



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Abschlussbericht

zum

Forschungsvorhaben

„Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft (optimierter Klimabetrieb) II“

Projektträger: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)
Förderkennzeichen: 2813HS019
Laufzeit: 01.10.2013 – 30.03.2017
Berichtszeitraum: 01.10.2013 – 30.03.2017

Zuwendungsempfänger: Fachhochschule Südwestfalen
Fachbereich Agrarwirtschaft
Lübecker Ring 2
59494 Soest
Tel.: 02921/ 378 236
Fax.: 02921/ 378 200

Fachhochschule
Südwestfalen
University of Applied Sciences



Kooperationspartner: Julius Kühn-Institut
Pflanzenbau und Bodenkunde
Bundesallee 50
38116 Braunschweig



Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Thünen-Institut für Agrartechnologie
Bundesallee 50
38116 Braunschweig



Projektleitung: Bernhard C. Schäfer
Berichterstatter: Karoline Röper
Franz-Ferdinand Gröblichhoff
Nicolas Ruoss
Jan Berglar
Dorothee Kramps-Alpmann
Karen Korte
Ulrike Ernst
Joachim Brunotte
Reinhard Well
Jürgen Braun
Bernhard C. Schäfer

Soest, 30.04.2017

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	XII
Vorwort	1
Zusammenfassung	3
1 Ziele und Aufgaben des Vorhabens.....	8
1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens	8
1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
2 Gemeinsames Zentralexperiment.....	9
2.1 Standortbeschreibung.....	9
2.2 Witterung	10
2.3 Anbausysteme.....	15
2.4 Datenerfassung Ernte	17
2.5 Ergebnisse des langjährigen Vergleichs der Betriebssysteme (2011-2016).....	19
2.5.1 Vergleich der Betriebssysteme bezüglich der erwirtschafteten Erträge.....	19
2.5.2 Vergleich der Betriebssysteme bezüglich der N_{\min} -Werte.....	29
2.5.3 Vergleich der Betriebssysteme bezüglich der Bodenbedeckung	36
3 Teilprojekt N-Düngeoptimierung	38
3.1 Literaturübersicht	38
3.2 Material und Methoden	39
3.3 N-Düngungsversuche.....	41
3.3.1 N-Düngungsversuche Wintergerste	41
3.3.2 N-Düngungsversuche Winterweizen.....	47
3.3.3 N-Düngungsversuche Winterraps.....	54
3.3.4 N-Düngungsversuche Silomais	61
3.4 Zusammenfassung	73
3.5 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen	75
4 Teilprojekt Klimagase	77
4.1 Einleitung	77
4.1.1 Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft	77
4.1.2 Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft	77
4.1.3 Management- und Düngesysteme	78
4.1.4 Biogas Gärreste (Produktion von Bioenergie)	79

4.1.5 Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft: Ziele.....	79
4.2 Material und Methoden	80
4.2.1 Getestete Varianten	80
4.2.2 Datenerhebung und Analyse für N ₂ O	80
4.2.3 Erfassung der Ammoniakemissionen	81
4.2.4 Boden: Beprobung und Analyse	83
4.2.5 Datenaufbereitung und statistische Analyse.....	83
Lachgasflüsse.....	83
Statistische Analyse	83
Generalisierte Additive Modelle.....	84
4.3 Ergebnisse.....	85
4.3.1 Lachgasemissionen	85
Generalisierte Additive Modelle.....	93
CH ₄ -Emissionen.....	93
4.3.2 Ammoniakemissionen	94
4.3.3 Gehalte an mineralischem Stickstoff (N _{min})	96
4.4 Diskussion	99
4.4.1 Lachgasemissionen	99
CH ₄ -Emissionen.....	102
4.4.2 Ammoniakemissionen	102
4.4.3 Gehalte an mineralischem Stickstoff (N _{min})	103
Gesamtbewertung der N ₂ O- und NH ₃ -Emissionen.....	104
4.5 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen	105
5 Teilprojekt Ökonomische Bewertung	107
5.1 Material und Methoden	107
5.2 Ergebnisse.....	109
5.2.1 Wirtschaftlichkeit der Fruchtfolgen in den Modellbetrieben	109
5.2.2 Treibhauspotential- Vermeidungskosten – Differenzen der Gewinnbeiträge	115
5.2.3 Treibhauspotential-Vermeidungskosten – Treibhausgasemissionen bzw. –potential	116
5.2.4 Bewertung der Düngerapplikation in Silomais bzw. Winterweizen	121
5.2.5 N- Düngeoptimum.....	128
5.3 Fazit ökonomische Bewertung	133
5.4 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen	134
6 Literatur	136
7 Anhang.....	144

Vergleich der Betriebssysteme anhand ausgewählter Qualitätsparameter	144
Bodenkundliche Begleituntersuchungen	156
Teilprojekt N-Düngeoptimierung	176
Teilprojekt Klimagase	197

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: MONATLICHE DURCHSCHNITTSTEMPERATUREN (°C) DER VERSUCHSFLÄCHE SOEST IN MERKLINGSEN 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 UND LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER REGION SOEST FÜR DIE JAHRE 1981 BIS 2010 (DWD 2011)	11
ABBILDUNG 2: MITTELWERTE DER MONATLICHEN NIEDERSCHLAGSMENGEN (MM) DER VERSUCHSFLÄCHE SOEST IN MERKLINGSEN 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 UND LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER REGION SOEST FÜR DIE JAHRE 1981-2002	12
ABBILDUNG 3: MITTELWERTE DER MONATLICHEN NIEDERSCHLAGSMENGEN (MM) DER VERSUCHSFLÄCHE SOEST IN MERKLINGSEN 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 UND LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER REGION SOEST FÜR DIE JAHRE 1981-2002	12
ABBILDUNG 4: MONATLICHE DURCHSCHNITTSTEMPERATUREN (°C) DER VERSUCHSFLÄCHE BRAUNSCHWEIG IN SICKTE 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 UND LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER REGION BRAUNSCHWEIG FÜR DIE JAHRE 1981 BIS 2010 (DWD 2011)	13
ABBILDUNG 5: MITTELWERTE DER MONATLICHEN NIEDERSCHLAGSMENGEN (MM) DER VERSUCHSFLÄCHE BRAUNSCHWEIG IN SICKTE 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 UND LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER REGION BRAUNSCHWEIG FÜR DIE JAHRE 1981-2010 (DWD 2011)	14
ABBILDUNG 6: MITTELWERTE DER MONATLICHEN NIEDERSCHLAGSMENGEN (MM) DER VERSUCHSFLÄCHE BRAUNSCHWEIG IN SICKTE 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 UND LANGJÄHRIGE MITTELWERTE DER REGION BRAUNSCHWEIG FÜR DIE JAHRE 1981-2010 (DWD 2011)	14
ABBILDUNG 7: KORNERTRAG VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (GRAU= AUßERPLANMÄßIGE VORFRUCHT, = ERTRÄGE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	19
ABBILDUNG 8: KORNERTRAG VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (= ERTRÄGE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	20
ABBILDUNG 9: KORNERTRAG VON WINTERRAPS DER ERNTEJAHRE 2012 BIS 2016 IN SOEST (= ERTRÄGE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	21
ABBILDUNG 10: KORNERTRAG VON ACKERBOHNEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST	22
ABBILDUNG 11: TM-ERTRAG VON GRÜNROGGEN DER ERNTEJAHRE 2012 BIS 2015 IN SOEST	22
ABBILDUNG 12: TM-ERTRAG VON GPS-ROGGEN/GPS-TRITICALE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST	23
ABBILDUNG 13: TM-ERTRAG VON SILOMAIS DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (= ERTRÄGE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG, SCHLEPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG)	24
ABBILDUNG 14: KORNERTRAG VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (GRAU= AUßERPLANMÄßIGE VORFRUCHT)	25
ABBILDUNG 15: KORNERTRAG VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (GRAU= AUßERPLANMÄßIGE VORFRUCHT)	25
ABBILDUNG 16: KORNERTRAG VON WINTERRAPS DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (GRAU= AUßERPLANMÄßIGE VORFRUCHT)	26
ABBILDUNG 17: KORNERTRAG VON ACKERBOHNE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG, * ERTRAG NICHT ERFASST	27
ABBILDUNG 18: TM-ERTRAG VON GRÜNROGGEN DER ERNTEJAHRE 2012 BIS 2015 IN BRAUNSCHWEIG	27
ABBILDUNG 19: TM-ERTRAG VON GPS-ROGGEN/GPS-TRITICALE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 AM STANDORT BRAUNSCHWEIG	28
ABBILDUNG 20: TM-ERTRAG VON SILOMAIS DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 AM STANDORT BRAUNSCHWEIG	29
ABBILDUNG 21: DURCHSCHNITTLLICHE N _{MIN} -WERTE (0-90) IN DEN VERSCHIEDENEN BETRIEBSSYSTEMEN IN SOEST UND BRAUNSCHWEIG SEIT VEGETATIONSENDE 2011 BIS VEGETATIONSBEGINN 2016	29
ABBILDUNG 22: N _{MIN} (KG/HA) ZU VEGETATIONSENDE UND - BEGINN SOWIE DIE VERLUSTE IM DURCHSCHNITT DER STANDORTE IN ABHÄNGIGKEIT DER JAHRE	30
ABBILDUNG 23: N _{MIN} -WERTE ZU VEGETATIONSENDE IN ABHÄNGIGKEIT VON STANDORT, JAHR UND BETRIEBSSYSTEM	31
ABBILDUNG 24: N _{MIN} - VERLUSTE ÜBER WINTER IN ABHÄNGIGKEIT VON STANDORT, JAHR UND BETRIEBSSYSTEM	31

ABBILDUNG 25: DURCHSCHNITTLLICHE N_{MIN} -WERTE (2011 – 2016) IN DER WINTERGERSTE ZU VEGETATIONSENDE (VE) UND VEGETATIONSBEGINN (VB) IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN VORFRÜCHTEN ACKERBOHNE UND WINTERWEIZEN UND DEM STANDORT.....	33
ABBILDUNG 26: DURCHSCHNITTLLICHE N_{MIN} -WERTE (2011 – 2016) IM WINTERWEIZEN ZU VEGETATIONSENDE (VE) UND VEGETATIONSBEGINN (VB) IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN VORFRÜCHTEN WINTERRAPS UND WINTERWEIZEN UND DEM STANDORT, IM M-BETRIEB.....	33
ABBILDUNG 27: DURCHSCHNITTLLICHE N_{MIN} -WERTE (2011 – 2016) IM WINTERWEIZEN ZU VEGETATIONSENDE (VE) UND VEGETATIONSBEGINN (VB) IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN VORFRÜCHTEN WINTERRAPS UND SILOMAIS UND DEM STANDORT, IM O-BETRIEB.....	34
ABBILDUNG 28: DURCHSCHNITTLLICHE N_{MIN} -WERTE (2011 - 2016) ZU VEGETATIONSENDE (VE) UND VEGETATIONSBEGINN (VB) IM WINTERWEIZEN NACH SILOMAIS IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DEM STANDORT.....	35
ABBILDUNG 29: DURCHSCHNITTLLICHE N_{MIN} -WERTE (2011 - 2016) ZU VEGETATIONSENDE (VE) UND VEGETATIONSBEGINN (VB) IM WINTERWEIZEN NACH WINTERRAPS IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DEM STANDORT.....	35
ABBILDUNG 30: BODENBEDECKUNG IN % NACH AUSSAAT DES STANDORTS SOEST IM MITTEL DER JAHRE 2012 – 2016, VORFRUCHT IN KLAMMERN.....	36
ABBILDUNG 31: BODENBEDECKUNG IN % NACH AUSSAAT DES STANDORTS BRAUNSCHWEIG IM MITTEL DER JAHRE 2012-2016, VORFRUCHT IN KLAMMERN	37
ABBILDUNG 32: KORNERTRAG VON WINTERGERSTE IN VERSCHIEDENEN BETRIEBSSYSTEMEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG (BS) UND SOEST (SO) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 -2016 (VORFRUCHT IN ()) (GD5 % $O \cdot B \cdot N = 3,7$ DT/HA (BS,V-B.=4,6 DT/HA), GD5)	42
ABBILDUNG 33: ANZAHL ÄHREN/M ² VON WINTERGERSTE IN VERSCHIEDENEN BETRIEBSSYSTEMEN (O; V) (VORFRUCHT IN ()) AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG (BS) UND SOEST (SO) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 UND 2015 (GD 5 % $O \cdot B \cdot N = \text{N.S.}$, GD 5 % $O \cdot B \cdot N \cdot J = \text{N.S.}$)	44
ABBILDUNG 34: N-GEHALTE IM KORN IN DER WINTERGERSTE AN DEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014-2016 IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM (VORFRUCHT) UND N-DÜNGUNG (GD 5 % $O \cdot B \cdot N = \text{N.S.}$; GD 5 % $O \cdot B \cdot N \cdot J = \text{N.S.}$)	45
ABBILDUNG 35: ERRECHNETE N-ABFUHR IN DER WINTERGERSTE AN DEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014-2016 IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND N-DÜNGUNG (GD5 % $O \cdot B \cdot N = 7,2$ KG/HA N (BS,V-B.=8,8 KG/HA N), GD5 % $O \cdot B \cdot N \cdot J = 12,5$ KG/HA N).....	45
ABBILDUNG 36: N-BILANZ (KG/HA N) IN DER WINTERGERSTE AN DEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014-2016 IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM (VORFRUCHT) UND N-DÜNGUNG (GD5 % $O \cdot B \cdot N = 7,2$ KG/HA N (BS V-BETRIEB = 8,8 KG/HA N), GD5 % $J \cdot O \cdot B \cdot N = 12,5$ KG/HA N).....	46
ABBILDUNG 37: N_{MIN} -WERTE ZU VEGETATIONSENDE 2014 UND 2015 NACH WINTERGERSTE IN SOEST UND BRAUNSCHWEIG IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (O=O-BETRIEB, V=V-BETRIEB, N1=SW-50 %, N3=SW, N5=SW+50 %)	47
ABBILDUNG 38: KORNERTRAG (DT/HA) VON WINTERWEIZEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5 % $O \cdot B \cdot N = 3,1$ DT/HA, GD 5 % $J \cdot O \cdot B \cdot N = 5,3$ DT/HA).....	49
ABBILDUNG 39: ZAHL DER ÄHREN/M ² VON WINTERWEIZEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5 % $O \cdot B \cdot N = 35$ ÄHREN/M ² , GD 5 % $J \cdot O \cdot B \cdot N = 60$ ÄHREN/M ²).....	50
ABBILDUNG 40: N-GEHALT IM KORN VON WINTERWEIZEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5 % $O \cdot B \cdot N = 0,08$ %, GD 5 % $J \cdot O \cdot B \cdot N = \text{N.S.}$).....	51
ABBILDUNG 41: N-ENTZUG MIT DEM KORN VON WINTERWEIZEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5 % $O \cdot B \cdot N = 8,5$ KG/HA N, GD 5 % $J \cdot O \cdot B \cdot N = 14,7$ KG/HA N)	52

ABBILDUNG 42: N-BILANZ VON WINTERWEIZEN (ORG. N IM GÄRREST ZU 85 % ANGERECHNET) AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5 % O*B*N = 8,5 KG/HA N, GD 5 % J*O*B*N = 14,7 KG/HA N)	52
ABBILDUNG 43: N _{MIN} -WERTE ZU VEGETATIONSENDE 2014 UND 2015 NACH WINTERWEIZEN IN SOEST UND BRAUNSCHWEIG IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (* PROBEN WAREN NICHT VALIDE UND MUSSTEN ZU EINEM SPÄTEREN ZEITPUNKT NACHANALYSIERT WERDEN; PROBENNAHME ZUR ZWEITEN BEPROBUNG NUR 0-60 CM) (O=O-BETRIEB, M=M-BETRIEB, N1=SW-50 %, N3=SW, N5=SW+50 %)	53
ABBILDUNG 44: KORNERTRAG VON WINTERRAPS AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5 % O*B*N = 3,1 DT/HA (SOEST O-BETRIEB = 4,4 DT/HA), GD 5 % J*O*B*N = N.S.)	55
ABBILDUNG 45: ÖLGEHALT (% ÖL IN 91 % TM) VON WINTERRAPS IN DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER BETRIEB UND MARKTFRUCHTBETRIEB AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (2014-2016) GD 5 % O*B*N = 0,74% ÖL IN 91 % TM (SOEST O-BETRIEB = 1,04 % ÖL IN 91 % TM), GD 5 % J*O*B*N=N.S.	56
ABBILDUNG 46: ÖLERTRAG VON WINTERRAPS IN DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER BETRIEB UND MARKTFRUCHTBETRIEB AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (2014-2016) GD 5 % O*B*N = 147 KG/HA (SOEST O-BETRIEB = 207 KG/HA), GD 5 % J*O*B*N=N.S.	57
ABBILDUNG 47: STICKSTOFFGEHALT (% N) VON WINTERRAPS IN DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER BETRIEB UND MARKTFRUCHTBETRIEB AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (2014-2016) GD 5 % O*B*N = 0,73% XP IN TM (SOEST O-BETRIEB = 1,04 % TM), GD 5 % J*O*B*N = N.S.	57
ABBILDUNG 48: N-ABFUHR (KG/HA N) MIT DEM WINTERRAPS IN DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER BETRIEB UND MARKTFRUCHTBETRIEB AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (2014-2016) GD 5 % O*B*N = 9,2 KG/HA N (SOEST O-BETRIEB = 13,0 KG/HA N), GD 5 % J*O*B*N = N.S.)	58
ABBILDUNG 49: N-BILANZSALDO (KG/HA N, ANRECHNUNG DES N-GEHALTS ORG. DÜNGER ZU 85 %) VON WINTERRAPS IN DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER BETRIEB UND MARKTFRUCHTBETRIEB AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (2014-2016) GD 5% O*B*N = 9,2 KG/HA N (SOEST O-BETRIEB = 13,1 KG/HA N), GD 5 % J*O*B*N = N.S.	59
ABBILDUNG 50: ABHÄNGIGKEIT DES N-BILANZSALDOS VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG ZU WINTERRAPS (LINEARE REGRESSION ÜBER 2 STANDORTE, 3 JAHRE, 2 BETRIEBSSYSTEME, 5 N-DÜNGESTUFEN 4 WDH; N=220)	59
ABBILDUNG 51: N _{MIN} -WERTE ZU VEGETATIONSENDE 2014 UND 2015 NACH WINTERRAPS IN SOEST UND BRAUNSCHWEIG IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG (O=O-BETRIEB, M=M-BETRIEB, N1=SW-50 %, N3=SW, N5=SW+50 %)	60
ABBILDUNG 52: SILOMAISERTRAG (DT/HA TM) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM, DER DÜNGEOTECHNIK UND DER N-MENGE AM STANDORT SOEST IN DEN JAHREN 2014-2016 (GD5 % B*T*N = 7,0 DT/HA TM, GD 5 % J*B*T*N = 12,2 DT/HA TM)	63
ABBILDUNG 53: SILOMAISERTRAG (DT/HA TM) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM, DER DÜNGEOTECHNIK UND DER N-MENGE AM STANDORT BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014-2016 (GD5 % B*T*N = N.S., GD 5 % J* B*T*N = N.S.)	64
ABBILDUNG 54: SILOMAISERTRAG (DT/HA TM) IN ABHÄNGIGKEIT DER DÜNGEOTECHNIK UND DER N-MENGE AM STANDORT BRAUNSCHWEIG (MITTEL 2014-2016) (GD5 % T*N = 9,9 DT/HA TM)	65
ABBILDUNG 55: SILOMAISERTRAG (DT/HA TM) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER N-MENGE AM STANDORT BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014-2016 (GD5 % B*N = N.S., GD 5 % J* B* N = 17,1 DT/HA TM) 66	
ABBILDUNG 56: N-GEHALT VON SILOMAIS (% N, TM) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM, DER DÜNGEOTECHNIK UND DER N-MENGE AM STANDORT SOEST IN DEN JAHREN 2014-2016 (GD5 % B*T*N = N.S., GD 5 % J* B*T*N = N.S.)	67

ABBILDUNG 57: N-ABFUHR MIT SILOMAIS (KG/HA N) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM, DER DÜNGETECHNIK UND DER N-MENGE AM STANDORT SOEST IN DEN JAHREN 2014-2016 (GD5 % B*T*N = N.S., GD 5 % J* B*T*N = N.S.).....	67
ABBILDUNG 58: N-BILANZSALDO VON SILOMAIS (KG/HA N) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM, DER DÜNGETECHNIK UND DER N-MENGE AM STANDORT SOEST IN DEN JAHREN 2014-2016 (GD5 % B*T*N = N.S., GD 5 % J* B*T*N = N.S.).....	68
ABBILDUNG 59: N-BILANZSALDO VON SILOMAIS (KG/HA N) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DÜNGETECHNIK UND DER N-MENGE AM STANDORT SOEST IM MITTEL DER JAHRE 2014-2016 UND DER BEIDEN BETRIEBSSYSTEME O UND V (GD5 % T*N = 7,9 KG/HA N).....	69
ABBILDUNG 60: N-BILANZSALDO VON SILOMAIS (KG/HA N) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER N-MENGE AM STANDORT BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014-2016. (GD5 % B*N = N.S., GD 5 % J* B* N = 20,5 KG/HAN).....	70
ABBILDUNG 61: N-ENTZUG MIT SILOMAIS (KG/HA N) IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER N-MENGE AM STANDORT BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014-2016. (GD5 % B*N = N.S., GD 5 % J* B* N = 20,4 KG/HA N).....	70
ABBILDUNG 62: N _{MIN} -WERTE ZU VEGETATIONSENDE 2014 NACH SILOMAIS IN SOEST (O=O-BETRIEB, V=V-BETRIEB, N1=SW-50 %, N3=SW, N4=SW+25 %, N5=SW+50 %, T1=MINERALISCHE DÜNGUNG, T2=SCHELPPSCHLAUCH, T3=GÄRREST-STRIP-TILL).....	71
ABBILDUNG 63: N _{MIN} -WERTE ZU VEGETATIONSENDE 2015 NACH SILOMAIS IN SOEST (O=O-BETRIEB, V=V-BETRIEB, N1=SW-50 %, N3=SW, N4=SW+25 %, N5=SW+50 %, T1=MINERALISCHE DÜNGUNG, T2=SCHELPPSCHLAUCH, T3=GÄRREST-STRIP-TILL).....	71
ABBILDUNG 64: N _{MIN} -WERTE ZU VEGETATIONSENDE 2014 UND 2015 NACH SILOMAIS IN BRAUNSCHWEIG (O=O-BETRIEB, V=V-BETRIEB, N1=SW-50 %, N3=SW, N4=SW+25 %, N5=SW+50 %, T1=MINERALISCHE DÜNGUNG, T2=SCHELPPSCHLAUCH).....	72
ABBILDUNG 65: JAHRESVERLÄUFE DER LACHGASEMISSIONEN VON JUNI 2014 BIS JUNI 2016 AM STANDORT SOEST. DIE FARBLICH MARKIERTEN BALKEN ENTSPRECHEN: AUSSAAT; ERNTE; ORGANISCHE DÜNGUNG (BIOGAS GÄRRESTE); MINERALISCHE DÜNGUNG (DAP, KAS, AHL). (SILOMAIS (T1) O-BETRIEB: MINERALISCHE DÜNGUNG; SILOMAIS (T2) O-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; SILOMAIS (T3) O-BETRIEB: STRIP-TILL GÄRRESTUNTERFLUR; SILOMAIS (T2) V-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG MIT ANSCHLIEßENDER EINARBEITUNG VOR DER AUSSAAT; WINTERWEIZEN (T2) O-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; WINTERWEIZEN (T1) M-BETRIEB: MINERALISCHE DÜNGUNG).....	86
ABBILDUNG 66: JAHRESVERLÄUFE DER LACHGASEMISSIONEN VON JUNI 2014 BIS JUNI 2016 AM STANDORT BRAUNSCHWEIG. DIE FARBLICH MARKIERTEN BALKEN ENTSPRECHEN: AUSSAAT; ERNTE; ORGANISCHE DÜNGUNG (BIOGAS GÄRRESTE); MINERALISCHE DÜNGUNG (DAP, KAS). (SILOMAIS (T2) O-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; SILOMAIS (T2) V-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG MIT ANSCHLIEßENDER EINARBEITUNG VOR DER AUSSAAT; WINTERWEIZEN (T2) O-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; WINTERWEIZEN (T1) M-BETRIEB: MINERALISCHE DÜNGUNG).....	87
ABBILDUNG 67: AMMONIAKEMISSIONEN IM SILOMAIS AM STANDORT SOEST IN DEN JAHREN 2014 / 2015.	95
ABBILDUNG 68: AMMONIAKEMISSIONEN IM SILOMAIS AM STANDORT BRAUNSCHWEIG IN DEN JAHREN 2014 / 2015. DIE VARIANTE GÄRREST UNTERFLUR SM WURDE AM STANDORT BRAUNSCHWEIG NICHT DURCHGEFÜHRT.	95
ABBILDUNG 69: JAHRESVERLÄUFE DER N _{MIN} -GEHALTE IM OBERBODEN (0 – 30 CM) VON JUNI 2014 BIS JUNI 2016 AM STANDORT SOEST. DIE FARBLICH MARKIERTEN BALKEN ENTSPRECHEN: ORGANISCHE DÜNGUNG (BIOGAS GÄRRESTE); MINERALISCHE DÜNGUNG (DAP, KAS, AHL). (SILOMAIS (T1) O-BETRIEB: MINERALISCHE DÜNGUNG; SILOMAIS (T2) O-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; SILOMAIS (T3) O-BETRIEB: STRIP-TILL GÄRRESTUNTERFLUR; SILOMAIS (T2) V-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG MIT ANSCHLIEßENDER EINARBEITUNG VOR DER AUSSAAT; WINTERWEIZEN (T2) O-BETRIEB: SCHELPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; WINTERWEIZEN (T1) M-BETRIEB: MINERALISCHE DÜNGUNG).....	97

ABBILDUNG 70: JAHRESVERLÄUFE DER N_{MIN} -GEHALTE IM OBERBODEN (0 – 30 CM) VON JUNI 2014 BIS JUNI 2016 AM STANDORT BRAUNSCHWEIG. DIE FARBLICH MARKIERTEN BALKEN ENTSPRECHEN: ORGANISCHE DÜNGUNG (BIOGAS GÄRRESTE); MINERALISCHE DÜNGUNG (DAP, KAS). (SILOMAIS (T2) O-BETRIEB: SCHLEPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; SILOMAIS (T2) V-BETRIEB: SCHLEPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG MIT ANSCHLIEßENDER EINARBEITUNG VOR DER AUSSAAT; WINTERWEIZEN (T2) O-BETRIEB: SCHLEPPSCHLAUCHAUSBRINGUNG IN DEN STEHENDEN BESTAND; WINTERWEIZEN (T1) M-BETRIEB: MINERALISCHE DÜNGUNG).	98
ABBILDUNG 71: TREIBHAUSPOTENTIAL SOWIE TREIBHAUSPOTENTIAL-VERMEIDUNGSKOSTEN IN DEN MODELLBETRIEBEN (2014)	118
ABBILDUNG 72: TREIBHAUSGASVERMEIDUNGSKOSTEN JE HA BEIM ÜBERGANG ZUR KLIMAOPTIMIERTEN BEWIRTSCHAFTUNG (2014)	118
ABBILDUNG 73: TREIBHAUSPOTENTIAL SOWIE -VERMEIDUNGSKOSTEN IN DEN MODELLBETRIEBEN (2015)	119
ABBILDUNG 74: TREIBHAUSGASVERMEIDUNGSKOSTEN JE HA BEIM ÜBERGANG ZUR KLIMAOPTIMIERTEN BEWIRTSCHAFTUNG (2015)	119
ABBILDUNG 75: TREIBHAUSGASPOTENTIAL SOWIE -VERMEIDUNGSKOSTEN IN DEN MODELLBETRIEBEN (2016)	120
ABBILDUNG 76: TREIBHAUSGASVERMEIDUNGSKOSTEN JE HA BEIM ÜBERGANG ZUR KLIMAOPTIMIERTEN BEWIRTSCHAFTUNG (2016)	120
ABBILDUNG 77: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION SILOMAIS: MITTLERE KOSTEN DER N-AUSBRINGUNG (€/HA) SOWIE N-MENGE V- UND O-BETRIEB BRAUNSCHWEIG IM VERGLEICH	122
ABBILDUNG 78: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION SILOMAIS: MITTLERE KOSTEN DER N-AUSBRINGUNG (€/HA) SOWIE N-MENGE V- UND O-BETRIEB SOEST IM VERGLEICH	122
ABBILDUNG 79: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION WINTERWEIZEN: MITTLERE KOSTEN DER N-AUSBRINGUNG (€/HA) SOWIE N-MENGE M- UND O-BETRIEB BRAUNSCHWEIG IM VERGLEICH	123
ABBILDUNG 80: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION WINTERWEIZEN: MITTLERE KOSTEN DER N-AUSBRINGUNG (€/HA) SOWIE N-MENGE M- UND O-BETRIEB SOEST IM VERGLEICH	123
ABBILDUNG 81: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION SILOMAIS: MITTLERE EMISSIONEN (KG CO ₂ -ÄQ./HA) V- UND O-BETRIEB BRAUNSCHWEIG IM VERGLEICH	124
ABBILDUNG 82: MITTLERE CO ₂ -ÄQ. FREISETZUNGSKOSTEN BEIM ÜBERGANG VOM VIEHHALTENDEN ZUM KLIMAOPTIMIERTEN BETRIEB; BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION SILOMAIS: THG-VERMEIDUNGSKOSTEN (€/KG CO ₂ -ÄQ./HA) V- UND O-BETRIEB BRAUNSCHWEIG IM VERGLEICH	124
ABBILDUNG 83: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION SILOMAIS: MITTLERE EMISSIONEN (KG CO ₂ -ÄQ./HA) V- UND O-BETRIEB SOEST IM VERGLEICH	125
ABBILDUNG 84: MITTLERE CO ₂ -ÄQ. FREISETZUNGSKOSTEN BEIM ÜBERGANG VOM VIEHHALTENDEN ZUM KLIMAOPTIMIERTEN BETRIEB; BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION SILOMAIS: THG-VERMEIDUNGSKOSTEN (€/KG CO ₂ -ÄQ./HA) V- UND O-BETRIEB SOEST IM VERGLEICH	126
ABBILDUNG 85: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION WINTERWEIZEN: MITTLERE EMISSIONEN (KG CO ₂ -ÄQ./HA) M- UND O-BETRIEB BRAUNSCHWEIG IM VERGLEICH	127
ABBILDUNG 86: MITTLERE CO ₂ -ÄQ. FREISETZUNGSKOSTEN BEIM ÜBERGANG VOM MARKTFRUCHTBETRIEB ZUM KLIMAOPTIMIERTEN BETRIEB; BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION WINTERWEIZEN: THG-VERMEIDUNGSKOSTEN (€/KG CO ₂ -ÄQ./HA) M- UND O-BETRIEB BRAUNSCHWEIG IM VERGLEICH	127
ABBILDUNG 87: BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION WINTERWEIZEN: EMISSIONEN (KG CO ₂ -ÄQ./HA) M- UND O-BETRIEB SOEST IM VERGLEICH	128
ABBILDUNG 88: MITTLERE CO ₂ -ÄQ. FREISETZUNGSKOSTEN BEIM ÜBERGANG VOM MARKTFRUCHTBETRIEB ZUM KLIMAOPTIMIERTEN BETRIEB; BEWERTUNG DÜNGERAPPLIKATION WINTERWEIZEN: THG-VERMEIDUNGSKOSTEN (€/KG CO ₂ -ÄQ./HA) M- UND O-BETRIEB SOEST IM VERGLEICH	128
ABBILDUNG 89: TAUSENDKORNMASSE VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (= WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	145
ABBILDUNG 90: HEKTOLITERGEWICHT VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (= WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	146
ABBILDUNG 91: ROHPROTEINGEHALT VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (= WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	146

ABBILDUNG 92: TAUSENDKORNMASSE VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	147
ABBILDUNG 93: HEKTOLITERGEWICHT VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	147
ABBILDUNG 94: ROHPROTEINGEHALT VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	148
ABBILDUNG 95: TAUSENDKORNMASSE VON WINTERRAPS DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG).....	149
ABBILDUNG 96: ÖLGEHALT VON WINTERRAPS DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	149
ABBILDUNG 97: TAUSENDKORNMASSE VON ACKERBOHNE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST	150
ABBILDUNG 98: ROHPROTEINGEHALT VON ACKERBOHNE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN SOEST.....	150
ABBILDUNG 99: TAUSENDKORNMASSE VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	151
ABBILDUNG 100: HEKTOLITERGEWICHT VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	152
ABBILDUNG 101: ROHPROTEINGEHALTE VON WINTERWEIZEN DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	152
ABBILDUNG 102: TAUSENDKORNMASSE VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	153
ABBILDUNG 103: HEKTOLITERGEWICHT VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	153
ABBILDUNG 104: ROHPROTEINGEHALT VON WINTERGERSTE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	154
ABBILDUNG 105: TAUSENDKORNMASSE VON WINTERRAPS DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG)	154
ABBILDUNG 106: ÖLGEHALT VON WINTERRAPS DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG (WERTE AUS PARZELLENVERSUCH DÜNGEOPTIMIERUNG).....	155
ABBILDUNG 107: TAUSENDKORNMASSE VON ACKERBOHNE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG, * NICHT ERFASST.....	155
ABBILDUNG 108: ROHPROTEINGEHALT VON ACKERBOHNE DER ERNTEJAHRE 2011 BIS 2016 IN BRAUNSCHWEIG, * NICHT ERFASST.....	156
ABBILDUNG 109: GESAMTPORENVOLUMEN SOWIE DIE PORENVERTEILUNG IN DER AUSGANGSSITUATION (APRIL 2012) UND ZU PROJEKTENDE (MÄRZ 2016) IN BRAUNSCHWEIG	158
ABBILDUNG 110: FELDKAPAZITÄT (FK) UND DIE NUTZBAREN WASSERVORRÄTE (NFK) IM BODEN ZU PROJEKTBEGINN UND (APRIL 2012) ZU PROJEKTENDE (MÄRZ 2016) IN BRAUNSCHWEIG	159
ABBILDUNG 111: LAGERUNGSDICHTE DES BODENS IN DER AUSGANGSSITUATION (APRIL 2012) SOWIE DIE ZU PROJEKTENDE (MÄRZ 2016) IN BRAUNSCHWEIG	159
ABBILDUNG 112: GESAMTPORENVOLUMEN SOWIE DIE PORENVERTEILUNG IN DER AUSGANGSSITUATION (JANUAR 2012) UND ZU PROJEKTENDE (MÄRZ 2016) IN SOEST	160
ABBILDUNG 113: FELDKAPAZITÄT (FK) UND DIE NUTZBAREN WASSERVORRÄTE (NFK) IM BODEN IN DER AUSGANGSSITUATION (JANUAR 2012) UND ZU PROJEKTENDE (MÄRZ 2016) IN SOEST.....	161
ABBILDUNG 114: LAGERUNGSDICHTE DES BODENS SOWIE DIE PORENVERTEILUNG IN DER AUSGANGSSITUATION (JANUAR 2012) UND ZU PROJEKTENDE (MÄRZ 2016) IN SOEST	161
ABBILDUNG 115: MITTLERE EINDRINGWIDERSTÄNDE DER DREI BETRIEBSMODELLE IM JAHR 2011 IN 0 - 80 CM TIEFE IN SOEST (VERÄNDERT NACH LINTEL-HÖPING ET AL. 2012).....	163
ABBILDUNG 116: MITTLERE EINDRINGWIDERSTÄNDE DER DREI BETRIEBSMODELLE IM JAHR 2016 IN 0 - 80 CM TIEFE IN SOEST (HORSTHEMKE 2016).....	163
ABBILDUNG 117: EINDRINGWIDERSTÄNDE AUF DEN PARZELLEN DER MODELLBETRIEBE IN BRAUNSCHWEIG ZU PROJEKTBEGINN 2011.....	165

ABBILDUNG 118: EINDRINGWIDERSTÄNDE AUF DEN PARZELLEN DER MODELLBETRIEBE IN BRAUNSCHWEIG ZU PROJEKTENDE (2016)	166
ABBILDUNG 119: BASALATMUNG AN GESTÖRTEN BODENPROBEN DER PARZELLEN DER MODELLBETRIEBE SOEST UND IN BRAUNSCHWEIG ZU PROJEKTBEGINN UND -ENDE	167
ABBILDUNG 120: REGENWURMABUNDANZEN DER PARZELLEN DER MODELLBETRIEBE SOEST UND IN BRAUNSCHWEIG ZU PROJEKTBEGINN UND -ENDE 2016	168
ABBILDUNG 121: REGENWURMBESIEDLUNG EINER MAISFLÄCHEN IN BRAUNSCHWEIG APRIL 2016	169
ABBILDUNG 122: VERÄNDERUNG DER GRUNDNÄHRSTOFFGEHALTE (P-K-MG) IM BODEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT IN SOEST (B, C, D = VERSORGUNGSSTUFEN).....	171
ABBILDUNG 123: VERÄNDERUNG DER GRUNDNÄHRSTOFFGEHALTE (P-K-MG) IM BODEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT IN BRAUNSCHWEIG (B, C, D = VERSORGUNGSSTUFEN).....	172
ABBILDUNG 124: VERÄNDERUNG DER PH-WERTE IM BODEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT IN SOEST (C = OPTIMALBEREICH)	173
ABBILDUNG 125: VERÄNDERUNG DER PH-WERTE IM BODEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT IN BRAUNSCHWEIG (C = OPTIMALBEREICH).....	174
ABBILDUNG 126: VERÄNDERUNG DES C-GEHALTS IM BODEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT IN SOEST	174
ABBILDUNG 127: VERÄNDERUNG DES C-GEHALTS IM BODEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT IN BRAUNSCHWEIG	175
ABBILDUNG 128: TAUSENDKORNMASSE (TKM) VON WINTERGERSTE IN VERSCHIEDENEN BETRIEBSSYSTEMEN (VORFRUCHT IN ()) AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 -2016. (GD5% O*B*N = 1,33 G (BS,V-B.=1,63 G), GD5% O*B*N.....	176
ABBILDUNG 129: HEKTOLITERGEWICHT (HLG) VON WINTERGERSTE IN VERSCHIEDENEN BETRIEBSSYSTEMEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VON DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 -2016 (GD 5% O*B*N =0,6 KG (BS,V-B.=0,7 KG) , GD 5% O*B*N*J =1,0 KG)	176
ABBILDUNG 130: TAUSENDKORNMASSE (TKM) VON WINTERWEIZEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5% O*B*N =1,0 G, GD 5% J*O*B*N = 1,7 G).....	177
ABBILDUNG 131: HEKTOLITERGEWICHT (HLG) VON WINTERWEIZEN AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN ABHÄNGIGKEIT VOM BETRIEBSSYSTEM UND DER HÖHE DER N-DÜNGUNG IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016 (GD 5% O*B*N = 0,75 KG, GD 5% J*O*B*N = 1,3 KG).....	177
ABBILDUNG 132: VERGLEICH DER KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/HA/A) ÜBER DIE ZEITRÄUME JUNI 2014 – JUNI 2015 UND JUNI 2015 – JUNI 2016. UNTERSUCHUNG DER FRÜCHTE SILOMAIS UND WINTERWEIZEN IN DEN BETRIEBEN O UND V IN DER VARIANTE (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.	197
ABBILDUNG 133: VERGLEICH DER ERTRAGSBEZOGENEN KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/DT/HA) ÜBER DIE ZEITRÄUME JUNI 2014 – JUNI 2015 UND JUNI 2015 – JUNI 2016. UNTERSUCHUNG DER FRÜCHTE SILOMAIS UND WINTERWEIZEN IN DEN BETRIEBEN O UND V IN DER VARIANTE (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.....	198
ABBILDUNG 134: VERGLEICH DER KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/HA/A) ÜBER DIE ZEITRÄUME AUSSAAT SILOMAIS 2014 – AUSSAAT SILOMAIS 2015 UND AUSSAAT SILOMAIS 2015 – AUSSAAT SILOMAIS 2016. UNTERSUCHUNG DER FRUCHT SILOMAIS IN DEN BETRIEBEN O UND V IN DER VARIANTE (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.....	199
ABBILDUNG 135: VERGLEICH DER ERTRAGSBEZOGENEN KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/DT/HA) ÜBER DIE ZEITRÄUME AUSSAAT SILOMAIS 2014 – AUSSAAT SILOMAIS 2015 UND AUSSAAT SILOMAIS 2015 – AUSSAAT SILOMAIS 2016. UNTERSUCHUNG DER FRUCHT SILOMAIS IN DEN BETRIEBEN O UND V IN DER VARIANTE (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.....	200
ABBILDUNG 136: VERGLEICH DER KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N /HA/A) ÜBER DIE ZEITRÄUME AUSSAAT SILOMAIS 2014 – AUSSAAT SILOMAIS 2015 (SM1) UND AUSSAAT SILOMAIS 2015 – AUSSAAT SILOMAIS 2016 (SM2). UNTERSUCHUNG DER FRUCHT SILOMAIS IM BETRIEB O IN DEN VARIANTEN (T1), (T2) UND (T3) AM STANDORT SOEST.....	201

ABBILDUNG 137: VERGLEICH DER ERTRAGSBEZOGENEN KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/DT/HA) ÜBER DIE ZEITRÄUME AUSSAAT SILOMAIS 2014 – AUSSAAT SILOMAIS 2015 (SM1) UND AUSSAAT SILOMAIS 2015 – AUSSAAT SILOMAIS 2016 (SM2). UNTERSUCHUNG DER FRUCHT SILOMAIS IM BETRIEB O IN DEN VARIANTEN (T1), (T2) UND (T3) AM STANDORT SOEST.....	202
ABBILDUNG 138: VERGLEICH DER KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/HA/A) ÜBER DEN ZEITRAUM AUSSAAT WINTERWEIZEN 2014 – AUSSAAT WINTERWEIZEN 2015. UNTERSUCHUNG DER FRUCHT WINTERWEIZEN IN DEN BETRIEBEN O UND M IN DEN VARIANTEN (T1) UND (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.....	203
ABBILDUNG 139: VERGLEICH DER ERTRAGSBEZOGENEN KUMULIERTEN LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/DT/HA) ÜBER DEN ZEITRAUM AUSSAAT WINTERWEIZEN 2014 – AUSSAAT WINTERWEIZEN 2015. UNTERSUCHUNG DER FRUCHT WINTERWEIZEN IN DEN BETRIEBEN O UND M IN DEN VARIANTEN (T1) UND (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.....	204

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: STANDORTBESCHREIBUNG DER VERSUCHSFLÄCHEN IN SOEST.....	9
TABELLE 2: STANDORTBESCHREIBUNG DER VERSUCHSFLÄCHE IN BRAUNSCHWEIG	10
TABELLE 3: FRUCHTFOLGEN DER BEISPIELBETRIEBE	16
TABELLE 4: QUALITÄTSANALYSEN AN ERNTEGUT UND ERNTERÜCKSTÄNDEN MIT DEN DAZU GEHÖRIGEN METHODEN IM 2. PROJEKTABSCHNITT (2013-2016)	18
TABELLE 5: N _{MIN} -WERTE (0-90 CM) DER EINZELNEN KULTUREN DES V-BETRIEBES ZU VEGETATIONSENDE	32
TABELLE 6: N _{MIN} -WERTE (0-90 CM) DER EINZELNEN KULTUREN DES M-BETRIEBES ZU VEGETATIONSENDE.....	32
TABELLE 7: N _{MIN} -WERTE (0-90 CM) DER EINZELNEN KULTUREN DES O-BETRIEBES ZU VEGETATIONSENDE.....	32
TABELLE 8: N-STUFEN IN DEN N-STEIGERUNGSVERSUCHEN.....	39
TABELLE 9: KORREKTURWERTE (ZU-/ABSCHLAG IN KG/HA N) NACH DER N _{MIN} -SOLLWERT METHODE	40
TABELLE 10: UM ZU- UND ABSCHLÄGE KORRIGIERTE N-SOLLWERTE (KG N/HA) IN DEN N-STEIGERUNGSVERSUCHEN IN W-GERSTE, W-WEIZEN, W-RAPS UND SILOMAIS IN DEN VERSCHIEDENEN BETRIEBSSYSTEMEN AN DEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.....	40
TABELLE 11: HÖHE DER AUSGEBRACHTEN N-MENGEN (KG/HA N) IN DEN DÜNGEVERSUCHEN ZU WINTERGERSTE AN DEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG 2014 - 2016 (ANRECHNUNG DES N-GEHALTES IM GÄRREST ZU 70 %)	42
TABELLE 12: HÖHE DER N-DÜNGUNG (KG/HA N) (N IM GÄRREST ZU 70 % ANGERECHNET) ZU WINTERWEIZEN NACH WINTERRAPS IM O-BETRIEB UND IM M-BETRIEB AN DEN STANDORTEN BRAUNSCHWEIG UND SOEST IN DEN JAHREN 2014 BIS 2016	48
TABELLE 13: N-DÜNGUNG (KG/HA N) VON WINTERRAPS IM O-BETRIEB UND M-BETRIEB AN DEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG (ANRECHNUNG N-GEHALT ORG. DÜNGER ZU 70 %)	54
TABELLE 14: DARSTELLUNG FÜR DAS JAHR 2015 DER N-AUFWANDSMENGEN UND ZUSAMMENSETZUNG DER N- VERSORGUNG IM SILOMAIS IN DEN VERSCHIEDENEN N-DÜNGUNGSINTENSITÄTEN UND DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER KLIMABETRIEB (O) UND VIEHHALTENDER BETRIEB (V) AM BEISPIEL DES STANDORTS SOEST IN DEN ORGANISCH GEDÜNGTEN VARIANTEN. BEIM GÄRREST WURDE EINE N- VERFÜGBARKEIT VON 70 % ZU GRUNDE GELEGT	61
TABELLE 15: GEDÜNGTE N-MENGEN (KG/HA N) IM SILOMAIS IN DEN VERSCHIEDENEN N-DÜNGUNGSTECHNIKEN UND DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER BETRIEB (O) UND VEREDELUNGSBETRIEB (V) AM STANDORT SOEST (SO). BEIM GÄRREST WURDE EINE N-VERFÜGBARKEIT VON 70 % ZU GRUNDE GELEGT	62
TABELLE 16: GEDÜNGTE N-MENGEN (KG/HA N) IM SILOMAIS IN DEN VERSCHIEDENEN N-DÜNGUNGSTECHNIKEN UND DEN BETRIEBSSYSTEMEN OPTIMIERTER KLIMABETRIEB (O) UND VIEHHALTENDER BETRIEB (V) AM STANDORT BRAUNSCHWEIG (BS). BEIM GÄRREST WURDE EINE N-VERFÜGBARKEIT VON 70 % ZU GRUNDE GELEGT	62
TABELLE 17: GETESTETE VARIANTEN AUF N ₂ O- UND NH ₃ -EMISSIONEN	80
TABELLE 18: KUMULIERTE LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/HA/A) ÜBER DIE ZEITRÄUME JUNI 2014 – JUNI 2015 UND JUNI 2015 – JUNI 2016. UNTERSUCHUNG DER FRÜCHTE SILOMAIS UND WINTERWEIZEN IN DEN BETRIEBEN O UND V IN DER VARIANTE (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.	89
TABELLE 19: KUMULIERTE LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/HA/A) ÜBER DIE ZEITRÄUME AUSSAAT SILOMAIS 2014 – AUSSAAT SILOMAIS 2015 UND AUSSAAT SILOMAIS 2015 – AUSSAAT SILOMAIS 2016. UNTERSUCHUNG DER FRUCHT SILOMAIS IN DEN BETRIEBEN O UND V IN DER VARIANTE (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.	91
TABELLE 20: KUMULIERTE LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/HA/A) ÜBER DIE ZEITRÄUME AUSSAAT SILOMAIS 2014 – AUSSAAT SILOMAIS 2015 UND AUSSAAT SILOMAIS 2015 – AUSSAAT SILOMAIS 2016. UNTERSUCHUNG DER FRUCHT SILOMAIS IM BETRIEBEN O IN DEN VARIANTEN (T1), (T2) UND (T3) AM STANDORT SOEST.....	92
TABELLE 21: KUMULIERTE LACHGASEMISSIONEN (KG N ₂ O-N/HA/A) ÜBER DEN ZEITRAUM AUSSAAT WINTERWEIZEN 2014 – AUSSAAT WINTERWEIZEN 2015. UNTERSUCHUNG DER FRUCHT WINTERWEIZEN IN DEN BETRIEBEN O UND M IN DEN VARIANTEN (T1) UND (T2) AN DEN BEIDEN STANDORTEN SOEST UND BRAUNSCHWEIG.	93
TABELLE 22: ERZEUGERPREISE PFLANZENPRODUKTION (€/DT).....	107
TABELLE 23: PREISANNAHMEN FÜR DÜNGER	108
TABELLE 24: TREIBHAUSGASEMISSIONEN IM ACKERBAU LT. LITERATURANGABEN	109
TABELLE 25: DECKUNGSBEITRÄGE 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	110

TABELLE 26: GEWINNBEITRÄGE 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	110
TABELLE 27: GEWINNBEITRÄGE 2012/2013 – 2015/2016 (€/GE)	110
TABELLE 28: GEWINNBEITRÄGE WINTERWEIZEN 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	111
TABELLE 29: GEWINNBEITRÄGE WINTERGERSTE 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	111
TABELLE 30: GEWINNBEITRÄGE WINTERRAPS 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	112
TABELLE 31: GEWINNBEITRÄGE SILOMAIS 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	112
TABELLE 32: GEWINNBEITRÄGE GRÜNROGGEN 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	112
TABELLE 33: GEWINNBEITRÄGE ACKERBOHNE 2012/2013 – 2015/2016 (€/HA)	113
TABELLE 34: GESAMTKOSTEN 2012/2013 – 2015/2016 (€/GE)	113
TABELLE 35: STRUKTUR DER VARIABLEN KOSTEN (€) IM DURCHSCHNITT DER FRUCHTFOLGE	114
TABELLE 36: DÜNGERKOSTEN IM DURCHSCHNITT DER FRUCHTFOLGE 2012/2013 – 2015/2016	114
TABELLE 37: PFLANZENSCHUTZMITTELKOSTEN IM DURCHSCHNITT DER FRUCHTFOLGE 2012/2013	115
TABELLE 38: VARIABLE MASCHINENKOSTEN IM DURCHSCHNITT DER FRUCHTFOLGE 2012/2013	115
TABELLE 39: ARBEITSAUFWAND 2012/2013 – 2015/2016 (AKH/HA)	115
TABELLE 40: GEWINNBEITRÄGE DER EINZELNEN BETRIEBE SOWIE DIFFERENZEN ZUM O-BETRIEB, ERNTEJAHRE 2014, 2015, 2016	116
TABELLE 41: TREIBHAUSPOTENTIAL (KG CO ₂ -ÄQ./HA) M-, V- UND O-BETRIEBE FÜR DIE JEWEILIGEN STANDORTE (2014 BIS 2016)	117
TABELLE 42: TREIBHAUSPOTENTIAL – VERMEIDUNGSKOSTEN JE KG CO ₂ BEIM ÜBERGANG ZUR KLIMAOPTIMIERTEN BEWIRTSCHAFTUNG FÜR DIE JEWEILIGEN STANDORTE (2014 BIS 2016)	117
TABELLE 43: MITTLERE N-MENGEN (KG/HA) MINERALISCH SOWIE ORGANISCH BEI GLEICHEM VERFAHREN (SILOMAIS)	121
TABELLE 44: MITTLERE N-MENGEN (KG/HA) MINERALISCH SOWIE ORGANISCH BEI GLEICHEM VERFAHREN (WINTERWEIZEN)	121
TABELLE 45: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN WINTERWEIZEN (€/HA)	129
TABELLE 46: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN WINTERGERSTE (€/HA)	130
TABELLE 47: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN WINTERRAPS (€/HA)	131
TABELLE 48: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN SILOMAIS IN ABHÄNGIGKEIT DES SOLLWERTES UND DER APPLIKATION, SOEST (2014)	131
TABELLE 49: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN SILOMAIS IN ABHÄNGIGKEIT DES SOLLWERTES UND DER APPLIKATION, SOEST (2015)	132
TABELLE 50: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN SILOMAIS IN ABHÄNGIGKEIT DES SOLLWERTES UND DER APPLIKATION, SOEST (2016)	132
TABELLE 51: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN SILOMAIS IN ABHÄNGIGKEIT DES SOLLWERTES UND DER APPLIKATION, BRAUNSCHWEIG (2014)	132
TABELLE 52: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN SILOMAIS IN ABHÄNGIGKEIT DES SOLLWERTES UND DER APPLIKATION, BRAUNSCHWEIG (2015)	132
TABELLE 53: GRENZGEWINN BEI STEIGERUNG DER N-DÜNGUNG IN SILOMAIS IN ABHÄNGIGKEIT DES SOLLWERTES UND DER APPLIKATION, BRAUNSCHWEIG (2016)	132
TABELLE 54: ZUSAMMENFASSUNG: POSITIVER UND NEGATIVER GRENZGEWINN SILOMAIS UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER APPLIKATIONSMETHODE, SOEST UND BRAUNSCHWEIG 2014 - 2016	133
TABELLE 55: VARIANZTABELLE DER DÜNGEVERSUCHE WINTERGERSTE (SIG. HAUPT- UND WECHSELWIRKUNGEN GELB UNTERLEGT)	178
TABELLE 56: VARIANZTABELLE DER DÜNGEVERSUCHE WINTERWEIZEN (SIG. HAUPT- UND WECHSELWIRKUNGEN GELB UNTERLEGT)	181
TABELLE 57: VARIANZTABELLE DER DÜNGEVERSUCHE WINTERRAPS (SIG. HAUPT- UND WECHSELWIRKUNGEN GELB UNTERLEGT)	185
TABELLE 58: VARIANZTABELLE DER DÜNGEVERSUCHE SILOMAIS IN SOEST (SIG. HAUPT- UND WECHSELWIRKUNGEN GELB UNTERLEGT)	189
TABELLE 59: VARIANZTABELLE DER DÜNGEVERSUCHE SILOMAIS IN BRAUNSCHWEIG (SIG. HAUPT- UND WECHSELWIRKUNGEN GELB UNTERLEGT)	193

Vorwort

Mit der Vorlage dieses Berichtes findet das Projekt „Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft - optimierter Klimabetrieb“ seinen Abschluss. Alle wesentlichen Erkenntnisse der zweiten Projektphase 2013-2017 sind hierin wiedergegeben. Die Ergebnisse knüpfen an die der ersten Projektphase 2010-2013 an.

Der Bericht wurde entsprechend der Vorgaben des Projektträgers gegliedert und zusammengestellt. Zusätzlich wurde eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse vorangestellt, die einen schnellen Überblick ermöglicht. In einem umfangreichen Anhang wurden solche Daten aufgenommen, die zur Absicherung der Ergebnisse zwar von Bedeutung, für ihr Verständnis gleichwohl nicht erforderlich sind. Darunter fallen auch solche Daten, bei denen keine Unterschiede zwischen den Modellbetrieben oder Versuchsvarianten beobachtet wurden, z.B. bei bestimmten Qualitätsparametern. Zur besseren Handhabung des Abschlussberichtes wurde der Anhang in der Papierform separat gebunden.

An der Durchführung des Projektes haben viele Personen mitgewirkt, ohne die das Gelingen nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank gilt dabei Frau Ulrike Neumann, die das Vorhaben von Seiten der BLE betreut hat und stets geduldige und hilfsbereite Ansprechpartnerin war.

Die anspruchsvollen Feldversuche wurden mit großer Sorgfalt unter der Leitung Hans-Henning Langenohl vom Julius Kühn-Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde am Standort Braunschweig und Günter Stemann von der FH-Südwestfalen im Versuchsgut Merklingsen bei Soest jeweils zusammen mit ihren Mitarbeitern angelegt und alle erforderlichen Feldarbeiten durchgeführt.

Dr. Karen Korte als Projektmitarbeiterin mit Dienstsitz im Thünen-Institut für Agrartechnologie war für die Betreuung der Feldversuche am Braunschweiger Standort verantwortlich und hat wichtige vorbereitende Arbeiten für die Erstellung des Abschlussberichtes geleistet. Ihre Kollegin am Soester Standort, Frau Ulrike Ernst, hat neben der Feldversuchsbetreuung die CNS-Analysen und NIRS-Analysen im Soester Labor vorgenommen. Zusammen waren sie in beiden Projektphasen wichtige Garanten für die Kontinuität der Arbeitsabläufe und haben besonderes Engagement mit hoher Gewissenhaftigkeit in ihren Arbeitsbereichen gezeigt.

Dr. Joachim Brunotte vom Thünen-Institut für Agrartechnologie hat stets ein wachsames Auge auf die Versuchsdurchführung am Braunschweiger Standort gehabt und stand dem Projekt von der ersten Projektphase an mit wissenschaftlichem Sachverstand zur Seite. Zu allen Fragen der Bodenbearbeitung hat er wertvolle Anregungen gegeben. Prof. Dr. Thomas Weyer hat mit seiner Arbeitsgruppe die bodenphysikalischen Untersuchungen durchgeführt.

Die Sicherstellung der zweijährigen unterbrechungsfreien Messreihen zur Erfassung der Lachgasemissionen in Soest und Braunschweig war eine Herausforderung. Diese wurde durch Nicolas Ruoff als Projektmitarbeiter mit großer Akribie angegangen. Er erhielt dabei auch bei widrigsten Witterungsbedingungen tatkräftige und verlässliche Unterstützung von Dorothee Kramps-Alpmann, (Projektmitarbeiterin) Dr. Karen Korte und Carolin Römer vom Fachbereich Agrarwirtschaft. Seine wissenschaftliche Betreuung wurde dankenswerter Weise durch Dr. Reinhard Well in enger Abstimmung mit Prof. Dr. Heinz Flessa an seinem Dienstsitz im Thünen-Institut für Agrarklimaschutz gewährleistet. Für die Analysen des Teilprojektes „Klimagase“ wurden die dortigen Labore genutzt. Der Bericht zu diesem Teilprojekt wurde durch Nicolas Ruoff angefertigt.

Dorothee Kramps-Alpmann hat die wissenschaftliche Umsetzung des Teilprojektes „N-Düngeoptimierung“ mit viel organisatorischem Geschick gewährleistet und für beide Standorte koordiniert.

Karoline Röper hat sich 2016 als ihre Nachfolgerin schnell in das Projekt eingearbeitet und zusammen mit Dr. Franz-Ferdinand Gröblichhoff vom Soester Fachbereich Agrarwirtschaft wesentliche Teile der pflanzenbaulichen Auswertungen vorgenommen, die entsprechenden Teile des Abschlussberichtes erstellt und den Gesamtbericht zusammengeführt.

Jan Berglar hat als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr. Jürgen Braun vom Soester Fachbereich Agrarwirtschaft zusammen mit Inga Hoffmann (Projektmitarbeiterin) die ökonomische Auswertung angefertigt.

Dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft in Bonn und Berlin und dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Düsseldorf sei auf diesem Weg herzlich für die Finanzierung des Projektes gedankt.

Soest, April 2017

Prof. Dr. Bernhard C. Schäfer

Zusammenfassung

„Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft - optimierter Klimabetrieb II“

Das Forschungsvorhaben „Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft - optimierter Klimabetrieb II“ wurde für die Jahre 2013-2017 bewilligt und ist die Fortführung des seit 2010 laufenden Projektes „Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft - optimierter Klimabetrieb“. Die Finanzierung erfolgte zu 2/3 aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn/Berlin und zu 1/3 aus Mitteln des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz, (MKULNV), Düsseldorf. Die Projektträgerschaft lag bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Zuwendungsempfänger war die Fachhochschule Südwestfalen. Als Kooperationspartner waren das Julius-Kühn-Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde sowie die Thünen-Institute für Agrartechnologie und Agrarklimaschutz eingebunden.

In der ersten Projektphase (2010-2013) standen Fragen zur Risikoabsicherung, der Bodenbearbeitung, der Ökobilanzierung und der ökonomischen Bewertung im Fokus (s. Abschlussbericht vom 25.06.2014).

In der Laufzeitverlängerung wurden Versuche zur N-Düngeoptimierung unter teilweiser Verwendung von Biogasgärresten angelegt (Teilprojekt „N-Düngeoptimierung“, Arbeitsgruppe Schäfer, FH-Südwestfalen), Messungen zur Freisetzung klimaschädlicher Gase in ausgewählten Versuchsvarianten (Teilprojekt „Klimagase“, Arbeitsgruppe Flessa/Well, Thünen-Institut für Agrarklimaschutz) durchgeführt und unter Einbeziehung der hier gewonnen Erkenntnisse erneut eine ökonomische Auswertung (Teilprojekt „Ökonomische Bewertung“, Arbeitsgruppe Braun, FH-Südwestfalen) vorgenommen. Die Untersuchungen wurden in Fortführung der Großparzellen-Versuchsanlagen aus der ersten Projektlaufzeit auf den Standorten in Braunschweig (Arbeitsgruppe Brunotte, Thünen-Institut für Agrartechnologie) und Soest durchgeführt, an denen jeweils drei Modellbetriebe mit ihren Fruchtfolgefeldern angelegt waren. Neben einem Marktfruchtbetrieb (M-Betrieb) wurden ein Veredelungsbetrieb mit Biogasanlage (V-Betrieb) und ein Optimierter Klimabetrieb (O- Betrieb) abgebildet.

Teilprojekt N-Düngeoptimierung

Ziel des Teilprojektes N-Düngeoptimierung war die Ableitung eines Mineraldüngeräquivalentes für Gärreste aus Biogasanlagen als Basis für eine Düngebedarfsermittlung sowie die Überprüfung der Empfehlungen zur N-Düngebedarfsermittlung nach der Sollwertmethode unter den Bedingungen der drei Modell-Betriebe bei Wintergerste, Winterweizen, Winterraps und Silomais. Für die organische Düngung mit Biogasgärrest wurde im V- und im O-Betrieb bei der Düngebedarfsermittlung ein Mineraldüngeräquivalent von 70 % angenommen. Bei der Bilanzierung wurde der Stickstoff im Gärrest zu 85 % angerechnet, um nur die unvermeidlichen Ausbringungsverluste zu berücksichtigen.

Grundsätzlich bildet das Sollwertverfahren die zu erwartende Nachlieferung und die erforderliche N-Düngung korrekt ab. Bei einer Düngung nach dem Sollwertverfahren werden an beiden Standorten bei allen Kulturen im Mittel der drei Jahre unabhängig von der Vorfrucht sowohl Erträge und Qualitäten im optimalen Bereich als auch bei Winterweizen und Wintergerste ausgeglichene bzw. bei Silomais negative N-Bilanzen erreicht, die im Rahmen der Vorgaben der Neufassung der DüngeVO liegen. Bei Raps gelingt der Ausgleich der hoch positiven Bilanzsalden bei der ertraglich und ökonomisch optimalen Düngung erwartungsgemäß nicht. Grundsätzlich ist eine weitere Absenkung der N-Bilanzsalden in allen Kulturen anzustreben. Die Annahme eines Mineraldüngeräquivalents (MDÄ) bei der Düngung mit Biogasgärresten von 70 % zur Düngeplanung und 85% zur N-Bilanzierung erscheint zutreffend, da sich rein mineralisch gedüngte und Varianten mit Biogasgärrestdüngung im Ergebnis gleichen.

Die ökonomische Auswertung bestätigt die Überlegungen zur Sollwertdüngung. Die Grenzgewinne sind bei einer Erhöhung der N-Düngung über den Sollwert in der Regel negativ. Durch das hohe Mineralisationsvermögen des Standortes Soest ist die Wirkung der Steigerung der N-Düngung dort oft gering. Die jährlichen Ertragsschwankungen erschweren zusätzlich die Bestimmung von standortspezifischen Abschlägen zur Verbesserung des N-Sollwertverfahrens.

Teilprojekt „Klimagase“

Der relative Anteil der Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft an den nationalen Gesamtemissionen steigerte sich seit 1990 von 60 % auf etwa 78 %. Bei NH_3 ist die Landwirtschaft für 95% der nationalen Emissionen verantwortlich, wobei die Ausbringung flüssiger organischer Dünger die größte Verlustquelle bildet. Beide Aspekte unterstreichen die Bedeutung dieses Teilprojektes für das gesamte Forschungsvorhaben.

In den Kulturen Silomais und Winterweizen wurden Lachgas- und Ammoniakemissionen in den Sollwert-Varianten der angelegten Exaktversuche gemessen, um die Höhe der gasförmigen Stickstoffverluste (über N_2O und NH_3) und deren Klimawirksamkeit zu ermitteln. Die Treibhausgasmessungen (N_2O und CH_4) erfolgten wöchentlich und kontinuierlich über den Zeitraum von zwei Jahren (Juni 2014 bis Juni 2016). Die Beprobung wurde, wenn möglich, immer am selben Wochentag und zur selben Tageszeit durchgeführt. Die Datenerfassung erfolgte dabei mit der geschlossenen Kammermethode. Die Erfassung der NH_3 -Emissionen wurde mit der „Dräger-Tube-Methode“ unmittelbar nach der Applikation der Gärreste vorgenommen.

Im Ergebnis schnitt der O-Betrieb zwar hinsichtlich der Lachgas- und Ammoniakemissionen schlechter als der V-Betrieb ab, zeigt aber noch einiges an Potential für Verbesserungen um den Ausstoß klimaschädlicher Gase weiter zu reduzieren. Bei der Einschränkung der Bodenbearbeitung über eine Mulchsaat hinaus (Direktsaat) kam es zu erhöhten Lachgasemissionen, wobei in der Gärrestunterflurdüngung mittels Strip-Till eine Einsparung von NH_3 -Emissionen nicht mit erhöhten N_2O -Emissionen erkauft wurde. Erfolgt die Ausbringung

wegen des Verzichtes auf die Bodenbearbeitung erst in die stehenden Bestände, kommt es zusätzlich noch zu hohen Ammoniakverlusten welche die N-Nutzungseffizienz verringern. Die Varianten der Betriebe M und V hingegen zeigen geringe Ammoniakemissionen infolge der sofortigen Einarbeitung der Biogasgärreste nach der Ausbringung und sind daher in dieser Hinsicht unkritisch. Außerdem sind Lachgasemissionen geringer als im O-Betrieb und somit weniger kritisch.

Teilprojekt „Ökonomische Bewertung“

Für die ökonomische Bewertung wurden die in den anderen Teilprojekten aus Versuchen ermittelten Daten über eine Auswertung der Schlagkarteien sowie von Ökobilanzdaten bzw. Lachgasemissionen ermittelt. Alle Daten wurden, insbesondere bezüglich der Maschinenausstattung und der Preise für Produkte und Produktionsmittel, standardisiert. Die Berechnung der variablen Kosten und Erlöse basierte auf Marktstatistiken und Datensammlungen. Bei den Arbeitserledigungskosten wurden eine Vollausslastung der Maschinen und Geräte unterstellt und die Daten von Richtwertsammlungen (KTBL-Planungsdaten bzw. Richtwert-Deckungsbeiträge LWK Niedersachsen) zugrunde gelegt. In die Auswertung gingen auch die Daten der ersten Projektphase mit ein. Die im Teilprojekt „Klimagase“ durchgeführten Lachgasmessungen aus den Jahren 2014 bis 2016 für die Kulturen Winterweizen und Silomais dienten als Grundlage der Kalkulation von CO₂-Äquivalent-Vermeidungskosten je Hektar.

Bei den über die Jahre gemittelten Gewinnbeiträgen (je ha und je GE) übertraf der M-Betrieb die Ergebnisse des O-Betriebes und dieser wiederum die des V-Betriebes an beiden Standorten. Die höhere Leistungsfähigkeit des Soester Standortes kam dabei in den meisten Jahren und bei der Mehrzahl der Kulturen zum Tragen. Große Unterschiede bei den Kulturen und Betriebsformen zeigten sich vor allem bei Wintergerste im O- und V-Betrieb, was sich durch die günstige Vorfruchtwirkung der Ackerbohne begründen ließ. Der Anbau von Grünroggen ist auf beiden Standorten mit einem hohen wirtschaftlichen Risiko verbunden.

Bei den variablen Kosten schneidet der M-Betrieb im Mittel über die Fruchtfolge am besten, der V-Betrieb am schlechtesten ab. Der O-Betrieb nimmt eine mittlere Stellung ein. Beim Arbeitsaufwand liegt der O-Betrieb am günstigsten, hier konnte betriebseigene Arbeitszeit durch Direktsaat bzw. durch den Einsatz von Lohnunternehmern bei organischer Düngung eingespart werden.

Beim Treibhauspotential schneidet der O-Betrieb auf beiden Standorten am besten ab. Aufgrund der schlechteren Gewinnbeiträge müssten dem M-Betrieb ca. 20 bzw. 62 ct/kg CO₂-Äquivalent (Soest bzw. Braunschweig) für einen ökonomischen Ausgleich bei klimafreundlicher Bewirtschaftung entsprechend des O-Betriebes gezahlt werden. Naheliegender ist aber der Vergleich zwischen V- und O-Betrieb, da in beiden Betrieben vergleichbare Stoffströme (Schweinemast, Energieerzeugung über Biogasanlage, Rückführung von Gärresten) vorliegen. Hier wäre die Umstellung auf eine klimafreundliche Bewirtschaftung vom V- zum O-

Betrieb auch ökonomisch sinnvoll und würde mit 92 bzw. 28 ct/kg eingespartem CO₂-Äquivalent (Soest bzw. Braunschweig) zu Buche schlagen. Auf Grund der im O-Betrieb vorherrschenden vielfältigen Anbaustruktur ist die Risikoanfälligkeit hier zudem am niedrigsten.

Die ökonomische Bewertung der Versuche zur N-Düngeoptimierung ergab, dass die meisten positiven Grenzgewinne bei der Steigerung der N-Düngung, und damit das Düngeoptimum für Winterweizen und Wintergerste auf beiden Standorten, sowie für Winterraps in Braunschweig durchweg bei SW -25 % erzielt wurden und damit Einsparpotentiale bei der Düngung deutlich wurden. Bei Silomais hat eine zunehmende Düngeintensität immer negativere Grenzgewinne zur Folge. Allgemein kann daher abgeleitet werden, dass aus ökonomischen Gesichtspunkten eine hohe Düngeintensität ungünstige Auswirkungen zur Folge hat.

Die Nutzung weiterer Optimierungspotenziale wäre bei langfristiger Betrachtungsweise für den O-Betrieb ein zukünftig sinnvolles Konzept, da es Emissionen mindern kann. Empfehlenswert wären diese Optimierungsprozesse insbesondere auch für Betriebe mit Veredlung, wie sich aus dem direkten Vergleich von V- und O-Betrieb ableiten lässt. Bei umfassender Bewertung sollten Faktoren wie beispielsweise Erosionsminderung, Biodiversitätssteigerung, Risikominderung sowie Arbeitsentlastung in die Analysen miteinbezogen werden.

Übergeordnete Ergebnisse aus den Betriebsvergleichen

Keiner der Modellbetriebe weist während der Projektlaufzeit eindeutige Vor- oder Nachteile bei den Erträgen und Qualitäten auf, sodass hinsichtlich der Bewertung ergänzend andere Kriterien berücksichtigt werden müssen:

Die Fruchtartendiversifizierung durch Auflockerung der Fruchtfolgen ist eine Möglichkeit zur Risikominimierung um Witterungsextreme auszugleichen.

Die zahlreichen positiven Wirkungen nicht wendender Bodenbearbeitung können zur Stabilisierung zukunftsfähiger Anbausysteme unter den Bedingungen des Klimawandels beitragen. Die Umsetzung in der extremen Form der Direktsaat stößt dabei vor allem an dem feuchteren Standort in Soest aber an Grenzen (Schnecken und Mäuse) und ist auf den Einsatz von Glyphosat angewiesen.

Dem Management der Erntereste kommt dabei besondere Bedeutung zu. Die notwendige Eingriffsintensität in den Boden hängt von Kulturart, Standort und der verfügbaren Technik ab.

Die Veränderungen in den untersuchten bodenphysikalischen, -biologischen und -chemischen Parametern lassen sich im Wesentlichen auf die Art der Bodenbearbeitung und damit die Einarbeitungstiefe der Erntereste und Düngemittel zurückführen. Bei Pflugarbeit sind die untersuchten Krumenschichten annähernd gleich und bei mehrjähriger Mulch- und Direktsaat ist eine deutliche Schichtung je nach

Eingriffstiefe erkennbar, ohne dass sich daraus Hinweise auf die Erfordernis einer Anpassung der Düngestrategie bei Phosphor und Kalium ergeben.

Fazit

Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft sind komplex und greifen oft in einander. Die Veränderung einzelner Faktoren kann Auswirkungen in anderen Bereichen haben, die gegenläufige und unerwünschte Effekte mit sich bringen. Der zu Projektbeginn konzipierte „Optimierte Klimabetrieb“ eröffnet eine Reihe von Möglichkeiten Klimaschutzziele voranzubringen, zeigt aber auch mögliche Zielkonflikte auf (z.B. Verzicht auf Bodenbearbeitung als Erosionsschutz und zur Reduktion des fossilen Energieverbrauches vs. Ammoniakfreisetzung).

Folgende wichtige Erkenntnisse sollten nach Ablauf des Projektes festgehalten werden:

1. Fruchtartendiversifizierung stellt ein sinnvolles Instrument zur Risikoabsicherung dar. Im Vergleich von V- und O-Betrieb wird zudem deutlich, dass auch ökonomische Vorzüglichkeit gegeben ist.
2. Die Einschränkung der Bodenbearbeitung bis hin zur Mulchsaat führte in dieser Untersuchung nicht zu erhöhten Lachgasemissionen. Erst der weiterführende, vollkommene Verzicht auf die Bodenbearbeitung (Direktsaat) führte zu Steigerung der N₂O-Freisetzung.
3. Die Freisetzung von Ammoniak kann sowohl durch das Strip-Till-System wie auch durch die sofortige Einarbeitung nach der Ausbringung wirksam unterbunden werden.
4. Die Umsetzung der Direktsaat bereitete an beiden Standorten Probleme. Während die Erträge von Weizen, Gerste, Raps und Ackerbohnen auf praxisüblichem Niveau gehalten werden konnten, brachen die Maiserträge deutlich ein und konnten erst nach einer moderaten Bodenbearbeitung stabilisiert werden.
5. Die Bewertung der Gärreste mit einem Mineraldüngeräquivalent von 70 % ist auf der Grundlage der durchgeführten Exaktversuche als sinnvoll anzusehen.

1 Ziele und Aufgaben des Vorhabens

1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben „Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft (optimierter Klimabetrieb) – Verlängerung Phase 2“ wurde zum 01.10.2013 mit einer weiteren auf drei Jahre befristeten Laufzeit aus Mitteln des BMELV und des MKULNV bewilligt.

Die Landwirtschaft ist mit Blick auf den Klimawandel sowohl Verursacher wie auch Betroffener. Laut anerkannter Klimaszenarien wird es zukünftig häufiger zu extremen Wetterereignissen mit signifikanten Auswirkungen auf die Ertragssicherheit heutiger Ackerbausysteme kommen. Die Effekte des Klimawandels können sich einerseits ertragsmindernd in Form von ausgedehnten Trockenperioden während der Wachstumsphasen im Frühjahr, Sturm- und Hagelereignissen oder starken Niederschlägen in Verbindung mit Überschwemmungen zeigen. Andererseits sind auch ertragssteigernde Wirkungen durch verlängerte Wachstumsperioden in Folge milderer Winter oder durch höhere CO₂-Gehalte in der Atmosphäre denkbar.

Die mit den verschiedenen Fruchtfolgen in Soest und Braunschweig angelegten drei Modellbetriebe (Marktfruchtbetrieb, viehhaltender Betrieb mit Biogasanlage und optimierter Klimabetrieb) wurden 2013/14 im vierten Jahr bewirtschaftet. Systembedingte Unterschiede konnten daher immer besser erfasst und Detailfragen bearbeitet werden. In der ersten Projektphase standen die Optimierung der Bodenbearbeitung, die Erfassung der Ertragsstabilität, die Ökobilanzierung und die ökonomische Bewertung im Fokus. Dabei wurde die besondere Bedeutung einer optimierten Stickstoffdüngung für die erfolgreiche Einführung einer durchgängigen Direktsaat und die Minimierung des Treibhauspotentials deutlich. Im Rahmen der Projektverlängerung wurden daher in ausgesuchten Kulturen Exaktversuche zur Herleitung des N Düngeoptimums angelegt. Dabei wurde die Düngung mit Gärresten entsprechend der in den Betrieben anfallenden Nährstoffmengen vorgenommen, die mineralische N-Ergänzungsdüngung aber mit Zu- und Abschlägen gegenüber dem N-Sollwert variiert, wodurch Mineraldüngeräquivalente abgeleitet werden können. Dies ist besonders auch nach Ackerbohnen von Interesse. Im Mais wurde am Standort Soest neben der Schleppschlauchausbringung auch das Strip-Till-Verfahren mit einer Gärrestunterflurdüngung untersucht. In dieser Versuchsanlage und in den Exaktversuchen wurden Untersuchungen zur Freisetzung klima- und umweltbelastender Gase (N₂O, NH₃) vorgenommen. Die langfristigen ökonomischen Effekte der Systeme wurden gegen Ende der 2. Projektphase abgeschätzt.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Ergebnisse der ersten Projektphase sind im Abschlussbericht „Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft (optimierter Klimabetrieb)“ zu finden und werden daher an dieser Stelle nicht weiter aufgeführt.

2 Gemeinsames Zentralexperiment

2.1 Standortbeschreibung

Soest

Der Versuchsstandort Soest liegt im Naturraum Soester Börde (Niederbörde) in der Gemeinde Welver (51°57'N, 08°00'E; 80 m NN) und entspricht dem Sommerregentyp. Die im langjährigen Mittel fallenden Jahresniederschläge von rund 750 mm weisen eine gute Verteilung mit einem Maximum in den Sommermonaten auf. Die vorherrschenden Bodenarten sind Ut3 mit einem Schluffanteil von über 80 %. Als Bodentyp wird eine Pseudogley-Parabraunerde angegeben, die einen Humusgehalt von meist über 2 % aufweist. Die Versuchsflächen sind auf zwei Schläge aufgeteilt und liegen ca. 80 m ü. NN. Während die beiden Modelbetriebe M (Marktfruchtbetrieb) und V (Viehhaltender Betrieb mit Biogasanlage) (siehe 2.3 Anbausysteme) auf einem Schlag zusammengefasst werden konnten, wurde der O (Optimierter Klimabetrieb) auf einem separaten Schlag etabliert. Auf beiden Flächen ist im Oberboden ein Krümelgefüge vorherrschend. Sie sind druckempfindlich sowie verschlammungsgefährdet und weisen eine mittlere bis geringe Luft- und Wasserdurchlässigkeit bei mittlerer bis geringer Erosionsgefährdung auf. Die Bonität der Versuchsflächen bewegt sich zwischen 70-75 Bodenpunkten bei der Zustandsstufe L4 Lö, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Standortbeschreibung der Versuchsflächen in Soest

Versuchsfläche Soest (Merklingsen)	
Naturraum:	Soester Börde
Höhenlage:	80 m ü. NN
Klima:	ca. 750 mm Niederschlag, Ø Jahrestemperatur 9,0 °C
Bodentyp:	Pseudogley-Parabraunerde
Bodenart:	Ut3, Schluffanteil ca. 80-85 %.
Bonität:	Bodenpunkte 70-75, Zustandsstufe L4 Lö
Eigenschaften:	druckempfindlich, verschlammungsgefährdet, mittlere bis geringe Luft- und Wasserdurchlässigkeit, mittlere bis geringe Erosionsgefährdung (CRAMER 2006)

Braunschweig

Die Versuchsflächen am Standort Braunschweig befinden sich auf einer arrondierten Fläche in der Samtgemeinde Sickte am Ortsausgang Salzdahlum in Richtung BS-Mascherode (52°16'N, 10°54'E; 80 m NN).

Auf dieser Fläche sind 14 Großparzellen von je 48 m x 100 m zzgl. begrünter Zufahrtswege angelegt worden. Der Standort Braunschweig repräsentiert im Projekt eine Region mit geringer und der Standort Soest eine Region mit hoher Niederschlagsintensität. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge pro Jahr liegt in Braunschweig mit 570 mm ca. 200 mm unter dem Wert der Soester Börde.

Nach der bodenkundlichen Übersichtskarte im Maßstab 1:50 000 (BÜK 50) handelt es sich am Versuchsstandort Braunschweig um einen recht homogenen Ton-Verwitterungsboden (LBEG 2010). Geringfügige Unterschiede lassen sich anhand der Bodenarten zwischen dem westlichen und östlichen Bereich der Fläche feststellen, wobei der Schluffgehalt zu Gunsten eines erhöhten Sandanteils von Westen nach Osten leicht abnimmt, wohingegen der Tongehalt von Westen nach Osten geringfügig ansteigt. Somit besteht der Bearbeitungshorizont aus mittel tonigem Schluff bis schwach sandigem Lehm. Die Ackerzahlen liegen zwischen 51 und 56 Bodenpunkten. Tabelle 2 fasst die wichtigsten Parameter zusammen.

Tabelle 2: Standortbeschreibung der Versuchsfläche in Braunschweig

Versuchsfläche Braunschweig (Sicke)	
Naturraum:	Norddeutsches Tiefland
Höhenlage:	ca. 80 m ü. NN
Klima:	ca. 570 mm Niederschlag, Ø Jahrestemperatur 9,7 °C
Bodentyp:	Pseudogley-Parabraunerde / Pseudogley-Pelosol
Bodenart:	Stark schluffiger Ton (Tu4) (25-35 % Ton, 65-75 % Schluff, 0-10 % Sand)
Bonität:	Ackerzahl 51-56, T4V / T3DV
Eigenschaften:	Kurze Bearbeitungsfenster (Minutenboden), druckempfindlich, verschlammungsgefährdet, geringe bis mittlere Luft- und Wasserdurchlässigkeit, sehr geringe Erosionsgefährdung (LBEG 2010)

2.2 Witterung

Die Versuchsfläche in Braunschweig besitzt eine eigene Wetterstation, um die Witterung im Jahresverlauf exakt zu erfassen, die Wetterdaten in Soest wurden ebenfalls durch Stationen auf den beiden Versuchsflächen und zusätzlich über die Wetterstation des dortigen Versuchsguts erfasst. Nachdem die Station des Typs iMetos der Marke Pessl Instruments im ersten Projektjahr erfolgreich auf allen Versuchsstandorten installiert werden konnten, liegen ab dem zweiten Projektjahr lückenlose Wetteraufzeichnungen der wichtigsten Parameter vor. Die Wetterdaten der ersten Projektphase wurden im Abschlussbericht „Klimaoptimierte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft (optimierter Klimabetrieb)“ ausführlich interpretiert, in diesem Bericht werden die Daten daher nur gezeigt, auf eine Beschreibung wird verzichtet. Auf die Auswirkungen des Wetters auf das Wachstum der Kulturen oder Nährstoffverluste wird in den einzelnen Kapiteln eingegangen.

Witterung Soest

In Abbildung 1 sind die langjährigen Monatsdurchschnittstemperaturen der Region von 1981-2010 im Vergleich zu denen aus den Anbauperioden 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 dargestellt.

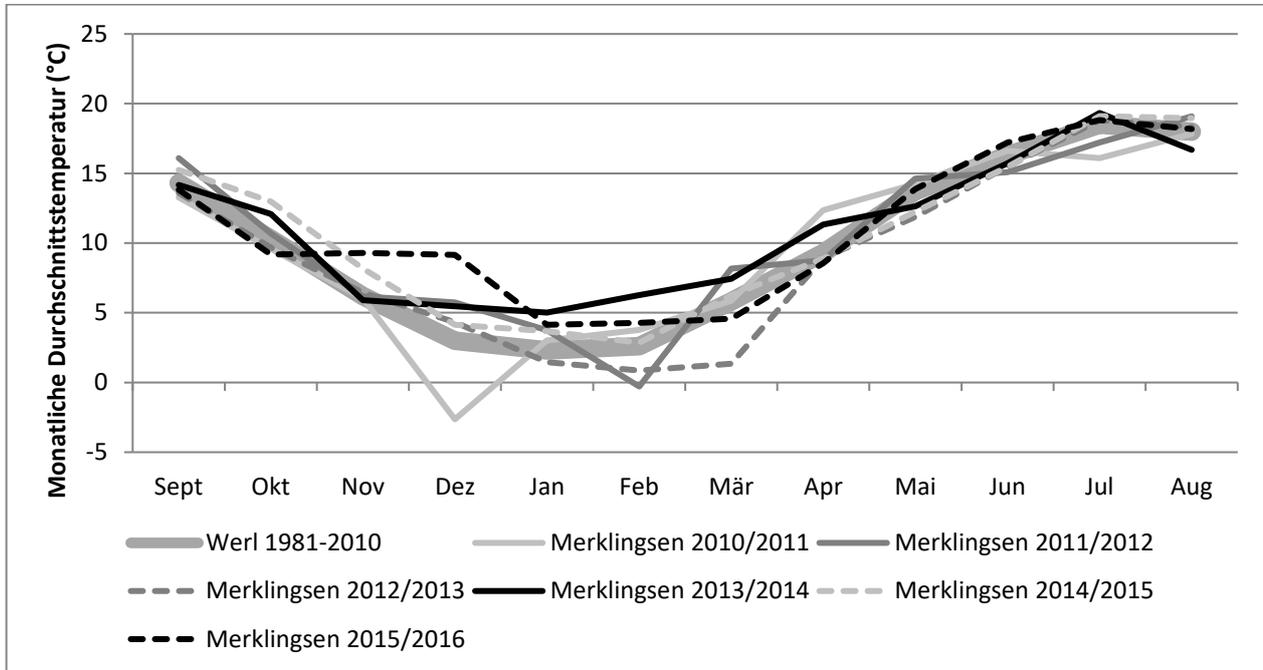


Abbildung 1: Monatliche Durchschnittstemperaturen (°C) der Versuchsfläche Soest in Merklingsen 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 und langjährige Mittelwerte der Region Soest für die Jahre 1981 bis 2010 (DWD 2011)

Im vierten Projektjahr 2013/2014 wurde ein milder Winter beobachtet, in dem die Temperaturen von Dezember bis April über dem langjährigen Mittel lagen. Im letzten Projektjahr wurde ein überdurchschnittlich warmer Dezember aufgezeichnet.

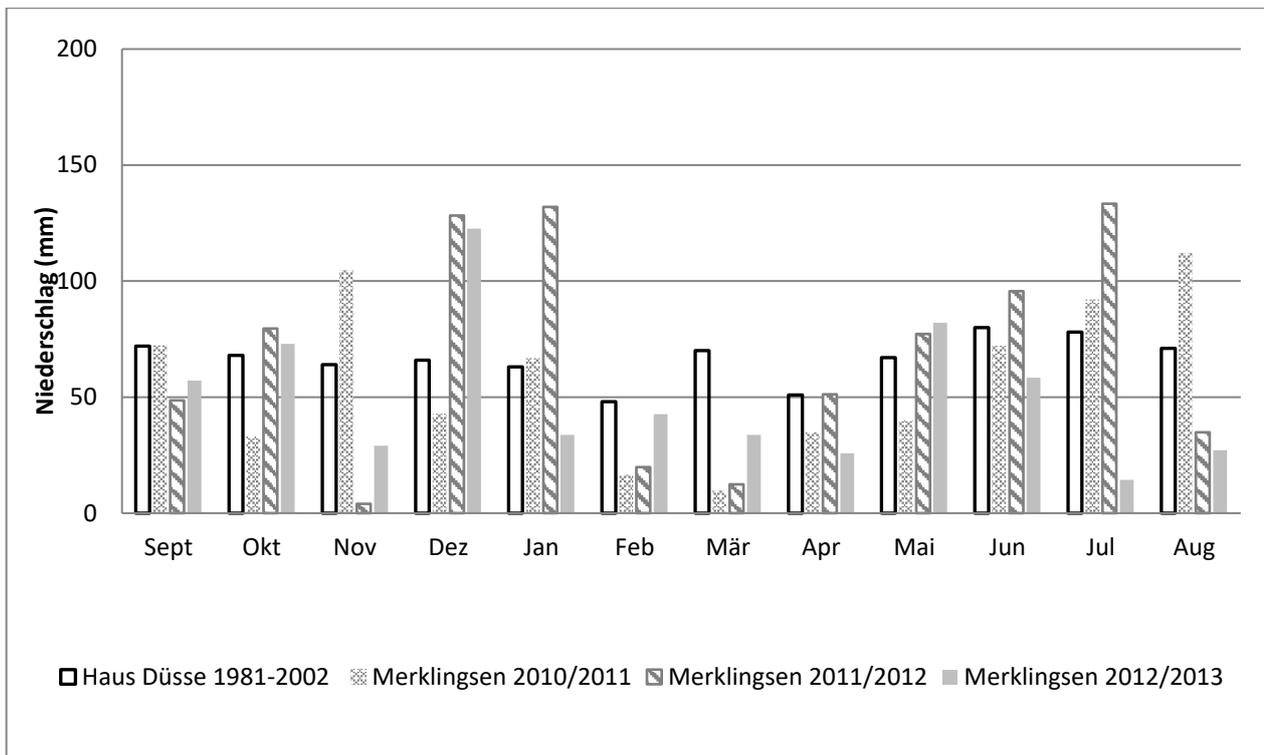


Abbildung 2: Mittelwerte der monatlichen Niederschlagsmengen (mm) der Versuchsfläche Soest in Merklingsen 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 und langjährige Mittelwerte der Region Soest für die Jahre 1981-2002

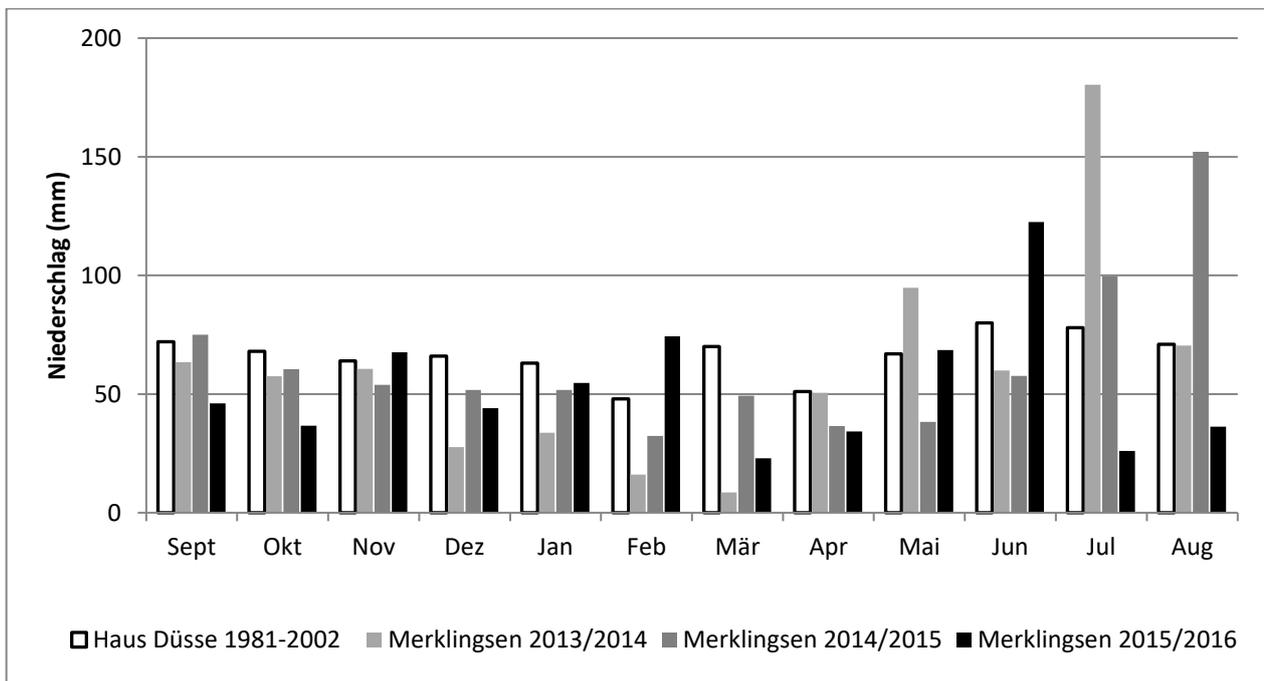


Abbildung 3: Mittelwerte der monatlichen Niederschlagsmengen (mm) der Versuchsfläche Soest in Merklingsen 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 und langjährige Mittelwerte der Region Soest für die Jahre 1981-2002

In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die monatlichen Niederschlagsmengen für den Standort Soest dargestellt. In den Monaten Februar und März ist in den ersten fünf Projektjahren weniger Niederschlag gefallen als im langjährigen Mittel, was für die zweite Projektphase für den März und April ebenfalls zutrifft. Im vierten Projektjahr wurde ein überdurchschnittlich nasser Juli verzeichnet, im fünften Projektjahr fiel im

August deutlich mehr Niederschlag als im langjährigen Mittel und im sechsten Projektjahr war der Juni außerordentlich nass, worauf ein trockener Juli und August folgten. In der zweiten Projektphase lag die Niederschlagsmenge in allen drei Anbaujahren unter dem langjährigen Mittel der Region.

Witterung Braunschweig

In Abbildung 4 sind die langjährigen Monatsdurchschnittstemperaturen zwischen 1981 und 2010 der Region Braunschweig im Vergleich zu denen aus den Anbauperioden 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015 und 2015/2016 dargestellt.

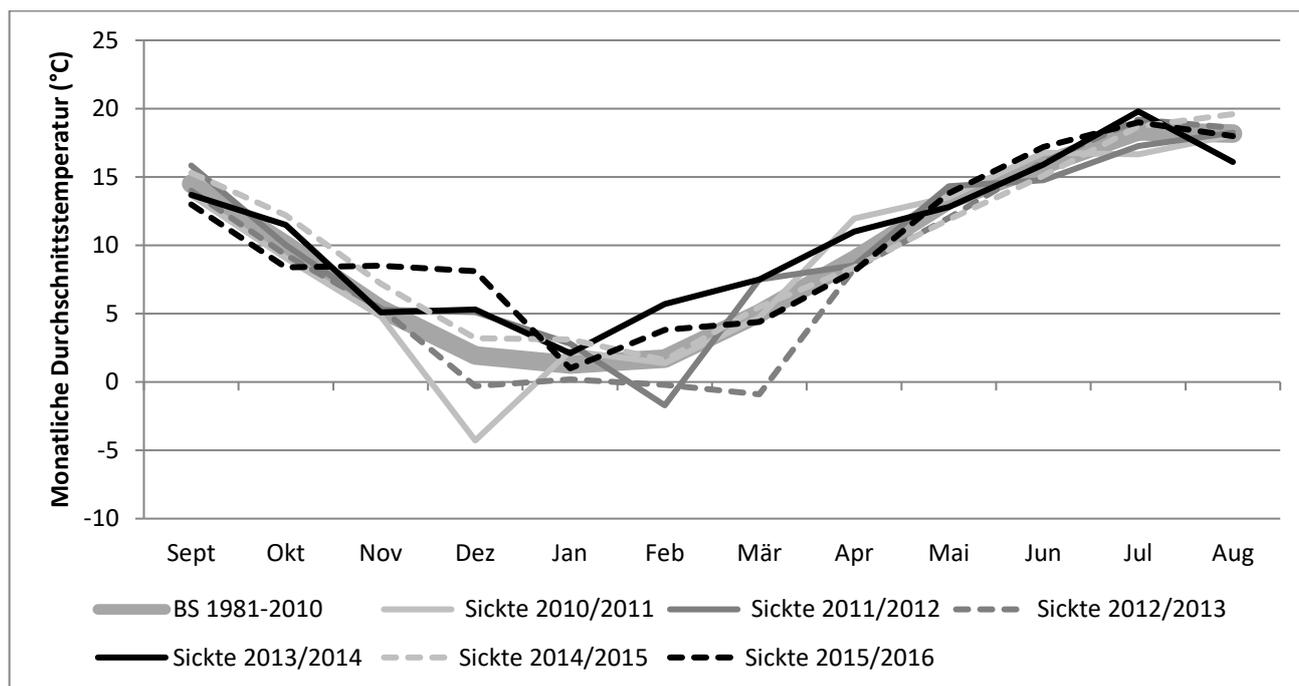


Abbildung 4: Monatliche Durchschnittstemperaturen (°C) der Versuchsfläche Braunschweig in Sickte 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 und langjährige Mittelwerte der Region Braunschweig für die Jahre 1981 bis 2010 (DWD 2011)

In der zweiten Projektphase wurden, mit Ausnahme des Erntejahres 2015/2016 in dem der wärmste November seit 1881 gemessen wurde und auch der Dezember überdurchschnittlich warm war, keine Besonderheiten festgestellt.

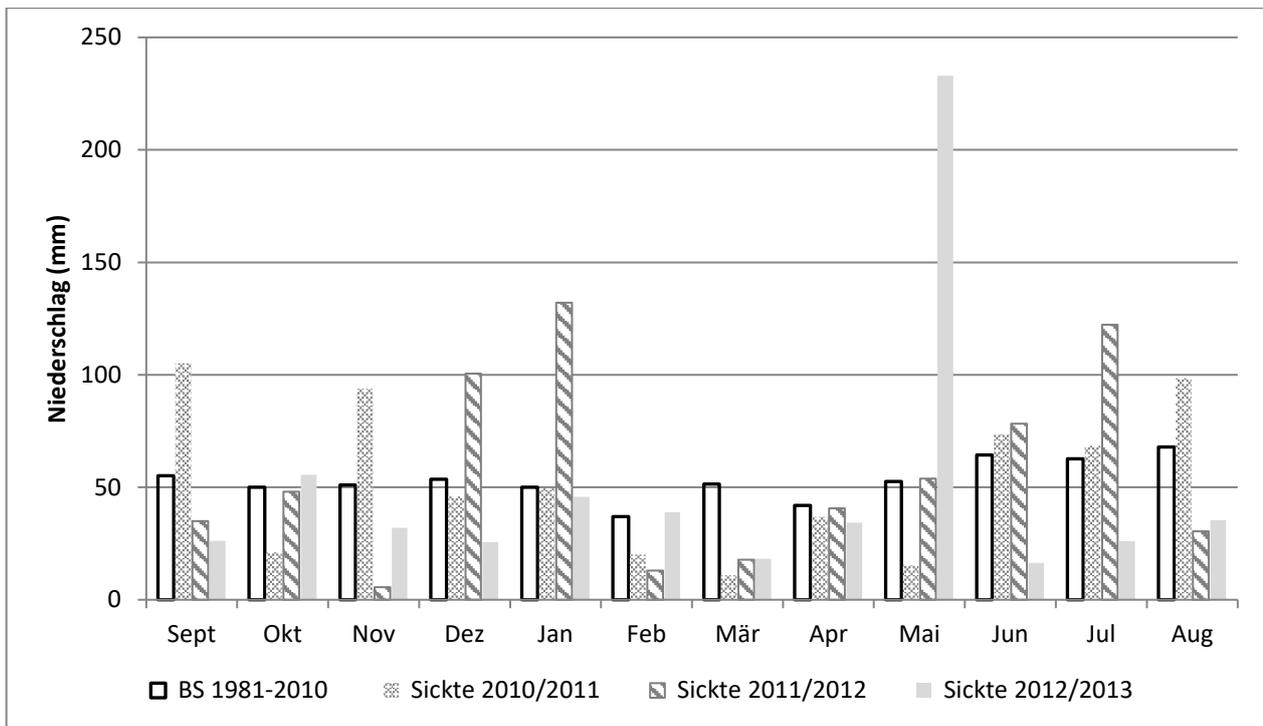


Abbildung 5: Mittelwerte der monatlichen Niederschlagsmengen (mm) der Versuchsfläche Braunschweig in Sichte 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 und langjährige Mittelwerte der Region Braunschweig für die Jahre 1981-2010 (DWD 2011)

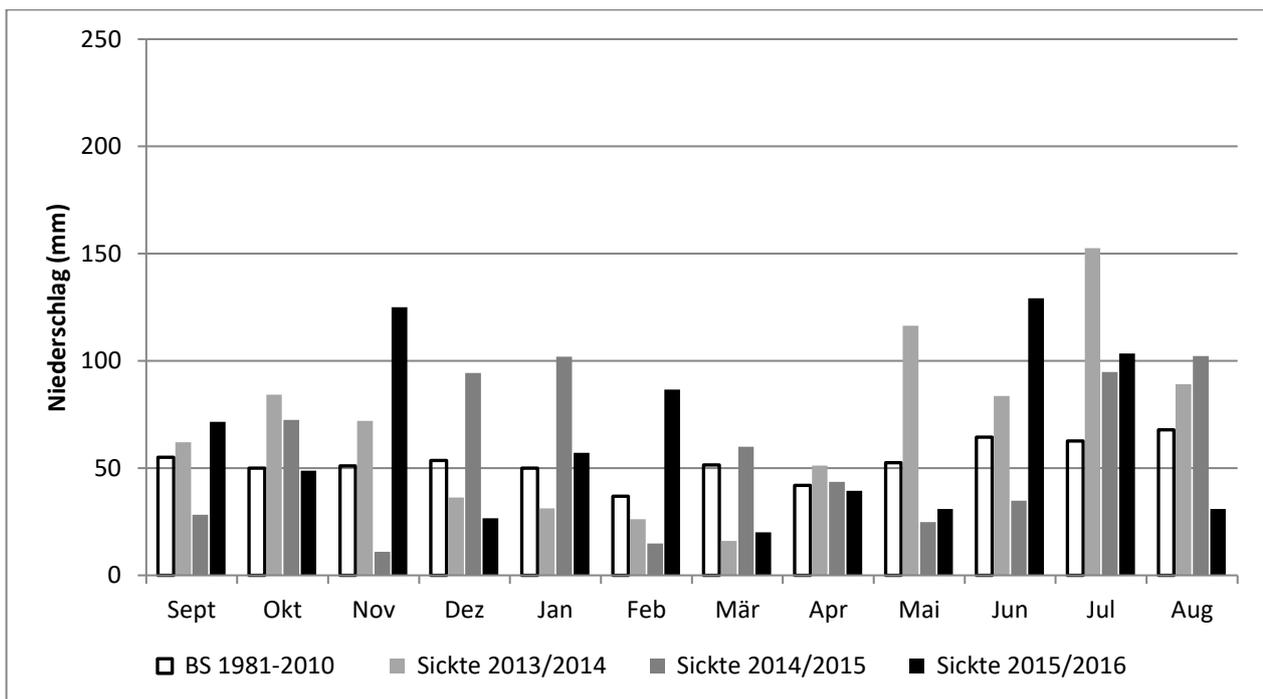


Abbildung 6: Mittelwerte der monatlichen Niederschlagsmengen (mm) der Versuchsfläche Braunschweig in Sichte 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 und langjährige Mittelwerte der Region Braunschweig für die Jahre 1981-2010 (DWD 2011)

Der zweite wichtige Parameter ist der Niederschlag. Wie in der vorangegangenen Grafik sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 die monatlichen Niederschlagsmengen aus den zurückliegenden Projektjahren den mittleren Niederschlägen zwischen 1981 und 2010 gegenübergestellt. Generell konnten in allen Projektjahren deutliche Abweichungen in den einzelnen Monaten verzeichnet werden.

Das Erntejahr 2013/2014 war insgesamt durch hohe Niederschlagsmengen gekennzeichnet, besonders in den Monaten April bis November waren die Niederschläge überdurchschnittlich hoch, während die Wintermonate Dezember bis März überdurchschnittliche niedrige Niederschläge hatten. Die letzten beiden Projektjahre waren durch eine lang anhaltende Frühsommertrockenheit sowie hohe Niederschlagsmengen im Oktober geprägt, wodurch sich die Weizenaussaat in beiden Jahren in den November verschob.

2.3 Anbausysteme

Auf jedem der beiden Standorte in Braunschweig und Soest werden drei Anbausysteme nebeneinander angelegt. Die Anbausysteme repräsentieren sowohl einen konventionellen Marktfruchtbetrieb im Folgenden als M-Betrieb bezeichnet als auch einen konventionellen Veredelungsbetrieb mit Biogasanlage (V-Betrieb) und einen Optimierten Klimabetrieb (O-Betrieb). In diesem Betrieb wird geprüft ob durch Nutzung der Vorteile einer vielseitigen Fruchtfolge in Kombination mit einer möglichst weitgehenden Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität die Emission klimaschädlicher Gase sowie das Risiko von extremen Witterungsereignissen gemindert werden kann. In den Anbausystemen wurden alle Fruchtfolgeglieder in jedem Jahr nebeneinander und in den Projektjahren zeitlich nacheinander angebaut, so dass in jedem Jahr ein vollständiger Vergleich der unterschiedlichen Anbausysteme möglich ist. Im modellhaften Betriebsvergleich ist jedes Anbausystem mit einer theoretischen LN von 200 ha ausgestattet.

Marktfruchtbetrieb (M):

Der Marktfruchtbetrieb bildet einen konventionellen Praxisbetrieb ohne Viehhaltung ab. Innerhalb der dreijährigen Anbaufolge aus Winterraps-Winterweizen-Winterweizen erfolgt zum Stoppelweizen sowie dem Winterraps eine wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug. Der Düngereinsatz erfolgt ausschließlich mineralisch und wird lediglich durch die Strohdüngung ergänzt. Mit Ausnahme der Ernterückstände verlassen alle produzierten Güter den Betrieb nach der Ernte.

In Braunschweig wurde 2010 auf der gesamten Versuchsfläche Winterraps nach konservierender Bodenbearbeitung angebaut.

Auf der Projektfläche in Soest standen zu Projektbeginn im September 2010 Zuckerrüben. Aufgrund der späten Ernte konnte im Herbst 2010 zu Versuchsbeginn kein Winterraps ausgesät werden, stattdessen wurden Ackerbohnen angebaut. Dadurch hatte auch zur Ernte 2012 der Blattfruchtweizen eine von der ursprünglichen Planung abweichende Vorfrucht. Statt des nicht möglichen Stoppelweizens wurde zur Ernte 2011 Winterweizen nach Zuckerrüben angebaut.

Viehhaltender Betrieb mit Biogasanlage (V):

Der Viehhaltende Betrieb mit Biogasanlage (V-Betrieb) entspricht einem konventionellen Praxisbetrieb mit Schweinemast und Biogasproduktion. Der Betrieb produziert auf 800 Mastplätzen Schweinefleisch sowie

elektrischen Strom mittels einer 200 kW (elektrisch installierte Leistung) Biogasanlage. Die LN dient der Rohstoffbereitstellung für die Veredlungszweige Schweinemast und Biogas sowie der Verwertung der Gärreste. Das Prinzip der geschlossenen Nährstoffkreisläufe wird angestrebt. Fehlende Nährstoffe werden durch den Einsatz mineralischer Düngemittel ausgeglichen. Innerhalb der dreifeldrigen Fruchtfolge aus Winterweizen-Wintergerste-Grünroggen-Silomais erfolgt zu den Kulturen W-Weizen und W-Gerste eine wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug. Die übrigen Bodenbearbeitungsmaßnahmen beschränken sich auf eine konservierende Bodenbearbeitung.

Auch hier waren im ersten Projektjahr Kompromisse in der Fruchtfolge notwendig. Der Anbau von Grünroggen wurde erst zur Ernte 2012 in den Anbauplan aufgenommen. In Braunschweig wurden im Erntejahr 2011 alle Früchte nach Winterraps bestellt. In Soest wurde der Winterweizen nach Zuckerrüben und nach Winterweizen bestellt.

Optimierter Klimabetrieb (O):

Der optimierte Klimabetrieb (O-Betrieb) verfügt wie der V-Betrieb über Schweinemast und Biogasproduktion. Mit ebenfalls 800 Mastplätzen und einer 200 kW (elektrisch) Biogasanlage ist der O-Betrieb mit dem V-Betrieb seitens der Betriebsausstattung identisch. Im Gegensatz zum V-Betrieb praktiziert der O-Betrieb jedoch eine aufgelockerte Fruchtfolge bestehend aus einer achtjährigen Rotation (Tabelle 3) sowie mit einer möglichst durchgängigen Direktsaat.

Tabelle 3: Fruchtfolgen der Beispielbetriebe

	Marktfrucht- betrieb (M)	Konventioneller viehhaltender Betrieb mit Biogasanlage (V)		Optimierter Klimabetrieb mit Biogasanlage, Kreislaufwirtschaft (O)		
		Hauptfrucht	Zwischenfrucht	Hauptfrucht	Untersaat / Zwischenfrucht	
1	Winterraps	Winterweizen	Grünroggen	Winterraps	SO: Untersaat Deutsch Weidelgras BS: Zwischenfrucht TerraLife Rigol	
2	Winterweizen	Wintergerste		Winterweizen		
3	Winterweizen	Silomais		Ackerbohnen		
4				Wintergerste		Grünroggen
5				Silomais		
6				Winterweizen		Grünroggen
7				Silomais		
8				Hybridroggen (GPS)		

Ebenfalls identisch ist die Verwertung der LN. Sie dient wie im V-Betrieb der Rohstoffproduktion für die Betriebszweige Schweinemast und Biogasproduktion sowie der Verwertung der Gärreste. Auch im O-Betrieb werden fehlende Nährstoffe durch den Einsatz mineralischer Düngemittel ausgeglichen. Im Gegensatz zum V-Betrieb ist wurde im O-Betrieb jedoch angestrebt, durch den Einsatz von Leguminosen und der damit verbundenen legumen N-Fixierung den mineralischen Düngereinsatz zu reduzieren. Zusätzlich wird durch die

mit der Direktsaat verbundene Verbesserung der Tragfähigkeit der Böden eine effizientere und gezieltere Verwertung der Gärreste angestrebt, weil die Ausbringungstermine optimiert werden können. In Soest bietet eine Untersaat mit Weidelgras im Weizen vor Ackerbohne gute Bedingungen für den Einsatz der Cross Slot-Technik und kann dazu beitragen, das Auflaufen von Unkräutern und Ungräsern in Ackerbohnen sowie den dafür erforderlichen Herbizideinsatz zu mindern.

In Braunschweig wird vor Ackerbohne das Zwischenfruchtgemenge „TerraLife-Rigol“ mit Zumischung eines tiefwurzelnden Rettichs (*tillage radish*, *Raphanus sativus*) von der Deutschen Saatveredlung (DSV) angebaut, welches aus den Kulturen Bitterlupine, Rauhafer, Sonnenblume, Sparriger Klee, Serradella, Phacelia, Öllein, Buchweizen und Leindotter besteht. Der abgefrorene Zwischenfruchtbestand bietet im Frühjahr gute Bedingungen für die Direktsaat mit Meißelscharen. Positive Nebeneffekte dieses Gemenges sind zusätzliche Nährstoffeinträge in das System und eine Lockerung des Bodens durch die unterschiedlichen Durchwurzelungstiefen der verschiedenen Kulturen. Ansonsten sind die Fruchtfolgen bis auf standortspezifische Sortenanpassungen an beiden Projektstandorten identisch.

Die Stickstoffdüngung wurde an beiden Standorten nach den Düngeempfehlungen der Landwirtschaftskammern Niedersachsen und NRW (BAUMGÄRTEL & BENKE, 2009, APEL & FECHNER, 2017) nach der Sollwertmethode durchgeführt. Ausgehend von einer hohen Ertragserwartung wurden auf allen Parzellen die entsprechenden Sollwerte inklusive Zu- und Abschlägen für Standort und Bestandsentwicklung berechnet und die erforderliche Düngermenge ausgebracht. Durch engmaschige Beobachtungsintervalle und einen gezielten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln konnten gesunde und homogene Bestände gewährleistet und negative Ertragseinflüsse durch Verunkrautung, Schädlinge oder Krankheiten minimiert werden.

2.4 Datenerfassung Ernte

Die Körnerernte von Ackerbohne, Getreide und die Ernte der Rapsexaktversuche erfolgte mittels Parzellendrescher. In den Maisparzellen in Braunschweig erfolgte die Ernte mit einem einreihigen Häcksler, indem jeweils acht einzelne Reihen über die gesamte Parzellenlänge von 100 m gehäckselt und gewogen wurden. Beim GPS-Roggen wurde zur Ertragsbestimmung eine Ganzpflanzenernte im Umfang von 8x1 m² durchgeführt. Die Trockenmassebestimmung erfolgte bei den Ernteproben nach 24 stündiger Trocknung bei 105 °C im Trockenschrank.

Für die Ertragserfassung der Maisparzellen in Soest kam ein vierreihiger Maishäcksler zum Einsatz. Es wurden 10 m² (vier Reihen à 3,33 m) zu acht Wiederholungen geerntet, zerkleinert und TS-korrigiert. Die Ertragserfassung der GPS-Getreide erfolgte hingegen mittels Futterpflanzenvollernter, ebenfalls in achtfacher Wiederholung.

Um die Qualität des Erntegutes beurteilen zu können, sind an beiden Standorten entsprechende Qualitätsuntersuchungen durchgeführt worden, die sich an den gängigen Vermarktungskriterien orientieren. Tabelle 4 enthält eine Zusammenfassungen der analysierten Parameter mit den dazugehörigen Methoden.

Darüber hinaus wurden projektbegleitende Bonituren (BSA 2000) wie die wöchentliche Dokumentation der Bestandesentwicklung während der Vegetationszeit vorgenommen, da sich keine systembedingten Unterschiede zeigten, wird auf eine weitere Ausführung und Darstellung der Ergebnisse verzichtet.

Jeweils zu Vegetationsende und Vegetationsbeginn wurden die N_{\min} -Werte ermittelt. Untersucht wurden Mischproben aus acht Einstichen in den Tiefen 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und 60 – 90 cm. Nach der Aussaat wurde in jeder Kultur die Bodenbedeckung mit der Schnurmethode, angelehnt an die terrestrische Methode zur Ermittlung der Bodenbedeckung nach WINNIGE et al. (1998), ermittelt.

Tabelle 4: Qualitätsanalysen an Erntegut und Ernterückständen mit den dazu gehörigen Methoden im 2. Projektabschnitt (2013-2016)

Parameter	Kulturen	Methode
Rohprotein (% TM)	AB, WG, WW, GPSRo	NIRS, Gerät Foss 5000, trocken, auf 1 mm vermahlen Kalibrierung nach Tillmann, VDLUFA, Stand 2011
	SM	NIRS, Gerät Foss 5000, trocken, auf 1 mm vermahlen Kalibrierung nach Tillmann, VDLUFA, Stand 2011
Stärke (% TM)	AB, WG, WW, GPSRo	NIRS, Gerät Foss 5000, trocken, auf 1 mm vermahlen Kalibrierung nach Tillmann, VDLUFA, Stand 2011
	SM	NIRS, Gerät Foss 5000, trocken, auf 1 mm vermahlen Kalibrierung nach Tillmann, VDLUFA, Stand 2011
Ölgehalt (% TM) und Fettsäuremuster	WR	NIRS, Gerät Foss 5000, trocken, auf 1 mm vermahlen Kalibrierung nach Tillmann, VDLUFA, Stand 2011
TKM (g)	WR, AB, WG, WW	Bundessortenamt (2000)
HLG (kg/hl)	WG, WW	Kern Getreideprober (2000), Tafeln vom Deutschen Eichverlag (1967)
C, N, S (%)	Stroh: AB, WG, WW, WR	Elementar-Analyser

2.5 Ergebnisse des langjährigen Vergleichs der Betriebssysteme (2011-2016)

2.5.1 Vergleich der Betriebssysteme bezüglich der erwirtschafteten Erträge

Soest

Die Abbildungen 7 bis 13 zeigen die Ergebnisse der Ertragserhebungen der Großparzellen am Standort Soest für alle Projektjahre, die keine varianzanalytische Verrechnung zuließen, vorhandene Unterschiede sind also Tendenzen ohne entsprechende Absicherung. Bei den Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Ackerbohne sind jeweils die Kornerträge mit einem Feuchtegehalt von 14 % (9 % bei Raps) dargestellt. Für die als Biogassubstrat verwendeten Kulturen Grünroggen, GPS-Roggen und Silomais sind die Biomasseerträge als Trockenmasse ausgewiesen. In einigen Fällen mussten die Erträge aus den Parzellenversuchen der Düngoptimierung für den Vergleich genutzt werden, die entsprechenden Säulen sind in den Abbildungen markiert.

Abbildung 7 zeigt die Winterweizenerträge am Standort Soest. Die höchsten Erträge wurden in allen Betrieben im Erntejahr 2013, mit Erträgen über 110 dt/ha, erzielt. Die niedrigsten Erträge wurden in allen Betrieben im Erntejahr 2016, mit Erträgen zwischen 78 und 91 dt/ha, erzielt. Auffällig ist der Weizenertrag im V-Betrieb im Erntejahr 2011. Durch die Vorgeschichte des Feldschlags musste mit zwei verschiedenen Vorfrüchten gearbeitet werden, die Vorfrucht Winterweizen wirkte sich dabei besonders ungünstig aus. Im Vergleich der Vorfrucht Winterraps waren die Erträge in M- und O-Betrieb in den Jahren 2012 und 2016 annähernd gleich, während in den Erntejahren 2013-2015 der M-Betrieb ertraglich überlegen war. Für die Vorfrucht Silomais zeigten sich in den Erntejahren 2012 bis 2014 ähnliche Erträge in V- und O-Betrieb, im Erntejahr 2015 wurden im O-Betrieb und im Erntejahr 2016 im V-Betrieb die höheren Erträge erzielt.

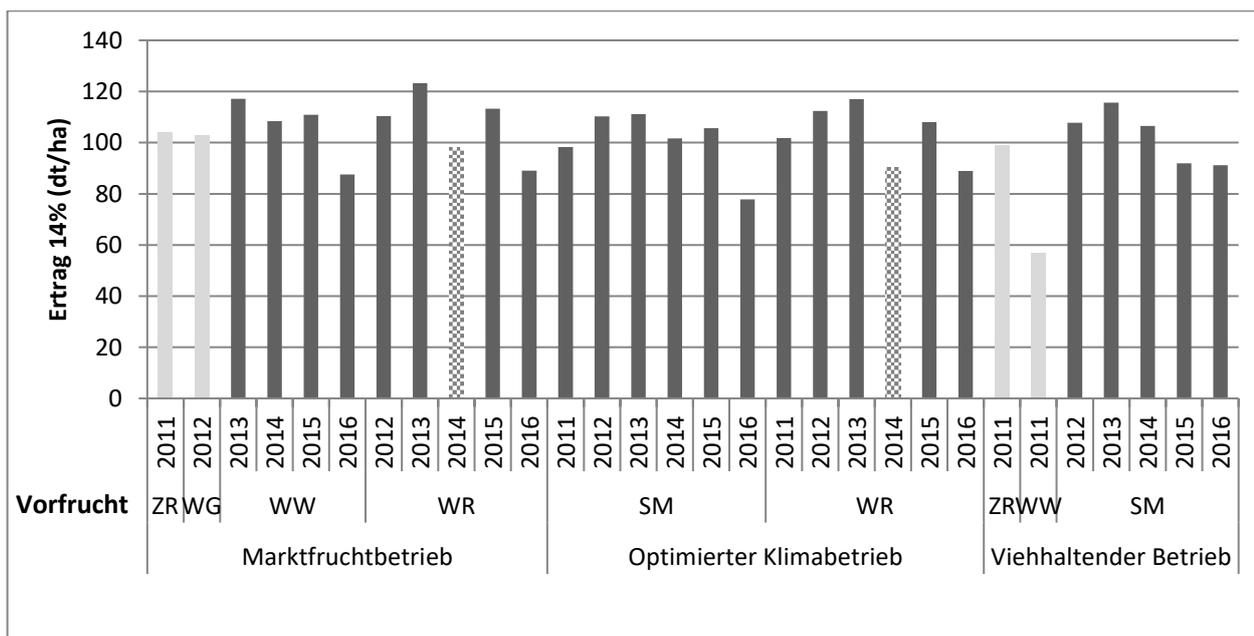


Abbildung 7: Kornertrag von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (Grau= außerplanmäßige Vorfrucht,  = Erträge aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

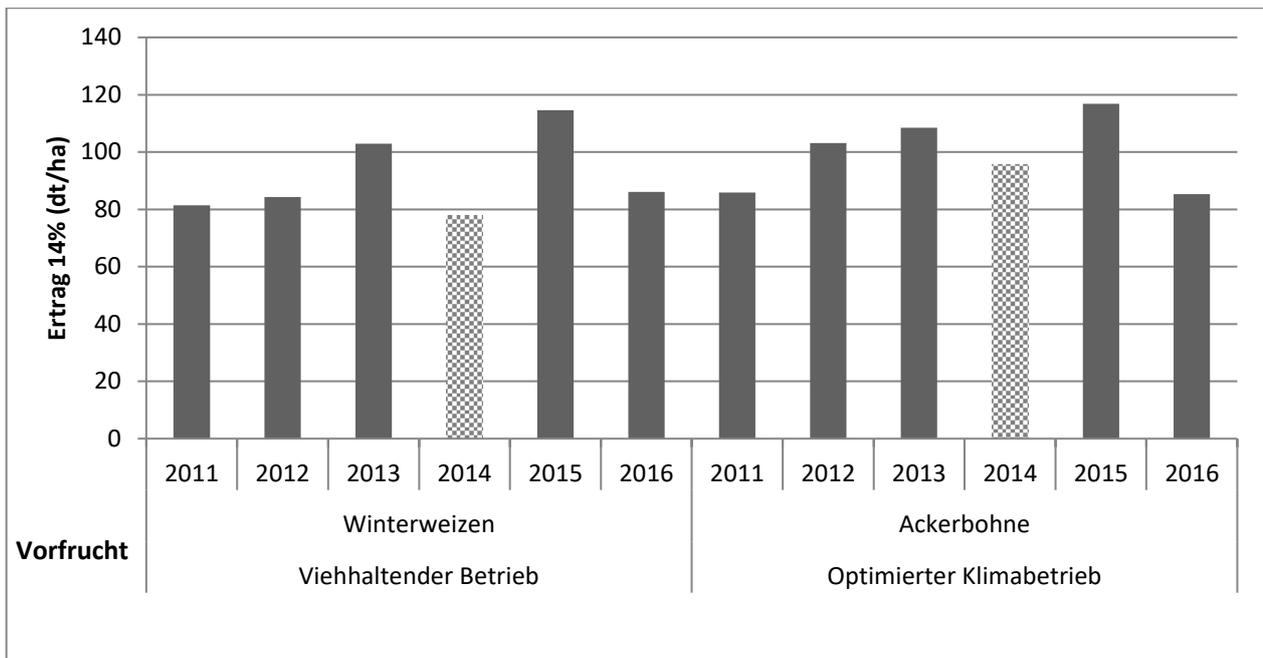


Abbildung 8: Kornertrag von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest ( = Erträge aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

Abbildung 8 zeigt die Wintergerstenerträge, die höchsten Erträge wurden im Erntejahr 2015, mit über 110 dt/ha, erzielt. Die niedrigsten Erträge lagen im Bereich von 80 dt/ha in den Jahren 2011 und 2014 im V-Betrieb und 85 dt/ha in den Jahren 2011 und 2016 im O-Betrieb. Insgesamt lagen die Erträge im O-Betrieb mit Ausnahme des Erntejahres 2016 über denen des V-Betriebs. Im Erntejahr 2016 waren die Erträge annähernd gleich.

Abbildung 9 zeigt die Erträge im Winterraps, die höchsten Erträge wurden im Jahr 2015 (O-Betrieb 54 dt/ha), die niedrigsten im Jahr 2016 (M-Betrieb 33 dt/ha) erzielt. Im Erntejahr 2014 waren die Erträge von O-Betrieb und M-Betrieb vergleichbar, in den anderen Erntejahren war der O-Betrieb dem M-Betrieb überlegen. Im ersten Projektjahr wurde kein Winterraps am Standort Soest etabliert, da das optimale Aussaatfenster dieser Kultur zu Projektbeginn bereits deutlich überschritten war.

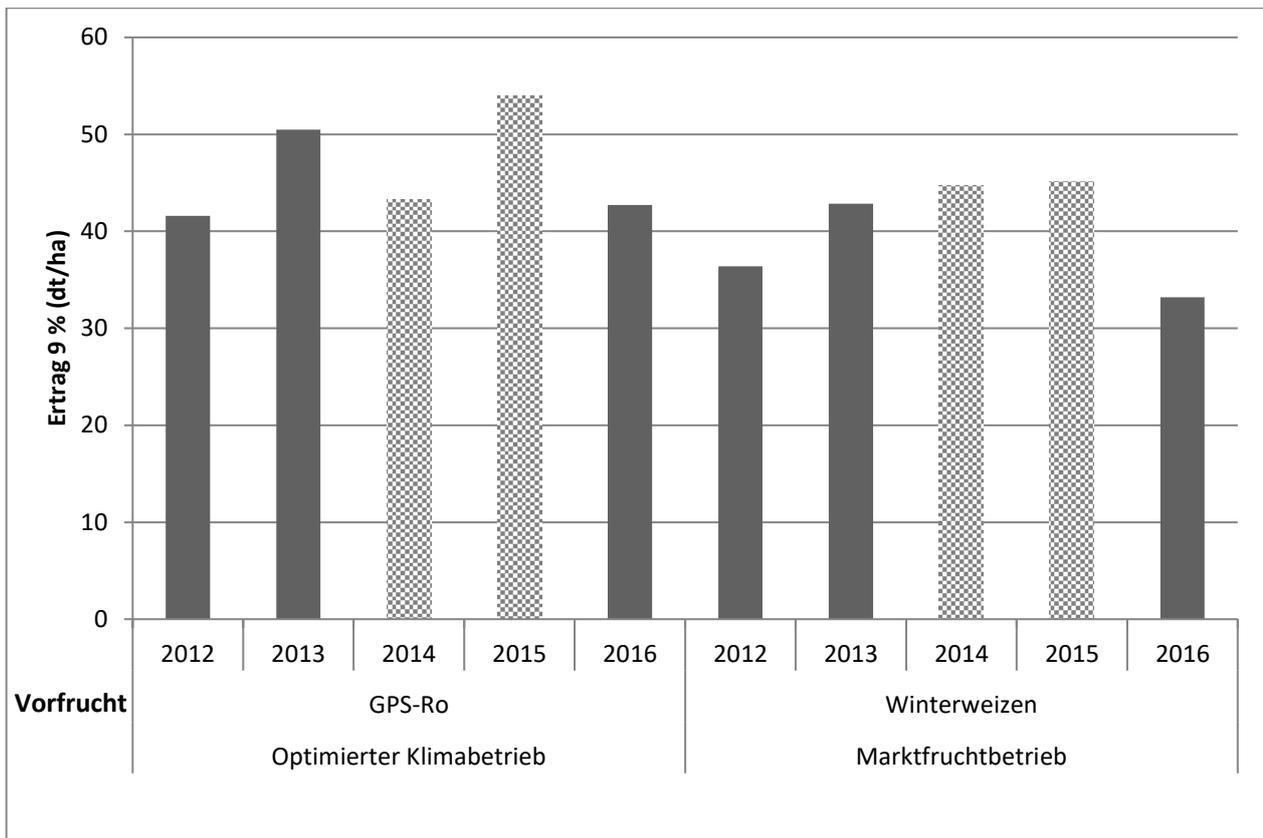


Abbildung 9: Kornertrag von Wintereraps der Erntejahre 2012 bis 2016 in Soest ( = Erträge aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

Die Ackerbohnerträge (Abbildung 10) reichten von 36 dt/ha im ersten Versuchsjahr bis zu knapp 77 dt/ha im Erntejahr 2015. Auffällig sind die gegenüber den restlichen Versuchsjahren erheblich geringeren Ackerbohnerträge des ersten Versuchsjahres. Dies lässt sich durch eine sehr starke Verunkrautung im zeitigen Frühjahr erklären. Aufgrund der Wirkungslücken sowie der geringen Zahl an Nachauflauf-Herbiziden für Körnerleguminosen war eine Behandlung nicht möglich und führte somit zu einem starken Konkurrenzdruck für die Ackerbohne.

Durch die Integration einer Grasuntersaat in die vor den Ackerbohnen stehenden Weizenbestände konnte die Unkrautproblematik teilweise entschärft und die Ackerbohne auf ein höheres Ertragsniveau angehoben werden. Die Etablierung der Untersaat ist allerdings mit einer hohen Unsicherheit verbunden und gelingt nicht in jedem Jahr.

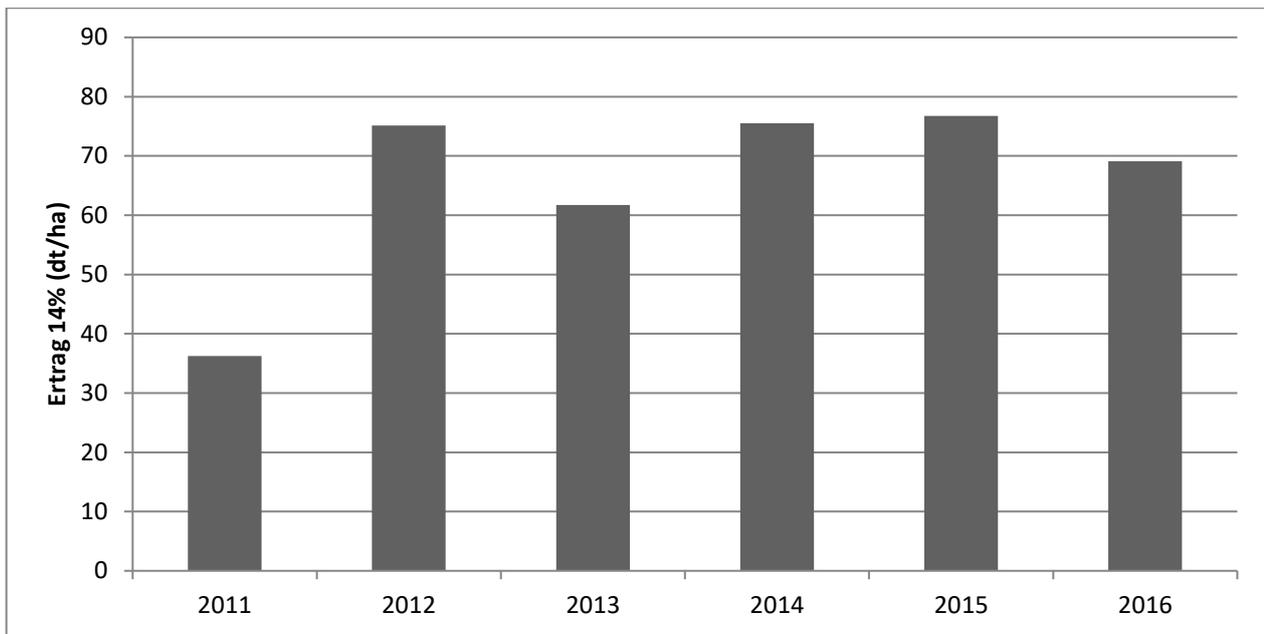


Abbildung 10: Kornertrag von Ackerbohnen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest

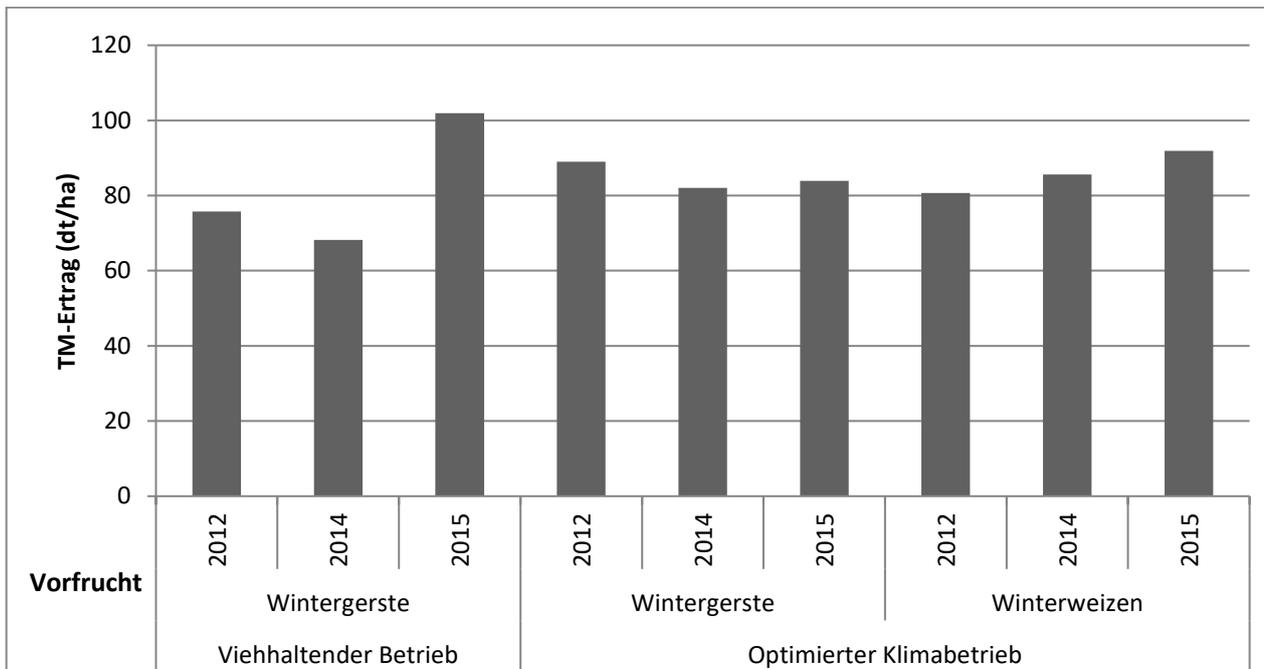


Abbildung 11: TM-Ertrag von Grünroggen der Erntejahre 2012 bis 2015 in Soest

Der Grünroggen wurde nur in den Jahren 2012, 2014 und 2015 geerntet (Abbildung 11). In den Erntejahren 2012 und 2014 war der O-Betrieb dem V-Betrieb und im Erntejahr 2015 der V- dem O-Betrieb überlegen.

Abbildung 12 zeigt den TM-Ertrag Roggen- bzw. Triticale-Ganzpflanzensilage, der höchste Ertrag mit 185 dt/ha wurde im Erntejahr 2013 erzielt, der niedrigste mit 113 dt/ha im Jahr 2014. Insgesamt zeigten sich deutliche Ertragsunterschiede zwischen den einzelnen Jahren.

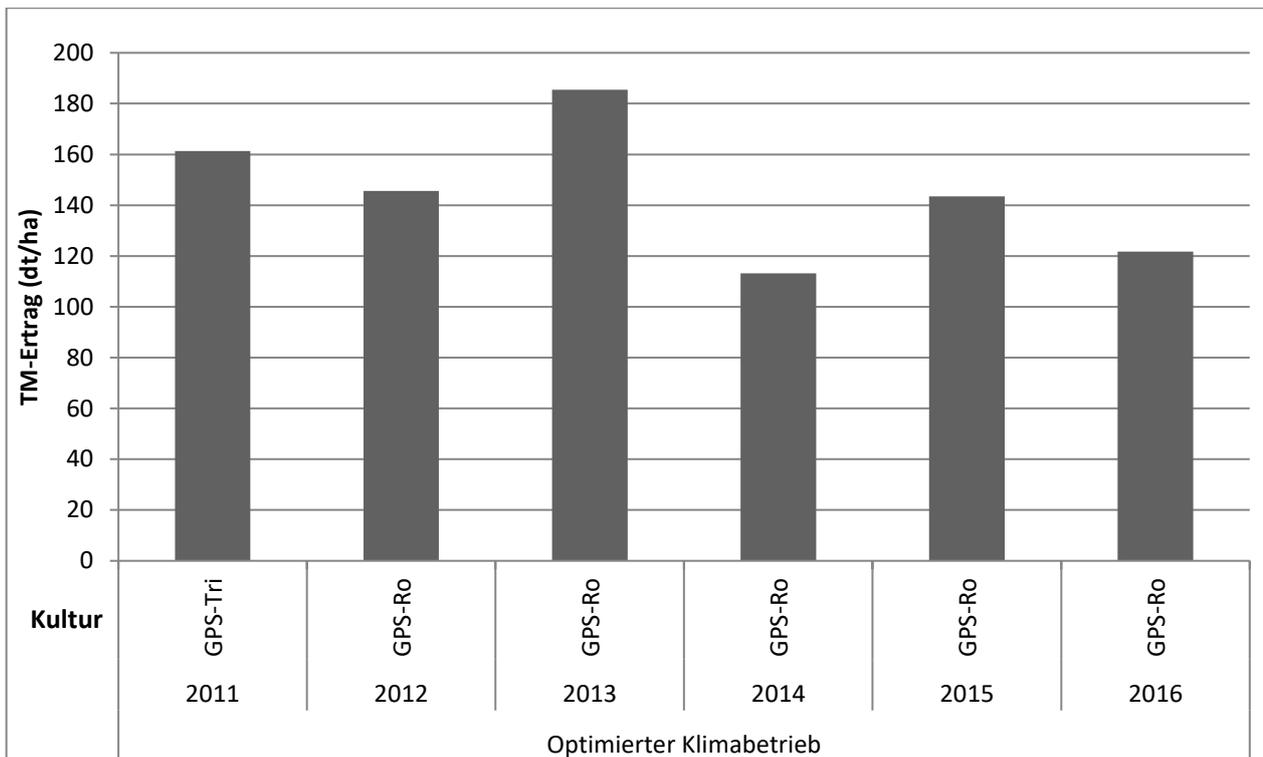


Abbildung 12: TM-Ertrag von GPS-Roggen/GPS-Triticale der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest

In Abbildung 13 sind die TM-Erträge im Silomais dargestellt, in der ersten Projektphase waren die Erträge im V-Betrieb auf einem konstant guten Niveau während im O-Betrieb teils deutliche Unterschiede sichtbar wurden. Die Erträge des V-Betriebs lagen, mit Ausnahme des ersten und letzten Projektjahres, deutlich über denen des O-Betriebs. Im ersten Projektjahr wurde der Mais im O-Betrieb im Mulchsaatverfahren bestellt, während in den beiden Jahren darauf die Drilltechnik geändert wurde. Durch den Einsatz der Cross Slot-Maschine mit Getreidereihenweite und den Verzicht auf Einzelkorntechnik konnten keine ertragsstarken und homogenen Maisbestände etabliert werden. In der zweiten Projektphase wurde ein neues System integriert. Der Boden wurde sowohl im O-Betrieb als auch im V-Betrieb mit der Strip-Till-Technik bearbeitet, was eine Verbesserung der Erträge bewirkte, jedoch konnten die Erträge nicht auf das Niveau des V-Betriebs angehoben werden. Die niedrigen Erträge im Erntejahr 2015 sind auf eine verspätete Aussaat nach Grünroggen zurückzuführen. Dadurch geriet die Jugendphase des Mais in die ausgeprägte Frühsommertrockenheit, dieser Entwicklungsrückstand konnte auch durch hohe Niederschläge im Juli und August 2015 nicht kompensiert werden. Ob der Grünroggenanbau eine negative Auswirkung auf den darauffolgenden Silomais hat, hängt stark von der jeweiligen Witterung während der Jugendentwicklung des Mais ab. Die oben beschriebene Problematik zeigte sich in der Form im Erntejahr 2012 im V-Betrieb nicht, die niedrigen Erträge im O-Betrieb können auch mit der Direktsaat zusammenhängen.

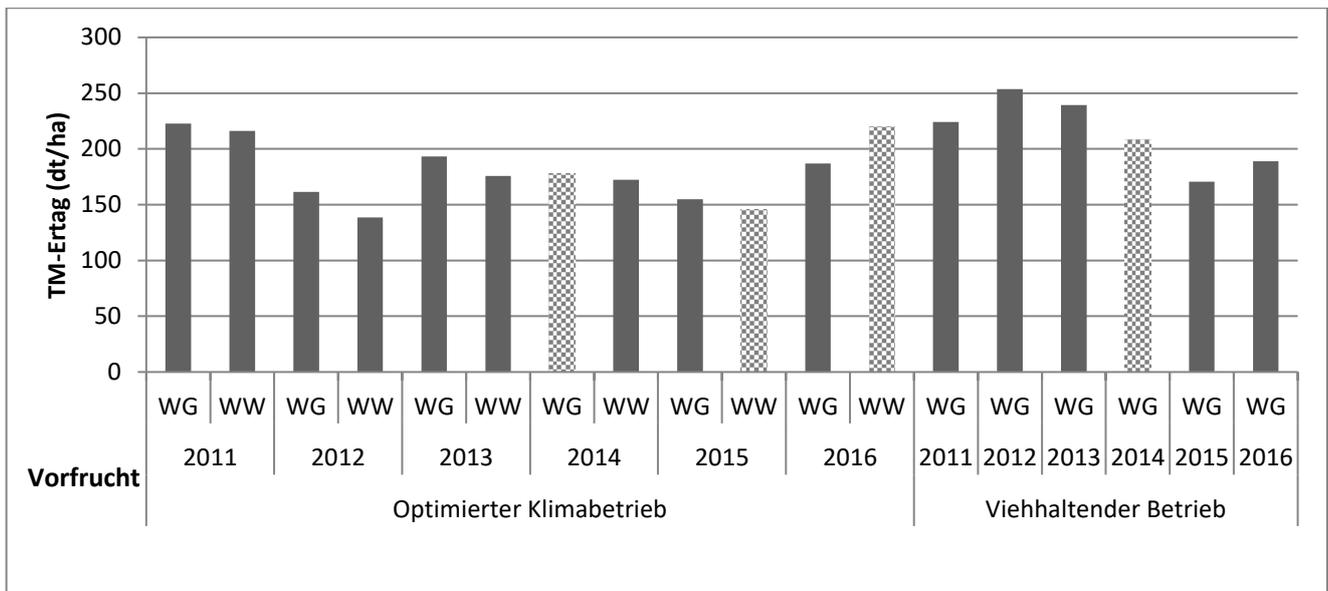


Abbildung 13: TM-Ertrag von Silomais der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest ( = Erträge aus Parzellenversuch Düngoptimierung, Schleppschlauchausbringung)

Braunschweig:

Abbildung 14 bis Abbildung 20 zeigen die Ergebnisse der Ertragserhebungen aus den Großparzellen über die gesamte Projektlaufzeit am Standort Braunschweig, die keine varianzanalytische Verrechnung zuließen, vorhandene Unterschiede sind also Tendenzen ohne entsprechende Absicherung. Die Umrechnung der Ergebnisse auf einheitliche Trockensubstanz entspricht der Vorgehensweise wie am Standort Soest.

Abbildung 14 enthält die Kornerträge des Winterweizens. Die höchsten Weizenerträge konnten im V-Betrieb und im O-Betrieb nach Vorfrucht Silomais im Erntejahr 2013 geerntet werden. Die Vorfrucht Winterraps hatte im M-Betrieb tendenziell höhere Erträge als nach Weizenvorfrucht zur Folge. Im O-Betrieb lässt sich dagegen keine Vorzüglichkeit zwischen den Vorfrüchten Winterraps und Silomais erkennen. In allen Betrieben lagen die Spitzenerträge über 100 dt/ha. Die niedrigsten Erträge wurden im Jahr 2011 mit weniger als 80 dt/ha im O-Betrieb nach Vorfrucht Silomais und im M-Betrieb in den Jahren 2015 und 2016 nach Vorfrucht Winterweizen geerntet. Mit Blick auf die Vorfruchtwirkung von Winterraps konnten im O-Betrieb trotz dieser vorteilhaften Fruchtfolgestellung in den ersten vier Projektjahren nicht die hohen Ertragsleistungen der vergleichbaren Kultur im M-Betrieb erreicht werden, jedoch wurden im letzten Projektjahr im O-Betrieb die höheren Erträge erzielt, während im Erntejahr 2015 die Erträge vergleichbar waren. Nach der Vorfrucht Silomais wurden in den Jahren 2012 bis 2014 im V- und O Betrieb vergleichbare Erträge gemessen, im Erntejahr 2015 hatte der V-Betrieb und im Erntejahr 2016 der O-Betrieb die höheren Erträge.

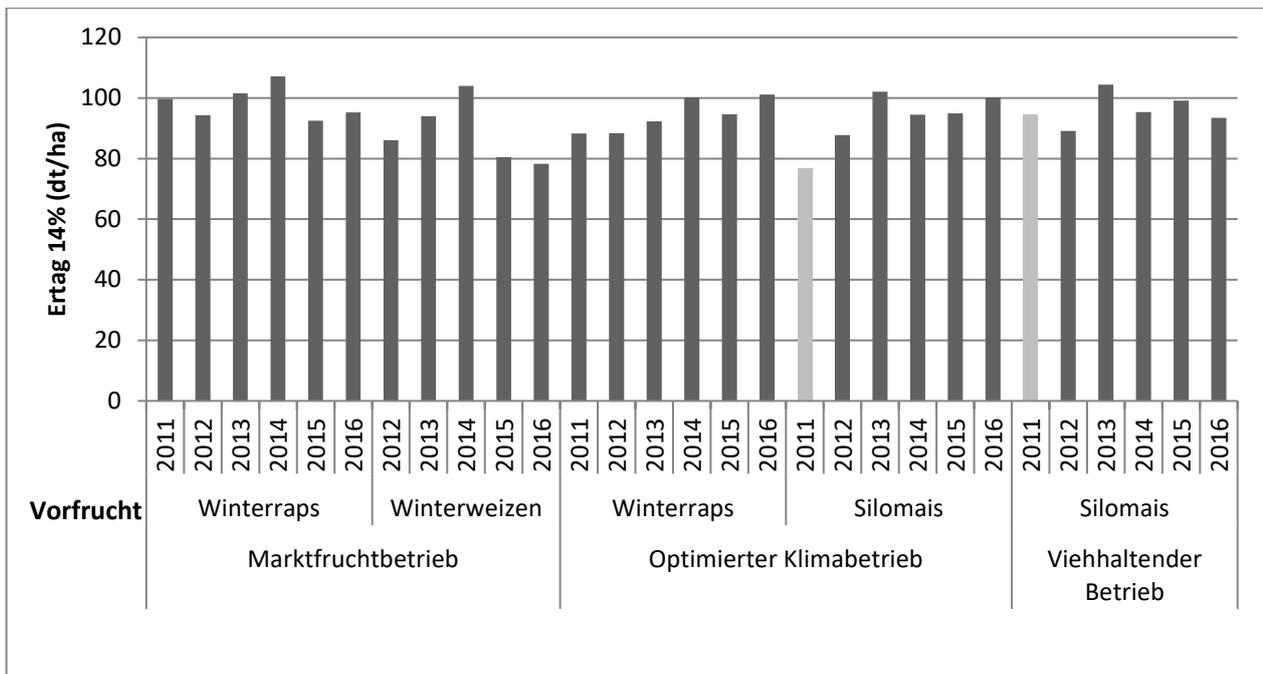


Abbildung 14: Kornertrag von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (Grau= außerplanmäßige Vorfrucht)

Die Wintergerstenerträge sind in Abbildung 15 dargestellt, der höchste Ertrag, mit 122 dt/ha, wurde im Erntejahr 2014 im O-Betrieb und der niedrigste Ertrag, mit knapp 63 dt/ha, 2015 im V-Betrieb erzielt. Die Erträge des O-Betriebs lagen ab dem Erntejahr 2014 über denen des V-Betriebs, in den Jahren davor gab es keine bedeutenden Ertragsunterschiede.

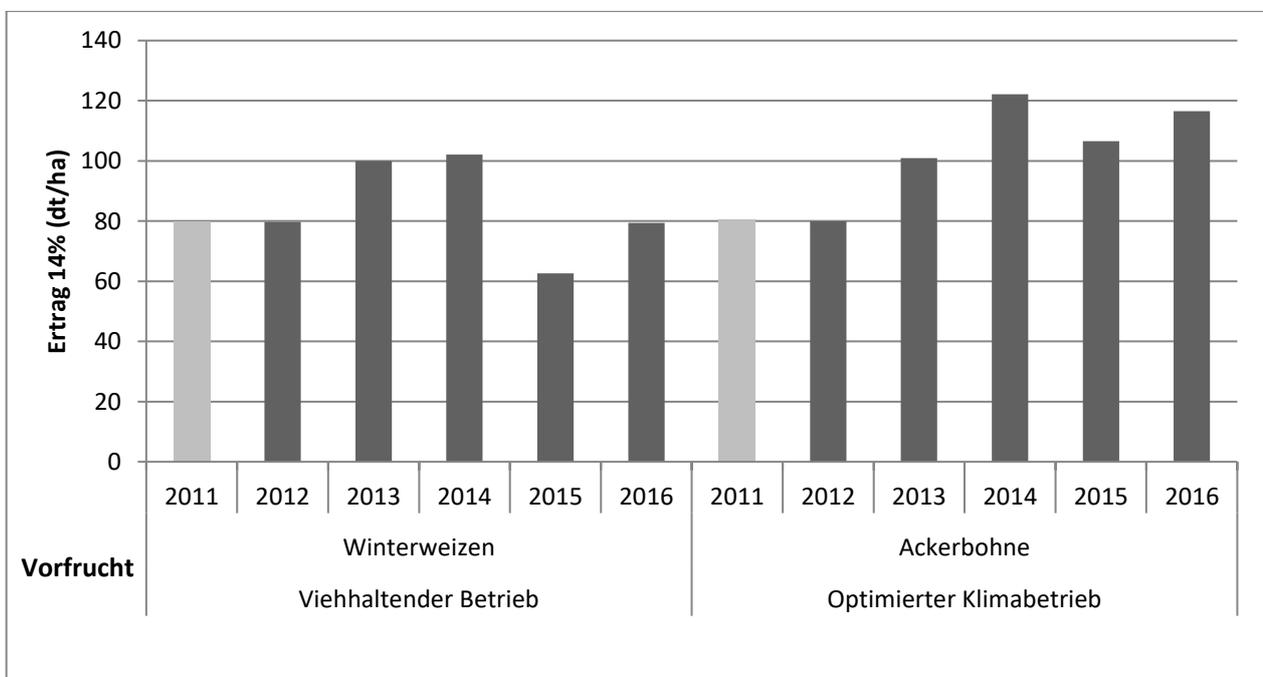


Abbildung 15: Kornertrag von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (Grau= außerplanmäßige Vorfrucht)

Abbildung 16 zeigt die Rapsenerträge, die höchsten Erträge von über 45 dt/ha wurden in den Jahren 2015 im M- und O-Betrieb sowie im Jahr 2011 im O-Betrieb erzielt, die geringsten Erträge (37 dt/ha) ergaben sich im

Erntejahr 2012 sowie im M-Betrieb im Erntejahr 2016. Zwischen den Betriebsformen gab es nur in den Jahren 2011 und 2016 nennenswerte Unterschiede, in diesen beiden Fällen war der O-Betrieb dem M-Betrieb überlegen.

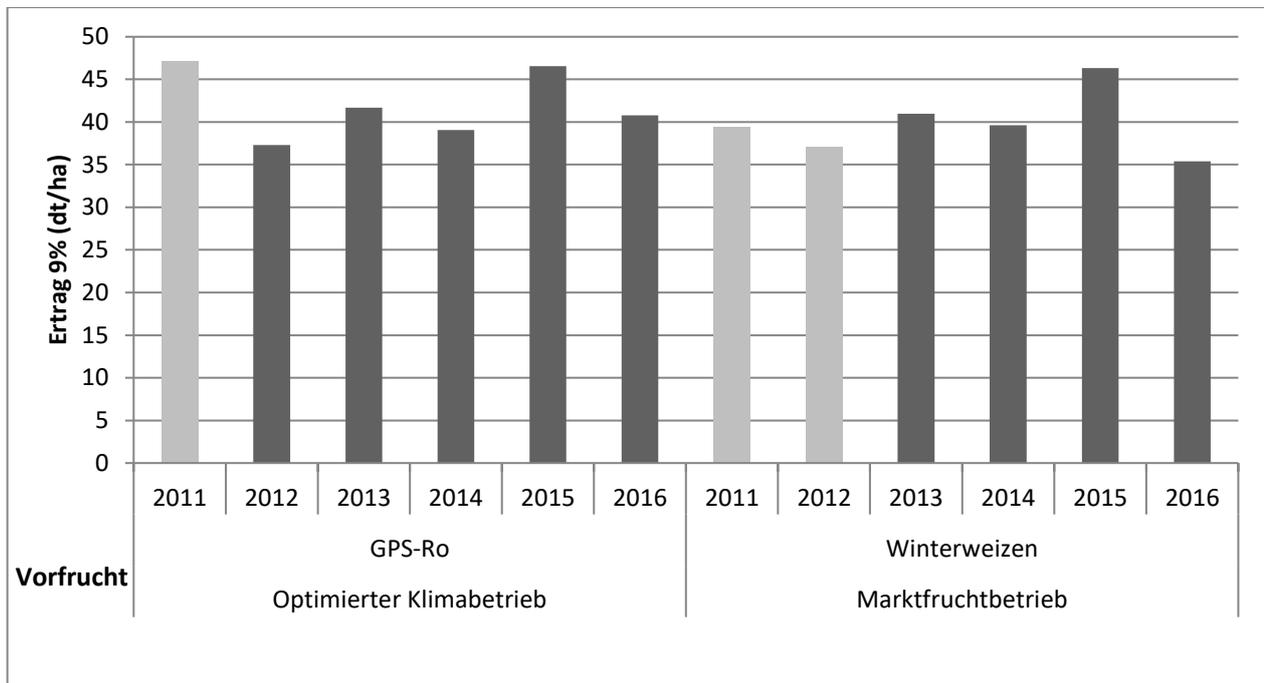


Abbildung 16: Kornertrag von Winterraps der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (Grau=außerplanmäßige Vorfrucht)

In Abbildung 17 sind die Ackerbohnenenerträge aufgeführt, diese reichen von 53 dt/ha im Erntejahr 2015 bis zu knapp 72 dt/ha im Erntejahr 2014. Im Erntejahr 2013 war keine Ertragsermittlung möglich.

Die Grünroggenerträge sind nur für die Jahre 2012, 2014 und 2015 erfasst und in Abbildung 18 dargestellt. Begründet ist dies durch die geringen Aufwüchse in den Erntejahren 2013 und 2016, in denen zugunsten einer frühen Maisaussaat auf eine Ernte verzichtet wurde. Im ersten Projektjahr wurde kein Grünroggen angebaut, da erst eine Systemanpassung erfolgte. In den Erntejahren 2012 und 2014 bewegen sich die Erträge in beiden Betriebsformen auf einem ähnlichen Niveau, während im Erntejahr 2015 der Ertrag im V-Betrieb mit etwa 72 dt/ha deutlich über denen des O-Betriebs mit 47 dt/ha und knapp 53 dt/ha liegt.

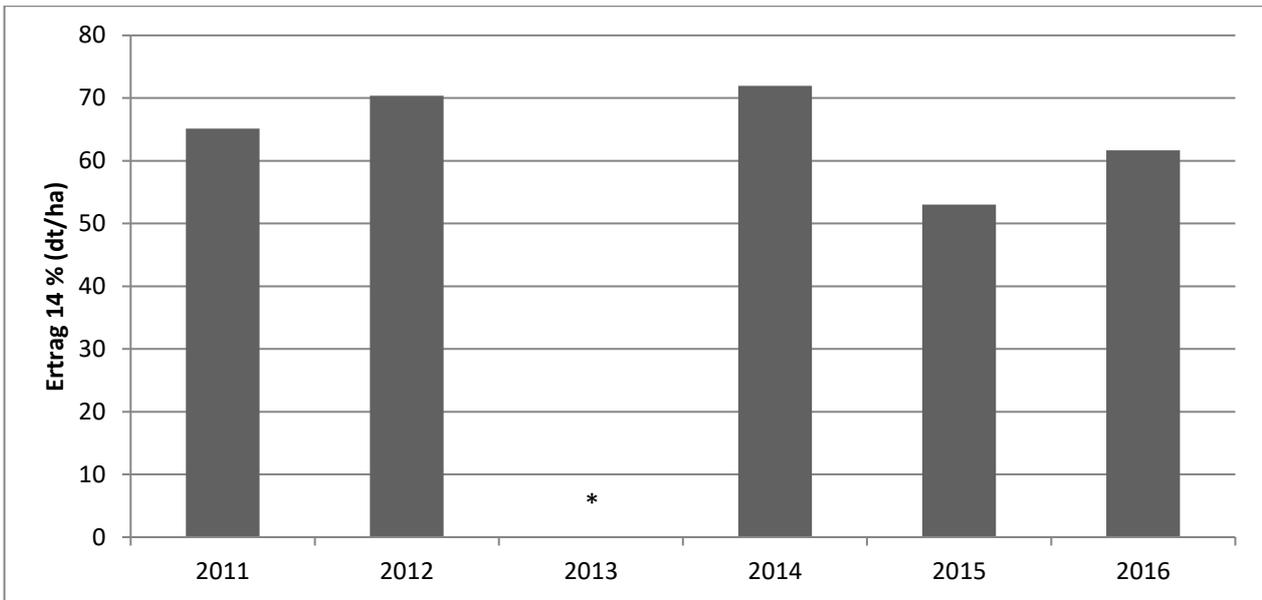


Abbildung 17: Kornertrag von Ackerbohne der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig, * Ertrag nicht erfasst

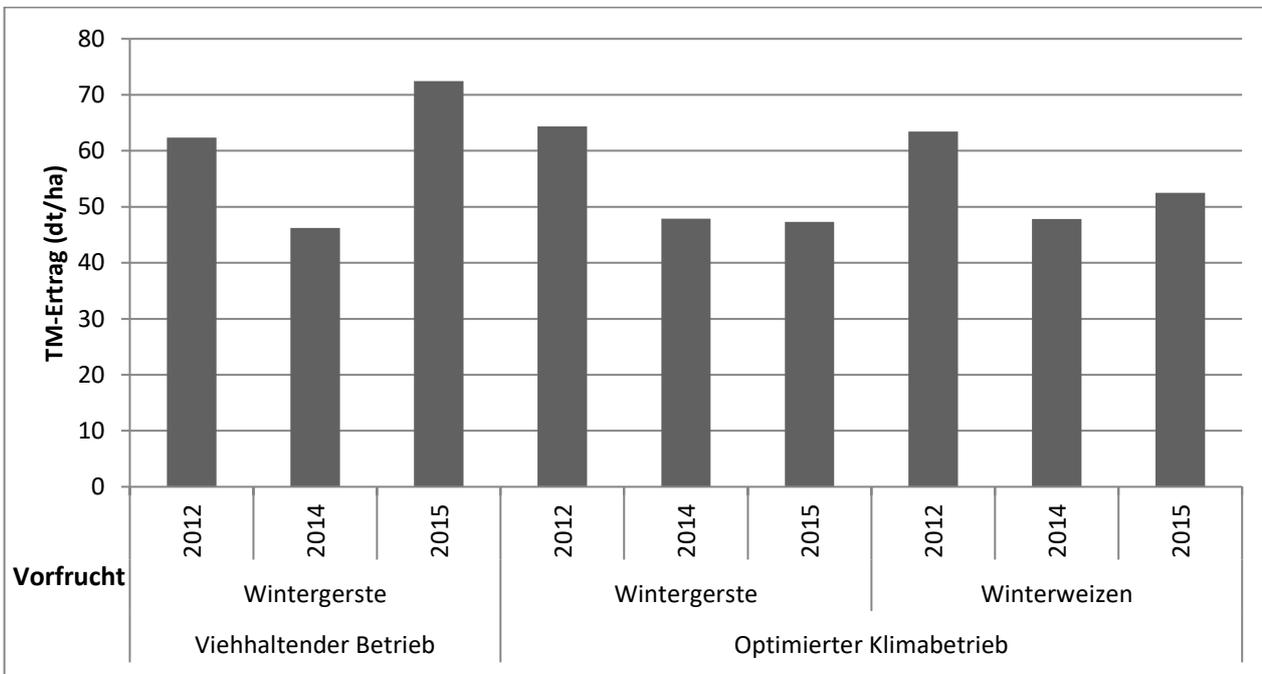


Abbildung 18: TM-Ertrag von Grünroggen der Erntejahre 2012 bis 2015 in Braunschweig

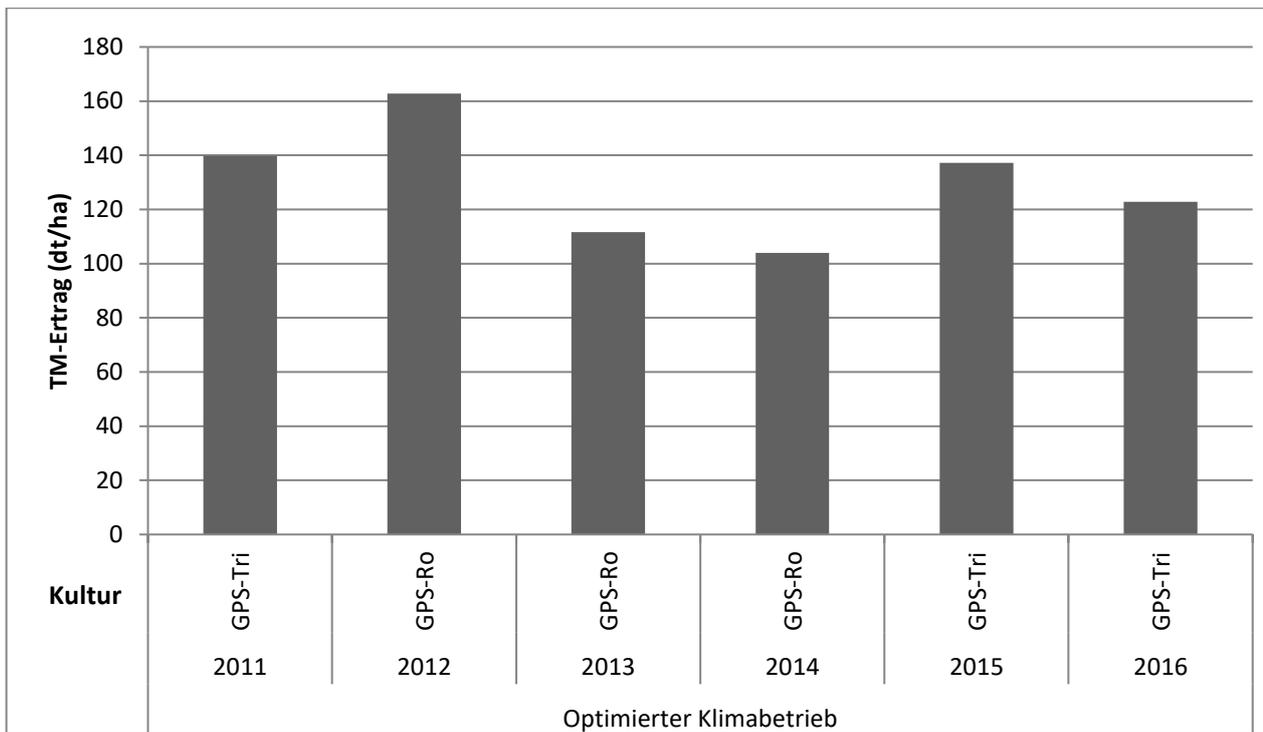


Abbildung 19: TM-Ertrag von GPS-Roggen/GPS-Triticale der Erntejahre 2011 bis 2016 am Standort Braunschweig

Im O-Betrieb wurde als Substrat für die Biogasanlage neben Grünroggen und Silomais Roggen bzw. Triticale als Ganzpflanzensilage angebaut, die TM-Erträge sind in Abbildung 19 dargestellt. Die jährlichen Schwankungen reichen von 104 dt/ha im Erntejahr 2014 bis zu 162 dt/ha im Erntejahr 2012.

In Abbildung 20 sind die TM-Erträge im Silomais aufgeführt, am niedrigsten waren die Erträge in beiden Betriebsformen in den Erntejahren 2013 und 2015, die Erträge lagen unter 120 dt/ha. Im Erntejahr 2013 wurde wegen des geringen Aufwuchses kein Grünroggen geerntet, die zum Grünroggen bereits ausgebrachten Düngermengen wurden von der zu düngenden Menge beim Silomais abgezogen. In Folge dessen zeigten die Maispflanzen deutliche Mangelerscheinungen in der Nährstoffversorgung. Das Erntejahr 2015 war durch eine stark ausgeprägte Trockenheit in den Monaten Mai und Juni und eine späte Maisausaat (19.5.), verursacht durch die Vorfrucht Grünroggen, gekennzeichnet. Die Pflanzen hatten durch diese Bedingungen eine verzögerte Jugendentwicklung. Die höchsten Erträge wurden nach Vorfrucht Wintergerste im Jahr 2014 erzielt, sie lagen über 195 dt/ha, auch in diesem Jahr erfolgte die Aussaat verzögert, die Pflanzen hatten jedoch durch die höheren Niederschläge bessere Wachstumsbedingungen. Im Vergleich der Betriebssysteme ist der V-Betrieb in den Jahren 2012 und 2015 über- und in den Jahren 2013 und 2014 unterlegen. Im Erntejahr 2011 und 2016 sind die Erträge im V- und im O-Betrieb annähernd gleich. Nach der Vorfrucht Wintergerste wurden im O-Betrieb höhere oder nahezu gleiche Erträge erzielt als nach der Vorfrucht Winterweizen.

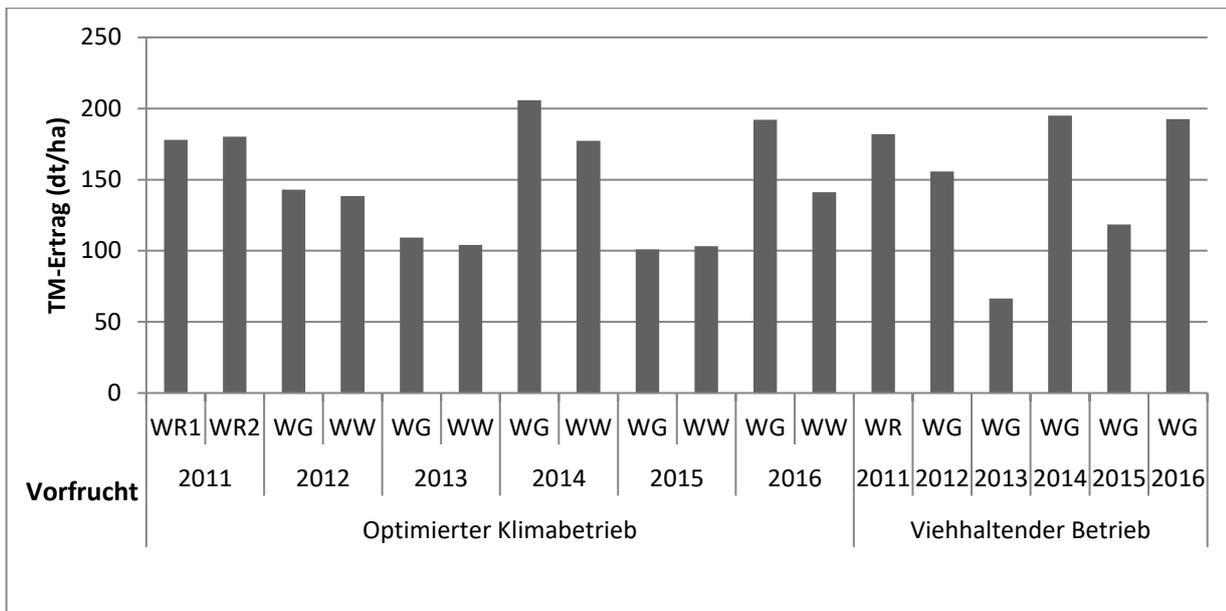


Abbildung 20: TM-Ertrag von Silomais der Erntejahre 2011 bis 2016 am Standort Braunschweig

Insgesamt konnte im Vergleich der Betriebssysteme bezüglich der Erträge keine der geprüften Varianten als grundsätzlich besser oder schlechter erkannt werden. Die Direktsaat konnte im Silomais nicht überzeugen und hatte in dieser Kultur teils hohe Ertragsverluste zur Folge. Anders hingegen bei der Kultur Wintertraps, hier hat sich die Direktsaat als vorteilhaft erwiesen. Die Vorzüge einer erweiterten Fruchtfolge zeigten sich besonders in der Gerste, durch die Vorfrucht Ackerbohne ergaben sich deutliche Ertragsvorteile.

Während der gesamten Projektlaufzeit wurden die gängigen und abrechnungsrelevanten Qualitätsparameter (z.B. Kornfeuchte, Hektolitergewicht, TKM, Rohprotein) erfasst. Zwischen den Modellbetrieben konnten dabei keine Unterschiede beobachtet werden, die auf die differenzierte Bewirtschaftung zurückzuführen waren. Die Ergebnisse sind daher in den Anhang übernommen worden.

2.5.2 Vergleich der Betriebssysteme bezüglich der N_{min} -Werte

In Abbildung 21 sind die N_{min} -Werte der Betriebssysteme im Durchschnitt der Fruchtfolgen und der Jahre dargestellt.

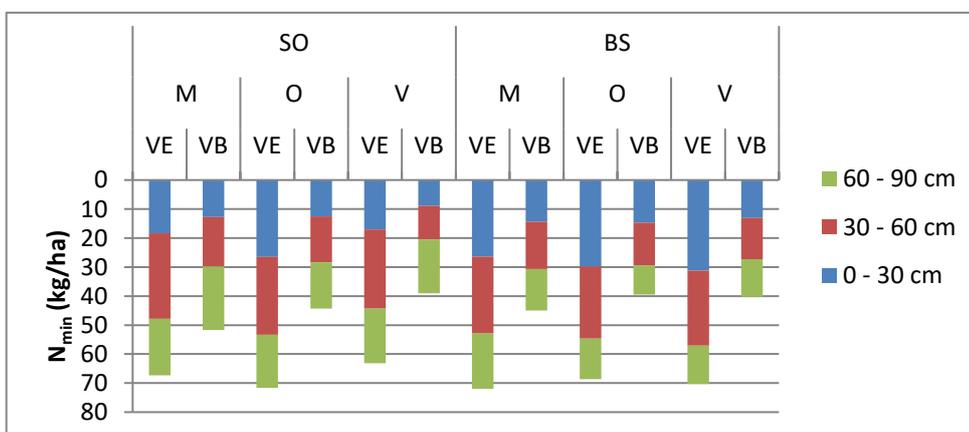


Abbildung 21: Durchschnittliche N_{min} -Werte (0-90) in den verschiedenen Betriebssystemen in Soest und Braunschweig seit Vegetationsende 2011 bis Vegetationsbeginn 2016

Der durchschnittliche N_{\min} -Wert aus der Summe der Horizonte beträgt zu Vegetationsende an beiden Standorten und in allen drei Betriebsformen zwischen 63 und 72 kg N/ha. Über Winter gehen im Schnitt zwischen 16 und 30 kg N/ha verloren. Im Durchschnitt der Jahre und der Fruchtfolgen, lässt sich zwischen den Betrieben weder in der Höhe der absoluten N_{\min} -Werte noch in den Verlusten ein eindeutiger Unterschied erkennen. Vielmehr scheint es zu jahresbedingten Effekten zu kommen (Abbildung 22).

Während es im Winter der Jahre 2014/15 und 2015/16 an beiden Standorten bei N_{\min} -Werten zu Vegetationsende von durchschnittlich 60-70 kg/ha, zu relativ hohen Verlusten gekommen ist, scheint der Winter 2013/14 deutlich verlustärmer zu sein. Gleichzeitig war der Ausgangs- N_{\min} -Wert im Vergleich zu den anderen Jahren reduziert. Im Jahr 2012/13 gibt es deutliche Unterschiede zwischen den beiden Standorten. Während in Soest, bei insgesamt geringen N_{\min} -Werten nur ein sehr geringer Abfall zu Vegetationsbeginn gemessen werden kann, wurden in Braunschweig nach sehr hohen Ausgangsgehalten im Herbst im Frühjahr deutlich geringere Werte analysiert. Über Winter der Jahre 2011/12 wurden trotz hoher N_{\min} -Werte im Herbst an beiden Standorten nur geringe Verluste festgestellt. Eine Erklärung dafür konnte nicht gefunden werden, da an beiden Standorten hohe Niederschlagsmengen in den Monaten Dezember und Januar bei gleichzeitig milden Temperaturen aufgezeichnet wurden (Abbildung 1-6).

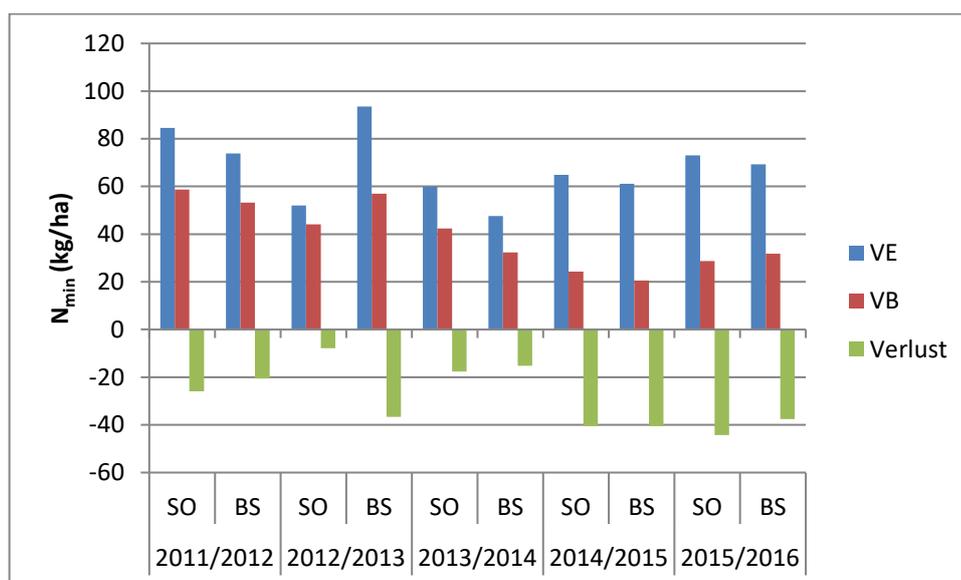


Abbildung 22: N_{\min} (kg/ha) zu Vegetationsende und -beginn sowie die Verluste im Durchschnitt der Standorte in Abhängigkeit der Jahre

Bei einer zusätzlichen Betrachtung der Betriebssysteme wird deutlich, dass sich die Betriebe in den einzelnen Jahren in ihren Ausgangssituationen vor Winter und den Verlusten über Winter deutlich voneinander unterscheiden können (Abbildung 23, Abbildung 24).

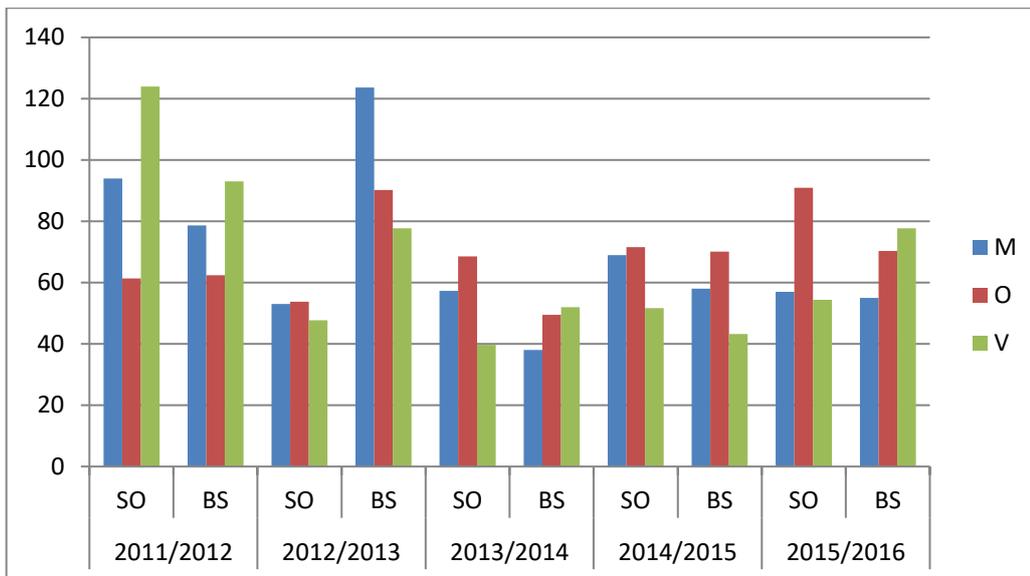


Abbildung 23: N_{min}-Werte zu Vegetationsende in Abhängigkeit von Standort, Jahr und Betriebssystem

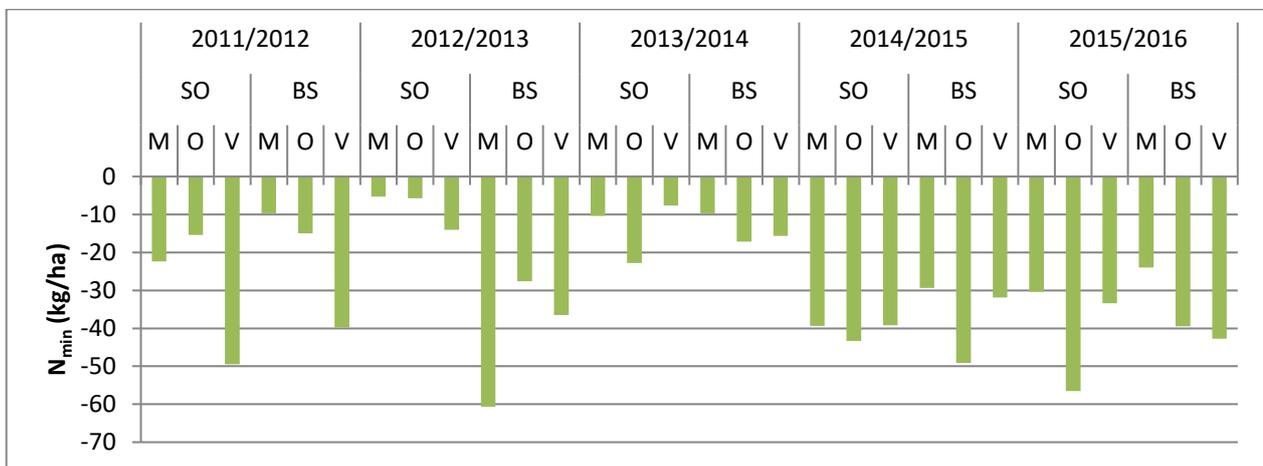


Abbildung 24: N_{min}-Verluste über Winter in Abhängigkeit von Standort, Jahr und Betriebssystem

So konnten im Jahr 2011/12 an beiden Standorten im V-Betrieb zu einen zum Teil deutlich höhere Ausgangs-N_{min}-Werte festgestellt werden zum anderen resultierten daraus auch deutlich höhere Verluste über Winter als in den beiden anderen Betriebssystemen. Diese hohen Durchschnittswerte im V-Betrieb sind an beiden Standorten insbesondere auf die hohen N_{min}-Gehalte nach Silomais zurückzuführen (Tabelle 5).

Während im folgenden Jahr 2012/13 in Soest zwischen den Betrieben kein relevanter Unterschied erkannt werden kann, ergibt sich in Braunschweig ein anderes Bild. Hier ist es der M-Betrieb, der sich durch hohe N_{min}-Werte und -Verluste kennzeichnet. Ausschlaggebend sind hierfür die hohen N_{min}-Werte im Weizen. So wurden im Stoppelweizen 111 kg N_{min}/ha und im Raps-Weizen sogar 173 kg N_{min}/ha gemessen (Tabelle 6).

In den Jahren 2013/14 und 2015/16 ist es der O-Betrieb in Soest, der durch erhöhte Werte auffällt, ebenso wie 2014/15 in Braunschweig. Während im Jahr 2014/15 der hohe Durchschnittswert des O-Betriebes in Braunschweig insbesondere auf die hohen N_{min}-Werte im Weizen nach Silomais und Winterraps zurückzuführen sind, liegt die Ursache für die hohen Soester Werte im Jahr 2015/16 insbesondere an den sehr hohen Gehalten in der Wintergerste nach Ackerbohne und dem Weizen nach Silomais begründet. Im Jahr

2013/14 scheinen die Werte in Soest in Raps, Weizen, Gerste sowie Grünroggen vor Silomais nach Winterweizen insgesamt etwas erhöht zu sein, insbesondere der Weizen nach Raps zeigt jedoch deutlich erhöhte Werte (Tabelle 7).

Tabelle 5: N_{\min} -Werte (0-90 cm) der einzelnen Kulturen des V-Betriebes zu Vegetationsende

		2011/12		2012/13		2013/14		2014/15		2015/16		Durchschnitt	
Hauptfrucht	Vorfrucht	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS
SM	WG	82	43	70	79	55	38	70	11	49	51	65	44
WG	WW	76	73	45	78	30	44	34	33	46	29	46	51
WW	SM	183	132	33	154	34	74	53	65	125	116	86	108

Kursiv: außerplanmäßige Vorfrucht

Tabelle 6: N_{\min} -Werte (0-90 cm) der einzelnen Kulturen des M-Betriebes zu Vegetationsende

		2011/12		2012/13		2013/14		2014/15		2015/16		Durchschnitt	
Hauptfrucht	Vorfrucht	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS
WR	WW	28	38	6	87	55	24	22	36	24	27	27	42
WW	WR	149	91	102	173	63	50	101	115	89	79	101	102
	WW	105	107	51	111	54	40	84	23	58	59	70	68

Kursiv: außerplanmäßige Vorfrucht

Tabelle 7: N_{\min} -Werte (0-90 cm) der einzelnen Kulturen des O-Betriebes zu Vegetationsende

		2011/12		2012/13		2013/14		2014/15		2015/16		Durchschnitt	
Hauptfrucht	Vorfrucht	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS	SO	BS
AB	WW	6	32	19	63	29	76	17	43	68	48	28	52
RoGPS	SM	70*	136*	37	67	50	43	46	58*	101	102*	61	81
SM	WG	85	34	49	96	16	37	70	45	64	75	57	57
	WW	61	39	68	108	88	38	57	35	69	42	69	52
WG	AB	93	45	85	102	89	58	71	76	141	77	96	72
WR	RoGPS	11	33	36	133	88	32	58	37	70	63	53	60
WW	SM	95	91	46	89	80	44	95	119	139	82	91	85
	WR	70	89	90	64	108	68	111	100	55	62	87	77

*Triticale-GPS, *Kursiv: außerplanmäßige Vorfrucht*

Im Schnitt der Jahre gibt es zwischen den Betrieben keinen Differenzen - in Einzeljahren, kann es aber zu deutlichen Unterschieden zwischen den Betrieben kommen, wobei hier eine Differenzierung nach den angebauten Kulturen vorgenommen werden muss.

Insbesondere die Vorfrüchte Ackerbohne, Winterraps und Silomais führen im Durchschnitt der Jahre zu erhöhten N_{\min} -Werten im Herbst (Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7), weshalb diese Kulturen im Folgenden genauer betrachtet werden.

Am Beispiel der Wintergerste lässt sich der Effekt einer legumens Vorfrucht gut abschätzen. Ein direkter Vergleich unter sonst gleichen Bedingungen ist nicht möglich, da die Ergebnisse aus zwei verschiedenen

Betriebssystemen stammen. Während nach der Ackerbohne im O-Betrieb zur Gerste lediglich eine Direktsaat stattgefunden hat, wurde im V-Betrieb zur Gerste nach Weizen gepflügt. Dennoch lässt sich gut erkennen, dass sowohl in Soest als auch in Braunschweig nach der Ackerbohne höhere N-Mengen im Boden gefunden wurden als nach Weizen (Abbildung 25). Der höhere Wert in Soest im Vergleich zu Braunschweig lässt sich aus Einzeljahren erklären, dies kann aber nicht pauschal abgeleitet werden (Tabelle 7). Zu Vegetationsbeginn sind nach der Ackerbohne an beiden Standorten noch etwa 40 kg N_{min}/ha im Boden zu finden und nach dem Weizen etwa 30 kg/ha.

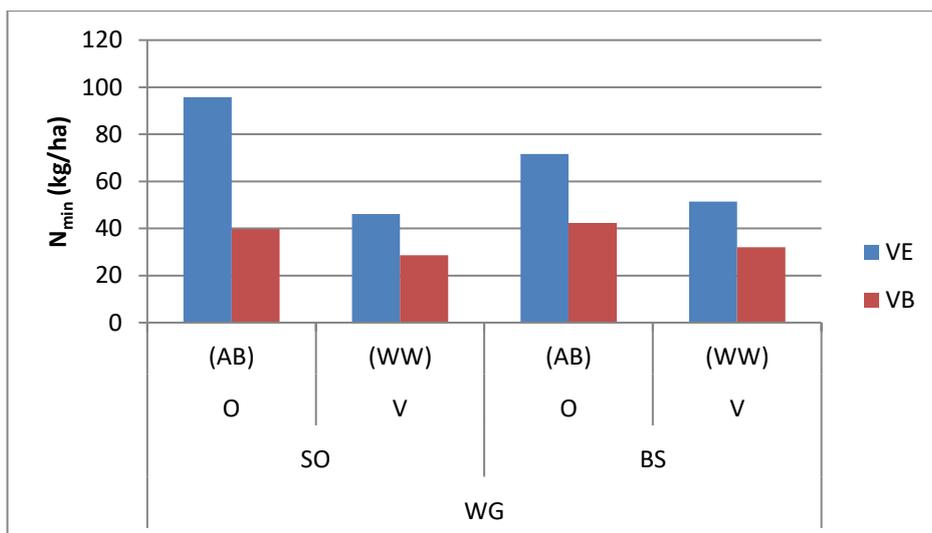


Abbildung 25: Durchschnittliche N_{min}-Werte (2011 – 2016) in der Wintergerste zu Vegetationsende (VE) und Vegetationsbeginn (VB) in Abhängigkeit von den Vorfrüchten Ackerbohne und Winterweizen und dem Standort

Neben den Leguminosen ist auch der Winterraps dafür bekannt, hohe N-Mengen im Boden zu hinterlassen (SCHÄFER 2011). Auch dies lässt sich im 5-jährigen Durchschnitt im Vergleich zum Weizen bestätigen (Abbildung 26).

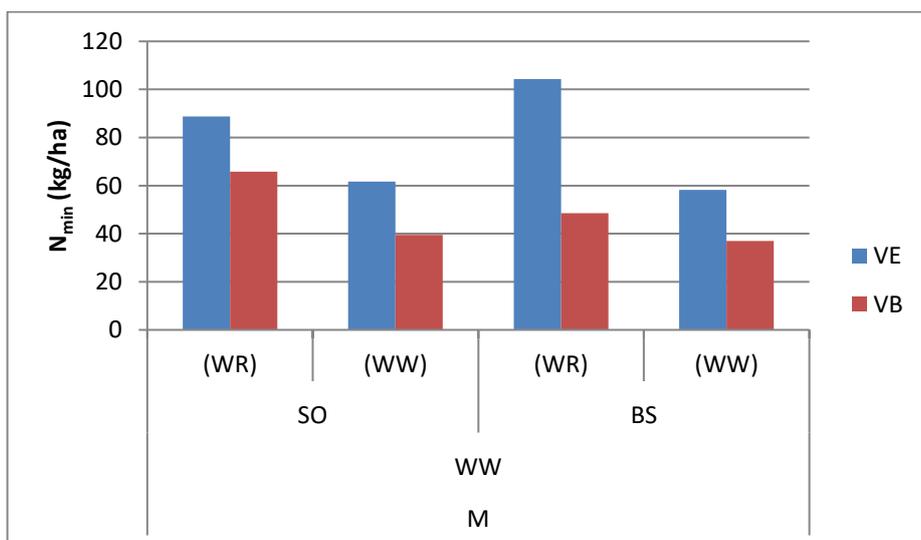


Abbildung 26: Durchschnittliche N_{min}-Werte (2011 – 2016) im Winterweizen zu Vegetationsende (VE) und Vegetationsbeginn (VB) in Abhängigkeit von den Vorfrüchten Winterraps und Winterweizen und dem Standort, im M-Betrieb

Im M-Betrieb wurde im Durchschnitt der Jahre an beiden Standorten im Rapsweizen zu Vegetationsende etwa 30 – 40 kg N_{min}/ha mehr gefunden als im Stoppelweizen. Zum Stoppelweizen hat aus phytosanitären Gründen eine wendende Bodenbearbeitung stattgefunden, während zum Rapsweizen konservierend gearbeitet wurde. Bei einer Betrachtung der Einzeljahre (Tabelle 6) wird deutlich, dass es insbesondere die Jahre 2012 und 2014 sind, die zu den hohen Braunschweiger Werten im Herbst führen.

Betriebsintern kann weiterhin im O-Betrieb ein Vergleich im Weizen nach den Vorfrüchten Winterraps und Silomais gezogen werden (Abbildung 27).

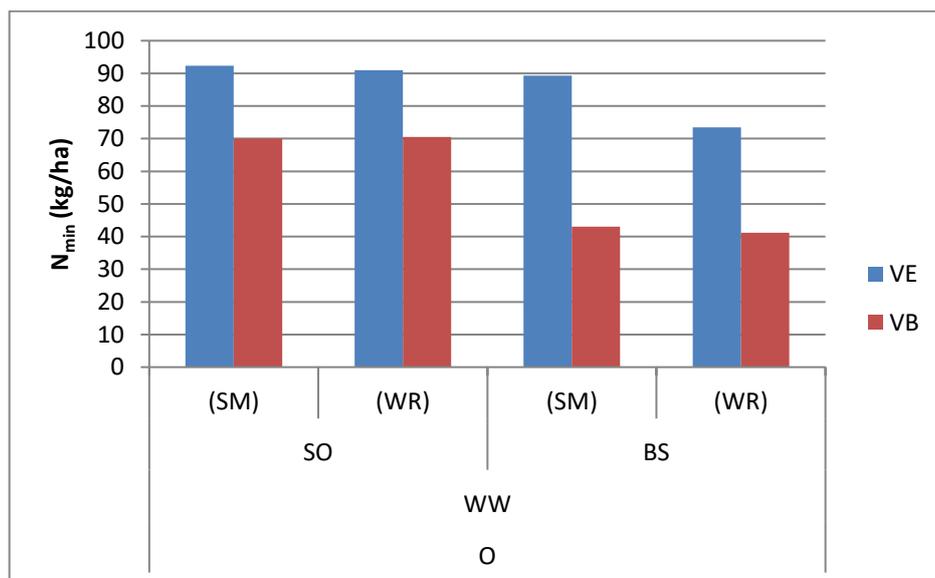


Abbildung 27: Durchschnittliche N_{min}-Werte (2011 – 2016) im Winterweizen zu Vegetationsende (VE) und Vegetationsbeginn (VB) in Abhängigkeit von den Vorfrüchten Winterraps und Silomais und dem Standort, im O-Betrieb

Es wird deutlich, dass der Silomais ebenfalls sehr hohe N-Mengen im Boden hinterlässt. Davon werden während der Wintermonate erhebliche Mengen ausgewaschen. In Soest sind im Frühjahr sowohl nach Raps als auch nach Silomais noch etwa 75 % vorhanden, während in Braunschweig noch etwa 50 % des Stickstoffs zur Verfügung stehen.

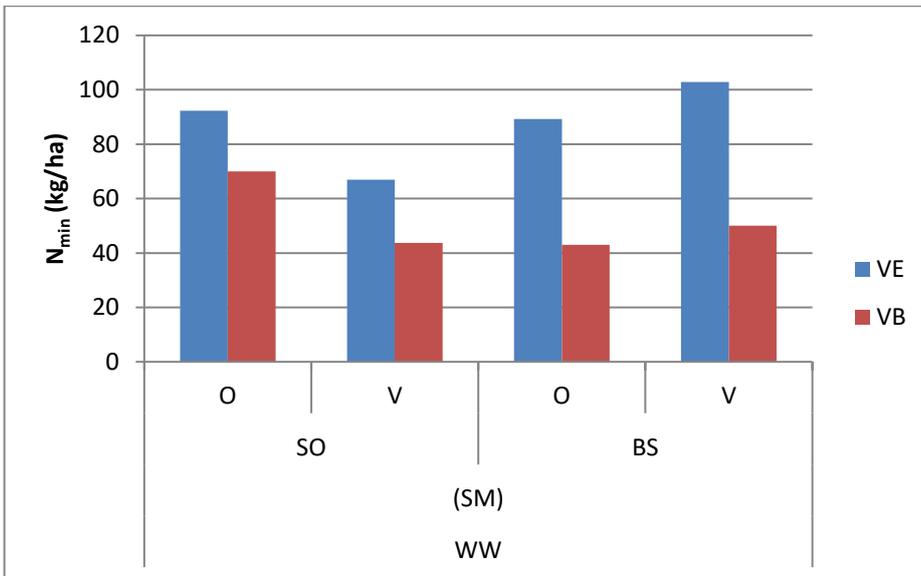


Abbildung 28: Durchschnittliche N_{\min} -Werte (2011 - 2016) zu Vegetationsende (VE) und Vegetationsbeginn (VB) im Winterweizen nach Silomais in Abhängigkeit vom Betriebssystem und dem Standort

Ein möglicher Einfluss der Betriebssysteme auf die N_{\min} -Werte bei gleicher Vorfrucht-Nachfrucht-Konstellation ist in den Abbildung 28 und Abbildung 29 dargestellt. Es wird deutlich, dass in den Vergleichen kein Einfluss des Betriebssystemes zu erkennen ist, so sind im Winterweizen nach Silomais in Soest im O-Betrieb höhere N_{\min} -Werte zu finden, während in Braunschweig im V-Betrieb höhere Werte zu finden sind.

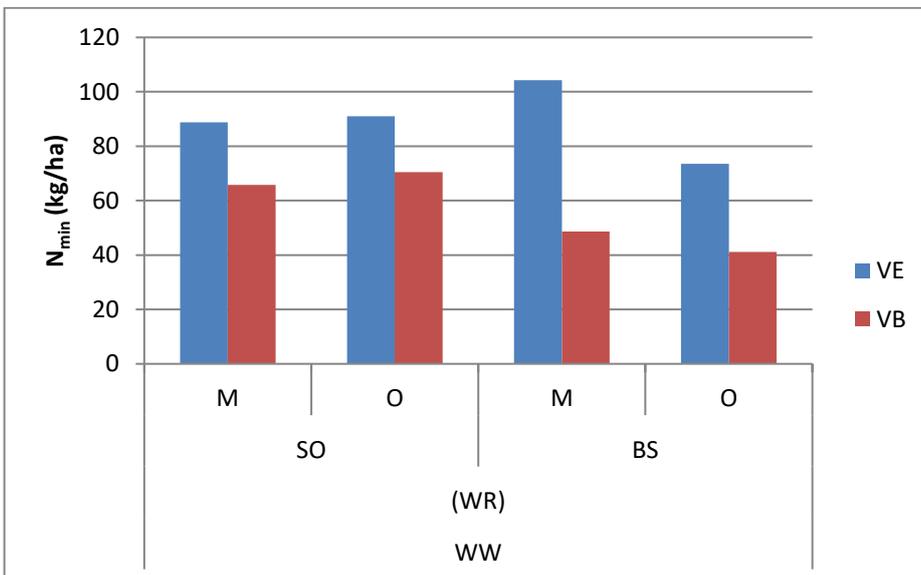


Abbildung 29: Durchschnittliche N_{\min} -Werte (2011 - 2016) zu Vegetationsende (VE) und Vegetationsbeginn (VB) im Winterweizen nach Wintererraps in Abhängigkeit vom Betriebssystem und dem Standort

Zwischen den einzelnen Betriebssystemen lassen sich keine nennenswerten Unterschiede erkennen, diese entstehen insbesondere durch Jahreseffekte und die unterschiedlichen Vorfrüchte. Besonders problematisch waren die Vorfrüchte Ackerbohne, Wintereraps und Silomais.

2.5.3 Vergleich der Betriebssysteme bezüglich der Bodenbedeckung

In jedem Projektjahr wurden die Flächen bezüglich der Bodenbedeckungsgrade nach der Aussaat untersucht. Zur Vereinfachung werden die Werte für die Kultur Grünroggen im O-Betrieb nicht nach Vorfrüchten getrennt, sondern als eine Säule dargestellt. Der Winterweizen wird nach Vorfrüchten getrennt dargestellt, wegen der hohen Differenzierung bedingt durch Bodenbearbeitung und Vorfrucht. In Abbildung 30 ist die Bodenbedeckung am Standort Soest dargestellt, als Mittel über die Jahre 2012 bis 2016. Auch in Soest sind große Differenzen zwischen den Betriebssystemen vorhanden, die Werte schwanken von 4,1 % bis zu 90,7 %. Wie bereits am Standort Braunschweig hatten auch in Soest das Betriebssystem und die Vorfrucht den größten Effekt. Nach der Vorfrucht Mais wurden auch im O-Betrieb niedrige Bodenbedeckungsgrade gemessen, während das Betriebssystem ansonsten den anderen überlegen war.

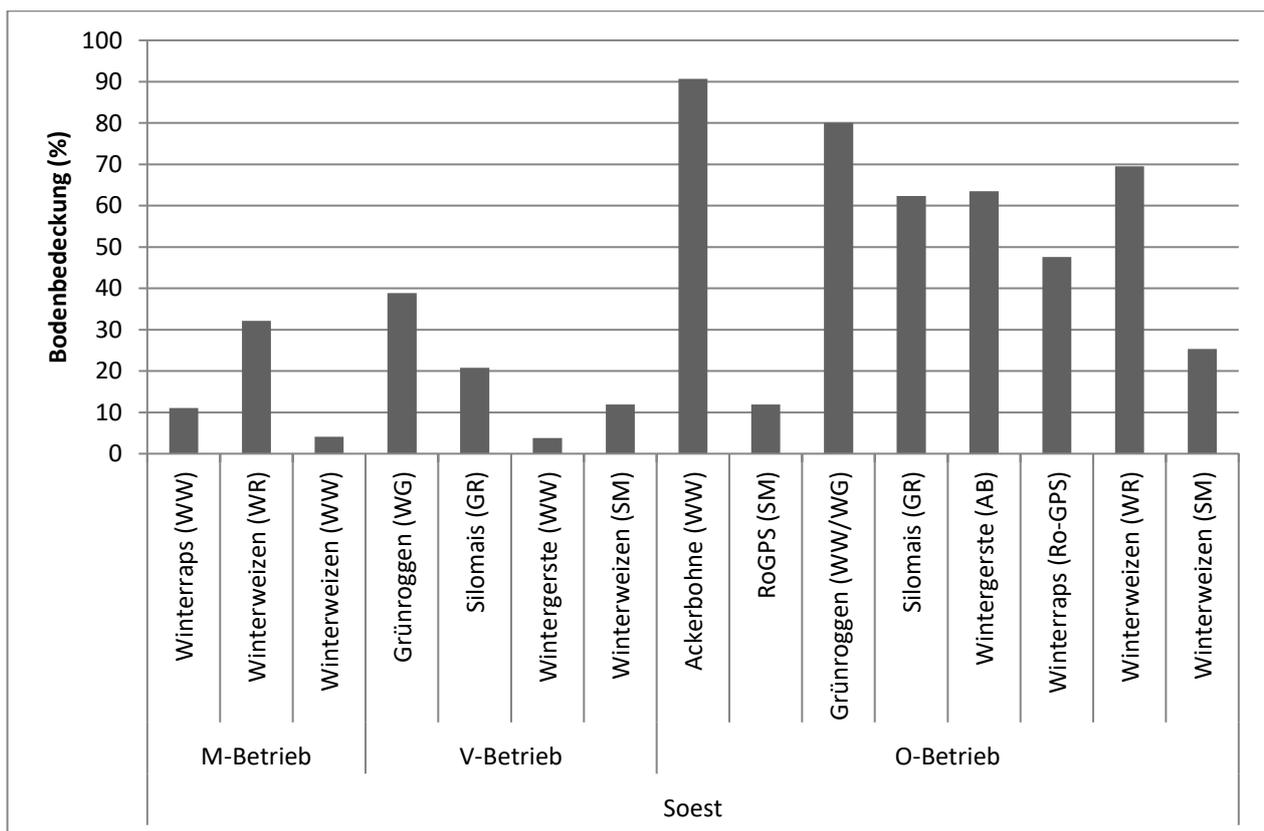


Abbildung 30: Bodenbedeckung in % nach Aussaat des Standorts Soest im Mittel der Jahre 2012 – 2016, Vorfrucht in Klammern

Die Ergebnisse des Standorts Braunschweig, als Mittel über die komplette Projektlaufzeit, sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Werte weisen eine hohe Schwankung zwischen 0,1 % bis zu 76,1 %, entscheidend für die Ergebnisse waren sowohl Bodenbearbeitung als auch Vorfrucht. Niedrige Bodenbedeckungsgrade waren erwartungsgemäß nach der Vorfrucht Silomais oder nach einer Bodenbearbeitung mit Pflug zu finden. Die

Bodenbedeckung war im O-Betrieb immer über denen des V- oder M-Betriebs, die niedrigsten Werte in diesem Betriebssystem wurden nach der Vorfrucht Silomais gemessen.

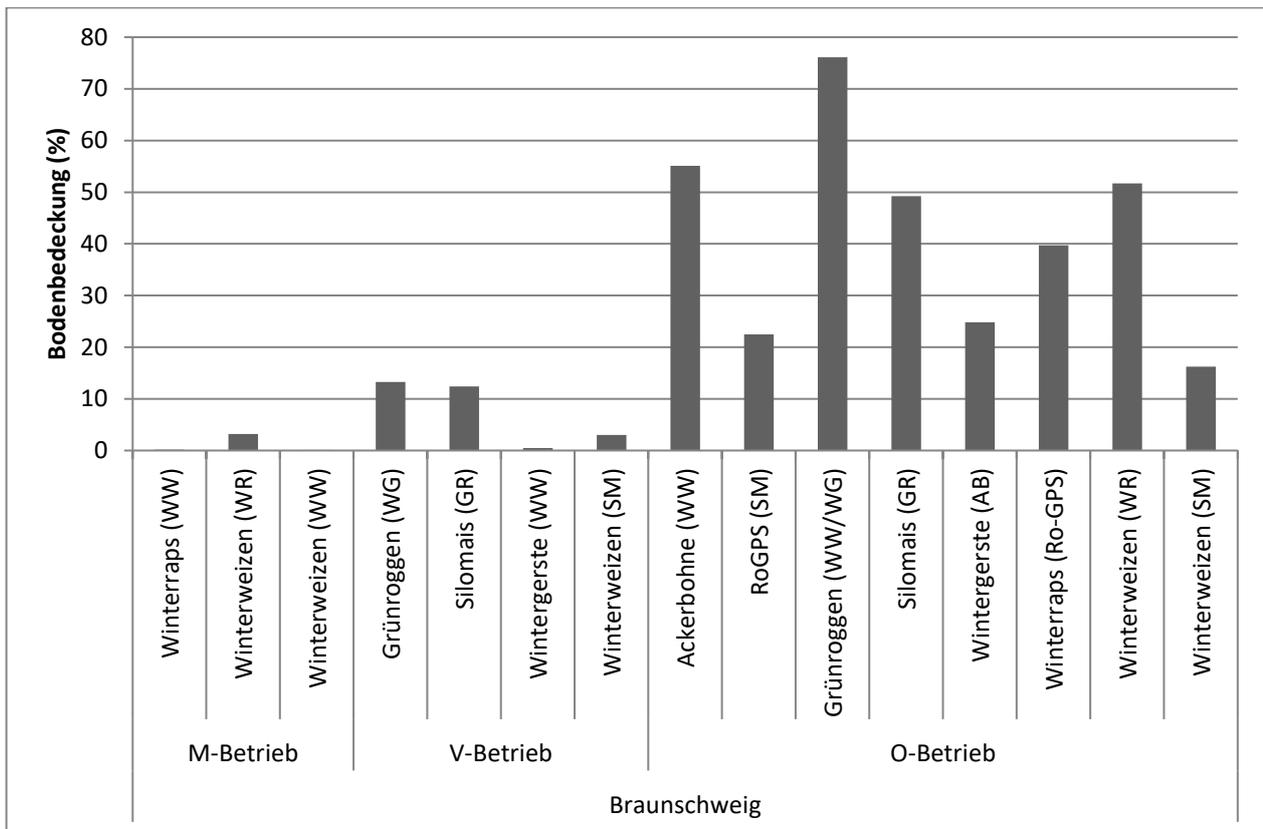


Abbildung 31: Bodenbedeckung in % nach Aussaat des Standorts Braunschweig im Mittel der Jahre 2012-2016, Vorfrucht in Klammern

Im Mittel über alle Kulturen und Jahre waren am Standort Soest 16 % Bodenbedeckung im M-Betrieb, 20 % im V-Betrieb und 59 % im O-Betrieb vorhanden. Am Standort Braunschweig waren es im M-Betrieb 1 %, im V-Betrieb 7 % und im O-Betrieb 46 % Bodenbedeckung. In diesem Zusammenhang lässt sich ein klarer Vorteil der Direktsaat oder zumindest des Pflugverzichts erkennen, denn die Bodenbedeckung steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Erosionsschutz von Böden, da für Erosion meist Niederschläge auf un- oder geringfügig bedeckte Flächen verantwortlich sind (DUTTMANN et al. 2011). Im Mittel der Projektjahre war an beiden Standorten der O-Betrieb überlegen und nur nach der Vorfrucht Silomais wurden hier niedrige Bodenbedeckungsgrade gefunden, im Vergleich der Weizenflächen nach Vorfrucht Silomais in V- und O-Betrieb zeigt sich jedoch wieder die Überlegenheit der Direktsaat und das unabhängig vom Standort. Für den Schutz vor Winderosion reichen 25 % (BACH 2015) und für den Schutz vor Wassererosion 30 % Bodenbedeckung aus (SCHMIDT et al. 2015), diese Werte wurden am Standort Soest nach der Vorfrucht Silomais auch im O-Betrieb nicht erreicht, deutlich wurde jedoch, dass ein Pflugeinsatz (im M-Betrieb zu Winterraps und Stoppelweizen, im V-Betrieb zu Wintergerste) ein Erreichen dieser Richtwerte ausschließt. In Braunschweig wurden diese Richtwerte weder im V- noch im M-Betrieb erreicht, im O-Betrieb wurden sie nur nach den Vorfrüchten Ackerbohne und Silomais nicht erreicht.

3 Teilprojekt N-Düngeoptimierung

3.1 Literaturübersicht

Mit der Zunahme von Biogasanlagen in Deutschland werden auch die Ansprüche an die Verfahren der Gülle- bzw. Gärrestausbringung größer. Anerkannte Verfahren der Technik haben zum Ziel, Emissionen und Nährstoffverluste bei der Ausbringung von Gülle und Gärresten möglichst gering zu halten.

Ziele einer anerkannten Technik zur Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger sind:

- Optimierung der Logistik
- präzise Längs- und Querverteilung
- präzise Mengendosierung
- Vermeidung von Emissionen in Luft und Wasser
- Vermeidung von Bodenverdichtungen

Im Jahr 2010 wurden noch knapp 70 % der flüssigen Wirtschaftsdünger mit Breitverteilern ausgebracht, mit der Schleppschlauchtechnik 22 % und nur knapp 9 % mit stärker emissionsmindernder Technik wie Schleppschuh (2,2 %), Schlitzverfahren (1,3 %), Güllegrubbern und anderer Injektionstechnik (5,3 %). Demgegenüber steht die Forderung der DüV, die Einarbeitung von organischem Dünger auf unbestelltem Ackerland „unverzüglich“ (seit 01.01.2012 innerhalb von vier Stunden) durchzuführen, um Ammoniak- und Lachgasemissionen zu vermindern und die bestmögliche Ausnutzung der Nährstoffe zu gewährleisten.

Mit der bisherigen Technik, die überwiegend in der Praxis eingesetzt wird, sind die Forderungen nach größtmöglicher Vermeidung von Emissionen von klimarelevanten Gasen nicht zu erfüllen. Auf der Suche nach technischen Lösungen zur Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger haben die Hersteller Verfahren zur Injektion von organischen Düngemitteln entwickelt.

Seit drei Jahren bieten fast alle Hersteller Geräte an, mit denen eine günstige Platzierung der Nährstoffe im Wurzelbereich der Pflanze möglich ist. Ziel dieser Technik ist die Senkung von N-Emissionen sowie die optimale Ausnutzung des Stickstoffs aus organischen Düngemitteln. Die Technologie wird inzwischen in Deutschland in der Praxis zunehmend angewendet (BOCK & BENSING 2012, LAURENZ 2012, LAURENZ 2016).

Zusammen mit der Streifenbearbeitung „Strip-Till“ steht ein bodenschonendes Verfahren der Gülleausrbringung unter der Pflanzenreihe zur Verfügung, bei dem Emissionen und Kosten möglichst gering gehalten werden sollen. Dieses System hat sich seit Jahren unter amerikanischen Anbauverhältnissen bewährt (FISHER 2011). In mehreren Bundesländern (BY, NDS, NRW, ST) wird an der Einbindung der Gülle-

Strip-Till-Technik in Produktionsverfahren geforscht (BISCHOFF 2013, DEMMEL & BRANDHUBER 2012, KOWALEWSKY 2013a, b). Forschungsgegenstand sind u.a. die Ausbringmengen und -termine (Herbst, Frühjahr), der Zusatz von Nitrifikationshemmern sowie die Prüfung unterschiedlicher Reihenweiten in Mais. Im Projekt „Optimierung der Stickstoff- und Phosphat-Effizienz aus flüssigen organischen Wirtschaftsdüngern durch „Depot-Applikation“ zur Verminderung der Umweltbelastung“ der Hochschule Osnabrück (Förderung durch die DBU) wurde diese Technik, die bisher primär unter dem Aspekt der Verringerung der gasförmigen Ammoniak-Verluste eingesetzt wird, zu einer Unterfuß-Düngestrategie im Maisanbau entwickelt (OLFS 2013). Es fehlen jedoch in allen aufgeführten Projekten konkrete Untersuchungen zur Lachgasemission beim Einsatz von bodenschonender Strip-Till-Technik in Kombination mit Gülleinjektion. Auch Aspekte der Auswirkung langjähriger Direktsaaten auf die Düngewirkung wurden bisher nicht untersucht.

3.2 Material und Methoden

Ziel des Teilprojektes „N-Düngeoptimierung“ ist die Bestimmung des N-Düngeoptimums unter den spezifischen Anbaubedingungen der drei Betriebssysteme (Beschreibung s. 2.3 Anbausysteme), um hieraus Schlüsse bezüglich der Ressourceneffizienz der verschiedenen Anbausysteme ziehen zu können. Hierzu wurden in die Großparzellen der Betriebssysteme mit W-Weizen, W-Gerste, W-Raps und Silomais jeweils N-Steigerungsversuche als Blockanlagen bzw. in Silomais als Spaltanlagen etabliert. Im Optimierten- und im Viehhaltenden Betrieb gibt es eine einheitliche organische Basisdüngung mit Gärrest in Höhe der geringsten Düngungsstufe (SW - 50 %). Da diese Basisdüngung teilweise bereits vor dem Vorliegen der Ergebnisse der N_{min} -Analyse erfolgte, ist dann die Staffelung angepasst worden. Diese wird um eine gestaffelte, mineralische KAS-Düngung ergänzt. Im Marktfruchtbetrieb erfolgt die Düngung rein mineralisch mit KAS. Für die Düngebedarfsermittlung wurde der N-Gehalt im Gärrest mit einem Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) von 70 % angerechnet. In der N-Bilanzierung erfolgte die Anrechnung nach den Vorgaben der Dünge-VO zu 85 %, hier werden nur die unvermeidlichen N-Ausbringungsverluste berücksichtigt. Dadurch können die Präzision sowohl der MDÄ als auch der Sollwerte mit den Zu- und Abschlägen geprüft werden.

Tabelle 8: N-Stufen in den N-Steigerungsversuchen

Bezeichnung	N-Form
Sollwert - 50 %	organisch
Sollwert - 25 %	organisch (SW-50 %) + mineralisch
Sollwert	organisch (SW-50 %) + mineralisch
Sollwert + 25 %	organisch (SW-50 %) + mineralisch
Sollwert + 50 %	organisch (SW-50 %) + mineralisch

Für die Berechnung der N-Düngungsstufen werden die fruchtartspezifischen Sollwerte mit Zu- und Abschlägen korrigiert. Mit Hilfe dieser Zu- und Abschläge wird das Mineralisationsvermögen des Standortes in Abhängigkeit von den Standorteigenschaften und der vorhergehenden Bewirtschaftung (u. a. Vorfrucht, langjährige organische Düngung) abgeschätzt (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN 2015). Für den Tonboden in Braunschweig wurde ein Zuschlag von 20 kg/ha N sowie an beiden Standorten im O-Betrieb für die Vorfrucht Ackerbohnen ein Abschlag von 20 kg/ha N und die mehrjährige organische Düngung im O- und V-Betrieb wurde ein weiterer Abschlag von 10 kg/ha N angerechnet. Weitere Korrekturwerte zeigt die Tabelle 9.

Tabelle 9: Korrekturwerte (Zu-/Abschlag in kg/ha N) nach der N_{\min} -Sollwert Methode

Standorteigenschaften	
• kalte untätige Böden (utL, tL,T)	+20
• flachgründige humusarme Sandböden, Neulandböden	+20
Bewirtschaftungsverhältnisse	
• Standorte ohne organische Düngung, regelmäßige Strohabfuhr oder hackfruchtbetonte Fruchtfolgen	bis zu +30
• langjährige organische Düngung, je GV/ha	-10
Vorfrucht	
• Weizen nach Getreide (einschließlich Mais)	+20
• Gerste, Roggen, Triticale nach Blattfrucht (außer Mais)	-20
Beim Anbau von E-Weizen wird ein Zuschlag von 20 kg/ha N empfohlen. Die Summe der Zu- und Abschläge sollte bei Weizen 50 kg/ha N, bei den übrigen Getreidearten 40 kg/ha N nicht übersteigen!	

Quelle: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2015

Tabelle 10: Um Zu- und Abschläge korrigierte N-Sollwerte (kg N/ha) in den N-Steigerungsversuchen in W-Gerste, W-Weizen, W-Raps und Silomais in den verschiedenen Betriebssystemen an den Standorten Soest und Braunschweig

Kultur	Betriebssystem	Vorfrucht	Soest	Braunschweig
W-Gerste	O	AB	160	180
	V	WW	180	200
W-Weizen	O	WR	200	210
	M	WR	210	220
W-Raps	O	GPS-Ro	230	240
	M	WW	200	240
Silomais	O	Grünroggen	190	190
	V	Grünroggen	190	190

¹⁾= nach Düngeempfehlungen der LWK Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen

Von diesem standortspezifischen Sollwert (Quelle: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2015

Tabelle 10) wird der jeweilige durch Beprobung ermittelte N_{\min} -Gehalt abgezogen und so die zu düngende N-Menge nach Sollwert berechnet. Diese N-Menge nach Sollwert wurde in den Versuchen der

Düngeoptimierung um 25 bzw. 50 % vermindert bzw. erhöht um die Abstufung SW-50 % bis SW+50 % zu erreichen. Die jeweils konkret gedüngten N-Mengen finden sich bei in den Ergebnissen der einzelnen Fruchtarten.

Ziel der Düngungsoptimierung ist nicht der biologische Höchstertag, sondern der ökonomische Maximalertrag, d.h. der Ertrag, der um die Düngekosten bereinigt den höchsten Erlös erzielt.

Die Qualitätsanalysen erfolgten nach den gleichen Methoden wie in Kapitel 2.4 Datenerfassung Ernte dargestellt.

Die statistische Auswertung der N-Steigerungsversuche erfolgte mit dem Programmpaket IBM SPSS Statistics Version 21 und der Prozedur ANOVA. Die Berechnung der Grenzdifferenzen erfolgte nach SCHUSTER & LOCHOW 1979. Die entsprechenden Varianztabellen sind im Anhang zu finden. Im Folgenden werden jeweils die Wechselwirkungen Ort * Betrieb * Düngung * Jahr bzw. Ort * Betrieb * Düngung grafisch dargestellt und im Text weitere relevante Aspekte erläutert.

3.3 N-Düngungsversuche

3.3.1 N-Düngungsversuche Wintergerste

Die N-Steigerungsversuche in der W-Gerste wurden 2015 und 2016 an beiden Standorten im O-Betrieb und V-Betrieb angelegt. In Braunschweig musste in 2014 auf die Anlage eines Exaktversuches in Wintergerste im Veredelungsbetrieb verzichtet werden. Grund ist der notwendige Flächenbedarf für den aufwändiger gestalteten Exaktversuch im nachfolgenden Mais, der keinen Raum für Versuche in der Vorfrucht ließ. Deshalb sind in den Abbildungen abweichende Grenzdifferenzen angegeben. Im O-Betrieb wurde die Gerste nach Ackerbohnen in Direktsaat etabliert, während sie im V-Betrieb nach Pflugeinsatz auf einen W-Weizen folgte. Der erwarteten höheren N-Nachlieferung der Ackerbohnen wird bei der Anwendung des Sollwertverfahrens Rechnung getragen.

Die Höhe der in den einzelnen Jahren und Betriebssystemen gedüngten N-Mengen zeigt die Tabelle 11.

Tabelle 11: Höhe der ausgebrachten N-Mengen (kg/ha N) in den Düngeversuchen zu Wintergerste an den Standorten Soest und Braunschweig 2014 - 2016 (Anrechnung des N-Gehaltes im Gärrest zu 70 %)

			2014	2015	2016	Mittel
Soest	optimierter Betrieb (AB)	SW-50 %	80	52	57	63
		SW-25 %	111	92	97	100
		SW	144	132	137	138
		SW+25 %	174	172	187	178
		SW+50 %	205	212	217	211
	Veredelungsbetrieb (WW)	SW-50 %	68	93	82	81
		SW-25 %	102	140	127	123
		SW	136	185	172	164
		SW+25 %	170	230	217	206
		SW+50 %	204	275	262	247
Braunschweig	optimierter Betrieb (AB)	SW-50 %	52	71	60	61
		SW-25 %	90	113	105	103
		SW	126	158	150	145
		SW+25 %	165	203	195	188
		SW+50 %	202	248	240	230
	Veredelungsbetrieb (WW)	SW-50 %	*	96	88	92
		SW-25 %	*	143	138	140
		SW	*	193	188	190
		SW+25 %	*	243	238	240
		SW+50 %	*	293	288	290

* kein Versuch

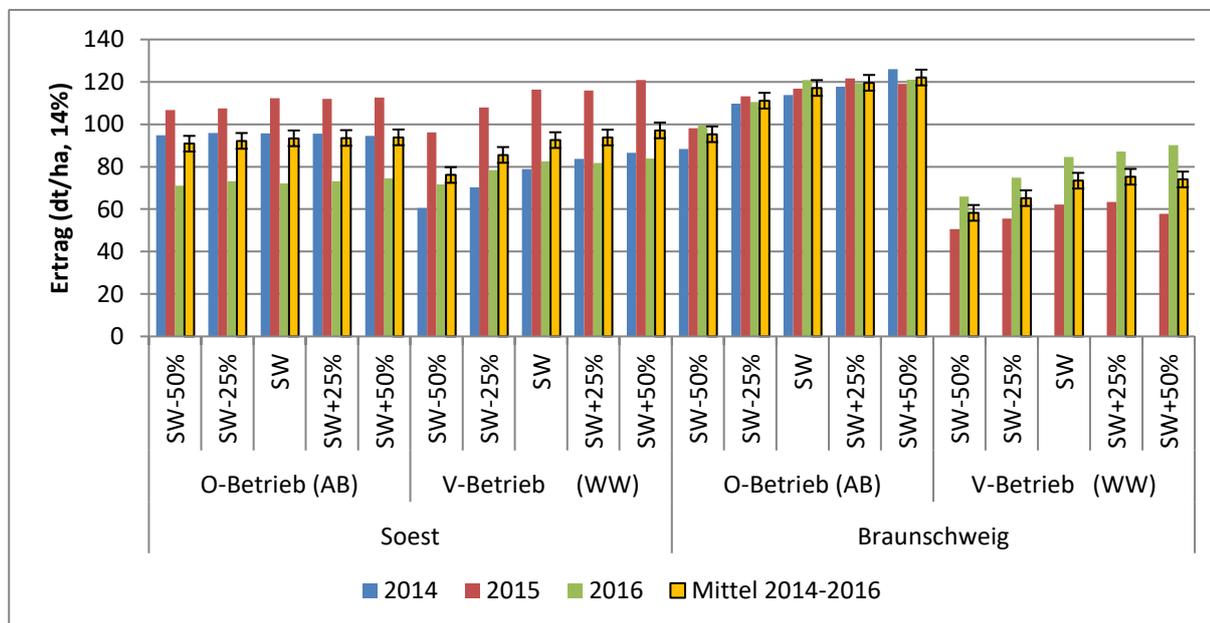


Abbildung 32: Kornenertrag von Wintergerste in verschiedenen Betriebssystemen an den Standorten Braunschweig (BS) und Soest (SO) in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 - 2016 (Vorfrucht in ()) (GD5 % O*B*N = 3,7 dt/ha (BS,V-B.=4,6 dt/ha), GD5)

In Soest weisen die Gerstenerträge nach Ackerbohnen in beiden Betriebssystemen erhebliche Ertragsschwankungen zwischen den Jahren auf. Vor allem das Jahr 2016 mit nur 73,8 dt/ha im Mittel der

Düngungsstufen fällt hier auf und deckt sich mit Berichten aus der landwirtschaftlichen Praxis in der Soester Börde. Die niedrigen TKM (Abbildung 128) und Hektolitergewichte (Abbildung 129) sowie die sehr hohen N-Gehalte im Korn (Abbildung 34) bei Düngung nach Sollwert deuten auf Störungen in der Kornfüllungsphase als Ursache für die geringen Erträge im Jahr 2016 hin. Die Zahl der gebildeten Ähren/m² (Abbildung 33) scheidet als Erklärungsansatz aus. Auch die Krankheitsbonituren weisen keine Auffälligkeiten aus.

Unabhängig von diesem Ertragseinbruch 2016 können im Mittel der Jahre durch eine N-Düngung über dem Sollwert + 50 % keine Mehrerträge erreicht werden, durch die Nachlieferung aus der Vorfrucht Ackerbohnen wird bereits bei stark reduzierter N-Düngung ein ausreichendes N-Angebot sichergestellt.

Im Veredelungsbetrieb nach der Vorfrucht Winterweizen sind durch eine Düngung über den Sollwert hinaus nur noch bei einer Steigerung der N-Düngung auf einen um 50 % erhöhten Sollwert (+83 kg/ha N) gesicherte Ertragssteigerungen bei der Wintergerste (+4,5 dt/ha) möglich. Dieser Mehraufwand ist allerdings aufgrund der N-Düngerkosten unwirtschaftlich.

In Braunschweig zeichnen sich die Erträge der Wintergerste im optimierten Betrieb nach Ackerbohnen durch eine hohe Ertragsstabilität in den drei Versuchsjahren aus. Mit der Düngung auf den N-Sollwert werden im Mittel der drei Jahre gegenüber der reduzierten Düngung signifikante Mehrerträge erreicht, eine weitere Erhöhung des Sollwertes um 25 % bringt keine signifikanten Ertragsvorteile, die Steigerung der N-Düngung um weitere 25 % (+86 kg/ha N) erhöht den Ertrag gegenüber dem Sollwert signifikant (+5,0 dt/ha), ist aber aufgrund der Düngerkosten unwirtschaftlich.

Die im Veredelungsbetrieb nach Winterweizen angebaute Wintergerste liegt in Braunschweig deutlich unter dem Niveau nach Ackerbohnen. Die Differenz von fast 50 dt/ha legt nahe, dass hier auch nicht systembedingte Einflussfaktoren eine Rolle spielen. Eine niedrige Tausendkornmasse und Hektolitergewicht deuten auf Störungen in der Kornfüllung hin. Durch eine Düngung über den Sollwert hinaus wird im Mittel der Jahre kein gesicherter Mehrertrag erreicht.

Die Qualitätsparameter sind in Abbildung 128 bis Abbildung 131 im Anhang dargestellt. Die Tausendkornmasse lässt bei Betrachtung über die Jahre und Standorte keinen klaren Trend erkennen. Die Tausendkornmasse zeigt im Mittel der Jahre nach Ackerbohnen keine (BS) bzw. nur eine geringe (SO) Reaktion auf die Steigerung der Düngeintensität. Auch nach Winterweizen ist bei Betrachtung der Einzeljahre keine klare Tendenz zu erkennen.

Das Hektolitergewicht (HLG) ist bei Gerste ein wichtiges Vermarktungskriterium, im Minimum werden 62 kg gefordert. In Soest ist nach Ackerbohnen 2014 und 2015 kein Effekt der N-Düngung auf das HLG feststellbar, 2016 ist das HLG sehr niedrig und nimmt mit zunehmender N-Düngung weiter ab. Nach Winterweizen im Veredelungsbetrieb nimmt 2014 das HLG mit der Steigerung der Düngung zu, 2015 ist es unbeeinflusst und 2016 nimmt es ab einer Düngung nach Sollwert tendenziell ab. Im Mittel der Jahre ist eine Düngung nach Sollwert am besten zu bewerten.

In Braunschweig steigt das HLG im Veredelungsbetrieb im Mittel der Jahre bis zur Düngung nach Sollwert - 25 % an und bleibt bei einer weiteren Steigerung der N-Düngung gleich. Im Optimierten Betrieb sind nach Ackerbohnen Wechselwirkungen mit dem Jahreseinfluss feststellbar. 2014 nimmt das HLG mit der Düngung zu, während 2015 nur ein Anstieg von der stark reduzierten Düngung zur reduzierten Düngung feststellbar ist, zeigt sich 2016 das HLG von der N-Düngung unbeeinflusst.

Bei der Betrachtung der Abbildung 33 wird deutlich, dass an beiden Standorten die Anzahl Ähren/m² durch die N-Düngung signifikant positiv beeinflusst wird. Gleichzeitig kann für beide Standorte festgehalten werden, dass im optimierten Klimabetrieb nach Ackerbohnen eine signifikant höhere Anzahl Ähren/m² vorhanden ist als im Veredelungsbetrieb nach Winterweizen. Höhere Wechselwirkungen sind nicht gesichert.

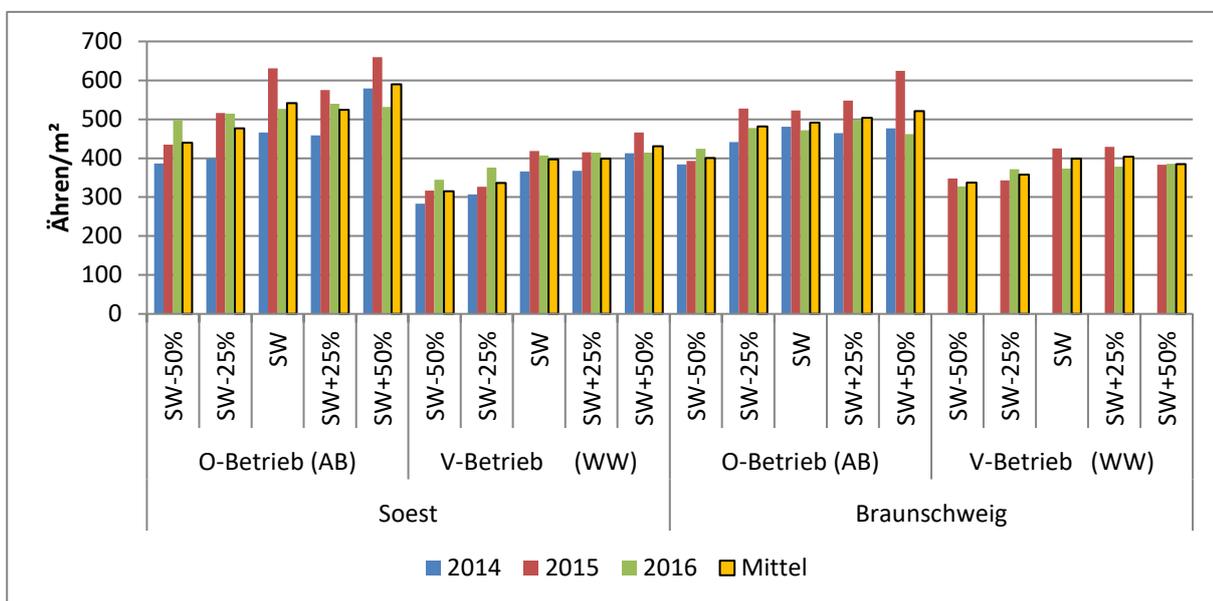


Abbildung 33: Anzahl Ähren/m² von Wintergerste in verschiedenen Betriebssystemen (O; V) (Vorfrucht in ()) an den Standorten Braunschweig (BS) und Soest (SO) in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 und 2015 (GD 5 % O*B*N =n.s., GD 5 % O*B*N*J =n.s.)

Eine gesicherte Zunahme der N-Gehalte im Korn mit steigender N-Düngungsmenge ist an beiden Standorten und Betriebssystemen in der Wechselwirkung N-Düngung*Betriebssystem (GD5 % = 0,03%) feststellbar. In Soest ist ein deutlich höherer N-Gehalt nach der Vorfrucht Ackerbohnen gegenüber der Vorfrucht Winterweizen erkennbar. In Braunschweig sind durch den Verdünnungseffekt der hohen Erträge nach Ackerbohnen die Verhältnisse umgekehrt. Höhere Wechselwirkungen sind nicht gesichert (Abbildung 34).

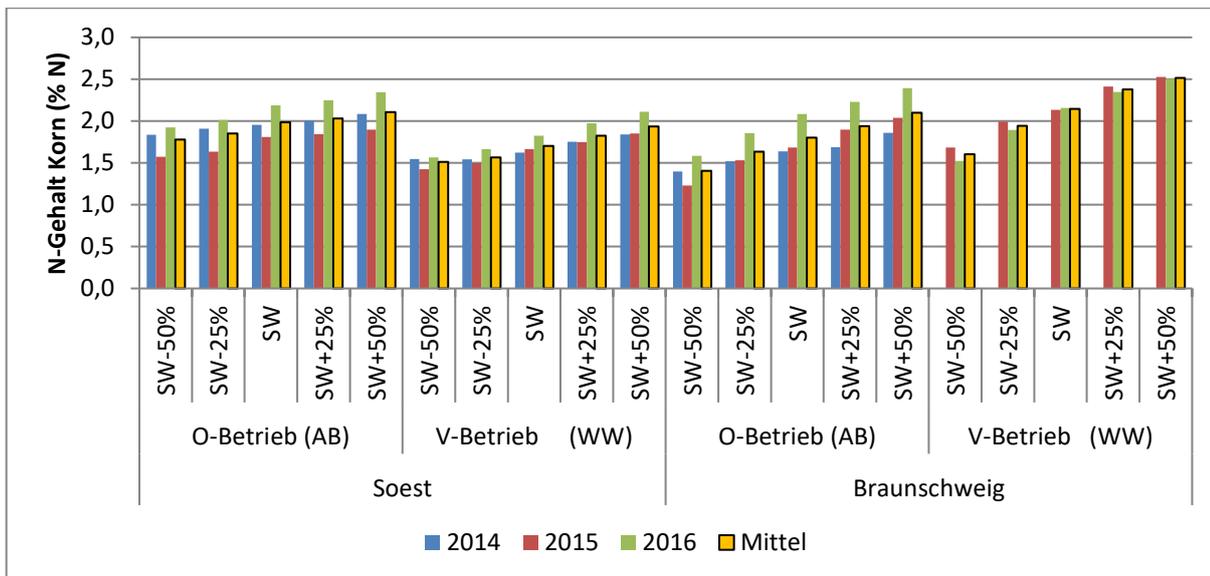


Abbildung 34: N-Gehalte im Korn in der Wintergerste an den Standorten Soest und Braunschweig in den Jahren 2014-2016 in Abhängigkeit vom Betriebssystem (Vorfrucht) und N-Düngung (GD 5 % O*B*N= n.s.; GD 5 % O*B*N*J= n.s.)

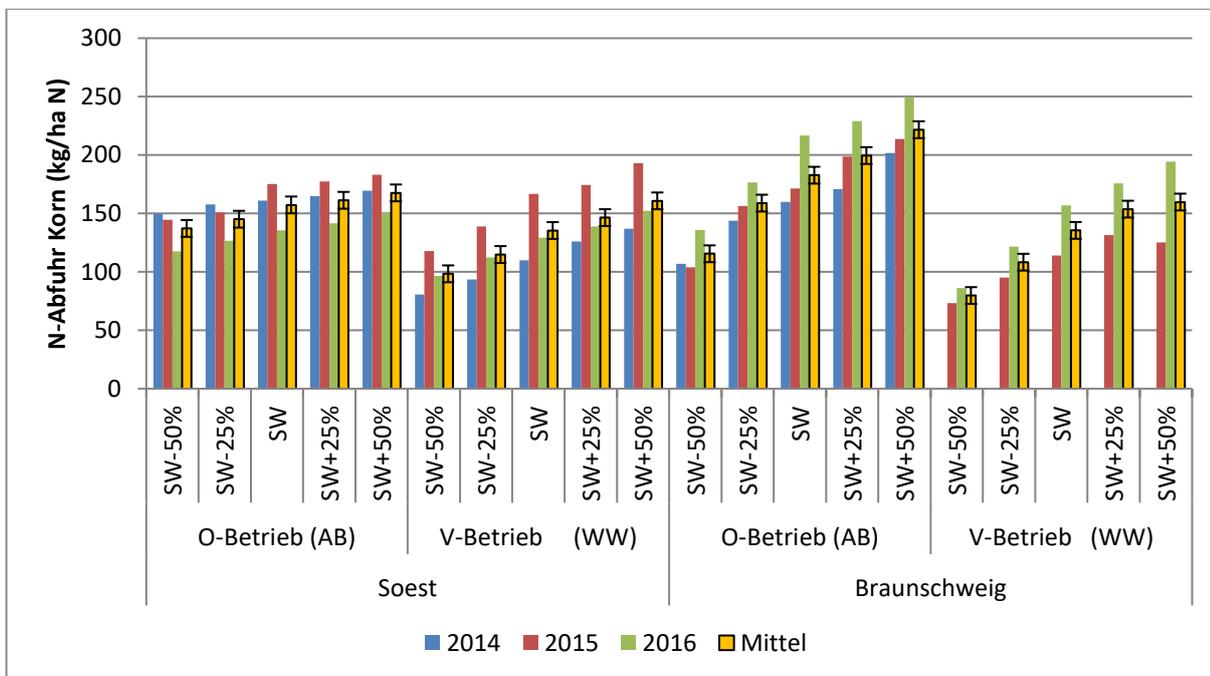


Abbildung 35: Errechnete N-Abfuhr in der Wintergerste an den Standorten Soest und Braunschweig in den Jahren 2014-2016 in Abhängigkeit vom Betriebssystem und N-Düngung (GD5 % O*B*N=7,2 kg/ha N (BS,V-B.=8,8 kg/ha N), GD5 % O*B*N*J= 12,5 kg/ha N)

Die N-Abfuhr mit der Gerstenernte nimmt auf allen Standorten und Vorfrüchten mit der N-Düngung zu. An beiden Standorten werden die höheren N-Entzüge im optimierten Betrieb festgestellt. Als Differenz zwischen den gedüngten N-Mengen und den Entzügen wird der N-Bilanzsaldo berechnet.

An beiden Standorten ist im Optimalen Betrieb bei der Vorfrucht Ackerbohnen bei einer N-Düngung nach Sollwert und geringer der N-Bilanzsaldo negativ, d.h. der N-Entzug ist höher als die Düngung. Erst bei einer Düngung deutlich über Sollwert übersteigt die Düngung den Entzug. Selbst bei einem um 50 % erhöhten

Sollwert bleibt die N-Bilanz im optimierten Betrieb nach der Vorfrucht Ackerbohnen im Mittel der Jahre an beiden Standorten noch unter 55 kg/ha N.

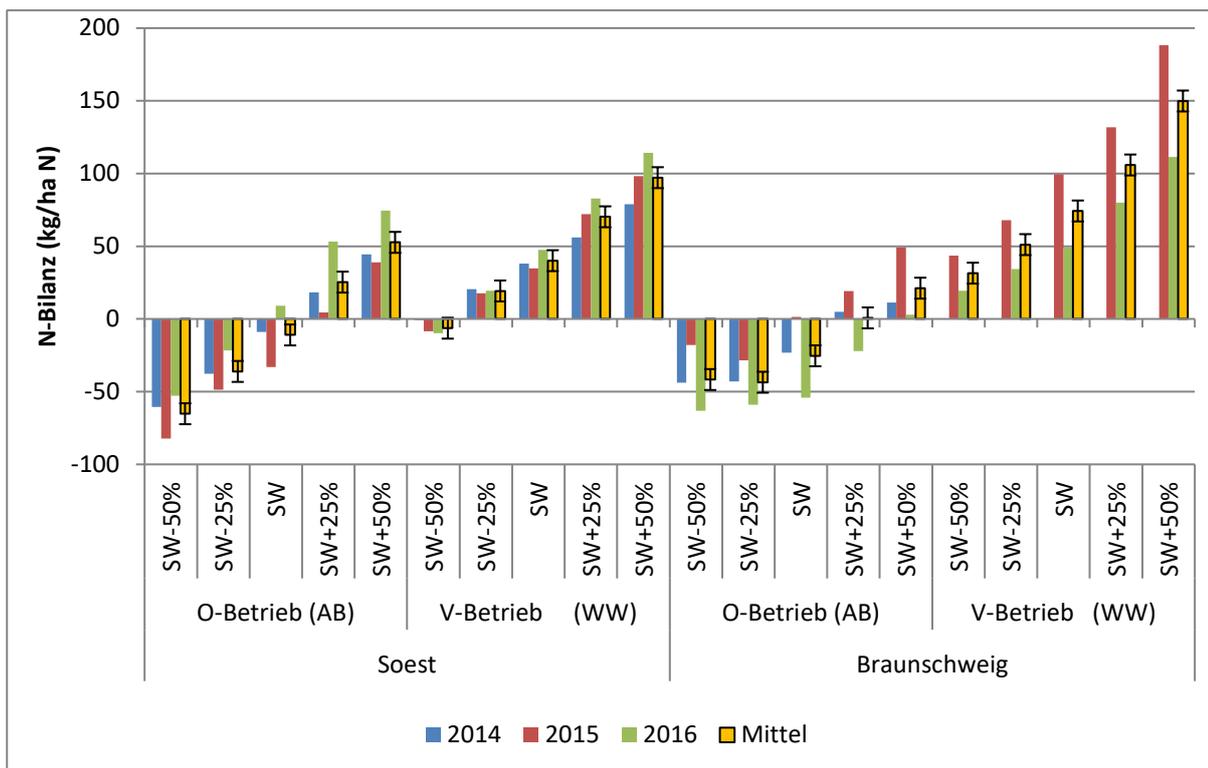


Abbildung 36: N-Bilanz (kg/ha N) in der Wintergerste an den Standorten Soest und Braunschweig in den Jahren 2014-2016 in Abhängigkeit vom Betriebssystem (Vorfrucht) und N-Düngung (GD5 % O*B*N = 7,2 kg/ha N (BS V-Betrieb = 8,8 kg/ha N), GD5 % J*O*B*N = 12,5 kg/ha N)

Etwas differenzierter ist die Bilanz beim Veredelungsbetrieb zu sehen. Hier steht die Wintergerste nach der Vorfrucht Winterweizen. Aufgrund des insgesamt höheren N-Düngungsniveaus werden in Soest nur beim Sollwert – 50 % negative N-Bilanzen ermittelt. Bei einer Düngung mit einem um 25 % verminderten Sollwert und einer Düngung nach Sollwert bleibt die N-Bilanz unter 50 kg/ha N. Alle Düngevarianten über Sollwert überschreiten diesen Wert.

Die aufgrund der Standorteigenschaften erhöhten N-Sollwerte führen in Braunschweig im Veredelungsbetrieb vor allem in Verbindung mit den sehr geringen Erträgen 2015 dazu, dass in jeder geprüften N-Sollwertstufe positive N-Salden gefunden werden. Bereits bei der Düngung nach Sollwert wird aufgrund der geringen Erträge 2015 im Mittel der beiden Prüffahre mit 75 kg/ha ein großer N-Bilanzüberschuss erzielt. Dieser steigt bei einer weiteren Steigerung der N-Düngeintensität auf 100 – 150 kg/ha N. Da auf der Großfläche von 2011-2014 für die Düngung auf den Sollwert ein N-Bilanzsaldo von +27 kg/ha N ermittelt wird, kann im Mittel der sechs Jahre ein noch akzeptabler positiver N-Saldo von 43 kg/ha N bei Sollwertdüngung unterstellt werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass bei Wintergerste nach Winterweizen im Mittel mehrerer Jahre mit einer Düngung nach der N_{min} -Sollwert-Methode weder bei den Erträgen und der Qualität noch bei den N-

Bilanzüberschüssen Probleme zu erwarten sind. Nach einer günstigen Vorfrucht wie Ackerbohnen können auf Standorten mit guter Nachlieferung wie in Soest höhere Abschläge vom Sollwert ohne Ertragsrisiko bei negativen N-Bilanzen vorgenommen werden. Auf anderen Standorten sollte das N-Sollwertverfahren unverändert angewendet werden. Auf allen Standorten sind aber bei Anwendung des N-Sollwertverfahrens die N-Bilanzen ausgeglichen.

Ergänzend wurden in den Parzellen des Kleinparzellenversuchs zum Vegetationsende 2014 in Braunschweig und 2015 in Soest und Braunschweig die Rest-N_{min}-Gehalte im Boden unter dem nach der Wintergerste folgenden Grünroggen bestimmt. Während in Braunschweig in Herbst 2014 keine Abstufung des Restnitrats in Abhängigkeit der N-Düngung feststellbar war, stieg im Herbst 2015 der Nitratgehalt von der stark reduzierten N-Düngung (SW-50 %) um rund 45 kg nach Ackerbohnen im O-Betrieb von 57 auf 101 kg/ha N nach der N-Düngung Sollwert + 50 % an (Abbildung 37). Nach Winterweizen im V-Betrieb war der Anstieg von 41 (N1) bis 66 kg/ha N (N5) wesentlich geringer, obwohl die Erträge 2015 nur sehr gering waren und ein Düngungsunterschied zwischen N1 und N5 von fast 200 kg/ha N bestand.

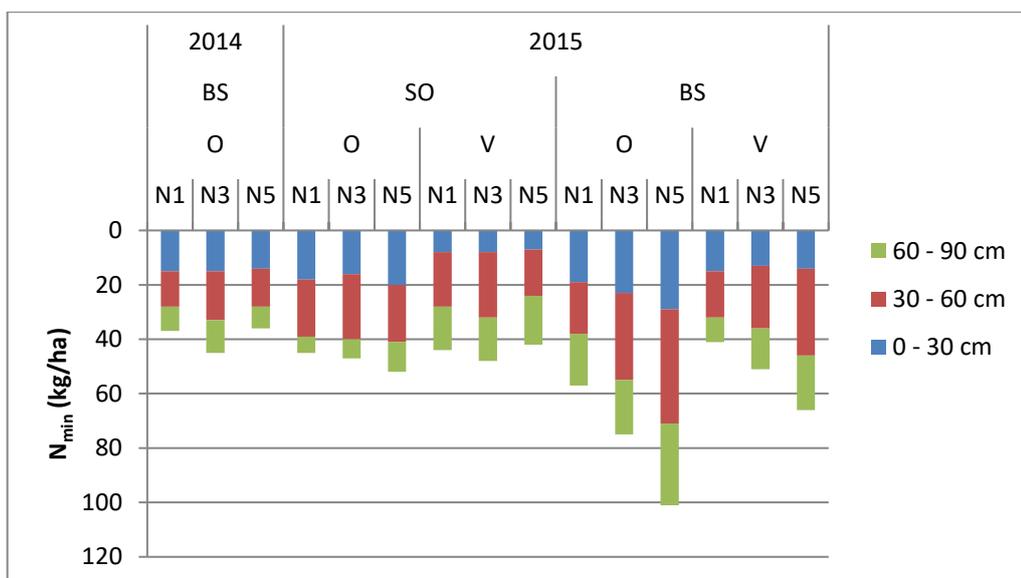


Abbildung 37: N_{min}-Werte zu Vegetationsende 2014 und 2015 nach Wintergerste in Soest und Braunschweig in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung (O=O-Betrieb, V=V-Betrieb, N1=SW-50 %, N3=SW, N5=SW+50 %)

In Soest sind im Herbst 2015 die Restnitratgehalte kaum durch die N-Düngung beeinflusst und liegen unabhängig von der Vorfrucht bei 40-50 kg/ha N.

3.3.2 N-Düngungsversuche Winterweizen

Die N-Düngungsversuche im W-Weizen wurden an beiden Standorten im Optimalen Betrieb und im M-Betrieb angelegt und stehen in beiden Betriebssystemen nach der Vorfrucht W-Raps. Im M-Betrieb erfolgte die Bestellung in Mulchsaat und die Düngung mineralisch, während der Weizen im O-Betrieb in Direktsaat etabliert wurde und die Düngung zur 1. Gabe im Frühjahr einheitlich mit Gärrest erfolgte und die Folgebaben gestaffelt mineralisch aufgedüngt wurden.

Tabelle 12: Höhe der N-Düngung (kg/ha N) (N im Gärrest zu 70 % angerechnet) zu Winterweizen nach Winterraps im O-Betrieb und im M-Betrieb an den Standorten Braunschweig und Soest in den Jahren 2014 bis 2016

			2014	2015	2016	Mittel
Soest	O-Betrieb (organisch- mineralische Düngung, Direktsaat)	SW-50 %	86	71	68	75
		SW-25 %	121	102	117	113
		SW	156	152	167	158
		SW+25 %	191	202	217	203
		SW+50 %	226	252	267	248
	M-Betrieb (Mineralische Düngung, Mulchsaat)	SW-50 %	60	48	62	57
		SW-25 %	103	101	115	106
		SW	145	153	167	155
		SW+25 %	188	206	220	205
		SW+50 %	230	258	272	253
Braunschweig	O-Betrieb (organisch- mineralische Düngung, Direktsaat)	SW-50 %	65	66	83	71
		SW-25 %	110	120	138	123
		SW	156	175	193	175
		SW+25 %	198	230	248	225
		SW+50 %	247	285	303	278
	M-Betrieb (Mineralische Düngung, Mulchsaat)	SW-50 %	89	62	64	72
		SW-25 %	134	115	117	122
		SW	180	167	169	172
		SW+25 %	222	220	222	221
		SW+50 %	267	272	274	271

In Soest ist die N-Düngewirkung in beiden Betriebssystemen deutlich geringer als in Braunschweig. Im Optimierten Betrieb kann 2014 gar kein, im Jahr 2015 kann ein signifikanter Unterschied nur zwischen den Düngevarianten SW-25 und SW+50 % ermittelt werden. Nur 2016 steigt der insgesamt geringe Weizenertrag mit der Düngung an und erreicht mit der Düngung nach SW+50 % den Höchstertrag. Dieser unterscheidet sich von der Düngung SW+25 % nicht gesichert, wohl aber von allen anderen. Im Mittel der drei Versuchsjahre unterscheidet sich die Düngung nach Sollwert (90,8 dt/ha) nicht von der Düngung SW-25 % (89,6 dt/ha) und nur knapp von der Düngung SW+25 % (94,1 dt/ha) und SW+50 % (94,7 dt/ha). Diese geringen Mehrerträge von 3,3 bzw. 3,9 dt/ha wurden mit einem unwirtschaftlichen N-Düngeraufwand von 45 bzw. 90 kg/ha N erreicht.

Im Marktfruchtbetrieb kann 2014 nur ein signifikanter Unterschied von der Düngevariante SW-50 % zu den Stufen SW-25 % und SW+50 % gefunden werden, die anderen Stufen unterscheiden sich nicht. 2015 ist eine deutliche Dünge Wirkung zwischen der Düngung nach Sollwert und den Dünge stufen SW-50 % und SW+50 % feststellbar, nicht aber zu den Sollwertstufen -25 % und +25 %. 2016 ist wieder nur eine geringe Dünge Wirkung erkennbar. Die Düngung nach Sollwert unterscheidet sich nicht von den Varianten SW-25 % bis SW+50 %, die Dünge stufe SW-50 % erreicht nur gesichert niedrigere Erträge. Im Mittel der drei Versuchsjahre wird zwar der höchste Ertrag mit der Dünge stufe SW+50 % erreicht, dieser Mehrertrag (4,4

dt/ha) ist gegenüber der Düngung nach Sollwert gesichert höher, wird aber mit einem um fast 100 kg/ha höheren N-Dünger Aufwand erzielt und ist damit unwirtschaftlich.

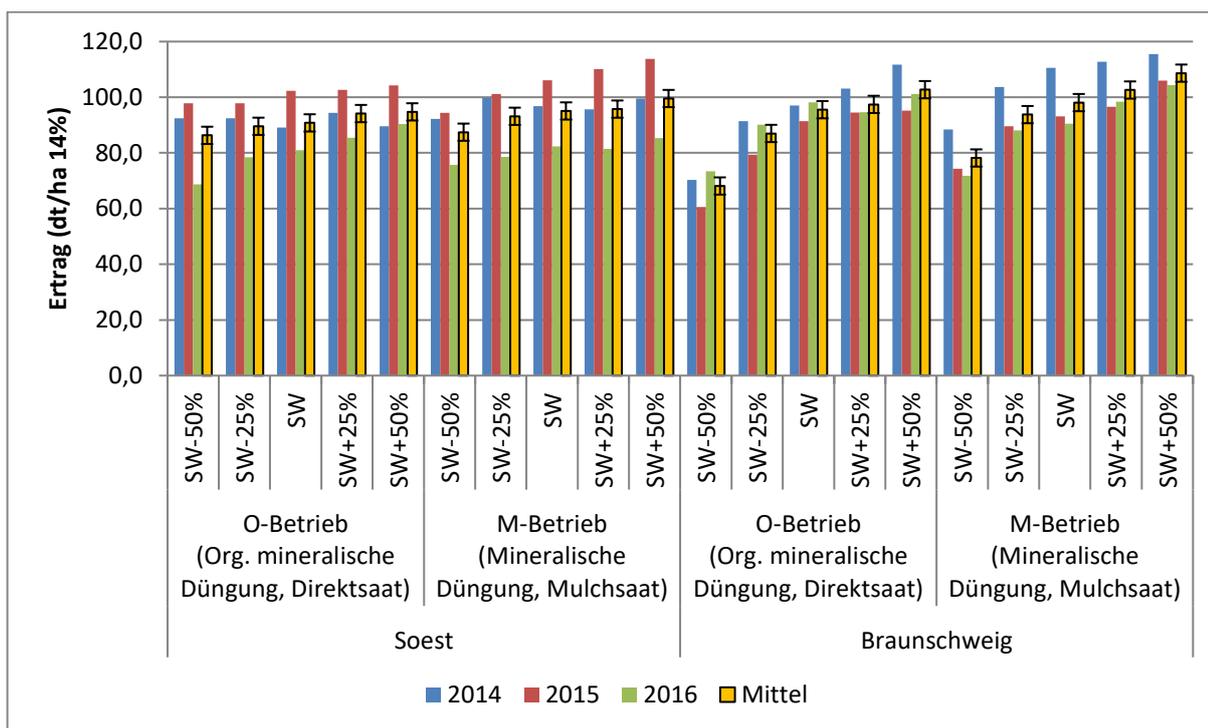


Abbildung 38: Kornertrag (dt/ha) von Winterweizen an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5 % O*B*N = 3,1 dt/ha, GD 5 % J*O*B*N = 5,3 dt/ha)

In Braunschweig sind die Ertragsschwankungen zwischen den drei Versuchsjahren geringer als in Soest. Im O-Betrieb steigen die Erträge in jedem Jahr bis zur Düngung nach Sollwert an, bei einer Steigerung darüber hinaus werden nur 2014 gesichert höhere Erträge bis zur Stufe SW+50 % festgestellt. Diese deutliche Düngewirkung 2014 wirkt sich auch im Mittel der drei Jahre aus, gegenüber der Düngung nach Sollwert werden mit der Düngung SW+50 % mit einem zusätzlichen Düngaufwand von 102 kg/ha N noch 7,2 dt/ha höhere Erträge erzielt, dieser Mehraufwand ist allerdings an der Grenze der Wirtschaftlichkeit.

Im Marktfruchtbetrieb steigen die Erträge mit der Steigerung der Düngintensität kontinuierlich an. Alle Düngestufen unterscheiden sich im Mittel der Versuchsjahre signifikant voneinander. Der Mehrertrag von der Düngestufe SW zu den Stufen SW+25 % und SW+50 % ist mit +4,5 bzw. +10,6 dt/ha und einem N-Aufwand von 50 bzw. 100 kg/ha N noch wirtschaftlich.

Bei der Betrachtung der Qualitätsparameter TKM und HI-Gewicht (Abbildung 130 & Abbildung 131) wird nicht mehr auf die Einzeljahre eingegangen, sondern auf die ebenfalls signifikante Wechselwirkung Standort*Betriebssystem*N-Düngung, dies erlaubt die jahresunabhängige Verallgemeinerung der Ergebnisse für den Standort und das Betriebssystem.

Die Tausendkornmasse (TKM) steigt von der niedrigsten Dünge­stufe bis zum Sollwert -25 % bzw. zur Sollwertdüngung deutlich an, eine weitere Steigerung der N-Dünge­intensität erhöht die TKM nur noch geringfügig und ist meist nicht signifikant.

Das Hektolitergewicht (HLG) erreicht an beiden Standorten mit einer Düngung nach Sollwert den vom Handel abschlagsfrei geforderten Sollwert für Futterweizen von 72 kg. Eine Düngung darüber hinaus verbessert das HLG nicht.

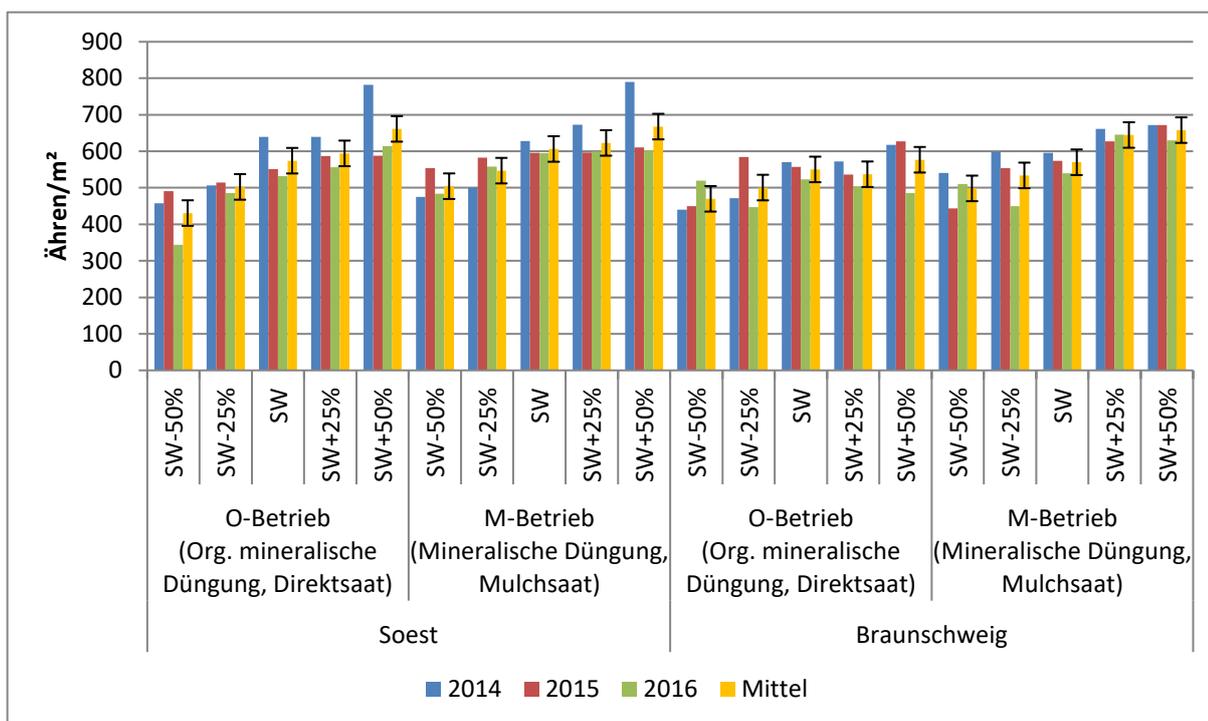


Abbildung 39: Zahl der Ähren/m² von Winterweizen an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5 % O*B*N = 35 Ähren/m², GD 5 % J*O*B*N = 60 Ähren/m²)

Die Bestandesdichte steigt erwartungsgemäß mit der Steigerung der N-Düngung an. Die Zunahme ist in Soest im Mittel der drei Versuchsjahre auch von der Stufe SW+25 % zu SW+50 % gesichert. In Braunschweig ist der Anstieg im Marktfruchtbetrieb nur von der Sollwertdüngung zur Düngungsstufe SW+25 % gesichert.

Der N-Gehalt im Korn steigt ebenfalls mit dem N-Angebot an. In Soest ist der Anstieg des Korn-N-Gehaltes in beiden Betriebssystemen von der Sollwertdüngung zur Düngung SW+50 % gesichert, nicht aber zur Düngung SW+25 %. In Braunschweig erfolgt der Anstieg im optimierten Klimabetrieb bis zum SW+25 %, der weitere Anstieg beim SW+50 % ist nicht mehr gesichert. Im Braunschweiger Marktfruchtbetrieb sind alle Dünge­stufen signifikant unterschiedlich.

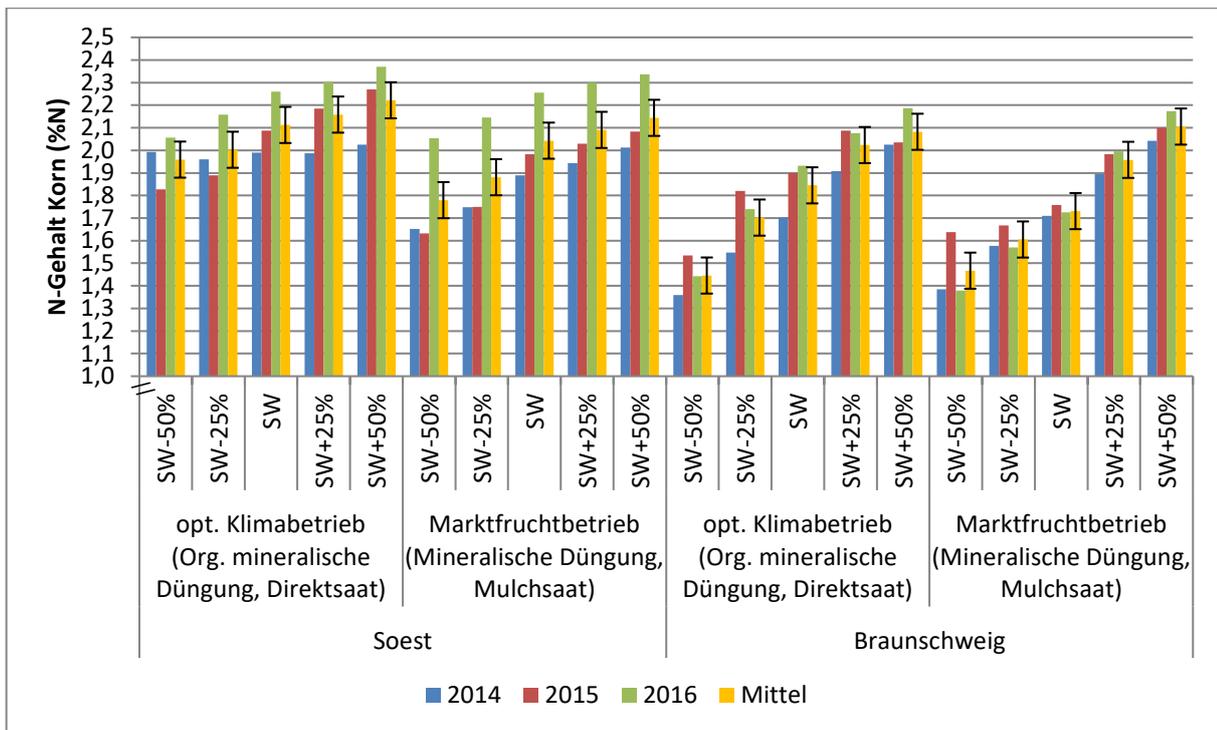


Abbildung 40: N-Gehalt im Korn von Winterweizen an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5 % O*B*N = 0,08 %, GD 5 % J*O*B*N = n.s.)

Anhand der Erträge und N-Gehalte im Korn kann die Abfuhr berechnet werden. Entsprechend der höheren N-Gehalte im Korn und der mit der Düngung leicht steigenden Erträge steigen die Entzüge ebenfalls mit der Düngung an.

Die N-Bilanzsalden als Differenz zwischen gedüngtem und entzogenem Stickstoff zeigen am Standort Soest bei beiden Betriebssystemen bei den Düngestufen SW-25 % und SW-50 % einen negativen N-Bilanzsaldo. Die Düngung nach Sollwert weist eine ausgeglichene Bilanz und die Düngestufen über dem Sollwert weisen einen positiven N-Bilanzsaldo auf. Der Bilanzsaldo liegt im Bereich zwischen SW-25 % und SW+25 % in einem akzeptablen Rahmen von +/- 50 kg/ha N.

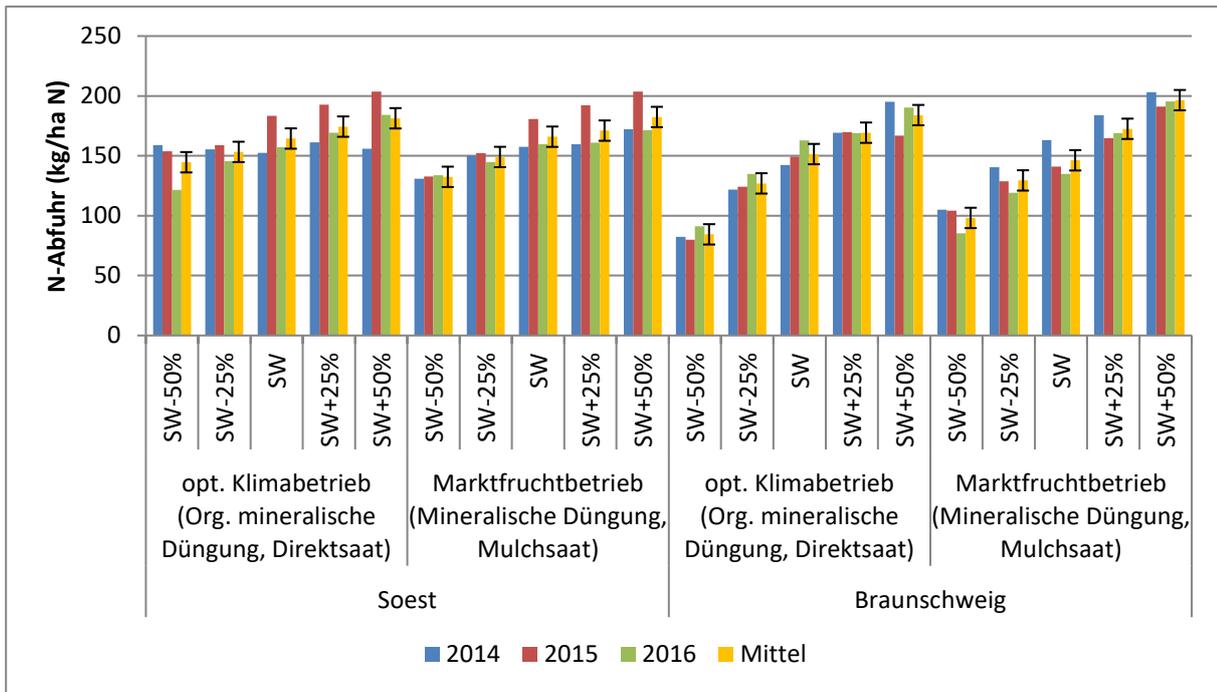


Abbildung 41: N-Entzug mit dem Korn von Winterweizen an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5 % O*B*N = 8,5 kg/ha N, GD 5 % J*O*B*N = 14,7 kg/ha N)

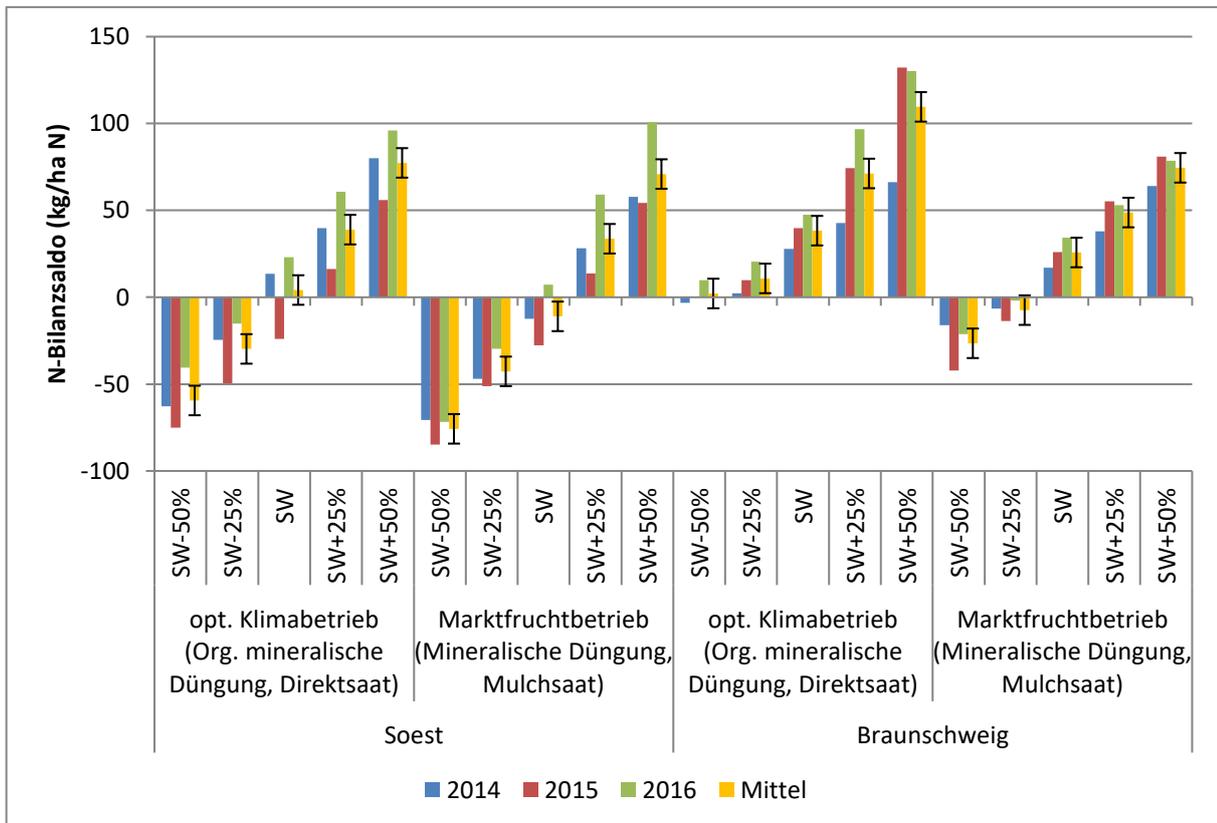


Abbildung 42: N-Bilanz von Winterweizen (org. N im Gärrest zu 85 % angerechnet) an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5 % O*B*N = 8,5 kg/ha N, GD 5 % J*O*B*N = 14,7 kg/ha N)

In Braunschweig sind die Bilanzsalden in den gegenüber der Düngung nach Sollwert abgesenkten Düngestufen ausgeglichen bzw. schwach negativ, bereits die Düngung nach Sollwert weist einen akzeptablen schwach positiven Bilanzsaldo auf, die Düngestufen SW+25 % und SW+50 % erreichen bzw. überschreiten die 50 kg/ha N Marke teilweise sehr deutlich. Die geringen Differenzen im N-Bilanzsaldo von ca. 10-15 kg/ha zwischen der rein mineralischen Düngung und der organisch-mineralischen Düngung mit der teilweisen Anrechnung des im Gärrest enthaltenen N zeigt, dass die Annahme eines Mineraldüngeräquivalents von 70 % im Anwendungsjahr richtig ist. Der Nachlieferung in den Folgejahren wird über die Abschläge bei der Ermittlung des Sollwertes bei der Düngeberechnung sowie die Erhöhung der Anrechenbarkeit auf 85 % des N-Gehalt im Gärrest bei der Bilanzierung Rechnung getragen.

Unter Berücksichtigung der um die Düngekosten bereinigten Erträge und Qualitäten sowie der N-Bilanzsalden führt an beiden Standorten und in beiden Betriebssystemen die Düngung nach der Sollwertmethode zum besten Ergebnis. Eine Steigerung der N-Düngung über den Sollwert hinaus verbessert die Erträge nur unwesentlich und belastet die N-Bilanzsalden.

Um die Wirksamkeit von Strategien zur Absenkung hoher Nitratmengen im Herbst zu prüfen wurden die Restnitratgehalte nach dem Winterweizen zu Vegetationsende im O-Betrieb unter der Grasuntersaat (SO) bzw. Zwischenfrucht (BS) und im M-Betrieb im Stoppelweizen gemessen. In beiden Jahren wird die N-Aufnahme durch die gezielte Begrünung im O-Betrieb deutlich, die die Nitratgehalte auf unbedenkliche Werte absenkt und die N-Düngungssteigerung in Soest kaum mehr erkennen lässt. Ohne Begrünung sind unter dem noch wenig entwickelten Weizen die Nitratgehalte deutlich höher und lassen 2015 in Braunschweig die N-Düngungsstufen deutlich erkennen, die in N5 inakzeptabel hoch sind.

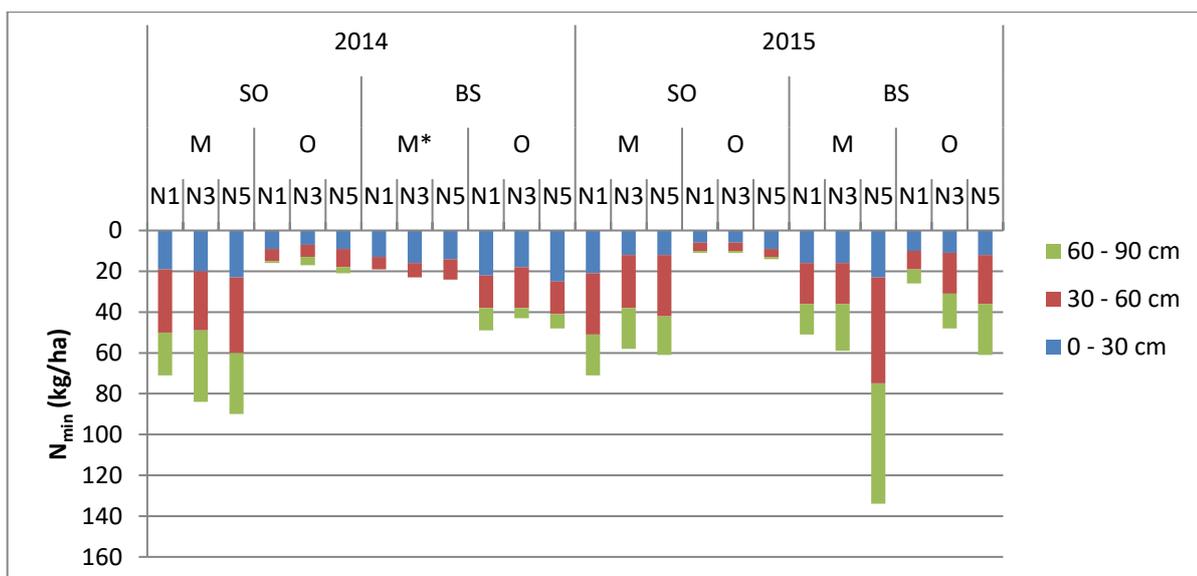


Abbildung 43: N_{min} -Werte zu Vegetationsende 2014 und 2015 nach Winterweizen in Soest und Braunschweig in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung (* Proben waren nicht valide und mussten zu einem späteren Zeitpunkt nachanalysiert werden; Probennahme zur zweiten Beprobung nur 0-60 cm) (O=O-Betrieb, M=M-Betrieb, N1=SW-50 %, N3=SW, N5=SW+50 %)

3.3.3 N-Düngungsversuche Winterraps

Sowohl in Soest als auch in Braunschweig wurden die N-Düngungsversuche im W-Raps im Optimierten Betrieb und im Marktfruchtbetrieb angelegt. Während in Soest im optimierten Betrieb eine Direktsaat nach Roggen-GPS und folgender „N-Fix“-Zwischenfruchtmischung stattfand, wurde in Braunschweig nach Roggen-GPS keine Zwischenfrucht etabliert. Im Marktfruchtbetrieb wurde auf beiden Standorten zur Rapsbestellung nach W-Weizen gepflügt.

Im Herbst und Winter 2015/16 wurde in Soest der Rapsbestand des Düngeversuchs im optimierten Klimabetrieb durch Mäusefraß so stark geschädigt, dass der Versuch aufgegeben werden musste. Eine Alternativfläche stand nicht zur Verfügung. Die gedüngten N-Mengen zeigt Tabelle 13, dabei wurden die N-Gehalte der organischen Dünger bei der Berechnung der Düngegaben zu 70 % angerechnet. Zur Berechnung des N-Bilanzsaldos wurden diese zu 85 % angerechnet.

Tabelle 13: N-Düngung (kg/ha N) von Winterraps im O-Betrieb und M-Betrieb an den Standorten Soest und Braunschweig (Anrechnung N-Gehalt org. Dünger zu 70 %)

			2014	2015	2016	Mittel
Soest	O-Betrieb (Org. mineral. Düngung, Direktsaat, Vorfrucht Roggen- GPS und Zwischenfrucht)	SW-50 %	117	128	*	123
		SW-25 %	165	186	*	176
		SW	213	243	*	228
		SW+25 %	260	301	*	281
		SW+50 %	308	359	*	334
	M-Betrieb (Mineralische Düngung, Pflugsaat, Vorfrucht Winterweizen)	SW-50 %	127	113	120	120
		SW-25 %	180	173	180	178
		SW	234	233	240	236
		SW+25 %	288	293	300	294
		SW+50 %	332	353	360	348
Braunschweig	O-Betrieb (Org. mineral. Düngung, Direktsaat, Vorfrucht Roggen- GPS und Zwischenfrucht)	SW-50 %	76	111	98	95
		SW-25 %	130	172	158	153
		SW	183	232	218	211
		SW+25 %	237	292	278	269
		SW+50 %	291	352	338	327
	M-Betrieb (Mineralische Düngung, Pflugsaat, Vorfrucht Winterweizen)	SW-50 %	110	111	99	107
		SW-25 %	164	171	159	165
		SW	217	231	219	222
		SW+25 %	271	291	279	280
		SW+50 %	325	351	339	338

*kein Versuch

Aus Gründen der analogen Darstellung wird in Abbildung 44 auch die Wechselwirkung Jahr*Ort*Betriebssystem*N-Düngeintensität dargestellt, obwohl sie nicht gesichert ist. Daneben wird die in jedem Merkmal gesicherte Wechselwirkung Ort*Betriebssystem*N-Düngeintensität dargestellt. Die

Signifikanz dieser Wechselwirkung erlaubt die Verallgemeinerung der Aussagen zur N-Düngung für die Betriebssysteme der Standorte unabhängig von den Jahreseffekten. Allerdings ist zu beachten, dass aufgrund des fehlenden Versuchs 2016 im O-Betrieb in Soest abweichende Grenzdifferenzen auftreten.

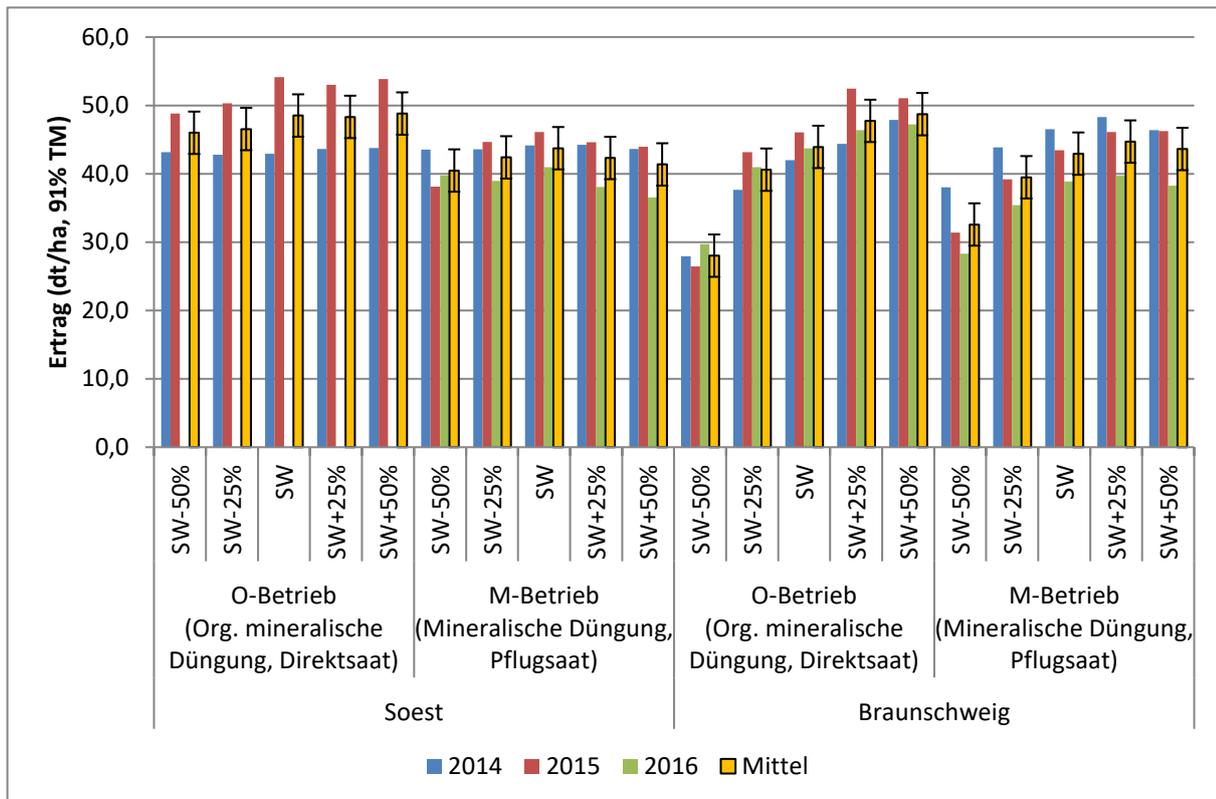


Abbildung 44: Kornertrag von Winterraps an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5 % O*B*N = 3,1 dt/ha (Soest O-Betrieb = 4,4 dt/ha), GD 5 % J*O*B*N = n.s.)

Auf beiden Standorten konnte im Mittel der Jahre im Optimalen Klimabetrieb im Vergleich zum Marktfruchtbetrieb ein signifikanter Mehrertrag festgestellt werden.

Wie bereits die W-Gerste und der W-Weizen reagiert auch der W-Raps am Standort Braunschweig stärker auf die Höhe der N-Düngung als in Soest. In Braunschweig konnte im Mittel der Jahre im optimalen Klimabetrieb bis zum SW + 25 % und im Marktfruchtbetrieb bis zur Sollwertstufe zwischen allen N-Stufen eine signifikante und wirtschaftliche Ertragssteigerung festgestellt werden. In Soest hingegen konnte im Mittel der Jahre lediglich im Marktfruchtbetrieb eine gerade gesicherte Ertragssteigerung von der geringsten N-Stufe zur Sollwertstufe festgestellt werden. Im optimalen Betrieb war keine Wirkung der Steigerung der N-Düngungsintensität abzusichern.

Der Ölgehalt ist beim Raps ein wesentliches preisrelevantes Qualitätskriterium und sollte mindestens 41 % (91 % TS) betragen. Dieser Standard konnte in allen Varianten erreicht werden. Prinzipiell sinkt der Ölgehalt mit steigender Düngungsintensität. Dies ist in Braunschweig in beiden Betriebssystemen deutlich stärker ausgeprägt, als in Soest.

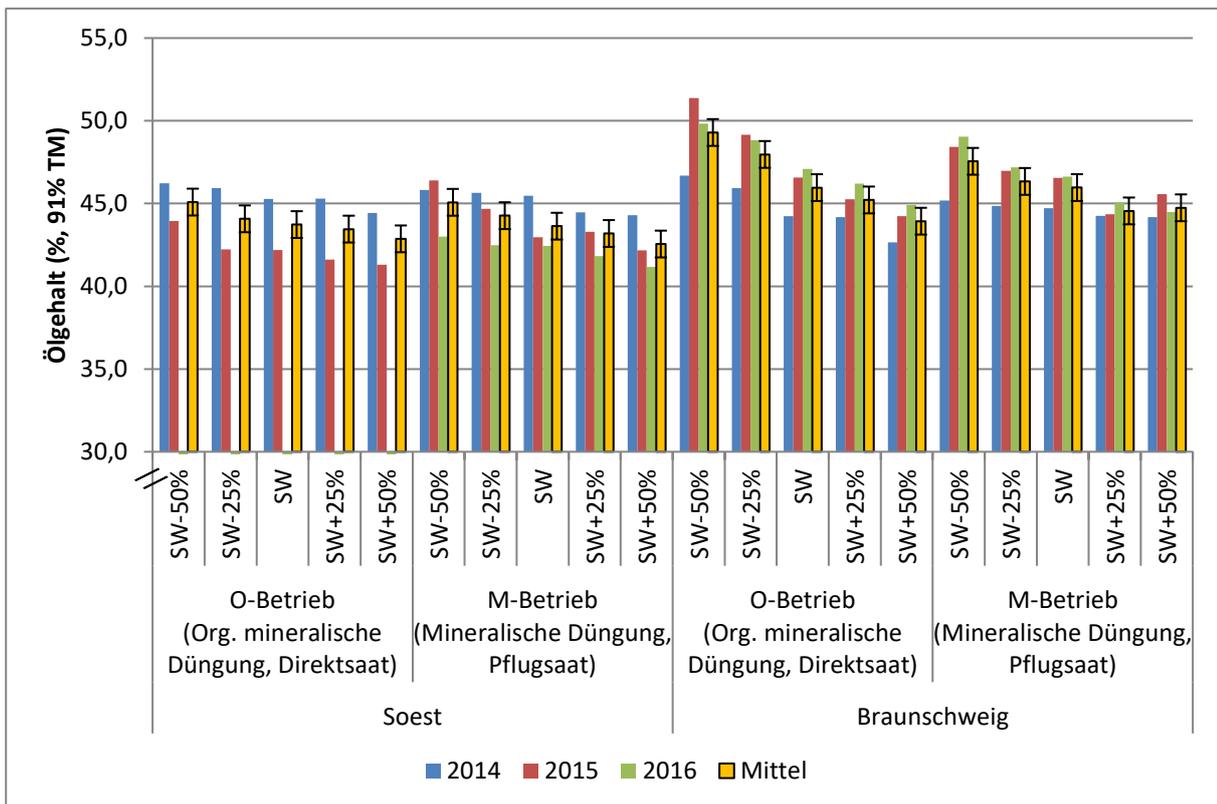


Abbildung 45: Ölgehalt (% Öl in 91 % TM) von Wintererbsen in den Betriebssystemen optimierter Betrieb und Marktfruchtbetrieb an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung (2014-2016) $GD\ 5\ \% O^*B^*N = 0,74\ \% \text{ Öl in } 91\ \% TM$ (Soest O-Betrieb = $1,04\ \% \text{ Öl in } 91\ \% TM$), $GD\ 5\ \% J^*O^*B^*N = n.s.$

Durch die mit der steigenden Düngeintensität sinkenden Ölgehalte ist in Soest in beiden Betriebssystemen kein Effekt der N-Düngestufen auf den Ölertrag feststellbar, in Braunschweig wird im optimierten Betrieb der höchste Ölertrag mit der Düngung SW+25 % erzielt, dieser unterscheidet sich aber nicht signifikant von der Sollwertstufe.

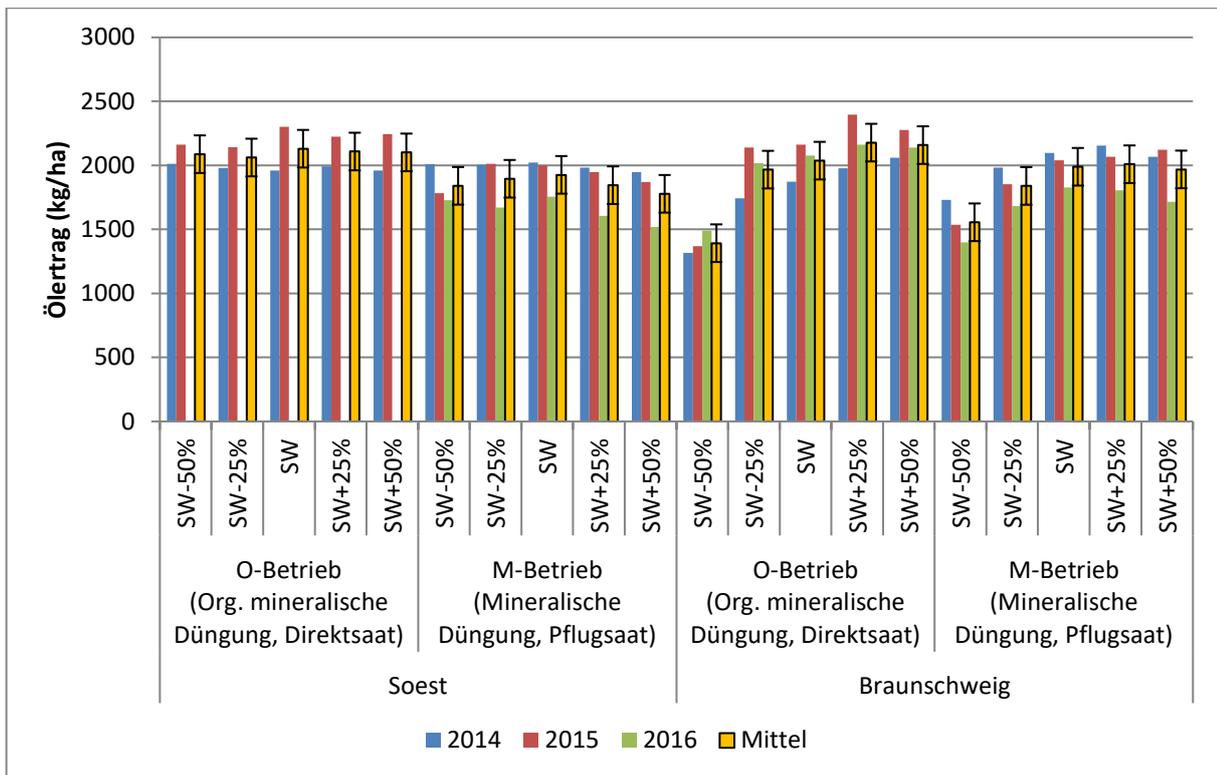


Abbildung 46: Ölertrag von Wintererbsen in den Betriebssystemen optimierter Betrieb und Marktfruchtbetrieb an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung (2014-2016) GD 5 % O*B*N = 147 kg/ha (Soest O-Betrieb = 207 kg/ha), GD 5 % J*O*B*N = n.s.

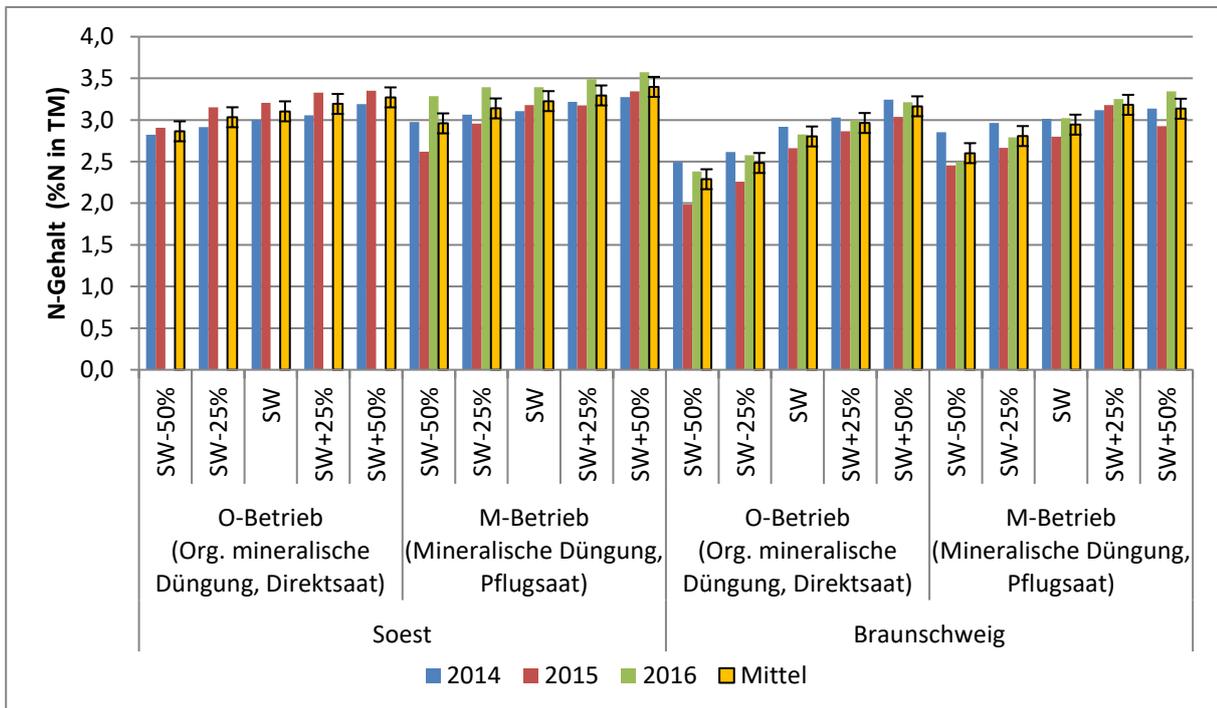


Abbildung 47: Stickstoffgehalt (% N) von Wintererbsen in den Betriebssystemen optimierter Betrieb und Marktfruchtbetrieb an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung (2014-2016) GD 5 % O*B*N = 0,73% xP in TM (Soest O-Betrieb = 1,04 % TM), GD 5 % J*O*B*N = n.s.

Erwartungsgemäß steigt der N-Gehalt im Rapskorn mit der Düngung an, dies ist in Braunschweig deutlicher als in Soest. Umgekehrt zu den Ölgehalten sind die N-Gehalte in Soest höher als in Braunschweig.

Durch die im Vergleich zum Getreide geringeren Erträge wird im Raps trotz der höheren N-Gehalte weniger Stickstoff mit dem Erntegut von der Fläche gefahren. Der N-Entzug steigt in Soest im optimierten Betrieb in allen Dünge­stufen an, die Differenzierung ist aber bei einer Steigerung über den Sollwert nicht mehr gesichert. Im Marktfruchtbetrieb unterscheiden sich die Entzüge zwischen den N-Stufen SW-25 % und SW+50 % nicht. In Braunschweig ist der Anstieg des N-Entzuges im optimierten Betrieb in allen Dünge­stufen gesichert, im Marktfruchtbetrieb ist der Anstieg bis zur Stufe SW+25 % signifikant.

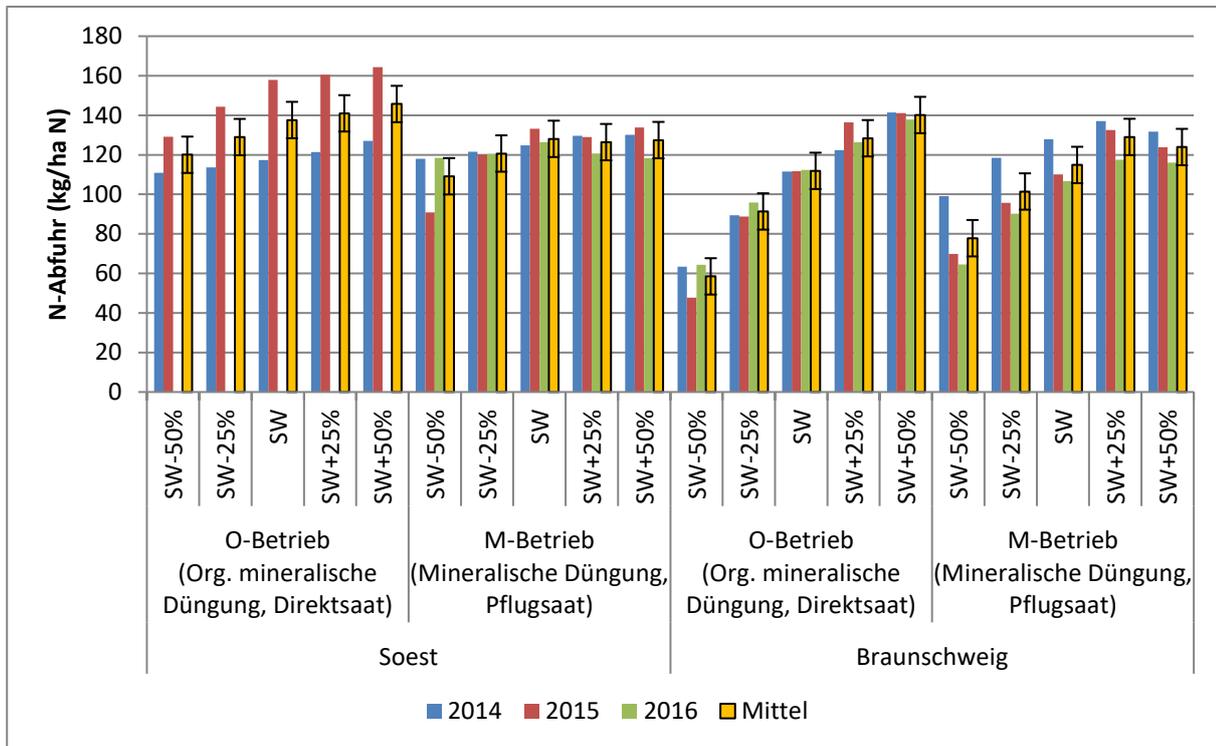


Abbildung 48: N-Abfuhr (kg/ha N) mit dem Winterraps in den Betriebssystemen optimierter Betrieb und Marktfruchtbetrieb an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung (2014-2016) $GD\ 5\ \% O * B * N = 9,2\ kg/ha\ N$ (Soest O-Betrieb = $13,0\ kg/ha\ N$), $GD\ 5\ \% J * O * B * N = n.s.$)

Die N-Bilanzsalden sind an beiden Standorten in beiden Betriebssystemen in allen Dünge­stufen positiv. Die lineare Regressionsanalyse (Abbildung 50) zeigt, dass jedes gedüngte kg N den Bilanzsaldo um $0,8\ kg/ha\ N$ ($r^2=0,92$) erhöht.

Nur in der Dünge­stufe SW-50 % werden N-Bilanzsalden unter $50\ kg/ha\ N$ erreicht. Diese Dünge­stufe ist vor allem auf dem Standort Braunschweig mit deutlichen Ertrags­einbußen verbunden. Mit der Düngung auf den Sollwert sind auf beiden Standorten und Betriebssystemen N-Überschüsse von 100 bis $120\ kg/ha\ N$ verbunden. Das ist auf dem Standort Braunschweig bei einer ertragsorientierten N-Düngung unvermeidlich. Auf dem Standort Soest kann die N-Düngung in beiden Betriebssystemen ohne Ertragsrisiko um ca. $60\ kg/ha\ N$ von der Düngung nach der Sollwertmethode zurückgenommen werden, dadurch würde der N-Bilanzüberschuss von über $100\ kg/ha\ N$ auf ca. $50\ kg/ha\ N$ sinken.

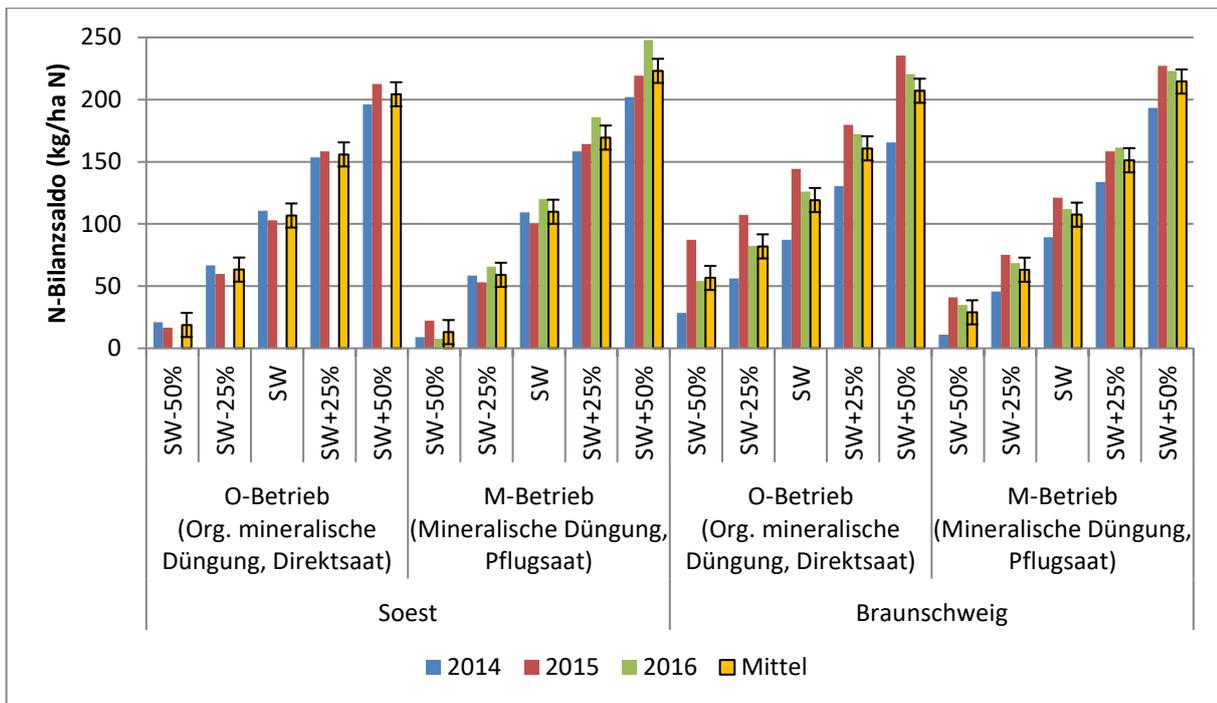


Abbildung 49: N-Bilanzsaldo (kg/ha N, Anrechnung des N-Gehalts org. Dünger zu 85 %) von Wintererbsen in den Betriebssystemen optimierter Betrieb und Marktfruchtbetrieb an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung (2014-2016) GD 5% O*B*N = 9,2 Kg/ha N (Soest O-Betrieb = 13,1 kg/ha N), GD 5 % J*O*B*N = n.s.

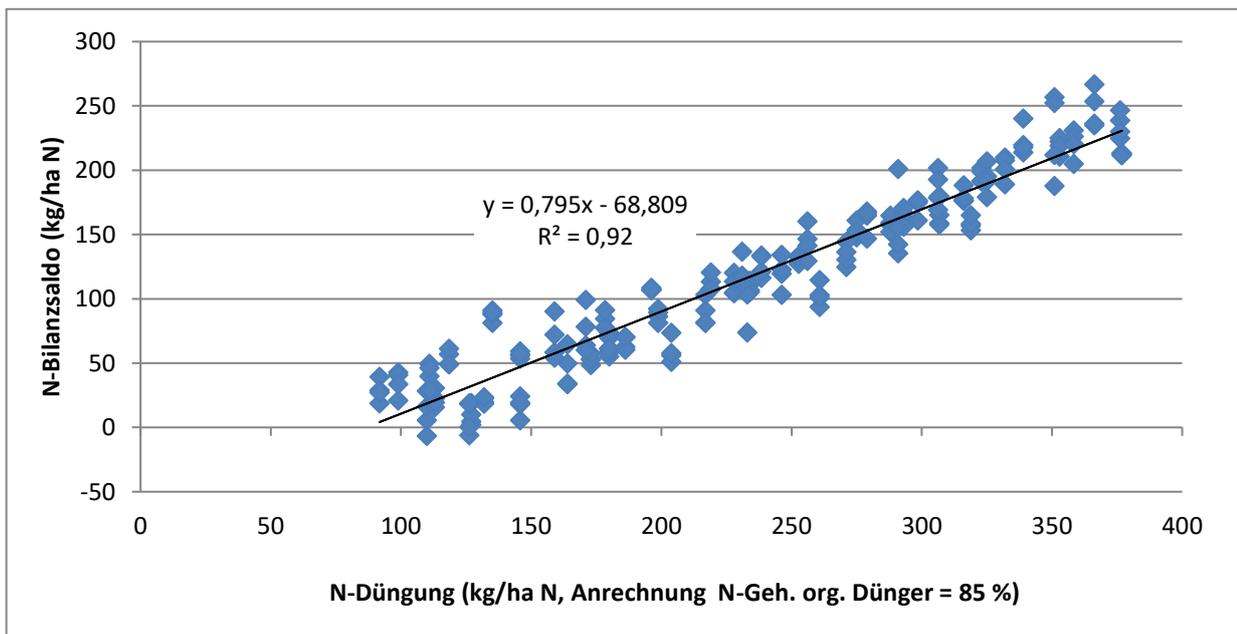


Abbildung 50: Abhängigkeit des N-Bilanzsaldos von der Höhe der N-Düngung zu Wintererbsen (lineare Regression über 2 Standorte, 3 Jahre, 2 Betriebssysteme, 5 N-Düngestufen 4 WDH; n=220)

Auch im Wintererbsen wird die Richtigkeit der N-Sollwertmethode mit der Annahme des MDÄ von 70 % für den Gärrest und der Berücksichtigung der Nachlieferung in den Folgejahren durch Abschläge durch die nahezu identischen N-Bilanzsalden zwischen dem optimierten Betrieb und dem Marktfruchtbetrieb bestätigt.

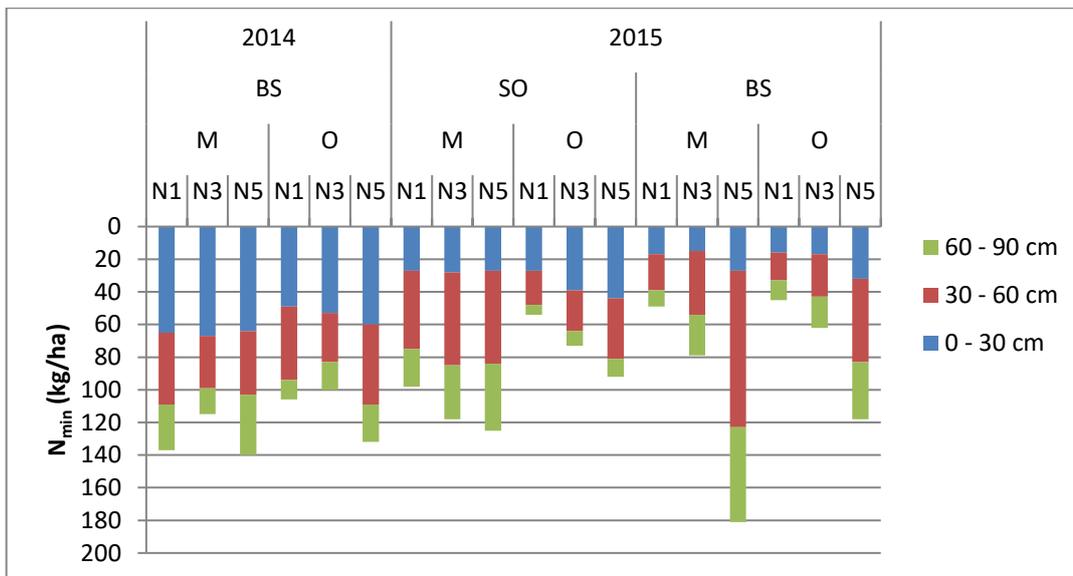


Abbildung 51: N_{\min} -Werte zu Vegetationsende 2014 und 2015 nach Wintereraps in Soest und Braunschweig in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung (O=O-Betrieb, M=M-Betrieb, N1=SW-50 %, N3=SW, N5=SW+50 %)

Die gestuften N-Bilanzüberschüsse nach dem Raps finden sich im Spätherbst 2014 im Winterweizen in Braunschweig im Restnitratgehalt nur sehr eingeschränkt wieder. Sowohl im M- als auch im O-Betrieb werden auch nach der N-Stufe Sollwert – 50 % mit einer akzeptablen N-Bilanz über 100 kg/ha N_{\min} gefunden, die nach der höchsten N-Düngungsstufe kaum ansteigen. Nennenswerte Unterschiede zwischen den Betriebssystemen sind nicht erkennbar. Die N-Düngungsstufen spiegeln sich 2015 deutlicher wider. In Soest wurde im M-Betrieb der Ausfallraps 2-3 Wochen nach der Saat abgetötet und dann Mitte Oktober der Weizen in Mulchsaat bestellt. Im O-Betrieb erfolgte die Abtötung erst unmittelbar vor der Weizenaussaat in Direktsaat ebenfalls im Oktober. Der Effekt der längeren Vegetationszeit des Ausfallrapses und der unterlassenen Bodenbearbeitung ist in der Absenkung der Nitratgehalte in Soest deutlich erkennbar. Er wird aber mit den steigenden N-Bilanzüberschüssen schwächer und ist bei der Sollwertstufe und Sollwertstufe +50 % nicht mehr ausreichend.

In Braunschweig wurde der Ausfallraps Anfang August in beiden Betriebssystemen einmal abgetötet und dann im M-Betrieb mehrmals bearbeitet. Im O-Betrieb wurde auf eine Bodenbearbeitung verzichtet und Anfang November wurde in beiden Systemen der Weizen bestellt. Die unterschiedliche Bodenbearbeitungsintensität und die vorherige N-Düngeintensität machen sich in den Restnitratgehalten deutlich bemerkbar. Nur bei den Düngungsstufen Sollwert und niedriger kann im O-Betrieb der Nitratgehalt unter 60 kg /ha N gehalten werden.

Mit einem gezielten Nacherntemanagement können die bei einer ertragsorientierten N-Düngung unvermeidbaren N-Bilanzüberschüsse biologisch gebunden werden, vor der winterlichen Auswaschung geschützt und von den Folgekulturen genutzt werden. Die damit verbundenen phythosanitären Probleme wie die unkontrollierte Schneckenvermehrung bedürfen weiterer Untersuchungen.

3.3.4 N-Düngungsversuche Silomais

Im Silomais wurden neben verschiedenen N-Düngungsintensitäten auch verschiedene N-Applikationsverfahren geprüft. Während in der Variante T1 „mineralische Düngung“ der Stickstoff ausschließlich in Form von DAP und KAS ausgebracht wurde, wurde in den Varianten T2 „Schleppschlauchdüngung“ und T3 „Strip-Till“ neben der DAP-Unterfußdüngung bei der Maisaussaat mit Gärrest auch in organischer Form Stickstoff zugeführt und anschließend mit KAS auf die jeweilige Sollwertstufe aufgedüngt. Bei der Berechnung der zu düngenden N-Mengen wurde beim Gärrest wieder mit einer N-Verfügbarkeit von 70 % kalkuliert. Für die N-Bilanzsalden wurde beim Gärrest nach den Vorgaben der DüngeVO eine N-Verfügbarkeit von 85 % zu Grunde gelegt. Tabelle 14 veranschaulicht die Vorgehensweise am Beispiel Soest. Zusätzlich zu den in Braunschweig etablierten vier N-Stufen wurde in Soest eine weitere Düngungsstufe N5 (SW + 50 %) angelegt (Tabelle 14).

Tabelle 14: Darstellung für das Jahr 2015 der N-Aufwandmengen und Zusammensetzung der N-Versorgung im Silomais in den verschiedenen N-Düngungsintensitäten und den Betriebssystemen Optimierter Klimabetrieb (O) und Viehhaltender Betrieb (V) am Beispiel des Standorts Soest in den organisch gedüngten Varianten. Beim Gärrest wurde eine N-Verfügbarkeit von 70 % zu Grunde gelegt

		Zielwert (kg N/ha)	N _{min} (kg N/ha)		DAP Unterfuß (kg N/ha)	Gärrest (kg N/ha (70 %))	KAS (kg N/ha)	
			(O)	(V)			(O)	(V)
N1	UFD	50	11	5	27	97	-	-
N2	SW – 25 %	143					-	13
N3	SW	190					55	61
N4	SW + 25 %	238					102	108
N5	SW + 50 %	285					150	156

Die Versuche wurden 2014 und 2015 an beiden Standorten sowohl im Optimierten Klimabetrieb als auch im Veredelungsbetrieb nach der Ernte des Grünroggens Mitte Mai etabliert. Zu diesem Zeitpunkt erfolgte auch die N_{min}-Probenahme. Im Jahr 2016 wurde der Grünroggen aufgrund der unzureichenden Entwicklung auf beiden Standorten Mitte Februar abgetötet und der Mais zum normalen Termin Ende April gelegt.

Der in T2 ausgebrachte Gärrest wurde im Optimierten Klimabetrieb (Direktsaat) zum Stadium BBCH 16 in den stehenden Maisbestand gefahren, da eine Einarbeitung vor der Saat systembedingt (Direktsaat) nicht möglich war. Im Veredelungsbetrieb (Mulchsaat) hingegen wurde der Gärrest vor der Aussaat ausgebracht und eingearbeitet. Die mineralische Aufdüngung erfolgte zum Stadium BBCH 16.

Tabelle 15: Gedüngte N-Mengen (kg/ha N) im Silomais in den verschiedenen N-Düngungstechniken und den Betriebssystemen Optimierter Betrieb (O) und Veredelungsbetrieb (V) am Standort Soest (SO). Beim Gärrest wurde eine N-Verfügbarkeit von 70 % zu Grunde gelegt

Betrieb	Technik	N-Düngung	2014	2015	2016	Mittel
O-Betrieb	Mineralisch /Schlepp- schlauch/ Strip-Till	SW-50 % (UFD)	27	27	27	27
		SW-25 %	112	132	117	120
		SW	161	179	164	168
		SW+25 %	208	227	212	216
		SW+50 %	254	274	259	262
V-Betrieb	Mineralisch /Schlepp- schlauch/ Strip-Till	SW-50 % (UFD)	27	27	27	27
		SW-25 %	112	138	132	127
		SW	159	185	179	174
		SW+25 %	206	233	227	222
		SW+50 %	254	280	274	269

Tabelle 16: Gedüngte N-Mengen (kg/ha N) im Silomais in den verschiedenen N-Düngungstechniken und den Betriebssystemen Optimierter Klimabetrieb (O) und Viehhaltender Betrieb (V) am Standort Braunschweig (BS). Beim Gärrest wurde eine N-Verfügbarkeit von 70 % zu Grunde gelegt

Betrieb	Technik	N-Düngung	2014	2015	2016	Mittel
O-Betrieb	Mineralisch / Schlepp- schlauch	SW-50 % (UFD)	26	26	26	26
		SW-25 %	121	125	129	125
		SW	168	172	176	172
		SW+25 %	216	220	224	220
V-Betrieb	Mineralisch / Schlepp- schlauch	SW-50 % (UFD)	26	26	26	26
		SW-25 %	121	132	129	127
		SW	168	179	176	174
		SW+25 %	216	227	224	222

Aufgrund der negativen Erfahrungen mit der Direktsaat von Mais in der ersten Projektphase wurde am Soester Standort in beiden Betriebssystemen das Strip-Till-Verfahren angewendet und genau im Bereich der späteren Saatreihe der Boden ca. 20 cm tief gelockert. Nur bei der Variante T3 Strip-Till wurde zusätzlich der Gärrest unter die spätere Saatreihe in ca. 12 cm Tiefe (= ca. 6 cm unter dem Saatkorn) ausgebracht. Danach erfolgte im Veredelungsbetrieb die Saatbettbereitung und Aussaat, im Optimierten Betrieb erfolgte die Aussaat in Direktsaat d. h. ohne weitere Bodenbearbeitung, so dass durch den Vergleich der Varianten der Effekt der Düngerplatzierung unabhängig von dem der Intensität der Lockerung geprüft werden konnte. Die Variante T3 Strip-Till wurde ausschließlich in Soest sowohl im Veredelungs- wie im optimierten Klimabetrieb realisiert.

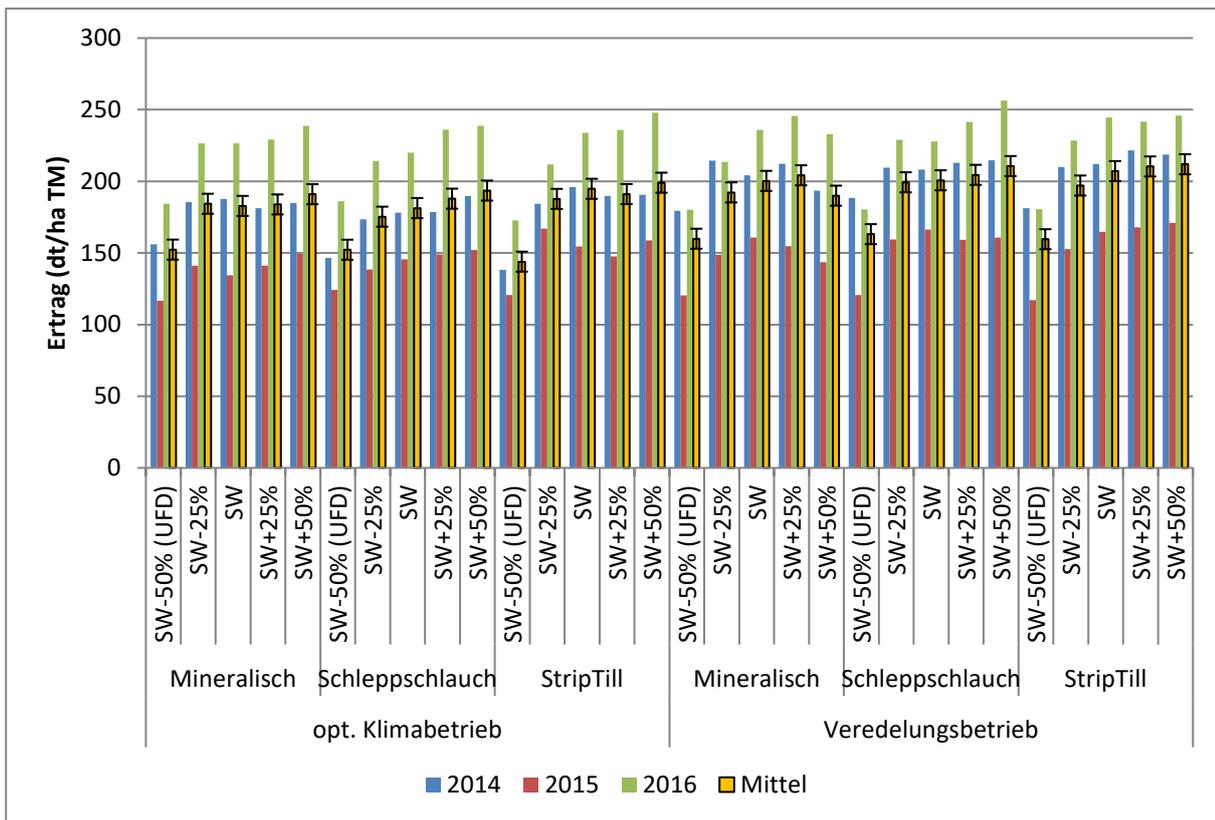


Abbildung 52: Silomaisertrag (dt/ha TM) in Abhängigkeit vom Betriebssystem, der Düngetechnik und der N-Menge am Standort Soest in den Jahren 2014-2016 (GD5 % B*T*N = 7,0 dt/ha TM, GD 5 % J*B*T*N = 12,2 dt/ha TM)

Im Mittel der Jahre ist unabhängig von der N-Düngemenge und Applikationstechnik der Silomaisertrag im Veredelungsbetrieb (194,0 dt/ha TM) höher als im optimierten Klimabetrieb (180,0 dt/ha TM) (GD 5 % Betriebssystem = 1,8 dt/ha TM), dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf die unterlassene flächige Bodenbearbeitung beim optimierten Klimabetrieb zurückzuführen. Die flächige Bodenlockerung im Veredelungsbetrieb führt vor allem im Jahr 2015 mit sehr geringen Maiserträgen bei mineralischer Düngung und der Gärrestausrückführung mit Schleppschauch zu deutlich besseren Erträgen. Die Effekte der Düngerform bzw. Platzierung sind innerhalb der Düngestufen bei der Mulchsaat im V-Betrieb meist nicht gesichert. Als Beispiel wird auf die Sollwertstufe verwiesen. Diese ist im Mittel der drei Jahre gerade nicht gesichert, Strip-Till 207,1 dt/ha, Mineralisch 200,7 bzw. Schleppschauch 200,9 dt/ha, GD5 % =7,0 dt/ha (Abbildung 52).

Der Effekt der Gärrestplatzierung direkt unter der Saatreihe wird im optimierten Betrieb deutlich. Die Strip-Till-Varianten sind im Mittel der drei Jahre der Schleppschauch-Variante bei einer Düngung SW-25 % und SW signifikant überlegen, erst bei einer Düngung 25 % bzw. 50 % über Sollwert werden gleichwertige Erträge erreicht. Die Strip-Till-Variante ist der Mineraldüngervariante gleichwertig. Die Überlegenheit der exakten Gärrestplatzierung unter der Saatreihe bei der Strip-Till-Variante wird vor allem im ertragsschwachen Jahr 2015 deutlich, hier ist die Variante SW-25 % der gleichen Düngermenge bei flächiger Mineraldüngung oder der Schleppschauchverteilung ertraglich gesichert überlegen. Vor allem unter ungünstigen Bedingungen wirkt das Gärrest-Strip-Till-Verfahren ertragssichernd.

Die in der Hauptwirkung gesicherte Überlegenheit der flächigen Bearbeitung im V-Betrieb wird relativiert durch die Ertragsgleichheit der Strip-Till-Varianten im O-Betrieb. Bei Sollwert-Düngung sind die Erträge der Strip-Till-Varianten ohne weitere Bearbeitung gleich hoch wie die in Mulchsaat bestellten Flächen des V-Betriebes mit Mineraldüngung oder der zur Saat eingearbeiteten Schleppschlauchvarianten, nur die Kombination Strip-Till mit flächiger Bearbeitung zeigt noch eine leichte Überlegenheit. Diese Ertragsgleichheit des O-Betriebes mit Gärrest-Strip-Till-Verfahren zum V-Betrieb ist auch im Jahr 2016 ohne vorherigen Grünroggenanbau gegeben.

Insgesamt hat in Soest die Höhe der N-Düngung nur einen relativ geringen Einfluss auf den Ertrag. Im Mittel der Jahre wird mit der N-Düngungsstufe Sollwert in fast allen Applikationstechniken und Betriebsformen der Höchstertragsbereich sicher erreicht, eine weitere Steigerung erbringt keine gesicherten Ertragszuwächse mehr. Die Ausnahme stellt die Schleppschlauchvariante im optimierten Klimabetrieb dar, hier nimmt der Ertrag bis zur höchsten Düngestufe zu. Die Ursache liegt in der späten Gärrestausbringung im Juni in den stehenden Bestand, der keine Einarbeitung mehr zulässt. Erhöhte N-Verluste und/oder verminderte Wirksamkeit sind die Folge (Kapitel 4 Teilprojekt Klimagase).

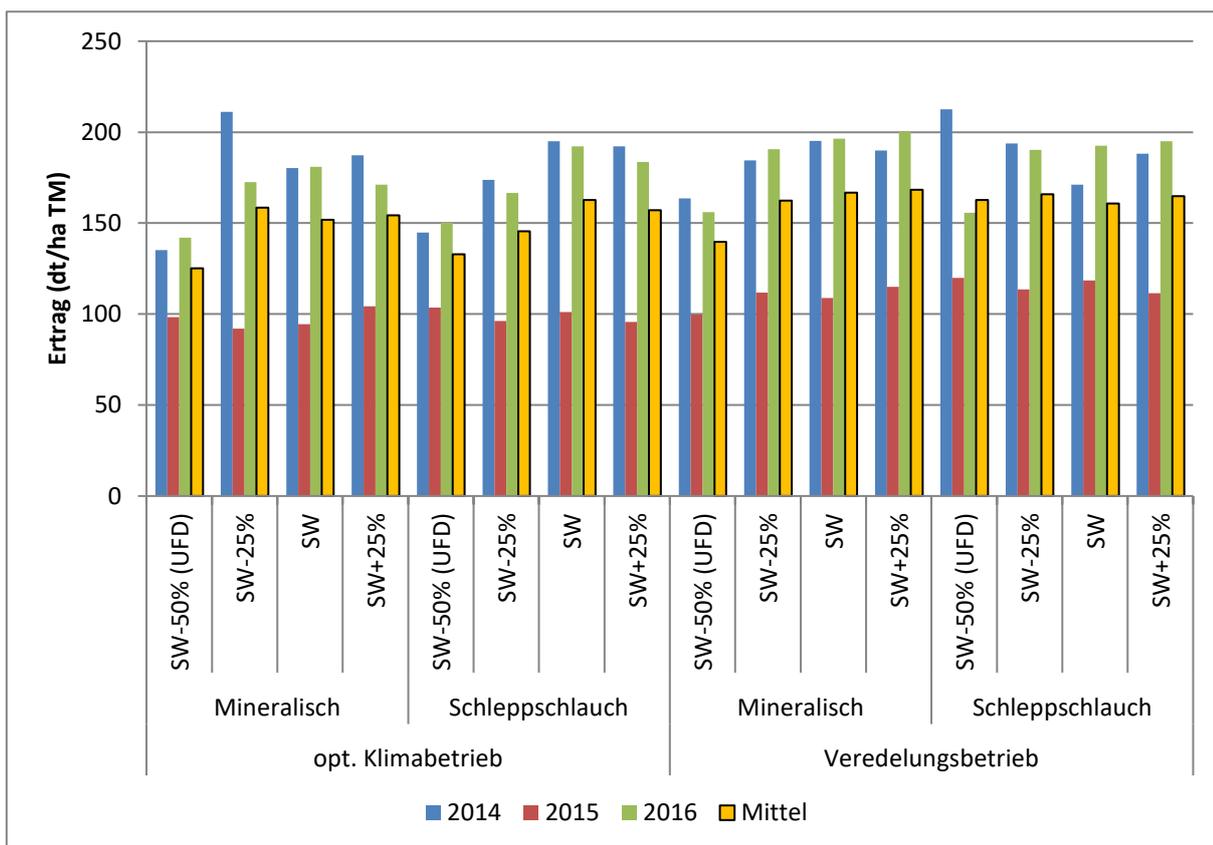


Abbildung 53: Silomaiserertrag (dt/ha TM) in Abhängigkeit vom Betriebssystem, der Düngetechnik und der N-Menge am Standort Braunschweig in den Jahren 2014-2016 (GD5 % B*T*N = n.s., GD 5 % J* B*T*N = n.s.)

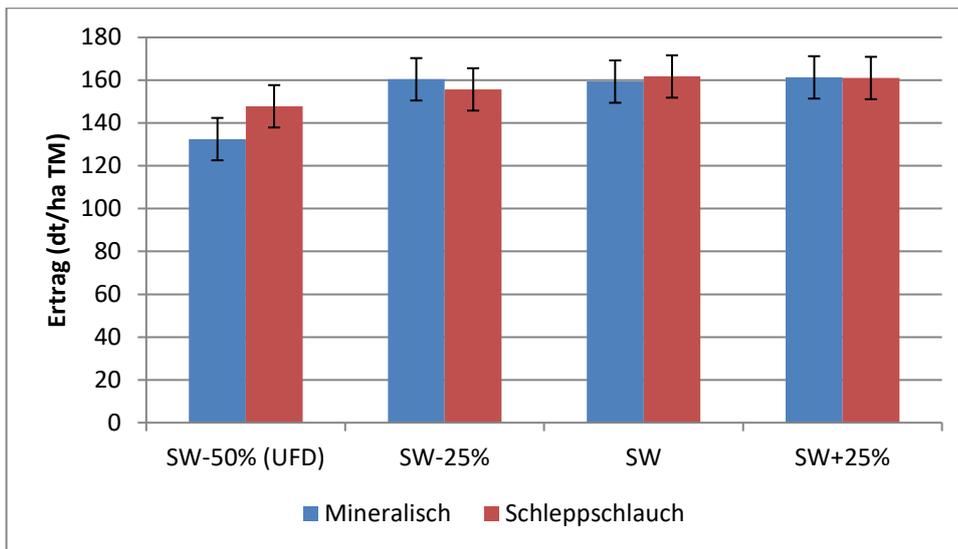


Abbildung 54: Silomaiserertrag (dt/ha TM) in Abhängigkeit der Düngetechnik und der N-Menge am Standort Braunschweig (Mittel 2014-2016) (GD5 % T*N = 9,9 dt/ha TM)

Die Varianzanalyse der Erträge (Anhang Tabelle 58) in Braunschweig zeigt für die N-Applikationstechnik (rein mineralisch oder organisch mit Schleppschauch und mineralischer Ergänzung) keine signifikante Haupt- oder Wechselwirkung. Selbst die signifikante Wechselwirkung Technik*N-Menge (Abbildung 54) zeigt nur in der nicht differenzierten Düngestufe, SW-50 % = nur UFD einen signifikanten aber eindeutig zufälligen Unterschied. Die Form der Düngung - rein mineralisch oder organisch mit Schleppschauch und mineralischer Ergänzung - hat somit auf dem schwierigen tonigen Standort Braunschweig keinen Einfluss auf den Ertrag. Das eröffnet sehr gute Möglichkeiten der Gärrestverwertung.

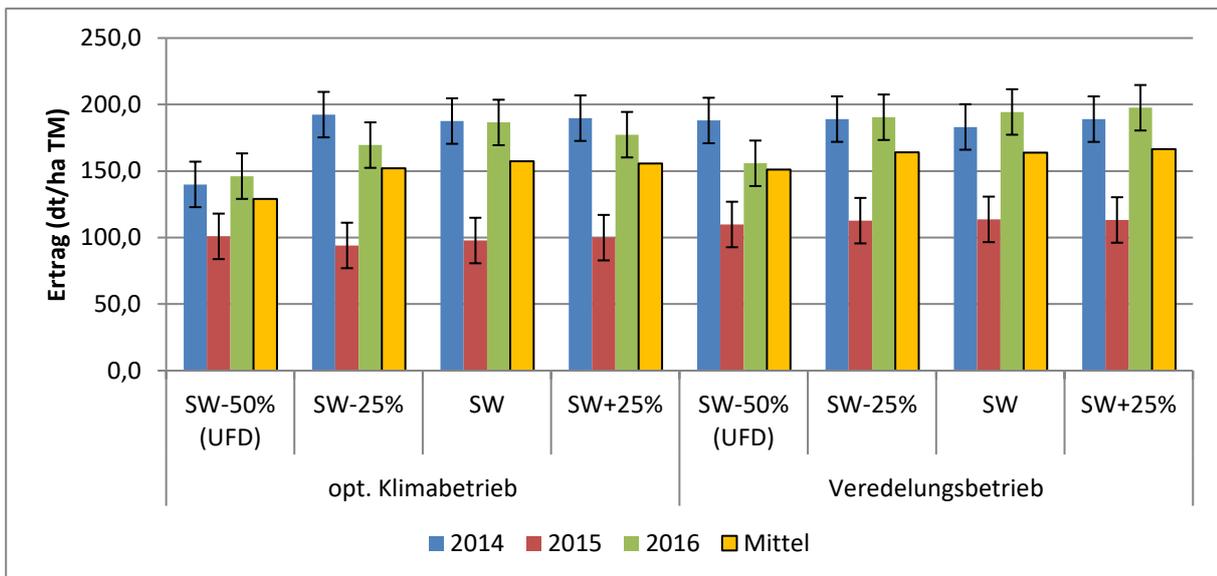


Abbildung 55: Silomaiserertrag (dt/ha TM) in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der N-Menge am Standort Braunschweig in den Jahren 2014-2016 (GD5 % B*N = n.s., GD 5 % J* B* N = 17,1 dt/ha TM)

In den Jahren 2014 und 2016 wurden am Standort Braunschweig in beiden Betriebssystemen mit den Düngungsstufen SW-25 % bis SW+25 % optimale Erträge erreicht, signifikante Unterschiede treten nicht auf. Eine um 50 kg/ha N reduzierte N-Düngung ist somit ausreichend. 2015 waren die Erträge unabhängig von der Höhe der N-Düngung in beiden Betriebsformen sehr gering, eine Wirkung der N-Düngung war nicht erkennbar. Tendenziell waren die Erträge im Veredelungsbetrieb mit der flächigen Bodenbearbeitung gegenüber dem optimierten Klimabetrieb etwas besser.

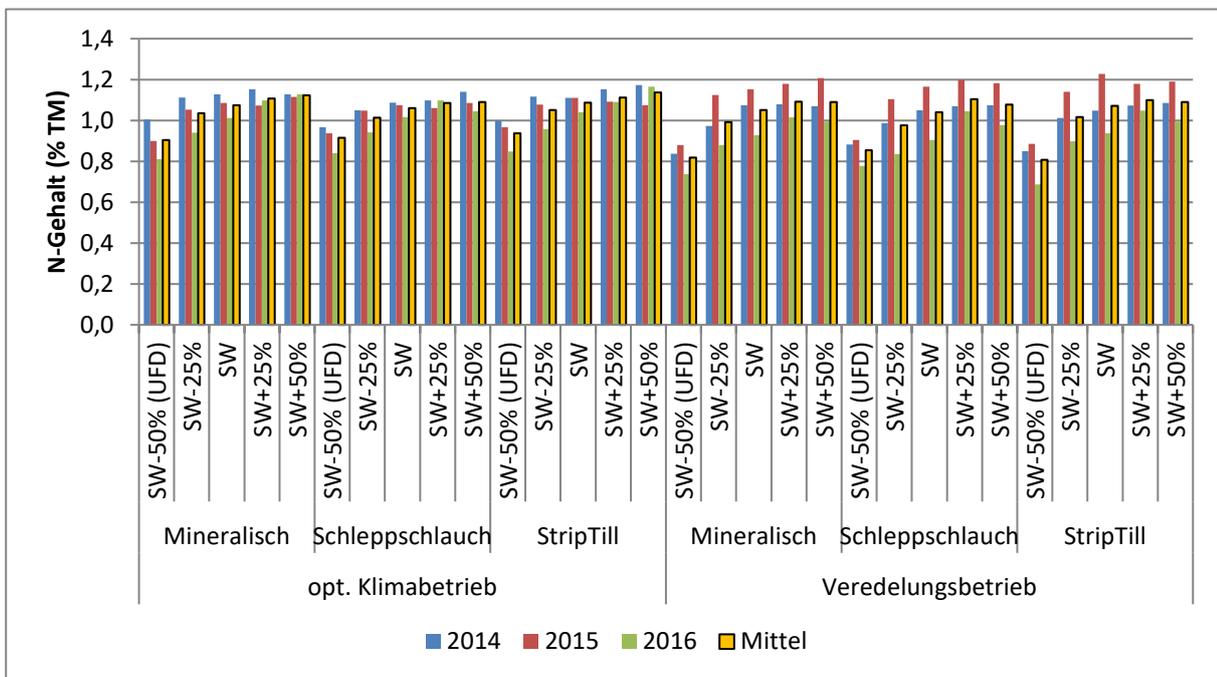


Abbildung 56: N-Gehalt von Silomais (% N, TM) in Abhängigkeit vom Betriebssystem, der Düngetechnik und der N-Menge am Standort Soest in den Jahren 2014-2016 (GD5 % B*T*N = n.s., GD 5 % J* B*T*N = n.s.)

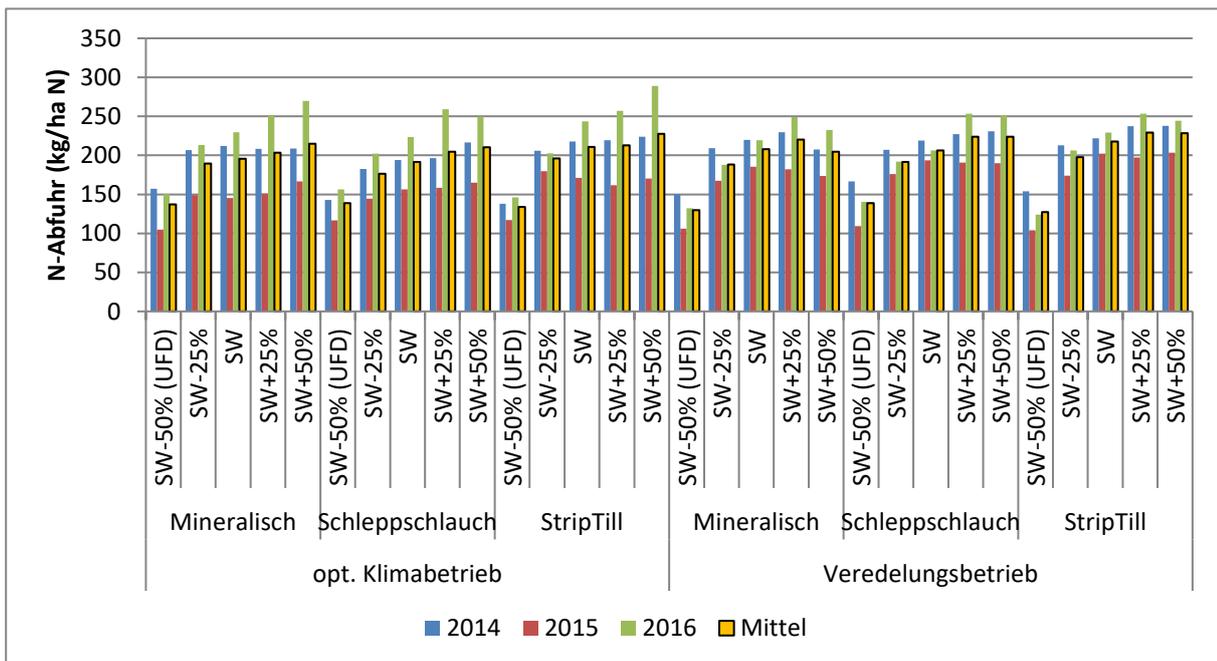


Abbildung 57: N-Abfuhr mit Silomais (kg/ha N) in Abhängigkeit vom Betriebssystem, der Düngetechnik und der N-Menge am Standort Soest in den Jahren 2014-2016 (GD5 % B*T*N = n.s., GD 5 % J* B*T*N = n.s.)

Unter Berücksichtigung der N-Gehalte im Erntegut und der damit verbundenen N-Abfuhr zeigen in Soest die N-Bilanzsalden den überragenden Effekt der Höhe der N-Düngung. Die hohen Wechselwirkungen sind sämtlich nicht signifikant. Mit einer N-Düngung auf den Sollwert werden im Mittel der Jahre schwach negative N-Bilanzsalden erreicht. In den Jahren mit guten Maiserträgen sind die N-Bilanzsalden auch bei einer um 25 % erhöhten N-Düngung noch ausgeglichen bis negativ. Selbst in den Jahren mit geringen

Erträgen (2015) bleiben die N-Bilanzsalden bei Düngung nach Sollwert im ausgeglichenen bis schwach positiven Bereich (max. +48 kg/ha N). Insgesamt wird deutlich, dass sowohl die Betriebsform als auch die N-Düngerform und die Düngetechnik im Gegensatz zur N-Düngermenge einen untergeordneten Einfluss auf die N-Bilanzsalden haben.

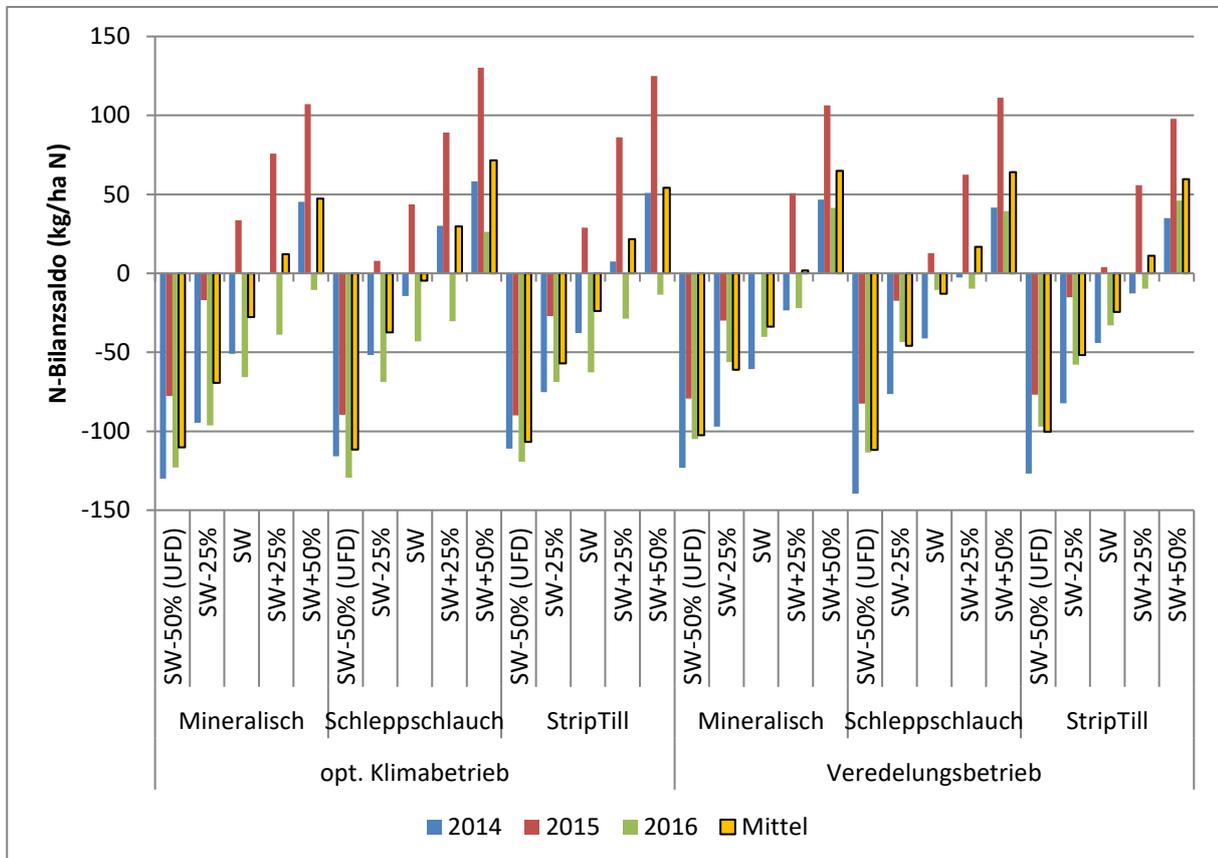


Abbildung 58: N-Bilanzsaldo von Silomais (kg/ha N) in Abhängigkeit vom Betriebssystem, der Düngetechnik und der N-Menge am Standort Soest in den Jahren 2014-2016 (GD5 % B*T*N = n.s., GD 5 % J* B*T*N = n.s.)

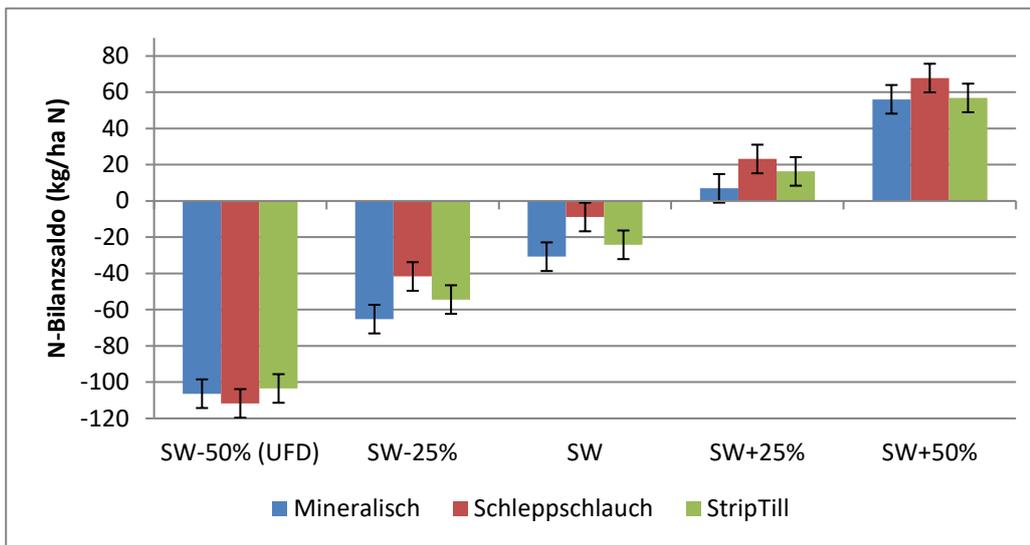


Abbildung 59: N-Bilanzsaldo von Silomais (kg/ha N) in Abhängigkeit von der Düngetechnik und der N-Menge am Standort Soest im Mittel der Jahre 2014-2016 und der beiden Betriebssysteme O und V (GD5 % T*N = 7,9 kg/ha N)

Dieser Einfluss der N-Menge wird durch die Applikationstechnik etwas differenziert: Das Gärrest-Strip-Till-Verfahren weist am Standort Soest im Mittel der Betriebssysteme und Jahre bei den meisten Düngestufen signifikant geringere N-Bilanzsalden auf, als das Schleppschlauchverfahren, es erreicht aber in der Regel nicht ganz die guten Bilanzsalden der reinen Mineraldüngung. Durch den zusätzlichen Vorteil der zur flächigen Bearbeitung bei Mulchsaat vergleichbaren Erträge stellt somit das Verfahren der Gülle/Gärrest-Unterfußdüngung (Gärrest-Strip-Till) das überlegene Verfahren dar. Hohe Ertragssicherheit wird kombiniert mit Einsparungen bei Bodenbearbeitung und negativen bis ausgeglichenen N-Bilanzsalden. Diese Einschätzung wird bestätigt durch die Ergebnisse der Arbeitsgruppe der Hochschule Osnabrück (OLFS et al. 2016, WESTERSCHULTE et al. 2016) und hat Eingang gefunden in die Beratungsempfehlungen der Landwirtschaftskammern Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen für sandige bis lehmige Böden (LAURENZ 2016, LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN 2016).

Ebenso wie in Soest wird der N-Bilanzsaldo am Standort Braunschweig in erster Linie durch die Höhe der N-Düngung bestimmt, der Einfluss des Betriebssystems und der N-Düngungstechnik sind dagegen marginal. Die N-Bilanzsalden der Düngung nach Sollwert sind mit gewissen Jahresschwankungen in beiden Betriebssystemen ausgeglichen, der Veredelungsbetrieb zeigt leichte Vorteile. Die ertraglich gleichwertige Düngestufe SW-25 % weist in allen Jahren einen leicht negativen N-Bilanzsaldo von 20 - 40 kg/ha N auf. Damit wird die bekannte Aussage (LÜTKE ENTRUP et al. 1997) bestätigt, dass bei richtig bemessener N-Düngung Mais mit hohen Erträgen nicht nur ohne N-Bilanzüberschüsse, sondern vielfach mit negativen N-Bilanzsalden angebaut werden kann. Durch die aktuelle Entwicklung des Gülle-Strip-Till-Verfahrens kann das System noch einmal verbessert werden. Damit kann Mais in vielfältigen Fruchtfolgen zum Ausgleich der unvermeidbaren N-Bilanzüberschüsse nach Raps oder Ackerbohnen beitragen.

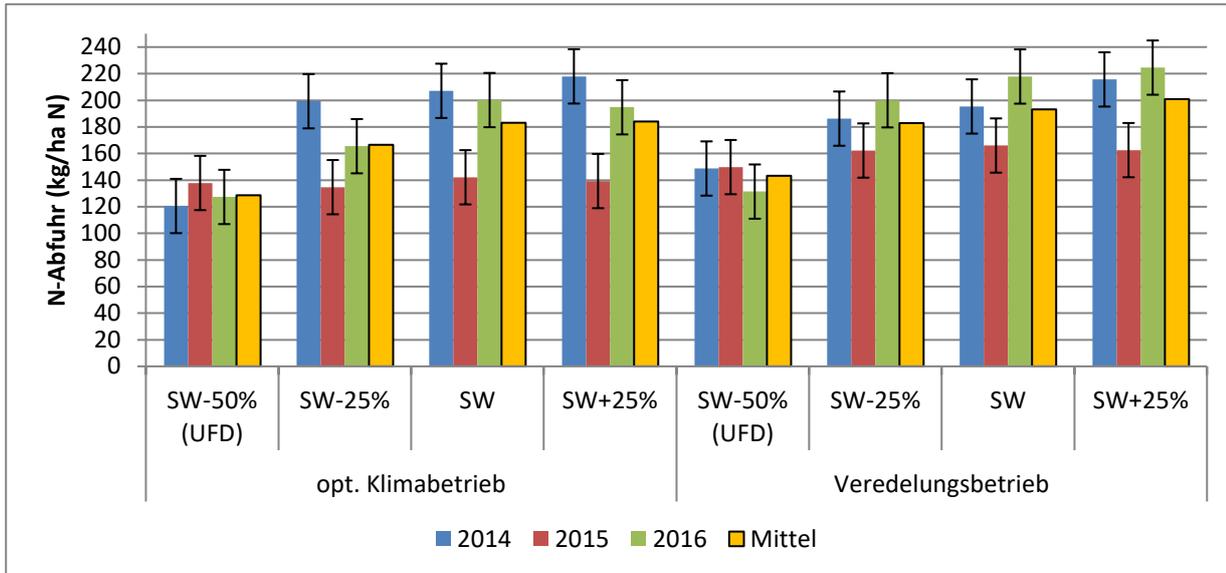


Abbildung 61: N-Abfuhr mit Silomais (kg/ha N) in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der N-Menge am Standort Braunschweig in den Jahren 2014-2016. (GD5 % B*N = n.s., GD 5 % J* B* N = 20,4 kg/ha N)

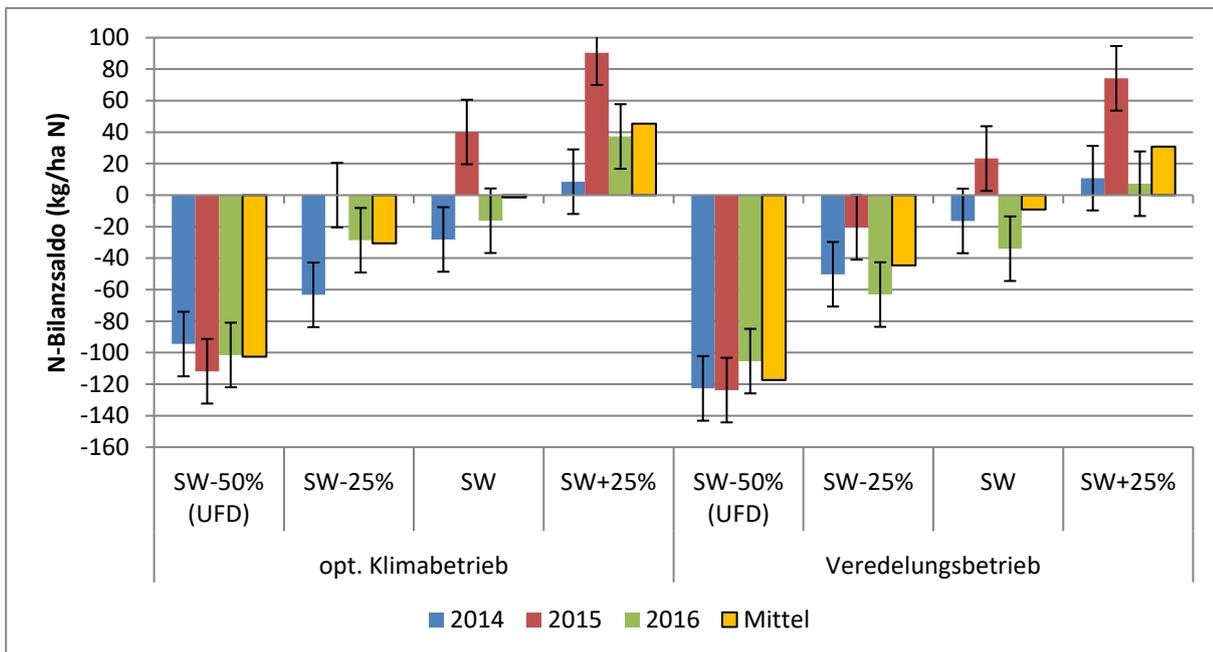


Abbildung 60: N-Bilanzsaldo von Silomais (kg/ha N) in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der N-Menge am Standort Braunschweig in den Jahren 2014-2016. (GD5 % B*N = n.s., GD 5 % J* B* N = 20,5 kg/haN)

Die Entwicklung der Restnitratgehalte nach der Silomaisernte unter dem nachfolgenden Roggen (O-Betrieb) und Weizen (V-Betrieb) zeigen die folgenden Abbildungen. In Soest ist der Effekt eines höheren Mineralisationsvermögens des O-Betriebes erkennbar.

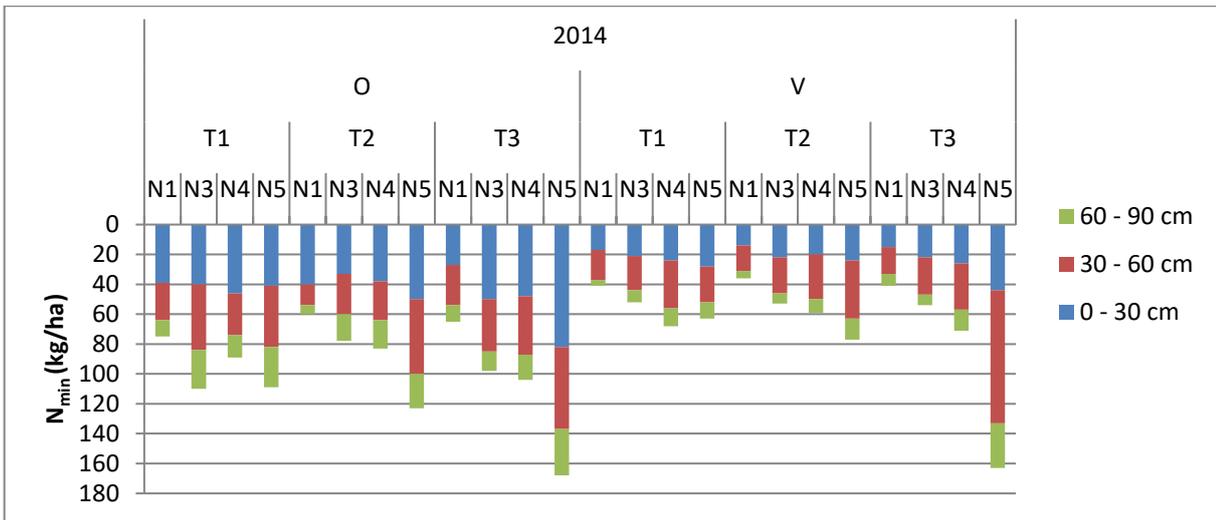


Abbildung 62: N_{min}-Werte zu Vegetationsende 2014 nach Silomais in Soest (O=O-Betrieb, V=V-Betrieb, N1=SW-50 %, N3=SW, N4=SW+25 %, N5=SW+50 %, T1=Mineralische Düngung, T2=Schleppschauch, T3=Gärrest-Strip-Till)

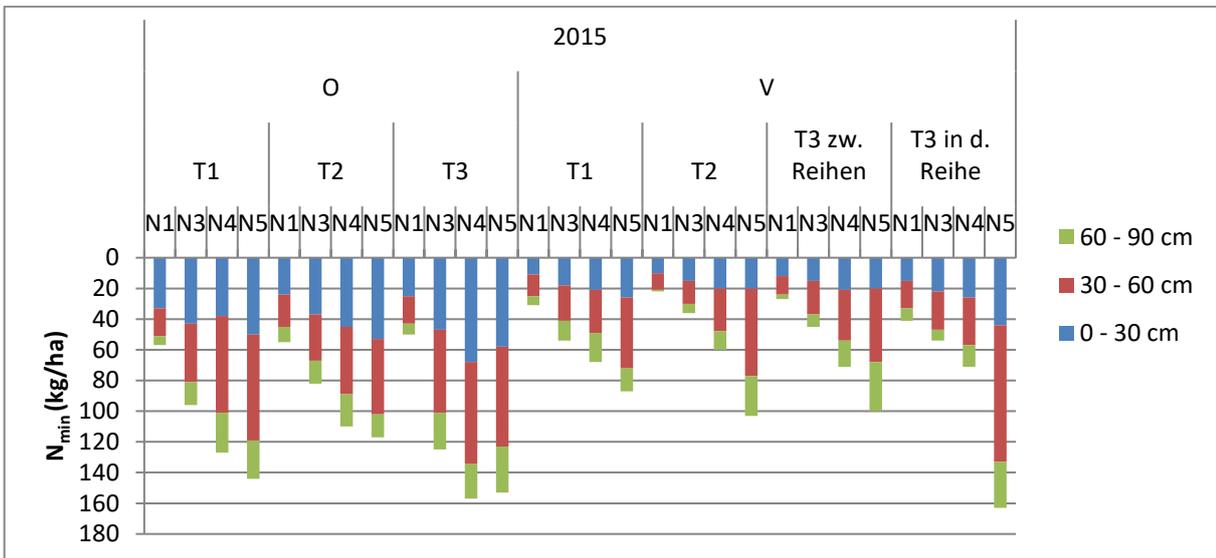


Abbildung 63: N_{min}-Werte zu Vegetationsende 2015 nach Silomais in Soest (O=O-Betrieb, V=V-Betrieb, N1=SW-50 %, N3=SW, N4=SW+25 %, N5=SW+50 %, T1=Mineralische Düngung, T2=Schleppschauch, T3=Gärrest-Strip-Till)

Obwohl die Bestellung des Roggens in Direktsaat erfolgte, weisen die Flächen im O-Betrieb selbst in der N1 Stufe, die nur mit einer Unterfußdüngung versehen wurde, Nitratgehalte um 60 kg/ha N (2014) und 2015 Werte zwischen 40 und 60 kg/ha N auf. In den Düngestufen über dem Sollwert steigen die Nitratgehalte 2015 auf 100- 160 kg/ha N. Nur mit Unterfußdüngung bleiben die Nitratgehalte zwischen 40-60 kg/ha N.

Im V-Betrieb werden in beiden Jahren unabhängig von der Düngerform bzw. Ausbringungstechnik bei einer Düngung nur mit mineralischer Unterfußdüngung (N1) und der Düngung nach Sollwert (N3) akzeptable N_{min}-Gehalte unter 50 kg/ha N gefunden. Erst bei einer Düngung über Sollwert steigen die Nitratgehalte teilweise sehr deutlich an. Besonders auffällig ist dies in der Stufe SW+50 % bei der Gärrest-Strip-Till-Variante.

Um zu klären ob dieser Befund mit dem Effekt der Gärrestplatzierung zu erklären ist, wurde zu Vegetationsende 2015 die N_{min} -Probenahme im V-Betrieb in der Variante Gärrest-Strip-Till (T3) sowohl in den Maisreihen als auch zwischen den Maisreihen vorgenommen. Zwischen den Maisreihen unterscheiden sich die Verfahren der Düngerapplikation (T1 –T3) nicht wesentlich. In der Reihe sind die Restnitratmengen vor allem in der höchsten Düngestufe deutlich erhöht. Bei einer Düngung bis in Höhe des Sollwertes wird das Gärrest-Düngeband unter der Maisreihe auch bei einer flächigen Ergänzung mit Mineraldünger weitgehend ausgenutzt. Nach einer deutlich erhöhten mineralischen Ergänzungsdüngung wird das Düngeband unter der Maisreihe nur noch unvollständig genutzt und es entstehen nach der Maisernte streifige Nitratbänder, die auswaschungsgefährdet sind. Auf weitere Untersuchungen wurde verzichtet, da diese Ergebnisse sehr gut zu denen der umfangreichen Untersuchungen von WESTERSCHULTE et al. (2016) passen. Die ungleichmäßige Verteilung der Restnitratmengen bei Gülleinjektion erfordert eine angepasste Probenahmetechnik um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Diese wurde von WESTERSCHULTE et al. (2015) erarbeitet.

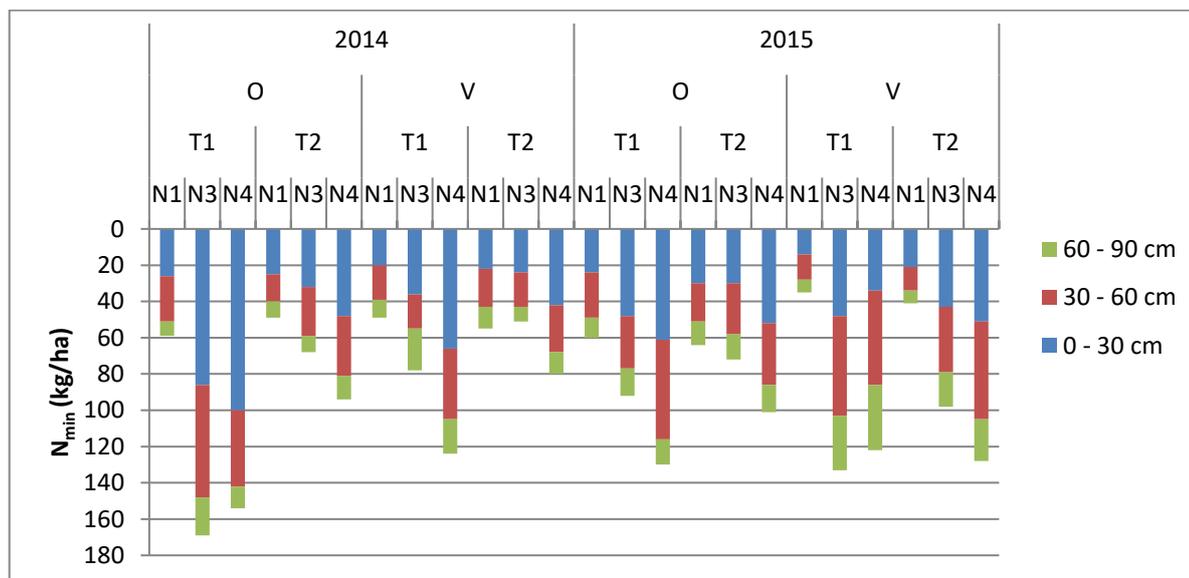


Abbildung 64: N_{min} -Werte zu Vegetationsende 2014 und 2015 nach Silomais in Braunschweig (O=O-Betrieb, V=V-Betrieb, N1=SW-50 %, N3=SW, N4=SW+25 %, N5=SW+50 %, T1=Mineralische Düngung, T2=Schleppschlauch)

Auch in Braunschweig ist das höhere Mineralisationspotential im O-Betrieb angedeutet erkennbar. Deutlicher ist aber der Unterschied zwischen mineralischer und organisch mineralischer Düngung. Während sich in den Einzeljahren und innerhalb der Betriebssysteme die reine Unterfußdüngung nicht unterscheidet, weisen die mineralisch nach Sollwert und Sollwert + 25 % gedüngten Parzellen teilweise deutlich höhere Restnitratmengen zu Vegetationsende auf, als die vergleichbaren organisch-mineralisch gedüngten Varianten. Zur Klärung der Ursachen sollten hier noch weitere Untersuchungen folgen.

3.4 Zusammenfassung

Ziel des Teilprojektes Düngeoptimierung war die Überprüfung der Empfehlungen zur N-Düngebedarfsermittlung nach der Sollwertmethode (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2015) unter den Bedingungen der Betriebssysteme bei Wintergerste, Winterweizen, Winterraps und Silomais. Zwischen den Betriebssystemen werden die Bodenbearbeitung, die Fruchtfolge, die Düngerform und Düngerplatzierung variiert. Nach der Sollwertmethode werden standort- und bewirtschaftungsabhängige Zu- und Abschläge vorgenommen. Für die organische Düngung mit Gärrest wurde im viehhaltenden und im optimierten Betrieb bei der Düngebedarfsermittlung ein Mineraldüngeräquivalent von 70 % angenommen. Bei der Bilanzierung wurde der Stickstoff im Gärrest zu 85 % angerechnet um nur die unvermeidlichen Ausbringungsverluste zu berücksichtigen.

In Wintergerste wurde die Düngebemessung nach der Vorfrucht Ackerbohnen im optimierten Betrieb gegenüber der üblichen Vorfrucht Winterweizen geprüft. Das Sollwertverfahren bildet die zu erwartende Nachlieferung aus der Vorfrucht bei Ackerbohnen und Winterweizen am Standort Braunschweig sowie nach Winterweizen in Soest korrekt ab. Auf dem Standort Soest werden nach Ackerbohnen auch mit einer deutlich abgesenkten N-Düngung gleiche Erträge bei ausreichenden Qualitäten und deutlich negativen N-Bilanzsalden erreicht. Durch das hohe Mineralisationsvermögen des Standortes Soest ist die Wirkung der Steigerung der N-Düngung gering. Die Ertragsschwankungen erschweren zusätzlich die Bestimmung von standortspezifischen Abschlägen zur Verbesserung des N-Sollwertverfahrens nach der Vorfrucht Ackerbohnen. Bei einer Düngung auf den Sollwert werden auch nach Ackerbohnen noch ausgeglichene Bilanzen gefunden, so dass im Mittel der drei Jahre unabhängig von der Vorfrucht bei einer Düngung auf den Sollwert sowohl Erträge und Qualitäten im optimalen Bereich als auch ausgeglichene N-Bilanzen erreicht werden. Auch die Annahme eines Mineraldüngeräquivalents (MDÄ) bei der Düngung mit Gärresten von 70 % zur Düngeplanung und 85 % zur N-Bilanzierung erscheint zutreffend.

Die N-Düngung zum Winterweizen wurde sowohl im Marktfruchtbetrieb als auch im optimierten Betrieb nach Winterraps geprüft. Im Marktfruchtbetrieb erfolgt die Düngung mineralisch nach Mulchsaat und im optimierten Betrieb organisch mineralisch nach Direktsaat. Das Sollwertverfahren mit standort- und bewirtschaftungsabhängigen Zu- und Abschlägen bildet die zu erwartende Nachlieferung aus der Vorfrucht Winterraps auf beiden Standorten und beiden Betriebssystemen sehr gut ab. Auch die Annahme eines MDÄ von 70 % für den Gärrest und mit Abschlägen bei mehrjähriger Anwendung von Gärresten ist zutreffend, so dass insgesamt bei Winterweizen mit einer Düngung auf den Sollwert ökonomisch optimale Erträge und Qualitäten sowie ausgeglichene Bilanzen erreicht werden.

Die optimalen Winterrapsenerträge werden in Braunschweig in beiden Betriebssystemen sowie in Soest im Marktfruchtbetrieb mit einer Düngung auf den Sollwert erzielt. Die Abschätzung der Nachlieferung bei

mehrfähriger organischer Düngung gestaltet sich auf dem Standort Soest schwierig, da im optimierten Betrieb in einzelnen Jahren sowohl eine mäßige als auch keine N-Düngerwirkung zu finden ist. Im Mittel der Jahre ist tendenziell die Düngung auf den Sollwert gesichert. Grundsätzlich werden beim Raps auch bei einer deutlich abgesenkten N-Düngung auf nur noch 50 % des Sollwertes positive N-Bilanzsalden gefunden. Jedes gedüngte kg Stickstoff erhöht den N-Bilanzsaldo um 0,8 kg. Dennoch wird die Richtigkeit der N-Sollwertmethode mit der Annahme des MDÄ von 70 % für den Gärrest und der Berücksichtigung der Nachlieferung in den Folgejahren durch Abschläge durch die nahezu identischen N-Bilanzsalden zwischen der organisch-mineralischen Düngung im optimierten Betrieb und der rein mineralischen Düngung im Marktfruchtbetrieb bestätigt.

Der Silomaisertrag wird vor allem durch die Intensität der Bodenbearbeitung bestimmt. Auf beiden Standorten ist aufgrund der Erfahrungen der ersten Projektphase zumindest eine streifenförmige Lockerung im optimierten Betrieb durchgeführt worden, im Veredelungsbetrieb wurde zusätzlich noch eine flächige Saatbettbereitung vorgenommen. Unter diesen Bedingungen werden auf beiden Standorten mit einer Düngung nach Sollwert sowohl mit einer mineralischen und einer organisch-mineralischen Düngung mit Schleppschlauch jeweils optimale Erträge erreicht. Damit wird auch beim Silomais das MDÄ für Gärrest von 70 % bestätigt.

Das nur in Soest geprüfte Gülle-Strip-Till-Verfahren sichert unter ungünstigen Bedingungen bei knappen bis angepassten Düngermengen die Ertragsleistung und ist ertragsgleich zum Standardverfahren mit flächiger Lockerung und Gärrestaubsbringung mit Schleppschlauch. Auf dem Standort in Braunschweig kann der Sollwert leicht abgesenkt werden. Mit dieser Düngung werden ohne Ertragsrisiko auf beiden Standorten negative N-Bilanzsalden von 20-40 kg N/ha erreicht. Damit trägt der Silomaisanbau zum Ausgleich der unvermeidbaren N-Bilanzüberschüsse anderer Fruchtfolgeglieder bei, so dass die Fruchtfolge insgesamt akzeptable N-Bilanzen hat.

Durch die Bewirtschaftung werden in Herbst nach den Düngeversuchen die Restnitratgehalte sehr unterschiedlich beeinflusst. Durch ein gezieltes Management kann in der Regel der Anstieg der Nitratgehalte nach einer Düngung auf den Sollwert auf unter 50 – 60 kg/ha N begrenzt werden. Probleme bereitet das durch Leguminosen-, Raps- und Zwischenfruchtanbau erhöhte Mineralisationspotential im O-Betrieb, für dessen gezielte Nutzung noch Strategien entwickelt werden müssen. Nach den Düngevarianten, die über dem Sollwert gedüngt worden sind, steigen die auswaschungsgefährdeten Nitratmengen teilweise deutlich an. Auch das ist ein Indiz für die Richtigkeit der Bemessung des Gärresteinsatzes nach der N-Sollwertmethode mit einem MDÄ von 70 %.

3.5 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

Im Teilprojekt N-Düngeoptimierung wurden wie geplant jährlich auf 8 Fruchtfolgefeldern beider Standorte Düngeversuche durchgeführt:

- 1a. Wintergerste nach Ackerbohnen in Direktsaat im O-Betrieb (O)
- 1b. Wintergerste nach Winterweizen in Mulchsaat im V-Betrieb (V)
- 2a. Winterweizen nach Winterraps mit Mineraldüngung und intensiver Bodenbearbeitung im Marktfruchtbetrieb (M)
- 2b. Winterweizen nach Winterraps mit organisch-mineralischer Düngung und Direktsaat im O-Betrieb (O)
- 3a. Winterraps nach Pflugfurche und mit mineralischer N-Düngung im Marktfruchtbetrieb (M)
- 3b. Winterraps nach Direktsaat und mit organisch mineralischer N-Düngung im O-Betrieb (O)
- 4a. Mais nach Wintergerste mit 3 Technikvarianten mit angepasster Direktsaat im O-Betrieb
- 4b. Mais nach Wintergerste mit 3 Technikvarianten mit Mulchsaat im V-Betrieb (V)

Mit diesen Versuchen konnten die zu klärenden Fragen beantwortet werden:

1. Über die Anrechenbarkeit der durch die Körnerleguminosen fixierten N-Mengen in den nachfolgenden Früchten besteht noch Unsicherheit.

Mit den Versuchen 1a und 1b konnte am Standort Braunschweig die Richtigkeit der Anrechnung der durch die Körnerleguminosen fixierten N-Mengen durch das Sollwertverfahren in Höhe von 20 kg/ha in der nachfolgenden Wintergerste festgestellt werden. Am Standort Soest konnte festgestellt werden, dass eine deutlich höhere Anrechenbarkeit möglich ist. Die Höhe kann aber aufgrund des hohen allgemeinen Mineralisationspotentials des Standortes nicht genauer fixiert werden. Hier besteht noch Untersuchungsbedarf.

2. Unklarheit besteht auch über die Wirksamkeit der Düngung mit Gärresten bei durchgängiger Direktsaat (O-Betrieb) im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung (M- und V-Betrieb).

Mit den Versuchen 2a, 2b und 3a, 3b wurde dieser Frage nachgegangen.

Mit einer Düngung nach dem N-Sollwertverfahren werden die optimalen Winterrapsertträge in Braunschweig in beiden Betriebssystemen sowie in Soest im Marktfruchtbetrieb erreicht. Die Abschätzung der Nachlieferung bei mehrjähriger organischer Düngung gestaltet sich auf dem Standort Soest schwierig, da im optimierten Betrieb in einzelnen Jahren sowohl eine mäßige als auch keine N-Düngerwirkung zu finden ist. Im Mittel der Jahre ist tendenziell die Düngung auf den Sollwert gesichert. Dennoch wird die Richtigkeit der N-Sollwertmethode mit der Annahme des MDÄ von 70 % für den Gärrest und der Berücksichtigung der Nachlieferung in den Folgejahren durch Abschläge durch die nahezu identischen N-Bilanzsalden zwischen der

organisch-mineralischen Düngung im optimierten Betrieb und der rein mineralischen Düngung im Marktfruchtbetrieb bestätigt.

Im Winterweizen bildet das Sollwertverfahren mit standort- und bewirtschaftungsabhängigen Zu- und Abschlägen die zu erwartende Nachlieferung aus der Vorfrucht Winterraps auf beiden Standorten und beiden Betriebssystemen sehr gut ab. Auch die Annahme eines MDÄ von 70 % für den Gärrest und mit Abschlägen bei mehrjähriger Anwendung von Gärresten ist zutreffend, so dass insgesamt bei Winterweizen mit einer Düngung nach den Sollwertverfahren ökonomisch optimale Erträge und Qualitäten sowie ausgeglichene Bilanzen erreicht werden.

3. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur Einarbeitung (Direktsaat) einerseits und den im Vergleich zu anderen Kulturen meist höheren Temperaturen bei der Ausbringung andererseits ist die Gärrestdüngung zum Mais im O-Betrieb mit potentiell besonders hohen gasförmigen N-Verlusten verbunden. Andererseits kann gerade der Mais durch sein intensives Wachstum in den Sommermonaten den aus dem organischen Anteil der Gärreste mineralisierten Stickstoff besonders gut verwerten.

Die Düngeversuche im Mais wurden gegenüber der Planung im Antrag erweitert. Die nur zwischen den Großflächen geplante Variation der Gärrestaustausbringung mit dem üblichen Schleppschlauchverfahren und der neuen Strip-Till-Technologie wurde in die Parzellenversuche integriert und um eine rein mineralische Düngung erweitert. In jedem der Versuche wurden in Soest drei und in Braunschweig zwei technische Verfahren der N-Düngung installiert. In jeder dieser Technikvarianten wurden in Braunschweig vier und in Soest fünf N-Düngungsstufen realisiert. Dadurch war es möglich ein sehr differenziertes Bild der Effekte der Ausbringungstechnik und der N-Menge sowie der Gärrestwirkung auf den Maisertrag zu bekommen. Dies wäre mit der ursprünglichen Planung weit weniger gut möglich gewesen.

Wie geplant wurden die Düngeversuche als Basis für umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich der N-Nährstoffdynamik in Boden und Pflanze herangezogen. Hier ergaben sich keine Abweichungen zur Planung. Das gilt vor allem auch für die umfangreichen Messungen zu den relevanten Klimagasen. Hierzu siehe auch das Teilprojekt Klimagase.

4 Teilprojekt Klimagase

4.1 Einleitung

4.1.1 Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft

Der Einsatz der Strip-Till-Technik sollte in dieser Projektphase die Erfüllung eines der zentralen Ziele, die Emissionen landwirtschaftlicher Produktion weiter zu reduzieren, forcieren (BOCK & BENSING, 2012; LAURENZ, 2012). Bisher fehlten jedoch konkrete Untersuchungen zur Emission von Lachgas (N_2O) beim Einsatz bodenschonender Strip-Till-Technik in Kombination mit Biogasgärrestinjektion und einem damit möglicherweise verbundenen „Trade-Off“ zwischen der Minderung von Emissionen von Ammoniak (NH_3) und einer Steigerung der Lachgasemissionen (FLESSA & BEESE, 2000; WEBB et al., 2010).

In Deutschland gibt es einen generellen Trend zur Verringerung der Lachgasemissionen von etwa 35 %. In der Landwirtschaft hingegen ist nur eine Reduktion von etwa 14 % zu verzeichnen. Der relative Anteil der Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft an den nationalen Gesamtemissionen steigerte sich seit 1990 daher von 60 % auf etwa 78 % (NIR, 2013, FLESSA et al., 2014). Die atmosphärische Konzentration von N_2O steigt ebenfalls seit 1990 kontinuierlich an, was zu erhöhtem politischen Druck auf die Landwirtschaft führt um einen Beitrag zu Treibhausgasminderungsstrategien zu leisten (IPCC, 2001).

N_2O -Emissionen sind hauptsächlich durch die Verfügbarkeit von mineralischem Stickstoff (Ammonium und Nitrat), der Verfügbarkeit mikrobiell leicht verwertbarer organischer Substanzen, dem Wassergehalt des Bodens und der Bodenbelüftung gesteuert und können im gesamten Jahresverlauf auftreten (FIRESTONE & DAVIDSON, 1989; FLESSA et al., 1995). In der Landwirtschaft spielt das Stickstoffmanagement eine signifikante Rolle in der Beeinflussung der Steuerungsfaktoren von Lachgasemissionen, da es direkt mikrobielle Prozesse wie Nitrifikation und Denitrifikation, die beiden Hauptprozesse der Lachgasproduktion, beeinflusst (BREMNER, 1997; HALVORSON et al., 2011; MÜLLER & CLOUGH, 2014). N-Management ist aber auch für eine Optimierung von Erträgen notwendig, was im Kontrast zu Minderungspotentialen von Anbausystemen stehen kann (ARCHER et al., 2008; BOUWMAN et al., 2002; VAN GROENIGEN et al., 2010).

4.1.2 Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft

Ammoniakemissionen stellen vor allem nach einer organischen Düngung eine große Herausforderung im Hinblick auf die Stickstoffnutzungseffizienz in der landwirtschaftlichen Produktion dar, weil die emittierte N-Menge nicht mehr für die Aufnahme in die Pflanze zur Verfügung steht (CHRISTIANSON et al., 1990; ROELCKE et al., 2002). Emissionen von NH_3 können aber auch über die Deposition zu einer Eutrophierung von Ökosystemen, Boden- und Wasserversauerung und indirekten Emissionen von Lachgas führen (ECETOC, 1994; ANDERSON et al., 2003; FLESSA et al., 2014). Die meisten Wirtschaftsdünger (organische Dünger, bspw. Biogasgärreste) enthalten hohe Konzentrationen von Ammonium oder Ammonium-bildenden Stickstoffformen wie Harnstoff oder Harnsäure. Abhängig vom pH-Wert sind diese stark

ausgasungsgefährdet für NH_3 . Des Weiteren sind Ammoniak Emissionen bestimmt durch atmosphärische Bedingungen und deren Veränderung über die Zeit, und treten, im Gegensatz zu N_2O Emissionen, nur direkt nach der Düngung bis wenige Tage danach auf. Beispiele für weitere Steuerungsfaktoren für NH_3 Emissionen sind Temperaturen von Boden und Luft, Windgeschwindigkeiten, Bodentyp, die Kontaktfläche von Dünger zu Atmosphäre, die Jahreszeit sowie die Wuchshöhe der angebauten Frucht (ROELCKE et al., 2002; PACHOLSKI et al., 2006; FLESSA et al., 2014).

4.1.3 Management- und Düngesysteme

In Deutschland ist die Applikation von flüssigen organischen Düngern mittels Breitverteiler noch immer weit verbreitet und gängige Praxis (DESTATIS, 2011). Auf unbewachsenen Flächen sieht die derzeit gültige Düngeverordnung eine vollständige Einarbeitung organischer Dünger innerhalb der ersten vier Stunden nach Ausbringung vor. Auf bewachsenen Flächen (bspw. Silomais oder Grünlandflächen) ist eine Ausbringung mittels Schleppschlauch und Schleppschuh zur Verminderung von NH_3 -Emissionen ratsam (UMWELTBUNDESAMT, 2014).

Einige Studien haben gezeigt, dass ein N-Management durch Bodenbearbeitung oder spezialisierte Düngetechniken signifikanten Einfluss auf Treibhausgasemissionen wie N_2O oder die Emission von NH_3 haben kann (FRANZLUEBBERS et al., 1995; LEMKE et al., 1999; RUSER et al., 2001; CHOUDHARY et al., 2002; WULF et al., 2002; DRURY et al., 2006; WEBB et al., 2010; HALVORSON et al., 2011; VELTHOF & MOSQUERA, 2011; FLESSA et al., 2012; ABDALLA et al., 2013). In einem Überblicksartikel von WEBB et al. (2009) gibt es eine Zusammenfassung von publizierten Daten zum Einfluss von Düngetechniken auf Ammoniakemissionen. So können auf unbewachsenen Flächen mit einer Schleppschlauchausbringung und sofortigen Einarbeitung von organischen Düngern im Vergleich zu einer Breitverteilung NH_3 Emissionen fast vollständig vermieden werden. In stehenden Beständen können Techniken wie Schleppschlauchausbringung helfen Emissionen von NH_3 um etwa 40 – 60 % zu verringern. Mit einer direkten Injektion von organischen Düngern in den Boden (wie bspw. beim Strip-Till-Verfahren als Unterflurdüngung) können ebenfalls NH_3 Emissionen nahezu vollständig vermieden werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist allerdings der kombinierte Einfluss von Bodenbearbeitungs- und Fruchtfolgesystemen und Düngetechniken auf bodenbürtige Treibhausgasemissionen gekoppelt an NH_3 Emissionen nur unzureichend untersucht (FLESSA et al., 2014). Sowohl Bodenbearbeitung, Düngetechnik als auch die Fruchtfolge können einen Einfluss auf N_2O Emissionen haben. Der Gehalt an mineralischen Stickstoff wird durch synthetische oder organische Dünger erhöht. Die Einarbeitung von Ernterückständen führt zu einer Erhöhung des organischen Kohlenstoffs und damit zu erhöhter mikrobieller Aktivität im Boden. Speziell in Direktsaatsystemen kann es zu einer Verringerung der Sauerstoffverfügbarkeit kommen, was Denitrifikationsprozesse begünstigen kann. Gerade eine Strip-Till-Unterflurdüngung mit flüssigen organischen Düngern kann durch die Bildung lokal anoxischer Bedingungen in den Injektionszonen, hohen und konzentrierten Mengen an mineralischem Stickstoff und der Erhöhung leicht abbaubarer Kohlenstoffanteile zu einer Steigerung der N_2O Emissionen führen. Beim Einsatz dieser

Technik ist also eine Erhöhung der N₂O Produktion aus Nitrifikation und Denitrifikation sehr wahrscheinlich möglich. Eine sofortige Einarbeitung vor der Aussaat führt meist zu einer guten Verhinderung von Ammoniakemissionen. Es ist nicht eindeutig, ob ein Konflikt zwischen der Verringerung von sowohl NH₃ als auch N₂O-Emissionen besteht. Da jedoch durch die Minderung der NH₃-Emissionen auch indirekte N₂O-Emissionen verringert werden, kann die sofortige Einarbeitung eine effiziente Klimaschutzmaßnahme sein (WEBB et al., 2010; FLESSA et al., 2014).

4.1.4 Biogas Gärreste (Produktion von Bioenergie)

Aber nicht nur das N-Management ist, wie oben gezeigt, verantwortlich für die Steuerung gasförmiger Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Auch der Anbau bestimmter Früchte und der Grund für deren Anbau können zu einer Erhöhung von Treibhausgasemissionen führen. Obwohl Bioenergie bzw. Biotreibstoffe oft als „CO₂-neutral“ (SENBAYRAM et al., 2014) deklariert werden, kann die Produktion der Rohstoffe (bspw. Früchte zur Bioenergiegewinnung wie Silomais) und die anschließende Wiederverwendung ihrer Rückstände (Biogas Gärreste als Dünger) zu einer Erhöhung bodenbürtiger Treibhausgasemissionen führen (ADLER et al., 2007; CHERUBINI & JUNGMEIER, 2010; HENNIG & GAWOR, 2012). Die meisten Anbausysteme für Bioenergie benötigen darüber hinaus einen hohen Aufwand an Stickstoffdüngern, was zu signifikanten Emissionen von N₂O führen kann (WEIER et al., 1993). Und obwohl Biogas Gärreste mit der Verwendung als Dünger dazu gedacht sind, betriebsinternes Nährstoffrecycling in der Produktion von Energiepflanzen umzusetzen, enthalten sie dennoch hohe Gehalte an mineralischem Stickstoff und organischem Kohlenstoff, was mikrobielle Bodenprozesse wie Nitrifikation und Denitrifikation beschleunigt und somit auch die Gefahr von N₂O Emissionen erhöht (SENBAYRAM et al., 2009; KOESTER et al., 2011; ABUBAKER et al., 2013).

4.1.5 Klimaausgewählte Anpassungsstrategien in der Landwirtschaft: Ziele

Da es bisher nur wenige Studien auf den langfristigen Einfluss von Bodenbearbeitung, Düngung und Fruchtart auf Lachgas- und Ammoniakemissionen und deren Steuerungsfaktoren gibt (ABDALLA et al., 2013; BAYER et al., 2016; WEBB et al., 2010; SENBAYRAM et al., 2014; SEHY et al., 2003; DRURY et al., 2006; DRURY et al., 2011; ANDERSON et al., 2003), wurden in einer Auswahl von Varianten der angelegten Versuche Daten zu Ammoniak- und Lachgasemissionen erhoben. Diese Daten sollten es ermöglichen, zuverlässige Aussagen über die Treibhausgasemissionspotentiale der unterschiedlichen Betriebsformen zu treffen. Die Fragen und Ziele dieser Untersuchung waren also:

1. Welches Betriebssystem (Anbausystem mit Bodenbearbeitung, Düngung und Düngetechnik) zeigt die geringsten Lachgasemissionen?
2. Welche Technik (Schleppschlauch in den stehenden Bestand, Gärrest-Unterflurdüngung mit Strip-Till, Schleppschlauch auf unbewachsenen Flächen mit anschließender Einarbeitung) sollte genutzt werden um effizient NH₃-Emissionen zu vermeiden?
3. Führen diese Techniken zu erhöhten N₂O Emissionen?

4. Wenn ja: Wie können diese Techniken gegebenenfalls modifiziert werden um negative Effekte auf N₂O Emissionen zu vermeiden?

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Getestete Varianten

In einer Auswahl der angebauten Kulturen (Silomais und Winterweizen) wurden Lachgas- und Ammoniakemissionen gemessen um die Höhe der gasförmigen Stickstoffverluste (über N₂O und NH₃) und deren Klimawirksamkeit zu ermitteln. Hierbei wurden alle Wiederholungen der in den angelegten Exaktversuchen ausgewählten Sollwert-Varianten (um Betriebs- und Standortvergleiche zu ermöglichen) erfasst (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Getestete Varianten auf N₂O- und NH₃-Emissionen

Düngetechnik	Betrieb	Frucht	Standort	Gemessene Emission
Mineralische Düngung (T1)	O-Betrieb	Silomais	Soest	N ₂ O
	M-Betrieb	Winterweizen	Soest	N ₂ O
	M-Betrieb	Winterweizen	Braunschweig	N ₂ O
Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand + mineralische Ergänzung (T2)	O-Betrieb	Silomais	Soest	N ₂ O + NH ₃
	O-Betrieb	Silomais	Braunschweig	N ₂ O + NH ₃
	O-Betrieb	Winterweizen	Soest	N ₂ O
	O-Betrieb	Winterweizen	Braunschweig	N ₂ O
Strip-Till Gärrestunterflurdüngung + mineralische Ergänzung (T3)	O-Betrieb	Silomais	Soest	N ₂ O + NH ₃
Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat + mineralische Ergänzung (T2)	V-Betrieb	Silomais	Soest	N ₂ O + NH ₃
	V-Betrieb	Silomais	Braunschweig	N ₂ O + NH ₃

4.2.2 Datenerhebung und Analyse für N₂O

Die Treibhausgasmessungen (N₂O und CH₄) erfolgten wöchentlich und kontinuierlich über den Zeitraum von zwei Jahren (Juni 2014 bis Juni 2016). Die Beprobung wurde, wenn möglich, immer am selben Wochentag

und zur selben Tageszeit durchgeführt. Die Datenerfassung erfolgte dabei mit der geschlossenen Kammermethode (HUTCHISON & MOSIER, 1981; PETERSEN et al., 1981). Hierzu wurde in den getesteten Silomais-Varianten (siehe Tabelle 17) ein quadratischer PVC Rahmen mit 60 x 60 x 15 cm (Ps-plastic, Eching, Deutschland) 5 – 10 cm tief im Boden installiert. In den getesteten Winterweizen-Varianten (siehe Tabelle 17) wurden runde PVC Rahmen mit \varnothing 30 cm (20 cm Höhe) ebenfalls 5 – 10 cm tief im Boden installiert. Im Winterweizen wurden ab einer gewissen Wuchshöhe zusätzlich zu den fest installierten Bodenrahmen noch 50 cm lange Zwischenstücke verwendet um zu gewährleisten, dass die Pflanzen innerhalb der Kammern sind. Die Flussberechnung wurde hier entsprechend des neuen Kammervolumens angepasst. Im Silomais wurden quadratische PVC-Kammern (60 x 60 x 70 cm) eingesetzt (Ps-plastic, Eching, Deutschland). Diese waren zur Lufthomogenisierung mit zwei Lüftern ausgestattet sowie Schläuchen um einen Druckausgleich zwischen Kammer und Atmosphäre zu gewährleisten. Im Winterweizen kamen runde Kammern (\varnothing 30 x 30 cm) zum Einsatz. Diese waren ebenfalls zur Lufthomogenisierung mit einem Lüfter ausgestattet und Druckausgleichsschläuchen. Im Silomais wurden die Rahmen, in der Annahme, dass dies zu keinem signifikanten Fehler in der Flussberechnung führt (WALTER et al., 2014; WALTER et al., 2015), zwischen den Pflanzenreihen (75 cm Reihenabstand) installiert. Im Winterweizen wurde die Rahmen so platziert, dass die Pflanzen innerhalb der Rahmen wachsen. Für die Beprobung wurden die Kammern über einen Zeitraum von einer Stunde auf den installierten Bodenrahmen platziert. Die Proben wurden direkt nach Aufsetzen der Kammer und dann im 20-minütigen Abstand genommen (0 Minuten, 20 Minuten, 40 Minuten, 60 Minuten). Hierzu wurden manuelle, aber auch neuentwickelte automatische Pumpsysteme verwendet. Die Proben wurden bei beiden Systemen direkt in Bördelrandflaschen (20 ml, verschlossen mit einem Butyl Septum) abgefüllt.

Die Konzentrationen von N_2O , CH_4 und CO_2 wurden mittels Gaschromatographie (GC 2014, Shimadzu, Duisburg, Deutschland) am Thünen-Institut für Agrarklimaschutz in Braunschweig analysiert. Der Gaschromatograph war dabei für N_2O und CO_2 mit einem Elektronen-Einfang-Detektor (ECD), für CH_4 mit einem Flammen-Ionisations-Detektor (FID) ausgestattet sowie einem automatischen Probenahmesystem (P65, Loftfields Analytical Solutions, Neu Eichenberg, Deutschland). Die Präzision der Analyse wurde mindestens wöchentlich getestet und war konstant $> 97 \%$. Zusätzlich zu jedem Probenahmezeitpunkt wurden ergänzende Parameter erhoben, um die Regulation der gasförmigen Stickstoffemissionen besser zu verstehen und eine Verallgemeinerung der Ergebnisse zu ermöglichen. Hierzu gehören die Bodentemperatur, Lufttemperatur, Kammertemperatur, Windgeschwindigkeiten und Niederschlagsdaten.

4.2.3 Erfassung der Ammoniakemissionen

Zur Erfassung der NH_3 Emissionen wurde die sogenannte „Dräger-Tube-Methode“ verwendet. Die Methode wurde ursprünglich zur Messung von CO_2 Emissionen aus Böden entwickelt (RICHTER, 1972). Roelcke modifizierte diese Methode, um quantitative mikrometeorologische Messungen zur NH_3 Verflüchtigung auf landwirtschaftlich genutzten Boden nach Düngung durchzuführen (ROELCKE, 1994; ROELCKE et al., 2002;

PACHOLSKI et al., 2006). Bei dieser Methode wird Luft mittels einer Handpumpe durch vier Kammern welche auf dem gedüngten Boden platziert sind gesogen (415 cm² abgedeckte Bodenoberfläche, 104 cm² pro Kammer). Die mit NH₃ angereicherte Luft wird durch Teflon Schläuche durch ein NH₃-sensitives Teströhrchen („Dräger Gas Analyse Detektor Rohr“, DRÄGERWERK AG, Lübeck, Deutschland) geleitet. Dieses erlaubt durch Färbung ein sofortiges Ablesen der NH₃ Konzentration. Unter Einbezug der definierten Bodenoberfläche und dem definierten Luftvolumen pro Zeiteinheit kombiniert mit der Lufttemperatur, dem barometrischen Luftdruck und Windgeschwindigkeiten, können NH₃-Flüsse berechnet werden. Kalibrierte Flüsse wurden unter Zuhilfenahme folgender Gleichungen berechnet (PACHOLSKI et al., 2006; GERICKE et al., 2010):

$$(1) F_{Ng} = \text{volume} * |\text{conc}| * (\rho) \frac{1013 \text{ hPa}}{\text{hPa}} * (\vartheta) \left(\frac{696.11 \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] * 298.15}{(273.15 + T_{akt}(^{\circ}\text{C}))} \right) * 10^{-6} * (U_N) \frac{14}{17} * (U_F) \frac{10000 [\text{cm}^2]}{415 [\text{cm}^2]} * (U_Z) \frac{3600 [\text{s}]}{\text{measuring time} [\text{s}]}$$

Dabei ist F_{Ng} der NH₃ Fluss (mg N m⁻² h⁻¹), volume das Luftvolumen, welches durch die vier Kammern gesogen wurde (0,1 L * Pumpvorgänge), |conc| ist der Wert der Volumen-Konzentration von NH₃ (Volumen ppm), (ρ) ist die Korrektur für den tatsächlichen barometrischen Luftdruck, (ϑ) ist die temperaturabhängige Konzentration von NH₃ (mg l⁻¹), (U_N) ist die Konvertierung der molekularen Masse von NH₃ zu N, (U_F) ist der Konvertierungsfaktor für die Bodenoberfläche (m²) und (U_Z) ist der Konvertierungsfaktor für die Zeit (h⁻¹). Um einer Unterschätzung der NH₃-Verluste vorzubeugen, kamen zwei Kalibrationsgleichungen für niedrige (<0,8 m) und hohe (>0,8 m) Bestände zum Einsatz:

$$(2) \text{ (Niedrige Bestände): } \ln(\text{calibrated flux}) = 0.444 \ln(\text{converted } F_{Ng}) + 0.590 \ln(V_{\text{Wind } 2 \text{ m}})$$

$$(3) \text{ (Hohe Bestände): } \ln(\text{calibrated flux}) = 0.456 \ln(\text{converted } F_{Ng}) + 0.745 \ln(V_{\text{Wind } 2 \text{ m}}) - 0.280 \ln(V_{\text{Wind } 0.2 \text{ m}})$$

V repräsentiert dabei die Windgeschwindigkeiten in 2 und 0,2 m Höhe. Mit den Messungen zu Ammoniakemissionen wurde direkt nach der organischen Düngung begonnen. Die Messungen wurden auf allen getesteten Varianten (siehe Tabelle 17) stündlich für vier Stunden (nach der Ausbringung) wiederholt. Nachfolgende Messungen wurden im 4-Stunden Takt bis Sonnenuntergang durchgeführt. Die Messungen wurden am Folgetage mit Sonnenaufgang zunächst im 2-Stunden Takt (erste und zweite Messung des Tages), danach wieder im 4-Stunden Takt fortgeführt, bis die gemessenen NH₃ Konzentrationen die Werte der ungedüngten Kontrollparzelle erreichten.

4.2.4 Boden: Beprobung und Analyse

Parallel zu den wöchentlichen Lachgasmessungen wurde mittels eines Göttinger Bohrstocks (\varnothing 12 mm, Nietfeld GmbH, Quakenbrück, Deutschland) eine Beprobung des Oberbodens (0 – 30 cm) durchgeführt. Die Bodenproben wurden bis zur Analyse im Labor des Thünen-Instituts aus transporttechnischen Gründen bei -20°C eingefroren. Vor der Analyse wurden die Bodenproben bei $5,6^{\circ}\text{C}$ über Nacht aufgetaut um signifikante Änderungen im Gehalt an mineralischem Stickstoff vorzubeugen (LFL, 2016). Für die Extraktion wurden 50 g aufgetauter Boden in 500 ml Polyethylen Flaschen eingewogen und mit 200 ml 0,01 M CaCl_2 Lösung für eine Stunde auf einem Über-Kopf-Schüttler geschüttelt. Die entstandene Suspension wurde anschließend filtriert (MN614 $\frac{1}{4}$ filters, Macherey & Nagel, Düren, Deutschland). Das Filtrat konnte dann auf Nitrat (NO_3) und Ammonium (NH_4) hin mit einem Segment flow analyzer (SA 5000, Skalar Analytical B.V., Niederlande) untersucht werden. Eine Teilprobe von 30 g wurde bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet um den Wassergehalt der Bodenproben zu bestimmen.

4.2.5 Datenaufbereitung und statistische Analyse

Lachgasflüsse

N_2O -Flüsse aus den Feld- N_2O -Daten wurden mittels linearer Regression, robust linearer Regression und HUTCHINSON-MOSIER Regression (für nicht-lineare Flüsse) berechnet (HUBER & RONCHETTI, 1981; PEDERSEN et al., 2010). Die Wahl der Regressionsmethode folgte dabei einem Algorithmus wie in LEIBER-SAUHEITL et al. (2014) beschrieben, basierte aber auf der Kalkulation der Standardfehler wie im korrigierten Update des HMR Package zur Version 0.4.1 (PEDERSEN, 2015). Daraus resultierte, dass nahezu alle N_2O -Flüsse robust linear berechnet wurden (>98 %). Um Ausreißer zu identifizieren wurde die Verteilung der Quadratwurzeln der Fluss-Standardfehler überprüft, welche aus den Regressionen berechnet wurden. Bei Auftreten hoher Standardfehler wurden die entsprechenden Flüsse einzeln geprüft um sicherzustellen, dass die Standardfehler nicht aus Fehlern bei den Probenahmen oder fehlendem Überdruck in den Vials zum Zeitpunkt der Analyse hervorgegangen war. Zusätzlich konnten die CO_2 -Flüsse als Qualitätsparameter der Beprobung herangezogen werden. Die Flussraten sind dargestellt als Mittelwerte ($n=4$) mit Standardabweichung der Replikate. Kumulative N_2O -Emissionen wurden aus den N_2O -Flüssen pro Replikat mittels linearer Interpolation zwischen zwei Beprobungszeitpunkten berechnet. Um einen Vergleich der Betriebe und Varianten zu gewährleisten, wurden unterschiedliche Zeiträume ausgewählt. Die Zeiträume zu den Vergleichen werden im Ergebnisteil näher erläutert.

Statistische Analyse

Sämtliche statistische Analysen wurden mit R 3.3.2 durchgeführt (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016). Für jeden Test wurde auf die kumulativen N_2O -Flüsse eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt, um die Effekte von Bodenbearbeitung (konventionelle Bodenbearbeitung, ohne Bodenbearbeitung und Strip-Till (Streifenbearbeitung)), Düngung (organisch und/oder mineralischer Dünger, Schleppschlauch-ausbringung in den stehenden Bestand, Strip-Till Gärrestunterflurdüngung und Schleppschlauchausbringung mit

anschließender Einarbeitung), Fruchtart (Silomais und Winterweizen) und Standort (Braunschweig und Soest) zu analysieren. Als *post hoc* Test wurde, zum paarweisen Vergleich aller Tests, bei denen die ANOVA signifikante Unterschiede gezeigt hat, der Tukey HSD Test durchgeführt. Für alle Tests wurde das Signifikanzniveau auf $\alpha = 0.05$ gesetzt.

Generalisierte Additive Modelle

Um die Beziehungen zwischen der Varianz der Lachgasflüsse und erklärenden Variablen zu untersuchen, wurden generalisierte additive Modelle (GAM (Mixed GAM Computation Vehicle with GCV/AIC/REML Smoothness Estimation)) angewendet. Solche Modelle sind beispielsweise im R-Package *mgcv* in der Version 1.8-17 implementiert (WOOD & AUGUSTIN, 2002; WOOD, 2011). Solche Modelle können nicht-lineare Zusammenhänge auf nicht-parametrischem Weg testen, indem additiv Glättungsterme angepasst werden. Der Grad der Glättung ist dabei durch die sogenannte „penalized maximum likelihood estimation“ bestimmt. Für diese Analyse wurden alle N_2O -Daten log-transformiert, was üblich für die Untersuchung von Lachgasflüssen ist (FOLORUNSO & ROLSTON, 1984).

Die verwendeten Modellparameter waren der Nitratgehalt der Bodenproben, der Wassergehalt (hier WFPS = **Water Filled Pore Space**) und der CO_2 Fluss (als Indikator für mikrobielle Aktivität), da diese nach derzeitigem Wissensstand Hauptfaktoren für die Steuerung von Lachgasemissionen darstellen. Der Einbezug des Ammoniumgehalts zeigte keine Verbesserung des Modells.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Lachgasemissionen

Die Erfassung der Lachgasemissionen wurde in den drei Projektjahren von Juni 2014 bis Juni 2016, bis auf wenige Ausnahmen, wie geplant in den oben aufgeführten Varianten durchgeführt (siehe auch Abbildung 65 und Abbildung 66). Mit der Aussaat der jeweiligen Fruchtart wurde mit der Erhebung der Daten in den Kleinparzellen begonnen. Die Erhebung wurde nach der Ernte in der Folgefrucht fortgeführt (auf demselben Standort der Messhauben). Mit der Aussaat der jeweiligen Hauptfrucht im Folgejahr (Silomais oder Winterweizen) wurde die Datenerhebung in den neu angelegten Kleinparzellen fortgeführt (Umsetzen der Messrahmen in die neuen Kleinparzellen der Folgefläche).

Zu sehen sind die Jahresverläufe der N_2O -Emissionen ($\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{h}^{-1}$) von Juni 2014 bis Juni 2016 an den beiden Standorten Soest und Braunschweig. Die einzelnen Düngetermine sowie Aussaat und Ernte sind dabei jeweils farblich markiert (**schwarz**: Aussaat; **rot**: Ernte; **grün**: Organische Düngung über Biogas Gärreste; **blau**: Mineralische Düngung (DAP, KAS, AHL)). Bereits anhand der Zeitverläufe ist eine mehr oder weniger starke Reaktion in den Lachgasemissionen nach bestimmten Ereignissen wie Aussaat, Düngung oder Ernte zu erkennen.

Um aber eine sinnvolle Gegenüberstellung der Betriebe, Varianten und Standorte zu ermöglichen mussten geeignete Zeiträume ausgewählt werden. In einem gewählten Zeitraum (bspw. Juni 2014 – Juni 2015 und Juni 2015 – Juni 2016) müssen statistisch sinnvoll miteinander vergleichbare Varianten innerhalb der Zeiträume und an beiden Standorten gleichermaßen abgebildet sein oder aber vergleichbare Varianten an einem Standort innerhalb der Zeiträume. Für o. a. Zeitraum wären das bspw. alle (T2) Varianten der beiden Standorte, d.h. Silomais und Winterweizen (T2, Schleppschlauch in den stehenden Bestand) im O-Betrieb, sowie der Silomais (T2, Schleppschlauch mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat) im V-Betrieb (siehe Tabelle 18). Dem Vergleich der reinen kumulierten Lachgasemissionen folgt dann in einem weiteren Schritt dieselbe Gegenüberstellung unter Zuhilfenahme der ertragsbezogenen kumulierten Lachgasemissionen (siehe Abbildungen im Anhang).

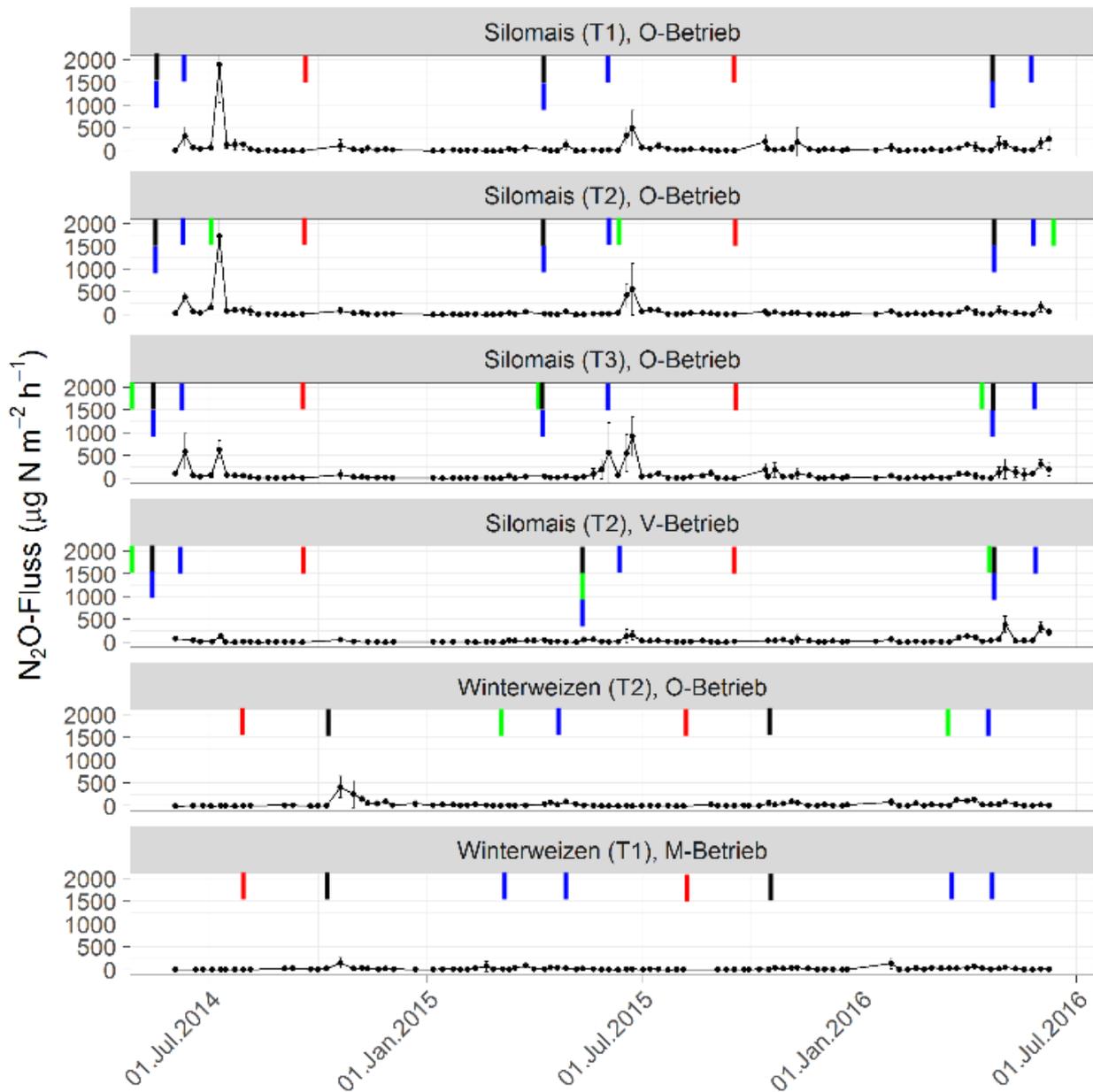


Abbildung 65: Jahresverläufe der Lachgasemissionen von Juni 2014 bis Juni 2016 am Standort Soest. Die farblich markierten Balken entsprechen: | Aussaat; | Ernte; | Organische Düngung (Biogas Gärreste); | Mineralische Düngung (DAP, KAS, AHL). (Silomais (T1) O-Betrieb: Mineralische Düngung; Silomais (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Silomais (T3) O-Betrieb: Strip-Till Gärrestunterflur; Silomais (T2) V-Betrieb: Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat; Winterweizen (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Winterweizen (T1) M-Betrieb: Mineralische Düngung).

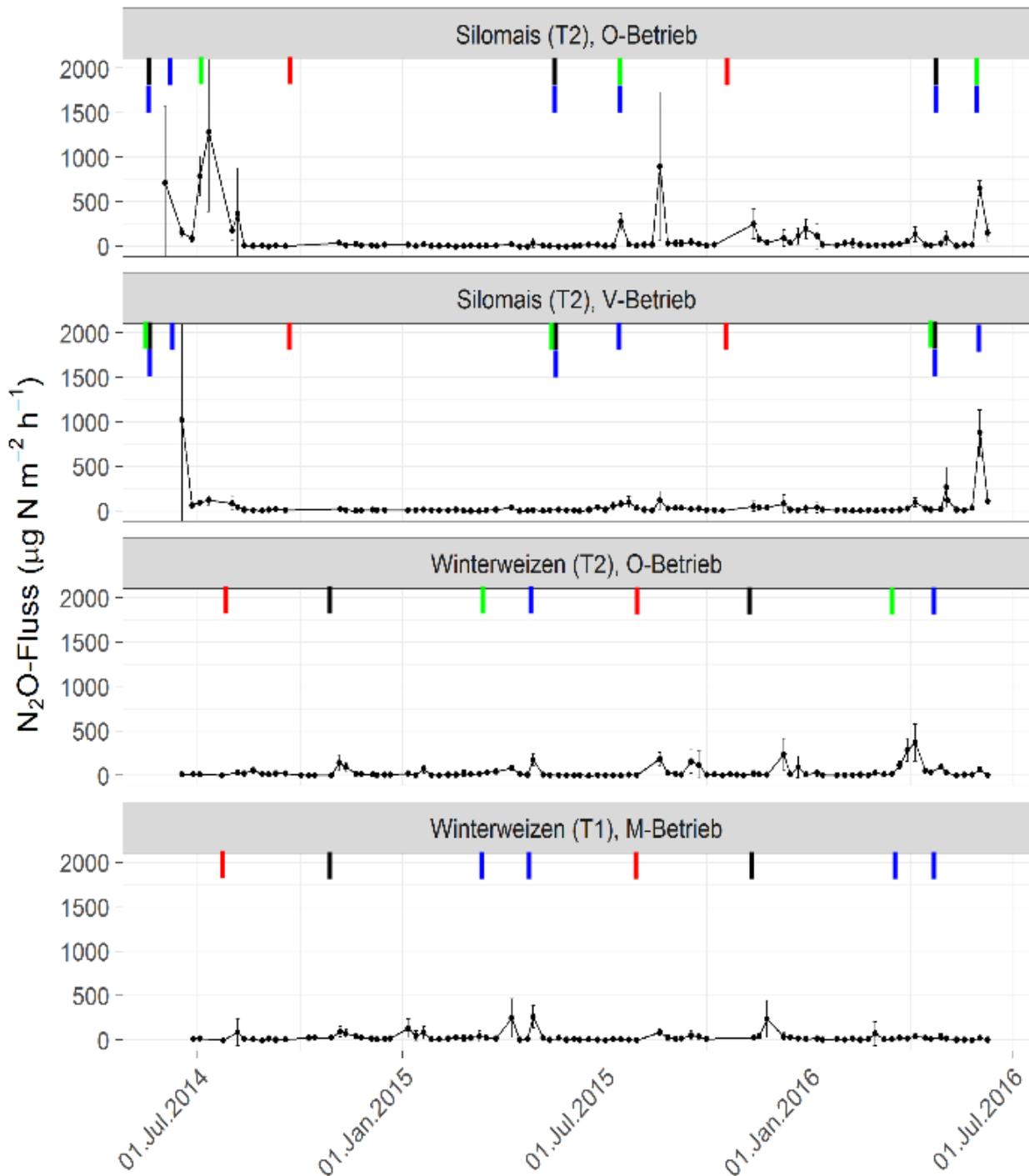


Abbildung 66: Jahresverläufe der Lachgasemissionen von Juni 2014 bis Juni 2016 am Standort Braunschweig. Die farblich markierten Balken entsprechen: | Aussaat; | Ernte; | Organische Düngung (Biogas Gärreste); | Mineralische Düngung (DAP, KAS). (Silomais (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Silomais (T2) V-Betrieb: Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat; Winterweizen (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Winterweizen (T1) M-Betrieb: Mineralische Düngung).

Für einen ersten Vergleich wurde wie oben beschrieben der Zeitraum Juni 2014 – Juni 2015 und der Zeitraum Juni 2015 – Juni 2016 ausgewählt (siehe Tabelle 18 und Anhang Abbildung 132). In diese Zeiträume fallen für sinnvolle Vergleiche, ebenfalls wie oben beschrieben, alle (T2)-Varianten der beiden Standorte (Silomais und Winterweizen T2 im O-Betrieb, Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Silomais T2 im V-Betrieb, Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat). Die ANOVA zeigt hierbei statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($p < 0,05$), den angebauten Früchten ($p < 0,001$) und den Betrieben ($p < 0,001$). Im ersten Jahr hat dabei der Silomais des V-Betriebes am Standort Soest signifikant niedrigere Emissionen als der Winterweizen und der Silomais des O-Betriebes am Standort Soest sowie des Silomais des O-Betriebes am Standort Braunschweig. Der Silomais des V-Betriebes am Standort Soest zeigt jedoch keine geringeren Emissionen als der Winterweizen des O-Betriebes und der Silomais des V-Betriebes am Standort Braunschweig in diesem Zeitraum. Der Silomais des O-Betriebes an beiden Standorten zeigt signifikant höhere Emissionen als alle anderen (T2)-Varianten, am Standort Soest jedoch keine höheren Emissionen als der Winterweizen des O-Betriebes. Zwischen den Winterweizenvarianten des O-Betriebes der beiden Standorte sowie des Silomais des V-Betriebes am Standort Braunschweig zeigen sich keine Unterschiede.

Im zweiten Jahr hat der Silomais des O-Betriebes am Standort Braunschweig signifikant höhere Emissionen als der Silomais des V-Betriebes am Standort Braunschweig sowie der Winterweizen des O-Betriebes am Standort Soest. Gegenüber den anderen Varianten zeigen sich keine Unterschiede.

Über beide Jahre betrachtet hat der Silomais im O-Betrieb am Standort Braunschweig im ersten Jahr signifikant höhere Emissionen als im zweiten Jahr. Umgekehrt stellt sich das für den Winterweizen im O-Betrieb am Standort Braunschweig dar, hier treten im zweiten Jahr höhere Emissionen als im ersten Jahr auf. Für die restlichen Varianten ergeben sich im Vergleich der beiden Jahre keine Unterschiede.

Tabelle 18: Kumulierte Lachgasemissionen (kg N₂O-N/ha/a) über die Zeiträume Juni 2014 – Juni 2015 und Juni 2015 – Juni 2016. Untersuchung der Früchte Silomais und Winterweizen in den Betrieben O und V in der Variante (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

Betrieb	Frucht	Standort	Zeitraum	kg N ₂ O-N/ha/a	ANOVA *
O-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Juni 2014 – Juni 2015	5,35 ± 1,93	de
O-Betrieb (T2)	Winterweizen	Soest	Juni 2014 – Juni 2015	3,35 ± 1,40	bcd
V-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Juni 2014 – Juni 2015	1,53 ± 0,38	a
O-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Juni 2015 – Juni 2016	5,38 ± 1,64	cd
O-Betrieb (T2)	Winterweizen	Soest	Juni 2015 – Juni 2016	2,39 ± 0,34	abc
V-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Juni 2015 – Juni 2016	3,12 ± 0,51	bcd
O-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Juni 2014 – Juni 2015	9,38 ± 2,19	e
O-Betrieb (T2)	Winterweizen	Braunschweig	Juni 2014 – Juni 2015	1,90 ± 0,50	ab
V-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Juni 2014 – Juni 2015	2,59 ± 1,36	abc
O-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Juni 2015 – Juni 2016	5,80 ± 0,45	de
O-Betrieb (T2)	Winterweizen	Braunschweig	Juni 2015 – Juni 2016	4,03 ± 0,34	cd
V-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Juni 2015 – Juni 2016	2,53 ± 0,58	abc

*Prüfglieder ohne Übereinstimmung der Buchstaben sind signifikant verschieden.

Ein anderes Bild ergibt sich jedoch bei der Betrachtung dieser beiden Zeiträume im Hinblick auf die ertragsbezogenen Emissionen (siehe Anhang Abbildung 133). Die Varianzanalyse zeigt hierbei signifikante Unterschiede der Standorte ($p < 0,001$), Unterschiede der beiden Zeiträume ($p < 0,01$) sowie der Betriebe ($p < 0,001$). Im ersten Jahr hat der Silomais im O-Betrieb an beiden Standorten signifikant höhere ertragsbezogene Emissionen als der Silomais im V-Betrieb an beiden Standorten. Am Standort Soest hat der Silomais im V-Betrieb ebenfalls signifikant niedrigere ertragsbezogene Emissionen als der Winterweizen im O-Betrieb am Standort Soest. Im Gegensatz zum Standort Soest hat am Standort Braunschweig der Silomais im O-Betrieb signifikant höhere ertragsbezogene Emissionen als der Winterweizen im O-Betrieb. Im zweiten Jahr ändert sich das Verhältnis der ertragsbezogenen Lachgasemissionen. Nun gibt es keine signifikanten Unterschiede mehr hinsichtlich der ertragsbezogenen Emissionen zwischen Silomais und Winterweizen im O-Betrieb am Standort Braunschweig. Der Silomais im O-Betrieb am Standort Braunschweig hat dagegen signifikant höhere ertragsbezogene Emissionen als der Silomais im V-Betrieb am Standort Braunschweig und

der Silomais im O-Betrieb am Standort Soest. Dieser unterscheidet sich nun nicht mehr zum Silomais im V-Betrieb und zum Winterweizen im O-Betrieb am Standort Soest. Über beide Jahre betrachtet hat der Winterweizen im O-Betrieb am Standort Braunschweig im zweiten Jahr signifikant höhere ertragsbezogene Emissionen als im ersten Jahr.

Um die Varianten der Frucht Silomais detaillierter miteinander vergleichen zu können, wurden zwei weitere Zeiträume ausgewählt (siehe Tabelle 19 und Tabelle 20). Die Zeiträume Aussaat Silomais 2014 – Aussaat 2015 und Aussaat Silomais 2015 – Aussaat 2016 beinhalten dabei vollständige Vegetationsperioden des Silomais sowie Nachernteemissionen und Emissionen der Folgekultur (Winterweizen). Ein erster Vergleich in diesen Zeiträumen betrachtet zunächst alle (T2)-Varianten des Silomais beider Standorte (Tabelle 19; Abbildung 134 im Anhang), ein zweiter Vergleich betrachtet die Varianten des Silomais im O-Betrieb (T1-3) am Standort Soest (Tabelle 20; Abbildung 136 im Anhang).

Die Varianzanalyse für die (T2)-Varianten zeigt signifikante Unterschiede in der Höhe der Lachgasemissionen zwischen den Standorten ($p < 0,01$) und zwischen den Betrieben ($p < 0,001$), jedoch nicht zwischen den beiden betrachteten Untersuchungszeiträumen. Im ersten Jahr haben die O-Betriebe der beiden Standorte jeweils signifikant höhere kumulierte Lachgasemissionen als die V-Betriebe zu verzeichnen. Im zweiten Jahr sind nur noch die Emissionen des O-Betriebes am Standort Braunschweig höher als die Emissionen der jeweiligen V-Betriebe der beiden Standorte, nicht aber im Vergleich zum O-Betrieb am Standort Soest. Zwischen den beiden Untersuchungszeiträumen sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Bei Betrachtung der ertragsbezogenen Lachgasemissionen (Abbildung 135 im Anhang) gibt es nach der Varianzanalyse ebenfalls statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($p < 0,001$) und den Betrieben ($p < 0,001$). Im ersten Jahr zeigen, wie auch schon bei den kumulierten Lachgasemissionen, die O-Betriebe der beiden Standorte höhere ertragsbezogene Emissionen als die beiden V-Betriebe. Im zweiten Jahr hat der O-Betrieb am Standort Braunschweig die höchsten ertragsbezogenen Emissionen. In diesem Fall sogar höhere Emissionen als der O-Betrieb am Standort Soest. Ein Vergleich beider Untersuchungszeiträume ergibt keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 19: Kumulierte Lachgasemissionen (kg N₂O-N/ha/a) über die Zeiträume Aussaat Silomais 2014 – Aussaat Silomais 2015 und Aussaat Silomais 2015 – Aussaat Silomais 2016. Untersuchung der Frucht Silomais in den Betrieben O und V in der Variante (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

Betrieb	Frucht	Standort	Zeitraum	kg N ₂ O-N/ha/a	ANOVA *
O-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	5,19 ± 2,03	cd
V-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	1,36 ± 0,31	a
O-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Aussaat 2015 – Aussaat 2016	4,99 ± 1,61	bc
V-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Aussaat 2015 – Aussaat 2016	2,31 ± 0,54	ab
O-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	9,39 ± 2,19	d
V-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	2,57 ± 1,36	ab
O-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Aussaat 2015 – Aussaat 2016	5,56 ± 0,53	cd
V-Betrieb (T2)	Silomais	Braunschweig	Aussaat 2015 – Aussaat 2016	2,00 ± 0,32	a

*Prüfglieder ohne Übereinstimmung der Buchstaben sind signifikant verschieden.

Wie bereits beschrieben, wurde für diese beiden Untersuchungszeiträume ein zweiter Vergleich der Varianten des Silomais im O-Betrieb (T1-T3) am Standort Soest durchgeführt (Tabelle 20). Die ANOVA findet hier nur einen signifikanten Unterschied bei der Interaktion zwischen Treatment und der Zeiträume ($p < 0,01$).

Tabelle 20: Kumulierte Lachgasemissionen (kg N₂O-N/ha/a) über die Zeiträume Aussaat Silomais 2014 – Aussaat Silomais 2015 und Aussaat Silomais 2015 – Aussaat Silomais 2016. Untersuchung der Frucht Silomais im Betrieben O in den Varianten (T1), (T2) und (T3) am Standort Soest.

Betrieb	Frucht	Standort	Zeitraum	kg N ₂ O-N/ha/a	ANOVA *
O-Betrieb (T1)	Silomais	Soest	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	6,39 ± 2,15	b
O-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	4,75 ± 3,45	ab
O-Betrieb (T3)	Silomais	Soest	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	3,49 ± 1,81	a
O-Betrieb (T1)	Silomais	Soest	Aussaat 2015 – Aussaat 2016	4,52 ± 0,83	ab
O-Betrieb (T2)	Silomais	Soest	Aussaat 2015 – Aussaat 2016	3,41 ± 1,53	ab
O-Betrieb (T3)	Silomais	Soest	Aussaat 2015 – Aussaat 2016	6,69 ± 1,51	b

*Prüfglieder ohne Übereinstimmung der Buchstaben sind signifikant verschieden.

Im ersten Jahr kommt es in der mineralisch gedüngten Variante (T1) zu signifikant höheren Lachgasemissionen als in der Strip-Till Gärrestunterflur-Variante (T3), im zweiten Jahr ist dieser Unterschied nicht mehr festzustellen. Die Variante Gärrest mit Schleppschlauch in den stehenden Bestand (T2) unterscheidet sich in beiden Jahren nicht von den anderen Varianten. In der Variante (T3) kommt es im ersten Jahr zu deutlich geringeren Lachgasemissionen verglichen mit dem zweiten Jahr. Auch hier unterscheiden sich die anderen Varianten im Jahresvergleich nicht untereinander. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der ertragsbezogenen Lachgasemissionen (Anhang Abbildung 137). Auch hier unterscheidet sich die Variante Strip-Till Gärrestunterflur (T3) signifikant zwischen den beiden Untersuchungszeiträumen mit deutlich geringeren ertragsbezogenen Emissionen im ersten Jahr. Bei der Betrachtung aller drei Varianten und den beiden Untersuchungszeiträumen ergeben sich jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Der letzte Vergleich betrachtet die Unterschiede der Winterweizen-Varianten (T1: mineralische Düngung) im M-Betrieb und (T2: Schleppschlauchausbringung der Gärreste in den stehenden Bestand) im O-Betrieb an den beiden Standorten Soest und Braunschweig (siehe Abbildung 138 im Anhang und Tabelle 21). Hierfür wurde der Zeitraum von der Aussaat des Winterweizen 2014 – Aussaat Winterweizen 2015 ausgewählt, da nur in diesem Zeitraum beide Varianten an beiden Standorten in gleichem Umfang vertreten sind und eine ganze Vegetationsperiode sowie die Nachernteemissionen abgebildet werden können. Für diesen Zeitraum zeigt die Varianzanalyse signifikante Unterschiede zwischen den Standorten ($p < 0,001$). Dabei zeigt die Variante (T1) im M-Betrieb am Standort Soest signifikant geringere kumulierte Lachgasemissionen als die Variante (T1) im M-Betrieb und die Variante (T2) im O-Betrieb am Standort Braunschweig. Die Variante (T2)

im O-Betrieb am Standort Soest zeigt hingegen keine Unterschiede zu den anderen drei Varianten. Die Auswertung der kumulierten Lachgasemissionen in Bezug auf die erzielten Erträge (siehe Abbildung 139 des Anhangs) in diesem Zeitraum führt zu einem nahezu identischen Ergebnis. Hier unterscheiden sich allerdings nur die beiden Standorte in der Variante (T1) im M-Betrieb mit signifikant geringeren ertragsbezogenen Lachgasemissionen am Standort Soest.

Tabelle 21: Kumulierte Lachgasemissionen (kg N₂O-N/ha/a) über den Zeitraum Aussaat Winterweizen 2014 – Aussaat Winterweizen 2015. Untersuchung der Frucht Winterweizen in den Betrieben O und M in den Varianten (T1) und (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

Betrieb	Frucht	Standort	Zeitraum	kg N ₂ O-N/ha/a	ANOVA *
O-Betrieb (T2)	Winterweizen	Soest	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	1,75 ± 0,58	ab
M-Betrieb (T1)	Winterweizen	Soest	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	1,13 ± 0,53	a
O-Betrieb (T2)	Winterweizen	Braunschweig	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	2,61 ± 0,38	b
M-Betrieb (T1)	Winterweizen	Braunschweig	Aussaat 2014 – Aussaat 2015	3,15 ± 1,18	b

*Prüfglieder ohne Übereinstimmung der Buchstaben sind signifikant verschieden.

Generalisierte Additive Modelle

Die Generalisierten Additiven Modelle (GAM) wurden angewendet um mit Hilfe erklärender Variablen wie der Anteil des mit Wasser gefüllten Porenraums (water filled pore space, WFPS) oder dem Nitratgehalt im Oberboden die Varianz der Lachgasflüsse zu untersuchen. Angewendet wurde ein GAM welches WFPS und NO₃-Gehalt an eine Kombination aus den Interaktionen der angebauten Frucht, des Betriebes, der Behandlung (T1-T3) und des Standortes anpasst. Durch dieses Model konnten 38,8 % der Varianz der Lachgasflüsse erklärt werden. Dabei findet das Model eine starke Annäherung zwischen Lachgasflüssen und erklärenden Variablen bei etwa 70 – 80 % WFPS und 10 – 60 kg NO₃-N/ha/30 cm.

CH₄-Emissionen

Über alle Betriebe, Varianten und Standorte hinweg zeigt sich in der vorliegenden Untersuchung über beide Untersuchungsjahre eine Aufnahme von CH₄ in den Boden von 0,9-2,3 kg CH₄-C/ha/2a. Die Böden stellen also Senken für Kohlenstoff aus Methan dar. Lediglich direkt nach organischer Düngung und Abschnitten mit

sehr hohen Bodenwassergehalten kommt es zu sehr geringen Methanemissionen. Dabei zeigen sich zwischen den untersuchten Varianten (siehe auch untersuchte Varianten für N₂O in Tabelle 17) keine statistisch signifikanten Unterschiede. Eine Auswertung lässt nur leichte Tendenzen erkennen. So hat der Boden am Standort Soest in der Tendenz die höheren C-Aufnahmen vorzuweisen als der Boden am Standort Braunschweig. Ebenfalls lässt sich erkennen dass die Betriebe M und V mit konventioneller Bodenbearbeitung an beiden Standorten tendenziell höhere C-Aufnahmen vorweisen können als der O-Betrieb mit durchgängiger Direktsaat bzw. Strip-Till-Bearbeitung an beiden Standorten.

4.3.2 Ammoniakemissionen

Die Erfassung der Stickstoffverluste über Ammoniak erfolgte mit der sogenannten „Dräger-Tube-Methode“ (siehe 4.2.3 Erfassung der Ammoniakemissionen). Die Messungen wurden an beiden Standorten in den Projektjahren 2014 und 2015 in den organisch gedüngten Sollwert-Varianten sowie den niedrigsten N-Stufen (Kontrolle zur Berechnung) des Silomais durchgeführt. Auf eine dritte Messkampagne in 2016 wurde verzichtet, da nach den ersten beiden Kampagnen bereits deutliche Tendenzen zu verzeichnen waren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 67 und Abbildung 68 dargestellt. Die konkret untersuchten Varianten waren im Optimierten Klimabetrieb die Varianten Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand (Schleppschl. SM) und Strip-Till (Gärrest Unterflur SM), im Viehhaltenden Betrieb die Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat (Schleppschl. Einarb. SM). Die Messungen erfolgten dabei so lange, bis die Werte der Kontrollen („Hintergrundemissionen“) erreicht wurden. Zeitlich erfolgte ebenfalls eine Begrenzung durch Sonnenuntergang und Sonnenaufgang.

Für beide Standorte ergab sich hinsichtlich der Ammoniakemissionen ein ähnliches Bild. Abbildung 67 und Abbildung 68 zeigen die kumulierten Ammoniakemissionen der einzelnen untersuchten Varianten der beiden Standorte in kg NH₃-N/ha. Im V-Betrieb wurden die Biogas Gärreste vor der Maisaussaat nach der Ausbringung direkt eingearbeitet. An beiden Standorten sind hier in beiden Jahren lediglich direkt nach der Ausbringung und noch vor der Einarbeitung Emissionen von ~2 kg NH₃-N/ha messbar. Direkt nach der Einarbeitung entspricht die Höhe der Emissionen dem Niveau der Hintergrundemissionen der ungedüngten Kontrollen. Im Gegensatz zum V-Betrieb erfolgte im O-Betrieb (Schleppschl. SM) eine spätere oberflächliche Schleppschlauchausbringung in den dann stehenden Bestand. Hier treten an beiden Standorten und in beiden Jahren im Vergleich zum V-Betrieb signifikant ($p < 0.05$) höhere Emissionen auf, mit Werten von 12 - 16 kg NH₃-N/ha am Standort Soest und nochmals etwas höhere Emissionen von 14 - 18 kg NH₃-N/ha am Standort Braunschweig.

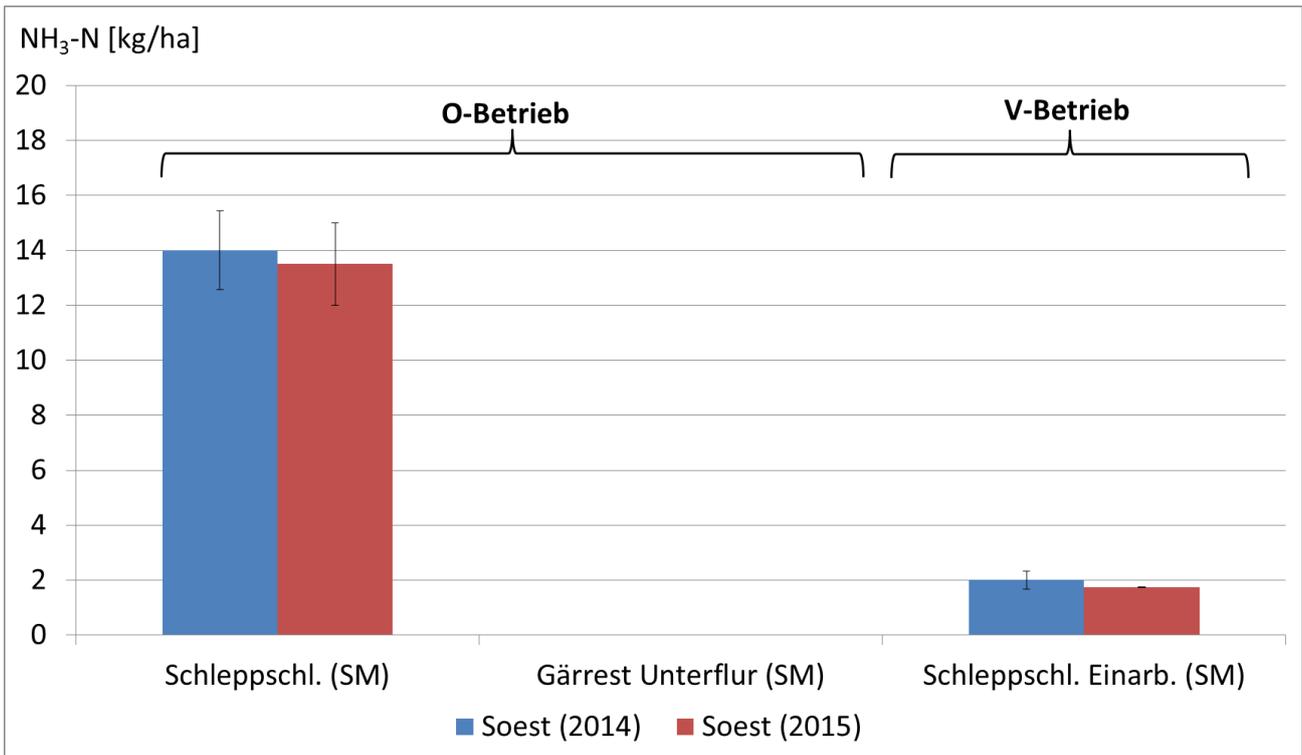


Abbildung 67: Ammoniakemissionen im Silomais am Standort Soest in den Jahren 2014 / 2015.

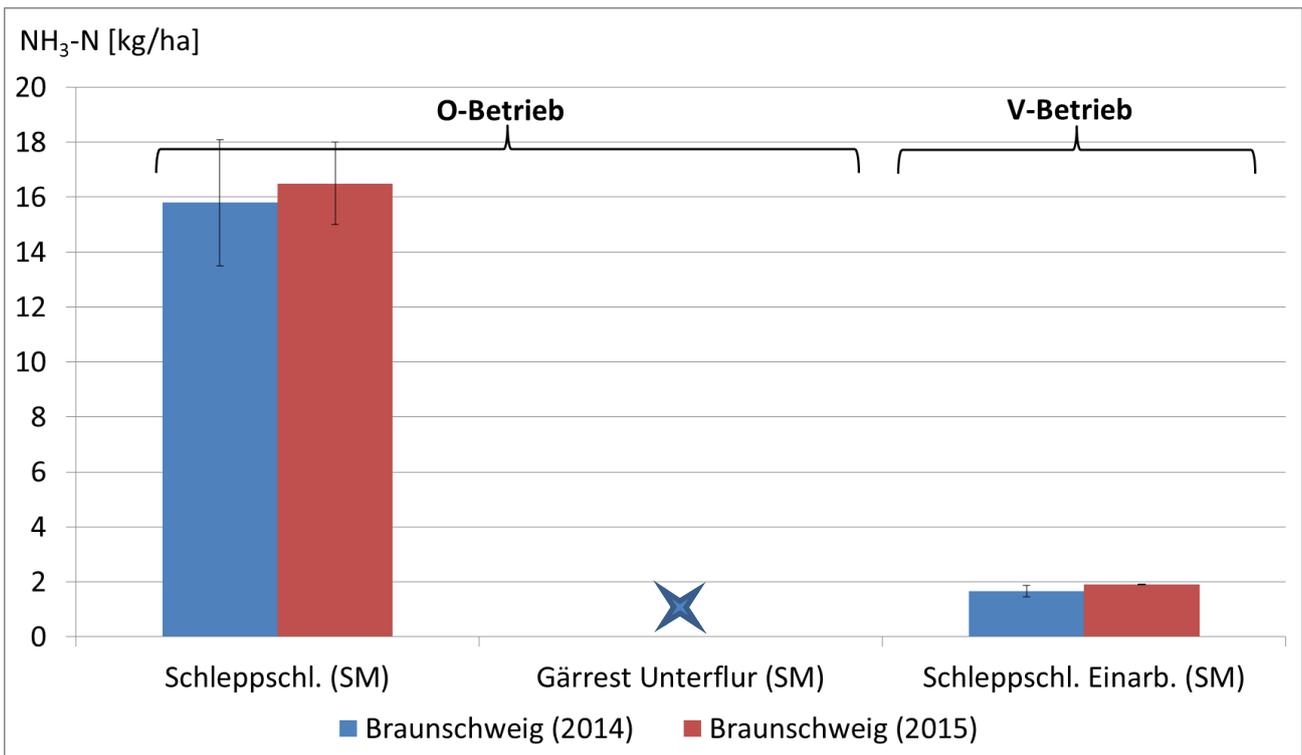


Abbildung 68: Ammoniakemissionen im Silomais am Standort Braunschweig in den Jahren 2014 / 2015. Die Variante Gärrest Unterflur SM wurde am Standort Braunschweig nicht durchgeführt.

Die Messungen mussten hier über einen Zeitraum von zwei Tagen durchgeführt werden, bis das Niveau der Hintergrundemissionen erreicht wurde, allerdings traten ~ 80 % der Gesamtemissionen in dieser Variante bereits innerhalb der ersten vier Stunden nach der Ausbringung auf.

Die Variante Strip-Till + Gärrestunterflur konnte aufgrund des schwereren Tonbodens am Standort Braunschweig nur am Standort Soest realisiert werden. Durch die direkte Injektion der Biogas Gärreste in den Boden konnten keine Ammoniakemissionen gemessen werden. Die ersten Messungen nach Injektion unterschieden sich bereits nicht von den Kontrollmessungen der ungedüngten Plots.

4.3.3 Gehalte an mineralischem Stickstoff (N_{\min})

Begleitend zu den Messungen der Lachgasemissionen wurden an beiden Standorten N_{\min} -Untersuchungen des Oberbodens (0 – 30 cm) zusätzlich zur regulären Beprobung von 0 – 90 cm jeweils zu Vegetationsbeginn und –ende durchgeführt. Die Daten dieser Untersuchungen können unter anderem der Erklärung außergewöhnlicher Emissionsereignisse, aber auch der Erklärung der Varianz innerhalb der Emissionen, dienen.

Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen die Jahresverläufe der N_{\min} -Gehalte (kg N/ha/30 cm) des Oberbodens (0 – 30 cm) von Juni 2014 bis Juni 2016 an den beiden Standorten Soest und Braunschweig. Die einzelnen Düngetermine sind dabei jeweils farblich markiert (**grün**: Organische Düngung über Biogas Gärreste; **Blau**: Mineralische Düngung (DAP, KAS, AHL)).

In den Jahresverläufen gut zu erkennen, ist ein Anstieg der Stickstoffkonzentrationen im Oberboden nach den Düngeereignissen und zwar unabhängig der Art der Düngung, der angebauten Frucht oder des Standortes. Der raschen Zunahme der Stickstoffkonzentrationen folgt eine Abnahme der Konzentrationen über wenige Wochen bis $\sim 0 - 50$ kg N/ha/30 cm. Lediglich die beiden Winterweizen-Varianten am Standort Soest bilden hier eine Ausnahme mit deutlich weniger starken Zu- und Abnahmen der Stickstoffkonzentrationen im Oberboden.

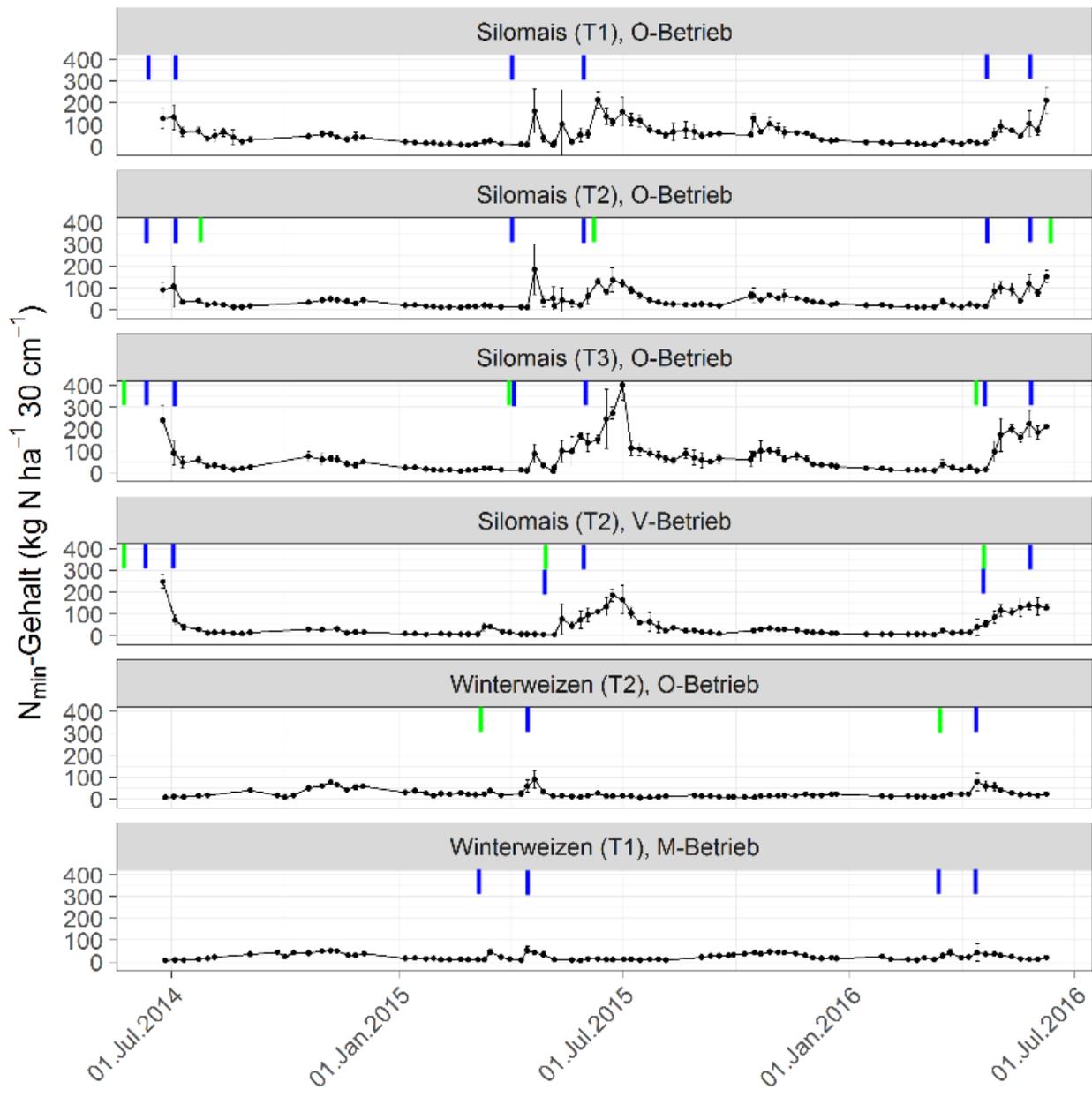


Abbildung 69: Jahresverläufe der N_{min}-Gehalte im Oberboden (0 – 30 cm) von Juni 2014 bis Juni 2016 am Standort Soest. Die farblich markierten Balken entsprechen: | Organische Düngung (Biogas Gärreste); | Mineralische Düngung (DAP, KAS, AHL). (Silomais (T1) O-Betrieb: Mineralische Düngung; Silomais (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Silomais (T3) O-Betrieb: Strip-Till Gärrestunterflur; Silomais (T2) V-Betrieb: Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat; Winterweizen (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Winterweizen (T1) M-Betrieb: Mineralische Düngung).

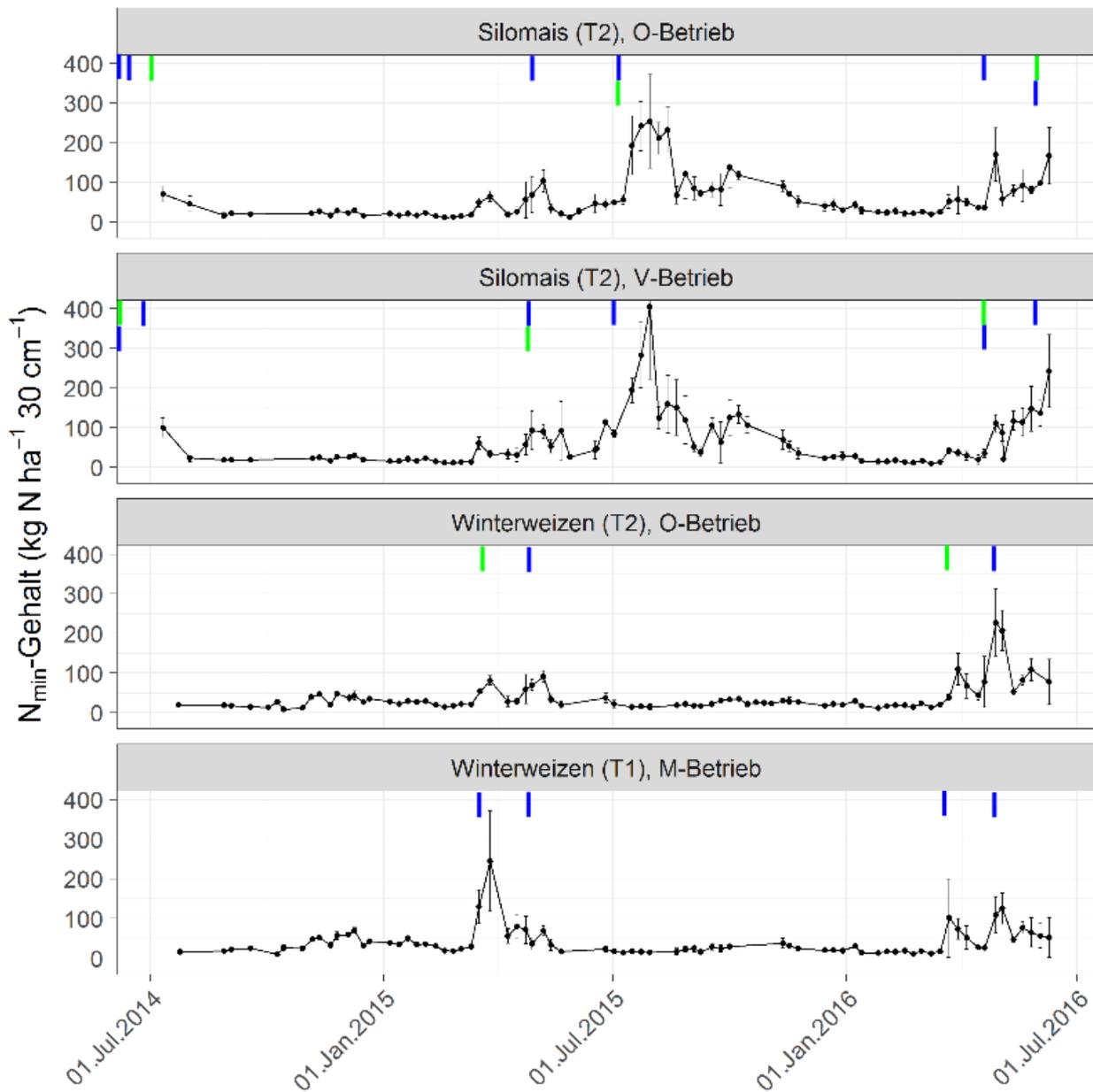


Abbildung 70: Jahresverläufe der N_{\min} -Gehalte im Oberboden (0 – 30 cm) von Juni 2014 bis Juni 2016 am Standort Braunschweig. Die farblich markierten Balken entsprechen: | Organische Düngung (Biogas Gärreste); | Mineralische Düngung (DAP, KAS). (Silomais (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Silomais (T2) V-Betrieb: Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung vor der Aussaat; Winterweizen (T2) O-Betrieb: Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand; Winterweizen (T1) M-Betrieb: Mineralische Düngung).

4.4 Diskussion

4.4.1 Lachgasemissionen

In beiden Jahren und an beiden Standorten zeigen die Emissionsverläufe der Lachgasemissionen klare Tendenzen, dass hohe Emissionen von Lachgas hauptsächlich in Perioden bestimmter Ereignisse, aber auch vermehrt bei einer Einschränkung der Bodenbearbeitung über die Mulchsaat hinaus, auftreten. Diese Ereignisse sind beispielsweise die Aussaat der jeweiligen Frucht, Düngung und Emissionen nach Regenereignissen. Das Frühjahr 2015 war beispielsweise deutlich trockener als das Frühjahr 2014. Mit Ausnahme der Variante O-Betrieb Silomais (T3) am Standort Soest ist der Anstieg der Lachgasflüsse hier leicht verzögert und geringer als im Frühjahr 2014. Dies ist sehr gut in der Variante V-Betrieb Silomais (T2) am Standort Braunschweig zu beobachten mit sehr geringen Frühjahrsemissionen nach Aussaat und Düngung. Erhöhte Lachgasemissionen treten im Jahr 2015 aufgrund des trockenen Frühjahrs erst im Sommer auf (siehe V-Betrieb Silomais (T2) am Standort Braunschweig). Die Emissionen von Lachgas scheinen dabei stark abhängig zu sein von der zeitlichen Dynamik des Anteils des mit Wasser gefüllten Porenraums (SENBAYRAM et al., 2014). So treten, zumindest in der Frucht Silomais, in beiden Jahren (hauptsächlich im Jahr 2015) und an beiden Standorten hohe Lachgasemissionen nach Regenfällen Ende Juli / Anfang August auf. Allgemein waren die Lachgasemissionen an beiden Standorten im Sommer zwischen Ende Juni und Anfang August am höchsten. Da die Gehalte an mineralischem Stickstoff in den Böden aufgrund der Düngerapplikation im Frühjahr in etwa gleich oder etwas höher sind als im Sommer, sind vermutlich die erhöhten Bodentemperaturen sowie die erhöhten Wassergehalte im Sommer für die erhöhten Lachgasemissionen verantwortlich (SENBAYRAM et al., 2014). Zusätzlich können Regenfälle nach längeren Trockenperioden Kohlenstoffverluste durch die Erhöhung des verfügbaren Bodenkohlenstoffs direkt nach Wiederbefeuchtung des Bodens beschleunigen. Generell können Umsetzungsprozesse und damit auch die Lachgasfreisetzung beschleunigt sein (MILLER et al., 2005; XIANG et al., 2008).

Die genannten Faktoren, wie hohe Wassergehalte, Bodentemperaturen und der Gehalt an verfügbarem Bodenkohlenstoff, sind dafür bekannt, im Speziellen Prozesse der Denitrifikation, eine der Hauptquellen für Lachgasemissionen, zu beschleunigen. Eine Laborstudie von SENBAYRAM et al. (2009) fand unter Zuhilfenahme stabiler Isotope heraus, dass über 90 % der Lachgasemissionen nach Wiederbefeuchtung von Böden aus Prozessen der Denitrifikation stammen. Dies legt die Vermutung nahe, dass in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls die Denitrifikation die dominierende Quelle für die erhöhten Lachgasemissionen im Sommer ist.

Die hohen ertragsbezogenen Emissionen im Silomais des O-Betriebes (T2) am Standort Braunschweig im Jahr 2015 erklären sich durch das sehr trockene Frühjahr. Der Silomais konnte hier erst sehr spät auflaufen und der Bestand hat sich zudem schlecht und sehr lückig entwickelt. Des Weiteren gab es vor der Ernte des

Silomais in diesem Jahr bereits Frost, was in Kombination mit der schlechten Bestandesentwicklung zu geringeren Erträgen führte.

Die ertragsbezogenen Emissionen im O-Betrieb (T3) am Standort Soest unterschieden sich noch deutlicher zwischen den Jahren 2014 und 2015. Hier konnten im Jahr 2015 deutlich geringere Erträge erzielt werden als im Jahr 2014 bei, im Vergleich zu 2014, stark erhöhten Lachgasemissionen. Der Einsatz der Strip-Till Gärrestunterflur Technik (T3) scheint unter trockenen Bedingungen im Vergleich zu einer mineralischen Düngung (T1) oder einer Schleppschlauchausbringung in den Bestand (T2) zu erhöhten Emissionen zu führen. Die Ursache dafür ist allerdings unklar. Vermutlich führen die hohen Gehalte an organischem Kohlenstoff und hohe Temperaturen in den Injektionszonen sowie die Wiederbefeuchtung des Bodens durch Regen, was zu zusätzlicher Verfügbarkeit von Bodenkohlenstoff führt, zu den erhöhten Lachgasemissionen beim Einsatz der Strip-Till Technik unter trockenen Bedingungen. Eine Möglichkeit um Lachgasemissionen beim Einsatz der Strip-Till-Technik, aber auch beim Einsatz anderer Techniken zur organischen Düngung, zu verringern, wäre der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren. Durch solche Inhibitoren ist der mineralische Stickstoff in organischen Düngern länger als $\text{NH}_4\text{-N}$ für die Pflanzenaufnahme verfügbar. In der Theorie wäre dann zu einem späteren Zeitpunkt weniger Nitrat für Denitrifikationsprozesse verfügbar, was unmittelbar zu einer Reduktion der Lachgasemissionen führen kann. Mehrere Studien haben bereits gezeigt, dass der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren zu signifikant geringeren Lachgas- aber auch Ammoniakemissionen führen kann (DITBERT et al., 2001; HALVORSON et al., 2011; LI et al., 2015; BELL et al., 2016). Beim Einsatz der Strip-Till-Technik mit Unterfußinjektion wäre letztere jedoch weitestgehend vermindert. Des Weiteren könnte die Entwicklung von Injektionstechniken für organische Dünger in stehende Bestände einen Fortschritt zur Minderung von Ammoniak- und Lachgasemissionen bringen.

Generell scheinen Lachgasemissionen beim Anbau von Silomais im Vergleich zu Winterweizen, vor allem in Direktsaatsystemen, erhöht. Auch andere Studien haben bereits gezeigt, dass Maisanbau meist zu signifikant höheren Emissionen als der Anbau von Winterweizen führt (DRURY et al., 2006; DRURY et al., 2007; SENBAYRAM et al., 2014). SENBAYRAM et al. (2014) begründen das damit, dass die Stickstoff- und Wasseraufnahme des Mais im frühen Sommer noch limitiert ist. Der Winterweizen ist zu dieser Zeit aber bereits in der produktivsten Wachstumsphase, d.h. die Wachstumsraten sind fast an ihrem Maximum angelangt und die Nährstoff- und Wasseraufnahme durch die Pflanzen ist sehr hoch zu dieser Jahreszeit. Daher sind sehr wahrscheinlich die Bedingungen für Nitrifikation und Denitrifikation auf Böden mit Maisanbau zu dieser Jahreszeit begünstigt, was zu höheren Lachgasemissionen führen kann.

Wie Direktsaaten oder Strip-Till Systeme auf Lachgasemissionen oder allgemein Treibhausgasemissionen aus Böden wirken, wird in der Literatur noch kontrovers diskutiert. Einige Studien geben Hinweise auf reduzierte Emissionen (JACINTHE, P.-A. & DICK, W.A., 1997; OMONODE et al., 2007; DRURY et al., 2006; DRURY et al., 2011; BAYER et al., 2016), während andere erhöhte Emissionen in diesen Anbausystemen finden (ABDALLA et al.,

2013) (mit enthaltenen Literaturangaben); BAYER et al., (2016), während wieder andere Studien kein Unterschiede in der Höhe der Emissionen dieser Systeme im Vergleich zu konventionellen Systemen finden (JOHNSON et al., 2010). In der vorliegenden Untersuchung waren Lachgasemissionen jedoch bei Verzicht der Bodenbearbeitung über die konventionelle Mulchsaat hinaus erhöht. Diese Ergebnisse passen zu Ergebnissen anderer Studien, welche bei Verzicht auf Bodenbearbeitung oder konservierender Bodenbearbeitung wie beim Strip-Till-Verfahren ebenfalls erhöhte Lachgasemissionen feststellten. Als Ursachen hierfür werden höhere Lagerungsdichten und erhöhte Bodenwassergehalte infolge verminderter oder fehlender Bodenbearbeitung (ARAH et al., 1991; PALMA et al., 1997; SIX et al., 2004; ABDALLA et al., 2013) vermutet. Mit zunehmender Dauer der Durchführung von Direktsaaten oder anderen konservierenden Anbausystemen könnte es laut DUERI et al. (2007) und LU & CHENG (2009) sogar noch zu einer höheren Zunahme von Lachgasemissionen kommen.

In dieser Untersuchung wurden entweder mineralische oder organische Dünger (Biogas Gärreste) mit mineralischer Ergänzung zur Düngung verwendet. Es konnten jedoch keine Unterschiede in den jährlichen Lachgasemissionen in Abhängigkeit des eingesetzten Düngesystems festgestellt werden. Eine Erklärung wäre, dass der im Boden vorhandene Kohlenstoff bereits für denitrifizierende Mikroorganismen ausreichte und die Menge an Stickstoff der limitierende Faktor für die Produktion von Lachgas war, sodass die Zuführung von labilem Kohlenstoff keine signifikanten Effekte hatte. Dies legt die Vermutung nahe, dass für die beiden untersuchten Böden klimatische Bedingungen, der Bodentyp sowie die angebauten Früchte eine größere Rolle für die Lachgasproduktion spielen als die eingesetzte Düngerart (AKIYAMA, H. & TSURUTA, H., 2003; CHANTIGNY et al., 2010; SENBAYRAM et al., 2014). Es ist jedoch auch möglich, dass der labile Kohlenstoff des organischen Düngers insgesamt während der Denitrifikation überproportional die Reduktion von N_2O zu N_2 gefördert hat (MÜLLER & CLOUGH, 2014).

Im Vergleich der drei Silomais Varianten T1-T3 am Standort Soest, können dennoch Unterschiede im verwendeten Dünger ausgemacht werden. Diese Unterschiede wären unmittelbar jedoch nicht an der Höhe der direkten Lachgasemissionen zu erkennen. Hierfür müsste in den Vergleich die Höhe der N_2O -Emissionen durch die Produktion von Mineraldüngern, die Nitratauswaschung in den Varianten (und die damit verbundenen indirekten Emissionen von N_2O , sowie die Höhe der NH_3 -Verluste (und die damit verbundenen indirekten Emissionen von N_2O) mit einbezogen werden. Bei der Abschätzung der indirekten N_2O -Emissionen aus der Nitratauswaschung wird davon ausgegangen, dass 30 % des insgesamt als Dünger ausgebrachten Stickstoffs ausgewaschen werden und dass 0,75% der ausgewaschenen Nitratmenge später aus Gewässern als N_2O emittiert wird (IPCC, 2001). In den drei Varianten T1-T3 würden dann zu den direkten Lachgasemissionen noch zusätzlich Treibhausgasemissionen aus der Herstellung hinzukommen, die einer N_2O -emission von ca. 2,1 g N_2O pro ausgebrachtem kg Mineraldünger-N-Äquivalent entspricht (BIOGRACE, 2015). In der Variante mit Schleppschlauchausbringung der Gärreste in den stehenden Bestand (T2) würden zu den direkten Lachgasemissionen noch zusätzlich die indirekten Lachgasemissionen durch Stickstoffaustrag

in Form von NH_3 kommen (Emissionsfaktor = 0,01; IPCC, 2001). Somit hätte die Strip-Till Gärrestunterflur Variante (T3) insgesamt doch weniger klimaschädliche Emissionen. Hier entfallen zum einen die Emissionen durch NH_3 , zum anderen gibt es weniger Lachgasemissionen durch die Produktion von Mineraldüngern. Aus der Berechnung der Lachgasemissionen inklusive der der Lachgasemissionen aus Mineraldüngerherstellung (Berechnung nach BIOGRACE, 2015) sowie der indirekten Lachgasemissionen über N-Deposition und N-Auswaschung (mit den Standardwerten von IPCC 2001) steigen zwar die Gesamtverluste über N_2O -N um $\sim 0,5 - 1 \text{ kg N}_2\text{O-N}$ in allen drei Varianten, jedoch zeigen sich weiterhin keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Somit stellen die direkten (gemessenen) Lachgasemissionen der drei Varianten unabhängig des verwendeten Düngers den weitaus größten Teil dar zur Bewertung des Treibhausgaspotentials der Betriebe.

CH₄-Emissionen

Die in der vorliegenden Untersuchung gemessenen Werte für die CH_4 -Aufnahmen entsprechen den Werten anderer Untersuchungen zu CH_4 in landwirtschaftlich genutzten Böden in Nord-Europa (DOBBIE et al., 1996 a & b; SMITH et al., 2000). Die Aufnahme von CH_4 in den Boden ist, neben weiteren Faktoren, durch den Wassergehalt im Boden gesteuert (SMITH et al., 1998; RUSER et al., 2006). Eine Produktion von CH_4 in Böden findet dabei unter anaeroben Bedingungen, eine Aufnahme unter aeroben Bedingungen statt (DENMAN et al., 2007). Unter anderem dadurch könnten sich auch tendenzielle Unterschiede zwischen den Betrieben, Fruchtarten sowie der Standorte erklären. So treten in den Betrieben M und V die tendenziell höchsten CH_4 -Aufnahmen auf. Dies liegt zum einen an der durch die Bodenbearbeitung besseren Bodendurchlüftung (erhöhte Diffusion von CH_4 und O_2), tendenziell etwas geringeren Bodenfeuchten, vor allem unter Winterweizen, sowie der etwas geringeren Lagerungsdichte des Bodens im Bearbeitungshorizont. Die höhere Lagerungsdichte des Bodens am Standort Braunschweig spricht auch für die tendenziell verringerten CH_4 -Aufnahmen im Vergleich zum Standort Soest (BORKEN et al., 2000; BORKEN et al., 2006; HARTMANN et al., 2011; LE MER & ROGER, 2001).

4.4.2 Ammoniakemissionen

Erwartungsgemäß kam es nach der organischen Düngung, vor allem bei einer Schleppschlauchausbringung der Gärreste in die stehenden Maisbestände, zu relativ hohen Emissionen von Ammoniak. Diese werden zum einen begünstigt durch höhere Lufttemperaturen zum Zeitpunkt der Ausbringung Mitte Juni, zum anderen durch eine sehr große Kontaktfläche der Gärreste zur Atmosphäre bei oberflächlicher Ausbringung und den damit erhöhten Austauschraten. Die sofortige Einarbeitung der Biogas Gärreste nach der Schleppschlauchausbringung zeigt eine effektive Verbesserung in der Verminderung der Ammoniakemissionen um 85 – 90 % gegenüber einer oberflächlichen Schleppschlauchausbringung in die stehenden Bestände. Emissionen treten bei dieser Düngetechnik nur zwischen Ausbringung und Einarbeitung auf, nach der Einarbeitung sind keine Emissionen mehr messbar. Aus den Ergebnissen der Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand (O-Betrieb T2) geht jedoch hervor, dass etwa 80 %

der Gesamtemissionen innerhalb der ersten vier Stunden nach Ausbringung auftreten. Im Hinblick auf die aktuell geltende Düngeverordnung, welche eine Einarbeitung innerhalb der ersten vier Stunden nach Ausbringung vorsieht, würde das übertragen auf eine Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung aber nur zu einer Reduktion der Ammoniakemissionen von etwa 20 % führen. Hier wäre also eine sofortige bzw. sehr viel schnellere Einarbeitung, wie sie in der vorliegenden Untersuchung vorgenommen wurde, erstrebenswert. Um hohe Ammoniakemissionen bei einer Ausbringung in stehende Bestände zu verringern, käme unter anderem das Ansäuern der Biogas Gärreste in Betracht. Dies würde das pH-abhängige Gleichgewicht von NH_3 und NH_4 zugunsten von NH_4 verschieben und somit wären die Biogas Gärreste weniger stark ausgasungsgefährdet (KAI et al., 2008; PETERSEN et al., 2012). Des Weiteren würde sich dadurch auch die Stickstoffnutzungseffizienz in dieser Variante erhöhen.

Das beste Ergebnis zeigt die Strip-Till Gärrestunterflur Variante (T3) des O-Betriebes hinsichtlich der Reduktion von Ammoniakemissionen. Durch die direkte Injektion der Gärreste in den Boden, und der damit einhergehenden vollständigen Vermeidung eines Kontaktes der Gärreste zur Atmosphäre, können Emissionen von Ammoniak beim Einsatz dieser Technik nahezu vollständig vermieden werden. Auch im Bezug zu den Lachgasemissionen schneidet diese Variante besser ab als die T2 Variante des O-Betriebes. Somit wurde die Minderung der Ammoniakemissionen nicht wie befürchtet mit einer Erhöhung der Lachgasemissionen erkaufte. Die Lachgasemissionen unterscheiden sich nicht zwischen den beiden Varianten, es kommt aber zu einer nahezu vollständigen Vermeidung der Ammoniakemissionen beim Einsatz der Strip-Till-Technik im Vergleich zur Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand. Bei einer Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung im V-Betrieb gibt es keinen Konflikt zwischen der Minderung der Ammoniakemissionen und der Minderung der Lachgasemissionen. So werden im Vergleich zu einer Schleppschlauchausbringung in stehende Bestände effizient NH_3 -Emissionen verringert. Des Weiteren führt in der vorliegenden Untersuchung die vorherige Einarbeitung im Vergleich zu einer eingeschränkten Bodenbearbeitung über die Mulchsaat hinaus nicht zu erhöhten Lachgasemissionen. Der Einsatz der Strip-Till-Technik ist allerdings auf die Verwendung auf relativ leichten Böden eingeschränkt. So konnte die Strip-Till-Technik beispielsweise auf dem stark tonigen Boden am Standort Braunschweig nicht realisiert werden.

4.4.3 Gehalte an mineralischem Stickstoff (N_{min})

Wie bereits in den Ergebnissen (siehe Generalisierte Additive Modelle) beschrieben können begleitende Untersuchungen zum Gehalt an mineralischem Stickstoff im Oberboden (0 – 30 cm) der Erklärung der Varianz der Lachgasflüsse dienen. Es zeigt sich eine gute Korrelation zwischen N_{min} -Gehalten und Lachgasemissionen. So gehen hohen Lachgasflüssen meist hohe N_{min} -Gehalte, welche von Nitrat dominiert sind, voraus. Nitrat wird in der Folge über den Prozess der Denitrifikation umgesetzt und kann dann unter bestimmten Voraussetzungen (bspw. hohe Wassergehalte) als Lachgas verloren gehen. Eine zusätzliche

Erklärung für den Zusammenhang zwischen Nitrat und Lachgasemission ist die Tatsache, dass Nitrat Produkt der Nitrifikation ist, wobei Lachgas als Nebenprodukt dieses Prozesses emittiert wird.

Ein Anstieg der N_{\min} -Konzentrationen ist in allen Varianten auf die Düngung mit Biogas Gärresten, die rein mineralische Düngung sowie die mineralische Ergänzungsdüngung zurückzuführen. Sehr hohe Werte, ab etwa 250 kg /ha, sind vermutlich Artefakte der Probenahme. Bei einer Beprobung nach Ausbringung mineralischer Dünger kann es passieren, dass einzelne Körner des Mineraldüngers mit in eine Probe aufgenommen werden solange der Mineraldünger noch auf der Bodenoberfläche verweilt. Dies kann dann u.U. zu sehr hohen Werten und gleichzeitig relativ hohen Fehlern führen.

Die Abnahme der N_{\min} -Konzentrationen im Oberboden ist das Resultat einer Kombination aus mikrobieller Bodenaktivität (Umsetzung von mineralischem Stickstoff über Nitrifikation / Denitrifikation), Ausgasung von Lachgas, N_2 und NH_3 sowie der Aufnahme von Stickstoff durch die angebauten Kulturen Silomais und Winterweizen. Des Weiteren können hohe N_{\min} -Gehalte im Oberboden im Herbst potentiell über Winter in das Grundwasser ausgewaschen werden und führen somit zu indirekten Lachgasemissionen (IPCC, 2001). Die potentielle Nitratauswaschung aller Versuchsvarianten wird in Kapitel 2.5.2 behandelt.

Die Ergebnisse verdeutlichen den hohen Stellenwert einer N_{\min} -Untersuchung begleitend zu der Erfassung von Lachgasemissionen. Diese Daten können wie bereits erwähnt einen erheblichen Beitrag zur Erklärung der Höhe, Dauer und Varianz auftretender Lachgasemissionen leisten.

Gesamtbewertung der N_2O - und NH_3 -Emissionen

Da in der ersten Projektphase keine Erhebung von Daten zu Lachgasemissionen oder Ammoniakemissionen erfolgt ist, fällt eine Bewertung der Optimierungsmaßnahmen in der zweiten Projektphase im optimierten Klimabetrieb schwer. Der optimierte Klimabetrieb schneidet zwar hinsichtlich der Lachgas- und Ammoniakemissionen schlechter ab als der konventionelle viehhaltende Betrieb, hat aber noch einiges an Potential für Verbesserungen um den Ausstoß klimaschädlicher Gase weiter zu reduzieren. Die Silomaisvarianten des O-Betriebes (T1-T3) an beiden Standorten sind als kritisch zu bewerten. Hier kommt es bei der Einschränkung der Bodenbearbeitung über eine Mulchsaat hinaus zu erhöhten Lachgasemissionen, wobei in der Variante T3 (Gärrestunterflurdüngung mittels Strip-Till) eine Einsparung von NH_3 -Emissionen nicht mit erhöhten N_2O -Emissionen erkaufte wurden wie es u.U. zu erwarten gewesen wäre. In der Variante T2 (Schleppschlauchausbringung der Biogasgärreste in den stehenden Maisbestand) kommt es zusätzlich noch zu hohen Ammoniakverlusten welche die N-Nutzungseffizienz zusätzlich verringern können. Die Varianten der Betriebe M und V hingegen zeigen geringe Ammoniakemissionen infolge der sofortigen Einarbeitung der Biogasgärreste nach der Ausbringung und sind daher in dieser Hinsicht unkritisch. Außerdem sind Lachgasemissionen geringer als im O-Betrieb und somit weniger kritisch.

Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist eine sofortige Einarbeitung nach der Schleppschlauchausbringung bzw. Injektion von NH_3 -bildenden flüssigen organischen Düngern erstrebenswert um Ammoniakemissionen effizient zu verhindern. Des Weiteren könnte die Entwicklung von Injektionstechniken für stehende Bestände oder eine Ansäuerung flüssiger organischer Dünger, im Besonderen in Silomais, einen großen Beitrag zur Minderung von Ammoniakemissionen leisten. Auch eine Nutzung von Injektionstechniken in Kombination mit Nitrifikationsinhibitoren wäre im Sinne einer Emissionsminderung erstrebenswert. Hier würde als Idealszenario eine Emissionsminderung von sowohl Lachgas als auch Ammoniak erzielt.

Nach den Ergebnissen dieser Untersuchung bleiben jedoch noch weitere Fragen ungeklärt. So waren eventuelle Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten aufgrund der hohen Variabilität der Lachgasemissionen teilweise statistisch nicht nachweisbar. Ebenfalls konnte keine direkte Erfassung der N_2 -Verluste aus den untersuchten Varianten erfolgen. Es können also keine Rückschlüsse für N_2 -Verluste und deren Düngewirksamkeit gezogen werden. Des Weiteren konnten die beteiligten Prozesse zu Lachgas- und Ammoniakemissionen nicht direkt bestimmt werden. Diese Lücken erschweren die Vorhersagbarkeit von Emissionen unter sich verändernden Umweltbedingungen sowie die Verallgemeinerbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf Standorte mit anderen als den untersuchten Böden sowie veränderten klimatischen Eigenschaften.

Es besteht daher weiterer Forschungsbedarf mit detaillierten Prozessstudien sowie umfangreichen Feldstudien zur Wirkung von Nitrifikationsinhibitoren und angesäuerten flüssigen organischen Düngern.

4.5 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

In dieser Projektphase konnten die Emissionen von Ammoniak, Lachgas und Methan wie in der ursprünglichen Planung vorgesehen an den Praxisschlägen in Soest und Braunschweig untersucht werden. Dabei konnte sowohl die möglichst vollständige Gärrestearbeitung direkt bei der Ausbringung (z.B. Strip-Till mit Gärrestunterfußdüngung bei Mais) als auch zum Vergleich die Ausbringung mit Schleppschlauchtechnik in stehende Bestände im Untersuchungsprogramm realisiert werden. Auf Grund der sehr arbeitsintensiven Messungen konnten die Untersuchungen nur in ausgewählten Varianten durchgeführt werden (siehe Tabelle 17).

Die getroffene Variantenauswahl ermöglichte es, folgende bis dahin offene Fragen für die Versuchsstandorte Soest und Braunschweig zu klären:

- Wirkung der Gärrestunterflurdüngung auf die Höhe der Emissionen im Vergleich zu einer Applikation mittels Schleppschlauch in stehende Bestände sowie einer rein mineralischen Düngung → Die Unterflurablage führte im Vergleich zu einer Schleppschlauchausbringung in den stehenden Bestand und einer rein mineralischen Düngung nicht zu erhöhten Emissionen, jedoch führte die

Einschränkung der Bodenbearbeitung über die Mulchsaat hinaus zu erhöhten Lachgasemissionen. Emissionen von Ammoniak konnten nahezu vollständig vermieden werden.

- Einfluss von zentralen Kulturarten wie Silomais und Winterweizen auf die Höhe der Emissionen → Die Kulturart Silomais zeigte im Vergleich zur Kulturart Winterweizen signifikant höhere Lachgasemissionen.
- Einfluss der Standorteigenschaften in Soest und Braunschweig auf die Höhe der Emissionen → Der Standort Soest zeigt tendenziell etwas geringere Emissionen als der Standort Braunschweig.
- Wirkung einer veränderten Düngeintensität auf die Höhe der flächen- und ertragsbezogenen Emissionen → Auf Grund der sehr arbeitsintensiven Messungen konnte eine Untersuchung zum Vergleich der verschiedenen Düngeintensitäten nicht realisiert werden. Es erfolgte zum besseren und umfangreicheren Vergleich der Modellbetriebe eine Erfassung in den angelegten Sollwert-Varianten.
- Jahresunterschiede in der Höhe der flächen- und ertragsbezogenen Emissionen an den Standorten Soest und Braunschweig.

Damit die Ergebnisse der Untersuchungen mithilfe der Standort- und Ausbringungsverhältnisse interpretiert werden konnten, waren umfassende Begleituntersuchungen erforderlich: Wie ursprünglich geplant konnten zusätzlich zu den im ersten Projektabschnitt untersuchten Bodenparametern (Bodenart, Humusgehalt, N-Gehalt) kontinuierliche Aufzeichnungen der Bodentemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeiten sowie Niederschläge mithilfe der auf den Versuchsschlägen vorhandenen Wetterstationen gemacht werden. Weiterhin wurde planungsgemäß der Verlauf des N_{\min} -Vorrats im Oberboden begleitend zu den Treibhausgasmessungen erfasst.

Mit Hilfe dieser Untersuchungen waren detaillierte Aussagen zu den Emissionen der klimarelevanten Gase möglich welche wiederum der Ermittlung der CO_2 -Vermeidungskosten dienlich waren.

Die Erfassung der N_2O - und CH_4 -Austauschraten erfolgte wie geplant mittels Gasanreicherungskammern, welche manuell beprobt wurden. Die einzelnen Gasflussraten wurden auf der Basis von vier Luftproben pro Gasanreicherungskammer bestimmt. Die N_2O - und CH_4 -Konzentration in den Luftproben wurde in Braunschweig mittels GC-ECD/FID bestimmt. Das Messprogramm für N_2O - und CH_4 -Emissionen erstreckte sich planungsgemäß über zwei Jahre. Die Beprobung der Varianten erfolgte wöchentlich.

Die Erfassung der NH_3 -Freisetzung erfolgte unmittelbar nach der Ausbringung der Gärreste mit der „Draeger-Tube-Methode“, die sich für die Emissionsmessung auf relativ kleinen Parzellen eignete.

5 Teilprojekt Ökonomische Bewertung

5.1 Material und Methoden

Das Teilprojekt „Ökonomische Bewertung“ der zweiten Projektphase wurde von Februar bis November 2016 bearbeitet. Gegenüber der überwiegend gesamtbetrieblichen ökonomischen Bewertung im ersten Teilprojekt werden in diesem Teilprojekt Fruchtfolgen und Düngeapplikationsmaßnahmen der Wirtschaftsjahre 2012/2013 bis 2015/2016 betrachtet.

Für die ökonomische Betrachtung wurden die in den anderen Teilprojekten aus Versuchen ermittelten Daten über eine Auswertung der Schlagkarteien (z.B. Erträge der Kulturen, Bewirtschaftungsmaßnahmen im Einzelnen, Aufwandmengen) sowie von Ökobilanzdaten bzw. Lachgasemissionen ermittelt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine versuchsnahe, projekt-konsistente Abbildung der Maßnahmen nach Standort, Betriebsform (M, V, O) sowie Kultur. Alle Daten wurden zur Vermeidung von versuchsbedingten Besonderheiten insbesondere bezüglich der Maschinenausstattung und der Preise für Produkte und Produktionsmittel standardisiert. Die Berechnung der variablen Kosten und Erlöse basierte auf Marktstatistiken und Datensammlungen aktueller bzw. für die Jahre erzielbarer Preise für Produkte und Betriebsmittel. Die Arbeitserledigungskosten wurden mithilfe der Standardisierung der eingesetzten Maschinen und Geräte sowie durch Anpassung an verschiedene Modellbetriebe („optimale“ Ausstattung entsprechend Größe und Produktionsrichtung) ermittelt. Darüber hinaus wurde eine Vollausslastung der Maschinen und Geräte unterstellt und die Daten von Richtwertsammlungen (KTBL-Planungsdaten bzw. Richtwert-Deckungsbeiträge LWK Niedersachsen) zugrunde gelegt. Für die Bewertung der Fruchtfolgen wurden die folgenden Preisannahmen, dargestellt in Tabelle 22, getroffen:

Tabelle 22: Erzeugerpreise Pflanzenproduktion (€/dt)

	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	Mittelwert
Backweizen (B-Sorte)	21,67	20,14	23,6	19,25	17,82	20,49
Futtergerste	18,51	18,4	21,31	17,34	15,33	18,18
Raps	43,89	45,85	48,17	37,27	33,64	41,76
Ackerbohnen	22,50	21,00	25,50	23,00	22,00	22,80
Silomais (30% TM)	2,40	2,90	2,85	2,80	2,92	2,77

Quelle: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2015)

Tabelle 23: Preisannahmen für Dünger

Dünger- und Reinnährstoffkosten	2010/ 2011	2011/ 2012	2012/ 2013	2013/ 2014	2014/ 2015	Mittelwert
KAS 27% €/t	26,93	30,05	29,06	26,37	27,23	27,93
€ je kg N	1,00	1,11	1,08	0,98	1,01	1,03
AHL 30% €/t	22,22	25,04	25,45	22,47	21,90	23,42
€ je kg N	0,74	0,83	0,85	0,75	0,73	0,78
Harnstoff 46% €/t	33,56	40,70	39,60	33,95	34,60	36,48
€ je kg N	0,73	0,88	0,86	0,74	0,75	0,79
DAP 46% €/t	47,80	51,38	48,73	45,10	47,51	48,10
€ je kg P	1,04	1,12	1,06	0,98	1,03	1,05
Kali 40% €/t	26,11	29,60	29,28	27,20	26,56	27,75
€ je kg K	0,65	0,74	0,73	0,68	0,66	0,69
Granukalk €/dt	3,60	3,74	3,37	2,90	3,44	3,41
ASS 26% N 15% S	22,10	26,43	26,28	24,40	22,81	24,40
€ je kg N	0,85	1,01	1,01	0,93	0,87	0,94
Kieserit 13% S	31,50	31,66	30,50	25,00	32,00	30,13
€ je kg S	2,42	2,43	2,34	1,92	2,46	2,32

Quelle: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2015)

Für die Bewertung der Fruchtfolgen im Hinblick auf die Klimawirkung wurden mangels eigener Versuchsdaten Literaturwerte herangezogen (BREITSCHUH & HELZEL (2012)), siehe

Tabelle 24.

Die Ergebnisse aus den Berechnungen der Treibhausgasemissionen dienen ebenfalls zur Kalkulation der CO₂-Äquivalent-Vermeidungskosten je ha beim Übergang von einem stärker CO₂-emittierenden auf ein weniger stark CO₂-emittierendes Produktionsprogramm, dargestellt durch die auf Gewinndifferenzen beruhenden Opportunitätskosten.

Die erhobenen Lachgasmessungen im Zeitraum 2014 bis 2016 für die Kulturen Winterweizen und Silomais (siehe Kapitel 4.3.1 Lachgasemissionen) basierten auf unterschiedlichen Düngungsstrategien und dienen ebenfalls als Grundlage der Kalkulation von CO₂-Äquivalent-Vermeidungskosten je Hektar.

Tabelle 24: Treibhausgasemissionen im Ackerbau lt. Literaturangaben

Treibhausgasemissionen im Ackerbau	Emissionsfaktor (kg CO ₂ -Äq.) je l bzw. kg
Diesel (Herstellung u. Einsatz)	2,10
Pflanzenschutzmittel (Herstellung u. Einsatz)	8,20
Getreide-Saatgut	0,44
Raps-Saatgut	1,90
Grünroggen-Saatgut	0,49
Mais-Saatgut	0,77
Ackerbohnen-Saatgut	0,68
N-Dünger (Herstellung)	6,41
N-Dünger (Feldemission)	4,87
P-Dünger (Herstellung)	1,18
K-Dünger (Herstellung)	0,66

Quelle: BREITSCHUH & HELZEL (2012)

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Wirtschaftlichkeit der Fruchtfolgen in den Modellbetrieben

Gewinnbeiträge, Deckungsbeiträge

Zur besseren Übersicht und zum Vergleich sind in den folgenden Tabellen und Abbildungen auch die Ergebnisse aus den Jahren der ersten Projektphase dargestellt.

Die Deckungsbeiträge sowie die entsprechenden Gewinnbeiträge je ha bzw. je GE sind an beiden Standorten in den jeweiligen M-Betrieben durchschnittlich am höchsten, die der V-Betriebe fallen im Durchschnitt am niedrigsten aus (

Tabelle 25, Tabelle 26, Tabelle 27). Die Gewinnbeiträge des Standortes Braunschweig liegen unabhängig von der Betriebsform durchschnittlich etwa 199 €/ha unter denen des Standortes Soest, die entsprechenden Deckungsbeiträge sind auf Grund der in Soest standortbedingt höheren Festkosten im Durchschnitt sogar um 247 €/ha niedriger.

In Soest werden in allen drei Betrieben im Vergleich zu den Vorjahren im Erntejahr 2015/2016, aufgrund eines niedrigeren Ertragsniveaus sowie etwas höherer Betriebsmittelaufwendungen und Arbeitserledigungskosten, die geringsten Gewinnbeiträge erzielt. Dasselbe gilt für den M- sowie für den V-Betrieb in Braunschweig, wohingegen auf dem Braunschweiger O-Betrieb 2015/2016 mit 172,29 €/ha ein deutlich besseres Ergebnis gegenüber dem Vorjahr erzielt werden konnte.

Tabelle 25: Deckungsbeiträge 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	1.380,93	892,84	789,12	1.077,60	488,07	461,54
2013/2014	1.139,47	761,47	723,38	1.056,76	420,13	734,72
2014/2015	1.346,20	920,81	986,31	991,44	329,69	511,48
2015/2016	902,17	446,21	509,56	708,30	450,36	604,84
Mittelwert	1.192,19	755,33	752,09	958,52	422,06	578,14

Tabelle 26: Gewinnbeiträge 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	938,24	447,42	495,98	627,65	62,45	85,71
2013/2014	643,54	314,72	298,72	604,13	83,90	339,04
2014/2015	886,41	223,88	604,85	555,15	-140,64	109,50
2015/2016	424,32	-245,61	77,13	232,37	-12,10	172,29
Mittelwert	723,13	185,10	369,17	504,82	-1,60	176,63

Tabelle 27: Gewinnbeiträge 2012/2013 – 2015/2016 (€/GE)

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	9,59	4,94	6,44	7,17	1,57	2,61
2013/2014	7,42	1,63	3,77	6,46	0,03	3,26
2014/2015	9,40	4,37	6,38	7,13	2,03	1,15
2015/2016	5,55	2,39	3,01	2,27	2,00	3,62

Mittelwert	7,99	3,33	4,90	5,76	0,39	2,66
-------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Die Differenz der Gewinnbeiträge der einzelnen Kulturen fällt unterschiedlich aus. Für Winterweizen wurde im Soester M-Betrieb mit durchschnittlich 822,41 € ein sehr hoher Gewinnbeitrag erzielt, der insgesamt der höchste über alle Feldfrüchte, Standorte und Jahre hinweg ist. Bei Betrachtung des Winterweizenanbaus in Soest weist der O-Betrieb mit 637,20 € den geringsten Gewinn je ha auf.

Insgesamt wird am Standort Braunschweig ein niedrigeres Niveau der Gewinnbeiträge als in Soest realisiert. Der M-Betrieb erreicht wie in Soest auch in Braunschweig mit 619,38 €/ha den höchsten Gewinnbeitrag bei Betrachtung der unterschiedlichen Betriebsformen; V- und O-Betrieb befinden sich mit 578,21 €/ha und 597,84 €/ha auf einem ähnlichen Niveau (Tabelle 28).

Tabelle 28: Gewinnbeiträge Winterweizen 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	1.129,37	1.048,33	1.010,67	771,33	861,47	737,20
2013/2014	688,40	713,52	502,12	765,41	541,11	499,68
2014/2015	1.011,83	530,09	794,93	555,86	460,74	552,06
2015/2016	460,05	348,16	241,08	384,92	449,50	602,43
Mittelwert	822,41	660,02	637,20	619,38	578,21	597,84

Bei Wintergerste fällt der Gewinnbeitrag der jeweiligen V-Betriebe beider Standorte deutlich niedriger aus als derjenige der O-Betriebe, da in den V-Betrieben teilweise geringere Erträge sowie tendenziell höhere Betriebsmittelaufwendungen anfielen. Dies ist eine direkte Folge der unterschiedlichen Vorfrucht in den Betrieben, im O-Betrieb steht die Wintergerste nach Ackerbohnen und im V-Betrieb nach Winterweizen. Im Mittel der Jahre beträgt die Differenz der Gewinnbeiträge zwischen V- und O-Betrieb in Soest rund 305,11 €/ha, in Braunschweig sogar rund 521,54 € (Tabelle 29).

Tabelle 29: Gewinnbeiträge Wintergerste 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	Soest		Braunschweig	
	V-Betrieb	O-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	380,32	841,75	576,65	816,67
2013/2014	64,43	583,41	551,92	891,62
2014/2015	671,64	1.009,05	- 294,76	552,14
2015/2016	348,16	250,77	55,09	714,61
Mittelwert	366,14	671,25	222,22	743,76

Der Gewinnbeitrag des Winterapses zeigt sich jeweils sowohl für Soest als auch für Braunschweig im Mittel sowohl auf dem jeweiligen M- als auch auf dem entsprechenden O-Betrieb auf einem ähnlichen Niveau.

Dabei liegen die Gewinnbeiträge des Standortes Soest für M- und O-Betrieb insgesamt ca. 257 € über denen des Standortes Braunschweig (Tabelle 30).

Tabelle 30: Gewinnbeiträge Winterraps 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	Soest		Braunschweig	
	M-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	555,98	681,43	340,30	233,68
2013/2014	553,83	258,74	281,56	275,77
2014/2015	635,58	811,34	553,72	369,28
2015/2016	352,86	350,93	-72,73	165,39
Mittelwert	524,56	525,61	275,72	261,03

Sehr große Unterschiede zwischen Standorten sowie Betriebsformen werden beim durchschnittlichen Gewinnbeitrag des Silomais deutlich. Während in Soest hier auf beiden Standorten geringe, jedoch positive durchschnittliche Gewinnbeiträge erzielt werden (im V-Betrieb 181,62 €, im O-Betrieb lediglich 102,01 €), treten in Braunschweig negative Gewinnbeiträge auf diesen beiden Betriebsformen auf. Dabei ist der Gewinnbeitrag des V-Betriebs im Mittel mit -224,23 € je ha deutlich negativer als der des O-Betriebes mit -161,68 € (Tabelle 31). 2014/2015 war für den Braunschweiger Standort aufgrund eines niedrigen Ertragsniveaus das Erntejahr mit dem geringsten Gewinnbeitrag.

Tabelle 31: Gewinnbeiträge Silomais 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	Soest		Braunschweig	
	V-Betrieb	O-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	469,57	244,86	-596,12	-330,62
2013/2014	491,72	-112,08	-4,60	90,29
2014/2015	-140,81	117,04	-425,36	-435,85
2015/2016	-94,01	158,24	129,18	29,47
Mittelwert	181,62	102,01	-224,23	-161,68

Die mittleren Gewinnbeiträge für Grünroggen in den jeweiligen O-Betrieben lagen für Soest mit -24,09 €/ha im leicht negativen Bereich, in Braunschweig sind diese mit 18,12 € je ha dagegen leicht positiv. Ungünstig wirkte sich das Erntejahr 2015/16 aus. Hier fielen die Gewinnbeiträge mit -258,62 € je ha in Braunschweig und -275,65 € in Soest aufgrund fehlender Erträge aus der Ernte in deutlich negative Bereiche (Tabelle 32).

Tabelle 32: Gewinnbeiträge Grünroggen 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	O-Betrieb	
	Soest	Braunschweig
2012/2013	199,46	317,95
2013/2014	7,27	67,89
2014/2015	-27,43	-54,73
2015/2016	-275,65	-258,62

Mittelwert	-24,09	18,12
-------------------	---------------	--------------

Der durchschnittliche Gewinnbeitrag für die Ackerbohnen liegt im Soester O-Betrieb ertragsbedingt deutlich über dem Niveau des O-Betriebes in Braunschweig (Tabelle 33). Ansonsten sind die Gewinnbeiträge bis auf das Erntejahr 2012/2013 auch in Braunschweig durchweg positiv.

Tabelle 33: Gewinnbeiträge Ackerbohne 2012/2013 – 2015/2016 (€/ha)

	O-Betrieb	
	Soest	Braunschweig
2012/2013	363,41	-83,24
2013/2014	710,06	749,43
2014/2015	823,28	362,58
2015/2016	711,91	568,74
Mittelwert	652,16	399,38

Kostenstruktur

Die Gesamtkosten/GE über die Jahre 2012/2013 bis 2014/2015 befinden sich beim Vergleich der Betriebe in den einzelnen Erntejahren auf einem ähnlichen Niveau. Das Erntejahr 2015/2016 hebt sich allerdings hiervon ab; im Soester als auch im Braunschweiger M-Betrieb werden in diesem Jahr mit 18,30 € bzw. 21,58 € je GE mit den höchsten Gesamtkosten produziert. Auf beiden Standorten lassen sich die erhöhten Gesamtkosten auf höhere Betriebsmittel- und Maschinenkosten in diesem Jahr zurückführen.

Beim zwischenbetrieblichen Vergleich der Mittelwerte über die Jahre 2012 bis 2016 fallen die Gesamtkosten der V-Betriebe beider Standorte am geringsten aus. Auf dem Soester und dem Braunschweiger M-Betrieb waren die Gesamtkosten am höchsten (Tabelle 34).

Tabelle 34: Gesamtkosten 2012/2013 – 2015/2016 (€/GE)

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	14,26 €	10,77 €	14,86 €	16,68 €	14,14 €	15,17 €
2013/2014	16,42 €	17,16 €	16,32 €	17,38 €	14,06 €	16,83 €
2014/2015	14,45 €	10,82 €	13,72 €	16,72 €	20,82 €	18,95 €
2015/2016	18,30 €	14,10 €	14,14 €	21,58 €	13,71 €	14,44 €
Mittelwert	15,86 €	13,21 €	14,76 €	18,09 €	15,68 €	16,35 €

Demgegenüber fallen die variablen Kosten des Soester M-Betriebes im Durchschnitt der Fruchtfolge und Jahre je ha durchweg am geringsten aus; die variablen Kosten des Soester V-Betriebes sind durchschnittlich am höchsten (en variablen Kosten je ha auf).

Tabelle 35). Am Standort Braunschweig weist der M-Betrieb ebenfalls die geringsten variablen Kosten je ha auf.

Tabelle 35: Struktur der variablen Kosten (€) im Durchschnitt der Fruchtfolge

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
Dünger	169,64 €	357,09 €	308,14 €	215,86 €	264,85 €	260,66 €
Pflanzenschutz	242,83 €	313,84 €	252,83 €	264,51 €	268,60 €	260,99 €
var. Maschko.	256,69 €	406,79 €	316,01 €	268,36 €	434,89 €	322,19 €
Summe	669,16 €	1.077,72 €	876,98 €	748,73 €	968,34 €	843,84 €

Wie aus

Tabelle 36 bis Tabelle 38 hervorgeht, kann dieser Zusammenhang auch anhand der einzelnen variablen Kostenpositionen des M-Betriebes dargestellt werden, die mit Ausnahme der Pflanzenschutzmittelkosten in Braunschweig (Tabelle 37) gegenüber den V- und O-Betrieben an beiden Standorten durchweg am geringsten sind. Der V-Betrieb weist an beiden Standorten die höchsten variablen Kosten auf.

Im Erntejahr 2015/16 liegen die variablen Maschinenkosten mehr oder weniger deutlich in allen Betriebsformen beider Standorte über denen der Vorjahre (Tabelle 38).

Tabelle 36: Düngerkosten im Durchschnitt der Fruchtfolge 2012/2013 – 2015/2016

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	145,34 €	422,30 €	338,82 €	169,52 €	216,70 €	219,01 €
2013/2014	140,76 €	364,30 €	368,03 €	165,35 €	252,77 €	283,87 €
2014/2015	160,01 €	389,82 €	300,70 €	235,71 €	373,89 €	336,54 €
2015/2016	232,45 €	251,93 €	225,01 €	292,85 €	216,05 €	203,23 €
Mittelwert	169,64 €	357,09 €	308,14 €	215,86 €	264,85 €	260,66 €

Tabelle 37: Pflanzenschutzmittelkosten im Durchschnitt der Fruchtfolge 2012/2013

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	273,27 €	193,92 €	203,77 €	244,87 €	160,86 €	232,29 €
2013/2014	140,76 €	364,30 €	265,46 €	355,69 €	265,33 €	283,34 €
2014/2015	260,85 €	248,14 €	219,35 €	195,84 €	228,72 €	206,01 €
2015/2016	296,46 €	449,01 €	322,74 €	261,65 €	419,50 €	322,30 €
Mittelwert	242,83 €	313,84 €	252,83 €	264,51 €	268,60 €	260,99 €

Tabelle 38: Variable Maschinenkosten im Durchschnitt der Fruchtfolge 2012/2013

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	231,76 €	406,39 €	311,69 €	258,10 €	444,88 €	309,82 €
2013/2014	242,01 €	471,99 €	320,71 €	251,17 €	439,22 €	340,57 €
2014/2015	256,51 €	463,09 €	307,02 €	245,05 €	488,71 €	339,89 €
2015/2016	296,46 €	285,71 €	324,61 €	319,12 €	366,73 €	298,46 €
Mittelwert	256,69 €	406,79 €	316,01 €	268,36 €	434,89 €	322,19 €

Der Arbeitsaufwand des O-Betriebes ist mit insgesamt durchschnittlich 2,55 Akh/ha bzw. 2,32 Akh/ha an beiden Standorten am geringsten, der des M-Betriebes dagegen mit insgesamt 5,12 Akh/ha bzw. 4,96 Akh/ha am höchsten (Tabelle 39). Auf dem O-Betrieb konnte betriebseigene Arbeitszeit durch Direktsaat bzw. durch den Einsatz von Lohnunternehmern bei organischer Düngung eingespart werden.

Tabelle 39: Arbeitsaufwand 2012/2013 – 2015/2016 (Akh/ha)

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2012/2013	4,38	4,04	2,33	5,20	4,05	1,64
2013/2014	5,32	3,85	2,42	4,99	3,00	1,87
2014/2015	5,19	5,89	1,91	4,60	3,97	2,68
2015/2016	5,60	4,35	3,53	5,06	3,53	3,11
Mittelwert	5,12	4,53	2,55	4,96	3,64	2,32

5.2.2 Treibhauspotential- Vermeidungskosten – Differenzen der Gewinnbeiträge

Die Treibhauspotential-Vermeidungskosten werden in diesem Projekt aus der Differenz der Gewinnbeiträge ermittelt, die sich durch die Änderung/Anpassung der Bewirtschaftung ergibt. Diese Veränderung des wirtschaftlichen Ergebnisses wird dann der Veränderung der Emissionen gegenübergestellt.

Insgesamt fallen die Gewinnbeiträge für den M- und V-Betrieb des Soester Standortes bis auf das Erntejahr 2014 durchweg höher aus als in Braunschweig. An beiden Standorten treten im M- und V-Betrieb sowohl positive als auch negative Abweichungen bei den Gewinndifferenzen zum O-Betrieb auf. Der V-Betrieb weist

in den Erntejahren 2014 und 2016 stets einen geringeren Gewinn gegenüber dem O-Betrieb auf. In Braunschweig ist dies ebenfalls in höherem Ausmaß für die Erntejahre 2015 und 2016 feststellbar.

Demgegenüber wiesen die Gewinndifferenzen des M- bzw. des V-Betriebes zum O-Betrieb für den Standort Soest eine geringere Streuung auf; die Gewinndifferenz des M-Betriebes zum O-Betrieb betrug in Soest insgesamt durchschnittlich 356,24 €/ha, in Braunschweig 442,27 €/ha. Die des V-Betriebes zum O-Betrieb betrug in Soest im Durchschnitt -137,84 €/ha, in Braunschweig -159,58 €/ha. Hier hebt sich lediglich das Erntejahr 2014 mit einer leicht positiven Gewinndifferenz von 26,54 €/ha ab.

Insgesamt weisen die M-Betriebe in Soest und Braunschweig durchweg positive Differenzen der Gewinnbeiträge zum O-Betrieb aus; demgegenüber zeigen sich auf dem V-Betrieb, bis auf das Erntejahr 2014 in Braunschweig bzw. 2015 in Soest, negative Differenzen der Gewinnbeiträge, diese Betriebsform hat demnach überwiegend niedrigere Gewinne zu verzeichnen als der O-Betrieb des jeweiligen gleichen Standorts. Die Differenzen der Gewinnbeiträge sind in der folgenden Tabelle 40 zusammengefasst.

Tabelle 40: Gewinnbeiträge der einzelnen Betriebe sowie Differenzen zum O-Betrieb, Erntejahre 2014, 2015, 2016

	Soest 2014		Braunschweig 2014	
	Gewinnbeitrag (€/ha)	Differenz (€/ha)	Gewinnbeitrag (€/ha)	Differenz (€/ha)
M-Betrieb	938,24	442,26	1.077,60	616,07
V-Betrieb	447,42	-48,56	488,07	26,54
O-Betrieb	495,98		461,54	
	Soest 2015		Braunschweig 2015	
	Gewinnbeitrag (€/ha)	Differenz (€/ha)	Gewinnbeitrag (€/ha)	Differenz (€/ha)
M-Betrieb	643,54	344,82	604,13	265,09
V-Betrieb	314,72	16,00	83,90	-255,13
O-Betrieb	298,72		339,04	
	Soest 2016		Braunschweig 2016	
	Gewinnbeitrag (€/ha)	Differenz (€/ha)	Gewinnbeitrag (€/ha)	Differenz (€/ha)
M-Betrieb	886,41	281,65	555,15	445,65
V-Betrieb	223,88	-380,97	-140,64	-250,14
O-Betrieb	604,85		109,50	

5.2.3 Treibhauspotential-Vermeidungskosten – Treibhausgasemissionen bzw. –potential

Bei der Gesamtbetrachtung aller Betriebsformen fällt das Treibhauspotential in den O-Betrieben beider Standorte mit 1.287,13 kg CO₂-Äq./ha in Soest bzw. 1.555,50 kg CO₂-Äq./ha in Braunschweig am geringsten aus. In den M-Betrieben lässt sich mit durchschnittlich 2.612 kg CO₂-Äq./ha das höchste Treibhauspotential über alle Betriebe hinweg verzeichnen. Dabei weist der M-Betrieb des Standorts Braunschweig ein niedrigeres Potential als derjenige in Soest auf.

In Tabelle 41 sind die Treibhauspotentiale der einzelnen Betriebsformen aus der zweiten Versuchsphase (kg CO₂-Äq./ha) zu entnehmen.

Tabelle 41: Treibhauspotential (kg CO₂-Äq./ha) M-,V- und O-Betriebe für die jeweiligen Standorte (2014 bis 2016)

	Soest			Braunschweig		
	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb	O-Betrieb
2014	3.125,97	2.042,14	1.531,40	1.906,35	1.695,43	1.581,21
2015	2.756,25	1.430,47	1.143,34	2.550,98	1.709,53	1.543,05
2016	2.765,79	1.406,55	1.186,64	2.567,28	1.660,47	1.542,23
Mittelwert	2.882,67	1.626,39	1.287,13	2.341,54	1.688,48	1.555,50

Die Treibhauspotential-Vermeidungskosten (€/kg CO₂-Äq.) sind in der Tabelle 42 aufgeführt. Wie zuvor beschrieben, liegt das THG-Potential der M-Betriebe höher als das der V-Betriebe. Das erhöhte THG-Potential der M-Betriebe lässt sich auf den intensiven Einsatz von mineralischen Düngern und Pflanzenschutzmitteln zurückführen. Dementsprechend sind auch die Treibhauspotential-Vermeidungskosten der M-Betriebe größer als in den V-Betrieben. Bei den M-Betrieben der jeweiligen Standorte werden im Mittel positive Treibhauspotential-Vermeidungskosten erzielt, wohingegen auf den beiden V-Betrieben negative Treibhauspotential – Vermeidungskosten ermittelt wurden (Tabelle 42). Würde der viehhaltende Betrieb seine Wirtschaftsweise zugunsten der klimaoptimierten Weise ändern, könnte er seinen Gewinnbeitrag um 0,92 ct/kg CO₂-Äq. in Soest bzw. 0,28 ct/kg CO₂-Äq. in Braunschweig bei verringerter Emission erhöhen.

Tabelle 42: Treibhauspotential – Vermeidungskosten je kg CO₂ beim Übergang zur klimaoptimierten Bewirtschaftung für die jeweiligen Standorte (2014 bis 2016)

	Soest		Braunschweig	
	M-Betrieb	V-Betrieb	M-Betrieb	V-Betrieb
2014	0,22 €	0,03 €	1,26 €	2,23 €
2015	0,17 €	- 1,33 €	0,53 €	- 1,50 €
2016	0,22 €	- 1,47 €	0,07 €	- 1,56 €
Mittelwert	0,20 €	-0,92 €	0,62 €	-0,28 €

Die folgenden Abbildungen stellen das Treibhauspotential je kg CO₂-Äq. sowie die Treibhausgasvermeidungskosten (je kg CO₂ und je ha) in den verschiedenen Jahren nochmals graphisch dar.

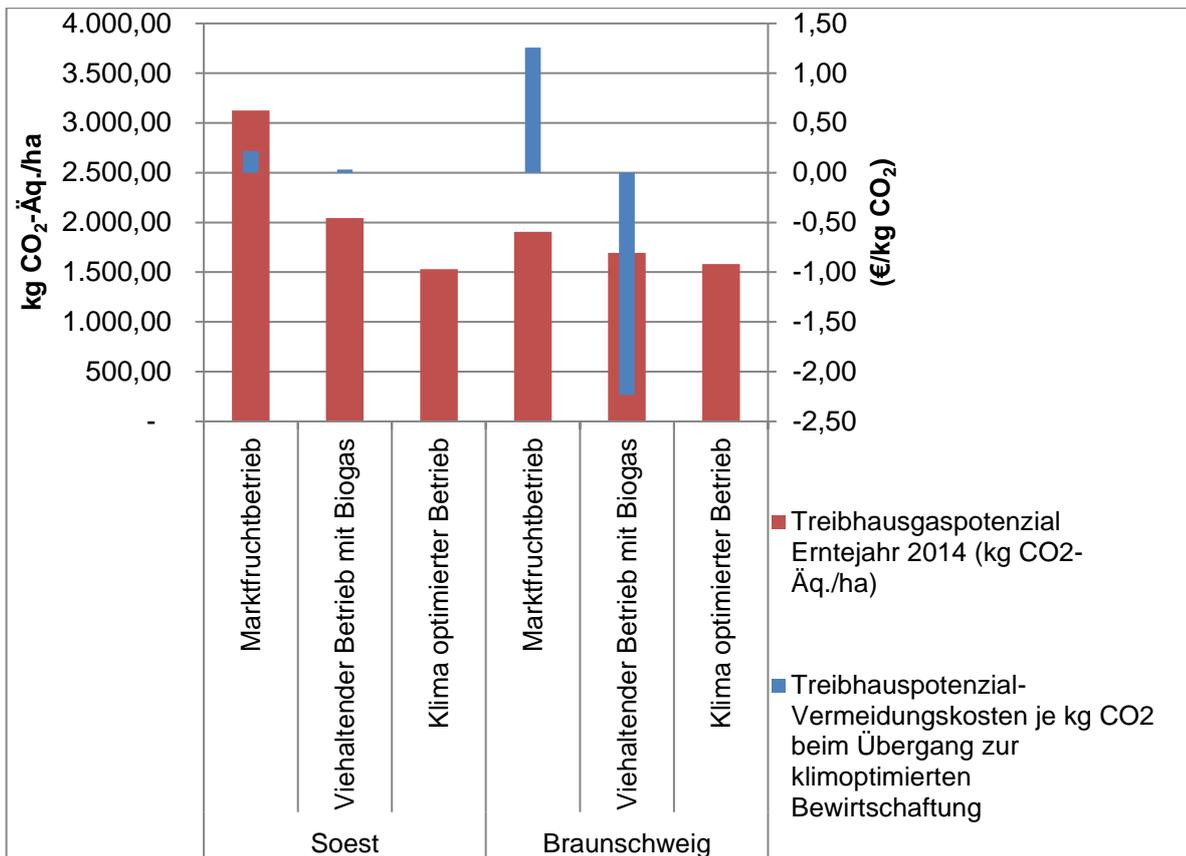


Abbildung 71: Treibhauspotential sowie Treibhauspotential-Vermeidungskosten in den Modellbetrieben (2014)

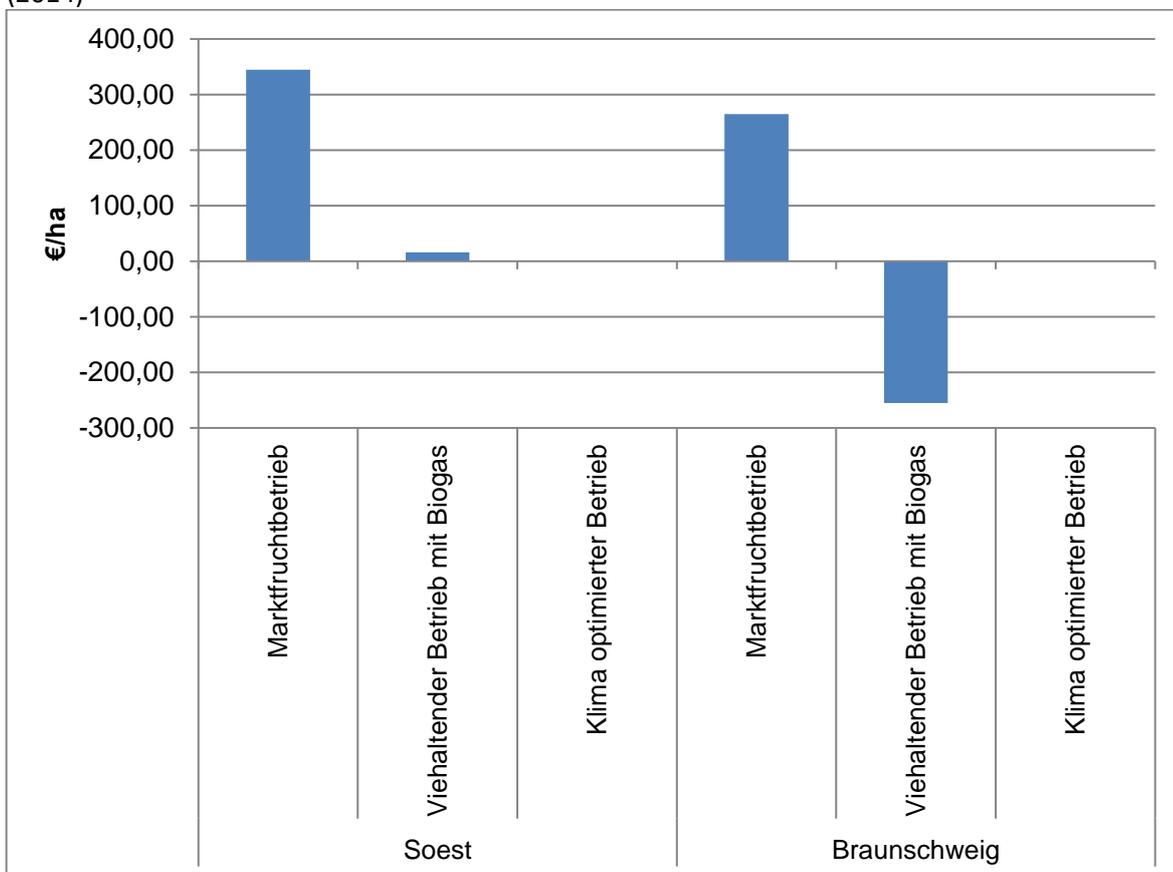


Abbildung 72: Treibhausgasvermeidungskosten je ha beim Übergang zur klimooptimierten Bewirtschaftung (2014)

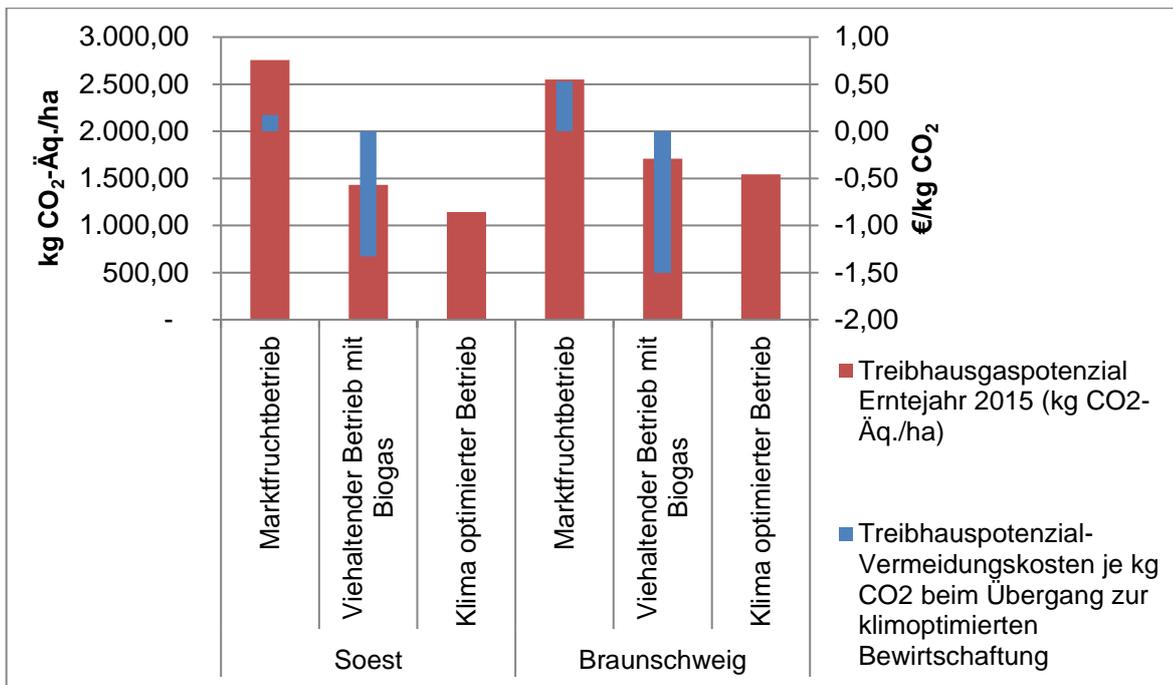


Abbildung 73: Treibhauspotential sowie -vermeidungskosten in den Modellbetrieben (2015)

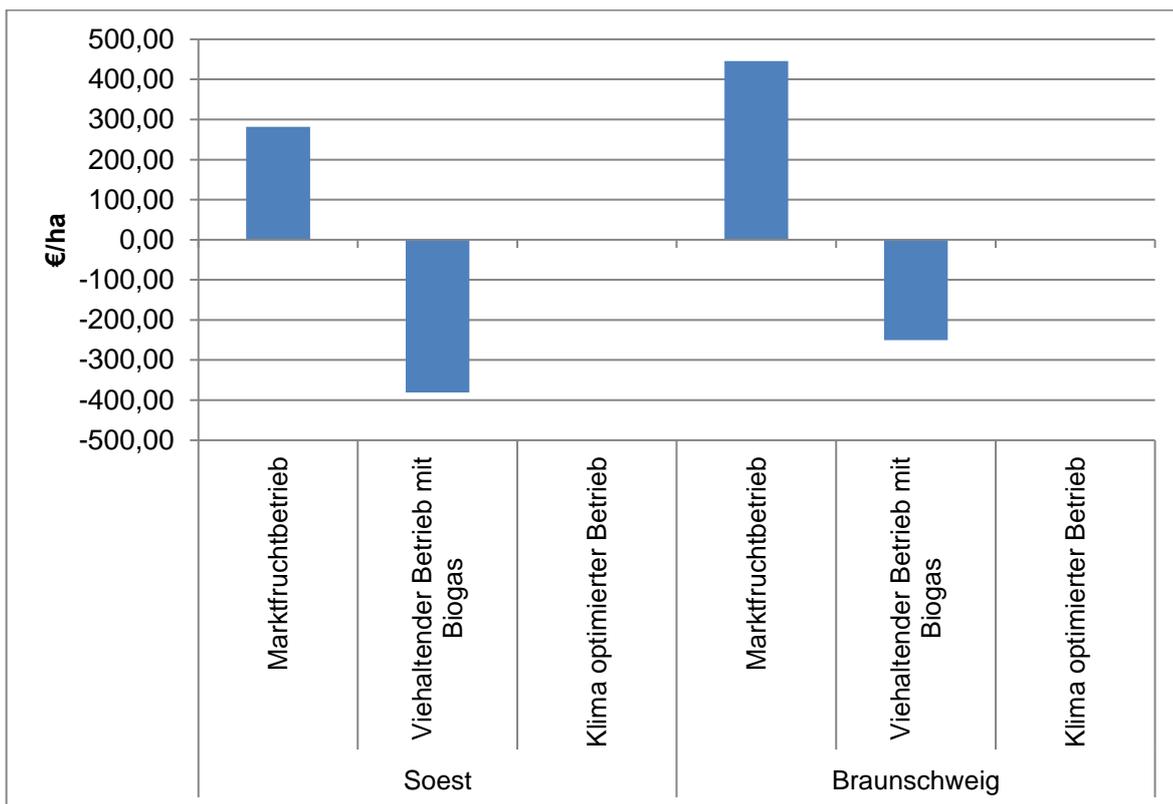


Abbildung 74: Treibhausgasvermeidungskosten je ha beim Übergang zur klimaoptimierten Bewirtschaftung (2015)

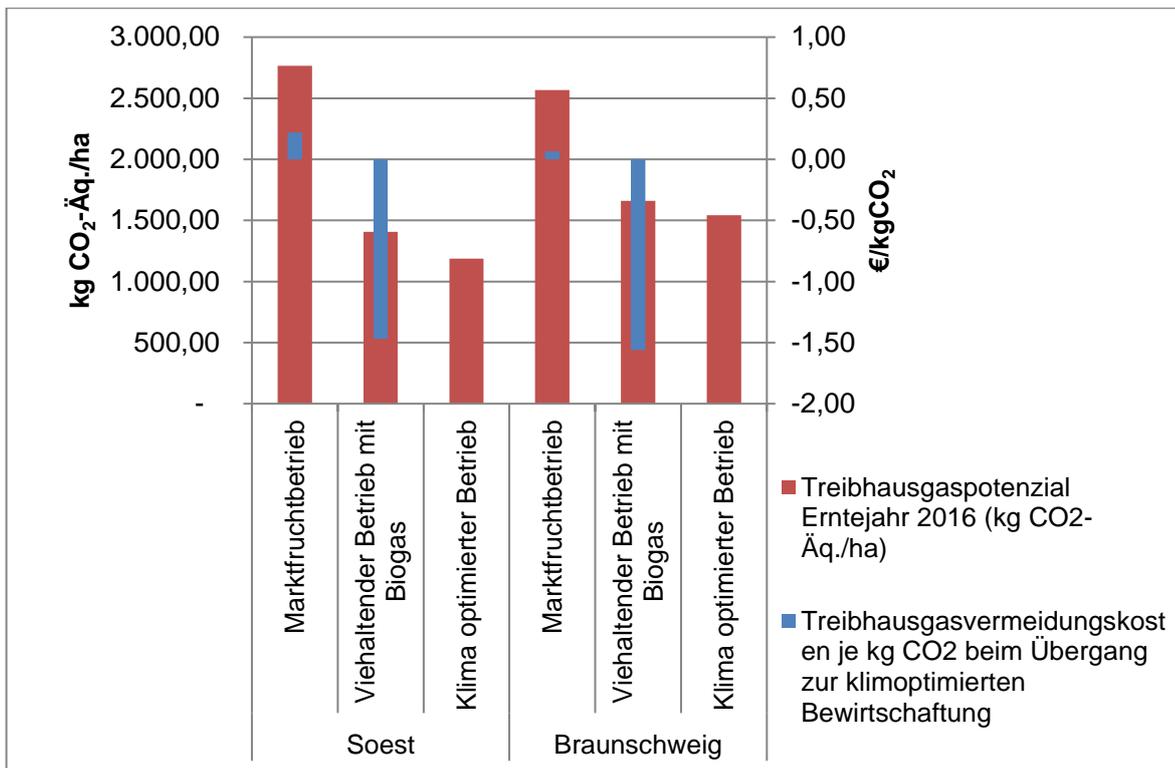


Abbildung 75: Treibhausgaspotential sowie -vermeidungskosten in den Modellbetrieben (2016)

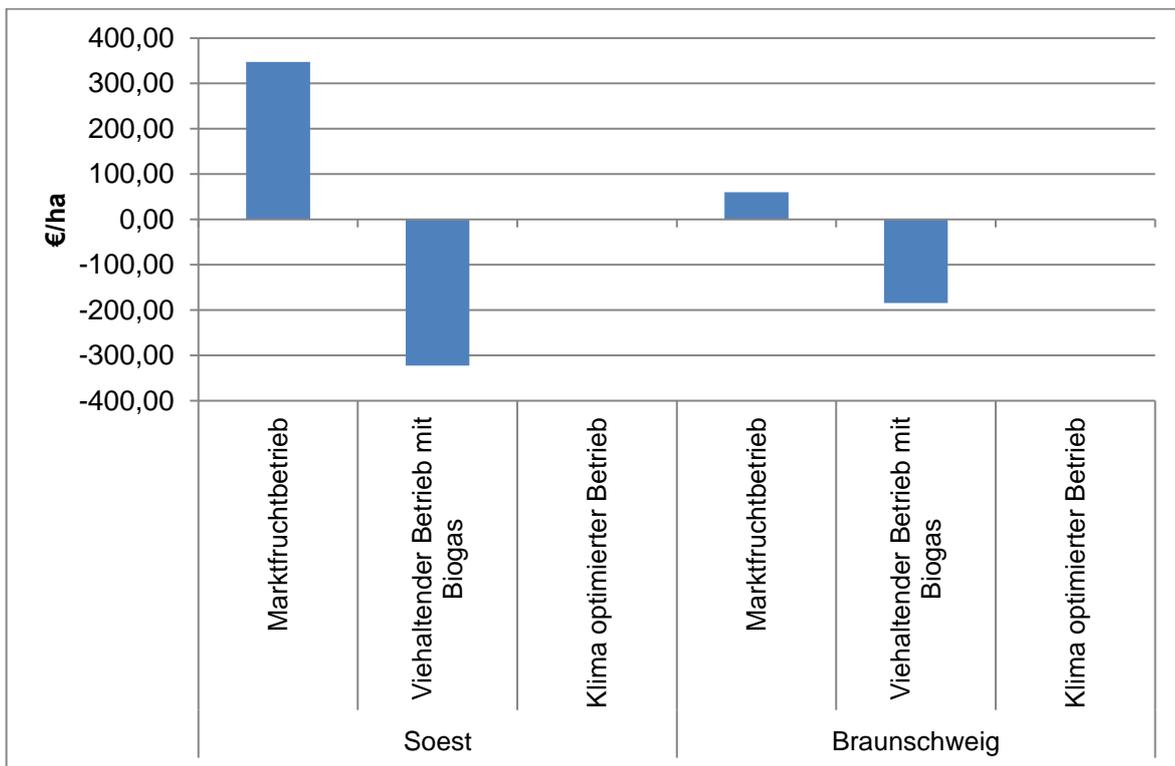


Abbildung 76: Treibhausgasvermeidungskosten je ha beim Übergang zur klimaoptimierten Bewirtschaftung (2016)

5.2.4 Bewertung der Düngerapplikation in Silomais bzw. Winterweizen

Im O-Betrieb konnte das Verfahren der organischen Düngung insgesamt mit geringeren Kosten als im V-Betrieb durchgeführt werden. Ausschlaggebend sind hierfür die fixen und variablen Kosten der Düngerausbringung, die bei der organischen Düngung gegenüber der mineralischen Düngung um das 15- 20 fache erhöht sind. Vor allem beim Silomais übertrifft die organische Düngung mit 68 kg N im Mittel deutlich den mineralischen Düngeaufwand (siehe Tabelle 43, Tabelle 44).

Tabelle 43: Mittlere N-Mengen (kg/ha) mineralisch sowie organisch bei gleichem Verfahren (Silomais)

	Org. Düngung mit Schleppschlauch + min. Ergänzungsdüngung				Gärrestunterfußdüngung + mineral. Ergänzungsdüngung	
	V-Betrieb		O-Betrieb		O-Betrieb	
	minerali- sch	organisch	mineralisch	organisch	mineralisch	organisch
Soest	96	124	85	124	85	124
Braunsch- weig	92	122	89	122	-	-

Tabelle 44: Mittlere N-Mengen (kg/ha) mineralisch sowie organisch bei gleichem Verfahren (Winterweizen)

	Org. Düngung mit Schleppschlauch + min. Ergänzungsdüngung, O-Betrieb	
	Mineralisch	organisch
Soest	111	68
Braunschweig	104	101

Beim klimaoptimierten Betrieb in Soest wurde die Gülle in den Boden eingebracht, dadurch erhöhen sich die Gülleausbringungskosten je kg N um etwa 20 % auf 1,15 €/kg N gegenüber der Schleppschlauch-Gülleausbringung mit 0,9 €/kg N. Allerdings kann bei Gülleausbringung in den Boden auf eine weitere Saatbettbereitung für den Mais verzichtet werden. Um die einzelnen Gülleausbringungsverfahren auch hinsichtlich der Kosten für die Saatbettbereitung miteinander vergleichbar zu machen, beinhalten die Schleppschlauch- und Mineraldüngervarianten bereits Kosten der Einarbeitung. Für die Gülleausbringung mit Einarbeitung werden somit mit 1,145 €/kg N angesetzt. Die Kosten der mineralischen Düngung liegen lediglich bei 0,065 €/kg N bei Kalkammonsalpeter, zuzüglich Einarbeitungskosten in Höhe von 0,25 €/kg N.

Abbildung 77 bis Abbildung 80 stellen die Ergebnisse nochmals graphisch dar. In Braunschweig stand die Strip-Till Technik (Gärrestunterfußdüngung) nicht zur Verfügung, da dieses Verfahren bei dem schweren Tonboden in Braunschweig große Probleme verursacht hätte.

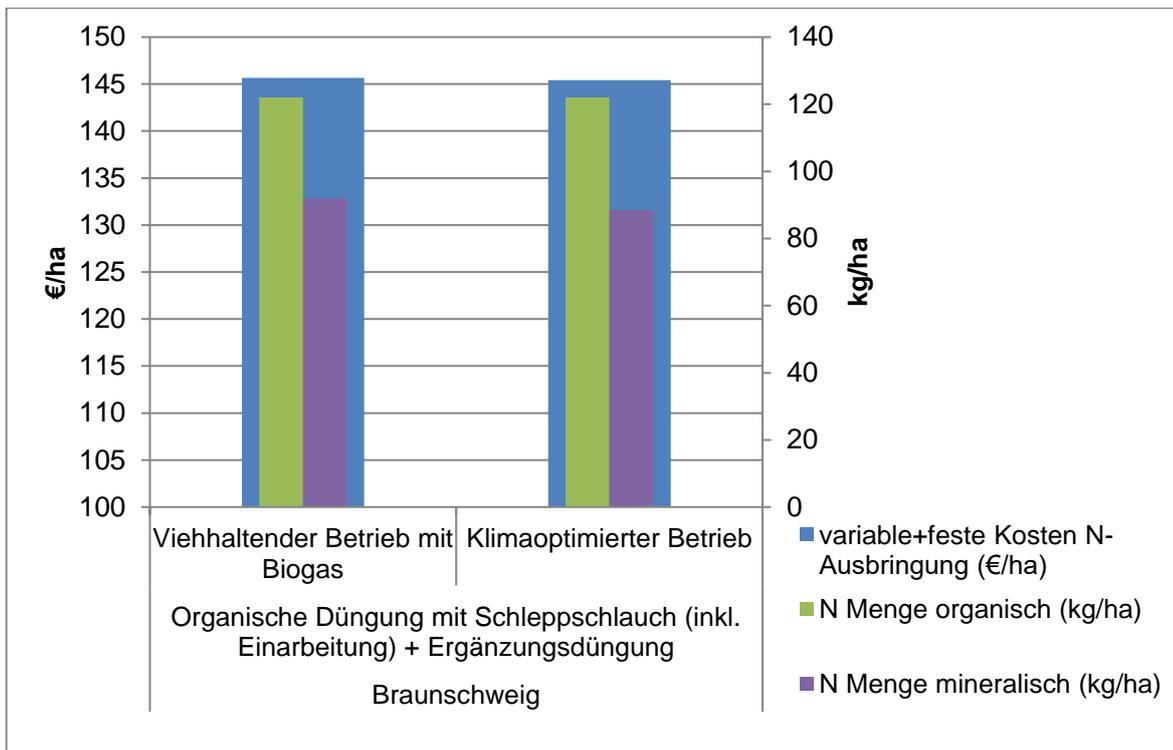


Abbildung 77: Bewertung Düngerapplikation Silomais: Mittlere Kosten der N-Ausbringung (€/ha) sowie N-Menge V- und O-Betrieb Braunschweig im Vergleich

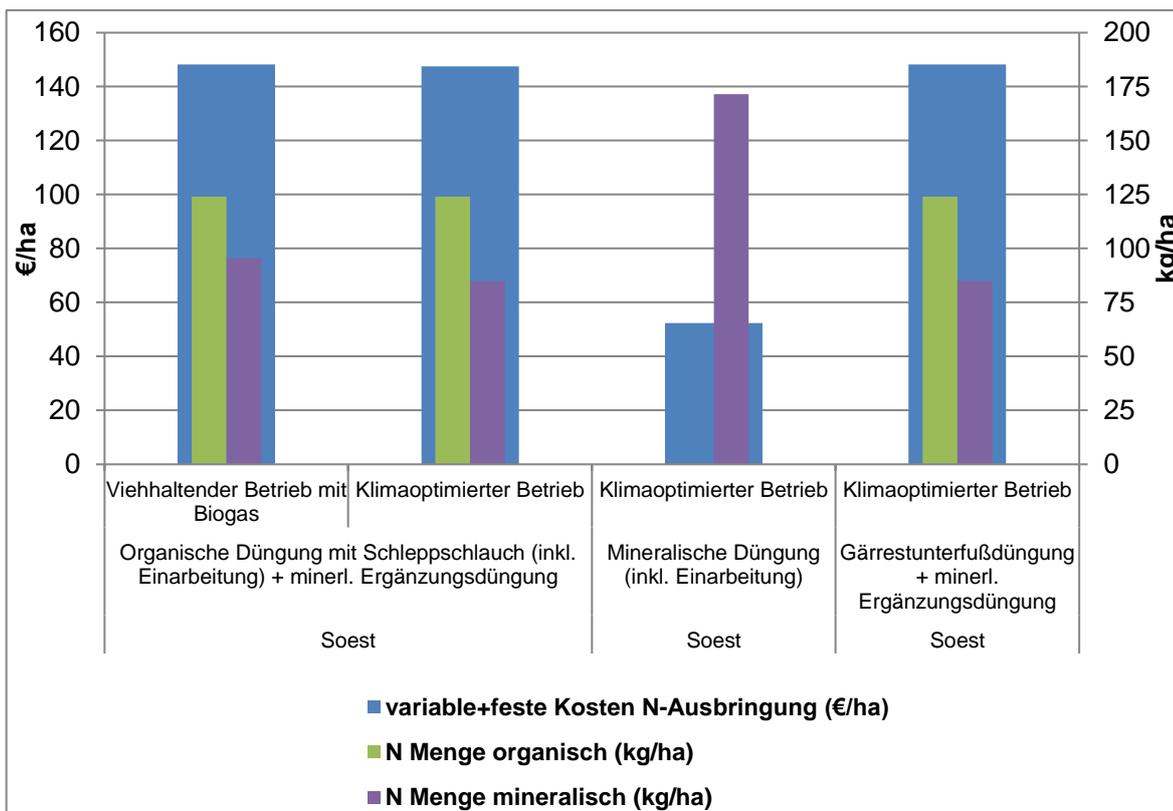


Abbildung 78: Bewertung Düngerapplikation Silomais: Mittlere Kosten der N-Ausbringung (€/ha) sowie N-Menge V- und O-Betrieb Soest im Vergleich

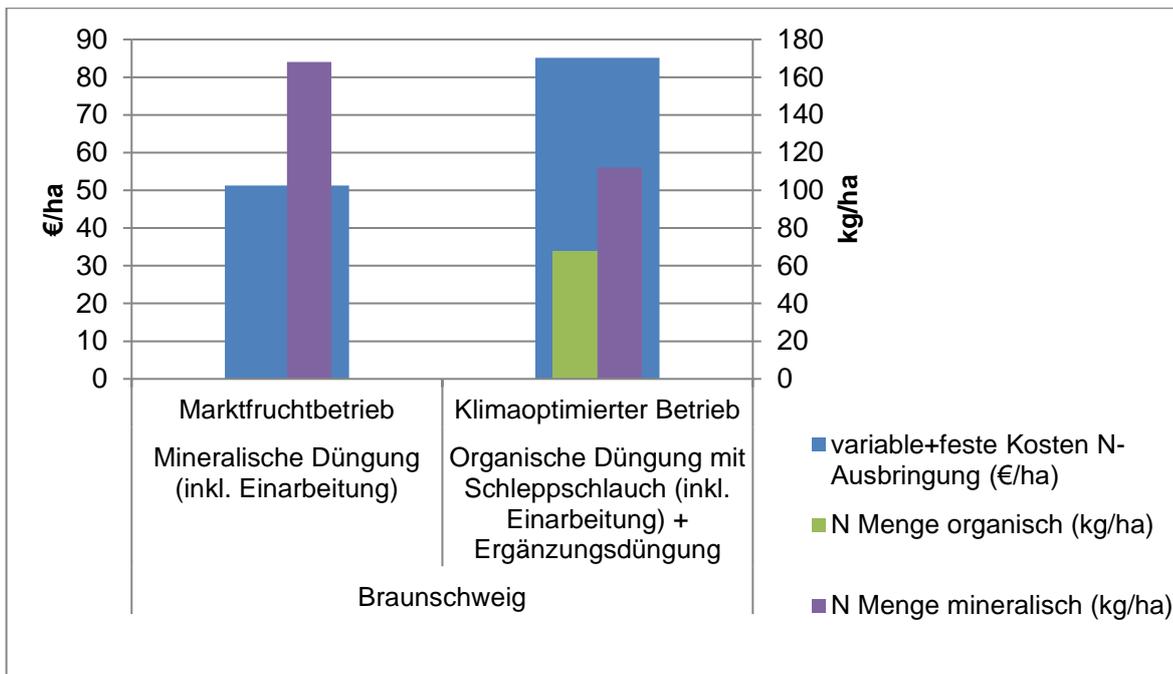


Abbildung 79: Bewertung Düngerapplikation Winterweizen: Mittlere Kosten der N-Ausbringung (€/ha) sowie N-Menge M- und O-Betrieb Braunschweig im Vergleich

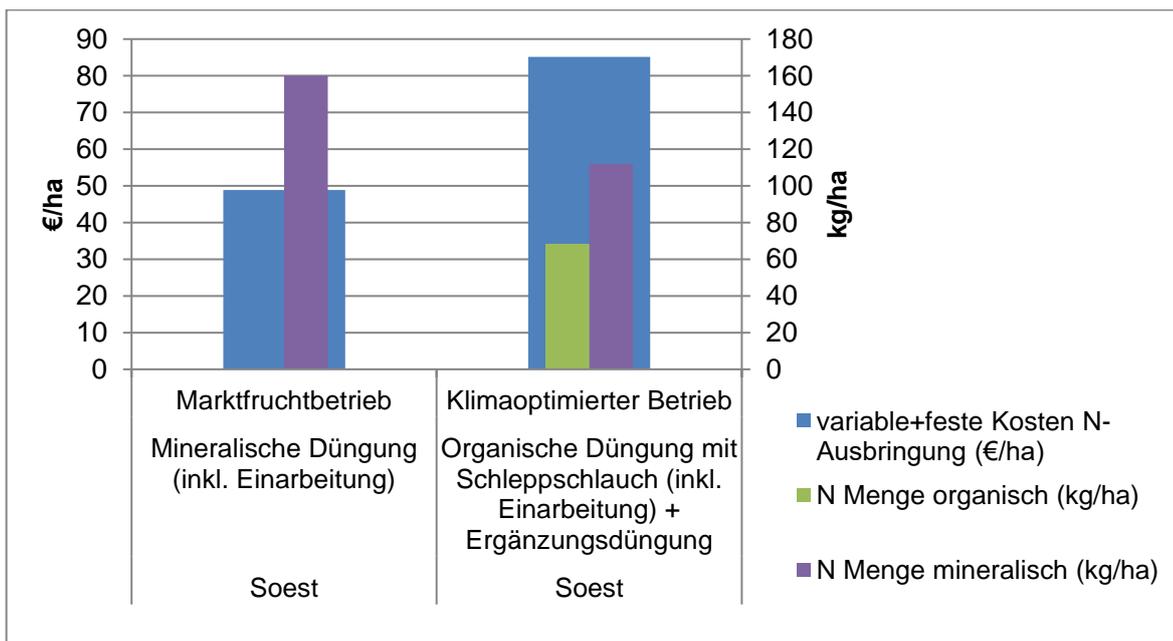


Abbildung 80: Bewertung Düngerapplikation Winterweizen: Mittlere Kosten der N-Ausbringung (€/ha) sowie N-Menge M- und O-Betrieb Soest im Vergleich

Silomais, Standort Braunschweig:

Die N₂O-Emissionen in kg/ha in CO₂-Äq. für Silomais sind im Braunschweiger O-Betrieb deutlich höher als auf dem V-Betrieb, wobei die bei der Herstellung von mineralischen Düngemitteln anfallenden CO₂-Emissionen für beide Betriebsformen etwa gleich hoch sind (Abbildung 81). Dementsprechend sind auch die Freisetzungskosten auf dem O-Betrieb negativ (Abbildung 82). Dieses Verfahren wird demnach kostengünstiger, wobei zugleich eine Steigerung der Emissionen zu verzeichnen ist; offensichtlich steigen die

Lachgasemissionen durch die Bewirtschaftungsverfahren im O-Betrieb an. Eine umfangreiche Begründung der Sachverhalte befindet sich im Teilprojekt 4.4.1 Lachgasemissionen.

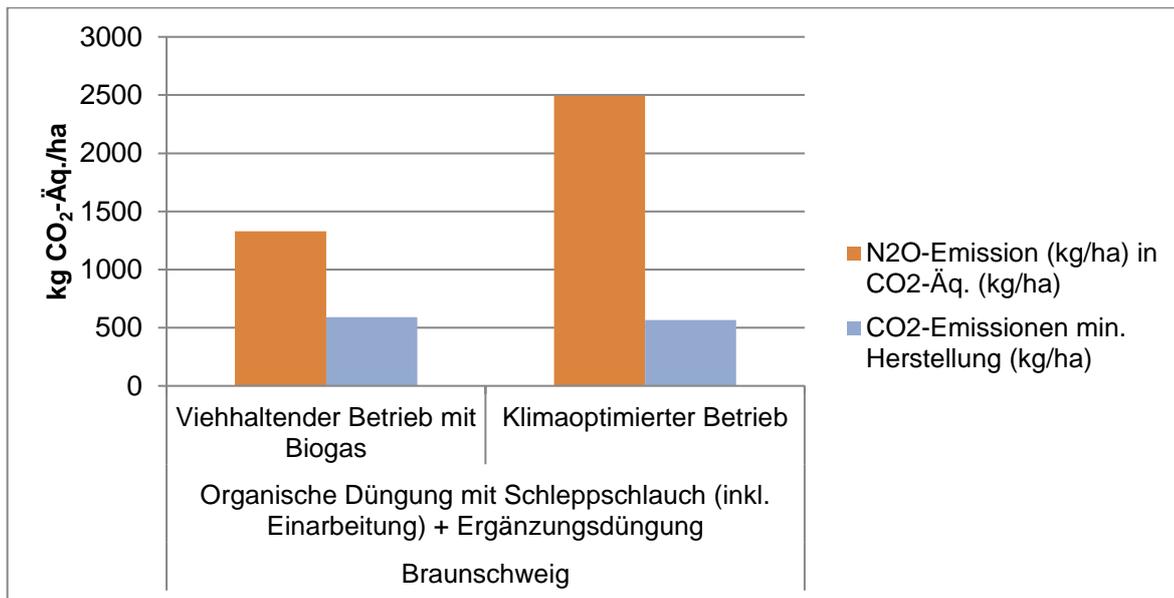


Abbildung 81: Bewertung Düngerapplikation Silomais: Mittlere Emissionen (kg CO₂-Äq./ha) V- und O-Betrieb Braunschweig im Vergleich

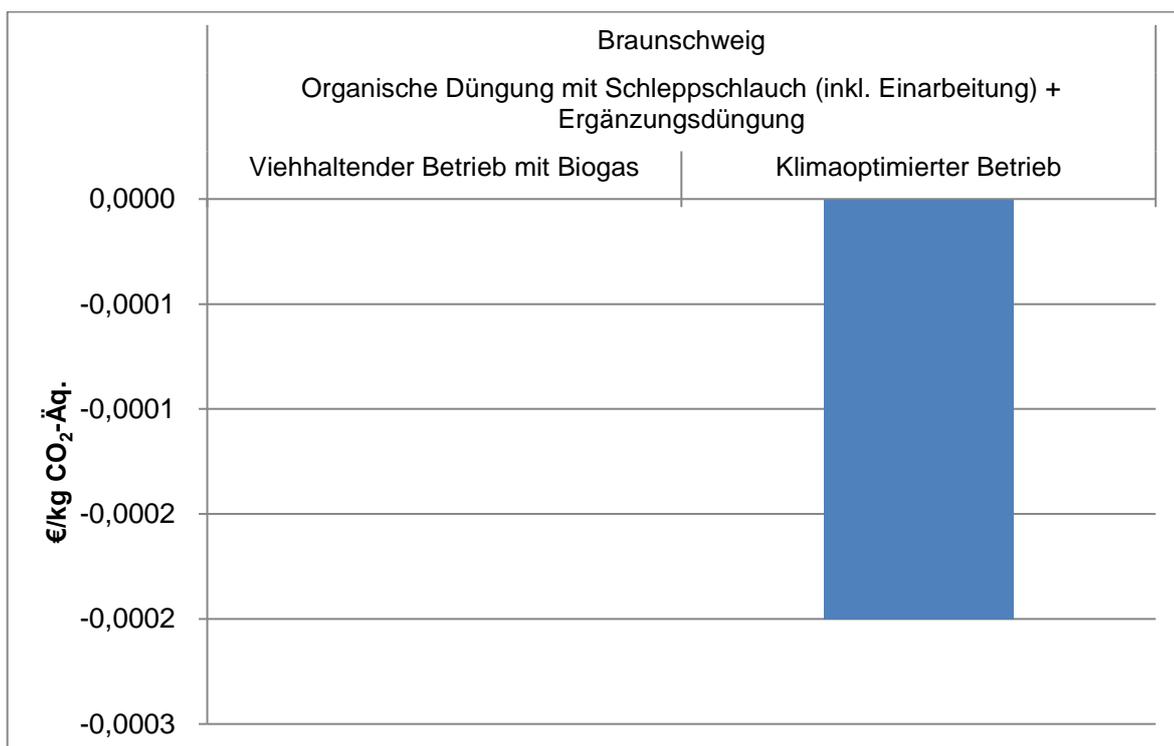


Abbildung 82: Mittlere CO₂-Äq. Freisetzungskosten beim Übergang vom viehhaltenden zum klimaoptimierten Betrieb; Bewertung Düngerapplikation Silomais: THG-Vermeidungskosten (€/kg CO₂-Äq./ha) V- und O-Betrieb Braunschweig im Vergleich

Silomais, Standort Soest:

Die N₂O-Emissionen bei der mineralischen Düngung fallen im Soester O-Betrieb insgesamt zu hoch und damit ungünstig aus. Die Schleppschlauchdüngung im V-Betrieb weist insgesamt die geringsten Emissionen auf. Die Gärrestunterfußdüngung verursacht höhere N₂O-Emissionen im O-Betrieb als die Schleppschlauch-Variante und die von den dargestellten Varianten die höchsten Freisetzungskosten (Abbildung 83 und Abbildung 84).

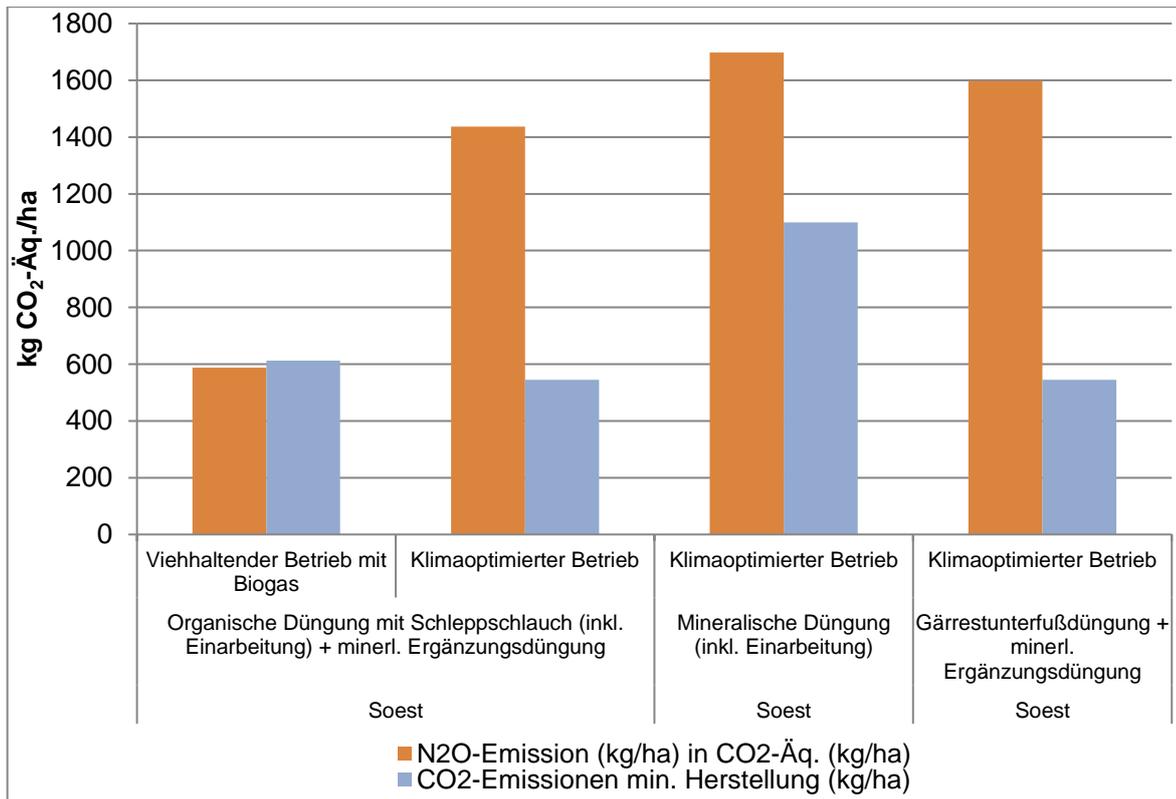


Abbildung 83: Bewertung Düngerapplikation Silomais: Mittlere Emissionen (kg CO₂-Äq./ha) V- und O-Betrieb Soest im Vergleich

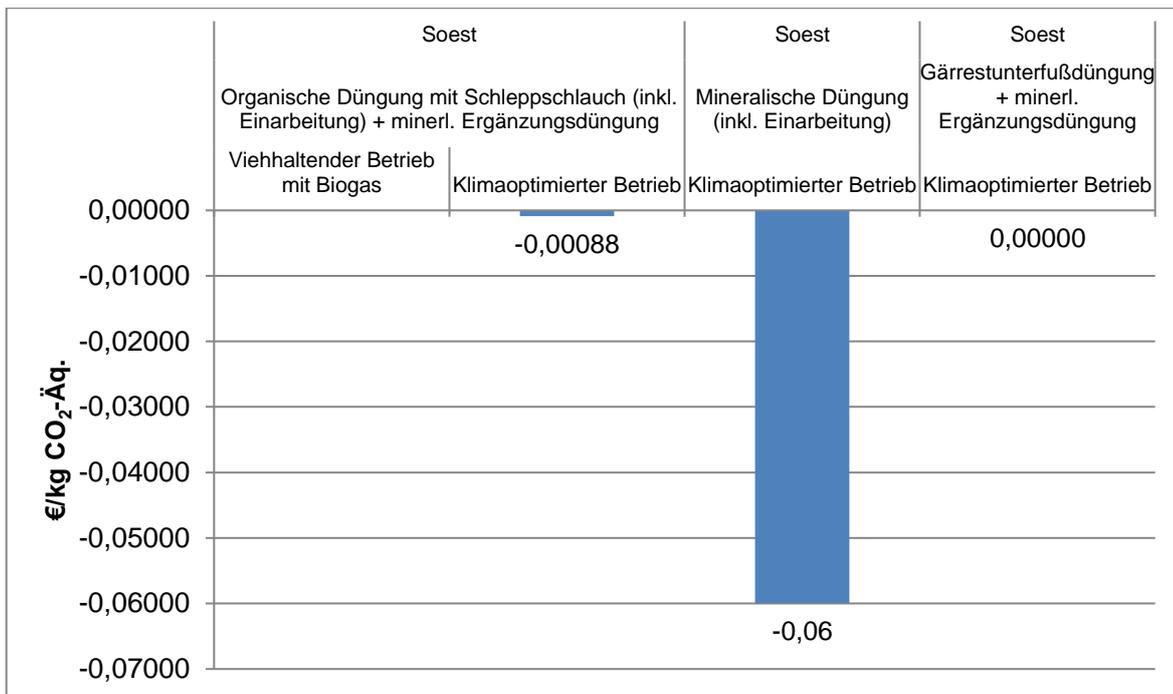


Abbildung 84: Mittlere CO₂-Äq. Freisetzungskosten beim Übergang vom viehhaltenden zum klimaaptimierten Betrieb; Bewertung Düngerapplikation Silomais: THG-Vermeidungskosten (€/kg CO₂-Äq./ha) V- und O-Betrieb Soest im Vergleich

Winterweizen, Soest und Braunschweig:

Die Gesamtemissionen der mineralischen Düngung sind in Braunschweig im M-Betrieb höher als im O-Betrieb bei organischer Düngung. In Soest ist es der umgekehrte Fall. Der entscheidende Unterschied zwischen den Standorten sind die gemessenen N₂O-Freisetzungen. In Braunschweig liegen die jährlichen N₂O-Emissionen im M- und O-Betrieb nahezu gleich bei 2,6 bzw. 2,8 kg/ha N₂O. Im M-Betrieb in Soest sind sie mit nur 1,7 kg/ha N₂O deutlich niedriger als im O-Betrieb mit 2,7 kg/ha N₂O (Siehe auch Kapitel 4.3.1 Lachgasemissionen).

Die Herstellung von mineralischem Stickstoff besitzt generell einen bedeutenden Anteil an den CO₂-Emissionen. Die Verfahrenskosten der mineralischen Düngung sind jedoch deutlich geringer als die der organischen Düngung, da sich bei der mineralischen Düngung in kürzester Zeit und bei geringerem Energieverbrauch höhere Stickstoffmengen ausbringen lassen. Die THG-Vermeidungskosten des M-Betriebes durch Übergang zur klimaaptimierten Bewirtschaftung variieren von -11,55 Cent je kg CO₂-Äq. in Braunschweig bis hin zu 1,22 Euro je kg CO₂-Äq. in Soest, bedingt durch die höheren CO₂-Emissionen im klimaaptimierten Betrieb (Abbildung 85 bis Abbildung 88).

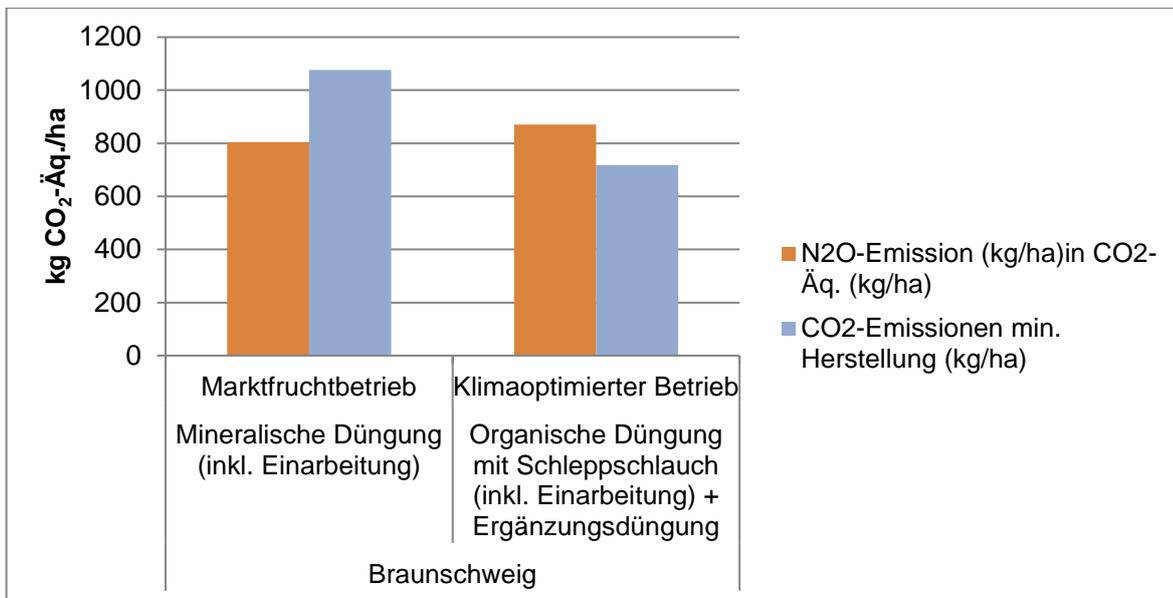


Abbildung 85: Bewertung Düngerapplikation Winterweizen: Mittlere Emissionen (kg CO₂-Äq./ha) M- und O-Betrieb Braunschweig im Vergleich

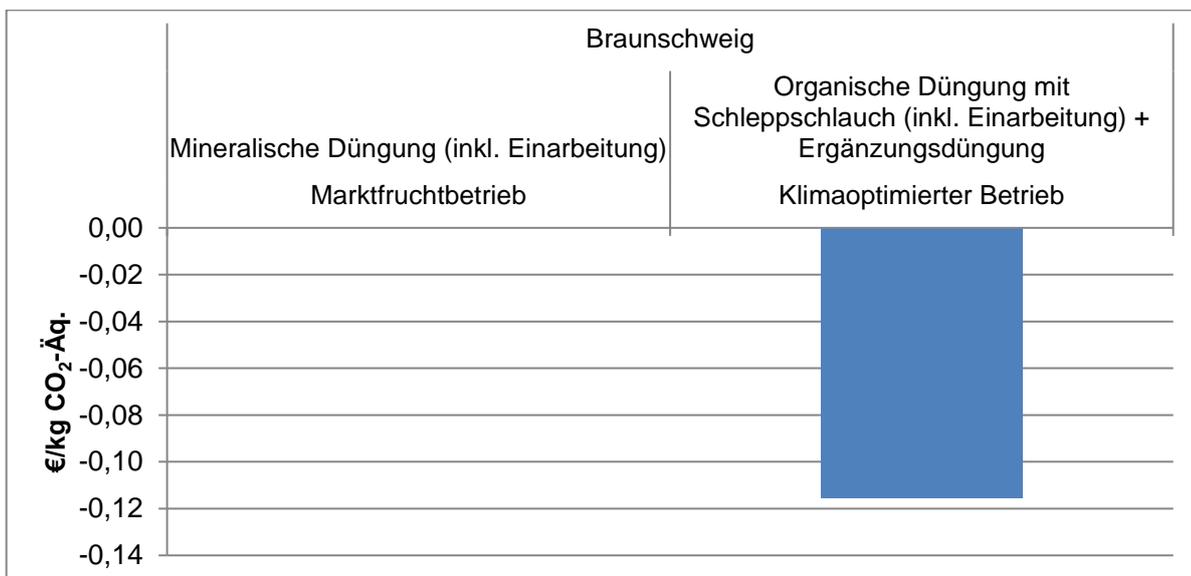


Abbildung 86: Mittlere CO₂-Äq. Freisetzungskosten beim Übergang vom Marktf Fruchtbetrieb zum klimaoptimierten Betrieb; Bewertung Düngerapplikation Winterweizen: THG-Vermeidungskosten (€/kg CO₂-Äq./ha) M- und O-Betrieb Braunschweig im Vergleich

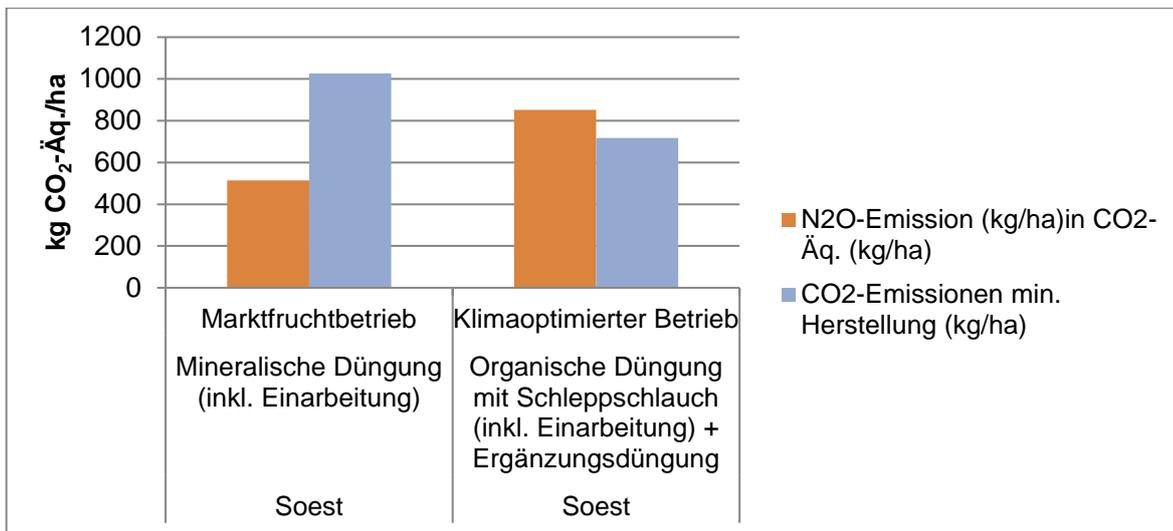


Abbildung 87: Bewertung Düngerapplikation Winterweizen: Emissionen (kg CO₂-Äq./ha) M- und O-Betrieb Soest im Vergleich

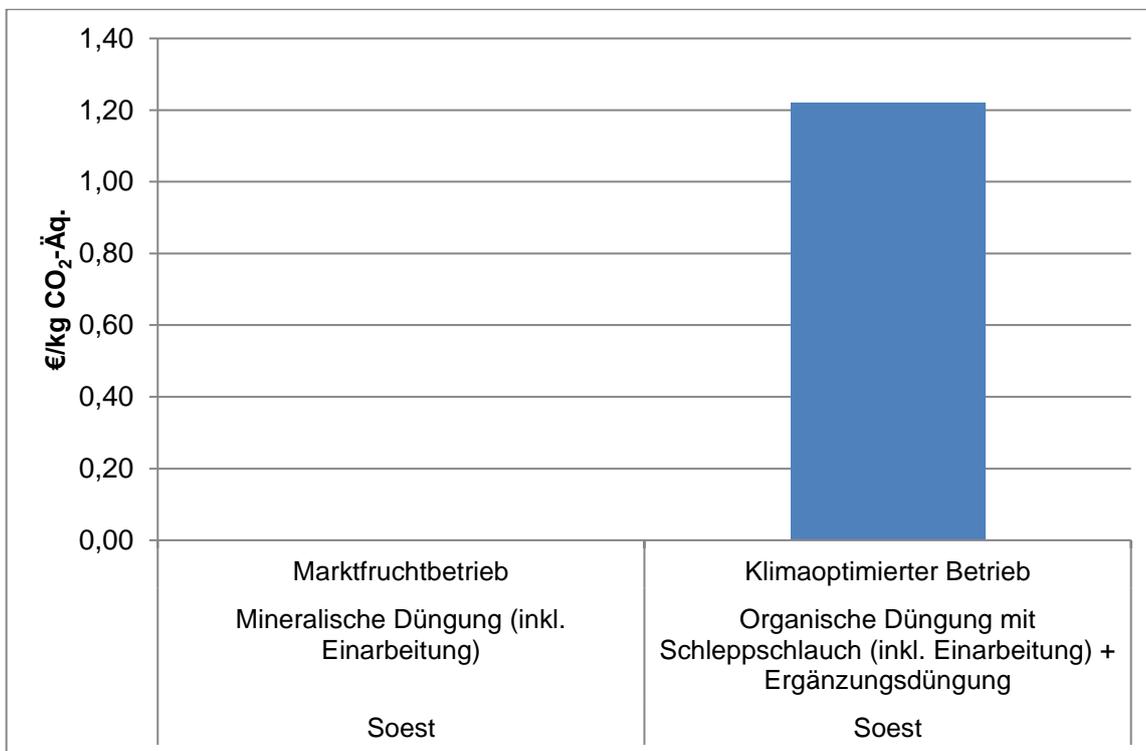


Abbildung 88: Mittlere CO₂-Äq. Freisetzungskosten beim Übergang vom Marktfruchtbetrieb zum klimaoptimierten Betrieb; Bewertung Düngerapplikation Winterweizen: THG-Vermeidungskosten (€/kg CO₂-Äq./ha) M- und O-Betrieb Soest im Vergleich

5.2.5 N- Düngeoptimum

Das N-Düngeoptimum wurde durch Berechnung der Grenzgewinne bei Steigerung des Düngereinsatzes bestimmt. Der Ausgangspunkt für den Grenzgewinn liegt bei SW-25 % und bezieht sich auf die jeweilige stufenweise Änderung des Sollwertes um 25 %.

Die Dünghöhe mit dem niedrigsten positiven Grenzgewinn und somit mit der optimalen Düngeintensität für Winterweizen auf den verschiedenen Standorten und Betrieben wird im Braunschweiger M-Betrieb im

Jahr 2014 bei SW +25 % erreicht (0,12 €/ha). Die geringsten Grenzgewinne, die oft auch im negativen Bereich liegen, werden über die Jahre, Standorte und Betriebsformen hinweg in 67 % der Fälle bei SW +25 % erreicht, dabei werden die negativsten Grenzgewinne und damit unwirtschaftliche Düngeneiveaus im Soester M-Betrieb sowie im Braunschweiger O-Betrieb, jeweils im Erntejahr 2016 erzielt (-173,87 €/ha bzw. -172,13 €/ha). Im Soester M-Betrieb 2015 sowie im Braunschweiger M-Betrieb 2014 und 2016 sind alle Grenzgewinne für die jeweiligen Düngestufen positiv. In 2015 werden bei SW sowie in 2016 bei SW und bei SW +50% über beide Betriebsformen und Standorte hinweg durchweg noch hohe positive Grenzgewinne erzielt, so dass geringfügige Steigerungen des Düngeneiveaus aus wirtschaftlicher Sicht noch möglich wären (Tabelle 45).

Tabelle 45: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Winterweizen (€/ha)

		Soest		Braunschweig	
		M-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	O-Betrieb
		Vorfrucht WR	Vorfrucht WR	Vorfrucht WR	Vorfrucht WR
2014	SW - 50 %				
	SW - 25 %	119,42 €	- 0,82 €	267,73 €	384,30 €
	SW	- 80,98 €	- 76,98 €	93,68 €	67,62 €
	SW +25 %	- 91,31 €	44,52 €	0,12 €	81,31 €
	SW +50 %	21,24 €	-124,72 €	11,80 €	127,08 €
2015	SW - 50 %				
	SW - 25 %	85,39 €	-30,67 €	256,85 €	330,04 €
	SW	45,84 €	38,96 €	19,29 €	189,17 €
	SW +25 %	27,25 €	-45,00 €	17,57 €	7,17 €
	SW +50 %	23,15 €	-19,26 €	137,52 €	-42,41 €
2016	SW - 50 %				
	SW - 25 %	-6,48 €	150,19 €	281,09 €	283,57 €
	SW	106,59 €	111,25 €	64,00 €	143,34 €
	SW +25 %	-173,87 €	-66,04 €	45,73 €	-172,13 €
	SW +50 %	14,01 €	53,35 €	71,52 €	72,97 €

Die optimale Düngeintensität bei Wintergerste wird im Soester O-Betrieb im Jahr 2016 bei SW -25 % erreicht (Grenzgewinn 4,56 €/ha). Der geringste positive Grenzgewinn wird wie bereits beim Winterweizen in 56 % der Fälle bei SW +25 % erreicht und ist hier bis auf eine Ausnahme durchweg negativ. Der ungünstigste Wert wird dabei mit -174,50 €/ha auf dem Soester O-Betrieb erzielt. Bei der Wintergerste werden lediglich im Braunschweiger O-Betrieb 2014 durchweg positive Grenzgewinne über die verschiedenen Düngewarianten hinweg erzielt. Wie beim Winterweizen werden auch bei der Wintergerste 2015 sowie 2016 jeweils bei SW positive Grenzgewinne erzielt, anders als beim Winterweizen bei der Wintergerste jedoch zusätzlich bei SW - 25 % in 2016 anstelle von +50 % in 2016 bei Winterweizen (Tabelle 46).

Tabelle 46: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Wintergerste (€/ha)

		Soest		Braunschweig
		V-Betrieb	O-Betrieb	O-Betrieb
		Vorfrucht WW	Vorfrucht AB	Vorfrucht AB
2014	SW - 50 %			
	SW - 25 %	139,70 €	- 30,22 €	348,90 €
	SW	99,41 €	- 40,01 €	32,89 €
	SW + 25 %	71,58 €	- 32,67 €	34,67 €
	SW + 50 %	-6,86 €	- 46,00 €	112,35 €
2015	SW - 50 %			
	SW - 25 %	165,00 €	-35,02 €	232,21 €
	SW	107,26 €	42,58 €	18,16 €
	SW + 25 %	-54,89 €	-54,26 €	39,84 €
	SW + 50 %	45,39 €	-36,33 €	-90,97 €
2016	SW - 50 %			
	SW - 25 %	80,43 €	4,56€	159,88€
	SW	74,21 €	107,72€	97,01€
	SW + 25 %	-100,14 €	-174,50€	-14,90€
	SW + 50 %	-4,56 €	-9,08€	-9,31€

Wie bei der Wintergerste wird auch beim Winterraps die optimale Düngeintensität (Grenzgewinn 3,04 €/ha) auf dem Soester O-Betrieb bei SW -25 % erreicht, allerdings im Jahr 2015. Die häufigsten negativen Grenzgewinne für Winterraps werden in Braunschweig bis auf eine Ausnahme durchweg bei SW +50 % erzielt, in Soest zu 50 % bei SW +25 %. Im Braunschweiger O-Betrieb konnten 2014 durchweg positive Grenzgewinne über die Düngevarianten hinweg erzielt werden. 2015 wurden bei SW-25 % und 2016 bei SW durchweg positive Grenzgewinne über die beiden Betriebsformen und Standorte hinweg ermittelt (Tabelle 47).

Tabelle 47: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Winterraps (€/ha)

		Soest		Braunschweig	
		M-Betrieb	O-Betrieb	M-Betrieb	O-Betrieb
		Vorfrucht WW	Vorfrucht RO-GPS	Vorfrucht WW	Vorfrucht RO-GPS
2014	SW - 50 %				
	SW - 25 %	-73,52 €	- 91,70 €	188,31 €	347,33 €
	SW	-8,32 €	-38,65 €	56,43 €	127,61 €
	SW + 25 %	-74,88 €	-44,19 €	17,37 €	43,91 €
	SW + 50 %	-61,53 €	-80,20 €	-137,47 €	91,85 €
2015	SW - 50 %				
	SW - 25 %	210,04 €	3,04 €	262,50 €	634,87 €
	SW	-41,70 €	91,70 €	116,23 €	59,15 €
	SW + 25 %	-83,89 €	-98,38 €	49,13 €	206,04 €
	SW + 50 %	-87,80 €	-25,53 €	-55,57 €	-120,94 €
2016	SW - 50 %				
	SW - 25 %	- 97,28 €		265,75 €	433,39 €
	SW	19,31 €		113,31 €	77,36 €
	SW + 25 %	-185,68 €		4,73 €	73,18 €
	SW + 50 %	-127,56 €		-92,37 €	- 2,00 €

Die optimalen Düngeintensitäten (Grenzgewinne +- 0) für den Silomais werden im Erntejahr 2016 in Soest deutlich, davon werden zwei dieser Werte bei der Applikationsmethode Schleppschlauch erzielt, jeweils im V-Betrieb (0,35 €/ha) bei SW +50% sowie im O-Betrieb (3,33 €/ha) bei SW +25%. In Braunschweig sind im Erntejahr 2015 bei der Applikationsmethode Schleppschlauch bei SW die Grenzgewinne allerdings stark negativ. Auf dem Braunschweiger O-Betrieb wird bei Schleppschlauchdüngung bei SW mit -318 €/ha der negativste Grenzgewinn für Silomais sowie für alle in der Analyse einbezogenen Feldfrüchte hinweg verzeichnet (Tabelle 48 bis Tabelle 53).

Tabelle 48: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Silomais in Abhängigkeit des Sollwertes und der Applikation, Soest (2014)

	Viehhaltender Betrieb mit Biogas			Klimaaptimierter Betrieb		
	Mineralisch	Schleppschlauch	Strip-Till	Mineralisch	Schleppschlauch	Strip-Till
SW-25%						
SW	-41,37€	- 38,60 €	76,98 €	- 193,48€	-102,40 €	76,06€
SW +25%	4,86 €	14,11 €	- 67,27 €	- 8,55 €	241,11 €	- 18,26 €
SW +50%	- 6,70 €	- 95,01 €	- 41,37 €	150,96 €	- 92,23 €	60,34 €

Tabelle 49: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Silomais in Abhängigkeit des Sollwertes und der Applikation, Soest (2015)

	Viehhaltender Betrieb mit Biogas			Klimaaoptimierter Betrieb		
	Mineralisch	Schleppschlauch	Strip-Till	Mineralisch	Schleppschlauch	Strip-Till
SW -25%						
SW	-41,37€	155,12 €	- 110,72 €	- 18,26 €	16,42 €	85,77 €
SW +25%	- 145,40€	- 87,61 €	- 110,72 €	- 6,70 €	-203,19 €	-52,93 €
SW +50%	85,77 €	- 41,37 €	120,44 €	- 353,45 €	-29,82 €	-284,10 €

Tabelle 50: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Silomais in Abhängigkeit des Sollwertes und der Applikation, Soest (2016)

	Viehhaltender Betrieb mit Biogas			Klimaaoptimierter Betrieb		
	Mineralisch	Schleppschlauch	Strip-Till	Mineralisch	Schleppschlauch	Strip-Till
SW -25%						
SW	20,37 €	-44,68 €	3,23 €	-41,88 €	-24,93 €	19,73 €
SW +25%	-14,33 €	-3,77 €	-49,44 €	-33,53 €	3,33 €	-35,79 €
SW +50%	-76,39 €	0,35 €	-29,45 €	-14,75 €	-33,97 €	-8,08 €

Tabelle 51: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Silomais in Abhängigkeit des Sollwertes und der Applikation, Braunschweig (2014)

	Viehhaltender Betrieb mit Biogas		Klimaaoptimierter Betrieb	
	Mineralisch	Schleppschlauch	Mineralisch	Schleppschlauch
SW -25%				
SW	-139,82 €	26,31 €	-7,25 €	-113,09 €
SW +25%	79,86 €	-118,10 €	-53,22 €	84,19 €

Tabelle 52: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Silomais in Abhängigkeit des Sollwertes und der Applikation, Braunschweig (2015)

	Viehhaltender Betrieb mit Biogas		Klimaaoptimierter Betrieb	
	Mineralisch	Schleppschlauch	Mineralisch	Schleppschlauch
SW -25%				
SW	143,56 €	136,16 €	-126,44 €	-318,77 €
SW +25%	-141,24 €	-119,05 €	-41,37 €	354,38 €

Tabelle 53: Grenzgewinn bei Steigerung der N-Düngung in Silomais in Abhängigkeit des Sollwertes und der Applikation, Braunschweig (2016)

	Viehhaltender Betrieb mit Biogas		Klimaaoptimierter Betrieb	
	Mineralisch	Schleppschlauch	Mineralisch	Schleppschlauch
SW -25%				
SW	-25,69 €	-87,82 €	-17,74 €	29,32 €
SW +25%	-30,72 €	18,05 €	-68,73 €	-64,75 €

Eine allgemeine Tendenz lässt sich jedoch dahingegen ableiten, dass eine verstärkte Düngeintensität bei Silomais negative Grenzgewinne zur Folge hat. Positive Grenzgewinne werden mit höherer Düngeintensität über alle Jahre, Applikationsmethoden und Betriebe zunehmend geringer, negative Grenzgewinne zunehmend häufiger (Tabelle 53).

Tabelle 54: Zusammenfassung: Positiver und negativer Grenzgewinn Silomais unter Berücksichtigung der Applikationsmethode, Soest und Braunschweig 2014 - 2016

	Pos. Grenzgewinn (Häufigkeiten)	Pos. Grenzgewinn (%) innerhalb des jeweiligen Sollwertes	Pos. Grenzgewinn (%) über alle Sollwerte	Neg. Grenzgewinn (Häufigkeiten)	Neg. Grenzgewinn (%) innerhalb des jeweiligen Sollwertes	Neg. Grenzgewinn (%) über alle Sollwerte
SW-25%	15	57,70%	15,0 %	11	42,30 %	11,00 %
SW	11	36,67 %	10,18 %	19	63,33 %	17,59 %
SW +25%	8	26,67 %	7,40 %	22	73,33 %	20,37 %
SW +50%*	6	33,30 %	5,55 %	12	66,67 %	11,11 %

*Ohne Braunschweig

Bei Tabelle 54 gilt es zu beachten, dass hier die Werte für Sollwert +50 % in Braunschweig fehlen. Der negative Grenzgewinn könnte sich demnach hier auf mehr als die in der Tabelle 54 dargestellten Werte erhöhen (12 mal, 66,67 % bzw. 11,11 %), andererseits könnten hierdurch auch der positive Grenzgewinn für SW +50 % höher ausfallen als die vorhandenen Werte (6 mal, 33,30 % bzw. 5 %).

5.3 Fazit ökonomische Bewertung

Bei alleiniger wirtschaftlicher Betrachtung, gemessen am Gewinnbeitrag/ha ist der M-Betrieb gegenüber den anderen beiden Betriebsformen auf dem jeweiligen Standort im Vorteil, Optimierungspotenzial für den O-Betrieb ist allerdings vorhanden. Der Vergleich des V- mit dem O-Betrieb ist aufgrund ähnlicher Bewirtschaftungsstrukturen (Schweinemast, Energieerzeugung über Biogas, Einsatz organischer Dünger in Form von Gärresten) naheliegender. Hierbei schneidet der O-Betrieb im Mittel der Jahre bezogen auf den Gewinnbeitrag deutlich besser ab. Auf Grund der im O-Betrieb vorherrschenden vielfältigen Anbaustruktur ist die Risikoanfälligkeit hier zudem am niedrigsten, auch fällt der Arbeitsaufwand des O-Betriebes durch die Bewirtschaftung im Vergleich zu den anderen beiden Betriebsformen am geringsten aus.

Bei umfassender Bewertung ist die deutliche rechnerische Verminderung der Treibhausgasemissionen des O-Betriebes verglichen mit den beiden anderen Betriebsformen einzubeziehen. Dieser Aspekt dürfte zukünftig eine höhere Bedeutung erlangen und bestätigt somit eine der wesentlichen bei der Projektkonzeption getroffenen Annahmen.

Die Düngerapplikation ermöglicht ein hohes Einsparpotenzial der CO₂-Emissionen. Die Versuchsergebnisse zeigen aber, dass bei organischer Düngung bei Silomais in den O-Betrieben beider Standorte höhere Lachgasemissionen auftreten als in den jeweiligen V-Betrieben. In Soest beträgt diese Differenz zwischen O-Betrieb zu V-Betrieb beispielsweise rund 1.250 kg/ha CO₂-Äq. Emissionen und am Standort Braunschweig sogar rund 2.300 kg/ha CO₂-Äq. Emissionen. Bei gleichzeitig höheren Kosten ist hier ein Übergang zur organischen Düngung und klimaoptimierten Bewirtschaftung nicht sinnvoll bzw. es lässt sich daraus schließen, dass die Aussagen zu den untersuchten Verfahren der organischen Düngerapplikation in Silomais

nach aktuellen Ergebnissen derzeit noch nicht belastbar sind. Bei Winterweizen sind dagegen bei organischer Düngung insgesamt geringere Emissionen zu messen, die Treibhauspotenzial-Vermeidungskosten liegen hier bei 16-20 ct je kg CO₂-Äq..

Die meisten positiven Grenzgewinne bei der Steigerung der N-Düngung und damit das Düng optimum wurden für Winterweizen und Wintergerste auf beiden Standorten sowie für Winterraps des Standortes Braunschweig durchweg bei SW-25 % erzielt; die niedrigsten und meistens negativen Grenzgewinne wurden für Winterweizen und Wintergerste beider Standorte sowie für Winterraps in Soest bei SW +25 % ermittelt. Bei Silomais hat eine zunehmende Düngintensität immer negativere Grenzgewinne zur Folge. Allgemein kann daher abgeleitet werden, dass aus ökonomischen Gesichtspunkten eine hohe Düngintensität ungünstige Auswirkungen zur Folge hat.

Die Nutzung weiterer Optimierungspotenziale wäre bei langfristiger Betrachtungsweise für den O-Betrieb ein zukünftig sinnvolles Konzept, da es Emissionen mindern kann. Empfehlenswert wären diese Optimierungsprozesse insbesondere auch für Betriebe mit Veredlung, wie sich aus dem direkten Vergleich von V- und O-Betrieb ableiten lässt. Bei umfassender Bewertung sollten Faktoren wie beispielsweise Erosionsminderung, Biodiversitätssteigerung, Risikominderung sowie Arbeitsentlastung in die Analysen miteinbezogen werden.

5.4 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

Im Teilprojekt Ökonomische Bewertung wurden die Projektziele erreicht. Methodisch wurden im ökonomischen Teil betriebswirtschaftliche Kalkulationen auf Fruchtfolgeebene durchgeführt, die mit Standarddaten zu Emissionen aus der Literatur ergänzt wurden.

In allen betrachteten Erntejahren waren die Gewinnbeiträge je ha im Durchschnitt der Fruchtfolgen in den jeweiligen M-Betrieben am höchsten. Die geringsten Gewinnbeiträge wurden in den V-Betrieben beider Standorte erzielt. Wesentlichen Einfluss auf die Gewinne haben u.a. Ertragsunterschiede und die Düngkosten, die in den O-Betrieben aufgrund von Unterschieden im Düngemiteleinsatz (organisch vs. mineralisch) und wegen höherer Maschinenkosten (v.a. bedingt durch Düngausbringungstechnik) höher ausfallen als in den M-Betrieben. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Umstellung der landwirtschaftlichen Praxisbetriebe hin zu den Konzepten des Optimierte Klimabetriebes ausgehend vom V-Betrieb bereits unter den aktuellen Rahmenbedingungen sinnvoll ist, aus Sicht des M-Betriebes allerdings nur mit begleitenden agrarpolitischen Instrumenten erfolgen wird.

Darüber hinaus wurde in diesem Teilprojekt eine ökonomische Bewertung unterschiedlicher Düngerapplikationstechniken im Hinblick auf Lachgasemissionen in Winterweizen und Silomais

vorgenommen. Die entsprechenden Lachgasemissionen wurden von Projektpartnern direkt im Versuch gemessen. Die aus diesen Methoden gewonnenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Das Treibhauspotential (kg CO₂-Äq./ha) bestehend aus CO₂-Dieselausstoß, CO₂-Emissionen Saatgut, Dünger und Pflanzenschutz war für die Jahre 2014, 2015 und 2016 im M-Betrieb an beiden Standorten am höchsten. Die Treibhauspotenzial-Vermeidungskosten je kg CO₂ beim Übergang zur klimaoptimierten Bewirtschaftung fallen im V-Betrieb geringer aus als im M-Betrieb, teilweise fallen sie bei dem V-Betrieb sogar in deutlich negative Bereiche, d.h. der Übergang führt zu besseren wirtschaftlichen Betriebsergebnissen.

Bei Betrachtung der Düngeapplikation fallen die Kosten der Ausbringung bei organischer Düngung je nach Standort und Kultur höher aus. Der Unterschied zwischen mineralischer Düngung und organischer Düngung mit Schleppschlauch und mineralischer Ergänzungsdüngung im O-Betrieb am Standort Soest beträgt z.B. rund 100 €/ha, während es verglichen mit dem V-Betrieb sogar 200 €/ha sind. Zu berücksichtigen ist darüber hinaus, dass die Emissionen der mineralischen Düngung vornehmlich auch bei der Düngemittelherstellung entstehen.

Bei organischer Düngung des Silomais treten in den O-Betrieben beider Standorte höhere Lachgasemissionen auf als in den jeweiligen V-Betrieben. Bei Winterweizen sind dagegen bei organischer Düngung insgesamt geringere Emissionen zu messen, die Treibhauspotenzial-Vermeidungskosten liegen hier bei ca. 20 ct je kg CO₂-Äq. Diese Kosten sind damit allerdings weitaus höher als die aktuellen Preise für die CO₂-Zertifikate in Höhe von rund 5 €/t CO₂-Äq., so dass auch hier agrarpolitische Instrumente für eine erfolgreiche Umsetzung derartiger Konzepte angewendet werden müssten. Allerdings wird auch deutlich, dass allein die produktionstechnische Optimierung mit stabilen Erträgen im O-Betrieb zu einer deutlichen Absenkung der Kosten für das Treibhauspotential beitragen kann.

6 Literatur

- ABDALLA, M., OSBORNE, B., LANIGAN, G., FORRISTAL, D., WILLIAMS, M., SMITH, P., JONES, M.B. 2013: Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions. *Soil Use and Management* 29: 199-209.
- ABUBAKER, J., ODLARE, M., PELL, M. 2013: Nitrous oxide production from soils amended with biogas residues and cattle slurry. *J. Environ. Qual.* 42:1046-1058.
- ADLER, P.R., GROSSO, S.J.D., PARTON, W.J. 2007: Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. *Ecol. Appl.* 17:675-691.
- AKIYAMA, H., TSURUTA, H. 2003: Nitrous oxide, nitric oxide and nitrogen dioxide fluxes from soils after manure and urea application. *J. Environ Qual* 32:423-431.
- ANDERSON, N., STRADER, R., DAVIDSON, C. 2003: Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources. *Environ. Int.* 29: 277-286.
- APEL, B., FECHNER, H. 2017: Stickstoffdüngung. In: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.): Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz. 22. Auflage, Abteilung Herstellung und KreaTec im Landwirtschaftsverlag GmbH, Kap. 4.4, 127
- ARAH, J.R.M., SMITH, K.A., CRICHTON, I.J., LI, H.S. 1991: Nitrous oxide production and denitrification from Scottish arable soils. *Soil Science* 42:351-367.
- ARCHER, D.W., HALVORSON, A.D., REULE, C.A. 2008: Economics of irrigated continuous corn under conventional-till in Northern Colorado. *Agron. J.* 100:1166-1172. Doi:10.2134/agronj2007.0291
- BACH, M. 2015: Winderosion. In: AID INFODIENST ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ E.V. (Hrsg.): Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Erstaufgabe, Druckerei Lokay e.K., Reinheim, Kap. 4.1, 80
- BAUMGÄRTEL, B., BENKE, M. 2009: Düngeempfehlungen Stickstoff: Getreide, Raps, Hackfrüchte, Landwirtschaftskammer Niedersachsen - Geschäftsbereich Landwirtschaft
- BAYER, C., GOMES, J., ZANATTA, J.A., VIEIRA, F.C.B., DIECKOW, J. 2016: Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. *Soil & Tillage Research* 161:86-94.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) 2016: Verbindliche Hinweise zur Bodenuntersuchung auf N_{min} im Rahmen von DNS in Bayern. Stand 03.11.2016. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/zentrale_analytik/dateien/6_verbindliche_hinweise_dsn_031114.pdf
- BELL, M.J., CLOY, J.M., TOPP, C.F.E., BALL, B.C., BAGNALL, A., REES, R.M., CHADWICK, D.R. 2016: Quantifying N_2O emissions from intensive grassland production: the role of synthetic fertilizer type, application rate, timing and nitrification inhibitors. *Journal of Agricultural Science*. Doi:10.1017/S0021859615000945.
- BREITSCHUH, T., HELZEL, S. 2012: Berechnung von CO_2 -Äquivalenten für einen Landwirtschaftsbetrieb. In: Neue Landwirtschaft, 5/2012. Internet: www.neulandwirtschaft.agrarheute.com. Hannover.
- BIOGRACE 2015: Biograce.net, Harmonised Calculations of Biofuel Greenhouse Gas Emissions in Europe.
- BISCHOFF, J. 2013: Strip Till: So geht`s mit Gülle. *DLG-Mitteilungen* 3, 24-27
- BOCK, M., BENSING T. 2012: Lasst den Boden in Ruhe, *Profi* 8, 66-71

- BORKEN, W., BRUMME, R., XU, Y.J. 2000: Effects of prolonged soil drought on CH₄ oxidation in a temperate spruce forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105, 7079-7088.
- BORKEN, W., DAVIDSON, E.A., SAVAGE, K., SUNDQUIST, E.T., STEUDLER, P. 2006: Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1388-1395.
- BOUWMAN, K.F., BOUMANS, L.J.M., BATJES, N.H. 2002: Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochem. Cycles* 16:28-1-28-9.
- BREMNER, J.M. 1997: Sources of nitrous oxide in soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 49, 7-16.
- BUNDESSORTENAMT (Hrsg.) 2000: Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen,
http://www.bundessortenamt.de/internet30/fileadmin/Files/PDF/Richtlinie_LW2000.pdf (25.11.2013)
- CHANTIGNY, M.H., ROCHETTE, P., ANGERS, D.A., BITTMAN, S., BUCKLEY, K., MASSÉ, K.D., BELANGER, G., ERIKSEN-HAMEL, N., GASSER, M.O. 2010: Soil nitrous oxide emissions following band-incorporation of fertilizer nitrogen and swine manure. *J. Environ Qual* 39:1545:1553.
- CHERUBINI, F., JUNGMEIER, G. 2010: LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. *Int. J. Life Cycle Assess.* 15:53-66.
- CHOUDHARY, M.A., AKRAMKHANOV, A., SAGGAR, S. 2002: Nitrous oxide emissions from a New Zealand cropped soil: Tillage effects, spatial and seasonal variability. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93:33-43.
- CHRISTIANSON, C.B., BATIONO, A., HENAO, J., VLEK, P.L.G. 1990: Fate and efficiency of N fertilizers applied to pearl millet in Niger. *Plant Soil* 125: 221.231.
- CRAMER, B. 2006: Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. Dissertation DEMMEL, M., BRANDHUBER, R. 2012: Strip Tillage ermöglicht neue Strategien. *LOP* 12/2012, 12-18
- DENMAN, K.L., G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P. CIAIS, P.M.C., R.E. DICKINSON, D. HAUGLUSTAINE, C. HEINZE, E., HOLLAND, D. JACOB, U. LOHMANN, S RAMACHANDRAN, P.L. DA SILVA DIAS, WOFYSY, S.C., ZHANG, X. 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M.TIGNOR AND H.L. MILLER (Ed.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- DESTATIS 2011: Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben – Erhebung zur Wirtschaftsdüngerausbringung 2010. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Fachserie 3 Reihe 2.2.2.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) 2002: Physikalische Laboruntersuchungen DIN ISO 11274:2001-01 ; DIN ISO 11274:2001- 01; DIN ISO 11461; DIN ISO 11508:1998; DIN ISO 10381-1:2003-08; DIN 19683-9 Beuth Verlag, Berlin
- DITTERT, K., BOL, R., KING, R., CHADWICK, D., HATCH, D. 2001: Use of a novel nitrification inhibitor to reduce nitrous oxide emission from ¹⁵N-labelled dairy slurry injected into soil. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 15:1291-1296.
- DOBBIE, K.E., SMITH, K.A. 1996a: Comparison of CH₄ oxidation rates in woodland, arable and set aside soils. *Soil Biology and Biochemistry* 28, 1357-1365.
- DOBBIE, K.E., SMITH, K.A., PRIEMÉ, A., CHRISTENSEN, S., DEGORSKA, A., ORLANSKI, P. 1996b: Effect of land use

- on the rate of methane uptake by surface soils in Northern Europe. *Atmos. Environ.* 30, 1005-1011.
- DRURY, C.F., REYNOLDS, W.D., TAN, C.S., WELACKY, T.W., CALDER, W., MCLAUGHLIN, N.B. 2006: Emissions of Nitrous Oxide and Carbon Dioxide: Influence of Tillage Type and Nitrogen Placement Depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:570-581.
- DRURY, C.F., YANG, X.M., REYNOLDS, W.D., MCLAUGHLIN, N.B. 2007: Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from monoculture and rotational cropping of corn, soybean and winter wheat. *Can J Soil Sci* 88:163-174.
- DRURY, C.F., REYNOLDS, W.D., YANG, X.M., MCLAUGHLIN, N.B., WELACKY, T.W., CALDER, W., GRANT, C.A. 2011: Nitrogen Source, Application Time, and Tillage Effects on Soil Nitrous Oxide Emissions and Corn Grain Yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:1268-1279.
- DRÄGERWERK A.G. 1994: Dräger-Tube Handbook: Soil, Water and Air Investigations as well as Technical Gas Analysis 9th ed. Drägerwerk Aktiengesellschaft, Lübeck, Germany.
- DUERI, S., CALANCA, P.L., FUHRER, J. 2007: Climate change affects farm nitrogen loss- A Swiss case study with a dynamics farm model. *Agricultural Systems* 93:191-214.
- DUTTMANN, R., BACH, M., HERZIG, A. 2011: Bodenerosion durch Wasser. In: BLUME, H.-P., HORN, R., THIELE-BRUHN, S. (Hrsg.): *Handbuch des Bodenschutzes*. 4. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, Kap. 14.1, 199
- ECETOC (EUROPEAN CENTER FOR ECOTOXICOLOGY AND TOXICOLOGY OF CHEMICALS) 1994: Ammonia Emissions to Air in Western Europe, ECETOC Technical Report No. 62, Brussels, Belgium.
- ERDMANN, M., KÖLLER, C. 2016: Regenwurmabundanzmessungen im Klimafarmprojekt 2011 und 2016. Projektarbeit an der FH Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest.
- FIRESTONE, M.K., DAVIDSON, E.A. 1989: Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil. In: ANDREAEE, M.O., SCHIMEL, D.S. (Eds.), *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. Wiley, Chichester, pp. 7-21.
- FIRMA EIJKELKAMP SOIL AND WATER 2016: Gebrauchsanleitung Penetrologger <https://de.eijkelkamp.com/produkte/feldmessger-te/penetrologger-set-c.html> (Abruf: 01.06.2016)
- FISHER, 2011: Manure incorporation in no-till systems, *Crops & Soils magazine*, 05-06-2011, 5-10
- FLESSA, H., DÖRSCH, P., BEESE, F. 1995: Seasonal variation of N₂O and CH₄ fluxes in differently managed soils in southern Germany. *J. Geophys. Res.* 100, 23115-23124.
- FLESSA, H., BEESE, F. 2000: Laboratory estimates of trace gas emissions following surface application and injection of cattle slurry. *Journal of Environmental Quality* 29, 262-268.
- FLESSA, H., MÜLLER, D., PLASSMANN, K., OSTERBURG, B., TECHEN, A.K., NITSCH, H., NIEBERG, H., SANDERS, J., MEYER ZU HARTLAGE, O., BECKAMNN, E., ANSPACH, V. 2012: Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Braunschweig: vTI, 472 Seiten. *Landbauforschung Völkenrode – Sonderheft 361*.
- FLESSA, H., GREEF, J. M., DITTERT, K., RUSER, R., OSTERBURG, B., PODDEY, E., WULF, S., PACHOLSKI, A. 2014: Minderung von Stickstoff-Emissionen aus der Landwirtschaft : Empfehlungen für die Praxis und aktuelle Fragen an die Wissenschaft. Berlin: Senat der Bundesforschungsinstitute des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft, 63 p, *ForschungThemenheft 1/2014*
- FOLORUNSO, O., ROLSTON, D. 1984: Spatial variability of field-measured denitrification gas fluxes. *Soil Science Society of America, Journal* 48, 1214-1219.
- FRANZLUEBBERS, A.J., HONS, F.M., ZUBERER, D.A. 1995: Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil

- CO₂ evolution, water content, temperature and bulk density. *Appl. Soil Ecol.* 2:95-109.
- GERICKE, D., PACHOLSKI A., KAGE H. 2010: Measurement of ammonia emissions in multi-plot field experiments, *Biosystems Engineering*, doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.11.00
- HALVORSON, A.D., DEL GROSSO, S.J., POZZI JANTALIA, C. 2011: Nitrogen Source Effects in Soil Nitrous Oxide Emissions from Strip-Till Corn. *J. Environ. Qual.* 40:1775-1786.
- HARTMANN, A.A., BUCHMANN, N., NIKLAUS, P.A. 2011: A study of soil methane sink regulation in two grasslands exposed to drought and N fertilization. *Plant and Soil* 342, 265-275.
- HENNIG, C., GAWOR, M. 2012: Bioenergy production and use: comparative analysis of the economic and environmental effects. *Energy Convers. Manag.* 63: 372-137.
- HORSTHEMKE J. 2016: Effekte von Betriebssystemen und Bodenbearbeitung auf bodenphysikalische Parameter lößbürtiger Böden in der Soester Börde. Master-Thesis an der FH Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft Soest.
- HUBER, P.J., RONCHETTI, E. 1981: *Robust Statistics*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. New York, NY, USA: Wiley-IEEE 52, 54.
- HUTCHINSON, G.L., MOSIER, A.R. 1981: Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 311–316.
- IPCC Ed. 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- ISO/DIS 17155 2001: Soil quality – Determination of abundance and activity of the soil microflora using respiration curves.
- JACINTHE, P.-A., DICK, W.A. 1997: Soil management and nitrous oxide emissions from cultivated fields in southern Ohio. *Soil & Tillage Research* 41:221-235.
- JOHNSON, J.M.F., ARCHER, D., BARBOUR, N. 2010: Greenhouse Gas Emission from Contrasting Management Scenarios in the Northern Corn Belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:396-406.
- KAI, P., PEDERSEN, P., JENSEN, J.E., HANSEN, M.N., SOMMER, S.G. 2008: A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *Europ. J. Agronomy* 28:148-154.
- KOESTER, J.-R., CÁRDENAS, L., SENBAYRAM, M., BOL, R., WELL, R., BUTLER, M., MÜHLING, K.H., DITTERT, K. 2011: Rapid shift from denitrification to nitrification in soil after biogas residue application as indicated by nitrous oxide isotopomers. *Soil Biol. Biochem.* 43:1671-1677.
- KOWALEWSKY, H.H., 2013a: Verminderung von Emissionen bei der Ausbringung organischer Dünger. *Land & Forst* (3), 55-57
- KOWALEWSKY, H.H., 2013b: <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/348/article/21682.html>
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN 2015: Richtwert – Deckungsbeiträge 2015, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN, 2016: Grundwasserschutzorientierte Maisdüngung, Stand 2016. <https://www.lwk-niedersachsen.de/.../1667,7756594c-ab14-ad71-70c4e6ea33097f18...>
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN-WESTFALEN 2015: Stickstoffdüngung im Getreide - Ermittlung des Düngebedarfs. <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/.../getreide-n-duengung-pdf.pdf>

- LAURENZ, L. 2016: Gülle-Unterfußdüngung im Strip-Till-Verfahren - Erfahrungen und Ergebnisse 2015. Workshop Gülle-Strip-Till, 19. März 2016, Saerbeck
- LAURENZ, L. 2012: Gülledepot unter Mais im Praxistest. Top Agrar 3,2012
- LBEG 2010: Bodenkundliche Übersichtskarte (BÜK 50)
- LEIBER-SAUHEITL, K., FUß, R., VOIGT, C., FREIBAUER, A. 2014: High CO₂ fluxes from grassland on histic Gleysol along soil carbon and drainage gradients. Biogeosciences 11, 749-761.
- LE MER, J., ROGER, P. 2001: Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. European Journal of Soil Biology 37, 25-50.
- LEMKE, R.L., IZAURRALDE, M., NYBORG, M., SOLBERG, E.D. 1999: Tillage and N source influence soil-emitted nitrous oxide in the Alberta Parkland region. Can. J. Soil Sci. 79:15-24.
- LI, Q., YANG, A., WANG, Z., ROELCKE, M., CHEN, X., ZHANG, F., PASDA, G., ZERULLA, W., WISSEMEIER, A.H., LIU, X. 2015: Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest china. Field Crops Research 175:96-105.
- LINTEL-HÖPING, M., HUNKEMÖLLER, M., WELLENKÖTTER, N. 2012: Vergleich der Anbauverfahren Mulchsaat und Pflugsaat in unterschiedlichen Fruchtfolgen in den Parametern Lagerungsdichte und C-N-S Analyse, Projektarbeit an der FH Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft
- LOFTFIELD, N., FLESSA, H., AUGUSTIN, J., BEESE, F. 1997: Automated gas chromatographic system for rapid analysis of the atmospheric trace gases methane, carbon dioxide, and nitrous oxide. J Environ Qual. 26:560-564.
- LU, X., CHENG, G. 2009: Climate change effects on soil carbon dynamics and greenhouse gas emissions in Abies fabri forest of subalpine, southwest China. Soil Biology & Biochemistry 41:1015-1021.
- LÜTKE ENTRUP, N., GRÖBLINGHOFF F.-F., WIEKER H. 1997: Ertragliche Effizienz und ökologische Relevanz verschiedener N-Düngestrategien. Tagungsband der Fachtagung: Umweltgerechter und ertragsorientierter Maisanbau, Soest, 8.-9. 7. 1997. S.102-115
- MILLER, A.E., SCHIMEL, J.P., MEIXNER, T., SICKMAN, J.O., MELACK, J.M. 2005: Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. Soil Biol Biochem 12:2195-2204.
- MÜLLER, C. UND CLOUGH, T.J. 2014: Advances in understanding nitrogen flows and transformations: gaps and research pathways. J. Agr. Sci. 152, 34-44.
- NIR 2013: Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990-2011. Authors: Rösemann, C., Haenel, H.-D., Dämmgen, U., Poddey, E., Freibauer, A., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Döhler, H., Schreiner, C., Bauer, B., Osterburg, B.; Thuenen Report 1, Johann Heinrich von Thuenen-Institut, Braunschweig, Germany.
- NORDGREN, A., 1988: Apparatus for the continuous, long-term monitoring of soil respiration rate in large numbers of samples. Soil Biology & Biochemistry 20, 955-957.
- OLFS H.-W., FEDEROLF, C.-P., WESTERSCHULTE, M., TRAUTZ, D. 2016: „Gülleinjektion im Maisanbau – Mineralische Unterfußdüngung kann ersetzt werden“ Mais 2/2016 Seite 64-67
- OLFS, H.-W. 2013: Projektbeschreibung: Optimierung der Stickstoff- und Phosphat-Effizienz aus flüssigen organischen Wirtschaftsdüngern durch „Depot-Applikation“ zur Verminderung der Umweltbelastung. <http://www.al.hs-osnabrueck.de/21206+M5b1aee7ca98.html>
- OMONODE, R.A., VYN, T.J., SMITH, D.R., HEGYMEGI, P., GÁL, A. 2007: Soil carbon dioxide and methane

fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations. *Soil & Tillage Research* 95:182-195.

- PACHOLSKI, A., CAI, G., NIEDER, R., RICHTER, J., FAN, X., ZHU, Z., ROELCKE, M. 2006: Calibration of a simple method for determining ammonia volatilization in the field – comparative measurements in Henan Province, China. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 74, 259-273.
- PALMA, R.M., RIMOLO, M., SAUBIDET, M.I., CONTI, M.E. 1997: Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils. *Biology & Fertility in Soils* 25:142-146.
- PEDERSEN, A., PETERSEN, S., SCHELDE, K. 2010: A comprehensive approach to soil-atmosphere trace-gas flux estimation with static chambers. *European Journal of Soil Science* 61, 888-902.
- PEDERSEN, A. 2015: R-package HMR: Flux Estimation with Static Chamber Data, pp. R package version 0.4.1. <http://CRAN.R-project.org/package=HMR>.
- PETERSEN, S.O. 1981: Nitrous Oxide Emissions from Manure and Inorganic Fertilizers Applied to Spring Barley. *Journal of Environmental Quality* 28: 1610-1618.
- PETERSEN, S.O., ANDERSEN, A.J., ERIKSEN, J. 2012: Effects of cattle slurry acidification on ammonia and methane evolution during storage. *J Environ Qual* 41(1):88-94.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM 2016: A language and environment for statistical computing. Version: 3.3.2. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RICHTER, J. 1972: Zur Methodik des Bodengashaushaltes: I. Ökologisches Modell II. Ergebnisse und Diskussion. *J. Plant*
- ROELCKE, M. 1994: Die Ammoniak-Volatilisation nach Ausbringung von Mineraldünger-Stickstoff in carbonatreichen chinesischen Löß-Ackerböden. Ph.D. Thesis, Braunschweig Technical University, Braunschweig, Germany, pp.194. *Nutr. Soil Sci.* 132: 208 –239.
- ROELCKE, M., LI, S.X., TIAN, X.H., GAO, Y.J. UND RICHTER, J. 2002: In situ comparisons of ammonia volatilization from N fertilizers in Chinese loess soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 62: 73 –88.
- RUSER, R., FLESSA, H., SCHILLING, R., BEESE, F., MUNCH, J.C. 2001: Effects of crop-specific field management and N fertilization on N₂O emissions from a fine-loamy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59, 177-191.
- RUSER, R., FLESSA, H., RUSSOW, R., SCHMIDT, G., BUEGGER, F., MUNCH, J.C. 2006: Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 263-274.
- SCHÄFER, B.-C. 2011: Ölfrüchte, In: LÜTKE-ENTRUP, N., SCHÄFER, B.C. (Hrsg.): *Lehrbuch des Pflanzenbaus Band 2: Kulturpflanzen*. 3. Auflage, AgroConcept, Bonn, Kap.6.3, 593f
- SCHMIDT, W., BRANDHUBER, R., BUG, J. 2015: Wassererosion. In: AID INFODIENST ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT, VERBRAUCHERSCHUTZ E.V. (Hrsg.): *Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz*. Erstauflage, Druckerei Lokay e.K., Reinheim, Kap. 4.2, 88
- SCHUMACHER, A. 2011: Kartierung und Bewertung des Gefügezustandes und des Humusgehaltes langjährig pfluglos geführter Ackerböden, Master-Thesis an der FH Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft Soest
- SEHY, U., RUSER, R., MUNCH, J.C. 2003: Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99:97-111.
- SENBAYRAM, M., CHEN, R., MÜHLING, K.H., DITTERT, K. 2009: Contribution of nitrification and denitrification

to nitrous oxide emissions from soils after application of biogas waste and other fertilizers. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 23:2489-2498.

- SENBAYRAM, M., CHEN, R., WIENFORTH, B., HERRMANN, A., KAGE, H., MÜHLING, K.H., DITTERT, K. 2014: Emissions of N₂O from Biogas Crop Production systems in Northern Germany. *Bioenerg. Res.* 7: 1223-1236.
- SIX, J., OGLE, S.M., BREIDT, F.J., CONANT, R.T., MOSIER, A.R., PAUSTIAN, K. 2004: The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. *Global Change Biology* 10:155-160.
- SMITH, K.A., THOMSON, P.E., CLAYTON, H., MCTAGGART, I.P., CONEN, F. 1998: Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmos. Environ.* 32, 3301-3309.
- SMITH, K.A., DOBBIE, K.E., BALL, B.C., BAKKEN, L.R., SITAULA, B.K., HANSEN, S., BRUMME, R., BORKEN, W., CHRISTENSEN, S., PRIEMÉ, A., FOWLER, D., MACDONALD, J.A., SKIBA, U., KLEMEDTSSON, L., KASIMIR-KLEMEDTSSON, A., DEGÓRSKA, A., ORLANSKI, P. 2000: Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Glob. Change Biol.* 6, 791-803.
- THIELEMANN, U. 1986: The Octet-Method for Sampling Earthworm Populations. In *Pedobiologia* (29), S. 296-302
SCHUSTER, W., LOCHOW, J. v. 1979: *Anlage und Auswertung von Feldversuchen*, 2. Aufl. 1979, DLG-Verlag Frankfurt
- UMWELTBUNDESAMT 2014: *Novellierung der Düngeverordnung. Kurzstellungnahme der Kommission Landwirtschaft beim Umweltbundesamt (KLU)*. Ribbe, L., Freibauer, A., Heißenhuber, A., Hülsbergen, K.-J., Krug, A., von Meyer, H., Peterwitz, U.
- VAN GROENIGEN, J.W., VELTHOF, G.L., OENAMA, O., VAN GROENIGEN, K.J., VAN KESSEL, C. 2010: Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *European Journal of Soil Science* 61:903-913.
- VELTHOF, G.L., MOSQUERA, J. 2011: The impact of slurry application technique on nitrous oxide emission from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems Environment* 140, 298-308.
- WALTER, K., DON, A., FUß, R., KERN, J., DREWER, J., FLESSA, H. 2014: Direct nitrous oxide emissions from oilseed rape cropping - a meta-analysis. *Global Change Biol. Bioenergy* 7, 1260–1271. DOI:10.1111/gcbb.12223.
- WALTER, K., DON, A., FLESSA, H. 2015: Net N₂O and CH₄ soil fluxes of annual and perennial bioenergy crops in two central German regions. *Biomass Bioenerg.* 81, 556–567.
- WEBB, J., EURICH-MENDEN, B., DÄMMGEN, U., AGOSTINI, F. 2009: Review of published studies estimating the abatement efficacy of reduced-emission slurry spreading techniques. In: Sutton MA, Reis S, Baker S (Hrsg.): *Atmospheric Ammonia: detecting emission changes and environmental impacts; results of an Expert Workshop under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*. Springer, Dordrecht, S. 195-202.
- WEBB, J., PAIN, B., BITTMAN, S., MORGAN, J. 2010: The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response - A review. *Agriculture, Ecosystems Environment* 137, 39-46.
- WEIER, K.L., DORAN, J.W., POWER, J.F., WALTERS, D.T. 1993: Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:66-72.

- WESTERSCHULTE, M., FEDEROLF, C.-P., TRAUTZ, D., OLFS, H-W. 2016: Ergebnisse eines mehrjährigen Feldversuchs zur Unterfuß-Gülleapplikation in Mais. Sommertagung AG Landwirtschaftliches Versuchswesen 23.06.2016 www.biometrische-gesellschaft.de/.../AG.../20160622_Ferderolf_Westerschulte.pdf (abgerufen 6.3.2016)
- WESTERSCHULTE, M., FEDEROLF, C.-P., PRALLE, H., TRAUTZ D., BROLL G., OLFS, H.W. 2015: „Soil nitrogen dynamics after slurry injection in field trials: Evaluation of a soil sampling strategy“ . Journal of plant nutrition and soil sciences 2015,178 pp 923-934
- WEYER, TH., BOEDDINGHAUS, R. 2010: Bestimmungsschlüssel zur Erkennung und Bewertung von Bodenschadverdichtungen im Feld, Herausgeber Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen.
- WINNIGE, B., CORZELIUS, U., FRIELINGHAUS, M. 1998: Indikation der aktuellen Erosionsgefährdung mit Hilfe der Bodenbedeckung. In: Mitteilung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 88, S. 569 - 572
- WOOD, S. 2011: Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. Journal of the Royal Statistical Society 73, 3-36.
- WOOD, S., AUGUSTIN, N. 2002: GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. Ecological Modelling 157, 157-177.
- WULF, S., MAETING, M., CLEMENS, J. 2002: Application Technique and Slurry Co-Fermentation Effects on Ammonia, Nitrous Oxide, and Methane Emissions after Spreading. Journal of Environmental Quality 31, 1795-1801.
- XIANG, S.R., DOYLE, A., HOLDEN, P.A., SCHIMEL, J.P. 2008: Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. Soil Biol Biochem 40:2281-2289.

7 Anhang

Vergleich der Betriebssysteme anhand ausgewählter Qualitätsparameter

Soest

Abbildung 89 bis Abbildung 98 zeigen die Qualitätsparameter Tausendkornmasse für die Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Ackerbohne, Rohprotein für die Kulturen Winterweizen, Wintergerste und Ackerbohne, Ölgehalt für den Winterraps sowie das Hektolitergewicht für die Kulturen Winterweizen und Wintergerste für den Standort Soest über die vollständige Projektlaufzeit. Die Parameter Tausendkornmasse, Hektolitergewicht und Ölgehalt beziehen sich dabei auf 14 % bzw. 9 % (Raps) Feuchte, der Rohproteingehalt bezieht sich auf 100 % Trockenmasse. Zum Teil waren keine Daten aus den Großparzellen vorhanden, in diesen Fällen wurde auf die Werte aus den Parzellenversuchen zur Düngoptimierung zurückgegriffen. Die entsprechenden Säulen sind in den Diagrammen markiert.

In Soest wurde während der kompletten Projektlaufzeit eine B-Weizensorte angebaut. Abbildung 89 bis Abbildung 91 zeigen die Qualitätsparameter im Winterweizen, in Abbildung 89 ist die Tausendkornmasse zu sehen. Die höchsten Tausendkornmassen waren in den Erntejahren 2012 und 2014 vorhanden, die niedrigsten in den Erntejahren 2013, 2015 und 2016. Die Betriebssysteme unterschieden sich innerhalb der jeweiligen Erntejahre zum Teil erheblich voneinander, in den Jahren 2011, 2014 und 2015 war der V-Betrieb den anderen Betriebsformen überlegen, im Jahr 2013 waren V- und O-Betrieb dem M-Betrieb überlegen und in den Erntejahren 2012 und 2016 war der O-Betrieb den anderen Betrieben überlegen. Der Einfluss der Vorfrucht innerhalb des Betriebssystems ist in den meisten Fällen unwesentlich, die einzige Ausnahme bildet der M-Betrieb im Erntejahr 2014, in diesem Fall ist die Vorfrucht Winterweizen der Vorfrucht Winterraps überlegen.

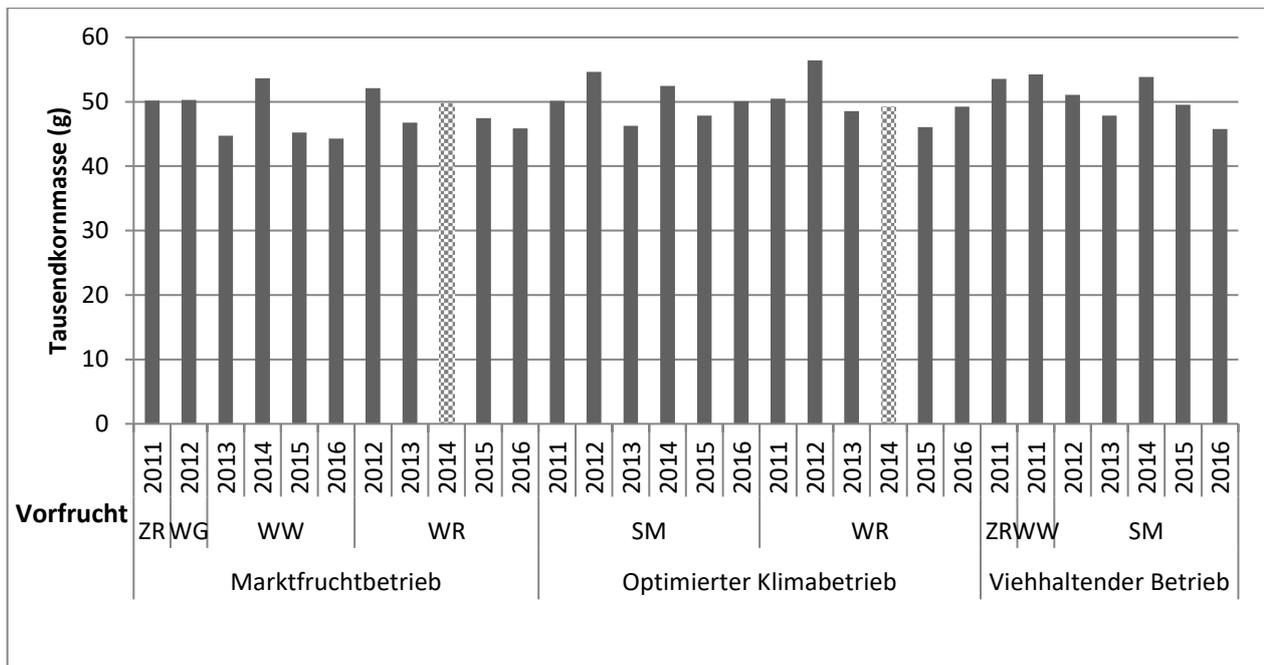


Abbildung 89: Tausendkornmasse von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

In Abbildung 90 ist das Hektolitergewicht des Weizens dargestellt, die höchsten Hektolitergewichte gab es in den Erntejahren 2012 und 2013 mit über 78 kg, die niedrigsten im Erntejahr 2016 mit Werten zwischen 70 und 71 kg. Stärkere Differenzierungen durch das Betriebssystem gab es nur im Erntejahr 2011, in diesem Fall war der V-Betrieb dem O-Betrieb und der O-Betrieb dem M-Betrieb überlegen. Die Aussagekraft ist jedoch fraglich, da in diesem Jahr noch nicht die gewünschten Vorfrüchte vorhanden waren und somit die Betriebssysteme noch nicht umgesetzt wurden. Auffällig ist der niedrige Wert im O-Betrieb nach Vorfrucht Winterraps im Erntejahr 2015, der gut 10 % unter der vergleichbaren Variante im M-Betrieb liegt. Eine mögliche Erklärung sind die vielen unterständigen Ähren, die in der Parzelle beobachtet wurden. Die vom Handel geforderten 76 kg/hl für Backweizen wurden nicht immer erreicht, besonders auffällig in diesem Fall das Erntejahr 2016 in dem in keiner Versuchsvariante dieses Gewicht erreicht wurde, auch die geforderten 72 kg/hl für Futterweizen wurden nicht erreicht. Das Jahr war durch diverse Krankheitsverläufe und eine verzögerte, durch schlechtes Wetter bedingte Ernte geprägt, was insgesamt schlechtere Hektolitergewichte und Erträge zur Folge hatte. Abbildung 91 zeigt die Rohproteingehalte des Weizens, wesentliche Unterschiede ergaben sich nur für das Erntejahr 2011, in dem der V-Betrieb überlegen war, die Aussagekraft dieses Ergebnisses wurde bereits diskutiert. In den Erntejahren 2012 und 2013 konnten die durch den Handel vorgegebenen 12 % Proteingehalt erreicht werden, in der zweiten Projektphase wurde dies in keiner der untersuchten Varianten in keinem Jahr erreicht.

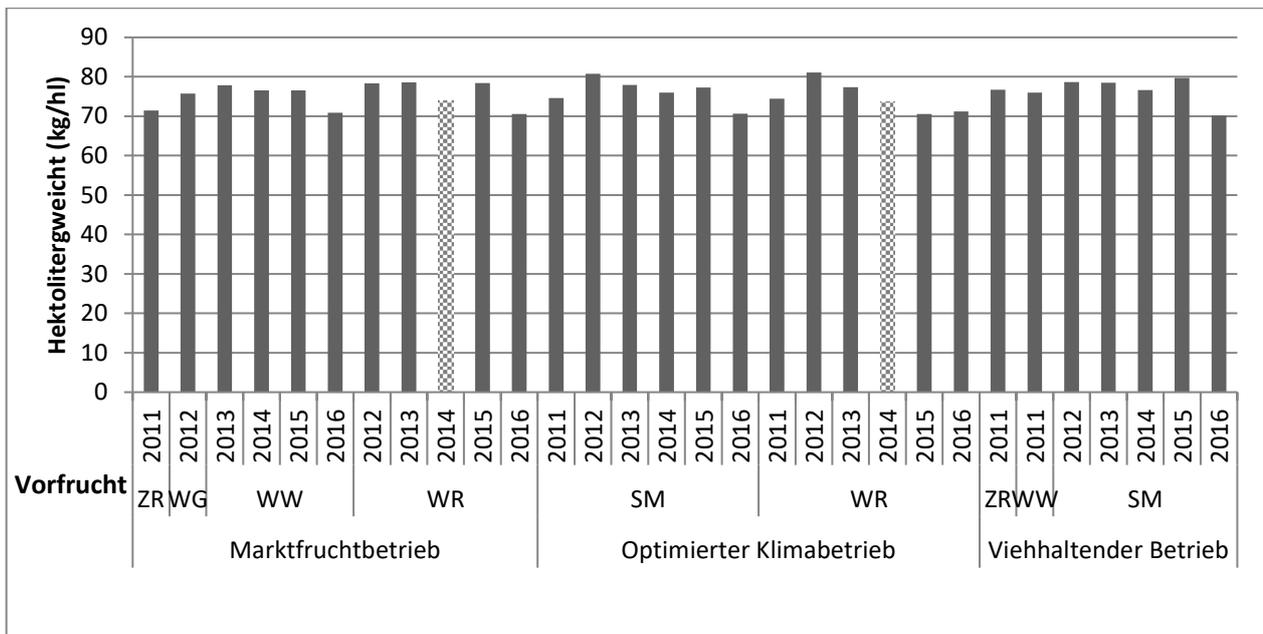


Abbildung 90: Hektolitergewicht von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

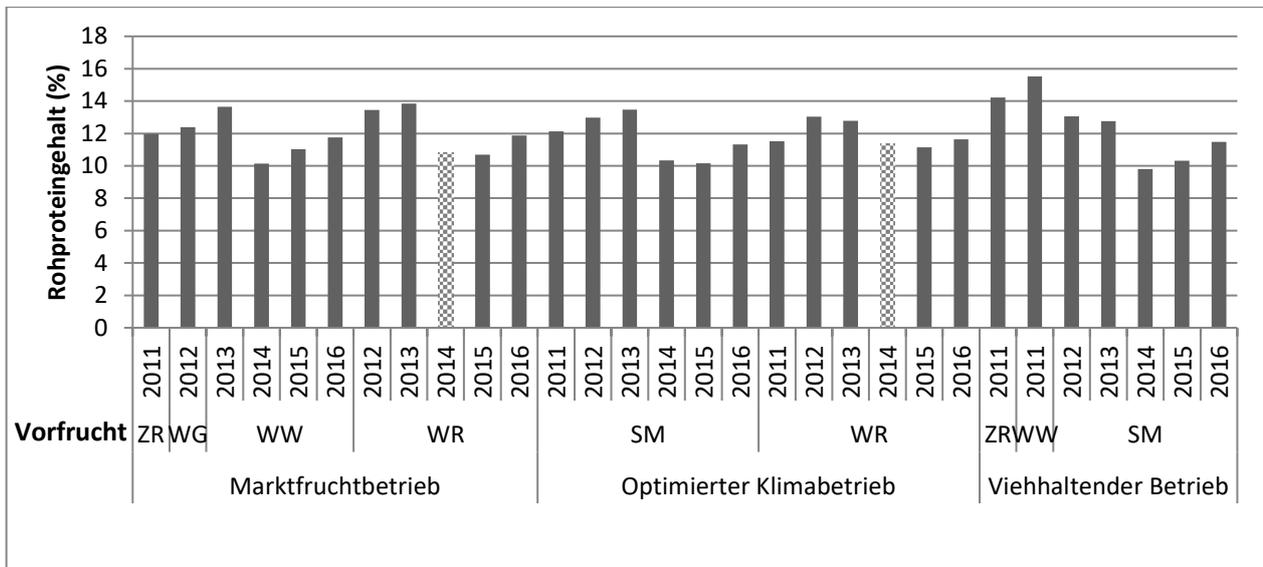


Abbildung 91: Rohproteingehalt von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

In Abbildung 92 bis Abbildung 94 sind die Qualitätsparameter der Wintergerste dargestellt. Die Tausendkornmasse ist in Abbildung 92 gezeigt, in den Erntejahren 2011 bis 2014 ist der O-Betrieb dem V-Betrieb überlegen, in den anderen Jahren zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede. Die höchsten Tausendkornmassen wurden im Erntejahr 2012 gemessen, die niedrigsten im Erntejahr 2016. Das Hektolitergewicht ist in Abbildung 93 dargestellt, die vom Handel geforderten 62 kg/hl konnten nur in den Erntejahren 2014 und 2016 nicht erreicht werden. Zwischen den Betriebssystemen konnten keine entscheidenden Unterschiede beobachtet werden, das gleiche gilt für die Rohproteingehalte in Abbildung 94.

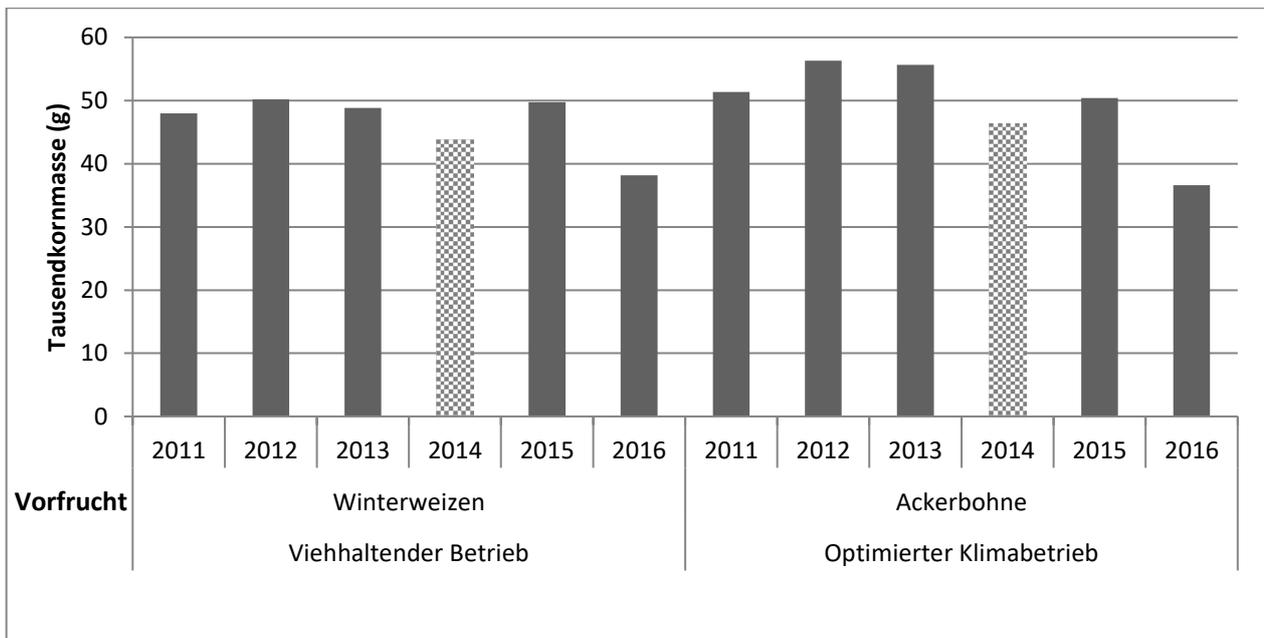


Abbildung 92: Tausend Kornmasse von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

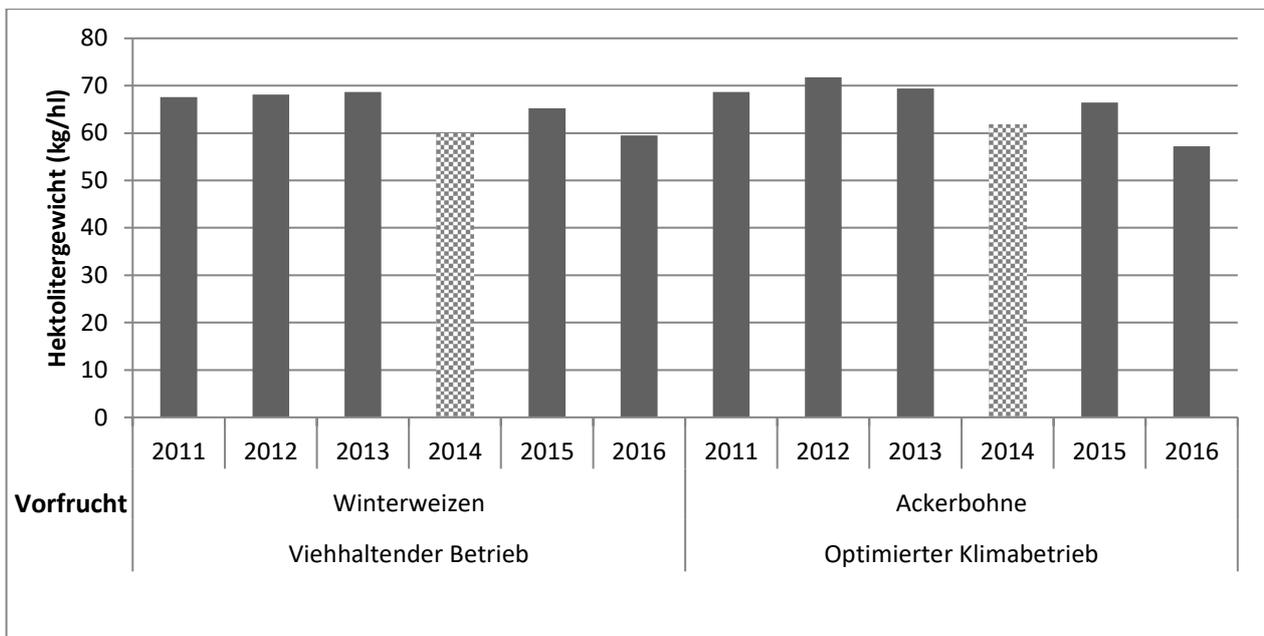


Abbildung 93: Hektolitergewicht von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

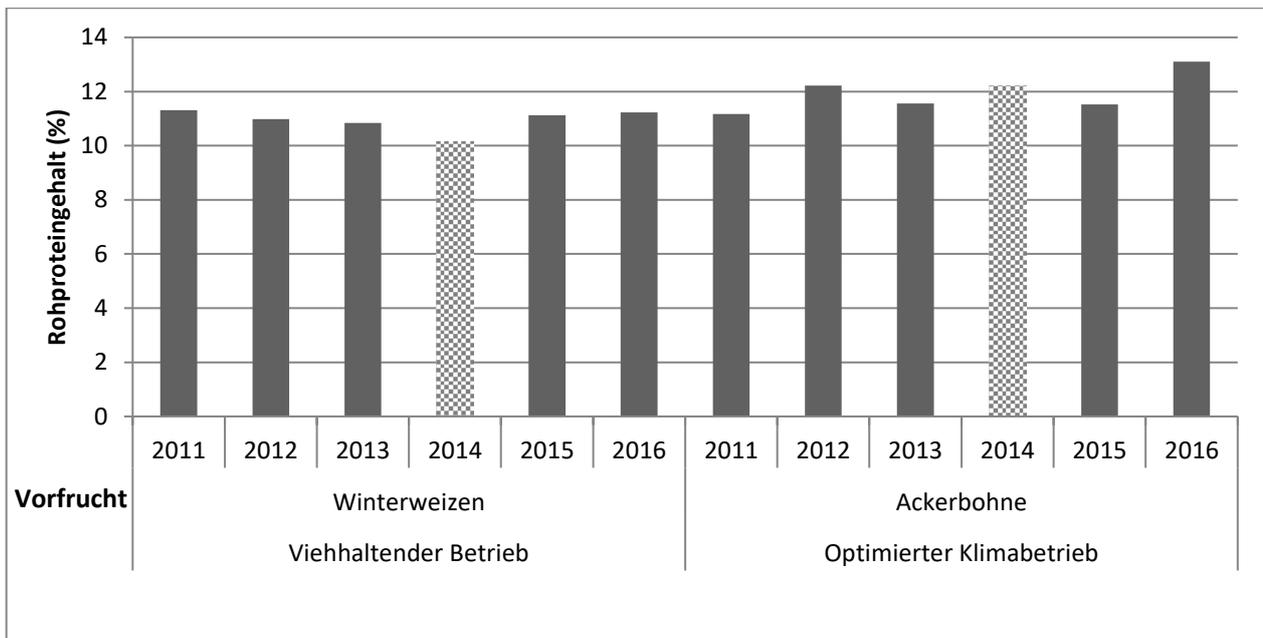


Abbildung 94: Rohproteingehalt von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

Die Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen die Qualitätsparameter im Winterraps, für das Erntejahr 2016 wurden im O-Betrieb aufgrund des fehlenden Exaktversuches keine Proben genommen. Die Tausendkornmasse des Winterrapses ist in Abbildung 95 dargestellt, zwischen den Betriebsformen lassen sich keine wesentlichen Unterschiede erkennen, lediglich im Erntejahr 2012, in dem es auch die höchsten Tausendkornmassen gab, war die Differenz relevant, im O-Betrieb wurde eine Tausendkornmasse von etwa 6,5 g erreicht, im M-Betrieb wurden 5,7 g erreicht. Die niedrigsten Tausendkornmassen wurden im Erntejahr 2013 gemessen (unter 4 g). In Abbildung 96 ist der Ölgehalt zu sehen, die Betriebssysteme verursachten keine grundlegenden Unterschiede im Ölgehalt, diese waren im Erntejahr 2015 am niedrigsten und in den Erntejahren 2012 und 2014 am höchsten. Die vom Handel geforderten 40 % Mindestölgehalt wurden in allen Fällen übertroffen.

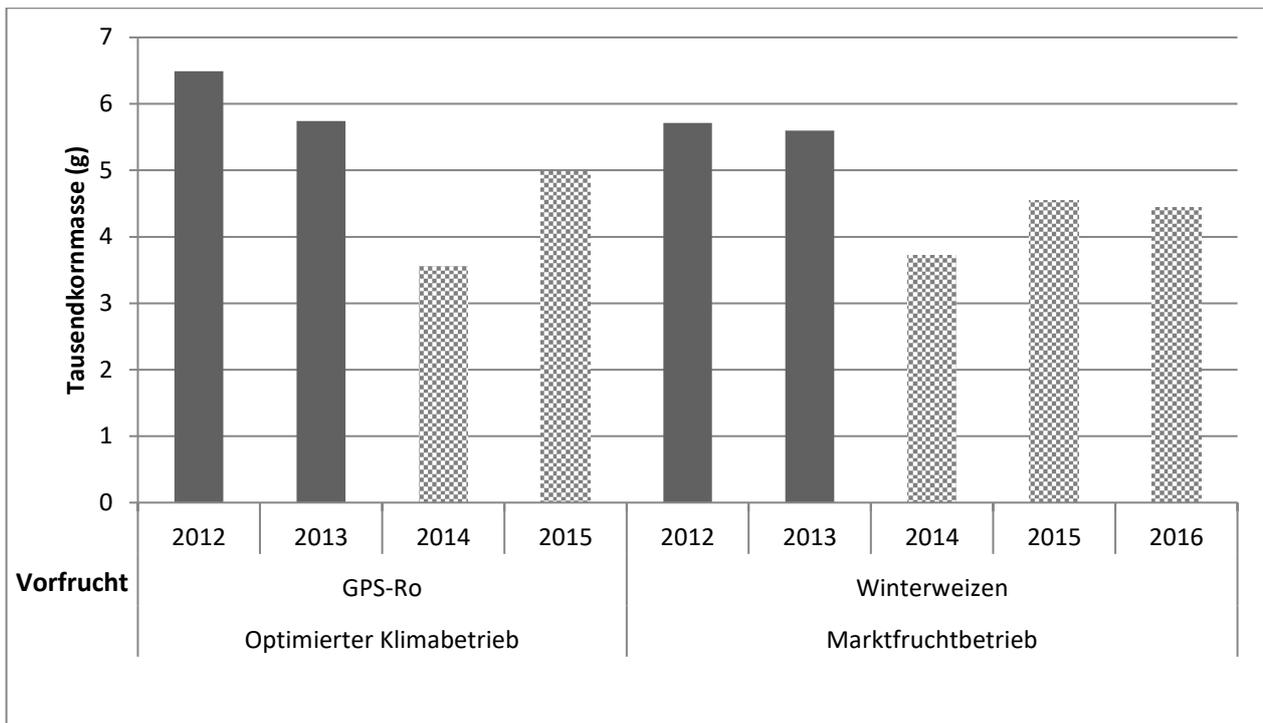


Abbildung 95: Tausendkornmasse von Winterraps der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

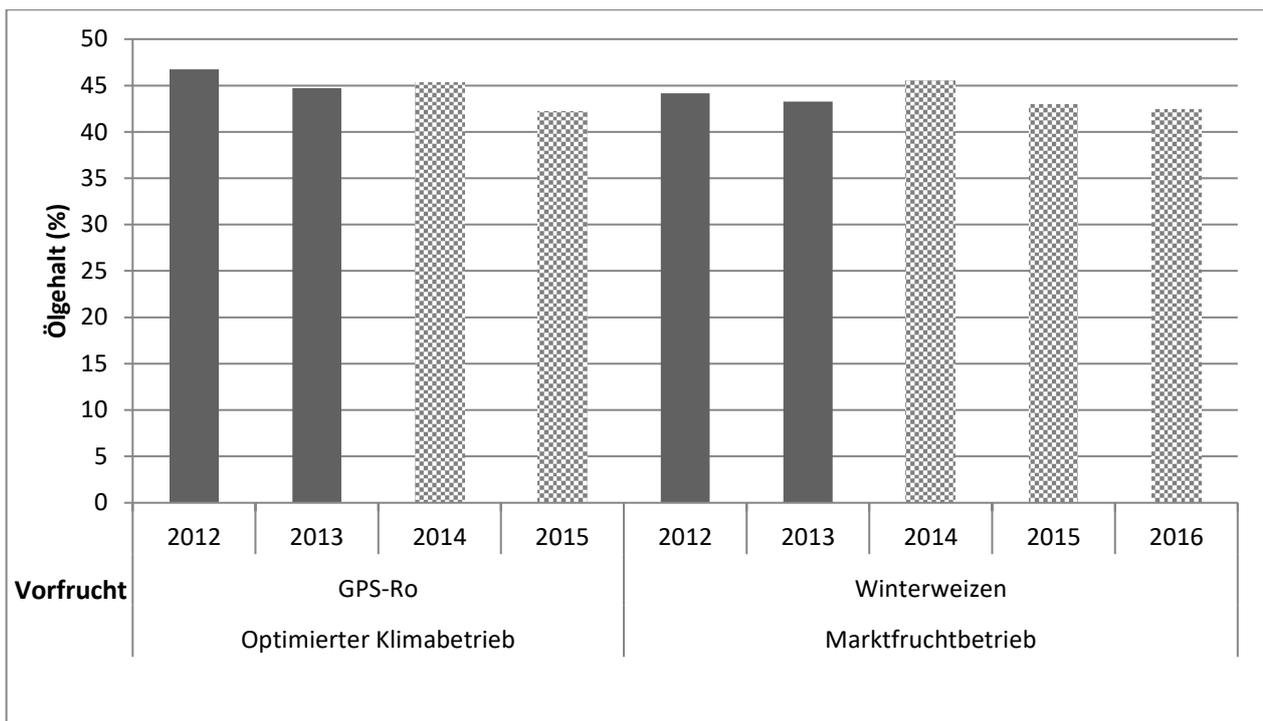


Abbildung 96: Ölgehalt von Winterraps der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

Die Tausendkornmasse und der Rohproteingehalt der Ackerbohnen sind in den Abbildung 97 und 98 dargestellt. Im Erntejahr 2014 wurden diese Parameter am Standort Soest nicht erfasst. Die Tausendkornmassen lagen in allen Jahren über 500 g und reichten von 506 g im Erntejahr 2013 bis zu 631 g im Erntejahr 2016. Die Rohproteingehalte schwankten zwischen knapp 30 % und knapp 35 %.

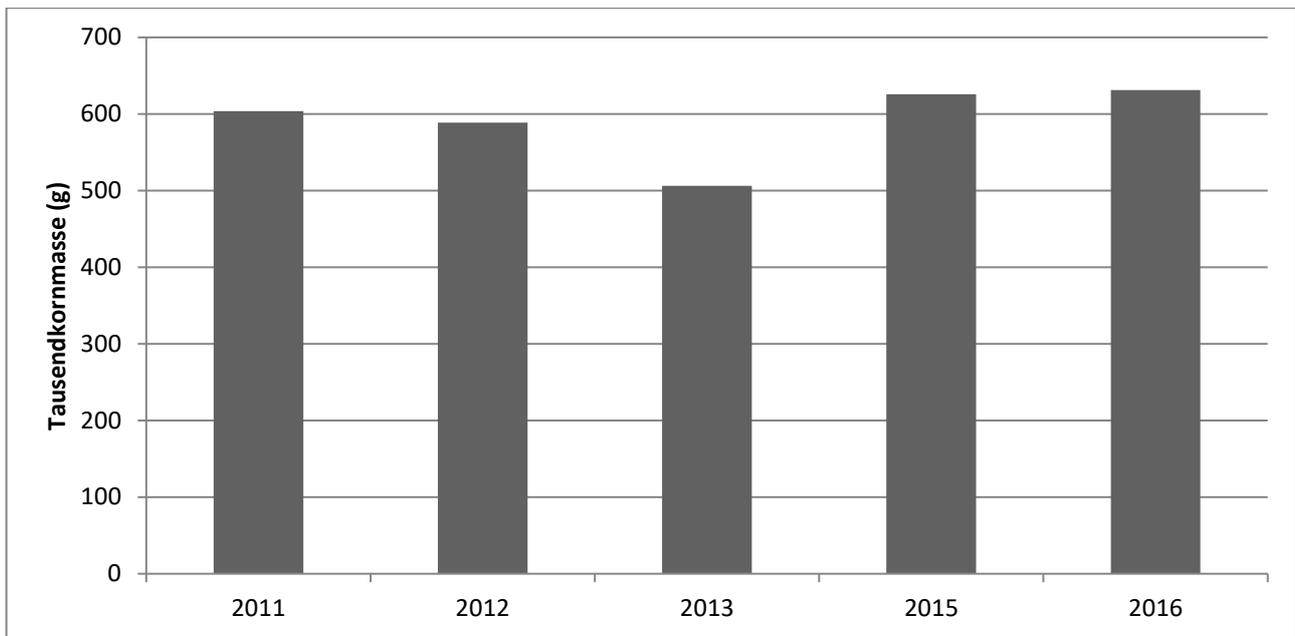


Abbildung 97: Tausendkornmasse von Ackerbohne der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest

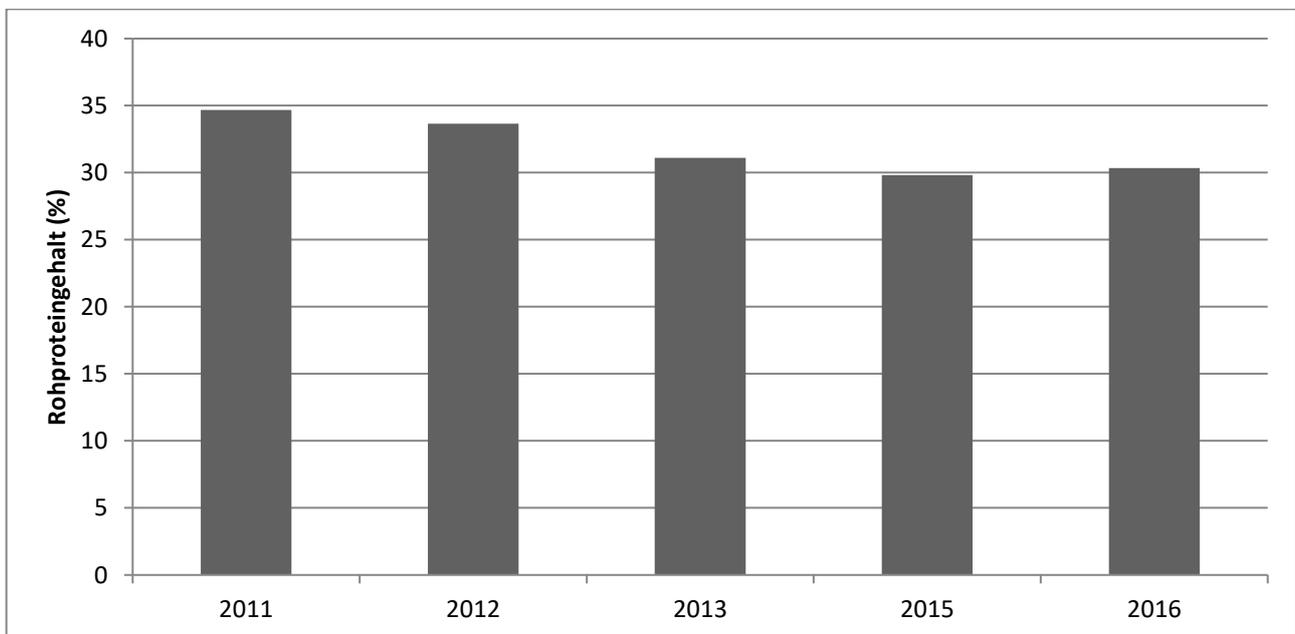


Abbildung 98: Rohproteingehalt von Ackerbohne der Erntejahre 2011 bis 2016 in Soest

Braunschweig

Abbildung 99 bis Abbildung 108 zeigen die Qualitätsparameter Tausendkornmasse für die Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Ackerbohne, Rohprotein für die Kulturen Winterweizen, Wintergerste und Ackerbohne, Ölgehalt für den Winterraps sowie das Hektolitergewicht für die Kulturen Winterweizen und Wintergerste für den Standort Braunschweig über die vollständige Projektlaufzeit. Die Parameter Tausendkornmasse, Hektolitergewicht und Ölgehalt beziehen sich dabei auf 14 % bzw. 9 % (Raps) Feuchte, der Rohproteingehalt bezieht sich auf 100 % Trockenmasse. Zum Teil waren keine Daten aus den Großparzellen vorhanden, in diesen Fällen wurde auf die Werte aus den Parzellenversuchen zur Düngoptimierung zurückgegriffen. Die entsprechenden Säulen sind in den Diagrammen markiert.

In Braunschweig wurde im Erntejahr 2011 eine B-Weizensorte angebaut, in den restlichen Jahren eine C-Weizensorte. In Abbildung 99 sind die Tausendkornmassen des Winterweizens dargestellt, die niedrigsten Tausendkornmassen gab es im Erntejahr 2013, die höchsten im Erntejahr 2016. Es konnten weder zwischen den einzelnen Betriebsformen, noch zwischen den verschiedenen Vorfrüchten wesentliche Unterschiede festgestellt werden. Abbildung 100 zeigt die Hektolitergewichte des Winterweizens, auch diese unterscheiden sich weder im Betriebssystem noch vorfruchtbedingt. In allen Fällen konnten die vom Handel geforderten 72 kg/hl für Futterweizen erreicht werden. Abbildung 101 zeigt die Rohproteingehalte des Winterweizens, diese liegen zwischen 9 % und knapp 14 %. Ein Einfluss des Betriebssystems oder der Vorfrucht lässt sich nicht erkennen, jedoch ein Effekt der einzelnen Jahre. Die niedrigsten Werte wurden in den Jahren 2011 und 2014 beobachtet, die tendenziell höchsten im Erntejahr 2013. Die Forderungen des Handels von mindestens 12% Protein, die für den M-Betrieb als Betrieb ohne Tierhaltung relevant sind, konnten dort nur im Erntejahr 2013 nach Vorfrucht Weizen und im Jahr 2012 nach Vorfrucht Winterraps erreicht werden, allerdings wurden auch keine Backweizensorten sondern Futterweizensorten angebaut.

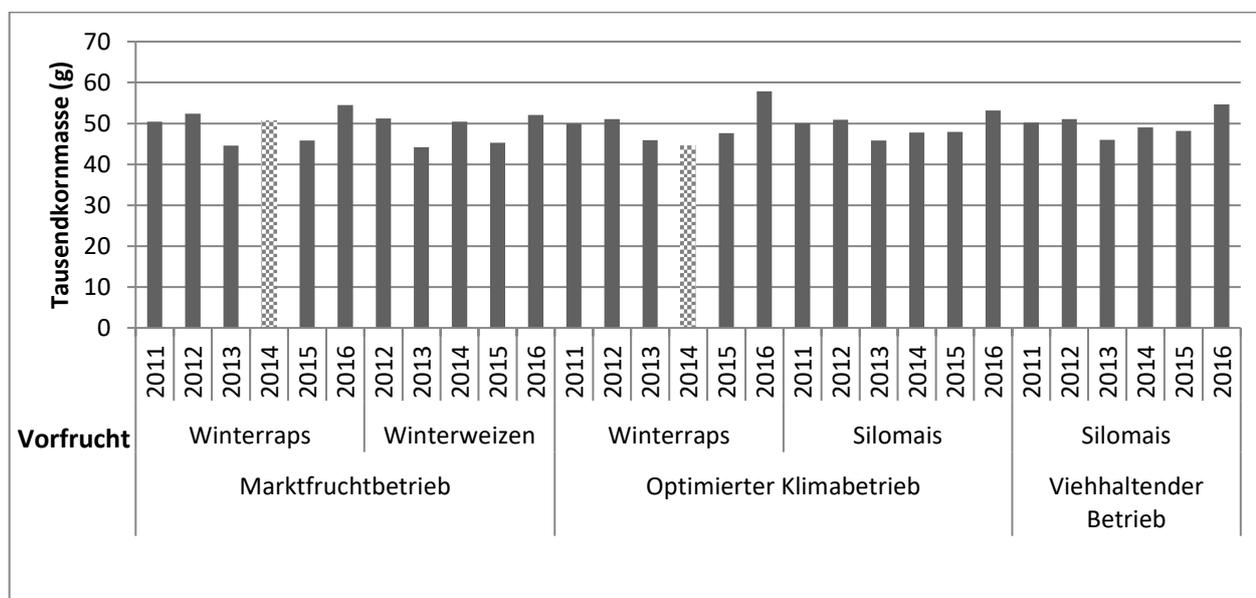


Abbildung 99: Tausendkornmasse von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig ( = Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

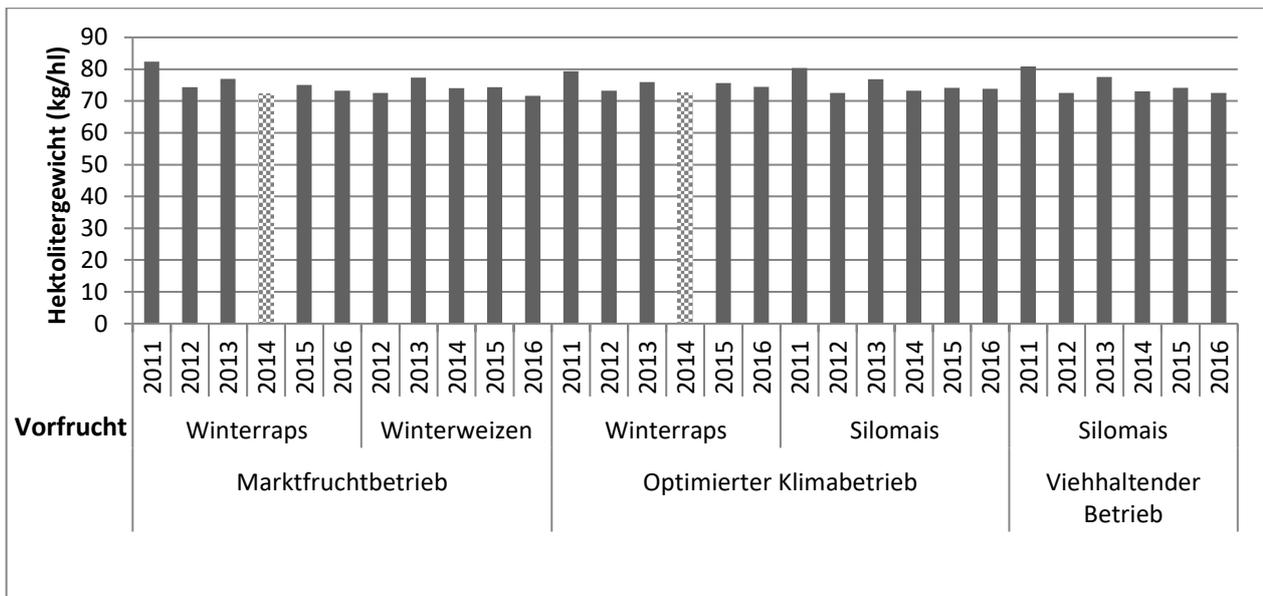


Abbildung 100: Hektolitergewicht von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

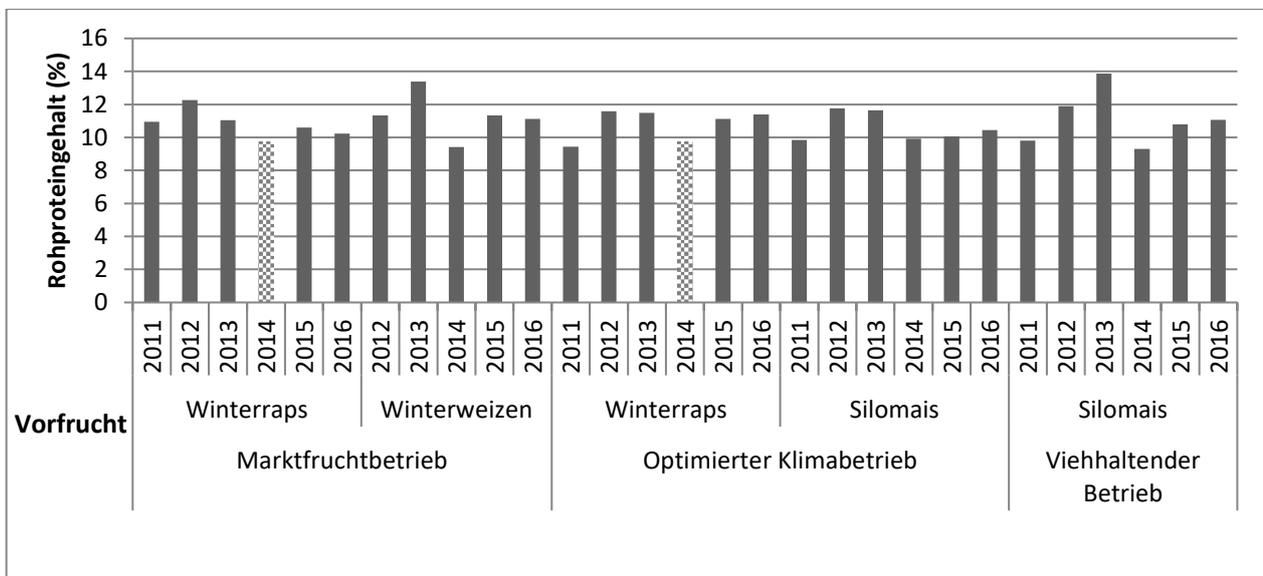


Abbildung 101: Rohproteingehalte von Winterweizen der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (= Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

In den Abbildung 102 bis Abbildung 104 sind die Tausendkornmasse, das Hektolitergewicht und der Rohproteingehalt der Wintergerste dargestellt. Die Tausendkornmasse (Abbildung 102) wies nur in den Erntejahren 2013, 2015 und 2016 wesentliche Unterschiede auf. In den Erntejahren 2013 und 2015 war der V-Betrieb überlegen, in 2016 der O-Betrieb. Das Hektolitergewicht schwankte zwischen Werten von knapp unter 59 kg/hl im Erntejahr 2011 bis zu Gewichten von knapp 70 kg/hl im Erntejahr 2013, ein Unterschied zwischen den Betrieben konnte nicht festgestellt werden. Die vom Handel anvisierten 62 kg/hl Mindestgewicht konnten nur in den Erntejahren 2012 und 2013 sowie im O-Betrieb in 2016 erreicht werden. Die Rohproteingehalte lagen zwischen gut 9 % und knapp 14 %. Die verschiedenen Betriebsformen und Vorfrüchte hatten keinen Einfluss auf das Ergebnis.

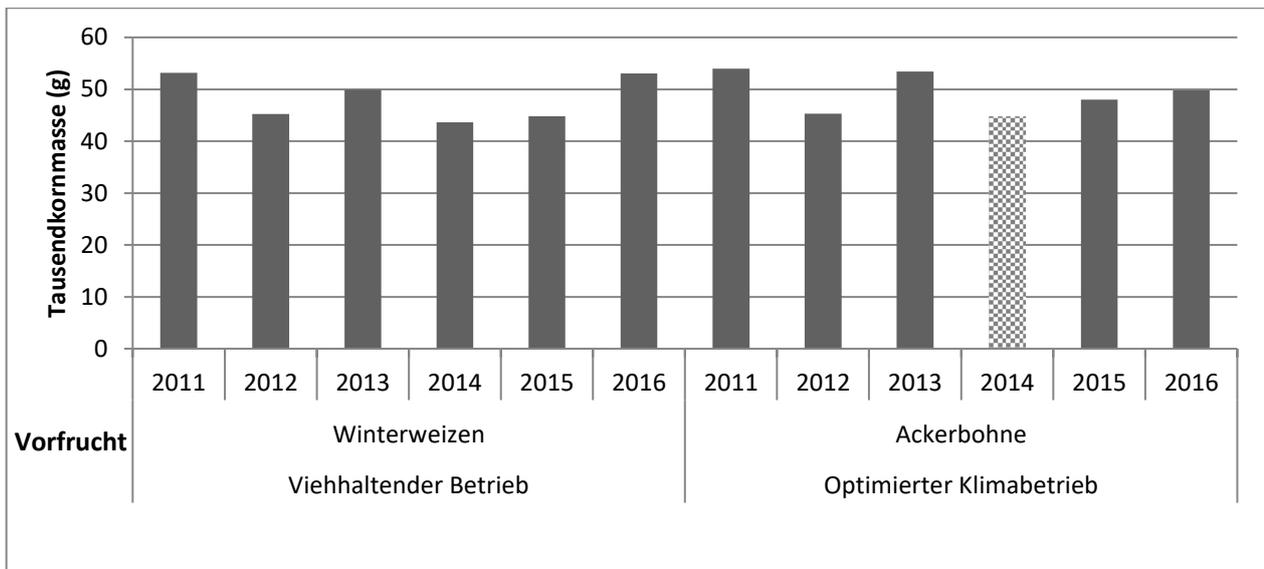


Abbildung 102: Tausendkornmasse von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig ( = Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

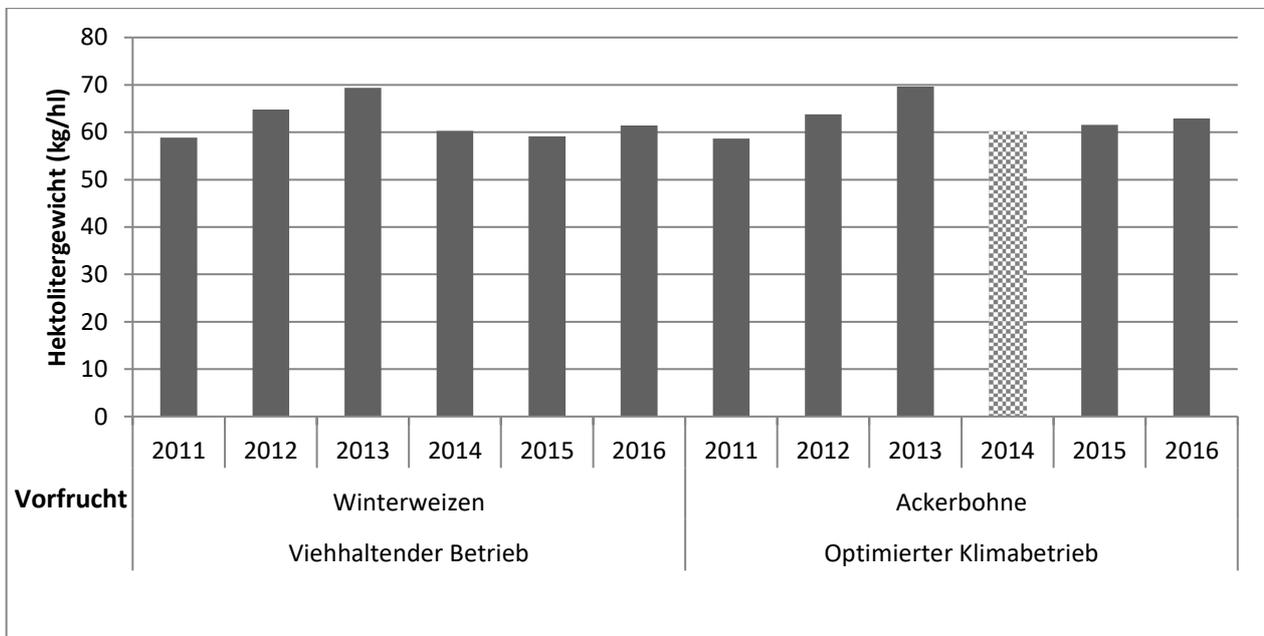


Abbildung 103: Hektolitergewicht von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig ( = Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

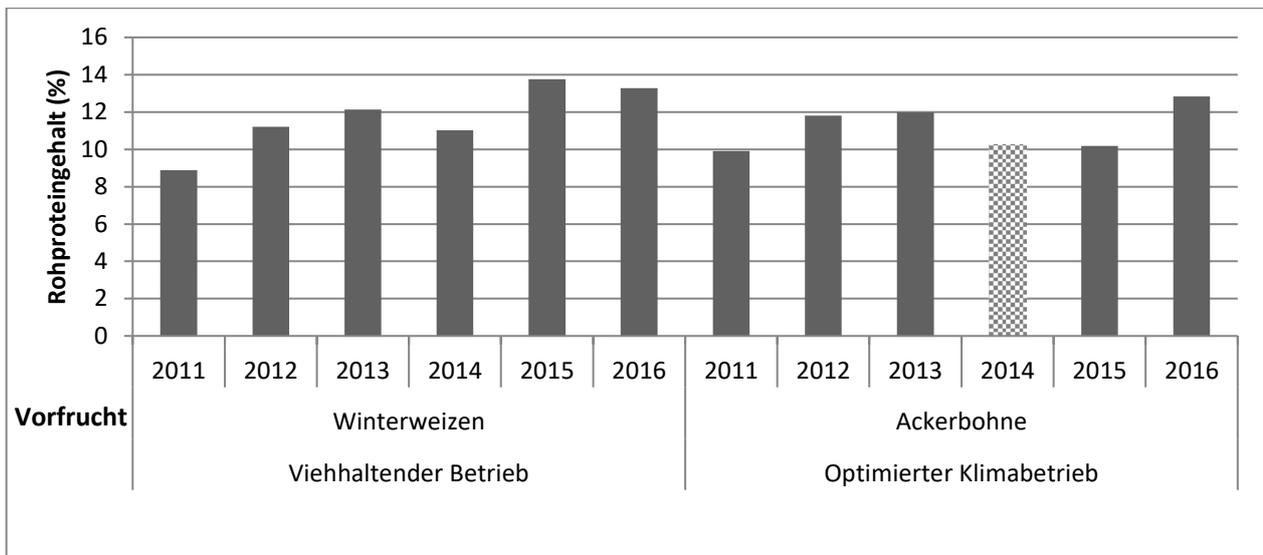


Abbildung 104: Rohproteingehalt von Wintergerste der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (= Werte aus Parzellenversuch Düngeoptimierung)

Abbildung 105 und Abbildung 106 zeigen die Qualitätsparameter des Winterrrapses. In Abbildung 105 ist die Tausendkornmasse dargestellt, die Betriebsformen haben hierauf keinen Einfluss. Die niedrigsten Werte mit 3,3 g (O-Betrieb) und 3,5 g (V-Betrieb) waren im Erntejahr 2014, die höchsten Werte mit knapp 5,5 g bzw. über 5,5 g im Erntejahr 2011. Die Ölgehalte wurden ebenfalls nicht von der Betriebsform beeinflusst und lagen in allen Fällen über den vom Handel geforderten 40 %, die Spanne ging dabei von 45 % bis knapp 52 %.

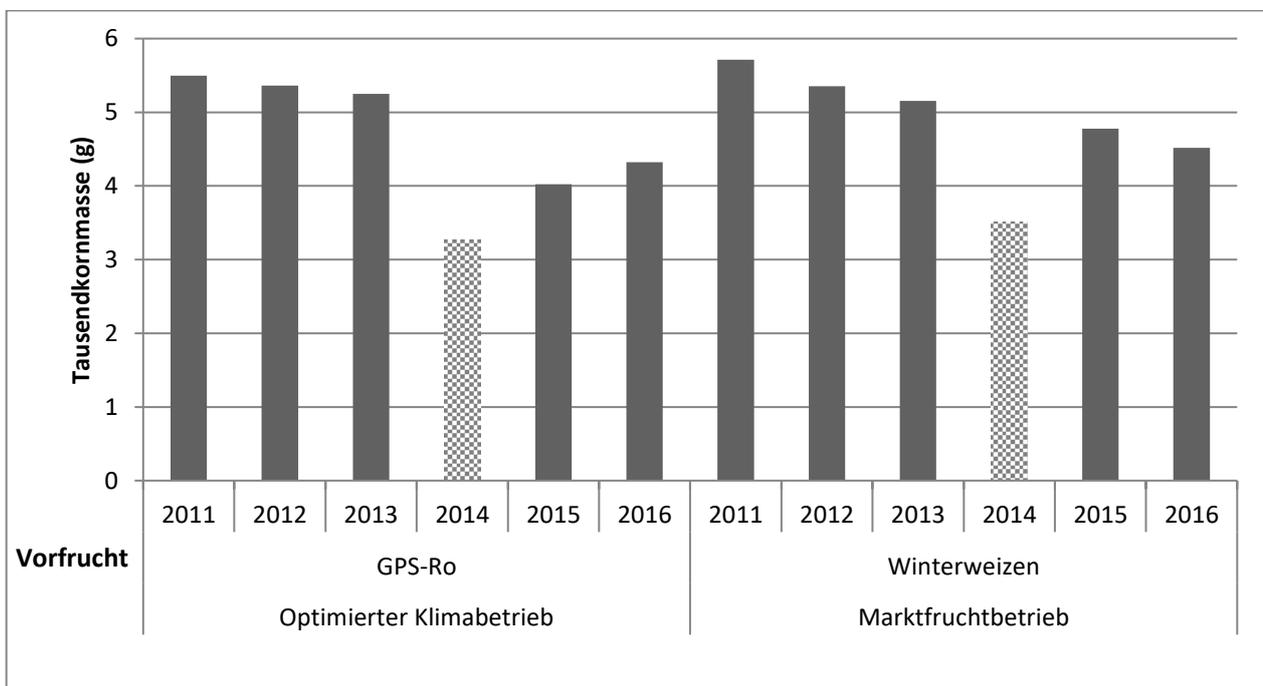


Abbildung 105: Tausendkornmasse von Winterrrapses der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (= Werte aus Parzellenversuch Düngeoptimierung)

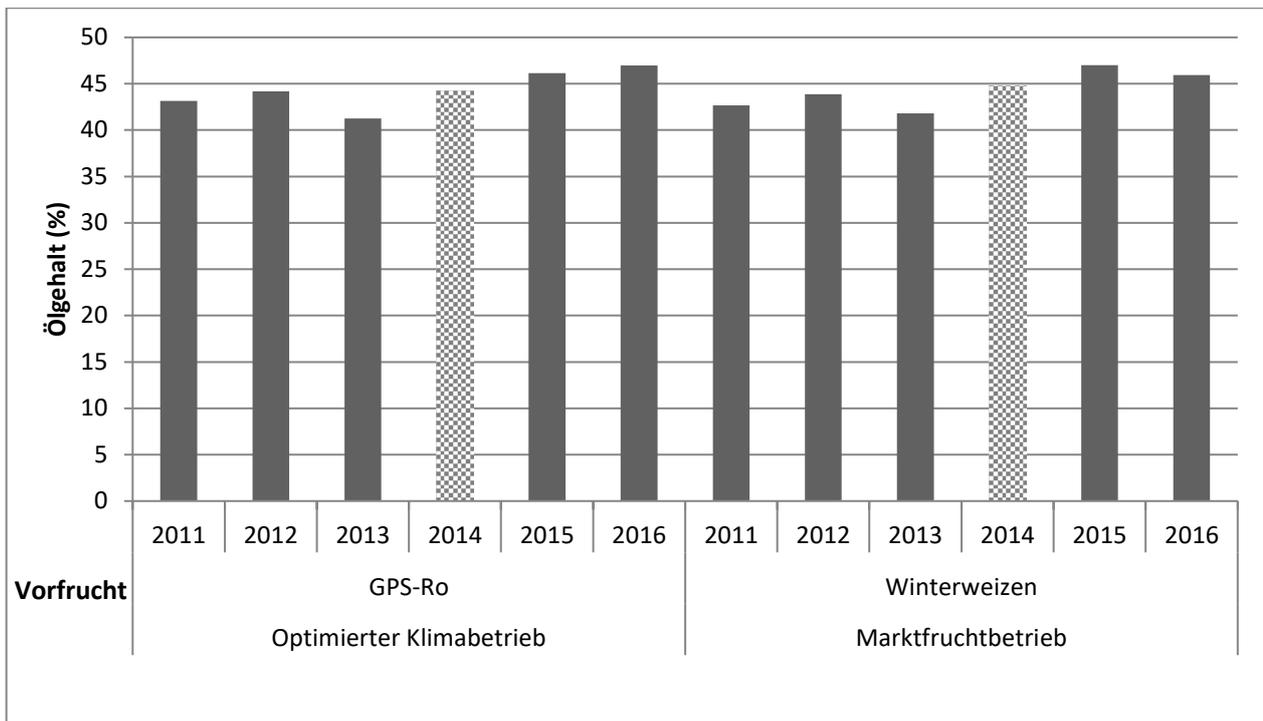


Abbildung 106: Ölgehalt von Wintererraps der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig (▨ = Werte aus Parzellenversuch Düngoptimierung)

Die Tausendkornmasse der Ackerbohnen ist in Abbildung 107 dargestellt und unterliegt starken jährlichen Schwankungen, die von knapp 400 g bis zu über 650 g reichen. Die Rohproteingehalte sind in Abbildung 108 gezeigt, diese lagen in jedem Jahr über 30 %, ohne nennenswerte Schwankungen. Im Erntejahr 2013 wurden die Parameter nicht erfasst.

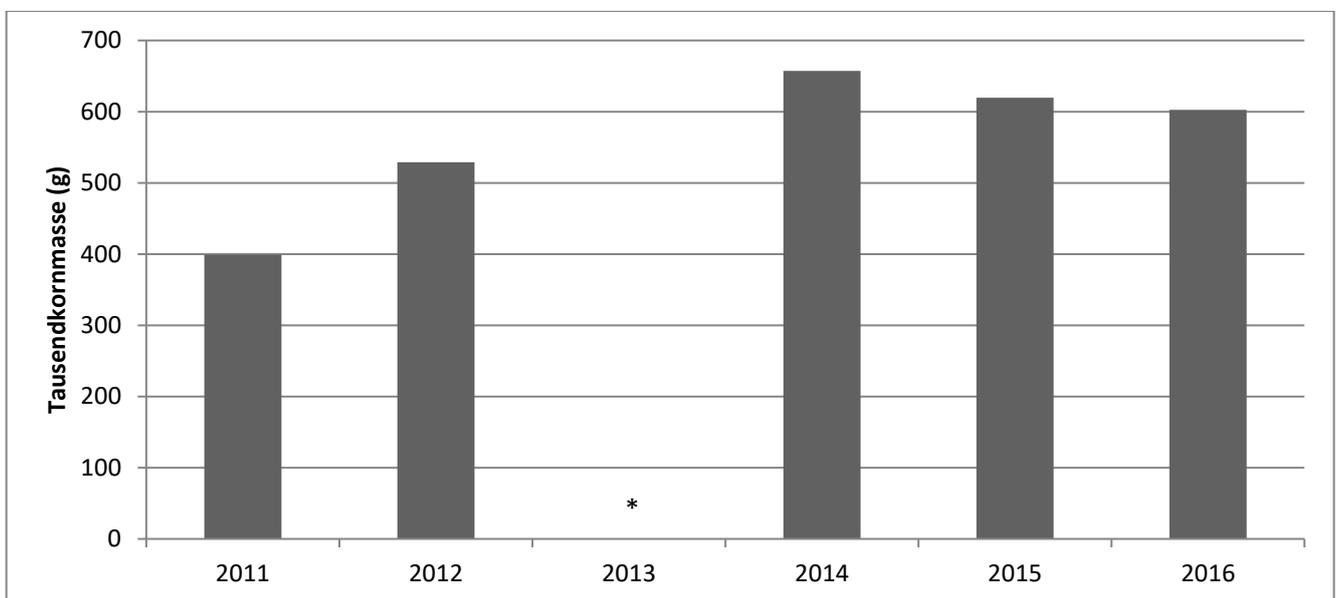


Abbildung 107: Tausendkornmasse von Ackerbohne der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig, * nicht erfasst

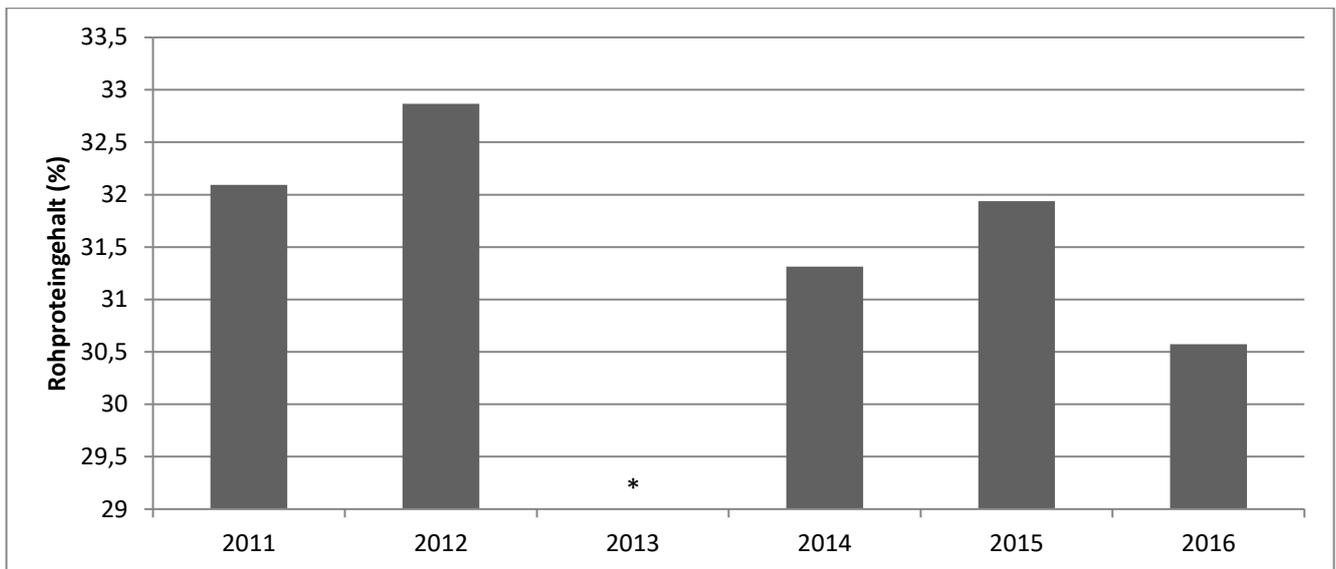


Abbildung 108: Rohproteingehalt von Ackerbohne der Erntejahre 2011 bis 2016 in Braunschweig, * nicht erfasst

Im Vergleich der Betriebssysteme lässt sich keines der geprüften Systeme mit Blick auf die Qualitätsparameter als Optimum darstellen. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass durch die Direktsaat keine Nachteile bei den Qualitäten entstehen.

Bodenkundliche Begleituntersuchungen

Gröblichhoff, F.-F., J. Horsthemke, C. Rawe, K. Korte, J. Brunotte, B.C. Schäfer.

Einleitung

Die drei Modellbetriebe unterscheiden sich in den Bewirtschaftungsbereichen Bodenbearbeitung, Fruchtfolge und Düngung zum Teil deutlich voneinander. Vor allem der klimaoptimierte Betrieb hebt sich durch die sehr geringe Bodenbearbeitungsintensität und die vielfältige Fruchtfolge deutlich vom Marktfrucht- und viehhaltenden Betrieb ab. Um die Effekte dieser Unterschiede im Zeitverlauf 2011- 2016 feststellen zu können, sind auf den Schlägen der Modellbetriebe sowohl im Jahr 2011/12 zu Projektbeginn als auch im März-April 2016 zu Projektende verschiedene bodenphysikalische, -biologische und -chemische Kennwerte ermittelt worden.

Material und Methoden

Auf ausgewählten Teilflächen sind folgende bodenphysikalische Untersuchungen nach DIN ISO 11274:2001-01; DIN ISO 11274:2001-01; DIN ISO 11461; DIN ISO 11508:1998; DIN ISO 10381-1:2003-08; DIN 19683-9 DIN ISO (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) 2002) an ungestörten Stechzylinder-Bodenproben durchgeführt worden:

Gesamtporenvolumen

Weite Grobporen

Enge Grobporen

Mittelporen

Feinporen

Feldkapazität (FK)

Nutzbare Feldkapazität (nFK)

Effektive Lagerungsdichte

Der Eindringwiderstand wurde mit Hilfe eines tragbaren elektronischen Penetrometers (EIJKELKAMP SOIL AND WATER 2016) 2011 und 2016 auf allen Schlägen der Modellbetriebe auf beiden Standorten gemessen.

Der Zustand der biologischen Aktivität eines Bodens wurde durch die Basalatmung 2011 und 2016 auf allen Schlägen der Modellbetriebe bestimmt. Die Proben der Bodenatmung wurden bis zur Messung eingefroren gelagert. Eine Bodenmenge entsprechend 30g Trockengewicht wurde in Plastikbecher gefüllt und 5 Tage bei 22°C vorinkubiert. Jede Probe wurde dreifach eingewogen. Die Bodenfeuchte liegt im empfohlenen Bereich von ca. 50-60% der maximalen Wasserkapazität (ISO/DIS 17155, 2001). Im Anschluss an die Vorinkubation wurde die Bodenatmung mit einem Respirometer (Respicond, Nordgren Innovations, Schweden) bei 22°C gemessen. Das Respicond basiert auf dem Prinzip, dass freigesetztes CO₂ von einer Kalilauge (KOH-Falle) aufgenommen wird, was zu einer Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit der KOH führt (NORDGREN 1988). Die Leitfähigkeit wurde stündlich gemessen. Die Messung erfolgte über drei Tage, wobei die ersten Stunden nicht berücksichtigt wurden, da noch keine stabile Atmungsrate vorlag (ISO/DIS 17155, 2001). Die mittlere stündliche CO₂ Freisetzung wurde berechnet und die Bodenatmung in µg CO₂ pro g Boden und Tag angegeben.

Die Regenwurmabundanzen nach der Thielemann'schen Oktettmethode (THIELEMANN 1986) wurden 2011 an ausgewählten und 2016 an allen Schlägen bestimmt.

Der Gehalt an Grundnährstoffen (P,K,Mg), der pH-Wert der Krume (VDLUFA 2000) sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff (ToC) wurden auf allen Schlägen der Modellbetriebe zu Projektbeginn und -ende bestimmt.

Statistik

Für den Vergleich der bodenkundlichen Kennwerte sind die Daten wenn sinnvoll statistisch ausgewertet worden. Für die statistische Auswertung ist das Statistik Programmpaket IBM-SPSS Statistics in der Version 21 verwendet worden.

Ergebnisse

Bodenphysikalische Begleituntersuchungen

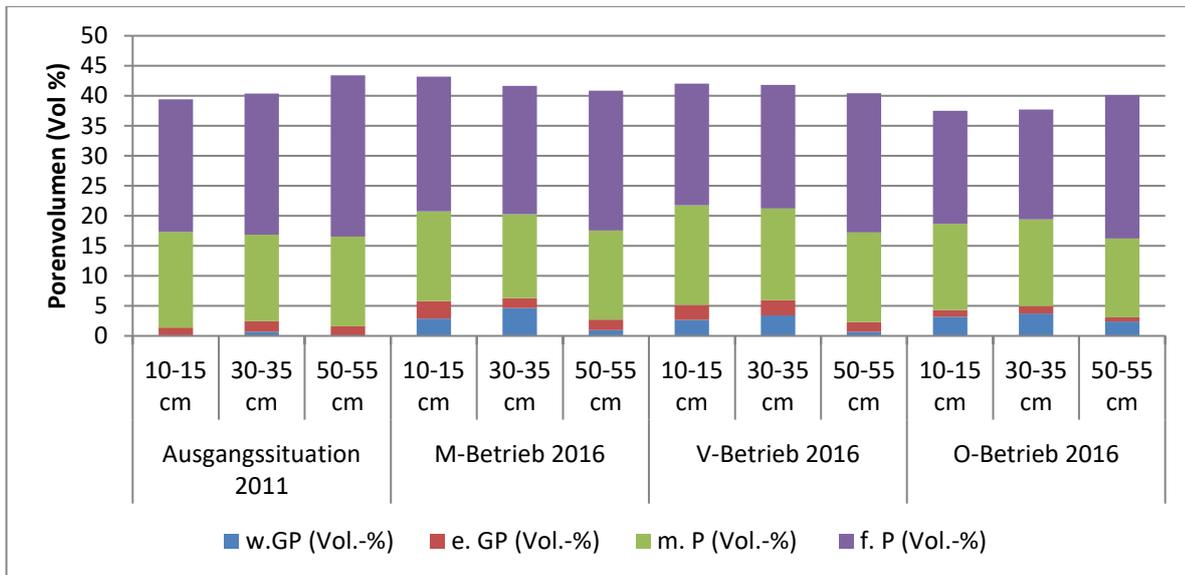


Abbildung 109: Gesamtporenvolumen sowie die Porenverteilung in der Ausgangssituation (April 2012) und zu Projektende (März 2016) in Braunschweig

Zu Projektbeginn wurde am Standort Braunschweig die Ausgangssituation an zwei repräsentativen Bodenprofilen für die gesamte Versuchsfläche aufgenommen, da die Bodenbearbeitung und Bewirtschaftung noch nicht differenziert war. Zum Projektende werden die Erhebungen an drei Profilgruben je Modellbetrieb durchgeführt.

Zu Beginn ist das vollständige Fehlen der weiten Grobporen in der Krume sowie im Unterboden bei 50-55 cm Tiefe auffällig. Die weiten Grobporen sind ein Maß für die Durchlüftung des Bodens. Hier wachsen die Wurzeln und sie sind als Lebensraum für viele Bodentiere (z. B. Collembolen und Regenwürmer) unverzichtbar. Während der Projektlaufzeit hat sich der Anteil des luftführenden Porensystems in allen Betriebsformen deutlich auf rund 5 % in der Krume und der Krumenbasis erhöht. Selbst im Unterboden werden rund 3 % Grobporenanteil erreicht. Das sind zwar immer noch sehr niedrige Werte, aber für einen Tonboden nicht untypisch. Welche Prozesse für die Erhöhung des Grobporenvolumens insbesondere in der Direktsaat des optimierten Klimabetriebes in welchem Umfang ursächlich sind, kann nur vermutet werden. Eine große Rolle werden aber die erhöhten Regenwurmdichten spielen.

Durch den regelmäßigen Pflugeinsatz steigt das Gesamtporenvolumen im Marktfrucht- und viehhaltenden Betrieb in der Krume im Vergleich zum optimierten Klimabetrieb, der mit nur minimaler Eingriffsintensität bewirtschaftet wird, an. Im optimierten Klimabetrieb nimmt das Gesamtporenvolumen leicht ab. Innerhalb des Porenvolumens verschieben sich die Anteile der Feinporen zugunsten der für die Durchlüftung wichtigen weiten Grobporen, so dass sich während der Projektlaufzeit die Situation trotz des niedrigen Gesamtporenvolumens über alle Bodentiefen verbessert hat.

Der Bodenart Ton entsprechend ist die Feldkapazität (FK) in allen Bodenhorizonten relativ hoch, dabei ist die nutzbare Feldkapazität (nFK), das pflanzenverfügbare Wasser aber niedrig. Durch die Bewirtschaftung können nur geringe Einflüsse erwartet werden.

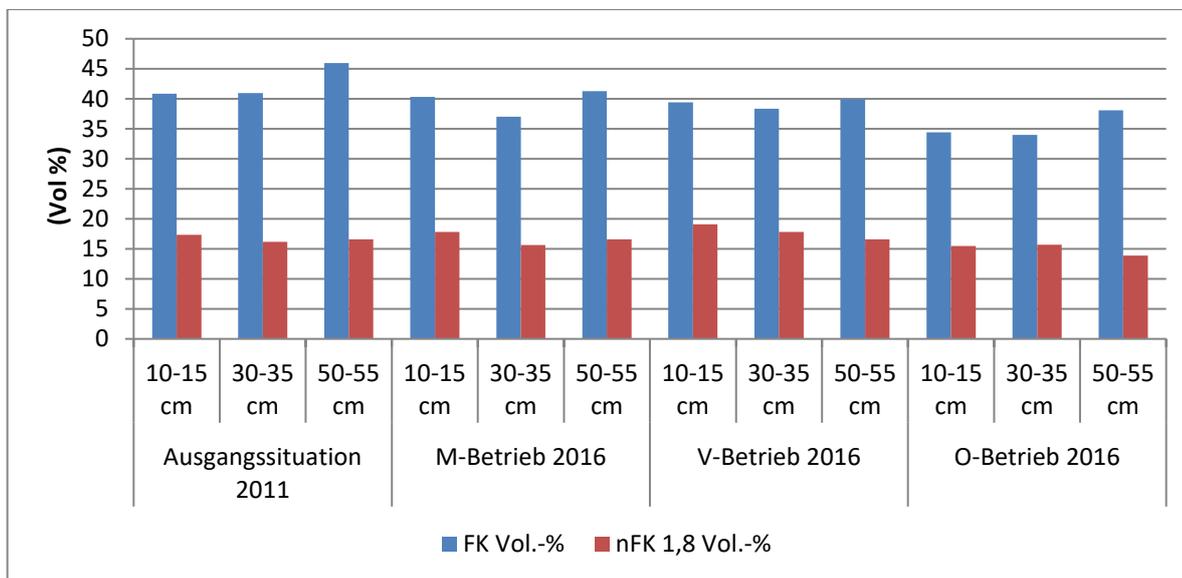


Abbildung 110: Feldkapazität (FK) und die nutzbaren Wasservorräte (nFK) im Boden zu Projektbeginn und (April 2012) zu Projektende (März 2016) in Braunschweig

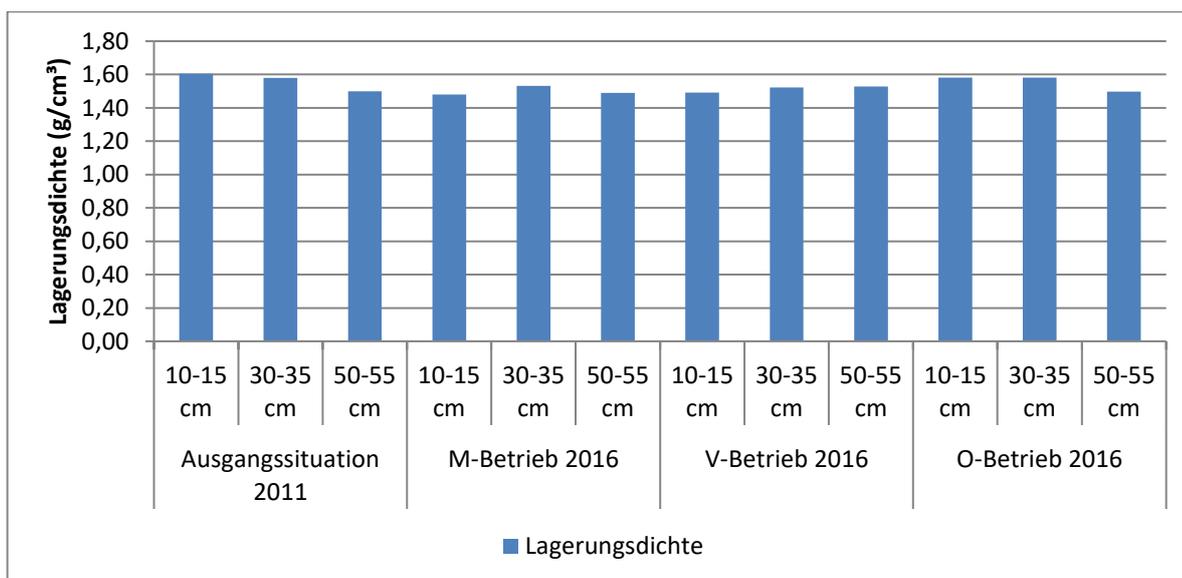


Abbildung 111: Lagerungsdichte des Bodens in der Ausgangssituation (April 2012) sowie die zu Projektende (März 2016) in Braunschweig

Die relativ hohen Lagerungsdichten in der Krume und der Krumenbasis haben während der Projektlaufzeit im Marktfrucht- und viehhaltenden Betrieb abgenommen. Dagegen sind sie im Untergrund sowie im optimierten Klimabetrieb in allen Bodenhorizonten annähernd gleich geblieben.

Auf dem Standort Soest wurde die Ausgangssituation auf dem Schlag mit dem Marktfrucht- und viehhaltenden Betrieb und dem Schlag des optimierten Klimabetriebes an je drei Profilgruben erhoben. Zum Projektende wurden auf jedem Modellbetrieb drei Profilgruben beprobt (HORSTHEMKE 2016).

Gegenüber der Ausgangssituation hat während der Projektlaufzeit im Marktfruchtbetrieb der Anteil der engen und weiten Grobporen zugunsten der Mittelporen in der Krume und an der Krumbasis abgenommen, im Unterboden ist keine Veränderung erkennbar.

Im viehhaltenden Betrieb ist eine Veränderung nur im Bereich der Krumbasis feststellbar. Hier nimmt der Anteil der Grobporen zugunsten der Mittelporen ab. In der Krume sowie im Unterboden sind keine Veränderungen erkennbar.

Auch im optimierten Klimabetrieb sind nur an der Krumbasis Veränderungen erkennbar. Das Gesamtporenvolumen nimmt leicht zu, dabei steigt der Anteil der weiten Grobporen und der Mittelporen.

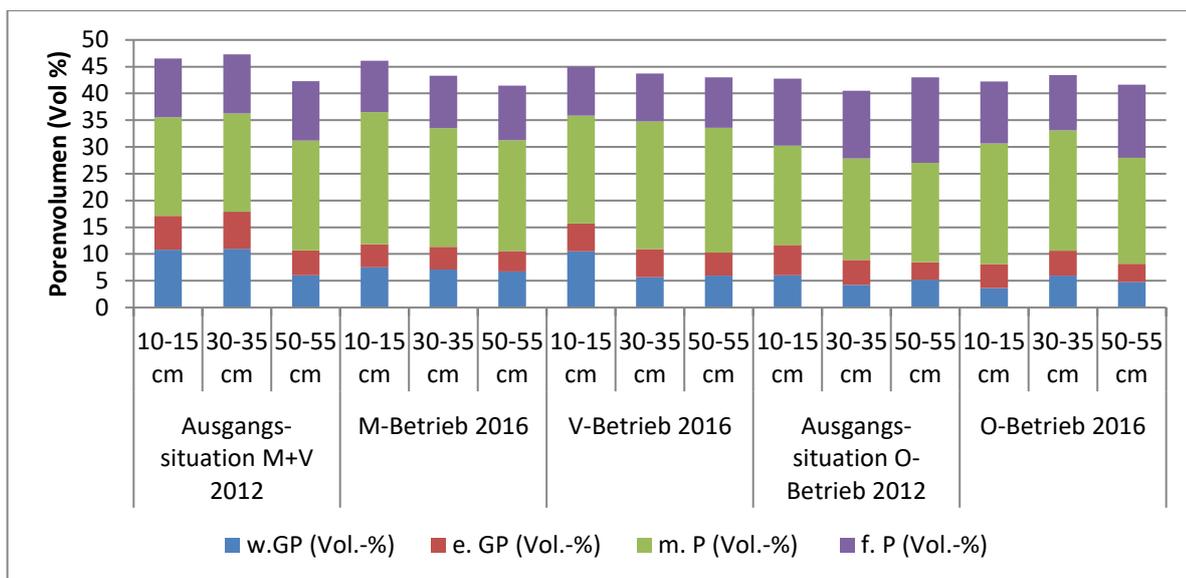


Abbildung 112: Gesamtporenvolumen sowie die Porenverteilung in der Ausgangssituation (Januar 2012) und zu Projektende (März 2016) in Soest

Die Feldkapazität bleibt erwartungsgemäß nahezu unverändert. Die nutzbare Feldkapazität nimmt beim Marktfruchtbetrieb in Krume und Krumbasis und im viehhaltenden Betrieb in der Krumbasis sowie im Unterboden leicht zu. Beim optimierten Klimabetrieb ist diese Zunahme etwas größer, das kann Vorteile während längerer Trockenphasen haben (HORSTHEMKE 2016).

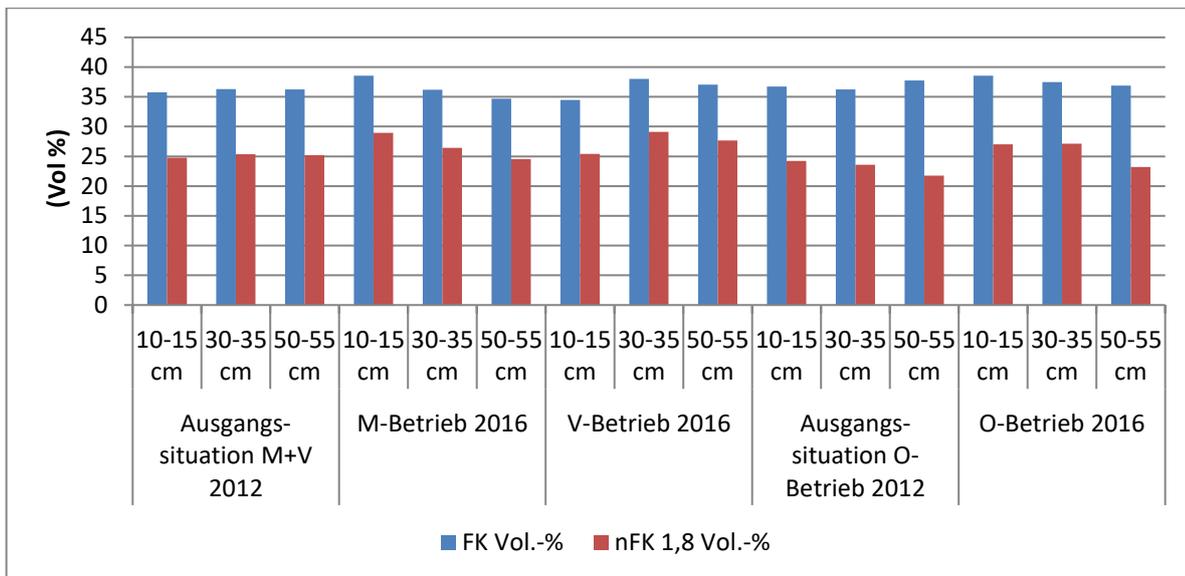


Abbildung 113: Feldkapazität (FK) und die nutzbaren Wasservorräte (nFK) im Boden in der Ausgangssituation (Januar 2012) und zu Projektende (März 2016) in Soest

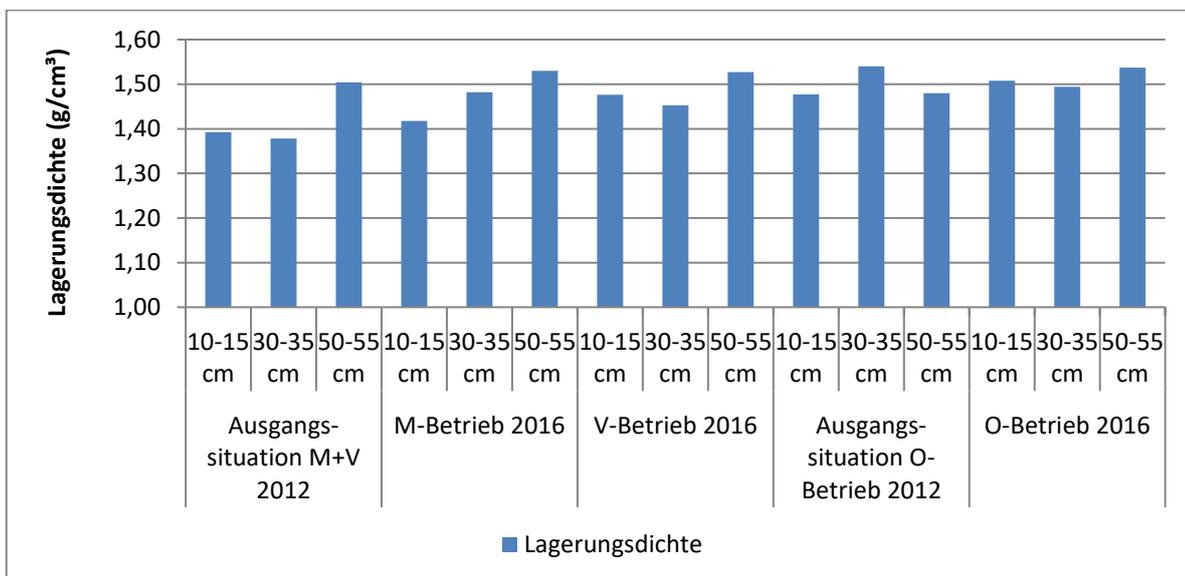


Abbildung 114: Lagerungsdichte des Bodens sowie die Porenverteilung in der Ausgangssituation (Januar 2012) und zu Projektende (März 2016) in Soest

Zu Projektbeginn sind die Lagerungsdichten in der Krume und Krumbasis im Marktfrucht- und viehhaltenden Betrieb infolge der Pflugarbeit im Spätherbst 2011 relativ niedrig. Während der Projektlaufzeit nehmen sie durch Setzungsprozesse vor allem an der Krumbasis leicht auf normale Werte zu. Die Lagerungsdichten im Unterboden verändern sich nicht.

Im optimierten Klimabetrieb nimmt die Lagerungsdichte an der Krumbasis leicht ab und im Unterboden leicht zu.

Penetrometermessungen

Die erhobenen Penetrometer-Ergebnisse aus den drei Betriebsmodellen stellen eine ergänzende Bewertungsmethode dar. Aus der Literatur sind unterschiedliche Angaben bekannt, ab welchem Eindringwiderstand in Megapascal (MPa) pro cm^2 von einer Bodenschadverdichtung ausgegangen werden kann. Die Penetrometermessungen sind von mehreren Einflussgrößen (z. B. Bodenart, Bodenfeuchte, oder der Größe und Ausformung der Sondenspitze) abhängig, so dass keine Grenzen für die Schädigung von Bodenfunktionen festgelegt werden können und so die Ergebnisse im Zusammenhang mit den anderen bodenphysikalischen Parametern interpretiert werden müssen. Dennoch kann im vorliegenden Fall davon ausgegangen werden, dass bei einem Eindringwiderstand von $> 2 \text{ MPa/cm}^2$ die Bedingungen für ein optimales Pflanzenwachstum leicht und bei $> 3 \text{ MPa/cm}^2$ stärker beeinträchtigt sein können. Letztendlich entscheidet der aktuelle Austrocknungsgrad über das Wurzelwachstum und die Ertragsentwicklung. D.h. übersteigen bei einer FK von 80-100 % die Eindringwiderstände $> 2,5 \text{ MPa/cm}^2$ kann es zu einer Gefährdung von Bodenfunktionen kommen - dies ist allerdings mit weiteren bodenphysikalischen Parametern zu belegen (WEYER & BOEDDINGHAUS 2010, LINTEL-HÖPING et al. 2012). In Soest wurden die Daten im Rahmen einer Masterarbeit ausgewertet (HORSTHEMKE 2016). Die in Soest gemessenen Eindringwiderstände der Böden werden als Mittelwerte der Betriebssysteme von 0- 80 cm dargestellt.

Bei der Analyse der mittleren Eindringwiderstände von 0 - 80 cm Tiefe der Betriebsmodelle im Jahr 2011 zeigen sich zwischen den Anbausystemen deutliche Unterschiede. Bei der Interpretation der Kurvenverläufe ist zu beachten, dass -wie bereits erwähnt- der optimierte Klimabetrieb auf einer Versuchsfläche abgebildet ist, die sich bezüglich des Bodentyps von der Versuchsfläche der anderen beiden Betriebe etwas unterscheidet. Dies kann neben der Bodenbearbeitungsintensität einen Einfluss auf die Eindringwiderstände mit sich bringen. Die Grafik auf der nächsten Seite zeigt die mittleren Eindringwiderstände der drei Betriebsmodelle im Jahr 2011(LINTEL-HÖPING et al. 2012).

Im Jahr 2011 weist keiner der drei Betriebe in Soest Eindringwiderstände auf, die über dem für eine Bodenschadverdichtung angenommen Orientierungswert von $2,5 \text{ MPa/cm}^2$ liegen. Beim M- und V- Betrieb ist auffällig, dass die Eindringwiderstände im Bereich von 26 bis ca. 40 cm deutlich auf bis zu - in der Spitze- $2,35 \text{ MPa/cm}^2$ zunehmen. In den danach folgenden Tiefen sinken die Eindringwiderstände wieder ab und steigen im Unterboden (70 – 80 cm) wieder an. Beim klimaoptimierten Betrieb steigen die mittleren Eindringwiderstände im Tiefenbereich 10 - 29 cm auf über 2 MPa/cm^2 an, fallen im Bereich von 30 - 43 cm wieder ab, um von 43 - 80 cm nahezu kontinuierlich anzusteigen (LINTEL-HÖPING et al. 2012).

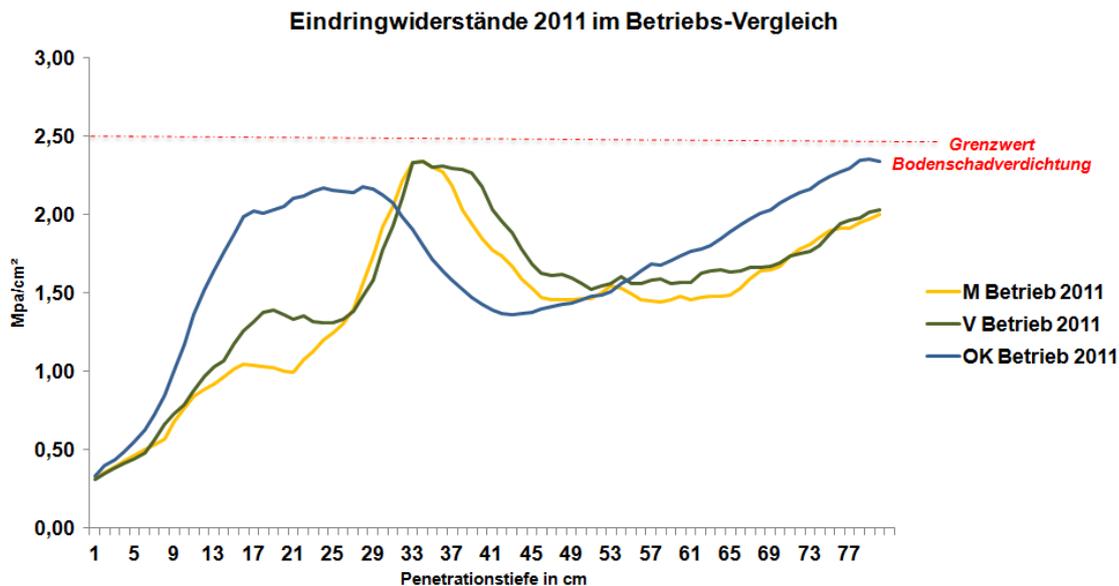


Abbildung 115: Mittlere Eindringwiderstände der drei Betriebsmodelle im Jahr 2011 in 0 - 80 cm Tiefe in Soest (verändert nach LINTEL-HÖPING et al. 2012)

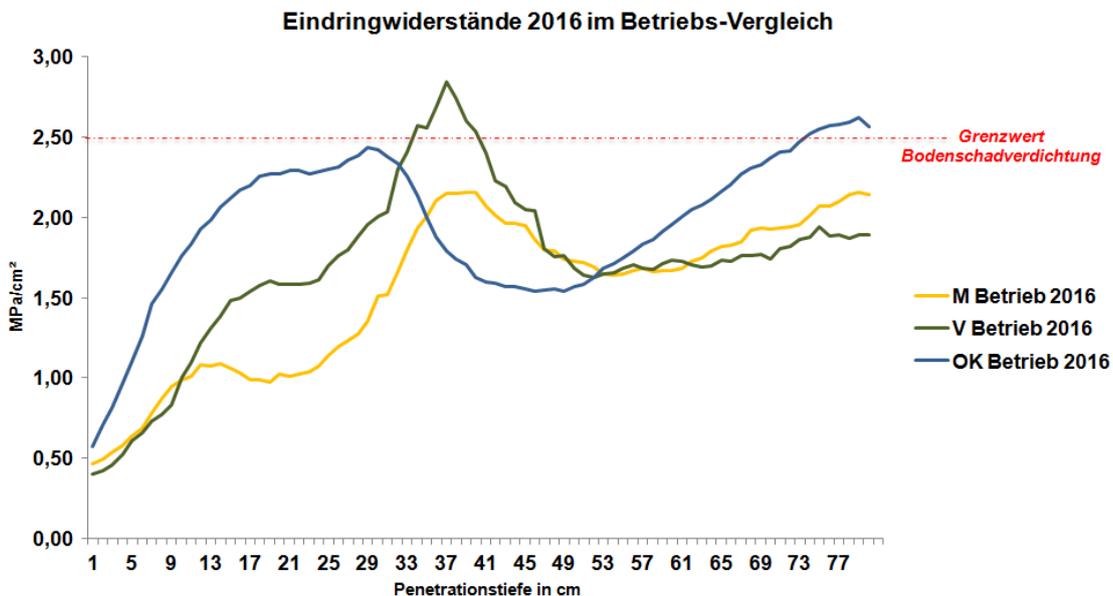


Abbildung 116: Mittlere Eindringwiderstände der drei Betriebsmodelle im Jahr 2016 in 0 - 80 cm Tiefe in Soest (HORSTHEMKE 2016)

Vier Jahre später - im Jahr 2016 - haben sich die mittleren Eindringwiderstände im Vergleich zu 2011 teils deutlich verändert. Innerhalb des Marktfrucht-Betriebes zeigen sich im Tiefenbereich von 36 – 40 cm mit 2,1 MPa/cm² die höchsten Eindringwiderstände, aber im Vergleich zu 2011 auf einem geringeren Niveau. Die Böden des Veredelungsbetriebes zeigen vier Jahre nach den Untersuchungen von 2011 im Tiefenbereich von 31 – 37 cm eine deutliche Zunahme der Eindringwiderstände von in der Spitze deutlich über 2,5 MPa/cm² (Tiefe 37 cm). Dieser Anstieg ist auch im Vergleich zur Abnahme im Marktfruchtbetrieb nicht erklärbar, da im Marktfruchtbetrieb häufiger und zu ähnlichen Terminen gepflügt wurde.

Im klimaoptimierten Betrieb ist der „Grundverlauf“ der Eindringwiderstandskurve in etwa gleich geblieben, allerdings auf einem höheren Niveau. Das bedeutet, die Widerstände haben in den Tiefen von 0 – 80 cm im Vierjahreszeitraum zugenommen. Dabei steigt der Eindringwiderstand in 70 – 80 cm mit $2,63 \text{ MPa/cm}^2$ über die Grenze einer Bodenschadverdichtung an, dieser Befund ist systemunabhängig, da die Bodenbearbeitung nur mit minimaler Eingriffsintensität erfolgte. Zusätzlich sollte beachtet werden, dass sich in diesem Tiefenbereich der Sw2- Horizont befindet, der eine beginnende natürliche Dichtlagerung des Bodens mit Übergang zu einem Sd-Horizont aufweisen könnte (HORSTHEMKE 2016).

Die Parzellen weisen in Braunschweig zu Projektbeginn teilweise sehr stark schwankende Eindringwiderstände auf, deshalb wird auf eine Mittelwertbildung über die Betriebssysteme verzichtet. Auf einigen Parzellen überschreiten die Eindringwiderstände in 50-70 cm Tiefe den kritischen Wert von 3 MPa/cm^2 . Inwieweit hier der Untergrund für die Messung noch nicht ausreichend durchfeuchtet ist, wurde leider nicht dokumentiert. Von Oktober bis zur Messung im Februar fielen insgesamt ca. 214 mm/m^2 Niederschlag.

Zu Projektende waren die Böden nach ergebnigen Niederschlägen (350 mm/m^2) im Herbst und Winter 2015/16 ausreichend durchfeuchtet und die Eindringwiderstände überschreiten auf keiner Parzelle im Mittel den Wert von 2 MPa/cm^2 . Betriebssystembedingte Effekte sind nicht erkennbar. Ertragsbeeinflussende Bodenverdichtungen können ausgeschlossen werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse beider Standorte, dass die Ergebnisse der Penetrometermessungen von vielen, vor allem über längere Zeiträume, nicht konstant zu haltenden Faktoren abhängig sind und deshalb nicht als Absolutwerte sondern nur als Relativwerte im Zusammenhang mit anderen Untersuchungsergebnissen interpretiert werden sollten.

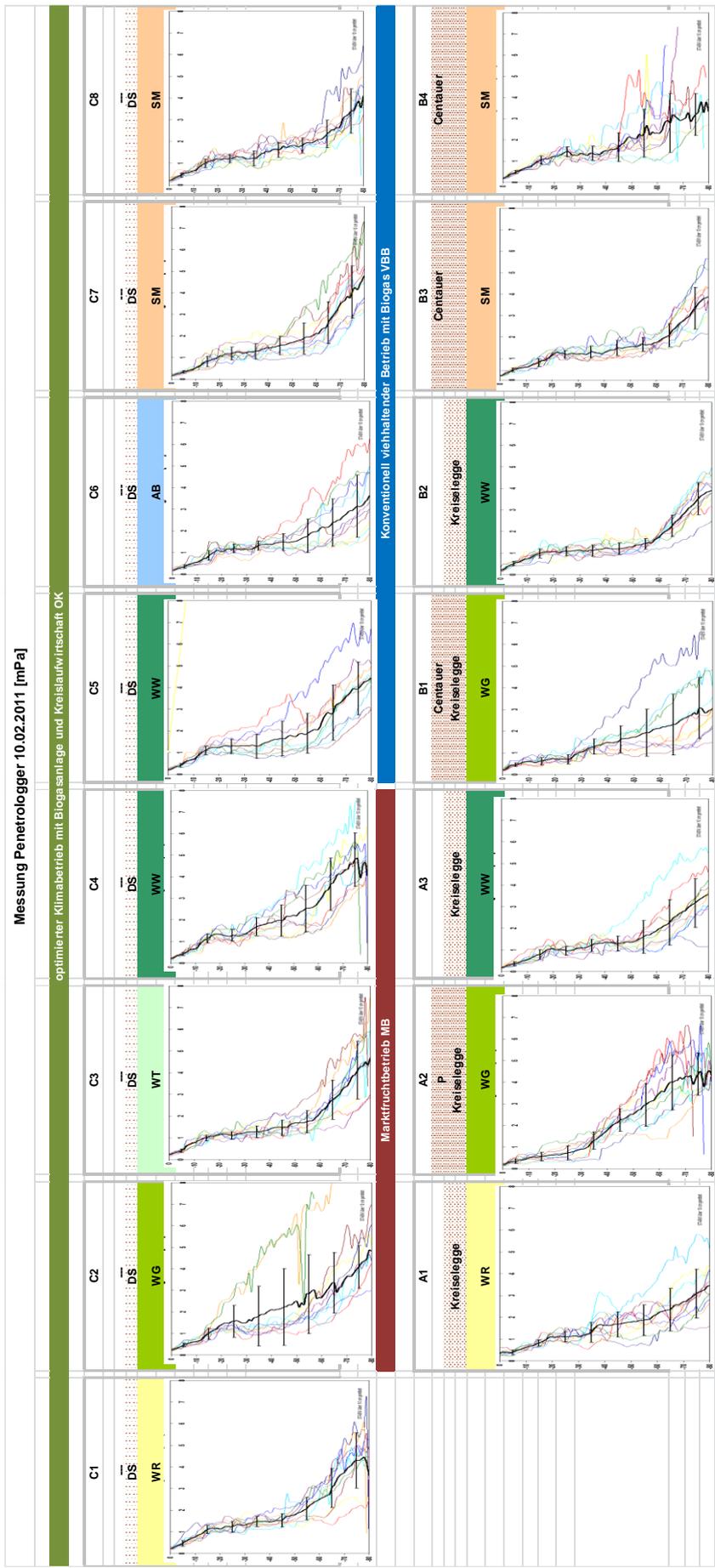


Abbildung 117: Eindringwiderstände auf den Parzellen der Modellbetriebe in Braunschweig zu Projektbeginn 2011

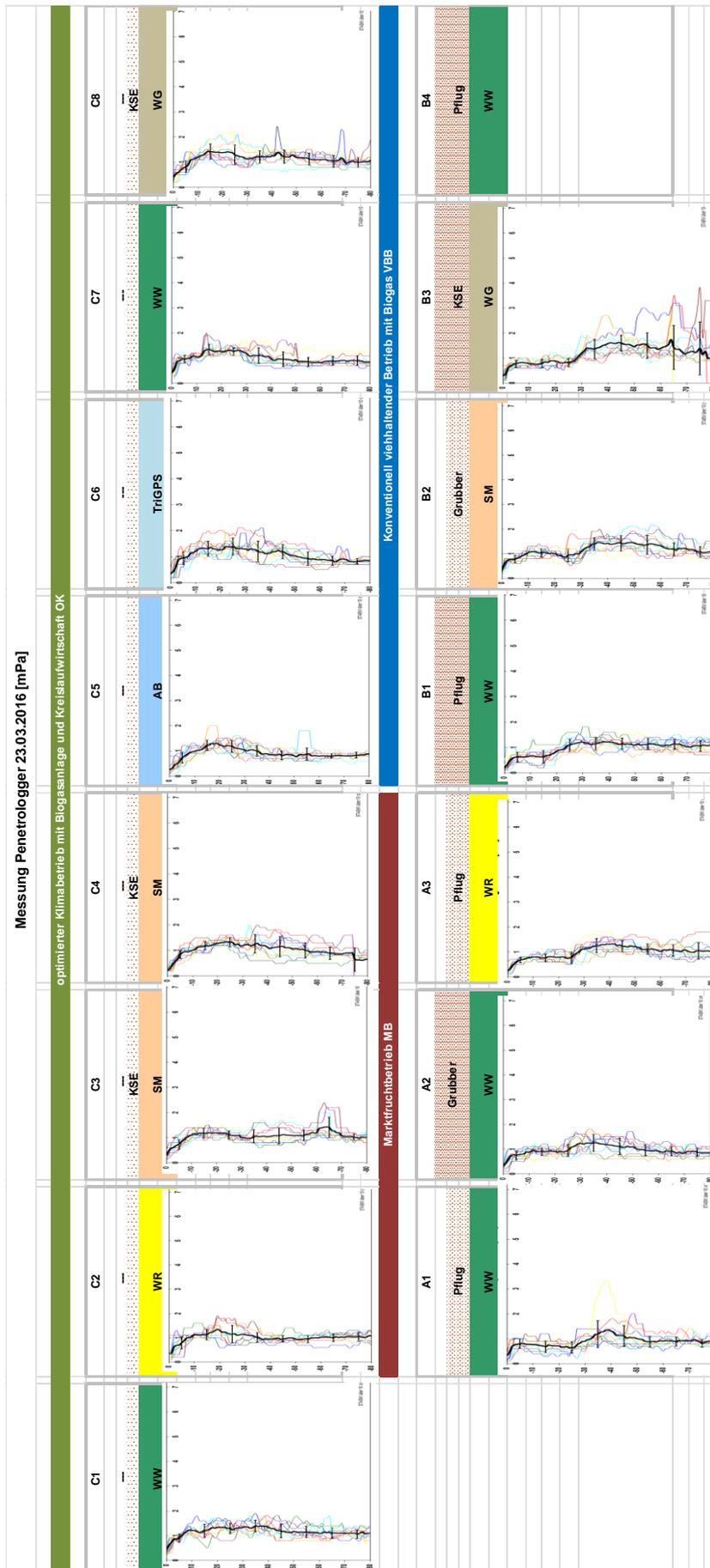


Abbildung 118: Eindringwiderstände auf den Parzellen der Modellbetriebe in Braunschweig zu Projektende (2016)

Bodenbiologischen Begleituntersuchungen

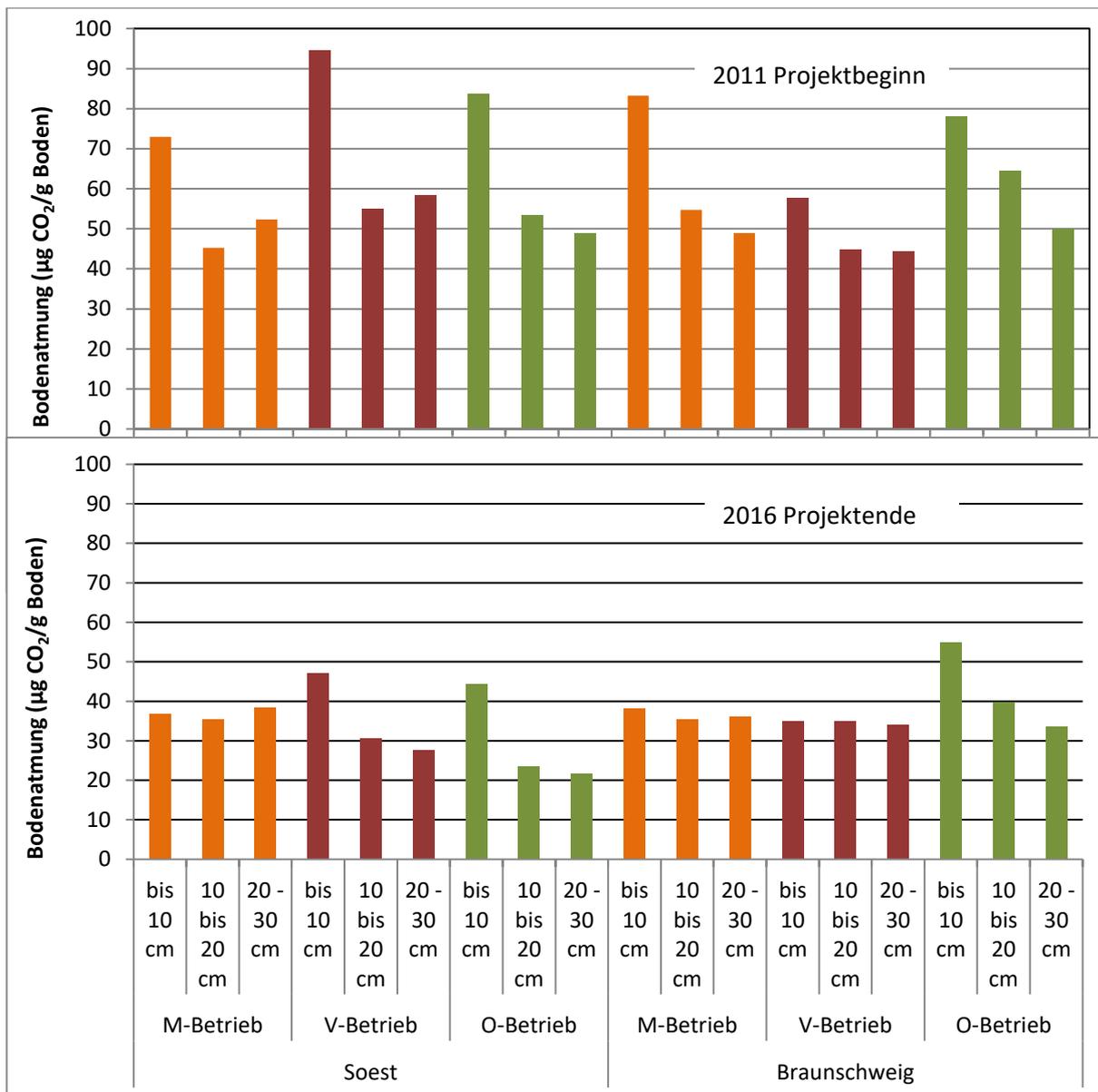


Abbildung 119: Basalrespiration an gestörten Bodenproben der Parzellen der Modellbetriebe Soest und in Braunschweig zu Projektbeginn und -ende

Die Basalrespiration ist die Atmung bzw. CO₂-Freisetzung einer "gestörten" (d.h. im Labor und nicht im Freiland gemessenen) und gesiebten Bodenprobe ohne Zusatz von Kohlenstoff- oder Nährstoffquellen (Einheit: µg CO₂ * g⁻¹ Boden * h⁻¹). Die Basalrespiration ist ein Maß für die respiratorische Aktivität von Bodenmikroben und ist von den im Boden zur Verfügung stehenden Energiequellen abhängig. Sie gibt einen Hinweis auf die tatsächliche CO₂-Bildung eines Bodens.

Die Basalrespiration im Jahr 2011 zeigt deutlich die Effekte der mehrjährigen pfluglosen Bewirtschaftung auf beiden Standorten vor Beginn des Projektes. Alle Flächen wurden pfluglos bewirtschaftet, die Erntesterne als Nahrungsquelle der Bodenorganismen wurden vornehmlich in der Oberkrume eingearbeitet. Deshalb weisen alle Modellbetriebe trotz des im Marktfrucht- bzw. Viehhaltenden Betrieb im Herbst 2010 teilweise erfolgten

Pflugeinsatzes in der Oberkrume im Vergleich zur mittleren bzw. tieferen Krumenbereich noch deutlich höhere CO₂-Freisetzungsraten auf.

Die gleiche Abstufung der Bodenatmung weist der optimierte Klimabetrieb auch am Projektende auf. Durch den langjährigen Pflugverzicht und die größtmögliche Reduktion der Eingriffsintensität mit sehr flacher Einarbeitung der Erntereste sinkt die Basalatmung im mittleren und unteren Krumenbereich auf nur noch 30-50 % der Bodenatmung in der Oberkrume.

Zu Projektende sind auf beiden Standorten im Marktfruchtbetrieb und auch im Braunschweiger V-Betrieb aufgrund des regelmäßigen Pflugeinsatzes und somit der gleichmäßigen Einmischung der Erntereste in den gesamten Krumenbereich die Basalatmung über die Tiefenstufen annähernd gleich. Im Soester V-Betrieb wurde nach der Ernte 2015 bis zur Probenahme im April 2016 der Pflug nicht eingesetzt, deshalb zeigt sich hier wieder die bekannte Abstufung zwischen den Krumenschichten.

Der Unterschied in der Höhe der Bodenatmung zwischen Projektbeginn und Projektende muss mit Jahres- bzw. Jahreszeiteffekten erklärt werden.

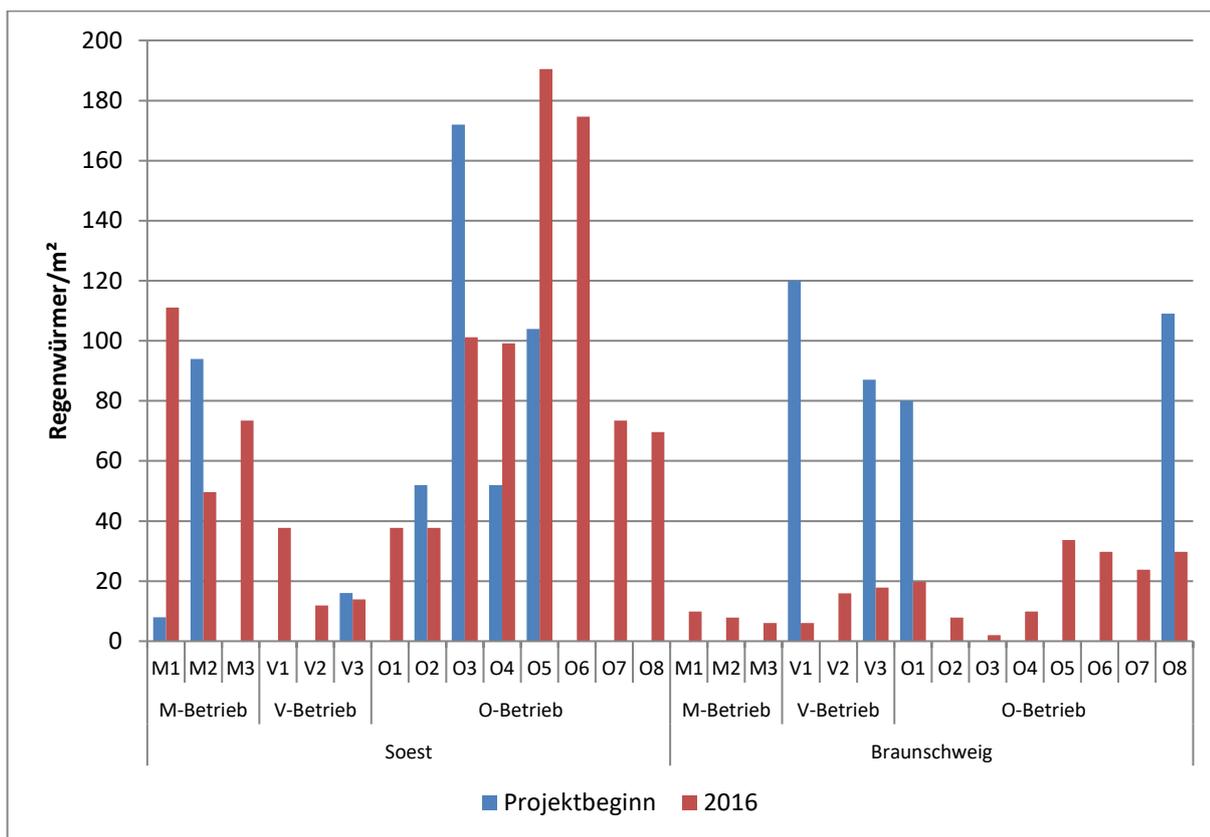


Abbildung 120: Regenwurmabundanzen der Parzellen der Modellbetriebe Soest und in Braunschweig zu Projektbeginn und -ende 2016

In Soest wurden im September/Oktober 2012 im Rahmen einer Masterarbeit (SCHUMACHER 2011) die Regenwurmabundanzen an ausgewählten Parzellen erhoben. Im März April 2016 wurde die Regenwurmdichte an allen Parzellen (KÖLLER und ERDMANN 2016) ermittelt. Die Zahl der Regenwürmer weist

zu beiden Terminen eine sehr große Streuung um die Mittelwerte auf. Während der Projektlaufzeit ist die Zahl der Regenwürmer im Marktfruchtbetrieb von 51 auf 78 Regenwürmer je m² gestiegen, im Viehhaltender Betrieb steigt sie von nur 8 auf 21 Regenwürmer je m², während die Zahl der Regenwürmer im Optimierten Klimabetrieb auf hohem Niveau größenordnungsmäßig gleich geblieben (95-98 Regenwürmer/m²) ist.

In Braunschweig werden im Herbst 2010 bei exemplarischen Untersuchungen Regenwurmdichten zwischen 80 und 120 Exemplaren /m² ermittelt. Ende April 2016 können nur noch sehr wenige Regenwürmer mit der Oktettmethode (THIELEMANN 1986) ausgetrieben werden. Die Ursache könnte sowohl in der bereits sehr weitgehenden Austrocknung des Oberbodens und den extrem hohen Temperaturen während der Messung als auch der unmittelbar vor der Messung durchgeführten Bodenbearbeitung zu Mais zu finden sein. Zeitgleich zu den Messungen zur Erhebung der Regenwurmpopulation wurden die Maisflächen bestellt.



Abbildung 121: Regenwurmbesiedlung einer Maisflächen In Braunschweig April 2016

Bei der Bodenbearbeitung durch die Kurzscheibenegge konnten sehr viel mehr Regenwürmer an der Bodenoberfläche beobachtet werden als wenig später beim Fang mit der Oktett-Methode. In einem Klumpen Erde haben sich im Mittel vier Regenwürmer (rot eingekreist) aufgehalten. Es ist davon auszugehen, dass der Stromfluss durch die frische Bearbeitung mit der Kurzscheibenegge nicht seine volle Wirkung entfalten konnte, zusätzlich konnten sich die Regenwürmer im lockeren Oberboden gut verbergen. Die Daten der Frühjahrserhebung 2016 in Braunschweig müssen daher verworfen werden (KÖLLER und ERDMANN 2016).

Bodenchemische Begleituntersuchungen

In Soest nehmen die Phosphorgehalte im Boden im Marktfruchtbetrieb während der Projektlaufzeit tendenziell leicht ab, sie bleiben unabhängig von der Krumentiefe im Bereich der Versorgungsstufe C (Abbildung 122). Im V-Betrieb bleiben die Phosphorgehalte auf zwei der drei Schläge in der Versorgungsstufe C-D gleich, auf einem steigt der P-Vorrat deutlich an und liegt im Bereich der Versorgungsstufe D. Im optimierten Klimabetrieb liegen die P-Gehalte 2011 mehrheitlich im Bereich der Versorgungsstufe C, gelegentlich in den unteren Krumenbereichen befinden sie sich in Stufe B. Während der Projektlaufzeit nehmen auf allen Schlägen und Krumentiefen die P-Gehalte ab und liegen 2016 in der Oberkrume im Bereich der Versorgungsstufe C, in den unteren Krumenbereichen fast überall im Bereich der Versorgungsstufe B.

Die Kaliumgehalte gehen im Marktfruchtbetrieb leicht zurück, bleiben aber im Mittel der Krumentiefen gerade noch knapp im Bereich der Versorgungsstufe C. Im Viehhaltender Betrieb nehmen sie ebenfalls im Mittel ab bleiben aber aufgrund des höheren Ausgangswertes überall sicher in der Versorgungsstufe C. Im optimierten Klimabetrieb bleiben die Kaligehalte in der Oberkrume nahezu unverändert bzw. leicht steigend im Bereich der Versorgungsstufe C-D. Aufgrund der fehlenden Bodenbearbeitung nimmt der K-Gehalt in der mittleren bis tiefen Krume mehr oder weniger deutlich ab und liegt mehrheitlich im Bereich der Versorgungsstufe B.

Der Magnesiumgehalt bleibt in allen Modellbetrieben und Krumentiefen überwiegend unverändert im Bereich der Versorgungsstufe B-C. Die Veränderungen liegen im Bereich von ± 1 mg/100 g Boden. Im Optimierten Klimabetrieb kommen in der Oberkrume regelmäßig Erhöhungen vor.

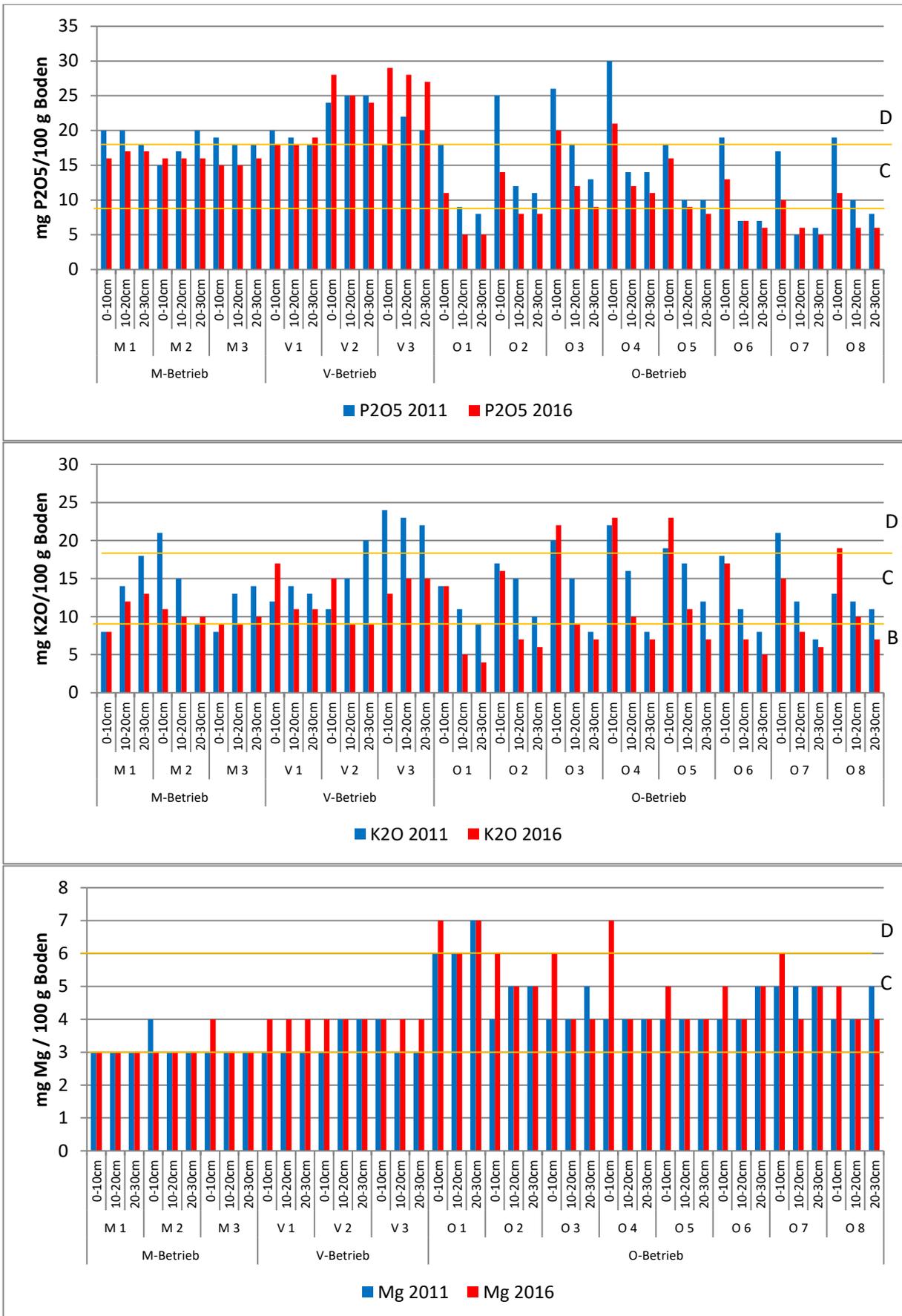


Abbildung 122: Veränderung der Grundnährstoffgehalte (P-K-Mg) im Boden während der Projektlaufzeit in Soest (B, C, D = Versorgungsstufen)

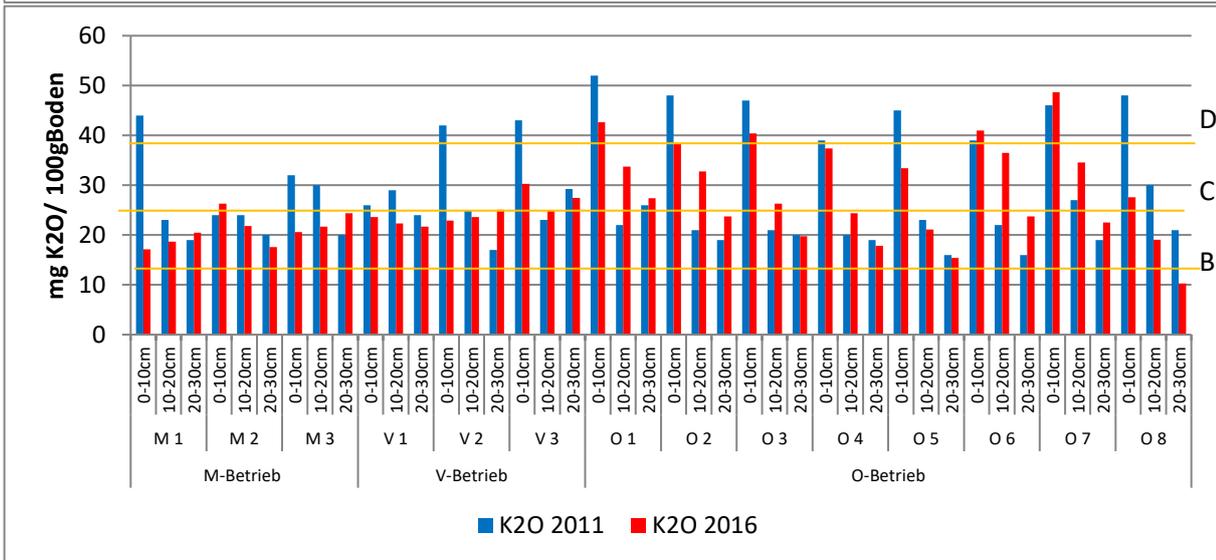
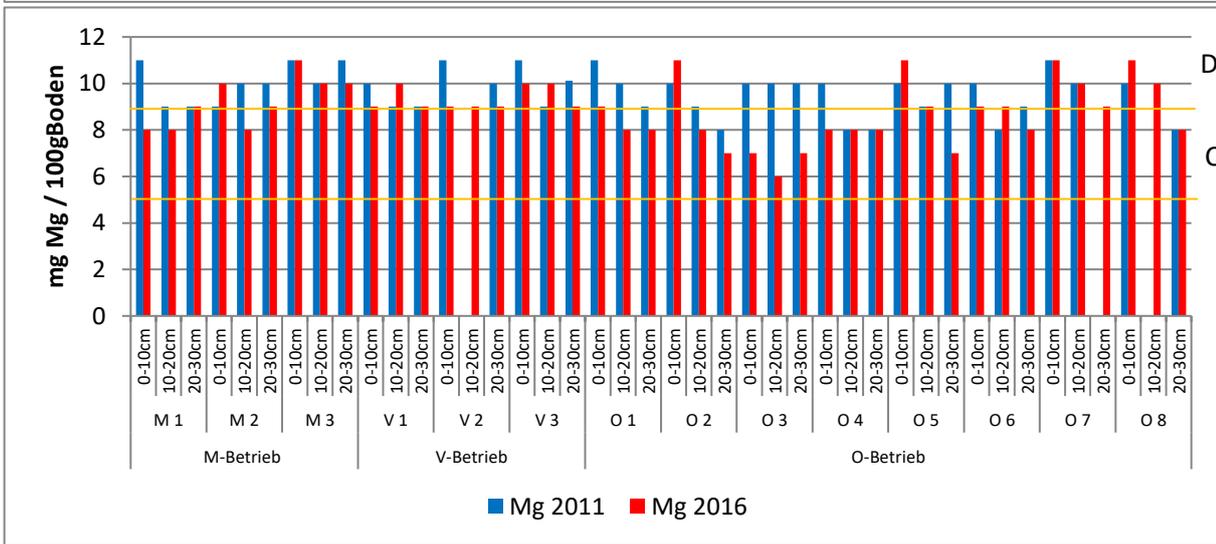
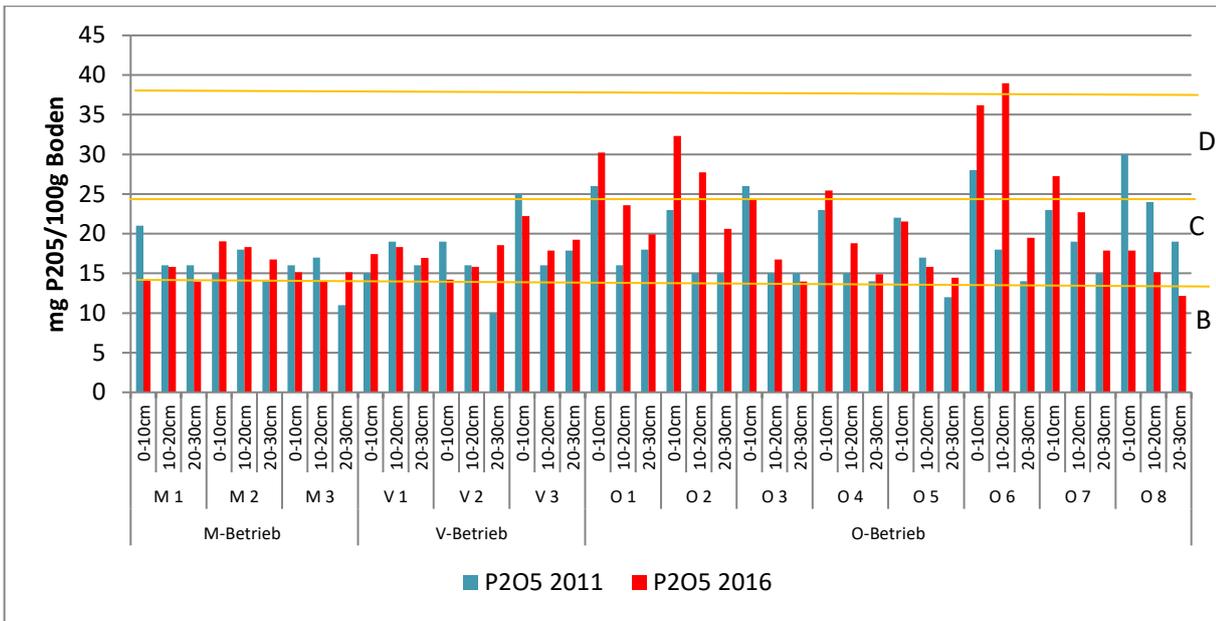


Abbildung 123: Veränderung der Grundnährstoffgehalte (P-K-Mg) im Boden während der Projektlaufzeit in Braunschweig (B, C, D = Versorgungsstufen)

In Braunschweig bleiben die Phosphorgehalte im Boden des Marktfrucht- und des Veredelungsbetriebes während der Projektlaufzeit nahezu unverändert im Bereich der Versorgungsstufe C. Die Zunahmen in den tieferen Krumschichten sowie die Abnahmen im oberen Krumbereich können durch den Pflugeinsatz erklärt werden, da die Fläche vor Projektbeginn mehrjährig pfluglos bewirtschaftet wurde.

Auf den Schlägen des optimierten Klimabetriebes sind die P_2O_5 -Gehalte auf der Fläche 1, 2 und 6 in allen Krumbereichen erheblich angestiegen, nur auf der Fläche 8 gehen sie in allen Krumentiefen zurück.

Die Kaligehalte der Schläge des Marktfrucht- und des Veredelungsbetriebes verändern sich während der Projektlaufzeit ähnlich wie die P-Gehalte.

Auf den Schlägen des optimierten Klimabetriebes gehen die K_2O -Gehalte in der Oberkrume mehrheitlich zurück, in der Unterkrume sind die Gehalte kaum verändert. Auf der Fläche 8 gehen die Kaligehalte in allen Bodentiefen zurück.

Unabhängig von den Modellbetrieben sind die Veränderungen der Mg-Gehalte in allen Betriebsformen und Bodentiefen relativ gering. Auf allen Schlägen der Betriebe und Krumentiefen liegen die Mg-Gehalte im Bereich der Versorgungsstufen C-D.

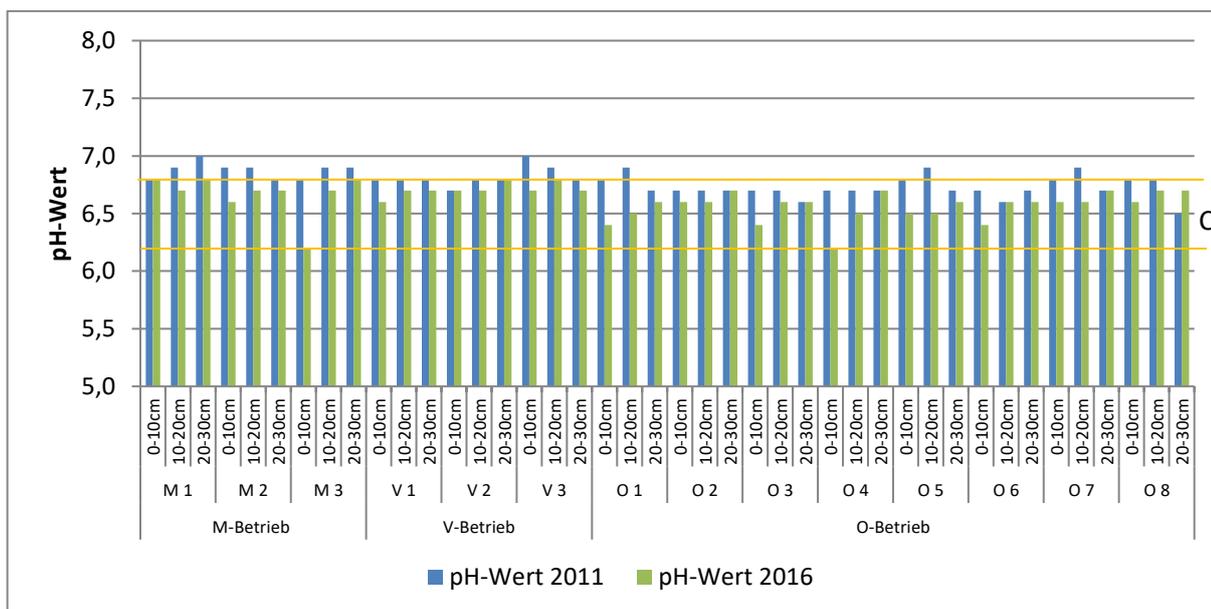


Abbildung 124: Veränderung der pH-Werte im Boden während der Projektlaufzeit in Soest (C = Optimalbereich)

Da während der Projektlaufzeit keine Kalkungsmaßnahmen durchgeführt wurden, haben in Soest die pH-Werte leicht abgenommen. Diese sind in Soest aber noch im optimalen Bereich zwischen pH 6,2 und 6,7. In Braunschweig sind die pH-Werte wenig verändert und liegen im oberen Optimal-Bereich, bzw. leicht darüber. Die 2015 erfolgte Kalkung auf den Schlägen M2 und O3 ist deutlich erkennbar.

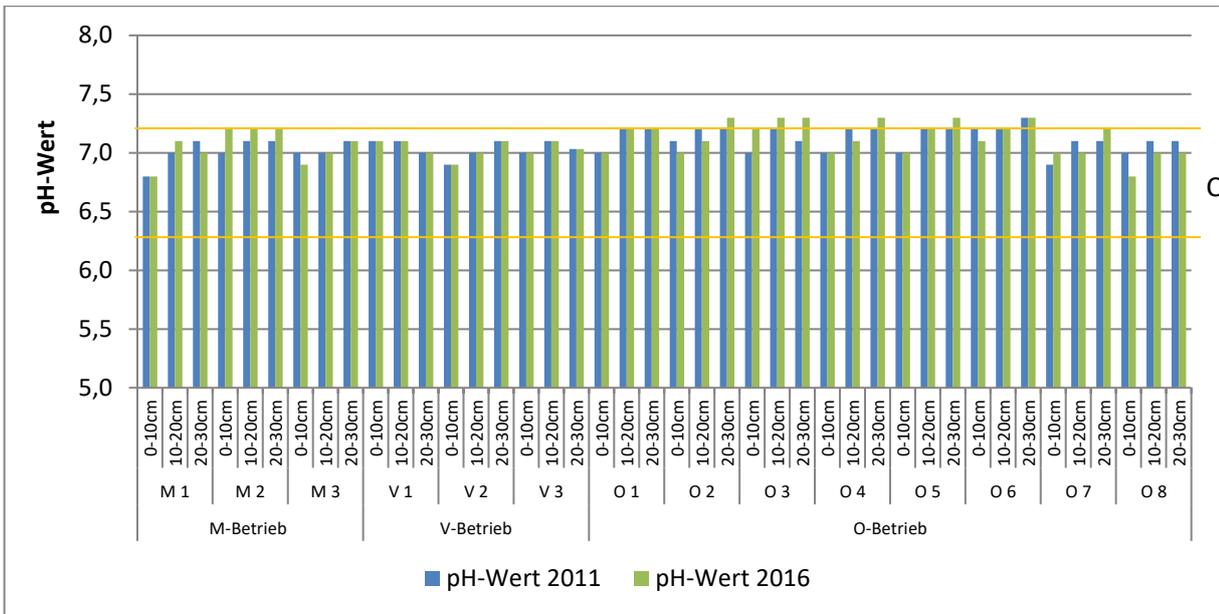


Abbildung 125: Veränderung der pH-Werte im Boden während der Projektlaufzeit in Braunschweig (C = Optimalbereich)

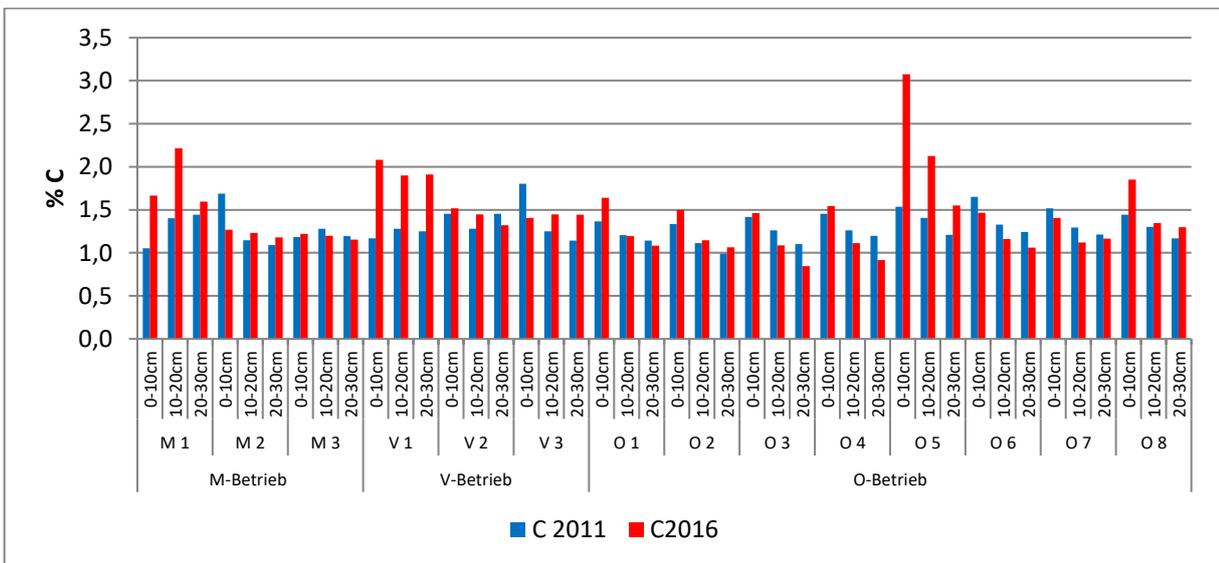


Abbildung 126: Veränderung des C-Gehalts im Boden während der Projektlaufzeit in Soest

Eine stärkere Veränderung der Boden-C-Gehalte ist nicht zu erwarten gewesen. Deshalb fallen in Soest die sehr deutlichen Zunahmen der Humusgehalte in den Schlägen M1, V1 und O5 auf. Diese können derzeit nicht erklärt werden.

Alle anderen Veränderungen können durch den Verbleib der Erntereste und der organischen Dünger erklärt werden. Durch den Pflugeinsatz werden sie tiefer eingemischt (V3) bzw. verbleiben bei Verzicht auf denselben im oberen Krumenbereich (O1, O8).

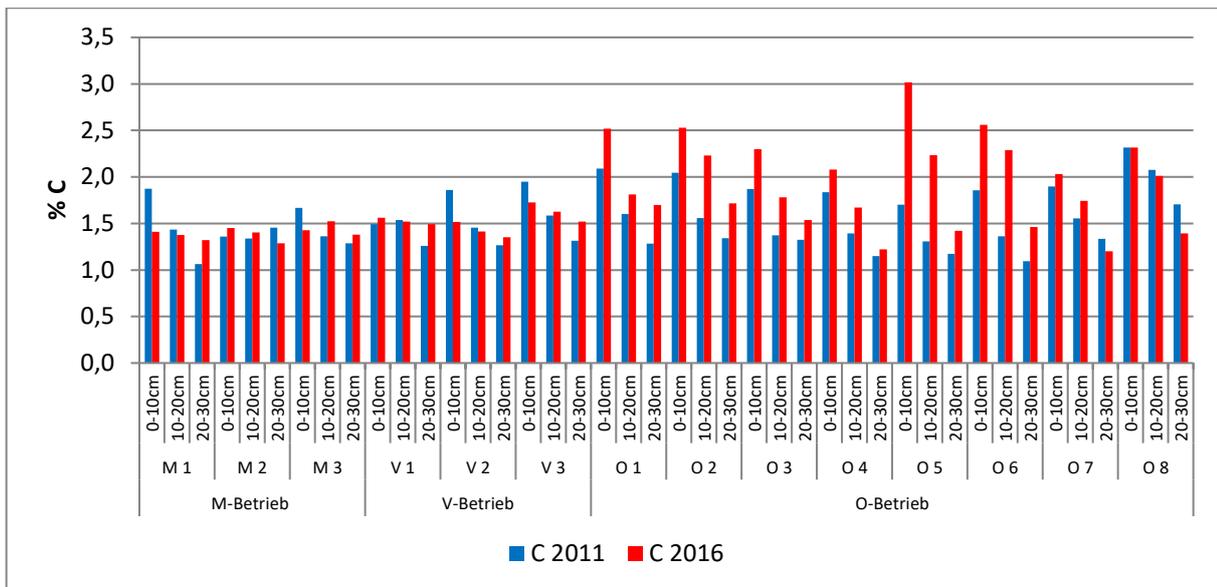


Abbildung 127: Veränderung des C-Gehalts im Boden während der Projektlaufzeit in Braunschweig

In Braunschweig können die Veränderungen im Boden C-Gehalt des Marktfrucht- und des V-Betriebes sehr gut durch den Pflugeinsatz erklärt werden. Die durch die vorherige konservierende Bewirtschaftung im Oberboden erhöhten C-Gehalte wurden in die ganze Krume eingemischt und dadurch wurde der Gehalt in der Unterkrume angehoben, so dass jetzt die Humusgehalte in den verschiedenen Krumentiefen etwa gleich sind.

Im Optimierten Klimabetrieb steigt auf fast allen Schlägen und Krumenschichten der C-Gehalt an, dies ist teilweise erheblich (z.B. O5, O6) und nur dadurch erklärbar, dass noch nicht humifizierte Erntereste in die Proben geraten sind.

Zusammenfassung

Die drei Modellbetriebe unterscheiden sich in den Bewirtschaftungsbereichen Bodenbearbeitung, Fruchtfolge und Düngung deutlich voneinander. Um die Effekte dieser Unterschiede im Zeitverlauf feststellen zu können, sind auf den Schlägen der Modellbetriebe zu Projektbeginn und zu Projektende verschiedene bodenphysikalische, -biologische und -chemische Kennwerte ermittelt worden.

Die Veränderungen in den untersuchten Parametern lassen sich im Wesentlichen auf die Art der Bodenbearbeitung zurückführen. Bei Pflugarbeit sind die untersuchten Krumenschichten annähernd gleich und bei mehrjähriger Mulch- und Direktsaat ist eine deutliche Schichtung je nach Eingriffstiefe erkennbar, ohne dass sich daraus Hinweise auf die Erfordernis einer Anpassung der Düngestrategie bei Phosphor und Kalium ergeben.

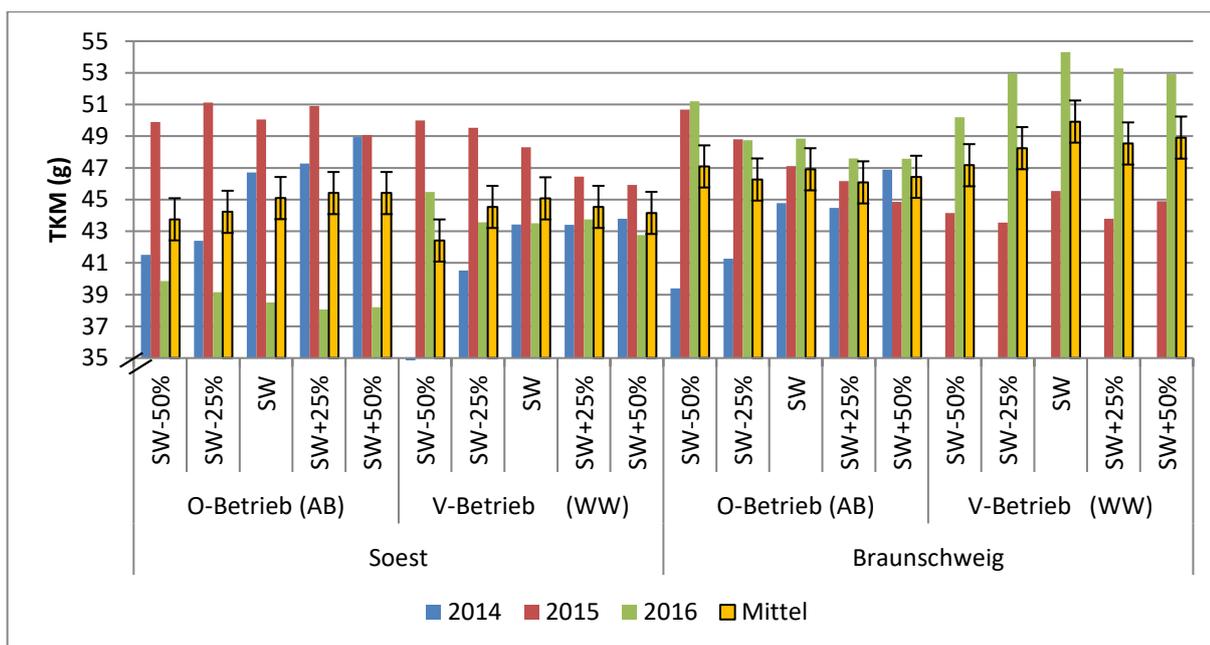


Abbildung 128: Tausendkornmasse (TKM) von Wintergerste in verschiedenen Betriebssystemen (Vorfrucht in ()) an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 -2016. (GD5% O*B*N = 1,33 g (BS,V-B.=1,63 g), GD5% O*B*N

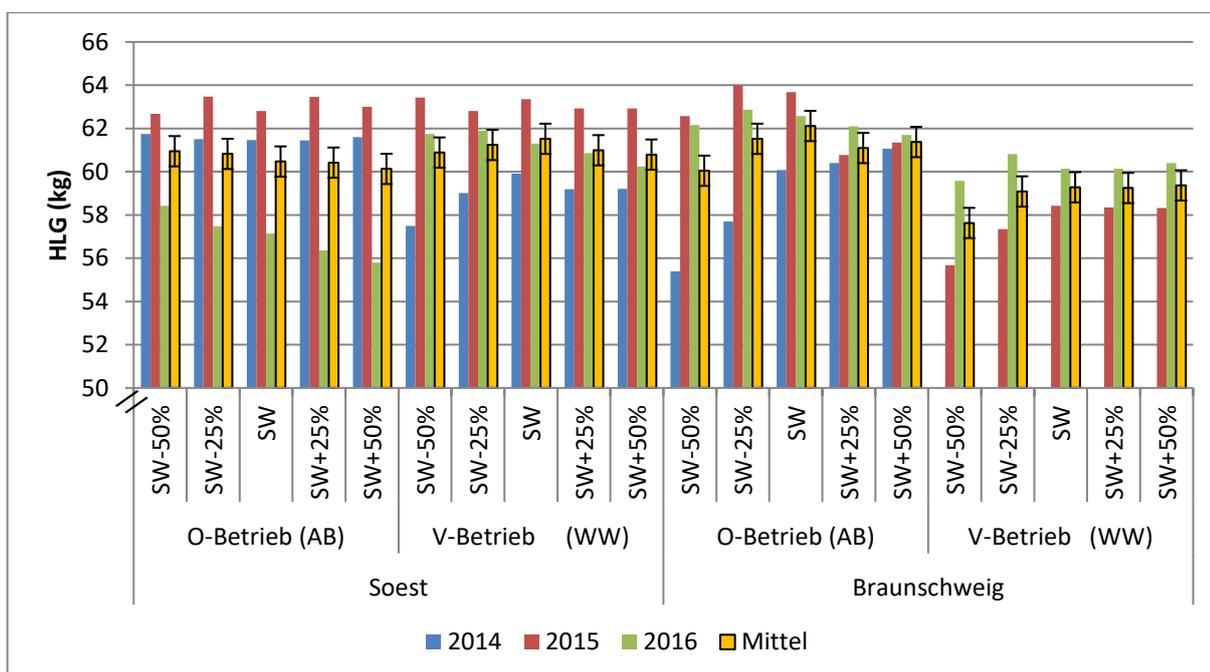


Abbildung 129: Hektolitergewicht (HLG) von Wintergerste in verschiedenen Betriebssystemen an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit von der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 -2016 (GD 5% O*B*N =0,6 kg (BS,V-B.=0,7 kg) , GD 5% O*B*N*J =1,0 kg)

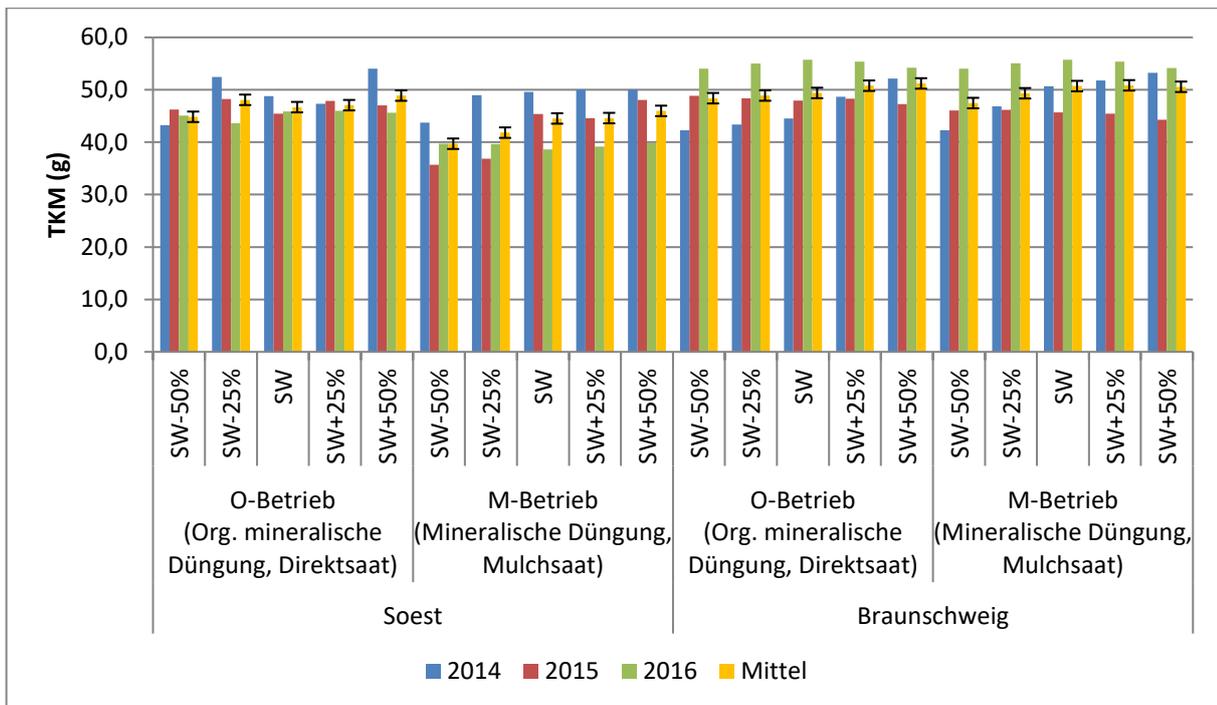


Abbildung 130: Tausendkornmasse (TKM) von Winterweizen an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5% O*B*N = 1,0 g, GD 5% J*O*B*N = 1,7 g)

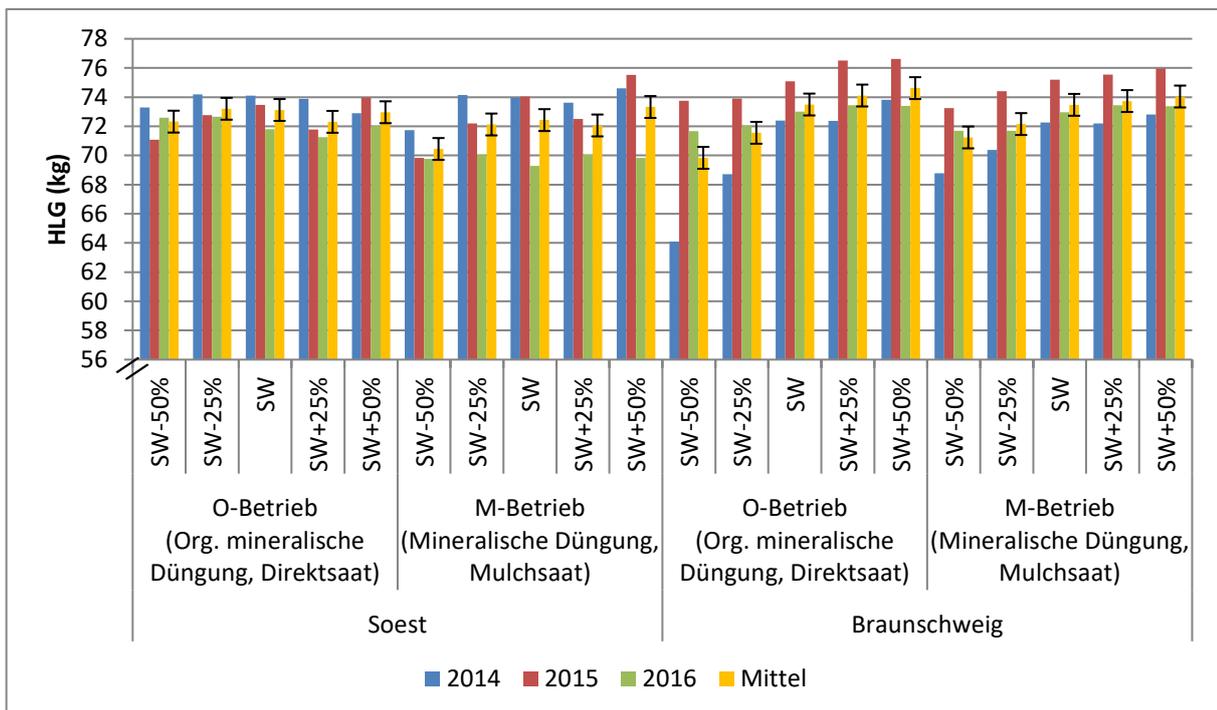


Abbildung 131: Hektolitergewicht (HLG) von Winterweizen an den Standorten Braunschweig und Soest in Abhängigkeit vom Betriebssystem und der Höhe der N-Düngung in den Jahren 2014 bis 2016 (GD 5% O*B*N = 0,75 kg, GD 5% J*O*B*N = 1,3 kg)

Tabelle 55: Varianztabelle der Düngeversuche Wintergerste (sig. Haupt- und Wechselwirkungen **gelb** unterlegt)

Tests der Zwischensubjekteffekte

Quelle		Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	Ertrag	97894,748 ^a	207	472,921	26,768	,000
	TKM	4705,324 ^b	207	22,731	10,196	,000
	HLG	1212,898 ^c	207	5,859	7,402	,000
	Ähren_m2	1873770,850 ^d	207	9052,033	3,298	,012
	KornN	19,713 ^e	207	,095	64,055	,000
	N_Abfuhr	324105,213 ^f	207	1565,726	23,905	,000
Konstanter Term	N_Bilanz	690649,686 ^g	207	3336,472	50,761	,000
	Ertrag	1706461,867	1	1706461,867	96586,657	,000
	TKM	427560,131	1	427560,131	191775,146	,000
	HLG	746588,519	1	746588,519	943099,677	,000
	Ähren_m2	39164761,886	1	39164761,886	14269,579	,000
	KornN	717,869	1	717,869	482859,498	,000
Jahr	N_Abfuhr	4343294,042	1	4343294,042	66311,015	,000
	N_Bilanz	114008,784	1	114008,784	1734,523	,000
	Ertrag	7840,956	2	3920,478	221,901	,000
	TKM	652,427	2	326,213	146,318	,000
	HLG	230,278	2	115,139	145,445	,000
	Ähren_m2	132005,161	2	66002,580	24,048	,000
Ort	KornN	2,438	2	1,219	820,047	,000
	N_Abfuhr	18849,934	2	9424,967	143,895	,000
	N_Bilanz	6196,700	2	3098,350	47,138	,000
	Ertrag	117,822	1	117,822	6,669	,024
	TKM	140,920	1	140,920	63,207	,000
	HLG	124,322	1	124,322	157,045	,000
Betriebsform	Ähren_m2	22662,153	1	22662,153	8,257	,014
	KornN	,184	1	,184	123,615	,000
	N_Abfuhr	229,874	1	229,874	3,510	,086
	N_Bilanz	5268,140	1	5268,140	80,149	,000
	Ertrag	27977,757	1	27977,757	1583,556	,000
	TKM	19,646	1	19,646	8,812	,012
N_DG	HLG	99,954	1	99,954	126,263	,000
	Ähren_m2	750874,254	1	750874,254	273,579	,000
	KornN	,013	1	,013	8,895	,011
	N_Abfuhr	83226,533	1	83226,533	1270,657	,000
	N_Bilanz	250675,469	1	250675,469	3813,763	,000
	Ertrag	8711,328	4	2177,832	123,266	,000
WDH	TKM	140,574	4	35,144	15,763	,000
	HLG	28,561	4	7,140	9,020	,001
	Ähren_m2	302816,521	4	75704,130	27,583	,000
	KornN	8,147	4	2,037	1369,939	,000
	N_Abfuhr	122831,181	4	30707,795	468,830	,000
	N_Bilanz	254163,934	4	63540,983	966,709	,000
Jahr * Betriebsform	Ertrag	16,146	3	5,382	,305	,822
	TKM	1,434	3	,478	,214	,884
	HLG	11,873	3	3,958	4,999	,018
	Ähren_m2	4911,739	3	1637,246	,597	,629
	KornN	,013	3	,004	2,832	,083
	N_Abfuhr	129,698	3	43,233	,660	,592
Betriebsform * N_DG	N_Bilanz	142,404	3	47,468	,722	,558
	Ertrag	5563,276	2	2781,638	157,442	,000
	TKM	770,262	2	385,131	172,744	,000
	HLG	237,107	2	118,554	149,758	,000
	Ähren_m2	28672,292	2	14336,146	5,223	,023
	KornN	1,004	2	,502	337,723	,000
Ort * Betriebsform	N_Abfuhr	12305,284	2	6152,642	93,935	,000
	N_Bilanz	2758,029	2	1379,015	20,980	,000
	Ertrag	458,075	4	114,519	6,482	,005
	TKM	98,221	4	24,555	11,014	,001
	HLG	21,223	4	5,306	6,702	,004
	Ähren_m2	20609,557	4	5152,389	1,877	,179
Jahr * Betriebsform	KornN	,073	4	,018	12,309	,000
	N_Abfuhr	410,905	4	102,726	1,568	,245
	N_Bilanz	1032,001	4	258,000	3,925	,029
	Ertrag	23831,483	1	23831,483	1348,875	,000
	TKM	10,910	1	10,910	4,893	,047
	HLG	259,608	1	259,608	327,940	,000
Ort * Betriebsform	Ähren_m2	11799,225	1	11799,225	4,299	,060

	KornN	2,293	1	2,293	1542,643	,000
	N_Abfuhr	24533,638	1	24533,638	374,566	,000
	N_Bilanz	22137,025	1	22137,025	336,792	,000
Betriebsform * WDH	Ertrag	99,425	3	33,142	1,876	,187
	TKM	6,218	3	2,073	,930	,456
	HLG	17,546	3	5,849	7,388	,005
	Ähren_m2	2548,498	3	849,499	,310	,818
	KornN	,005	3	,002	1,061	,402
	N_Abfuhr	203,666	3	67,889	1,036	,411
	N_Bilanz	156,067	3	52,022	,791	,522
Jahr * N_DG	Ertrag	353,314	8	44,164	2,500	,074
	TKM	761,324	8	95,165	42,685	,000
	HLG	86,678	8	10,835	13,687	,000
	Ähren_m2	67150,975	8	8393,872	3,058	,040
	KornN	,353	8	,044	29,695	,000
	N_Abfuhr	1876,609	8	234,576	3,581	,023
	N_Bilanz	3029,444	8	378,680	5,761	,004
Jahr * Ort	Ertrag	21579,558	2	10789,779	610,707	,000
	TKM	1814,023	2	907,012	406,825	,000
	HLG	449,156	2	224,578	283,690	,000
	Ähren_m2	13743,704	2	6871,852	2,504	,123
	KornN	,608	2	,304	204,339	,000
	N_Abfuhr	56278,292	2	28139,146	429,613	,000
	N_Bilanz	46051,729	2	23025,865	350,314	,000
Jahr * WDH	Ertrag	194,051	6	32,342	1,831	,175
	TKM	22,017	6	3,670	1,646	,218
	HLG	8,326	6	1,388	1,753	,192
	Ähren_m2	15412,827	6	2568,804	,936	,504
	KornN	,048	6	,008	5,404	,006
	N_Abfuhr	540,836	6	90,139	1,376	,300
	N_Bilanz	388,728	6	64,788	,986	,476
Ort * N_DG	Ertrag	1169,660	4	292,415	16,551	,000
	TKM	14,823	4	3,706	1,662	,223
	HLG	47,244	4	11,811	14,920	,000
	Ähren_m2	30454,774	4	7613,694	2,774	,076
	KornN	,778	4	,194	130,761	,000
	N_Abfuhr	12995,325	4	3248,831	49,601	,000
	N_Bilanz	5131,421	4	1282,855	19,517	,000
N_DG * WDH	Ertrag	285,092	12	23,758	1,345	,308
	TKM	5,031	12	,419	,188	,996
	HLG	4,611	12	,384	,485	,888
	Ähren_m2	15639,378	12	1303,281	,475	,894
	KornN	,008	12	,001	,430	,921
	N_Abfuhr	660,099	12	55,008	,840	,616
	N_Bilanz	582,683	12	48,557	,739	,696
Ort * WDH	Ertrag	23,023	3	7,674	,434	,732
	TKM	13,148	3	4,383	1,966	,173
	HLG	2,293	3	,764	,966	,441
	Ähren_m2	21199,312	3	7066,437	2,575	,103
	KornN	,010	3	,003	2,322	,127
	N_Abfuhr	182,864	3	60,955	,931	,456
	N_Bilanz	173,001	3	57,667	,877	,480
Jahr * Betriebsform * N_DG	Ertrag	193,676	8	24,210	1,370	,300
	TKM	86,726	8	10,841	4,862	,007
	HLG	8,158	8	1,020	1,288	,334
	Ähren_m2	35148,875	8	4393,609	1,601	,223
	KornN	,014	8	,002	1,179	,385
	N_Abfuhr	609,214	8	76,152	1,163	,393
	N_Bilanz	939,492	8	117,436	1,787	,176
Jahr * Ort * Betriebsform	Ertrag	681,038	1	681,038	38,547	,000
	TKM	,063	1	,063	,028	,869
	HLG	12,886	1	12,886	16,278	,002
	Ähren_m2	81,225	1	81,225	,030	,866
	KornN	,117	1	,117	78,601	,000
	N_Abfuhr	120,309	1	120,309	1,837	,200
	N_Bilanz	1562,500	1	1562,500	23,772	,000
Jahr * Betriebsform * WDH	Ertrag	124,015	6	20,669	1,170	,383
	TKM	35,975	6	5,996	2,689	,068
	HLG	17,214	6	2,869	3,624	,027
	Ähren_m2	9052,758	6	1508,793	,550	,762
	KornN	,026	6	,004	2,886	,056
	N_Abfuhr	379,728	6	63,288	,966	,487
	N_Bilanz	441,871	6	73,645	1,120	,406
Ort * Betriebsform *	Ertrag	472,798	4	118,199	6,690	,005

N_DG	TKM	94,902	4	23,726	10,642	,001
	HLG	8,589	4	2,147	2,713	,081
	Ähren_m2	7573,650	4	1893,412	,690	,613
	KornN	,009	4	,002	1,509	,261
	N_Abfuhr	3993,572	4	998,393	15,243	,000
	N_Bilanz	4044,850	4	1011,212	15,385	,000
Betriebsform * N_DG	Ertrag	362,439	12	30,203	1,710	,183
	TKM	14,468	12	1,206	,541	,850
	HLG	7,234	12	,603	,761	,678
	Ähren_m2	30106,967	12	2508,914	,914	,561
	KornN	,016	12	,001	,891	,577
	N_Abfuhr	797,095	12	66,425	1,014	,491
* WDH	N_Bilanz	763,494	12	63,625	,968	,522
	Ertrag	140,354	3	46,785	2,648	,097
	TKM	1,582	3	,527	,237	,869
	HLG	19,644	3	6,548	8,271	,003
	Ähren_m2	22358,725	3	7452,908	2,715	,091
	KornN	,003	3	,001	,654	,595
Ort * Betriebsform *	N_Abfuhr	336,343	3	112,114	1,712	,218
	N_Bilanz	578,725	3	192,908	2,935	,077
	Ertrag	690,622	8	86,328	4,886	,007
	TKM	23,711	8	2,964	1,329	,317
	HLG	34,291	8	4,286	5,415	,005
	Ähren_m2	20362,025	8	2545,253	,927	,528
Jahr * Ort * N_DG	KornN	,071	8	,009	5,937	,003
	N_Abfuhr	3292,767	8	411,596	6,284	,003
	N_Bilanz	3384,958	8	423,120	6,437	,002
	Ertrag	533,442	24	22,227	1,258	,348
	TKM	33,366	24	1,390	,624	,843
	HLG	12,431	24	,518	,654	,818
Jahr * N_DG * WDH	Ähren_m2	54450,392	24	2268,766	,827	,668
	KornN	,035	24	,001	,986	,533
	N_Abfuhr	1260,704	24	52,529	,802	,690
	N_Bilanz	1611,225	24	67,134	1,021	,506
	Ertrag	255,344	6	42,557	2,409	,092
	TKM	9,918	6	1,653	,741	,627
Jahr * Ort * WDH	HLG	4,548	6	,758	,957	,492
	Ähren_m2	23923,796	6	3987,299	1,453	,274
	KornN	,018	6	,003	2,032	,139
	N_Abfuhr	615,043	6	102,507	1,565	,239
	N_Bilanz	941,771	6	156,962	2,388	,094
	Ertrag	226,221	12	18,852	1,067	,456
Ort * N_DG * WDH	TKM	12,676	12	1,056	,474	,895
	HLG	10,098	12	,842	1,063	,459
	Ähren_m2	16791,783	12	1399,315	,510	,871
	KornN	,033	12	,003	1,838	,153
	N_Abfuhr	629,775	12	52,481	,801	,646
	N_Bilanz	564,050	12	47,004	,715	,715
Jahr * Ort *	Ertrag	201,941	4	50,485	2,857	,071
	TKM	10,965	4	2,741	1,230	,349
	HLG	11,295	4	2,824	3,567	,039
	Ähren_m2	9433,900	4	2358,475	,859	,515
	KornN	,006	4	,001	,993	,448
	N_Abfuhr	1173,244	4	293,311	4,478	,019
Betriebsform * N_DG	N_Bilanz	1065,250	4	266,313	4,052	,026
	Ertrag	493,931	24	20,580	1,165	,404
	TKM	37,409	24	1,559	,699	,781
	HLG	15,752	24	,656	,829	,666
	Ähren_m2	23059,825	24	960,826	,350	,986
	KornN	,041	24	,002	1,150	,414
Jahr * Betriebsform *	N_Abfuhr	1696,277	24	70,678	1,079	,463
	N_Bilanz	2229,442	24	92,893	1,413	,270
	Ertrag	216,421	3	72,140	4,083	,033
	TKM	,171	3	,057	,026	,994
	HLG	9,625	3	3,208	4,053	,033
	Ähren_m2	18178,025	3	6059,342	2,208	,140
Ort * Betriebsform *	KornN	,004	3	,001	,888	,475
	N_Abfuhr	586,388	3	195,463	2,984	,074
	N_Bilanz	514,750	3	171,583	2,610	,100
	Ertrag	350,821	12	29,235	1,655	,198
	TKM	31,139	12	2,595	1,164	,398
	HLG	10,469	12	,872	1,102	,435
Jahr * Ort * WDH	Ähren_m2	24650,150	12	2054,179	,748	,688
	KornN	,020	12	,002	1,138	,413

	N_Abfuhr	833,687	12	69,474	1,061	,460
	N_Bilanz	1120,150	12	93,346	1,420	,276
Jahr * Ort * N_DG *	Ertrag	510,882	24	21,287	1,205	,379
WDH	TKM	36,562	24	1,523	,683	,794
	HLG	13,267	24	,553	,698	,781
	Ähren_m2	39805,975	24	1658,582	,604	,858
	KornN	,061	24	,003	1,707	,168
	N_Abfuhr	1254,819	24	52,284	,798	,693
	N_Bilanz	1698,875	24	70,786	1,077	,464
Fehler	Ertrag	212,012	12	17,668		
	TKM	26,754	12	2,229		
	HLG	9,500	12	,792		
	Ähren_m2	32935,600	12	2744,633		
	KornN	,018	12	,001		
	N_Abfuhr	785,986	12	65,499		
	N_Bilanz	788,750	12	65,729		
Gesamt	Ertrag	2000923,960	220			
	TKM	465826,406	220			
	HLG	806602,395	220			
	Ähren_m2	44896511,000	220			
	KornN	786,864	220			
	N_Abfuhr	5192136,724	220			
	N_Bilanz	782342,000	220			
Korrigierte	Ertrag	98106,760	219			
Gesamtvariation	TKM	4732,077	219			
	HLG	1222,397	219			
	Ähren_m2	1906706,450	219			
	KornN	19,731	219			
	N_Abfuhr	324891,199	219			
	N_Bilanz	691438,436	219			

Tabelle 56: Varianztabelle der Düngeversuche Winterweizen (sig. Haupt- und Wechselwirkungen **gelb** unterlegt)

Tests der Zwischensubjekteffekte

Quelle		Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	Ertrag	37737,479 ^a	215	175,523	13,096	,000
	TKM	6326,760 ^b	215	29,427	22,294	,000
	HLG	1286,652 ^c	215	5,984	7,628	,000
	Ähren_m2	1804456,308 ^d	215	8392,820	4,913	,000
	KornN	16,811 ^e	215	,078	8,585	,000
	N_Abfuhr	237983,562 ^f	215	1106,900	10,815	,000
	N_Bilanz	645497,858 ^g	215	3002,316	29,579	,000
Konstanter Term	Ertrag	2072320,426	1	2072320,426	154619,647	,000
	TKM	541380,483	1	541380,483	410147,255	,000
	HLG	1262975,330	1	1262975,330	1609772,110	,000
	Ähren_m2	75955501,067	1	75955501,067	44458,910	,000
	KornN	882,706	1	882,706	96914,271	,000
	N_Abfuhr	5684895,870	1	5684895,870	55545,302	,000
	N_Bilanz	75048,067	1	75048,067	739,367	,000
Jahr	Ertrag	6025,448	2	3012,724	224,785	,000
	TKM	396,696	2	198,348	150,268	,000
	HLG	145,431	2	72,715	92,682	,000
	Ähren_m2	146579,733	2	73289,867	42,899	,000
	KornN	1,686	2	,843	92,556	,000
	N_Abfuhr	3119,518	2	1559,759	15,240	,000
	N_Bilanz	24232,258	2	12116,129	119,367	,000
Ort	Ertrag	18,426	1	18,426	1,375	,252
	TKM	1236,977	1	1236,977	937,128	,000
	HLG	18,922	1	18,922	24,117	,000
	Ähren_m2	17681,667	1	17681,667	10,350	,004
	KornN	3,532	1	3,532	387,739	,000
	N_Abfuhr	15346,987	1	15346,987	149,951	,000
	N_Bilanz	69700,417	1	69700,417	686,682	,000
Betriebsform	Ertrag	1264,545	1	1264,545	94,350	,000
	TKM	209,406	1	209,406	158,645	,000

	HLG	,443	1	,443	,565	,460
	Ähren_m2	124397,067	1	124397,067	72,813	,000
	KornN	,336	1	,336	36,898	,000
	N_Abfuhr	54,250	1	54,250	,530	,474
N_DG	N_Bilanz	17992,017	1	17992,017	177,256	,000
	Ertrag	12842,028	4	3210,507	239,542	,000
	TKM	455,945	4	113,986	86,355	,000
	HLG	206,434	4	51,609	65,780	,000
	Ähren_m2	812955,517	4	203238,879	118,961	,000
	KornN	7,092	4	1,773	194,662	,000
	N_Abfuhr	148176,137	4	37044,034	361,945	,000
	N_Bilanz	467989,725	4	116997,431	1152,649	,000
WDH	Ertrag	144,346	3	48,115	3,590	,028
	TKM	2,912	3	,971	,735	,541
	HLG	,668	3	,223	,284	,836
	Ähren_m2	3476,167	3	1158,722	,678	,574
	KornN	,023	3	,008	,839	,486
	N_Abfuhr	659,661	3	219,887	2,148	,121
	N_Bilanz	664,600	3	221,533	2,183	,116
Jahr *	Ertrag	838,275	2	419,138	31,273	,000
Betriebsform	TKM	263,380	2	131,690	99,768	,000
	HLG	35,766	2	17,883	22,794	,000
	Ähren_m2	7974,433	2	3987,217	2,334	,119
	KornN	,022	2	,011	1,187	,322
	N_Abfuhr	1512,333	2	756,167	7,388	,003
	N_Bilanz	837,258	2	418,629	4,124	,029
Betriebsform *	Ertrag	57,580	4	14,395	1,074	,391
N_DG	TKM	59,938	4	14,985	11,352	,000
	HLG	4,878	4	1,219	1,554	,219
	Ähren_m2	11662,267	4	2915,567	1,707	,181
	KornN	,046	4	,011	1,258	,314
	N_Abfuhr	553,581	4	138,395	1,352	,280
	N_Bilanz	784,192	4	196,048	1,931	,138
Ort *	Ertrag	136,655	1	136,655	10,196	,004
Betriebsform	TKM	220,912	1	220,912	167,362	,000
	HLG	5,055	1	5,055	6,444	,018
	Ähren_m2	4335,000	1	4335,000	2,537	,124
	KornN	,049	1	,049	5,325	,030
	N_Abfuhr	1156,727	1	1156,727	11,302	,003
	N_Bilanz	2232,600	1	2232,600	21,995	,000
Betriebsform *	Ertrag	378,773	3	126,258	9,420	,000
WDH	TKM	1,742	3	,581	,440	,727
	HLG	2,229	3	,743	,947	,434
	Ähren_m2	6050,833	3	2016,944	1,181	,338
	KornN	,019	3	,006	,678	,574
	N_Abfuhr	1712,233	3	570,744	5,577	,005
	N_Bilanz	1737,517	3	579,172	5,706	,004
Jahr * N_DG	Ertrag	234,819	8	29,352	2,190	,066
	TKM	384,159	8	48,020	36,380	,000
	HLG	83,253	8	10,407	13,264	,000
	Ähren_m2	111117,058	8	13889,632	8,130	,000
	KornN	,073	8	,009	1,007	,457
	N_Abfuhr	1787,457	8	223,432	2,183	,067
	N_Bilanz	5530,075	8	691,259	6,810	,000
Jahr * Ort	Ertrag	7402,136	2	3701,068	276,144	,000
	TKM	2055,644	2	1027,822	778,673	,000
	HLG	362,745	2	181,372	231,175	,000
	Ähren_m2	10340,633	2	5170,317	3,026	,067
	KornN	,827	2	,414	45,423	,000
	N_Abfuhr	9380,285	2	4690,143	45,826	,000
	N_Bilanz	11297,258	2	5648,629	55,650	,000
Jahr * WDH	Ertrag	53,386	6	8,898	,664	,679
	TKM	23,855	6	3,976	3,012	,024
	HLG	7,277	6	1,213	1,546	,206

	Ähren_m2	9150,333	6	1525,056	,893	,516
	KornN	,069	6	,011	1,254	,315
	N_Abfuhr	724,186	6	120,698	1,179	,350
	N_Bilanz	727,775	6	121,296	1,195	,342
Ort * N_DG	Ertrag	3620,819	4	905,205	67,539	,000
	TKM	33,051	4	8,263	6,260	,001
	HLG	79,029	4	19,757	25,182	,000
	Ähren_m2	27506,250	4	6876,563	4,025	,012
	KornN	,824	4	,206	22,625	,000
	N_Abfuhr	21840,651	4	5460,163	53,350	,000
	N_Bilanz	10088,375	4	2522,094	24,847	,000
N_DG * WDH	Ertrag	410,300	12	34,192	2,551	,025
	TKM	38,399	12	3,200	2,424	,031
	HLG	13,477	12	1,123	1,431	,219
	Ähren_m2	30179,250	12	2514,938	1,472	,203
	KornN	,114	12	,010	1,046	,443
	N_Abfuhr	1248,563	12	104,047	1,017	,465
	N_Bilanz	1245,442	12	103,787	1,022	,460
Ort * WDH	Ertrag	201,629	3	67,210	5,015	,008
	TKM	13,520	3	4,507	3,414	,034
	HLG	1,028	3	,343	,437	,729
	Ähren_m2	13101,900	3	4367,300	2,556	,079
	KornN	,059	3	,020	2,162	,119
	N_Abfuhr	832,398	3	277,466	2,711	,067
	N_Bilanz	830,050	3	276,683	2,726	,066
Jahr *	Ertrag	210,949	8	26,369	1,967	,096
Betriebsform *	TKM	148,362	8	18,545	14,050	,000
N_DG	HLG	37,660	8	4,707	6,000	,000
	Ähren_m2	7810,858	8	976,357	,571	,791
	KornN	,070	8	,009	,955	,492
	N_Abfuhr	1372,245	8	171,531	1,676	,156
	N_Bilanz	1291,908	8	161,489	1,591	,180
Jahr * Ort *	Ertrag	125,893	2	62,947	4,697	,019
Betriebsform	TKM	34,411	2	17,205	13,035	,000
	HLG	35,546	2	17,773	22,653	,000
	Ähren_m2	22794,300	2	11397,150	6,671	,005
	KornN	,178	2	,089	9,768	,001
	N_Abfuhr	2069,293	2	1034,646	10,109	,001
	N_Bilanz	3833,425	2	1916,713	18,883	,000
Jahr *	Ertrag	150,936	6	25,156	1,877	,126
Betriebsform *	TKM	9,345	6	1,557	1,180	,350
WDH	HLG	8,711	6	1,452	1,851	,131
	Ähren_m2	9582,167	6	1597,028	,935	,488
	KornN	,068	6	,011	1,236	,323
	N_Abfuhr	779,307	6	129,884	1,269	,308
	N_Bilanz	778,308	6	129,718	1,278	,304
Ort *	Ertrag	184,103	4	46,026	3,434	,024
Betriebsform *	TKM	37,528	4	9,382	7,108	,001
N_DG	HLG	41,102	4	10,275	13,097	,000
	Ähren_m2	38086,333	4	9521,583	5,573	,003
	KornN	,111	4	,028	3,040	,037
	N_Abfuhr	1646,172	4	411,543	4,021	,012
	N_Bilanz	1687,108	4	421,777	4,155	,011
Betriebsform *	Ertrag	151,736	12	12,645	,943	,523
N_DG * WDH	TKM	12,973	12	1,081	,819	,630
	HLG	6,198	12	,516	,658	,772
	Ähren_m2	19040,833	12	1586,736	,929	,535
	KornN	,158	12	,013	1,450	,211
	N_Abfuhr	1166,223	12	97,185	,950	,518
	N_Bilanz	1157,442	12	96,453	,950	,518
Ort *	Ertrag	318,201	3	106,067	7,914	,001
Betriebsform *	TKM	7,975	3	2,658	2,014	,139
WDH	HLG	,160	3	,053	,068	,976
	Ähren_m2	3321,233	3	1107,078	,648	,592

	KornN	,053	3	,018	1,932	,151
	N_Abfuhr	2361,070	3	787,023	7,690	,001
	N_Bilanz	2346,467	3	782,156	7,706	,001
Jahr * Ort *	Ertrag	429,261	8	53,658	4,003	,004
N_DG	TKM	280,346	8	35,043	26,549	,000
	HLG	53,138	8	6,642	8,466	,000
	Ähren_m2	158661,575	8	19832,697	11,609	,000
	KornN	,330	8	,041	4,531	,002
	N_Abfuhr	4908,830	8	613,604	5,995	,000
	N_Bilanz	3983,825	8	497,978	4,906	,001
Jahr * N_DG *	Ertrag	394,728	24	16,447	1,227	,310
WDH	TKM	71,144	24	2,964	2,246	,026
	HLG	20,283	24	,845	1,077	,429
	Ähren_m2	32809,375	24	1367,057	,800	,705
	KornN	,265	24	,011	1,213	,320
	N_Abfuhr	2596,497	24	108,187	1,057	,446
	N_Bilanz	2601,058	24	108,377	1,068	,437
Jahr * Ort * WDH	Ertrag	264,925	6	44,154	3,294	,017
	TKM	21,877	6	3,646	2,762	,035
	HLG	9,502	6	1,584	2,019	,102
	Ähren_m2	7821,100	6	1303,517	,763	,606
	KornN	,024	6	,004	,433	,850
	N_Abfuhr	1137,832	6	189,639	1,853	,131
	N_Bilanz	1123,175	6	187,196	1,844	,133
Ort * N_DG *	Ertrag	33,740	12	2,812	,210	,996
WDH	TKM	37,218	12	3,102	2,350	,036
	HLG	12,100	12	1,008	1,285	,289
	Ähren_m2	19915,850	12	1659,654	,971	,500
	KornN	,100	12	,008	,915	,547
	N_Abfuhr	707,844	12	58,987	,576	,840
	N_Bilanz	731,658	12	60,972	,601	,820
Jahr * Ort *	Ertrag	720,664	8	90,083	6,721	,000
Betriebsform *	TKM	152,161	8	19,020	14,410	,000
N_DG	HLG	31,705	8	3,963	5,051	,001
	Ähren_m2	52205,742	8	6525,718	3,820	,005
	KornN	,100	8	,012	1,371	,259
	N_Abfuhr	3559,063	8	444,883	4,347	,002
	N_Bilanz	2514,992	8	314,374	3,097	,015
Jahr *	Ertrag	307,739	24	12,822	,957	,543
Betriebsform *	TKM	27,353	24	1,140	,863	,639
N_DG * WDH	HLG	29,430	24	1,226	1,563	,140
	Ähren_m2	26464,042	24	1102,668	,645	,855
	KornN	,285	24	,012	1,303	,261
	N_Abfuhr	3220,225	24	134,176	1,311	,256
	N_Bilanz	3195,358	24	133,140	1,312	,256
Jahr * Ort *	Ertrag	263,817	6	43,969	3,281	,017
Betriebsform *	TKM	11,521	6	1,920	1,455	,236
WDH	HLG	9,380	6	1,563	1,993	,107
	Ähren_m2	17547,167	6	2924,528	1,712	,161
	KornN	,045	6	,008	,827	,560
	N_Abfuhr	781,448	6	130,241	1,273	,307
	N_Bilanz	790,008	6	131,668	1,297	,296
Ort *	Ertrag	213,095	12	17,758	1,325	,268
Betriebsform *	TKM	11,593	12	,966	,732	,708
N_DG * WDH	HLG	6,924	12	,577	,735	,705
	Ähren_m2	21862,100	12	1821,842	1,066	,427
	KornN	,116	12	,010	1,059	,433
	N_Abfuhr	1528,092	12	127,341	1,244	,312
	N_Bilanz	1540,325	12	128,360	1,265	,300
Jahr * Ort *	Ertrag	338,526	24	14,105	1,052	,451
N_DG * WDH	TKM	66,415	24	2,767	2,096	,038
	HLG	18,178	24	,757	,965	,534
	Ähren_m2	30025,525	24	1251,064	,732	,775
	KornN	,139	24	,006	,638	,861

Fehler	N_Abfuhr	2044,455	24	85,186	,832	,672
	N_Bilanz	2033,242	24	84,718	,835	,669
	Ertrag	321,665	24	13,403		
	TKM	31,679	24	1,320		
	HLG	18,830	24	,785		
Gesamt	Ähren_m2	41002,625	24	1708,443		
	KornN	,219	24	,009		
	N_Abfuhr	2456,328	24	102,347		
	N_Bilanz	2436,075	24	101,503		
	Ertrag	2110379,570	240			
Korrigierte Gesamtvariation	TKM	547738,922	240			
	HLG	1264280,812	240			
	Ähren_m2	77800960,000	240			
	KornN	899,736	240			
	N_Abfuhr	5925335,761	240			
Korrigierte Gesamtvariation	N_Bilanz	722982,000	240			
	Ertrag	38059,144	239			
	TKM	6358,439	239			
	HLG	1305,482	239			
	Ähren_m2	1845458,933	239			
Korrigierte Gesamtvariation	KornN	17,030	239			
	N_Abfuhr	240439,891	239			
	N_Bilanz	647933,933	239			

Tabelle 57: Varianztabelle der Düngeversuche Wintertraps (sig. Haupt- und Wechselwirkungen **gelb** unterlegt)

Tests der Zwischensubjekteffekte						
Quelle		Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Jahr	Ertrag_91TM	627,308	2	313,654	38,869	,000
	XL	1,997	2	,998	1,813	,205
	XP	63,733	2	31,867	70,169	,000
	N_Korn	1,630	2	,815	68,227	,000
	N_Abfuhr	782,437	2	391,218	5,527	,020
	N_Zufuhr70	23284,638	2	11642,319		
	N_Bilanz	26427,908	2	13213,954	183,633	,000
	Ölertrag	1239053,296	2	619526,648	34,214	,000
Ort	Ertrag_91TM	589,810	1	589,810	73,092	,000
	XL	325,271	1	325,271	590,823	,000
	XP	215,814	1	215,814	475,209	,000
	N_Korn	5,505	1	5,505	460,901	,000
	N_Abfuhr	21705,626	1	21705,626	306,654	,000
	N_Zufuhr70	13884,243	1	13884,243		
	N_Bilanz	851,089	1	851,089	11,828	,005
	Ölertrag	206237,532	1	206237,532	11,390	,006
Betriebsform	Ertrag_91TM	409,288	1	409,288	50,721	,000
	XL	,253	1	,253	,459	,511
	XP	19,793	1	19,793	43,583	,000
	N_Korn	,500	1	,500	41,820	,000
	N_Abfuhr	1100,589	1	1100,589	15,549	,002
	N_Zufuhr70	2363,272	1	2363,272		
	N_Bilanz	2003,343	1	2003,343	27,840	,000
	Ölertrag	789609,428	1	789609,428	43,607	,000
NDG	Ertrag_91TM	2233,856	4	558,464	69,207	,000
	XL	305,033	4	76,258	138,516	,000
	XP	307,103	4	76,776	169,056	,000
	N_Korn	7,887	4	1,972	165,070	,000
	N_Abfuhr	47412,793	4	11853,198	167,460	,000
	N_Zufuhr70	1314466,224	4	328616,556		
	N_Bilanz	883644,486	4	220911,122	3069,987	,000
	Ölertrag	2718377,317	4	679594,329	37,532	,000
WDH	Ertrag_91TM	52,156	3	17,385	2,154	,147
	XL	1,661	3	,554	1,006	,424
	XP	1,363	3	,454	1,001	,426
	N_Korn	,030	3	,010	,841	,497
	N_Abfuhr	632,734	3	210,911	2,980	,074
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	605,185	3	201,728	2,803	,085

	Ölertrag	105082,797	3	35027,599	1,934	,178
Jahr *	Ertrag_91TM	949,884	2	474,942	58,857	,000
Betriebsform	XL	4,712	2	2,356	4,279	,040
	XP	3,193	2	1,597	3,516	,063
	N_Korn	,082	2	,041	3,441	,066
	N_Abfuhr	8981,763	2	4490,882	63,447	,000
	N_Zufuhr70	12120,000	2	6060,000		
	N_Bilanz	1378,560	2	689,280	9,579	,003
	Ölertrag	1804438,408	2	902219,204	49,826	,000
Betriebsform *	Ertrag_91TM	124,203	4	31,051	3,848	,031
NDG	XL	5,900	4	1,475	2,679	,083
	XP	3,365	4	,841	1,853	,184
	N_Korn	,085	4	,021	1,787	,196
	N_Abfuhr	1623,050	4	405,763	5,733	,008
	N_Zufuhr70	216,530	4	54,133		
	N_Bilanz	2765,478	4	691,370	9,608	,001
	Ölertrag	196478,374	4	49119,593	2,713	,081
Ort *	Ertrag_91TM	252,758	1	252,758	31,323	,000
Betriebsform	XL	17,417	1	17,417	31,637	,000
	XP	16,009	1	16,009	35,250	,000
	N_Korn	,404	1	,404	33,824	,000
	N_Abfuhr	4323,488	1	4323,488	61,082	,000
	N_Zufuhr70	1440,000	1	1440,000		
	N_Bilanz	1531,406	1	1531,406	21,282	,001
	Ölertrag	301848,464	1	301848,464	16,670	,002
Betriebsform *	Ertrag_91TM	33,125	3	11,042	1,368	,299
WDH	XL	5,135	3	1,712	3,109	,067
	XP	2,737	3	,912	2,009	,166
	N_Korn	,073	3	,024	2,032	,163
	N_Abfuhr	92,021	3	30,674	,433	,733
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	88,905	3	29,635	,412	,748
	Ölertrag	121064,614	3	40354,871	2,229	,137
Jahr * NDG	Ertrag_91TM	291,893	8	36,487	4,522	,010
	XL	38,856	8	4,857	8,822	,001
	XP	20,645	8	2,581	5,682	,004
	N_Korn	,529	8	,066	5,541	,004
	N_Abfuhr	4275,263	8	534,408	7,550	,001
	N_Zufuhr70	5717,258	8	714,657		
	N_Bilanz	5368,385	8	671,048	9,326	,000
	Ölertrag	371582,176	8	46447,772	2,565	,069
Jahr * Ort	Ertrag_91TM	185,348	2	92,674	11,485	,002
	XL	318,393	2	159,197	289,165	,000
	XP	57,054	2	28,527	62,814	,000
	N_Korn	1,458	2	,729	61,014	,000
	N_Abfuhr	6606,820	2	3303,410	46,670	,000
	N_Zufuhr70	3368,800	2	1684,400		
	N_Bilanz	17155,473	2	8577,736	119,204	,000
	Ölertrag	5920,015	2	2960,007	,163	,851
Jahr * WDH	Ertrag_91TM	253,022	6	42,170	5,226	,007
	XL	4,519	6	,753	1,368	,303
	XP	4,923	6	,821	1,807	,180
	N_Korn	,129	6	,021	1,796	,183
	N_Abfuhr	1454,512	6	242,419	3,425	,033
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	1452,358	6	242,060	3,364	,035
	Ölertrag	562659,507	6	93776,585	5,179	,008
Ort * NDG	Ertrag_91TM	1368,978	4	342,244	42,412	,000
	XL	36,840	4	9,210	16,729	,000
	XP	37,924	4	9,481	20,877	,000
	N_Korn	,967	4	,242	20,233	,000
	N_Abfuhr	13637,557	4	3409,389	48,167	,000
	N_Zufuhr70	467,837	4	116,959		
	N_Bilanz	9399,184	4	2349,796	32,655	,000
	Ölertrag	2532903,615	4	633225,904	34,971	,000
NDG * WDH	Ertrag_91TM	109,999	12	9,167	1,136	,414
	XL	7,791	12	,649	1,179	,390
	XP	5,775	12	,481	1,060	,461
	N_Korn	,147	12	,012	1,029	,481
	N_Abfuhr	992,554	12	82,713	1,169	,396
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	987,364	12	82,280	1,143	,410
	Ölertrag	232348,429	12	19362,369	1,069	,455
Ort * WDH	Ertrag_91TM	89,734	3	29,911	3,707	,043

	XL	2,952	3	,984	1,788	,203
	XP	2,046	3	,682	1,502	,264
	N_Korn	,053	3	,018	1,490	,267
	N_Abfuhr	356,397	3	118,799	1,678	,224
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	352,782	3	117,594	1,634	,234
	Ölertrag	239257,380	3	79752,460	4,404	,026
Jahr *	Ertrag_91TM	20,296	8	2,537	,314	,946
Betriebsform *	XL	10,310	8	1,289	2,341	,089
NDG	XP	10,524	8	1,316	2,897	,047
	N_Korn	,268	8	,034	2,806	,052
	N_Abfuhr	483,210	8	60,401	,853	,577
	N_Zufuhr70	38,667	8	4,833		
	N_Bilanz	520,283	8	65,035	,904	,543
	Ölertrag	26620,317	8	3327,540	,184	,989
Jahr * Ort *	Ertrag_91TM	8,978	1	8,978	1,113	,312
Betriebsform	XL	23,493	1	23,493	42,673	,000
	XP	11,963	1	11,963	26,342	,000
	N_Korn	,305	1	,305	25,493	,000
	N_Abfuhr	1069,570	1	1069,570	15,111	,002
	N_Zufuhr70	57,600	1	57,600		
	N_Bilanz	2425,806	1	2425,806	33,711	,000
	Ölertrag	6941,811	1	6941,811	,383	,547
Jahr *	Ertrag_91TM	258,485	6	43,081	5,339	,007
Betriebsform *	XL	8,573	6	1,429	2,595	,075
WDH	XP	9,821	6	1,637	3,604	,028
	N_Korn	,250	6	,042	3,487	,031
	N_Abfuhr	2195,911	6	365,985	5,171	,008
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	2208,115	6	368,019	5,114	,008
	Ölertrag	615353,653	6	102558,942	5,664	,005
Ort *	Ertrag_91TM	154,122	4	38,530	4,775	,015
Betriebsform *	XL	30,211	4	7,553	13,719	,000
NDG	XP	19,990	4	4,998	11,004	,001
	N_Korn	,508	4	,127	10,631	,001
	N_Abfuhr	2096,790	4	524,198	7,406	,003
	N_Zufuhr70	240,000	4	60,000		
	N_Bilanz	1082,125	4	270,531	3,760	,033
	Ölertrag	259279,150	4	64819,787	3,580	,038
Betriebsform *	Ertrag_91TM	42,587	12	3,549	,440	,915
NDG * WDH	XL	4,628	12	,386	,701	,726
	XP	3,507	12	,292	,643	,772
	N_Korn	,089	12	,007	,620	,790
	N_Abfuhr	238,195	12	19,850	,280	,982
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	248,736	12	20,728	,288	,980
	Ölertrag	121786,377	12	10148,865	,560	,835
Ort *	Ertrag_91TM	38,704	3	12,901	1,599	,241
Betriebsform *	XL	1,458	3	,486	,883	,478
WDH	XP	1,395	3	,465	1,024	,416
	N_Korn	,037	3	,012	1,035	,412
	N_Abfuhr	416,697	3	138,899	1,962	,174
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	414,619	3	138,206	1,921	,180
	Ölertrag	94017,980	3	31339,327	1,731	,214
Jahr * Ort *	Ertrag_91TM	37,182	8	4,648	,576	,779
NDG	XL	19,055	8	2,382	4,326	,012
	XP	17,314	8	2,164	4,766	,008
	N_Korn	,442	8	,055	4,630	,009
	N_Abfuhr	1377,887	8	172,236	2,433	,080
	N_Zufuhr70	199,200	8	24,900		
	N_Bilanz	1771,142	8	221,393	3,077	,039
	Ölertrag	40467,833	8	5058,479	,279	,961
Jahr * NDG *	Ertrag_91TM	206,702	24	8,613	1,067	,471
WDH	XL	8,741	24	,364	,662	,812
	XP	6,567	24	,274	,603	,860
	N_Korn	,167	24	,007	,583	,874
	N_Abfuhr	1644,687	24	68,529	,968	,548
	N_Zufuhr70	0,000	24	0,000		
	N_Bilanz	1649,258	24	68,719	,955	,558
	Ölertrag	438645,408	24	18276,892	1,009	,515
Jahr * Ort *	Ertrag_91TM	290,521	6	48,420	6,000	,004
WDH	XL	6,115	6	1,019	1,851	,171
	XP	6,333	6	1,055	2,324	,101

	N_Korn	,164	6	,027	2,292	,104
	N_Abfuhr	2672,703	6	445,451	6,293	,003
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	2644,785	6	440,798	6,126	,004
	Ölertrag	602200,630	6	100366,772	5,543	,006
Ort * NDG *	Ertrag_91TM	124,616	12	10,385	1,287	,335
WDH	XL	5,304	12	,442	,803	,645
	XP	3,398	12	,283	,623	,788
	N_Korn	,087	12	,007	,606	,801
	N_Abfuhr	810,961	12	67,580	,955	,531
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	808,625	12	67,385	,936	,544
	Ölertrag	290389,239	12	24199,103	1,336	,312
Jahr * Ort *	Ertrag_91TM	39,824	4	9,956	1,234	,348
Betriebsform *	XL	5,673	4	1,418	2,576	,091
NDG	XP	3,444	4	,861	1,896	,176
	N_Korn	,090	4	,023	1,885	,178
	N_Abfuhr	150,396	4	37,599	,531	,715
	N_Zufuhr70	28,400	4	7,100		
	N_Bilanz	206,600	4	51,650	,718	,596
	Ölertrag	119539,425	4	29884,856	1,650	,226
Jahr *	Ertrag_91TM	243,605	24	10,150	1,258	,348
Betriebsform *	XL	14,376	24	,599	1,088	,456
NDG * WDH	XP	13,301	24	,554	1,220	,370
	N_Korn	,340	24	,014	1,186	,391
	N_Abfuhr	1822,661	24	75,944	1,073	,467
	N_Zufuhr70	0,000	24	0,000		
	N_Bilanz	1838,917	24	76,622	1,065	,473
	Ölertrag	582786,712	24	24282,780	1,341	,304
Jahr * Ort *	Ertrag_91TM	125,624	3	41,875	5,189	,016
Betriebsform *	XL	4,170	3	1,390	2,525	,107
WDH	XP	4,335	3	1,445	3,182	,063
	N_Korn	,109	3	,036	3,052	,070
	N_Abfuhr	1386,331	3	462,110	6,529	,007
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	1356,219	3	452,073	6,282	,008
	Ölertrag	251010,749	3	83670,250	4,621	,023
Ort *	Ertrag_91TM	99,016	12	8,251	1,023	,485
Betriebsform *	XL	6,508	12	,542	,985	,510
NDG * WDH	XP	8,026	12	,669	1,473	,256
	N_Korn	,205	12	,017	1,427	,274
	N_Abfuhr	1447,916	12	120,660	1,705	,184
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	1414,975	12	117,915	1,639	,202
	Ölertrag	183494,759	12	15291,230	,844	,613
Jahr * Ort *	Ertrag_91TM	189,963	24	7,915	,981	,537
NDG * WDH	XL	16,303	24	,679	1,234	,362
	XP	14,830	24	,618	1,361	,295
	N_Korn	,386	24	,016	1,345	,302
	N_Abfuhr	1931,332	24	80,472	1,137	,423
	N_Zufuhr70	0,000	24	0,000		
	N_Bilanz	1946,725	24	81,114	1,127	,429
	Ölertrag	382768,038	24	15948,668	,881	,621
Fehler	Ertrag_91TM	96,833	12	8,069		
	XL	6,606	12	,551		
	XP	5,450	12	,454		
	N_Korn	,143	12	,012		
	N_Abfuhr	849,386	12	70,782		
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	863,500	12	71,958		
	Ölertrag	217287,132	12	18107,261		
Gesamt	Ertrag_91TM	410440,330	220			
	XL	541159,088	220			
	XP	77464,948	220			
	N_Korn	1982,883	220			
	N_Abfuhr	3134935,177	220			
	N_Zufuhr70	12501796,000	220			
	N_Bilanz	3995179,000	220			
	Ölertrag	837239697,496	220			

Tabelle 58: Varianztabelle der Düngeversuche Silomais in Soest (sig. Haupt- und Wechselwirkungen **gelb** unterlegt)

Tests der Zwischensubjekteffekte						
Quelle		Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	Ertrag_TM	526837,397 ^a	311	1694,011	23,115	,000
	XP	207,221 ^b	311	,666	8,866	,000
	N_Geh_TS	5,328 ^c	311	,017	9,098	,000
	N_Abfuhr	693481,297 ^d	311	2229,843	11,987	,000
	N_Zufuhr70	2465156,622 ^e	311	7926,549		
	N_Bilanz	1680124,663 ^f	311	5402,330	29,163	,000
Konstanter Term	Ertrag_TM	12599426,425	1	12599426,425	171922,297	,000
	XP	14940,415	1	14940,415	198805,379	,000
	N_Geh_TS	382,336	1	382,336	203061,489	,000
	N_Abfuhr	13359976,987	1	13359976,987	71817,048	,000
	N_Zufuhr70	9375403,378	1	9375403,378		
	N_Bilanz	163149,103	1	163149,103	880,713	,000
Jahr	Ertrag_TM	349433,520	2	174716,760	2384,054	,000
	XP	40,371	2	20,185	268,598	,000
	N_Geh_TS	1,044	2	,522	277,348	,000
	N_Abfuhr	197516,720	2	98758,360	530,879	,000
	N_Zufuhr70	19483,022	2	9741,511		
	N_Bilanz	320871,440	2	160435,720	866,065	,000
Betriebsform	Ertrag_TM	17602,220	1	17602,220	240,187	,000
	XP	4,736	1	4,736	63,016	,000
	N_Geh_TS	,121	1	,121	64,264	,000
	N_Abfuhr	3403,533	1	3403,533	18,296	,000
	N_Zufuhr70	2475,378	1	2475,378		
	N_Bilanz	77,943	1	77,943	,421	,520
NDG	Ertrag_TM	95508,623	4	23877,156	325,810	,000
	XP	101,381	4	25,345	337,256	,000
	N_Geh_TS	2,598	4	,649	344,914	,000
	N_Abfuhr	343284,702	4	85821,175	461,335	,000
	N_Zufuhr70	2434377,956	4	608594,489		
	N_Bilanz	1183465,383	4	295866,346	1597,148	,000
Treatment	Ertrag_TM	2285,694	2	1142,847	15,594	,000
	XP	,862	2	,431	5,738	,006
	N_Geh_TS	,023	2	,011	6,008	,005
	N_Abfuhr	5575,273	2	2787,636	14,985	,000
	N_Zufuhr70	,356	2	,178		
	N_Bilanz	11150,779	2	5575,390	30,097	,000
WDH	Ertrag_TM	2197,376	3	732,459	9,995	,000
	XP	,327	3	,109	1,448	,240
	N_Geh_TS	,009	3	,003	1,663	,187
	N_Abfuhr	3819,657	3	1273,219	6,844	,001
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	3820,192	3	1273,397	6,874	,001
Jahr * Betriebsform	Ertrag_TM	9024,153	2	4512,076	61,568	,000
	XP	17,858	2	8,929	118,813	,000
	N_Geh_TS	,463	2	,232	122,962	,000
	N_Abfuhr	20283,115	2	10141,557	54,516	,000
	N_Zufuhr70	2628,622	2	1314,311		
	N_Bilanz	34486,765	2	17243,383	93,083	,000
Betriebsform * NDG	Ertrag_TM	977,719	4	244,430	3,335	,017
	XP	3,170	4	,792	10,545	,000
	N_Geh_TS	,082	4	,021	10,901	,000
	N_Abfuhr	5370,320	4	1342,580	7,217	,000
	N_Zufuhr70	625,956	4	156,489		
	N_Bilanz	3609,197	4	902,299	4,871	,002
Betriebsform *	Ertrag_TM	764,662	2	382,331	5,217	,009

Treatment	XP	,420	2	,210	2,793	,071
	N_Geh_TS	,011	2	,005	2,805	,070
	N_Abfuhr	1947,809	2	973,905	5,235	,009
	N_Zufuhr70	,356	2	,178		
	N_Bilanz	1989,953	2	994,976	5,371	,008
Betriebsform *	Ertrag_TM	697,077	3	232,359	3,171	,033
WDH	XP	,470	3	,157	2,083	,115
	N_Geh_TS	,012	3	,004	2,139	,108
	N_Abfuhr	1360,875	3	453,625	2,438	,076
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	1352,922	3	450,974	2,434	,076
Jahr * NDG	Ertrag_TM	8282,268	8	1035,284	14,127	,000
	XP	6,182	8	,773	10,283	,000
	N_Geh_TS	,160	8	,020	10,641	,000
	N_Abfuhr	30906,477	8	3863,310	20,767	,000
	N_Zufuhr70	4879,644	8	609,956		
	N_Bilanz	37372,793	8	4671,599	25,218	,000
Jahr *	Ertrag_TM	883,127	4	220,782	3,013	,027
Treatment	XP	,088	4	,022	,292	,882
	N_Geh_TS	,002	4	,001	,316	,866
	N_Abfuhr	1370,771	4	342,693	1,842	,136
	N_Zufuhr70	1,244	4	,311		
	N_Bilanz	845,779	4	211,445	1,141	,348
Jahr * WDH	Ertrag_TM	1865,416	6	310,903	4,242	,002
	XP	,652	6	,109	1,447	,217
	N_Geh_TS	,017	6	,003	1,520	,192
	N_Abfuhr	3759,055	6	626,509	3,368	,007
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	3763,636	6	627,273	3,386	,007
NDG *	Ertrag_TM	3540,169	8	442,521	6,038	,000
Treatment	XP	1,001	8	,125	1,665	,132
	N_Geh_TS	,025	8	,003	1,683	,127
	N_Abfuhr	5637,543	8	704,693	3,788	,002
	N_Zufuhr70	2,311	8	,289		
	N_Bilanz	7668,089	8	958,511	5,174	,000
NDG * WDH	Ertrag_TM	1076,933	12	89,744	1,225	,295
	XP	1,748	12	,146	1,939	,053
	N_Geh_TS	,046	12	,004	2,051	,040
	N_Abfuhr	3420,315	12	285,026	1,532	,146
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	3390,010	12	282,501	1,525	,148
Treatment *	Ertrag_TM	1144,919	6	190,820	2,604	,029
WDH	XP	,613	6	,102	1,359	,251
	N_Geh_TS	,014	6	,002	1,258	,294
	N_Abfuhr	2608,302	6	434,717	2,337	,046
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	2608,223	6	434,704	2,347	,046
Jahr *	Ertrag_TM	2255,581	8	281,948	3,847	,001
Betriebsform *	XP	2,215	8	,277	3,685	,002
NDG	N_Geh_TS	,058	8	,007	3,840	,001
	N_Abfuhr	4035,938	8	504,492	2,712	,015
	N_Zufuhr70	670,044	8	83,756		
	N_Bilanz	4647,565	8	580,946	3,136	,006
Jahr *	Ertrag_TM	505,635	4	126,409	1,725	,160
Betriebsform *	XP	,214	4	,053	,711	,588
Treatment	N_Geh_TS	,005	4	,001	,722	,581
	N_Abfuhr	627,821	4	156,955	,844	,504
	N_Zufuhr70	1,244	4	,311		
	N_Bilanz	665,397	4	166,349	,898	,473
Jahr *	Ertrag_TM	1235,213	6	205,869	2,809	,020

Betriebsform *	XP	1,266	6	,211	2,808	,020
WDH	N_Geh_TS	,034	6	,006	3,030	,014
	N_Abfuhr	867,886	6	144,648	,778	,592
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	867,163	6	144,527	,780	,590
Betriebsform *	Ertrag_TM	1666,765	8	208,346	2,843	,011
NDG *	XP	,519	8	,065	,864	,553
Treatment	N_Geh_TS	,013	8	,002	,868	,550
	N_Abfuhr	1199,351	8	149,919	,806	,601
	N_Zufuhr70	2,311	8	,289		
	N_Bilanz	1251,161	8	156,395	,844	,569
Betriebsform *	Ertrag_TM	1611,204	12	134,267	1,832	,069
NDG * WDH	XP	1,689	12	,141	1,873	,062
	N_Geh_TS	,043	12	,004	1,907	,057
	N_Abfuhr	3334,508	12	277,876	1,494	,160
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	3360,826	12	280,069	1,512	,153
Betriebsform *	Ertrag_TM	624,997	6	104,166	1,421	,226
Treatment *	XP	1,096	6	,183	2,430	,039
WDH	N_Geh_TS	,029	6	,005	2,581	,030
	N_Abfuhr	2312,183	6	385,364	2,072	,074
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	2301,393	6	383,566	2,071	,074
Jahr * NDG *	Ertrag_TM	1266,467	16	79,154	1,080	,399
Treatment	XP	1,549	16	,097	1,288	,243
	N_Geh_TS	,038	16	,002	1,263	,259
	N_Abfuhr	2635,517	16	164,720	,885	,589
	N_Zufuhr70	4,089	16	,256		
	N_Bilanz	2516,634	16	157,290	,849	,627
Jahr * NDG *	Ertrag_TM	3297,825	24	137,409	1,875	,032
WDH	XP	3,803	24	,158	2,109	,014
	N_Geh_TS	,097	24	,004	2,155	,012
	N_Abfuhr	8579,782	24	357,491	1,922	,027
	N_Zufuhr70	0,000	24	0,000		
	N_Bilanz	8507,743	24	354,489	1,914	,028
Jahr *	Ertrag_TM	2583,585	12	215,299	2,938	,004
Treatment *	XP	1,123	12	,094	1,246	,281
WDH	N_Geh_TS	,029	12	,002	1,271	,267
	N_Abfuhr	3945,690	12	328,808	1,768	,082
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	3923,171	12	326,931	1,765	,082
NDG *	Ertrag_TM	2176,486	24	90,687	1,237	,260
Treatment *	XP	3,214	24	,134	1,782	,044
WDH	N_Geh_TS	,082	24	,003	1,823	,038
	N_Abfuhr	6885,789	24	286,908	1,542	,100
	N_Zufuhr70	0,000	24	0,000		
	N_Bilanz	6871,244	24	286,302	1,546	,099
Jahr *	Ertrag_TM	2558,705	16	159,919	2,182	,019
Betriebsform *	XP	1,129	16	,071	,939	,533
NDG *	N_Geh_TS	,027	16	,002	,903	,571
Treatment	N_Abfuhr	4663,373	16	291,461	1,567	,116
	N_Zufuhr70	4,089	16	,256		
	N_Bilanz	4642,601	16	290,163	1,566	,116
Jahr *	Ertrag_TM	2558,458	24	106,602	1,455	,133
Betriebsform *	XP	2,232	24	,093	1,238	,260
NDG * WDH	N_Geh_TS	,056	24	,002	1,250	,250
	N_Abfuhr	3307,418	24	137,809	,741	,785
	N_Zufuhr70	0,000	24	0,000		
	N_Bilanz	3275,809	24	136,492	,737	,789
Jahr *	Ertrag_TM	1138,448	12	94,871	1,295	,253

Betriebsform *	XP	1,224	12	,102	1,358	,219
Treatment *	N_Geh_TS	,032	12	,003	1,434	,184
WDH	N_Abfuhr	2931,151	12	244,263	1,313	,243
	N_Zufuhr70	0,000	12	0,000		
	N_Bilanz	2942,878	12	245,240	1,324	,237
Betriebsform *	Ertrag_TM	3573,281	24	148,887	2,032	,018
NDG *	XP	2,147	24	,089	1,190	,297
Treatment *	N_Geh_TS	,055	24	,002	1,216	,276
WDH	N_Abfuhr	7722,388	24	321,766	1,730	,053
	N_Zufuhr70	0,000	24	0,000		
	N_Bilanz	7750,441	24	322,935	1,743	,051
Jahr * NDG *	Ertrag_TM	4500,872	48	93,768	1,279	,198
Treatment *	XP	3,922	48	,082	1,087	,387
WDH	N_Geh_TS	,099	48	,002	1,092	,381
	N_Abfuhr	10168,033	48	211,834	1,139	,327
	N_Zufuhr70	0,000	48	0,000		
	N_Bilanz	10127,532	48	210,990	1,139	,327
Fehler	Ertrag_TM	3517,708	48	73,286		
	XP	3,607	48	,075		
	N_Geh_TS	,090	48	,002		
	N_Abfuhr	8929,341	48	186,028		
	N_Zufuhr70	0,000	48	0,000		
	N_Bilanz	8891,842	48	185,247		
Gesamt	Ertrag_TM	13129781,530	360			
	XP	15151,244	360			
	N_Geh_TS	387,754	360			
	N_Abfuhr	14062387,625	360			
	N_Zufuhr70	11840560,000	360			
	N_Bilanz	1852165,609	360			
Korrigierte	Ertrag_TM	530355,105	359			
Gesamtvariation	XP	210,828	359			
	N_Geh_TS	5,418	359			
	N_Abfuhr	702410,638	359			
	N_Zufuhr70	2465156,622	359			
	N_Bilanz	1689016,506	359			

Tabelle 59: Varianztabelle der Düngeversuche Silomais in Braunschweig (sig. Haupt- und Wechselwirkungen **gelb** unterlegt)

		Tests der Zwischensubjekteffekte				
Quelle		Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	Ertrag_TM	345216,654 ^a	173	1995,472	7,610	,000
	XP	373,875 ^b	173	2,161	13,534	,000
	N_Geh_TS	9,604 ^c	173	,056	13,408	,000
	N_Abfuhr	299120,310 ^d	173	1729,019	4,630	,000
	N_Zufuhr70	990174,073 ^e	173	5723,550		
	N_Bilanz	798818,333 ^f	173	4617,447	12,277	,000
Konstanter Term	Ertrag_TM	4368712,624	1	4368712,624	16660,298	,000
	XP	9443,314	1	9443,314	59139,312	,000
	N_Geh_TS	241,702	1	241,702	58374,924	,000
	N_Abfuhr	5430159,668	1	5430159,668	14541,138	,000
	N_Zufuhr70	3405680,842	1	3405680,842		
	N_Bilanz	149666,282	1	149666,282	397,941	,000
Jahr	Ertrag_TM	214123,265	2	107061,633	408,285	,000
	XP	239,583	2	119,792	750,203	,000
	N_Geh_TS	6,147	2	3,073	742,296	,000
	N_Abfuhr	48063,904	2	24031,952	64,354	,000
	N_Zufuhr70	984,650	2	492,325		
	N_Bilanz	56085,431	2	28042,715	74,562	,000
Betriebsform	Ertrag_TM	7573,931	1	7573,931	28,884	,000
	XP	,009	1	,009	,053	,820
	N_Geh_TS	,000	1	,000	,033	,859
	N_Abfuhr	9531,895	1	9531,895	25,525	,000
	N_Zufuhr70	139,263	1	139,263		
	N_Bilanz	7372,794	1	7372,794	19,603	,000
NDG	Ertrag_TM	13991,296	3	4663,765	17,785	,000
	XP	49,683	3	16,561	103,714	,000
	N_Geh_TS	1,271	3	,424	102,307	,000
	N_Abfuhr	91675,076	3	30558,359	81,831	,000
	N_Zufuhr70	931506,667	3	310502,222		
	N_Bilanz	520416,981	3	173472,327	461,238	,000
Treatment	Ertrag_TM	456,767	1	456,767	1,742	,204
	XP	3,847	1	3,847	24,094	,000
	N_Geh_TS	,098	1	,098	23,764	,000
	N_Abfuhr	1061,268	1	1061,268	2,842	,110
	N_Zufuhr70	7,895	1	7,895		
	N_Bilanz	17743,245	1	17743,245	47,177	,000
WDH	Ertrag_TM	1085,490	3	361,830	1,380	,283
	XP	,602	3	,201	1,257	,321
	N_Geh_TS	,015	3	,005	1,174	,349
	N_Abfuhr	619,729	3	206,576	,553	,653
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	620,099	3	206,700	,550	,655
Jahr * Betriebsform	Ertrag_TM	219,027	2	109,513	,418	,665
	XP	2,040	2	1,020	6,387	,009
	N_Geh_TS	,052	2	,026	6,325	,009
	N_Abfuhr	4726,082	2	2363,041	6,328	,009
	N_Zufuhr70	264,600	2	132,300		
	N_Bilanz	3909,744	2	1954,872	5,198	,017
Betriebsform * NDG	Ertrag_TM	1586,406	3	528,802	2,017	,150
	XP	,912	3	,304	1,904	,167
	N_Geh_TS	,023	3	,008	1,829	,180
	N_Abfuhr	348,618	3	116,206	,311	,817
	N_Zufuhr70	48,222	3	16,074		
	N_Bilanz	414,391	3	138,130	,367	,778
Betriebsform * Treatment	Ertrag_TM	50,589	1	50,589	,193	,666
	XP	1,713	1	1,713	10,729	,004
	N_Geh_TS	,044	1	,044	10,622	,005
	N_Abfuhr	572,985	1	572,985	1,534	,232
	N_Zufuhr70	0,000	1	0,000		
	N_Bilanz	570,270	1	570,270	1,516	,235
Betriebsform * WDH	Ertrag_TM	2069,614	3	689,871	2,631	,083
	XP	5,349	3	1,783	11,165	,000

	N_Geh_TS	,136	3	,045	10,948	,000
	N_Abfuhr	3094,959	3	1031,653	2,763	,074
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	3052,622	3	1017,541	2,705	,078
Jahr * NDG	Ertrag_TM	8619,381	6	1436,563	5,478	,003
	XP	10,673	6	1,779	11,140	,000
	N_Geh_TS	,277	6	,046	11,143	,000
	N_Abfuhr	33159,209	6	5526,535	14,799	,000
	N_Zufuhr70	465,208	6	77,535		
	N_Bilanz	36565,285	6	6094,214	16,204	,000
Jahr * Treatment	Ertrag_TM	44,272	2	22,136	,084	,919
	XP	1,275	2	,638	3,993	,038
	N_Geh_TS	,032	2	,016	3,857	,042
	N_Abfuhr	2426,449	2	1213,224	3,249	,064
	N_Zufuhr70	42,650	2	21,325		
	N_Bilanz	3719,718	2	1859,859	4,945	,020
Jahr * WDH	Ertrag_TM	2746,975	6	457,829	1,746	,171
	XP	2,716	6	,453	2,835	,042
	N_Geh_TS	,072	6	,012	2,918	,038
	N_Abfuhr	3279,432	6	546,572	1,464	,249
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	3263,833	6	543,972	1,446	,255
NDG * Treatment	Ertrag_TM	2644,418	3	881,473	3,362	,043
	XP	1,021	3	,340	2,132	,134
	N_Geh_TS	,026	3	,009	2,085	,140
	N_Abfuhr	5071,489	3	1690,496	4,527	,017
	N_Zufuhr70	59,651	3	19,884		
	N_Bilanz	16976,614	3	5658,871	15,046	,000
NDG * WDH	Ertrag_TM	3480,780	9	386,753	1,475	,234
	XP	2,352	9	,261	1,637	,182
	N_Geh_TS	,063	9	,007	1,678	,171
	N_Abfuhr	4637,296	9	515,255	1,380	,271
	N_Zufuhr70	0,000	9	0,000		
	N_Bilanz	4613,047	9	512,561	1,363	,278
Treatment * WDH	Ertrag_TM	2304,398	3	768,133	2,929	,063
	XP	1,401	3	,467	2,924	,064
	N_Geh_TS	,037	3	,012	2,970	,061
	N_Abfuhr	4212,520	3	1404,173	3,760	,031
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	4185,702	3	1395,234	3,710	,032
Jahr * Betriebsform * NDG	Ertrag_TM	6970,553	6	1161,759	4,430	,007
	XP	,479	6	,080	,500	,800
	N_Geh_TS	,013	6	,002	,535	,775
	N_Abfuhr	6846,700	6	1141,117	3,056	,032
	N_Zufuhr70	95,278	6	15,880		
	N_Bilanz	6413,435	6	1068,906	2,842	,042
Jahr * Betriebsform * Treatment	Ertrag_TM	785,556	2	392,778	1,498	,252
	XP	,218	2	,109	,683	,519
	N_Geh_TS	,005	2	,003	,625	,547
	N_Abfuhr	420,774	2	210,387	,563	,580
	N_Zufuhr70	0,000	2	0,000		
	N_Bilanz	415,913	2	207,956	,553	,585
Jahr * Betriebsform * WDH	Ertrag_TM	2521,783	6	420,297	1,603	,207
	XP	2,022	6	,337	2,111	,106
	N_Geh_TS	,051	6	,008	2,049	,114
	N_Abfuhr	1813,726	6	302,288	,809	,577
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	1831,127	6	305,188	,811	,575
Betriebsform * NDG * Treatment	Ertrag_TM	2409,626	3	803,209	3,063	,056
	XP	,083	3	,028	,173	,913
	N_Geh_TS	,002	3	,001	,180	,908
	N_Abfuhr	1839,499	3	613,166	1,642	,217
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	1831,643	3	610,548	1,623	,221
Betriebsform * NDG * WDH	Ertrag_TM	3227,471	9	358,608	1,368	,276
	XP	,160	9	,018	,111	,999
	N_Geh_TS	,004	9	,000	,120	,999
	N_Abfuhr	4095,089	9	455,010	1,218	,346

	N_Zufuhr70	0,000	9	0,000		
	N_Bilanz	4111,835	9	456,871	1,215	,348
Betriebsform *	Ertrag_TM	3075,956	3	1025,319	3,910	,027
Treatment *	XP	,249	3	,083	,519	,675
WDH	N_Geh_TS	,006	3	,002	,515	,677
	N_Abfuhr	2260,519	3	753,506	2,018	,150
	N_Zufuhr70	0,000	3	0,000		
	N_Bilanz	2299,415	3	766,472	2,038	,147
Jahr * NDG *	Ertrag_TM	2321,089	6	386,848	1,475	,245
Treatment	XP	,781	6	,130	,815	,573
	N_Geh_TS	,020	6	,003	,811	,576
	N_Abfuhr	2573,450	6	428,908	1,149	,378
	N_Zufuhr70	151,986	6	25,331		
	N_Bilanz	4014,309	6	669,052	1,779	,163
Jahr * NDG *	Ertrag_TM	5240,376	18	291,132	1,110	,417
WDH	XP	3,633	18	,202	1,264	,317
	N_Geh_TS	,093	18	,005	1,243	,329
	N_Abfuhr	8781,137	18	487,841	1,306	,293
	N_Zufuhr70	0,000	18	0,000		
	N_Bilanz	8802,072	18	489,004	1,300	,296
Jahr *	Ertrag_TM	4807,706	6	801,284	3,056	,032
Treatment *	XP	,906	6	,151	,946	,489
WDH	N_Geh_TS	,023	6	,004	,929	,499
	N_Abfuhr	2556,228	6	426,038	1,141	,381
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	2582,374	6	430,396	1,144	,380
NDG *	Ertrag_TM	1545,272	9	171,697	,655	,737
Treatment *	XP	2,188	9	,243	1,523	,218
WDH	N_Geh_TS	,056	9	,006	1,507	,223
	N_Abfuhr	3947,660	9	438,629	1,175	,370
	N_Zufuhr70	0,000	9	0,000		
	N_Bilanz	3955,917	9	439,546	1,169	,373
Jahr *	Ertrag_TM	2879,159	6	479,860	1,830	,153
Betriebsform *	XP	1,315	6	,219	1,373	,281
NDG *	N_Geh_TS	,034	6	,006	1,379	,279
Treatment	N_Abfuhr	2684,614	6	447,436	1,198	,354
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	2693,608	6	448,935	1,194	,356
Jahr *	Ertrag_TM	8789,021	18	488,279	1,862	,103
Betriebsform *	XP	3,349	18	,186	1,165	,378
NDG * WDH	N_Geh_TS	,087	18	,005	1,167	,377
	N_Abfuhr	14325,526	18	795,863	2,131	,063
	N_Zufuhr70	0,000	18	0,000		
	N_Bilanz	14336,237	18	796,458	2,118	,064
Jahr *	Ertrag_TM	8235,908	6	1372,651	5,235	,003
Betriebsform *	XP	,406	6	,068	,424	,853
Treatment *	N_Geh_TS	,010	6	,002	,412	,861
WDH	N_Abfuhr	9742,189	6	1623,698	4,348	,008
	N_Zufuhr70	0,000	6	0,000		
	N_Bilanz	9699,372	6	1616,562	4,298	,008
Betriebsform *	Ertrag_TM	1523,351	9	169,261	,645	,744
NDG *	XP	,774	9	,086	,539	,827
Treatment *	N_Geh_TS	,019	9	,002	,516	,843
WDH	N_Abfuhr	2774,861	9	308,318	,826	,602
	N_Zufuhr70	0,000	9	0,000		
	N_Bilanz	2778,932	9	308,770	,821	,606
Jahr * NDG *	Ertrag_TM	4260,287	18	236,683	,903	,585
Treatment *	XP	3,110	18	,173	1,082	,437
WDH	N_Geh_TS	,082	18	,005	1,104	,421
	N_Abfuhr	7301,461	18	405,637	1,086	,434
	N_Zufuhr70	0,000	18	0,000		
	N_Bilanz	7321,930	18	406,774	1,082	,438
Fehler	Ertrag_TM	4457,790	17	262,223		
	XP	2,715	17	,160		
	N_Geh_TS	,070	17	,004		
	N_Abfuhr	6348,383	17	373,434		
	N_Zufuhr70	0,000	17	0,000		
	N_Bilanz	6393,721	17	376,101		

Gesamt	Ertrag_TM	4945178,910	191		
	XP	10273,086	191		
	N_Geh_TS	263,009	191		
	N_Abfuhr	6008936,599	191		
	N_Zufuhr70	4541703,000	191		
	N_Bilanz	967398,883	191		
Korrigierte	Ertrag_TM	349674,445	190		
Gesamtvariation	XP	376,589	190		
	N_Geh_TS	9,675	190		
	N_Abfuhr	305468,693	190		
	N_Zufuhr70	990174,073	190		
	N_Bilanz	805212,054	190		

Teilprojekt Klimagase

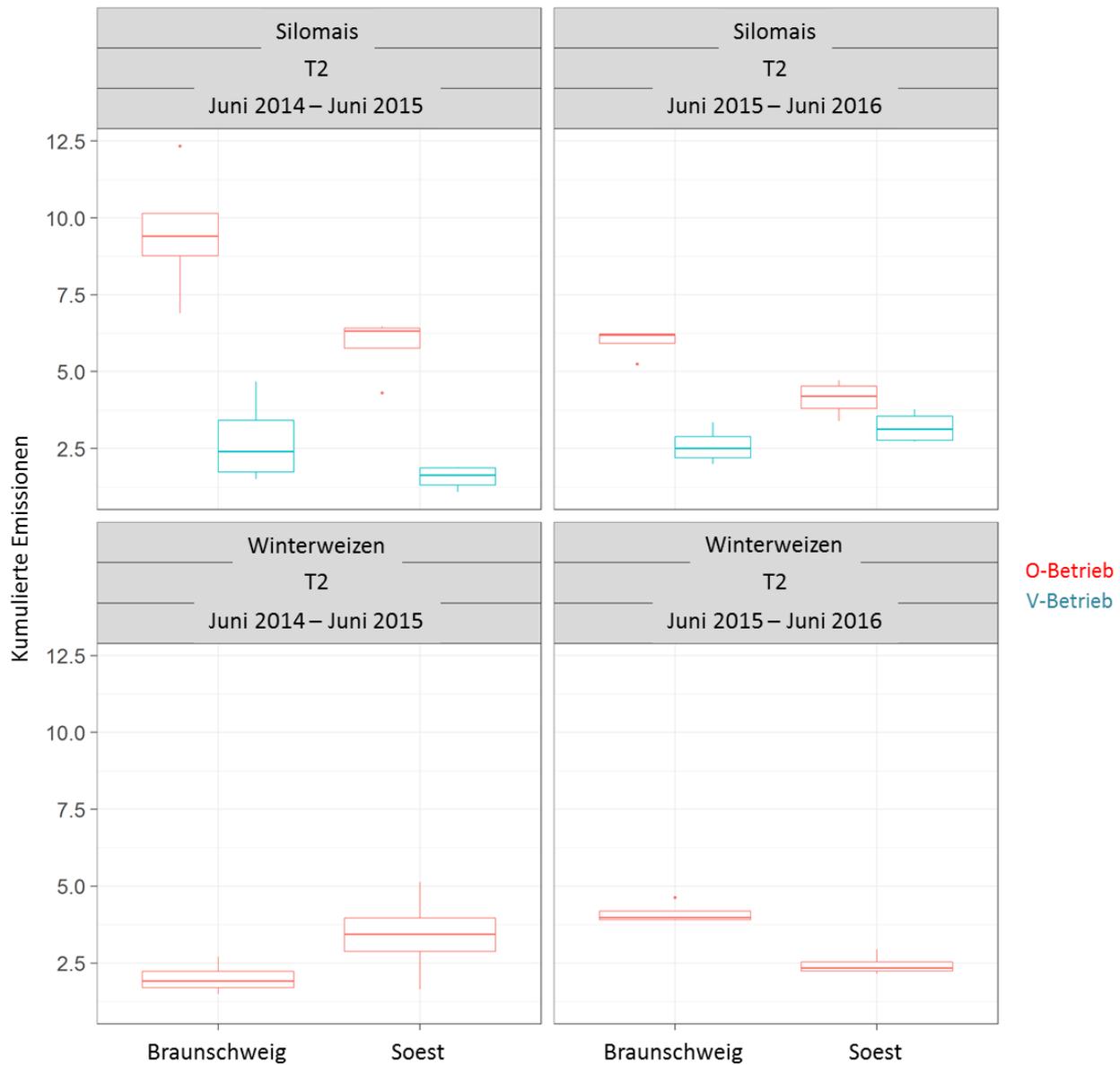


Abbildung 132: Vergleich der kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N/ha/a) über die Zeiträume Juni 2014 – Juni 2015 und Juni 2015 – Juni 2016. Untersuchung der Früchte Silomais und Winterweizen in den Betrieben O und V in der Variante (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

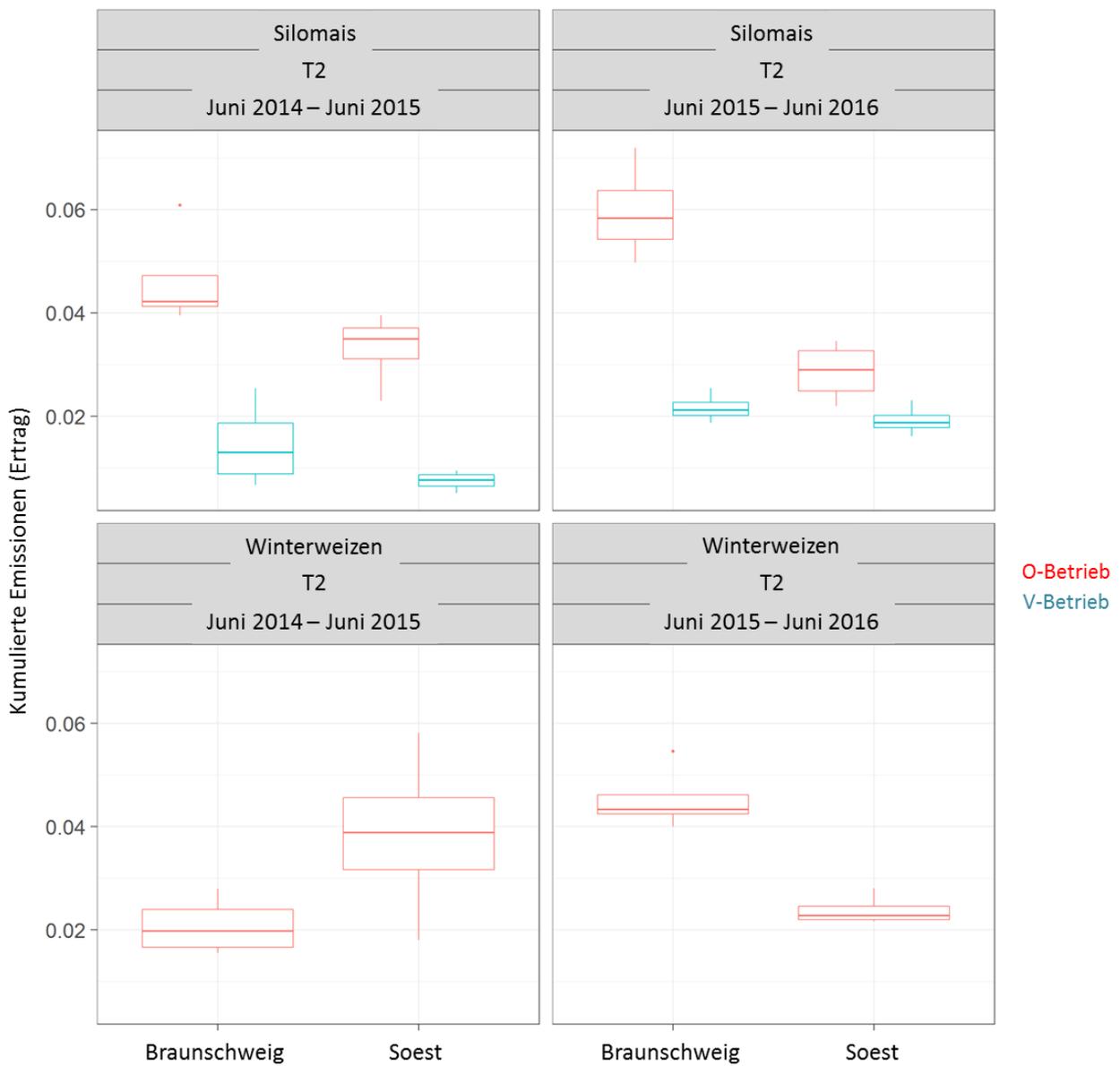


Abbildung 133: Vergleich der ertragsbezogenen kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N/dt/ha) über die Zeiträume Juni 2014 – Juni 2015 und Juni 2015 – Juni 2016. Untersuchung der Früchte Silomais und Winterweizen in den Betrieben O und V in der Variante (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

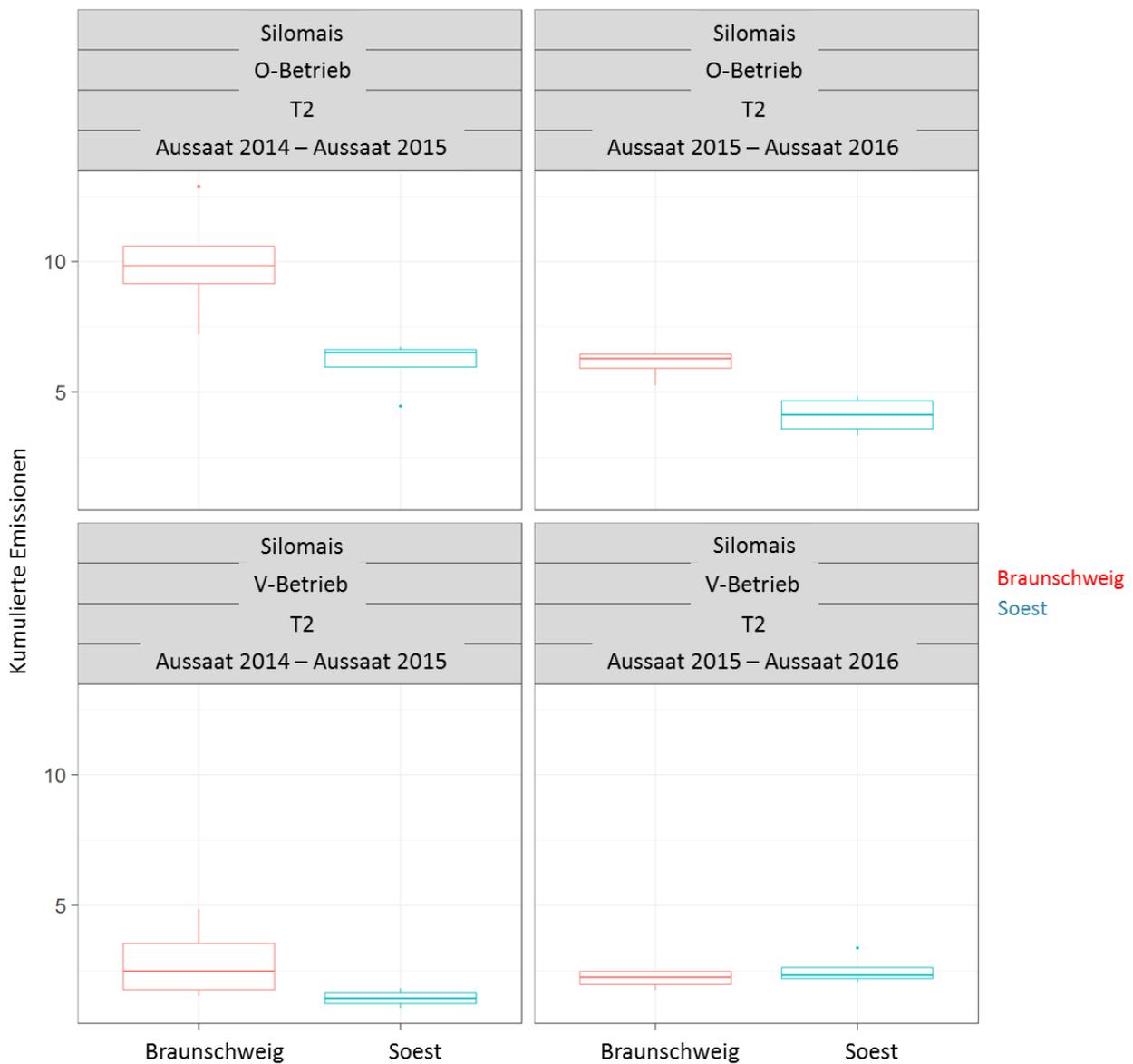


Abbildung 134: Vergleich der kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N/ha/a) über die Zeiträume Aussaat Silomais 2014 – Aussaat Silomais 2015 und Aussaat Silomais 2015 – Aussaat Silomais 2016. Untersuchung der Frucht Silomais in den Betrieben O und V in der Variante (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

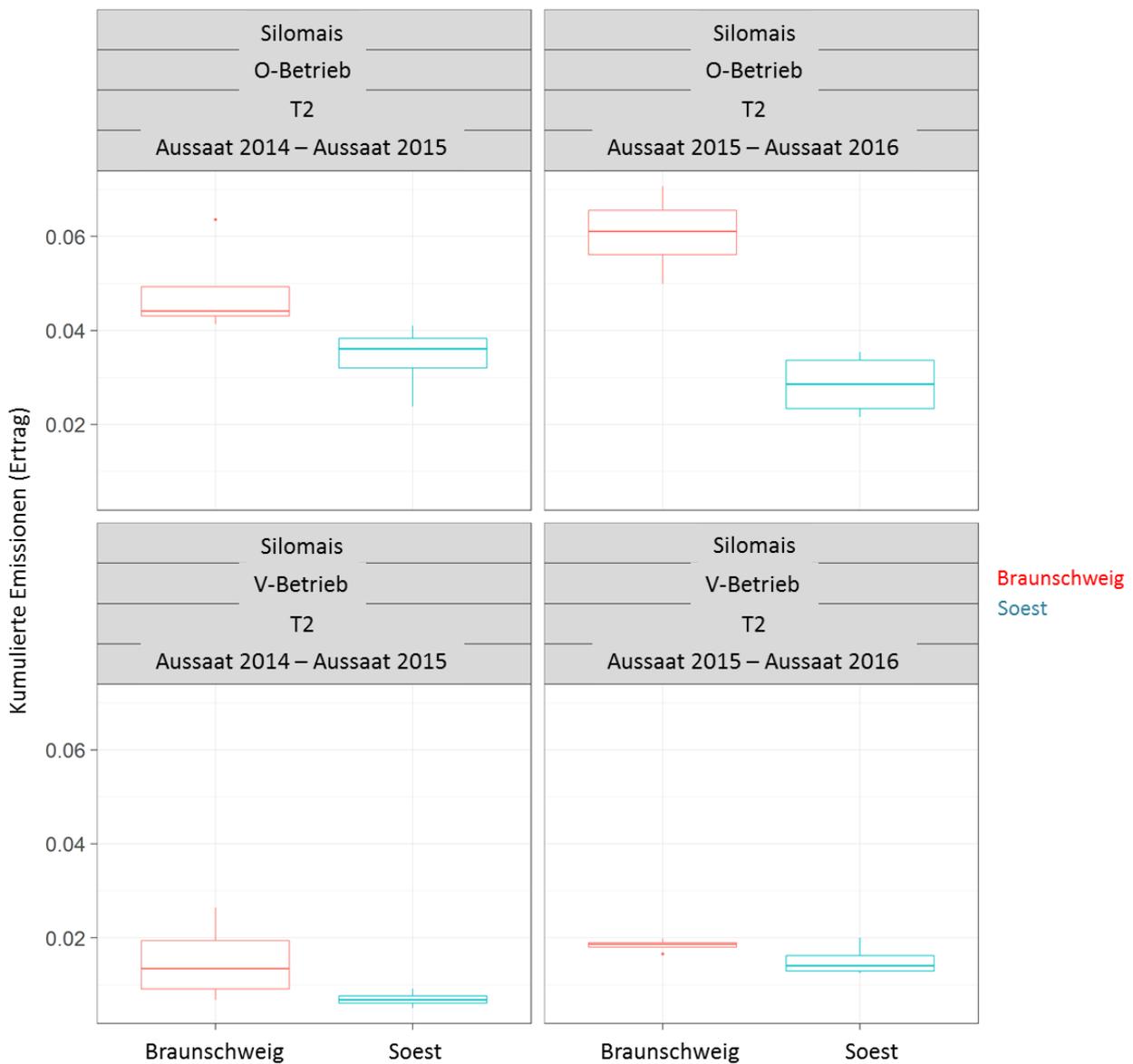


Abbildung 135: Vergleich der ertragsbezogenen kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N/dt/ha) über die Zeiträume Aussaat Silomais 2014 – Aussaat Silomais 2015 und Aussaat Silomais 2015 – Aussaat Silomais 2016. Untersuchung der Frucht Silomais in den Betrieben O und V in der Variante (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

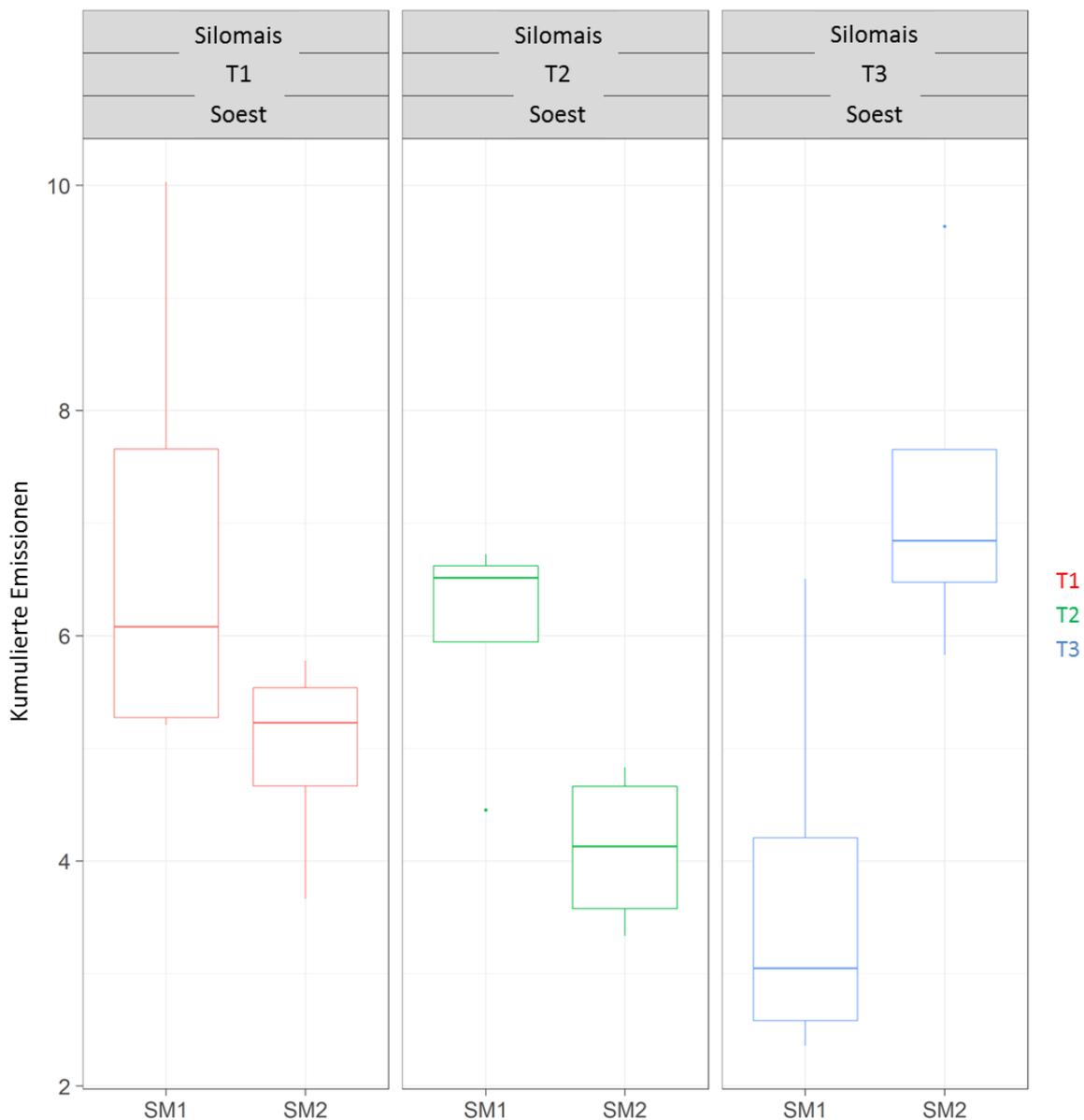


Abbildung 136: Vergleich der kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N /ha/a) über die Zeiträume Aussaat Silomais 2014 – Aussaat Silomais 2015 (SM1) und Aussaat Silomais 2015 – Aussaat Silomais 2016 (SM2). Untersuchung der Frucht Silomais im Betrieb O in den Varianten (T1), (T2) und (T3) am Standort Soest.

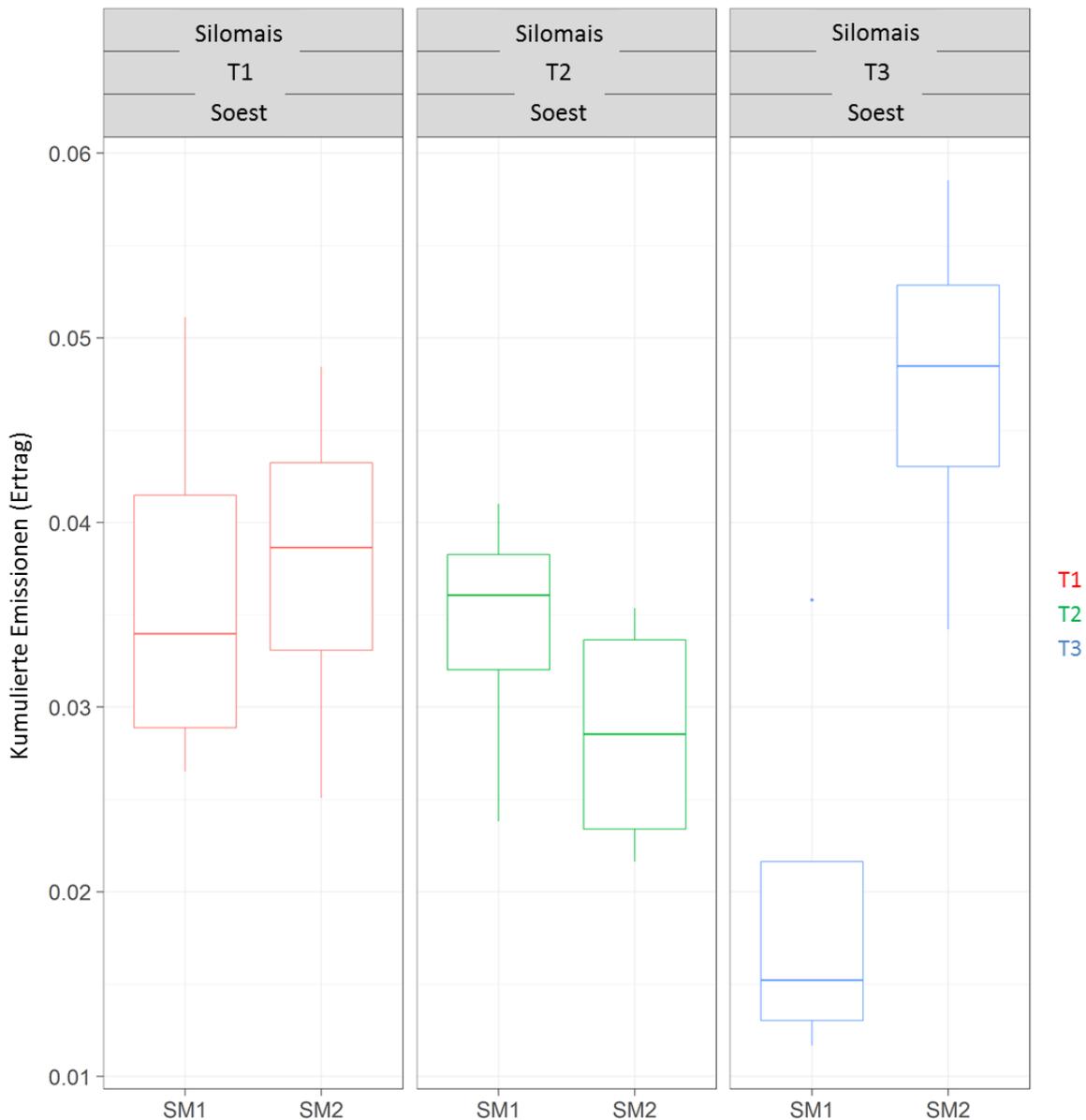


Abbildung 137: Vergleich der ertragsbezogenen kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N/dt/ha) über die Zeiträume Aussaat Silomais 2014 – Aussaat Silomais 2015 (SM1) und Aussaat Silomais 2015 – Aussaat Silomais 2016 (SM2). Untersuchung der Frucht Silomais im Betrieb O in den Varianten (T1), (T2) und (T3) am Standort Soest.

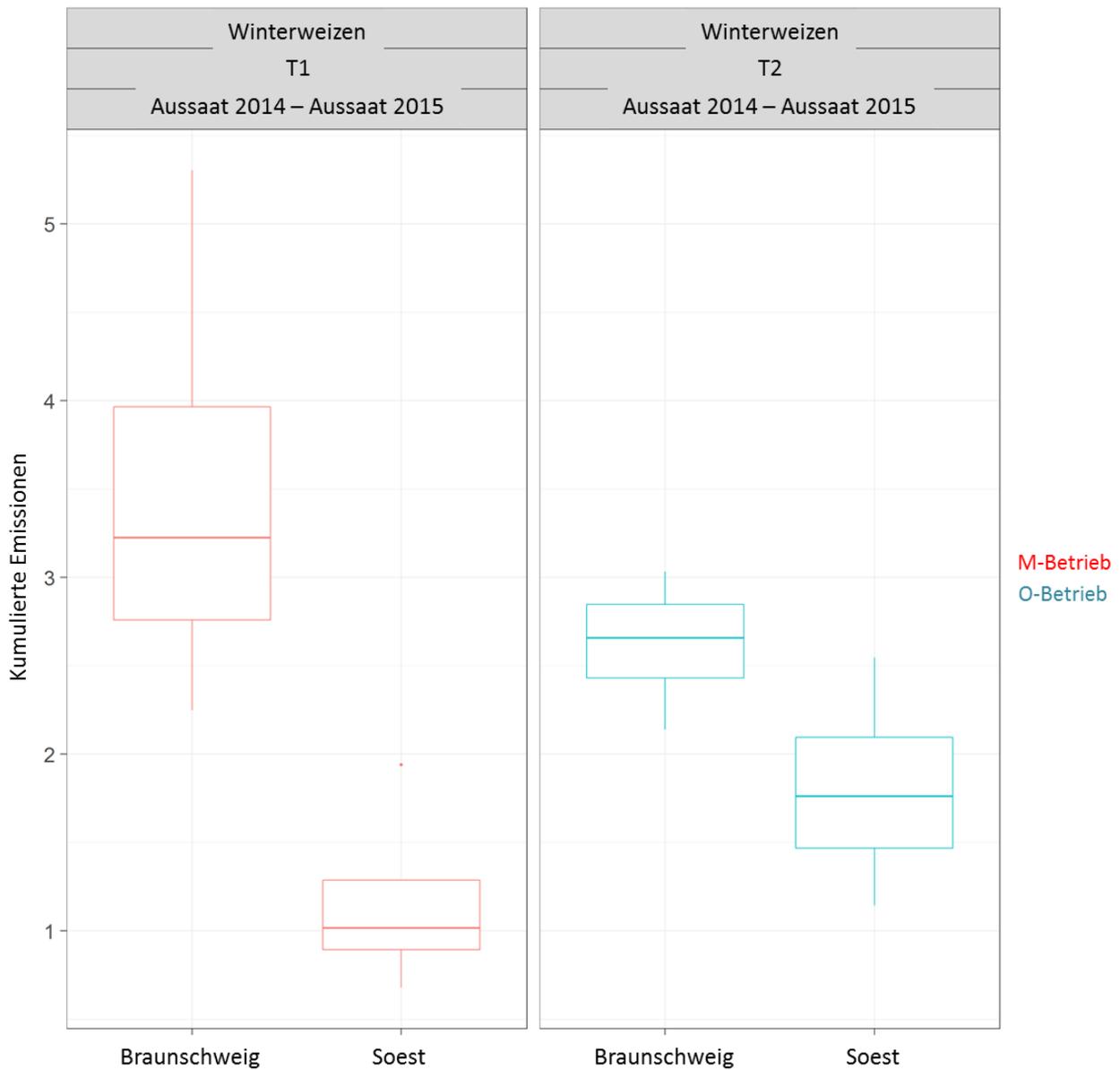


Abbildung 138: Vergleich der kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N/ha/a) über den Zeitraum Aussaat Winterweizen 2014 – Aussaat Winterweizen 2015. Untersuchung der Frucht Winterweizen in den Betrieben O und M in den Varianten (T1) und (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.

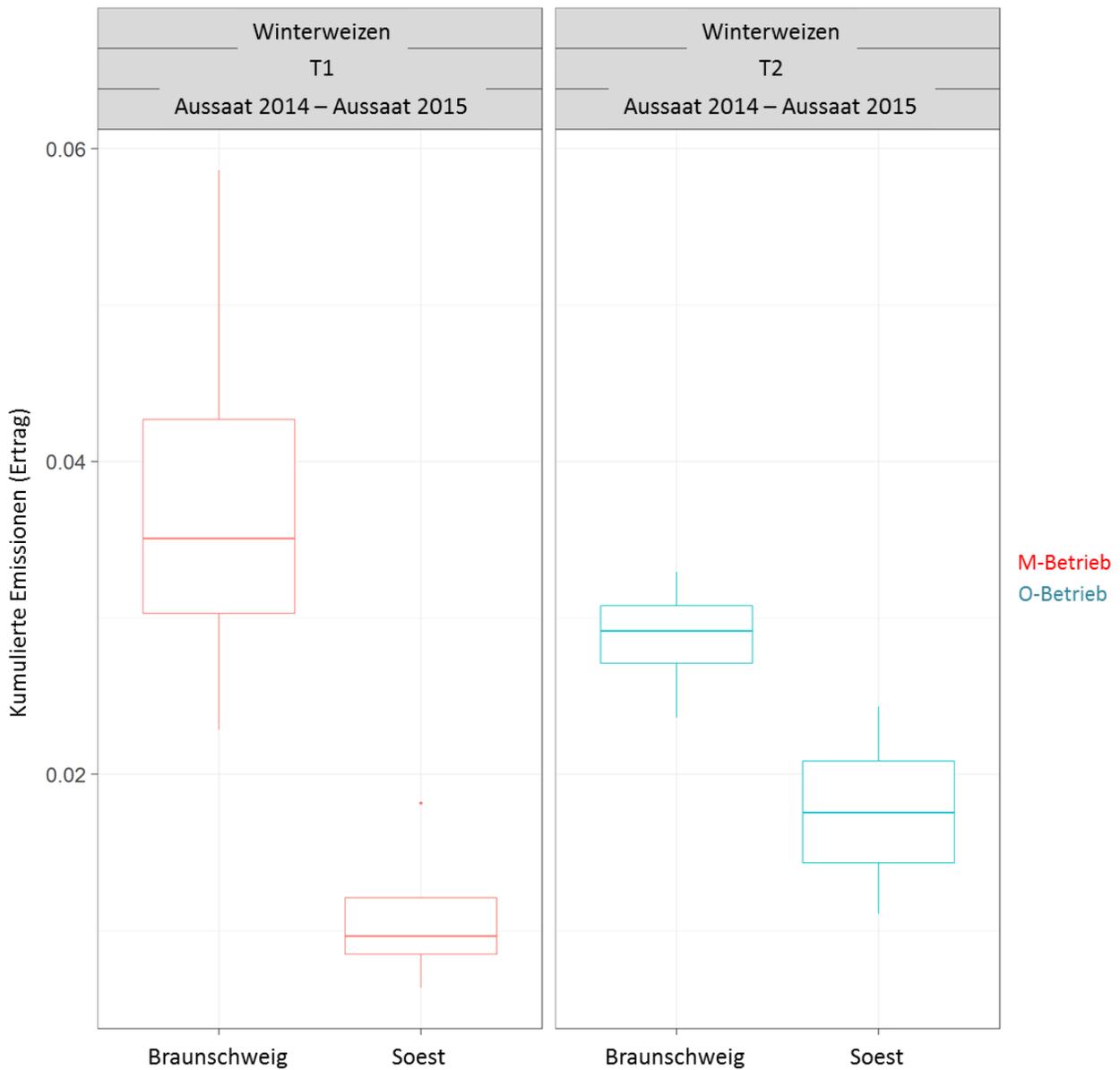


Abbildung 139: Vergleich der ertragsbezogenen kumulierten Lachgasemissionen (kg N₂O-N/dt/ha) über den Zeitraum Aussaat Winterweizen 2014 – Aussaat Winterweizen 2015. Untersuchung der Frucht Winterweizen in den Betrieben O und M in den Varianten (T1) und (T2) an den beiden Standorten Soest und Braunschweig.