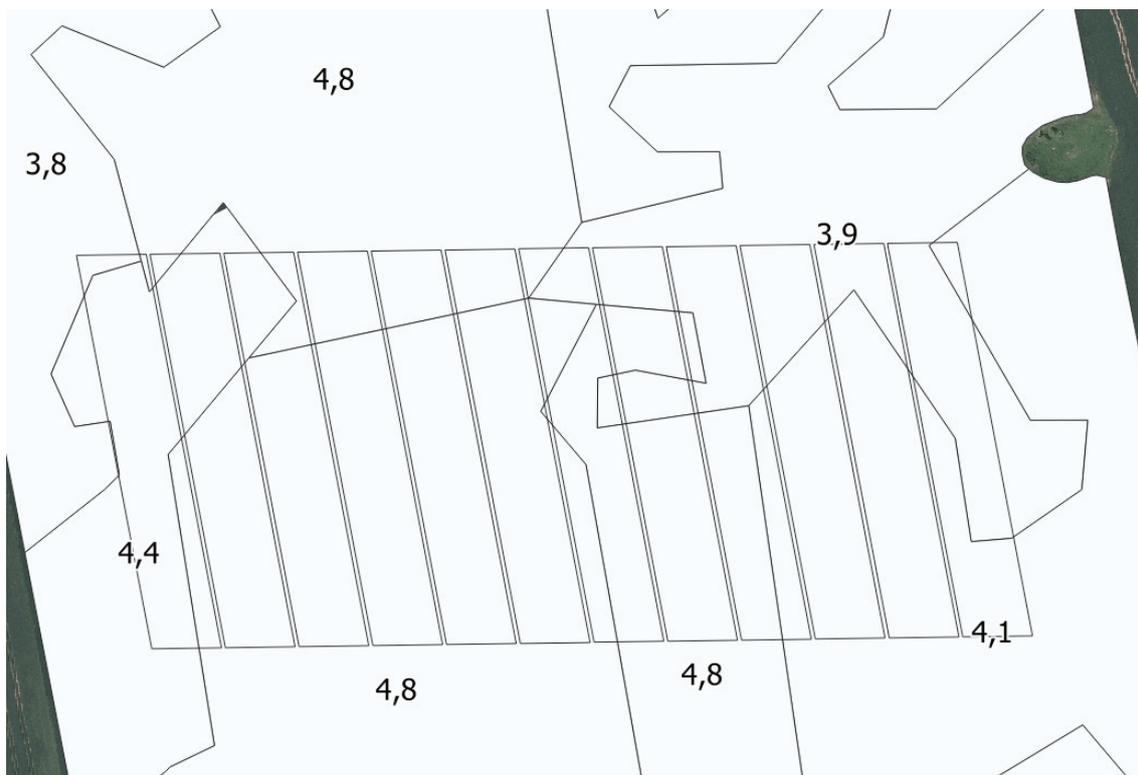


Abbildung A 8: Übersicht der P-Versorgung [mg P₂O₅-100 g Boden⁻¹] in den einzelnen Beprobungszonen, die sich mit den Versuchspartellen schneiden (Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus dem Jahr 2016). Farbe Weiß = Versorgungsstufe B

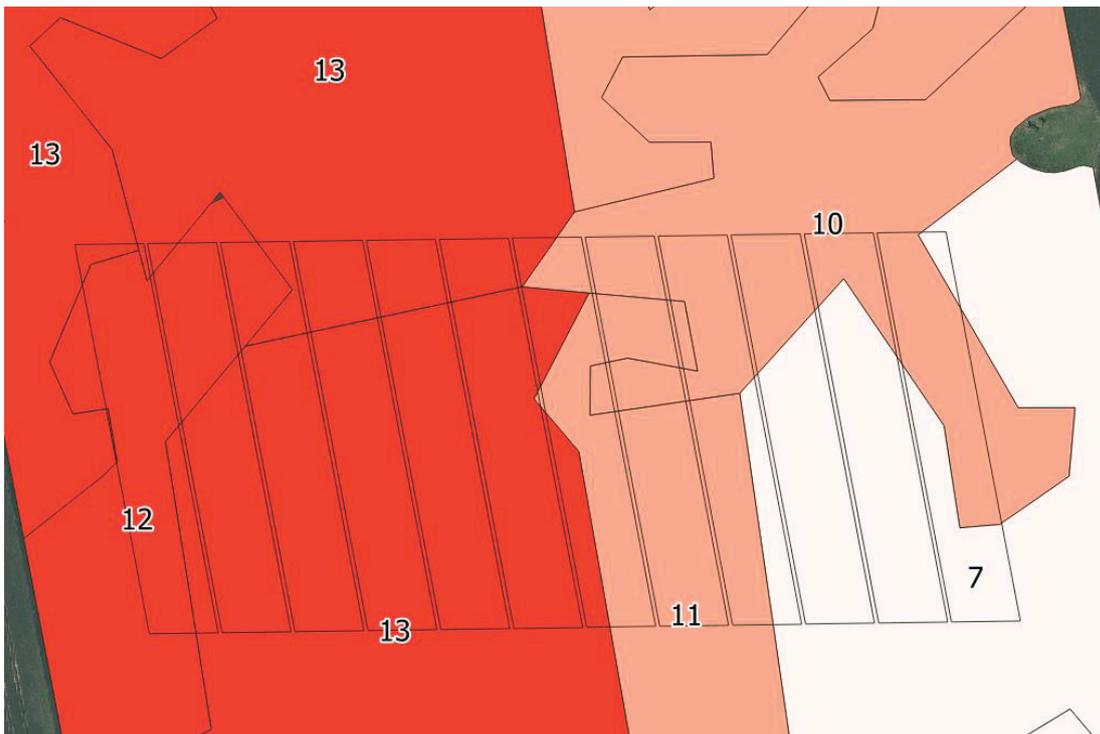


Abbildung A 9: Übersicht der Mg-Versorgung [$\text{mg Mg} \cdot 100 \text{ g Boden}^{-1}$] in den einzelnen Beprobungszonen, die sich mit den Versuchspartellen schneiden (Ergebnisse der Bodenuntersuchung aus dem Jahr 2016). Farblich unterschiedene Versorgungsstufen: Weiß = B; Hellrot = C; Rot = D

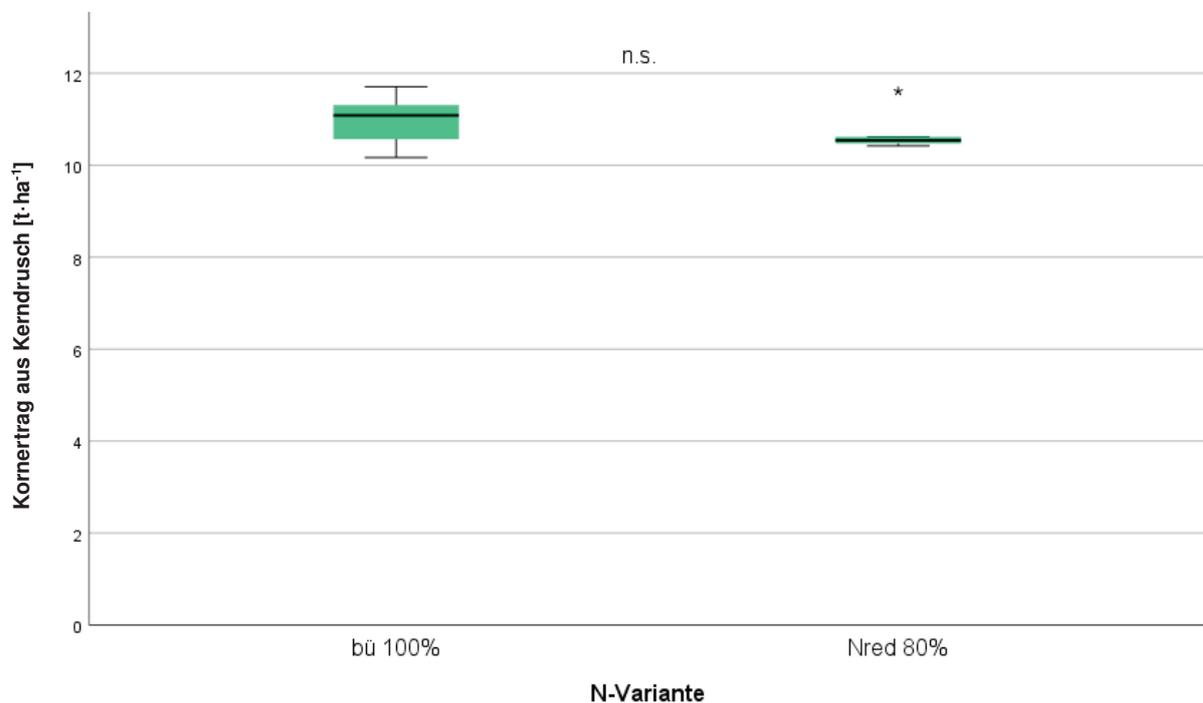


Abbildung A 10: Einfluss der Düngevariante auf den Kornertrag der Partellen. Der p-Wert zeigt keine signifikanten Ertragsunterschiede ($\alpha=0,05$)

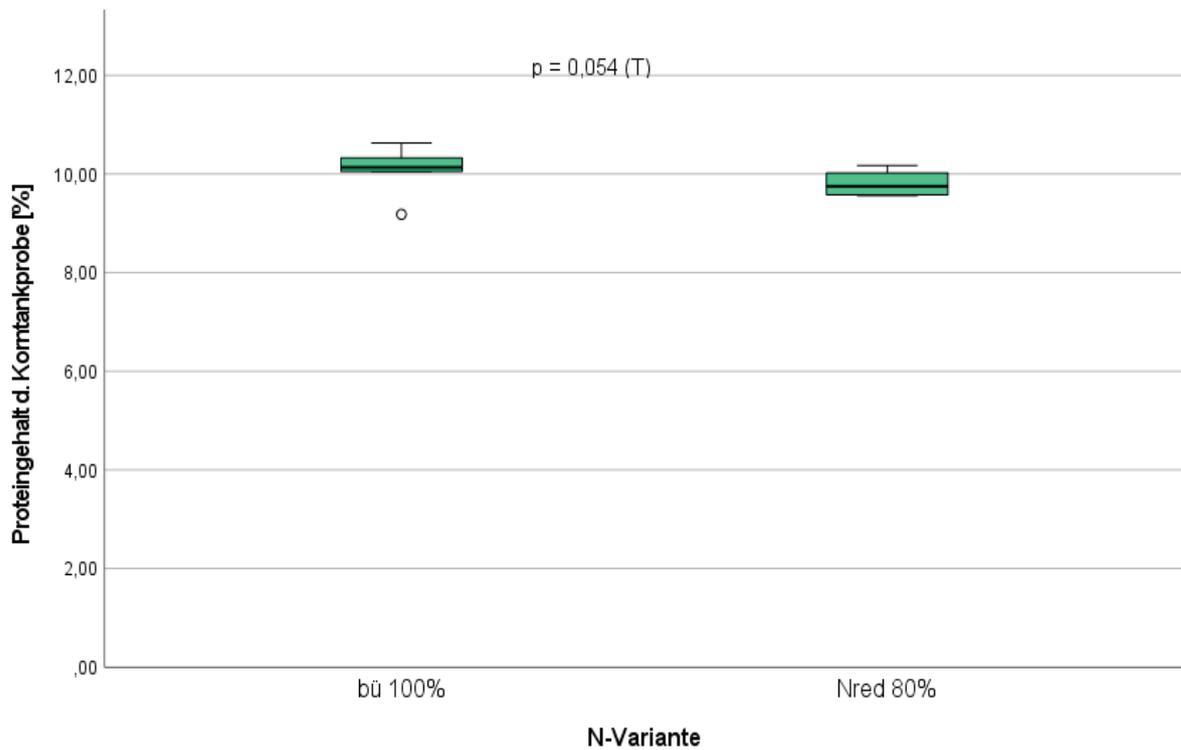


Abbildung A 11: Einfluss der N-Variante auf den Proteingehalt in den Parzellen. Der p-Wert zeigt tendenzielle Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

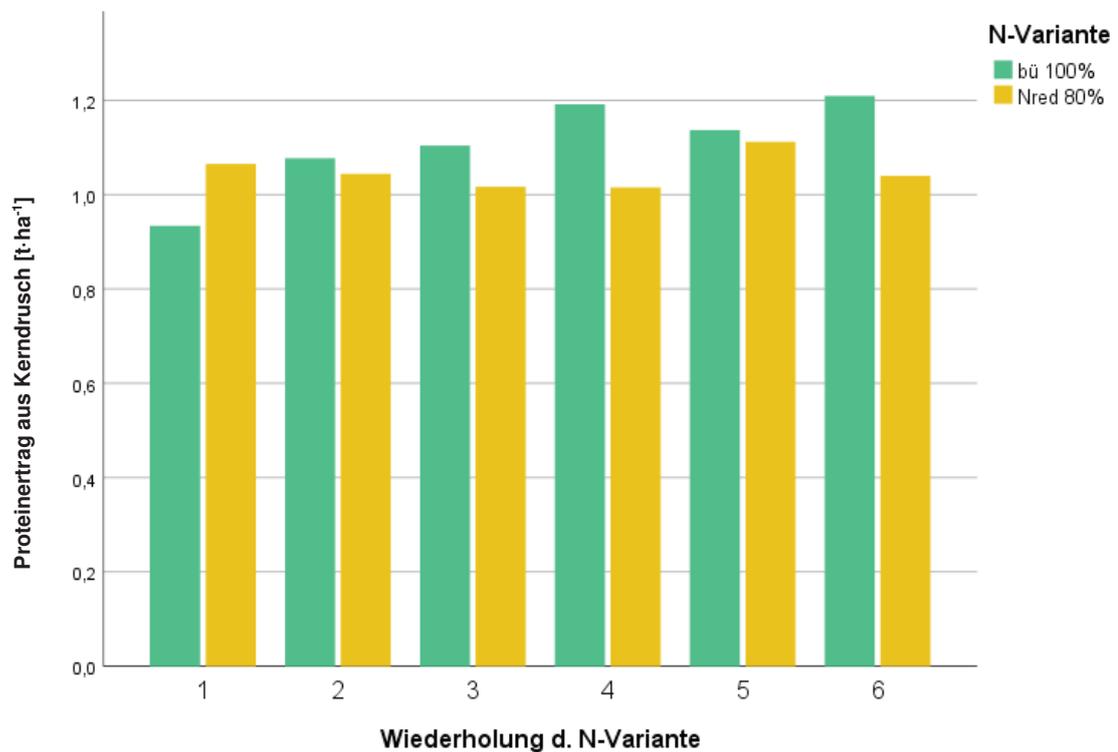


Abbildung A 12: Errechneter Proteinertrag des Parzellenkerndruschs, Differenzierung zwischen den zwei N-Varianten

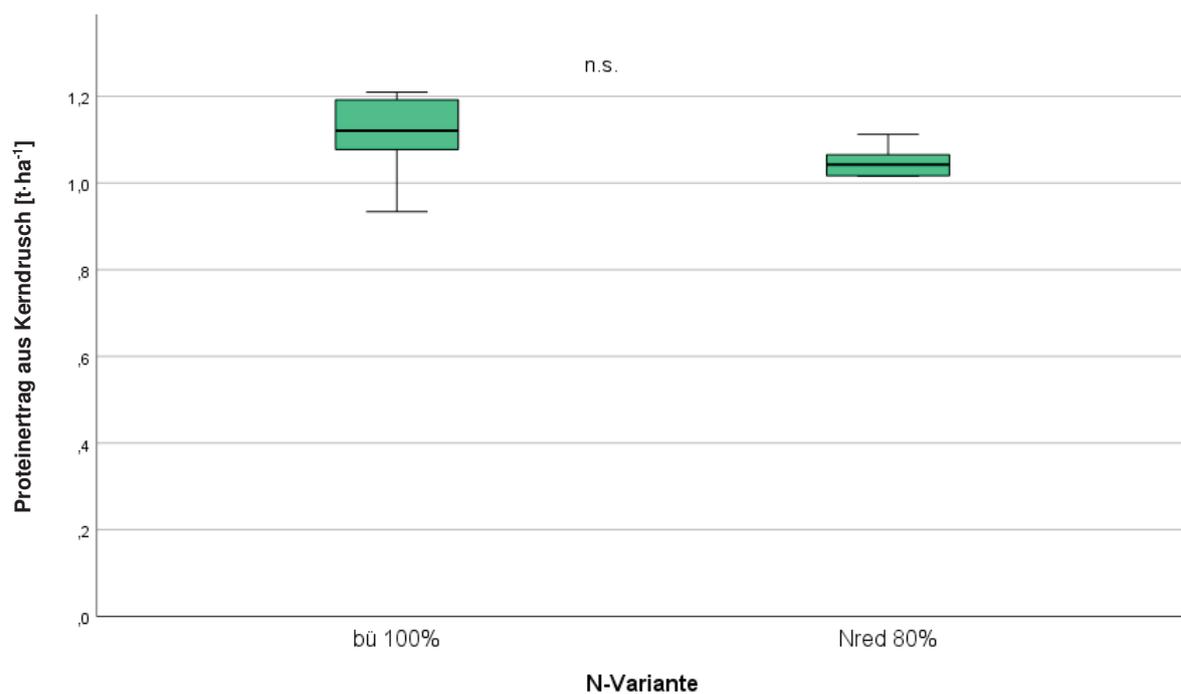


Abbildung A 13: Einfluss der N-Variante auf den Proteintrag des Parzellenkerndruschs. Der p-Wert zeigt keine signifikanten Unterschiede ($\alpha=0,05$).

Tabelle A 1: Ergebnisse des Post-Hoc-Tests zur Unterscheidung der N-Tester Werte nach Standort an den fünf Untersuchungstagen ($\alpha=0,05$)

Abhängige Variable	Standort	Standort	Mittelwertdifferenz	Signifikanz
N-Tester 13.04.	Ebene	Kuppe	14,594	0,142
		Senke	-7,358	0,919
	Kuppe	Senke	-21,953	0,012
N-Tester 29.04.	Ebene	Kuppe	19,161	0,081
		Senke	-12,681	0,406
	Kuppe	Senke	-31,842	0,002
N-Tester 20.05.	Ebene	Kuppe	13,706	0,218
		Senke	-29,189	0,001
	Kuppe	Senke	-42,894	<0,001
N-Tester 01.06.	Ebene	Kuppe	15,355	0,305
		Senke	-19,541	0,119
	Kuppe	Senke	-34,897	0,002
N-Tester 17.06.	Ebene	Kuppe	16,389	0,588
		Senke	-50,778	<0,001
	Kuppe	Senke	-67,167	<0,001

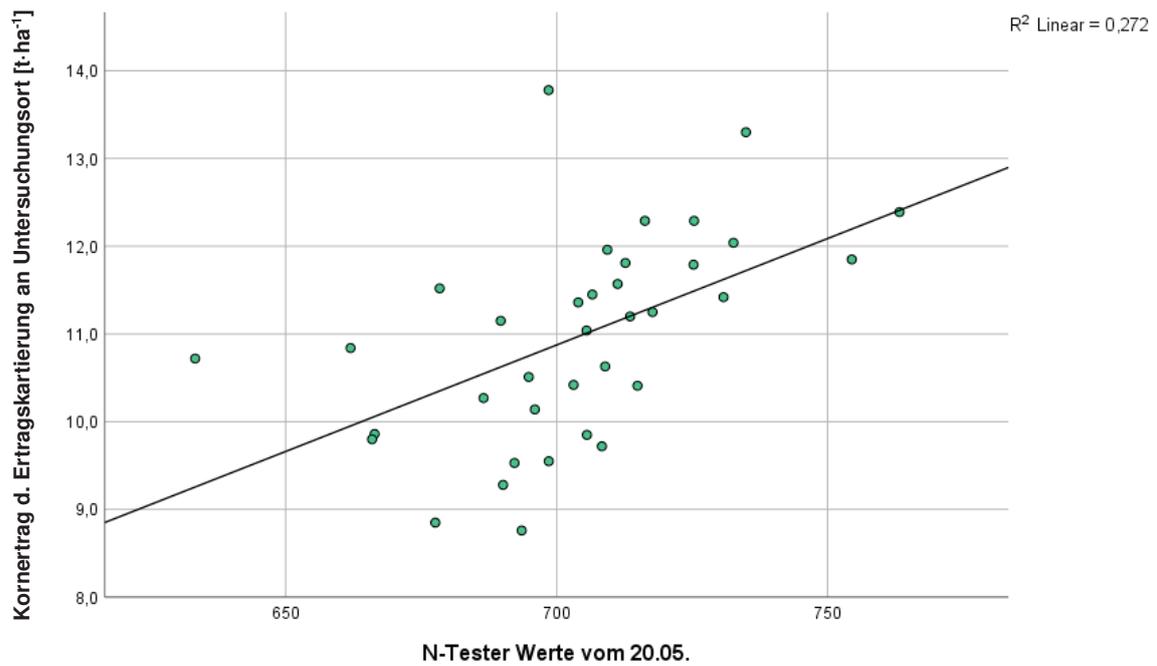


Abbildung A 14: Zusammenhang des N-Tester Werts vom 20.05. mit dem Wert der Ertragskartierung an den 36 Untersuchungsorten der zwölf Parzellen. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

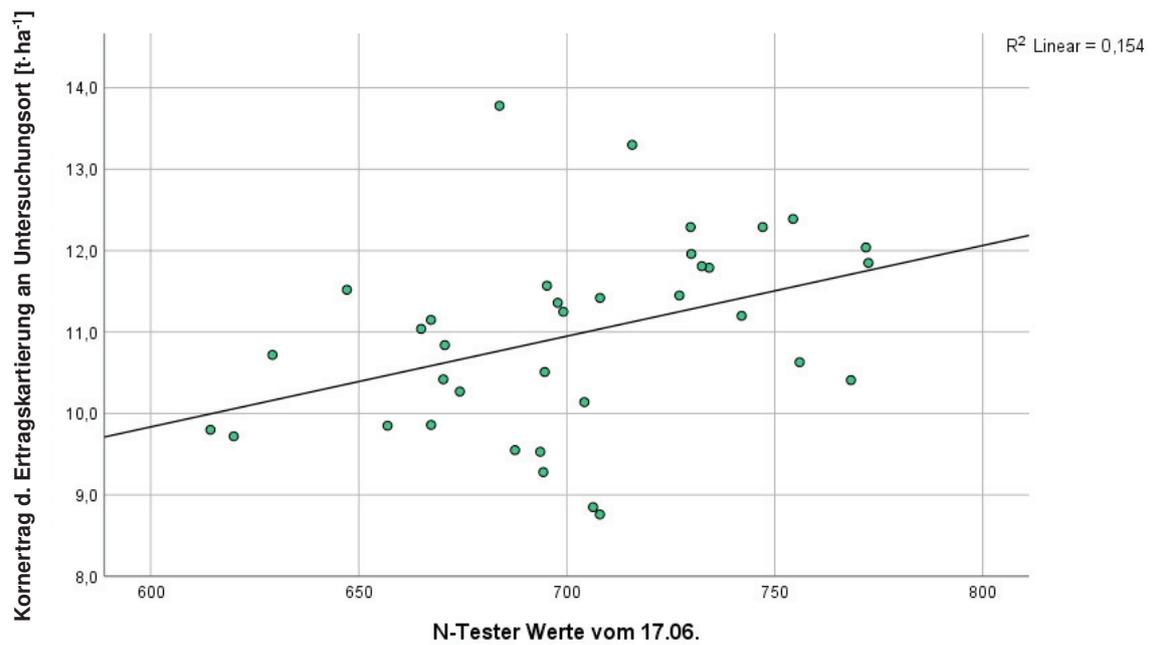


Abbildung A 15: Zusammenhang des N-Tester Werts vom 17.06. mit dem Wert der Ertragskartierung an den 36 Untersuchungsorten der 12 Parzellen. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

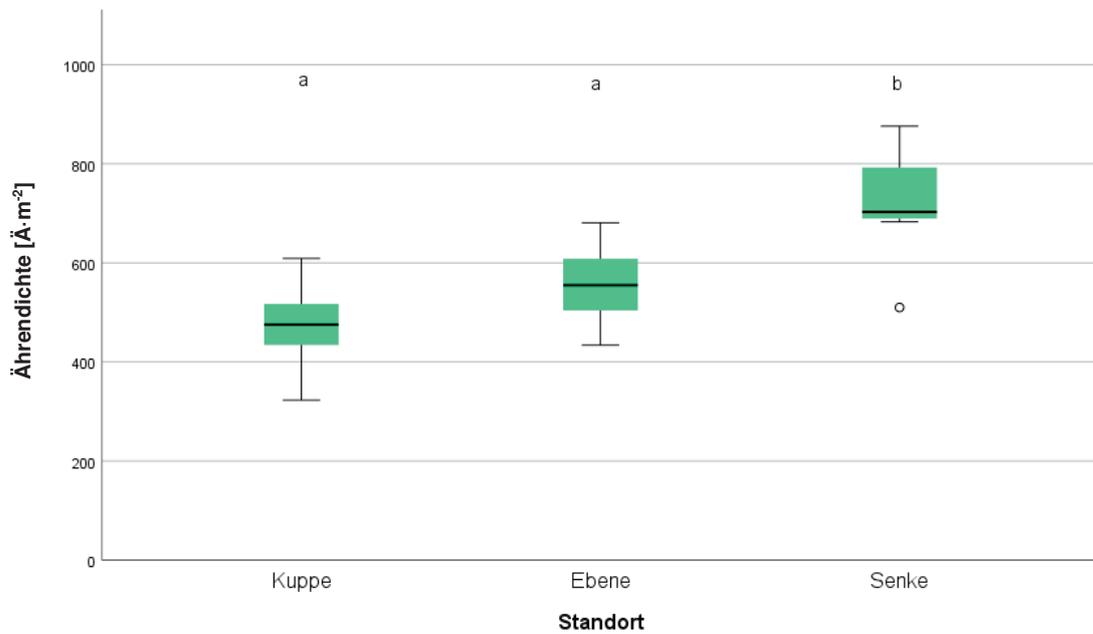


Abbildung A 16: Einfluss des Standorts, aufgeteilt in Kuppe, Ebene und Senke auf die Ährendichte. Berücksichtigung aller Proben Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

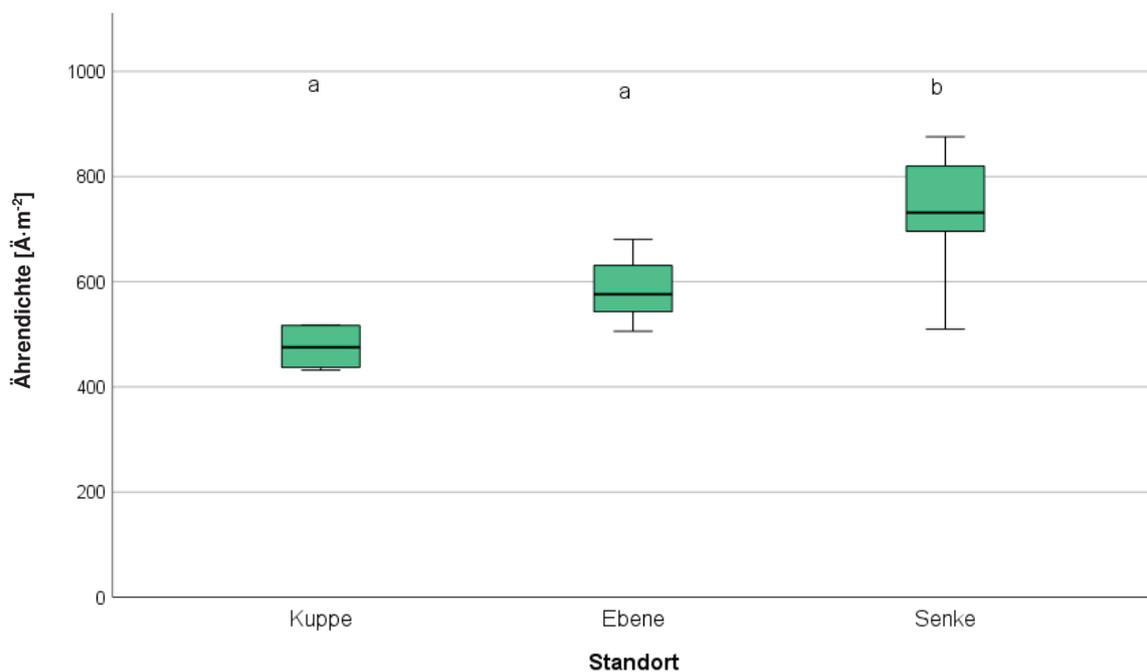


Abbildung A 17: Einfluss des Standorts, aufgeteilt in Kuppe, Senke und Ebene auf die Ährendichte. Berücksichtigung der Schnittproben ohne die Parzelle 1 u. 2. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede aus dem Post-Hoc-Test ($\alpha=0,05$)

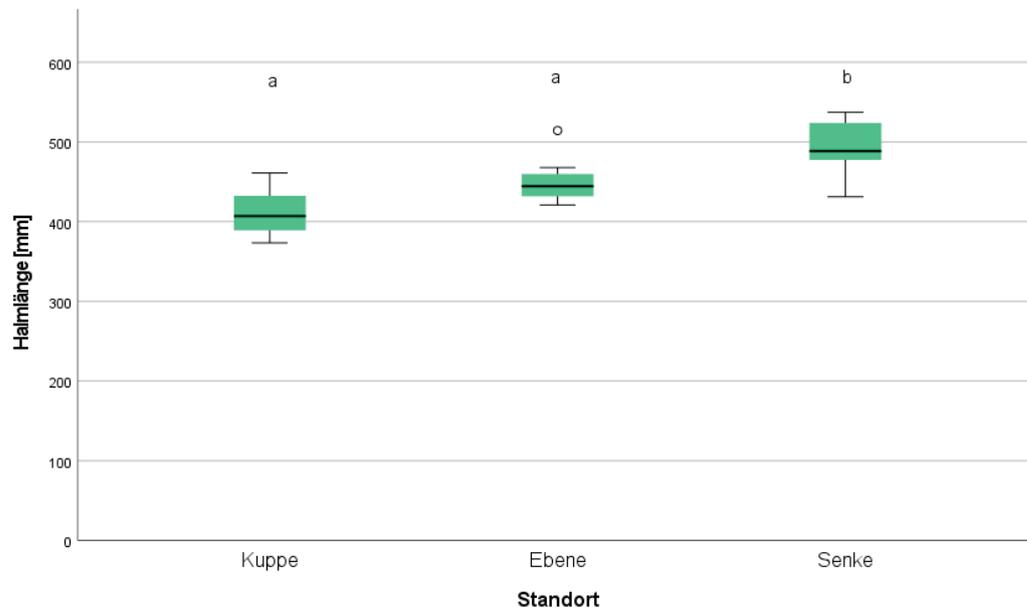


Abbildung A 18: Einfluss des Standorts auf die Halmlänge. Betrachtung aller Schnittproben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)

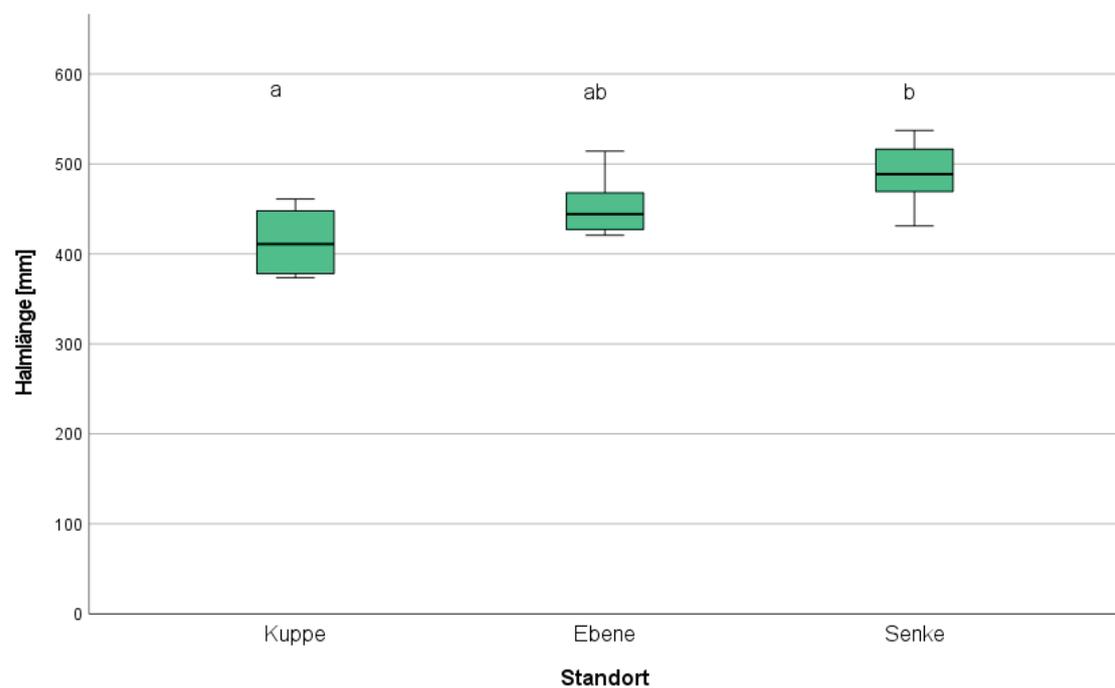


Abbildung A 19: Einfluss des Standorts auf die Halmlänge. Betrachtung der Schnittproben ohne die Parzelle 1 u. 2. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)

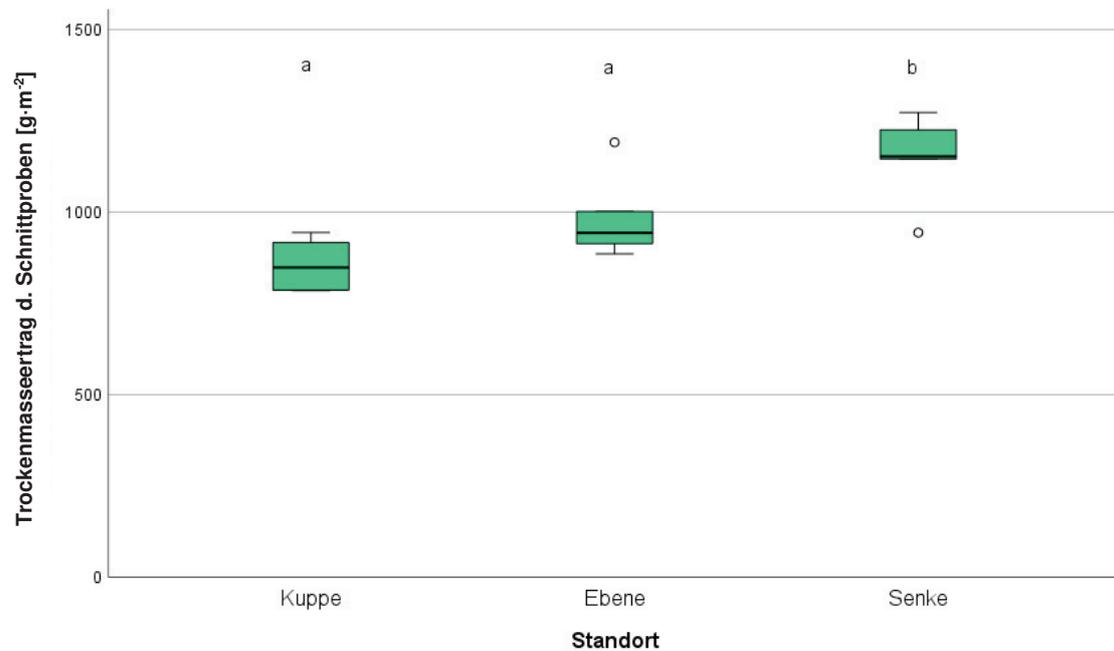


Abbildung A 20: Einfluss des Standorts auf den Kornertrag (trocken) der Schnittproben (ohne Parzelle 1 u. 2). Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Standorten ($\alpha=0,05$)

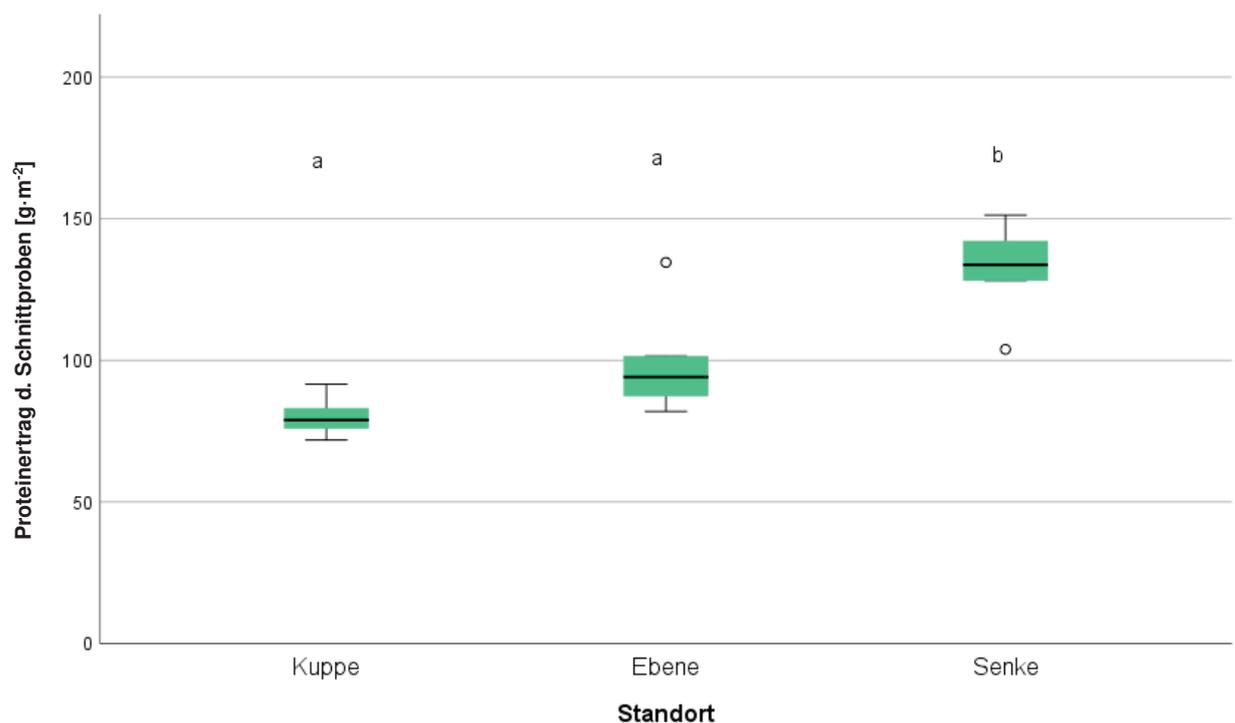


Abbildung A 21: Einfluss des Standorts auf den Proteinertrag der Untersuchungsorte. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Standorten bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Tabelle A 2: Übersicht der Korrelationsanalyse der Ertrags- und Qualitätseigenschaften zu den Werten der Laboranalyse. Differenzierung zwischen allen Proben und dem Ausschluss der Proben aus Parzelle 1 u. 2.

		Alle Proben		Ohne Parzelle 1 u. 2	
		Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Untersuchungsort [%]	Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Untersuchungsort [%]
Halmlänge [mm]	Korr.	,791*	,841*	,875*	,817*
	Sig.	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	N	24	24	18	18
Ährendichte [Ä·m ⁻²]	Korr.	,962*	,850*	,953*	,884*
	Sig.	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	N	24	24	18	18
Tausendkorn- masse [g]	Korr.	-0,227	-0,339	-0,300	-0,376
	Sig.	0,287	0,105	0,227	0,124
	N	24	24	18	18
Kornzahl je Ähre	Korr.	-,719*	-,609*	-,614*	-,536*
	Sig.	<0,001	0,002	0,007	0,022
	N	24	24	18	18
Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Korr.	1	,834*	1	,902*
	Sig.		<0,001		<0,001
	N	24	24	18	18
Proteingehalt Untersuchungs- ort [%]	Korr.	,834*	1	,902*	1
	Sig.	<0,001		<0,001	
	N	24	24	18	18

* markiert Signifikanz

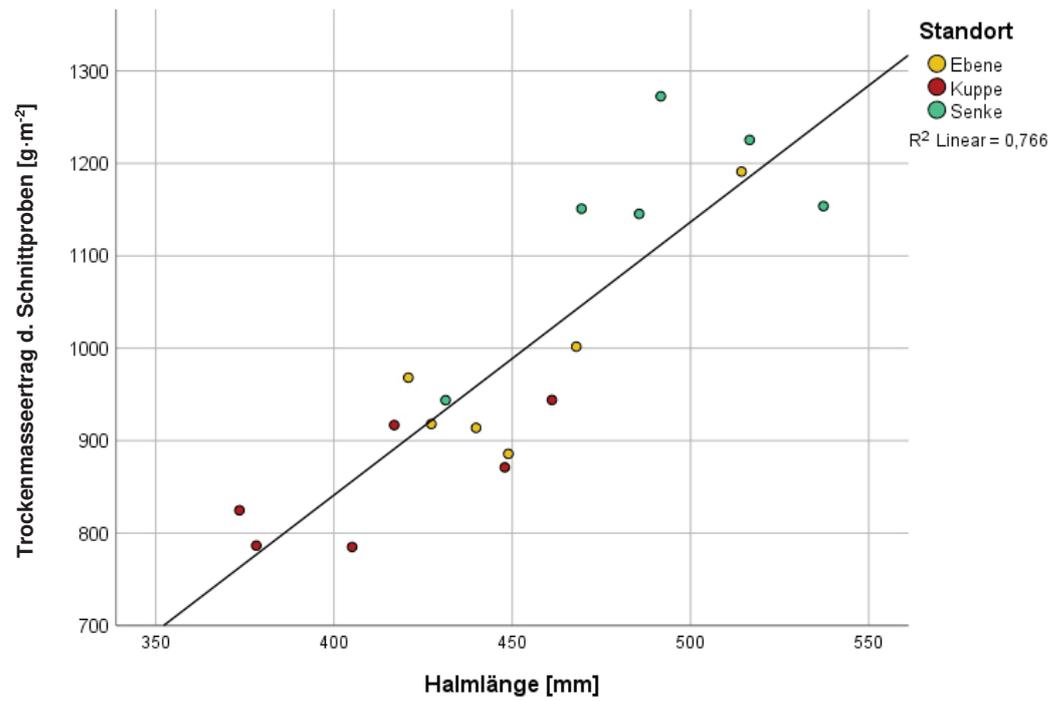


Abbildung A 22: Zusammenhang des Trockenmasseertrags und der Halmlänge kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Tabelle A 3: Übersicht der Korrelationsanalyse des Ertrags und Proteingehalts mit den N-Tester Werten sowie dem NDVI. Differenzierung der Proben zwischen allen Proben und dem Ausschluss der Proben aus Parzelle 1 u.2.

		Alle Proben		Ohne Parzelle 1 u. 2	
		Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Untersuchungsort [%]	Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Untersuchungsort [%]
N-Tester 13.04.	Korrelation	,307	,520	,480	,487
	Sig.	0,145	0,009	0,044	0,040
	N	24	24	18	18
N-Tester 29.04.	Korrelation	,523	,483	,642	,487
	Sig.	0,009	0,017	0,004	0,040
	N	24	24	18	18
N-Tester 20.05.	Korrelation	,574	,725	,654	,697
	Sig.	0,003	<0,001	0,003	0,001
	N	24	24	18	18
N-Tester 01.06.	Korrelation	,434	,662	,646	,742
	Sig.	0,034	<0,001	0,004	<0,001
	N	24	24	18	18
N-Tester 17.06.	Korrelation	,696	,814	,837	,853
	Sig.	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	N	24	24	18	18
NDVI 19.04.	Korrelation	,504	,593	0,403	,512
	Sig.	0,012	0,002	0,098	0,030
	N	24	24	18	18
NDVI 29.05.	Korrelation	,442	,587	0,333	0,464
	Sig.	0,030	0,003	0,177	0,053
	N	24	24	18	18
NDVI 15.06.	Korrelation	,486	,566	0,376	0,452
	Sig.	0,016	0,004	0,124	0,059
	N	24	24	18	18

NDVI 23.06.	Korrelation	,547	,629	,517	,603
	Sig.	0,006	0,001	0,028	0,008
	N	24	24	18	18
NDVI 23.07.	Korrelation	,782	,904	,844	,900
	Sig.	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	N	24	24	18	18

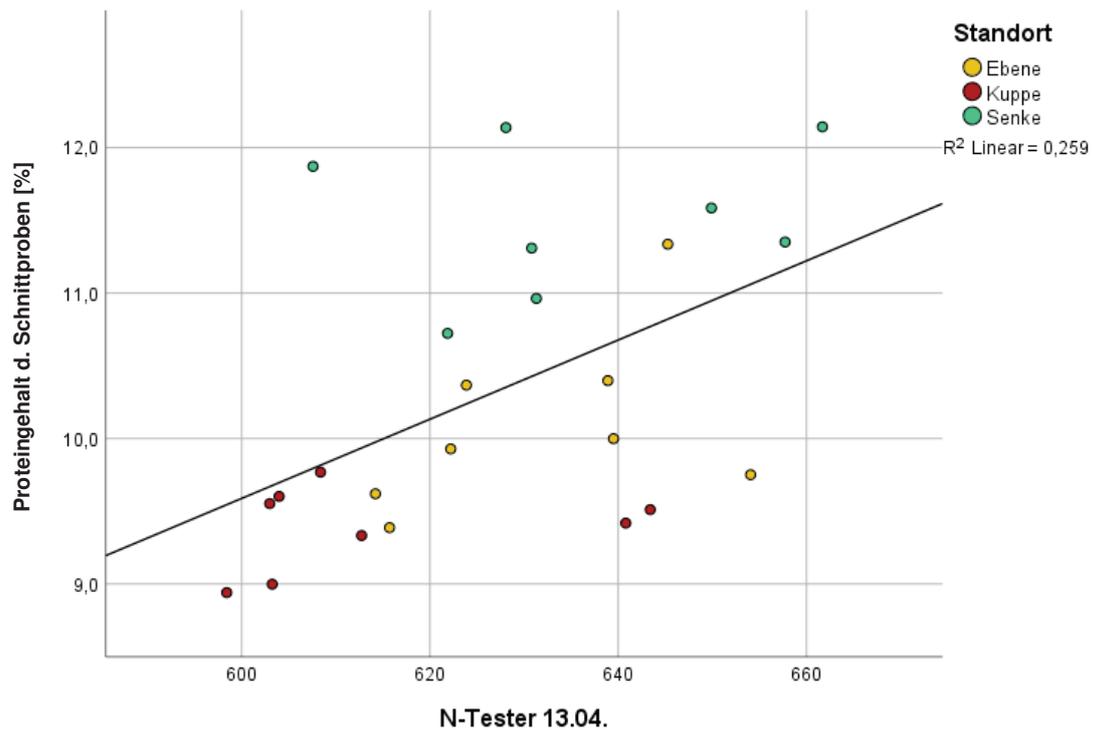


Abbildung A 23: Zusammenhang der N-tester Werte vom 13.04. mit dem Proteingehalt am Untersuchungsort, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

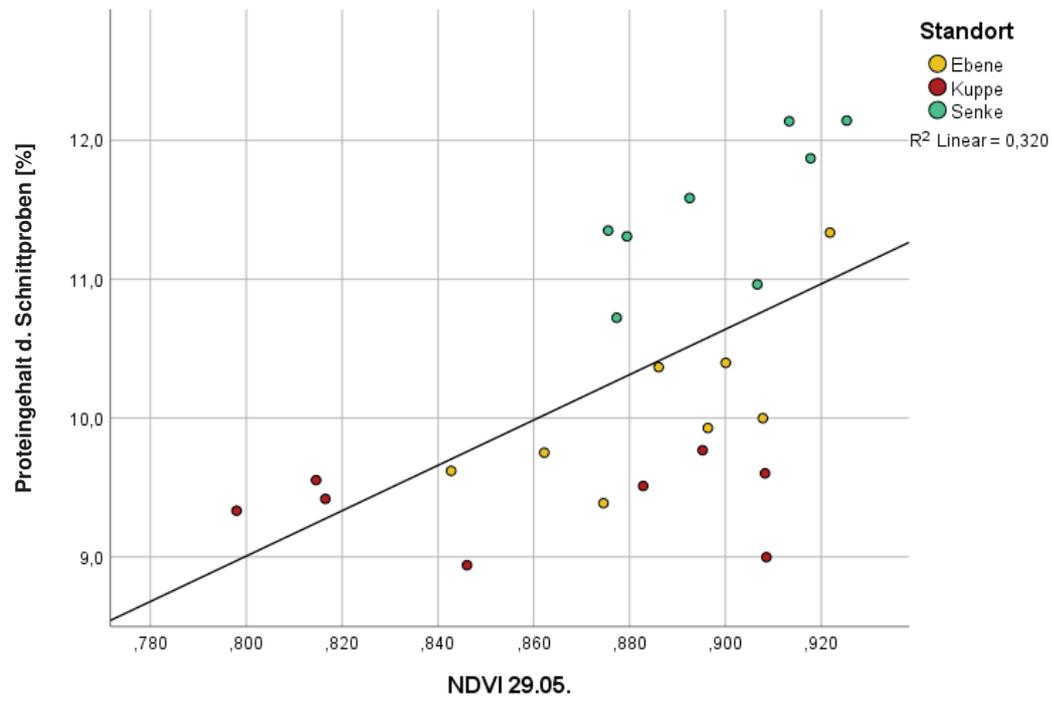


Abbildung A 24: Zusammenhang des NDVI vom 29.05. mit dem Proteingehalt der Ernteprobe, kategorisiert nach Standort. Signifikante Korrelation bei einem Niveau von $\alpha=0,05$

Tabelle A 4: Übersicht der Regressionsanalyse der N-Tester Werte und Ertragsparameter bei Unterscheidung der N-Varianten bezüglich Trockenmasseertrag und Proteingehalt. $\alpha=0,05$

		bü 100 %		N _{red} 80%	
		Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Unter- suchungsort [%]	Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Unter- suchungsort [%]
N-Tester 13.04.	Korr.	0,268	0,238	0,401	,700*
	Sig.	0,400	0,457	0,197	0,011
	N	12	12	12	12
N-Tester 29.04.	Korr.	0,510	0,505	0,566	0,441
	Sig.	0,090	0,094	0,055	0,151
	N	12	12	12	12
N-Tester 20.05.	Korr.	,706*	,745*	0,529	,747*
	Sig.	0,010	0,005	0,077	0,005
	N	12	12	12	12
N-Tester 01.06.	Korr.	0,512	,673*	0,435	,688*
	Sig.	0,089	0,016	0,158	0,013
	N	12	12	12	12
N-Tester 17.06.	Korr.	,684*	,801*	,801*	,834*
	Sig.	0,014	0,002	0,002	0,001
	N	12	12	12	12
Tausendkorn- masse [g]	Korr.	-0,101	-0,295	-0,412	-0,355
	Sig.	0,754	0,352	0,183	0,258
	N	12	12	12	12
Halmlänge [mm]	Korr.	,870*	,919*	,659*	,794*
	Sig.	<0,001	<0,001	0,020	0,002
	N	12	12	12	12
Ährendichte [Ä·m ⁻²]	Korr.	,958*	,939*	,976*	,787*
	Sig.	<0,001	<0,001	<0,001	0,002
	N	12	12	12	12

		Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Unter- suchungsort [%]	Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Proteingehalt Unter- suchungsort [%]
Trockenmasse- ertrag Schnittprobe [g·m ⁻²]	Korr.	1	,908*	1	,801*
	Sig.	0	<0,001	0	0,002
	N	12	12	12	12
Proteingehalt Untersuchungsort [%]	Korr.	,908*	1	,801*	1
	Sig.	<0,001	0	0,002	0
	N	12	12	12	12

* markiert Signifikanz

Tabelle A 5: Übersicht der Regressionsanalyse der N-Tester-Werte, unterteilt nach Standort Kuppe, Ebene und Senke, mit Trockenmasseertrag und Proteingehalt ($\alpha=0,05$)

		Kuppe		Ebene		Senke	
		Trockenertrag Schnittprobe [g/m ²]	Proteingehalt Untersuchungs- ort [%]	Trockenertrag Schnittprobe [g/m ²]	Proteingehalt Untersuchungs- ort [%]	Trockenertrag Schnittprobe [g/m ²]	Proteingehalt Untersuchungs- ort [%]
N-Tester 13.04.	Korrelation	-0,388	0,233	0,509	0,623	-0,127	0,158
	Sig.	0,342	0,579	0,197	0,099	0,765	0,709
	N	8	8	8	8	8	8
N-Tester 29.04.	Korrelation	0,001	0,076	0,420	0,486	0,565	-0,070
	Sig.	0,998	0,858	0,300	0,222	0,144	0,868
	N	8	8	8	8	8	8
N-Tester 20.05.	Korrelation	0,035	-0,240	0,622	0,671	-0,230	0,613
	Sig.	0,935	0,568	0,099	0,068	0,583	0,106
	N	8	8	8	8	8	8
N-Tester 01.06.	Korrelation	-0,415	0,379	0,588	,736*	0,022	0,008
	Sig.	0,307	0,354	0,125	0,037	0,960	0,985
	N	8	8	8	8	8	8
N-Tester 17.06.	Korrelation	-0,004	0,017	0,537	0,687	0,468	0,591
	Sig.	0,993	0,968	0,169	0,060	0,243	0,123
	N	8	8	8	8	8	8



Abbildung A 25: Drohnenbild der Versuchsanlage vom 16.07.2020. Parzellen 1-10. Fotografiert Richtung Norden.

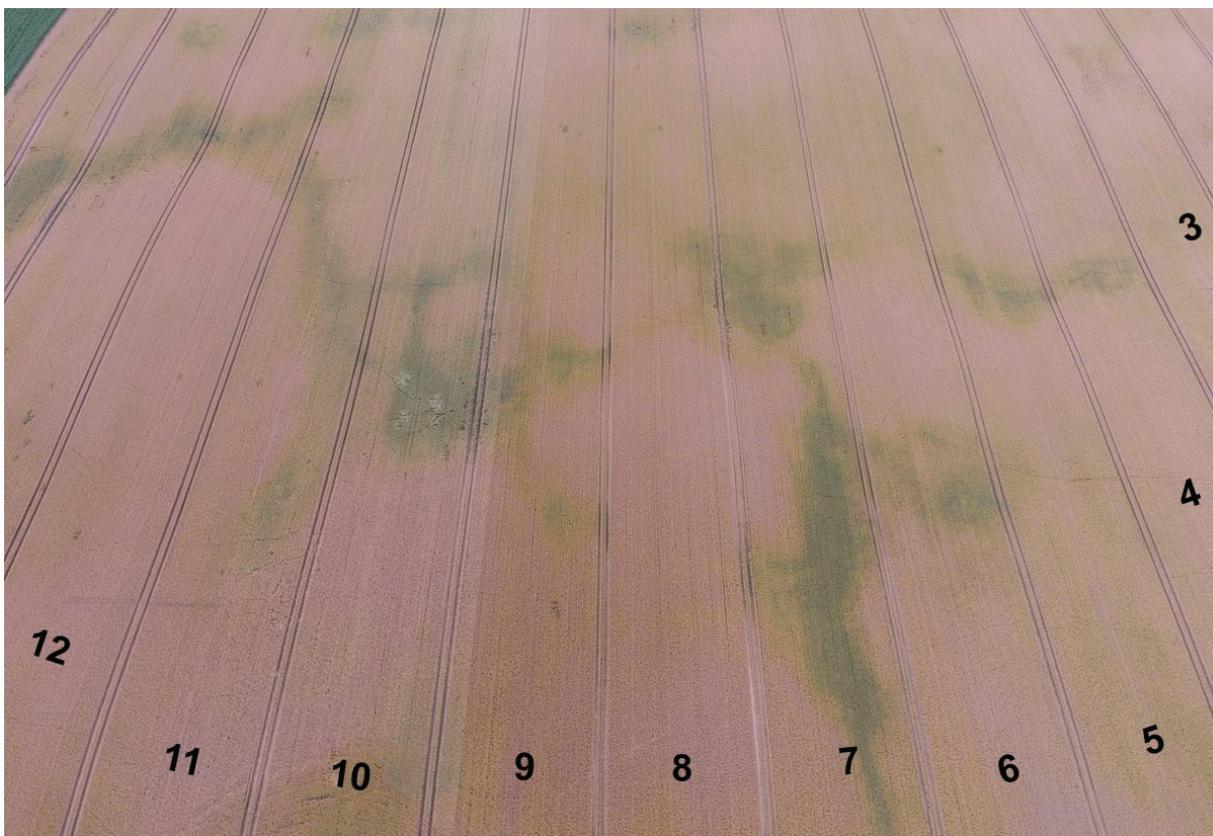


Abbildung A 26: Drohnenbild der Versuchsanlage vom 16.07.2020. Parzellen 3-12. Fotografiert Richtung Süden.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Lars Brüggemann, Neubrandenburg, 22.03.2021

Name, Ort, Datum Unterschrift