Landwirtschaftskammer Niedersachsen

LBEG Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

GRUNDWASSERSCHUTZORIENTIERTE DAUERVERSUCHE

Hamerstorf (643)

- Auswaschungsperioden 2014/2015 bis 2021/2022 -

LWK Niedersachsen

Karen Peters
Wolfgang Klahsen
Andrea Knigge-Sievers

LBEG

Arne Brummerloh
Norbert Bischoff
Annegret Fier
Linda Noltemeyer

01. Juli 2025

Impressum

Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche

Hamerstorf

Auswaschungsperioden 2014/2015 bis 2021/2022

Abschlussbericht

Herausgeber:

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK Ni)

Mars-la-Tour-Straße 1-13 26121 Oldenburg

Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)

Stilleweg 2 30655 Hannover

Zitationsvorschlag:

LWK Ni & LBEG (2025). Hamerstorf (643) – Auswaschungsperioden 2014/2015 bis 2021/2022. – Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche: 156 S., 66 Abb., 21 Tab., Anh.; Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK Ni) & Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Oldenburg & Hannover.

Datum der Veröffentlichung:

01.07.2025

Titelbild:

Mitte Links: Block mit konventionell bewirtschafteter Fruchtfolge, Mitte Rechts: Block mit grundwasserschutzorientierter Fruchtfolge (dauerbegrünt). © Arne Brummerloh

Hinweis:

Dieser Versuchsbericht sowie die Anlage, Betreuung und Auswertung der Versuche werden durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz finanziert.

Inhaltsverzeichnis

Impressum I
Abkürzungsverzeichnis IV
Abbildungsverzeichnis V
Tabellenverzeichnis IX
Kurzfassung XI
1 Einleitung 1
2 Material und Methoden 2
2.1 Standort 2
2.2 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung 4
2.3 Witterung 9
2.4 Aufbau der Sickerwasseranlage 12
2.5 Berechnungsverfahren 14
2.5.1 Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs zur Berechnung des ökonomischen Düngungs- und Ertragsoptimums 14
2.5.2 Stickstoff-Mineraldüngeräquivalente (N-MDÄ) 16
2.5.3 N-Gehalt im Erntegut 17
2.5.4 N-Angebot und N-Abfuhr 17
2.5.5 N-Bilanzsaldo 18
2.5.6 N-Düngeeffizienz 18
2.5.7 Getreideeinheiten 19
2.5.8 N_{min}-Methode 19
2.5.9 Nitratkonzentrationen 20
2.5.10 Nitratfrachten 21
2.6 Statistik 24
3 Ergebnisse 25
3.1 Erträge, Qualitäten, N-Abfuhren 25
3.2 N-Bilanzsalden und N-Düngeeffizienz 40
3.3 N_{min}-Werte 47
3.4 Berechnung der standörtlichen optimalen N-Düngung 59
3.5 Standörtliche N-Mineraldüngeräquivalente (N-MDÄ) 62
4 Sickerwasseruntersuchungen (LBEG) 64
4.1 Wasserhaushalt 64
4.1.1 Kartoffel 67
4.1.2 Winterroggen 67
4.1.3 Silomais 68
4.1.4 Braugerste 68
4.2 NO_3-Konzentration 68

4.2.1 Kartoffel 71
4.2.2 Winterroggen 72
4.2.3 Silomais 73
4.2.4 Braugerste 73
4.2.5 Mittel über beide Fruchtfolgezyklen 74
4.3 NO_3-N-Frachten im Sickerwasser 75
4.3.1 Kartoffel 76
4.3.2 Winterroggen 77
4.3.3 Silomais 77
4.3.4 Braugerste 78
4.3.5 Mittel über beide Fruchtfolgezyklen 78
4.4 Zusammenhang zwischen NO_3-Konzentration und Herbst-Nmin 79
4.5 Eignung der Herbst-Nmin-Methode zur Abschätzung der NO_3-Konzentration 81

5 Zusammenfassung und Diskussion 85

F1: Welchen Einfluss hat die N-Düngung und die Fruchtfolgegestaltung auf Ertrag und Qualität der angebauten Kulturen, die N-Dynamik im Boden und den N-Austrag mit dem Sickerwasser? 85
F2: Wie wirkt sich die Fruchtfolgegestaltung auf die wirtschaftlichen N-Düngungsoptima aus? 94
F3: Wie beeinflusst ein stabilisierter N-Dünger (ENTEC) (Variante 7) Ertrag, Qualität und N_{min}-Werte im Vergleich zu einem konventionellen Stickstoffdünger in den unterschiedlichen Fruchtfolgen? 95
F4: Wie wirkt eine reduzierte N-Düngung (Variante 8) auf Ertrag, Qualität und N_{min}-Werte in den unterschiedlichen Fruchtfolgen? 97
F5: Wie hoch sind die N-Mineraldüngeräquivalente des organischen Düngemittels und ist ein Einfluss der Fruchtfolge erkennbar? 98

6 Schlussfolgerung 100
7 Ausblick 104
8 Ergebnistransfer 107
9 Danksagung 108
Literaturverzeichnis 109
Anhang XII

A. Monatliche Witterungsdaten für den Versuch Hamerstorf XII
B. kC-Werte zur Umrechnung der ETp in die ETa XIX
C. Überblick über alle Versuchsergebnisse der Jahre 2014 bis 2021 XXI
D. N-Düngebedarfsermittlungen für die angebauten Kulturen XXXVII

Abkürzungsverzeichnis

Ah	Austauschhäufigkeit des Bodenwassers
C	Kohlenstoff
C_{org}	Organischer Kohlenstoff
ETa	aktuelle Verdunstung
ETp	potenzielle Verdunstung
FK	Feldkapazität
FKWe	Feldkapazität in der effektiven Durchwurzelungstiefe
FM	Frischmasse
GE	Getreideeinheit
GD	Grenzdifferenz
gws	grundwasserschutzorientiert
kC	Bestandskoeffizient
konv	konventionell
KWB	klimatische Wasserbilanz
N	Stickstoff
N-MDÄ	Stickstoff-Mineraldüngeräquivalent
NO_3	Nitrat
N_{min}	mineralischer Stickstoff
P	korrigierter Niederschlag
SW	Sickerwassermenge
SWP	Sickerwasserperiode
Temp	Temperatur
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
W	Bodenwasservorrat
We	effektive Durchwurzelungstiefe
WH	Winterhalbjahr

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Lage des Wasserschutzversuches 643 Hamerstorf *2*
Abbildung 2-2: Bodenprofil S5-8, Braunerde-Pseudogley *3*
Abbildung 2-3: Versuchsaufbau des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf, dargestellte N-Düngevarianten beispielhaft für Winterroggen/Mais, nicht maßstabsgerecht *4*
Abbildung 2-4:Aufbau der Sickerwasseranlage *13*
Abbildung 2-5: Das Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs, verändert nach Mitscherlich *14*
Abbildung 3-1: Knollenertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2014 und 2018 ..... *26*
Abbildung 3-2: Relativer Ertrag zur konv. Var. 4 in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2014 und 2018 ..... *26*
Abbildung 3-3: Stärkegehalt in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018 ..... *27*
Abbildung 3-4: N-Abfuhr in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018 ..... *28*
Abbildung 3-5: Kornertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) in Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2017 und 2021 ..... *29*
Abbildung 3-6: Relativer Kornertrag zur konv. Var. 4 in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2014 und 2018 ..... *29*
Abbildung 3-7: Rohproteingehalt in der TM ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021 ..... *30*
Abbildung 3-8: N-Abfuhr in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021 ..... *31*
Abbildung 3-9: N-Aufnahme von Ölrettich (konv.) und Untersaat Rotschwingel (gws.) in kg N/ha (n=1) nach Braugerste im Versuchsjahr 2017 ..... *31*
Abbildung 3-10: Trockenmasse-Ertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019 ..... *32*
Abbildung 3-11: Relativer Kornertrag zur konv. Var. 4 in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019 ..... *33*
Abbildung 3-12: Rohproteingehalt in der TM ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019 ..... *33*
Abbildung 3-13: N-Abfuhr kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019 ..... *34*
Abbildung 3-14: Trockenmasse-Ertrag in dt/ha (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016 ..... *35*

Abbildung 3-15: Trockenmasse-Ertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Silomais der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020 35
Abbildung 3-16: Relativer Ertrag zur konv. Var. 4 in % (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016 36
Abbildung 3-17: Rohproteingehalt in der TM (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016 37
Abbildung 3-18: Rohproteingehalt in der TM ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Silomais der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020 37
Abbildung 3-19: N-Abfuhr in kg N/ha (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016 38
Abbildung 3-20: Erträge in Getreideeinheiten der Hauptkulturen inkl. Untersaat (gws) ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 7) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021 39
Abbildung 3-21: Erträge in Getreideeinheiten der Hauptkulturen inkl. Untersaat (gws) der Variante 4 der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2014 – 2021(WW=Welsches Weidelgras, RS=Rotschwingel, US=Untersaat, ÖR=Ölrettich) 39
Abbildung 3-22: N-Abfuhr in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 7) der Hauptkulturen inkl. Untersaaten (gws) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021 40
Abbildung 3-23: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018 41
Abbildung 3-24: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018 41
Abbildung 3-25: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Winterroggen (GPS + US) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019 42
Abbildung 3-26: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019 43
Abbildung 3-27: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021 43
Abbildung 3-28: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021 44
Abbildung 3-29: Netto-N-Bilanzsalden in % (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge für das Versuchsjahr 2016 45
Abbildung 3-30: N-Düngeeffizienz in % (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge für das Versuchsjahr 2016 45
Abbildung 3-31: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=7) der Hauptfrüchte inkl. Untersaat der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021 46
Abbildung 3-32: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=7) der Hauptfrüchte im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021 47
Abbildung 3-33: Ernte-N_{min}-Wert in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Kartoffel im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018 48

Abbildung 3-34: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Kartoffel im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018 49
Abbildung 3-35: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Kartoffel im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018..... 49
Abbildung 3-36: Ernte-N_{min}-Wert in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Winterroggen/ Winterroggen GPS im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019..... 50
Abbildung 3-37: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Winterroggen/ Winterroggen GPS im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019..... 50
Abbildung 3-38: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Winterroggen/ Winterroggen GPS im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019..... 51
Abbildung 3-39: Ernte-N_{min}-Werte in kg N/ha (n=1) nach Silomais für das Versuchsjahr 2016 51
Abbildung 3-40: Ernte-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Silomais in der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020.... 52
Abbildung 3-41: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha (n=1) nach Silomais für das Versuchsjahr 2016 52
Abbildung 3-42: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Silomais in der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020.... 53
Abbildung 3-43: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha (n=1) nach Silomais für das Versuchsjahr 2016..... 53
Abbildung 3-44: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Silomais in der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020..... 54
Abbildung 3-45: Ernte-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler(Fehlerbalken, n=2) nach Braugerste im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021 54
Abbildung 3-46: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler(Fehlerbalken, n=2) nach Braugerste im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021 55
Abbildung 3-47: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Braugerste im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021 55
Abbildung 3-48: Verlauf der N_{min}-Werte, Temperatur und Niederschlagshöhe in den Versuchsjahren 2014 - 2017 in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge 57
Abbildung 3-49: Verlauf der N_{min}-Werte, Temperatur und Niederschlagshöhe in den Versuchsjahren 2018 - 2021 in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge 58
Abbildung 3-50: Standörtliche N-Mineraldüngeräquivalente und N-Düngung (Gesamt-N aus Organik) in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge der Versuchsjahre 2015 – 2021..... 63
Abbildung 4-1: Tagesgenaue Werte der Sickerwassermenge im Versuchszeitraum 2014-2022 am Beispiel von gws4. 66
Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf der NO_3-Konzentration im Untersuchungszeitraum von der SWP 2014/2015 bis 2021/2022 über alle Kulturen..... 69
Abbildung 4-3: Mittlere NO_3-Konzentration je Kultur und SWP in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Die rot gestrichelte Linie stellt den Grenzwert nach TrinkwV von 50 mg NO_3/l als Orientierungswert dar. 71
Abbildung 4-4: NO_3-Konzentration im Mittel über alle Kulturen je Fruchtfolgezyklus von der SWP 2014/2015 bis 2017/2018 und 2018/2019 bis 2021/2022 mit Standardfehlern. Der TrinkwV-Grenzwert dient hier nur zur Orientierung. 75

Abbildung 4-5: NO_3-N-Frachten der einzelnen Kulturen im Verlauf des Versuchszeitraumes von 2014 bis 2022 76
Abbildung 4-6: NO_3-N-Fracht im Mittel über alle Kulturen je Fruchtfolgezyklus von der SWP 2014/2015 bis 2017/2018 und 2018/2019 bis 2021/2022 mit Standardfehlern 79
Abbildung 4-7: Zusammenhang zwischen der mittleren NO_3-Konzentration im Winterhalbjahr und dem Herbst-N_{min}. Dargestellt sind alle mit Saugsonden ausgestatteten Varianten über den Zeitraum 2014/2015 – 2021/2022. Die statistischen Kennwerte wurden anhand log-transformierter Daten ermittelt. 80
Abbildung 7-1: Neue konventionelle und grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf ab 2023 105
Abbildung 7-2: Versuchsaufbau des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf ab dem Jahr 2023, dargestellte N-Düngevarianten beispielhaft für Winterroggen/Mais. Rot umrandet: Parzellen, die seit 2014 mit Saugsonden ausgestattet sind, Orange umrandet: Parzellen, die im Nov. 2021 mit Saugsonden ausgestattet wurden. nicht maßstabsgerecht 106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Fruchtfolge auf dem Feldversuch *5*
Tabelle 2-2: Saat- und Erntetermine der einzelnen Kulturen in den Versuchsjahren 2014 bis 2021 am Standort Hamerstorf *6*
Tabelle 2-3: N-Düngestufen des Wasserschutzversuchs Hamerstorf *7*
Tabelle 2-4: Trockensubstanz, pH-Wert und Nährstoffgehalte der eingesetzten Gärreste in den Versuchsjahren 2014 bis 2021 am Standort Hamerstorf *7*
Tabelle 2-5: Beregnungstermine des Feldversuchs *8*
Tabelle 2-6: Reihenfolge der verwendeten Wetterstationen je nach Datenverfügbarkeit des untersuchten Parameters *10*
Tabelle 2-7: Wetterdaten für den Versuch Hamerstorf 643 im Jahresmittel, im Mittel einer Sickerwasserperiode (SWP, jeweils Juli – Juni) und eines Winterhalbjahres (WH, jeweils Juli – April). Auf die Niederschlagsdaten wurde kein Korrekturverfahren angewendet. *12*
Tabelle 2-8: Angesetzte Faktor- und Produktpreise zur Ermittlung der N-Optima *15*
Tabelle 2-9: Getreideeinheiten für die Kulturen am Versuchsstandort Hamerstorf für die Versuchsjahre 2014 bis 2021 (Abel, et al., 2010) *19*
Tabelle 3-1: Berechnete ökonomisch optimale N-Düngung und optimale Erträge für die Versuchsjahre 2014 – 2021 (Konventionelle Fruchtfolge) *59*
Tabelle 3-2: Berechnete ökonomisch optimale N-Düngung und optimale Erträge für die Versuchsjahre 2014 – 2021 (Grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge) *60*
Tabelle 3-3: N-Bedarfswert, N-Düngebedarf und berechnete N-Optima für die Kulturen der konventionellen Fruchtfolge in den Versuchsjahren 2014-2021 am Standort Hamerstorf *61*
Tabelle 3-4: N-Bedarfswert, N-Düngebedarf und berechnete N-Optima für die Kulturen der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in den Versuchsjahren 2014-2021 am Standort Hamerstorf *62*
Tabelle 3-5: Standörtliche N-Mineraldüngeräquivalente und N-Gesamt-N aus Organik im Mittel für die Fruchtarten und über alle Fruchtarten in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge 2015 - 2021 ..... *63*
Tabelle 4-1:Sickerwassermenge und Austauschhäufigkeit im Verlauf der Sickerwasserperioden (SWP) am Standort Hamerstorf *65*
Tabelle 4-2: Wahrscheinlichkeit der Überschreitung einer mittleren NO_3-Konzentration im Sickerwasser von 50 mg/l in Abhängigkeit der Herbst-N_{min}-Vorräte am Standort Hamerstorf. *81*
Tabelle A-1: Monatliche Witterungsdaten für den Versuch Hamerstorf 643 (ohne Beregnung). Auf die Niederschlagsdaten wurde kein Korrekturverfahren angewendet. ..... *XII*
Tabelle A-2: Verwendete teils ertragsabhängige kC-Werte zur Umrechnung der ETp in die ETa für den Versuch Hamerstorf 643 ..... *XIX*
Tabelle A-3: Versuchsjahr 2014, Kulturart: Kartoffel, Sorte: Belana ..... *XXI*
Tabelle A-4: Versuchsjahr 2015, Kulturart: Winterroggen (konv), Winterroggen GPS mit Untersaat (gws) ..... *XXIII*
Tabelle A-5: Versuchsjahr 2016, Kulturart: Silomais (konv), Silomais mit Untersaat (gws) ..... *XXV*
Tabelle A-6: Versuchsjahr 2017, Kulturart: Braugerste mit ZwF (konv.), Braugerste mit Untersaat (gws.) ..... *XXVII*
Tabelle A-7: Versuchsjahr 2018, Fruchtart Kartoffel, Sorte Wega (konv); Sorte Leyla + Zwischenfrucht (gws) ..... *XXIX*

Tabelle A-8:Versuchsjahr 2019, Kulturart: Winterroggen (konv), Winterroggen GPS mit Untersaat (gws) ..... *XXXI*
Tabelle A-9:Versuchsjahr 2020, Kulturart: Silomais (konv), Silomais mit Untersaat (gws) ..... *XXXIII*
Tabelle A-10:Versuchsjahr 2021, Kulturart: Braugerste mit ZwF (konv.), Braugerste mit Untersaat (gws) ..... *XXXV*

Kurzfassung

Am Versuchsstandort Hamerstorf (LK Uelzen) werden seit 2014 die Auswirkungen unterschiedlicher Fruchtfolgegestaltung und langjährig unterschiedlich hoher Stickstoffdüngung (N-Düngung) auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser in einer Fruchtfolge aus Kartoffel – Winterroggen – Silomais – Sommerbraugerste untersucht. Zudem wird der Frage nachgegangen, welche Auswirkungen die Fruchtfolgegestaltung und N-Düngung auf die Stickstoffdynamik im Boden, die Erträge und Qualitätsparameter des Ernteguts haben. Die Versuchsanlage in Hamerstorf ist als zweifaktorielle Spaltanlage mit einem Faktor für die Fruchtfolgegestaltung (konventionell vs. grundwasserschutzorientiert) und einem Faktor für die N-Düngung angelegt. Die grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge zeichnet sich durch eine dauerhafte Begrünung der Ackerfläche aus (Zwischenfrucht, Untersaat mit teilweiser Andüngung und Schnittnutzung). Ziel des Versuches ist es, aus den gewonnenen Erkenntnissen Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Sickerwasserqualität abzuleiten. Um die Nitratkonzentrationen am Standort zu messen, wurde im Herbst 2013 eine Saugsondenanlage zur Sickerwassergewinnung installiert.

Im Mittel der Versuchsjahre 2014 bis 2021 zeigte sich, dass die Produktivität der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge geringer war als die der konventionellen, ohne dass gleichzeitig eine Senkung der mittleren N-Austräge mit dem Sickerwasser erreicht wurde. Ursache hierfür war einerseits die dauerhafte Begrünung in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge, die die Bewirtschaftung erschwerte und insbesondere im zweiten Fruchtfolgezyklus zu deutlichen Ertragseinbußen bei Kartoffel (z. B. durch Drahtwurmbefall) und Silomais führte. Zudem erhöhte der hohe Eintrag an organischem Material vermutlich das N-Mineralisationspotential und insbesondere mittel- bis längerfristig den N-Austrag. Andererseits konnte die aufgrund der Andüngung der Untersaaten in Summe höhere N-Düngung in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge nicht durch höhere N-Abfuhren über die Untersaaten kompensiert werden, so dass höhere N-Bilanzsalden die Folge waren.

Einzelne Maßnahmen zur Reduktion der N-Austräge erwiesen sich jedoch als sinnvoll, um die N-Austräge zu reduzieren ohne zu beträchtlichen Ertrags- und Qualitätseinbußen der landwirtschaftlichen Erzeugnisse zu führen: Dies umfasst eine auf zwei Gaben aufgeteilte, reduzierte N-Düngung im konventionellen Silomaisanbau oder eine Untersaat bei bedarfsgerechter N-Düngung. Nach Winterroggen ist zwar nur mit moderaten N-Austrägen zu rechnen, dennoch ist eine Zwischenfrucht empfehlenswert bei einer nachfolgenden Sommerung. Nach Sommerbraugerste mit Zwischenfrucht waren die N-Austräge sehr gering,

so dass eine reduzierte N-Düngung nicht notwendig ist. Hierbei konnte eine Zwischenfrucht die N-Austräge nach Braugerste deutlicher reduzieren als eine Untersaat. Nach Kartoffel ist, unabhängig vom Anbausystem, mit hohen N-Austrägen zu rechnen, wenn diese erst im August oder September geerntet wird. Auch eine im Anschluss an die Kartoffel gesäte Zwischenfrucht kann den N-Austrag dann nicht mehr reduzieren, wenn sie bereits im Herbst umgebrochen wird und ihre Standzeit nur etwa sieben Wochen beträgt.

Die Analyse der N-Optima in Hamerstorf zeigte, dass Fruchtfolge und Verwertungsrichtung der Kulturen das Stickstoffoptimum deutlich beeinflussen. Trotz geringerem Faktoreinsatz (N-Düngung) erzielte die konventionelle Fruchtfolge höhere Ertragsoptima, was unter anderem auf unterschiedliche Nutzungsrichtungen von Winterroggen und Kartoffeln zurückzuführen ist, während bei Silomais und Braugerste kaum Unterschiede auftraten.

In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurden mit Ausnahme eines Jahres höhere N-Mineraldüngeräquivalente (N-MDÄ) erzielt als in der konventionellen, was vermutlich auf einen höheren Gehalt an organischer Substanz und eine aktivere mikrobielle Bodengemeinschaft durch dauerhafte Begrünung zurückzuführen ist. Trotz erheblicher Schwankungen durch Witterung und andere Einflussfaktoren lagen die N-MDÄ insgesamt höher als in der konventionellen Fruchtfolge und entsprachen im Mittel den Mindestwirksamkeiten aus der Anlage 3 der Düngeverordnung 2020.

Am Standort Hamerstorf zeigte sich im Mittel über den gesamten Versuchszeitraum ein starker Zusammenhang (R^2_m = 0,40) zwischen der NO_3-Konzentration im Sickerwasser und dem Herbst-N_{min}-Vorrat. Bei Herbst-N_{min}-Vorräten größer 45 kg N/ha wurde eine NO_3-Konzentration von 50 mg/l stets überschritten.

1 Einleitung

Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK Ni) führt im Rahmen der landesweiten Aufgaben im kooperativen Trinkwasserschutz nach § 28 des Niedersächsischen Wassergesetzes Versuche zur grundwasserschutzorientierten Landwirtschaft durch. Diese Versuche werden durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU) und den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) mit Mitteln aus der Wasserentnahmegebühr finanziert. Das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) ist innerhalb der Projekte für die Messung der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser und die Modellierung des Wasserhaushaltes zur Berechnung der NO_3-N-Frachten zuständig.

Die Versuchsanlage am Standort Hamerstorf vergleicht die Auswirkungen einer konventionellen regional typischen Fruchtfolge und einer grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge. In der grundwasserschutzorientieren Fruchtfolge wird eine möglichst dauerhafte Begrünung durch den Anbau von Untersaaten und Zwischenfrüchten angestrebt. Weiterhin werden in der Versuchsanlage unterschiedliche N-Düngevarianten getestet.

Folgende Fragestellungen werden untersucht:

- F1: Welchen Einfluss hat die N-Düngung und die Fruchtfolgegestaltung auf Ertrag und Qualität der angebauten Kulturen, die N-Dynamik im Boden und den N-Austrag mit dem Sickerwasser?
- F2: Wie wirkt sich die Fruchtfolgegestaltung auf die wirtschaftlichen N-Düngungsoptima aus?
- F3: Wie beeinflusst ein stabilisierter N-Dünger (ENTEC) Ertrag, Qualität und N_{min}-Werte im Vergleich zu einem konventionellen Stickstoffdünger in den unterschiedlichen Fruchtfolgen?
- F4: Wie wirkt eine um 20 % reduzierte N-Düngung auf Ertrag, Qualität und N_{min}-Werte in den unterschiedlichen Fruchtfolgen?
- F5: Wie hoch sind die N-Mineraldüngeräquivalente des organischen Düngemittels und ist ein Einfluss der verschiedenen Fruchtfolgen erkennbar?

Dieser Bericht stellt als Abschlussbericht die Ergebnisse der gesamten Versuchslaufzeit über die Sickerwasserperioden 2014/2015 bis 2021/2022 dar. Eine Sickerwasserperiode startet im Juli und endet im Juni des Folgejahres.

2 Material und Methoden

2.1 Standort

Der Wasserschutzversuch Hamerstorf (Versuch 643) ist auf einer Fläche der Versuchsstation Hamerstorf der Landwirtschaftskammer Niedersachsen angelegt. Die Versuchsstation befindet sich im östlichen Teil Niedersachsens im Landkreis Uelzen, ca. 10 km südwestlich der Stadt Uelzen (Abbildung 2-1), 65 m über Normalnull.

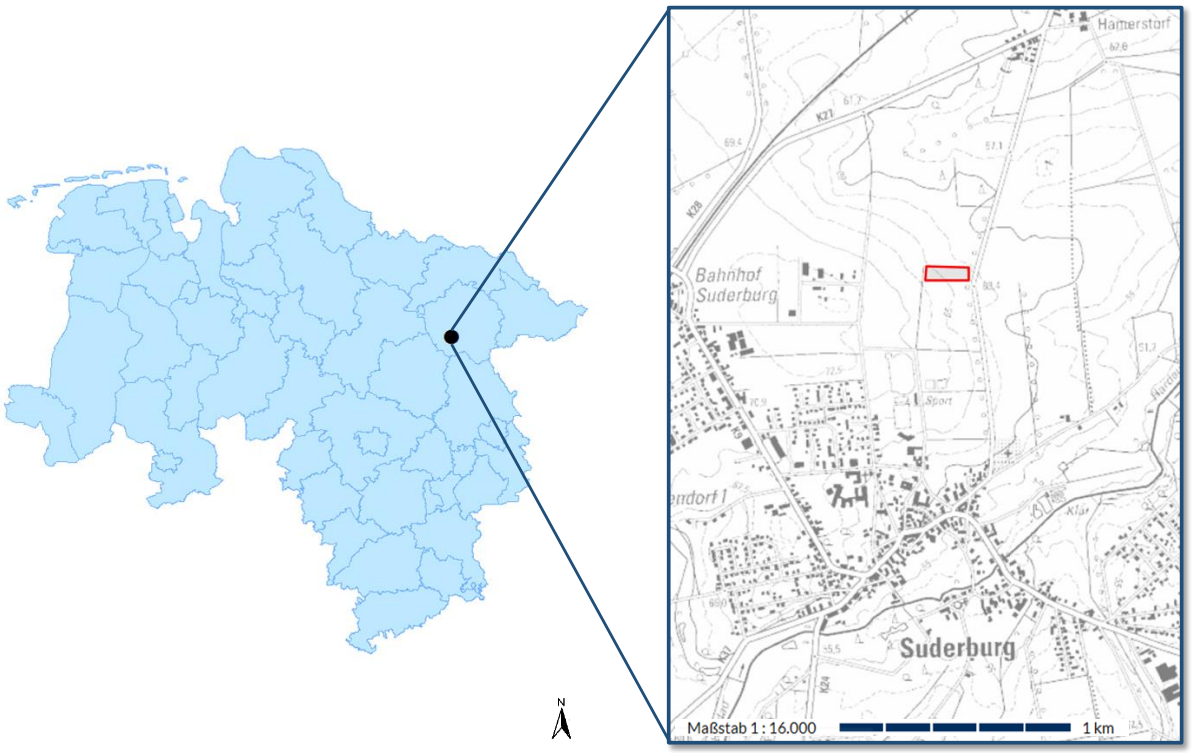

Abbildung 2-1: Lage des Wasserschutzversuches 643 Hamerstorf

Die Ackerzahl auf der Versuchsfläche liegt zwischen 37 und 47, wobei sie im Bereich der Saugsondenanlage 47 beträgt (LBEG, 2014). Der im Bereich der Saugsondenanlage anstehende Boden ist ein Braunerde-Pseudogley aus schwach schluffigem Sand (weichselzeitlicher Geschiebedecksand) über schwach bis stark lehmigem Sand (saalezeitlicher Geschiebelehm). Während des Versuchs wurde eine Nährstoffversorgung (Kalium, Magnesium, Phosphor) im Oberboden im Bereich von Gehaltsklasse C (LWK, 2018) angestrebt. Mit Gehalten an Kalium zwischen 4,0 und 9,0 mg/100 g Boden, Magnesium zwischen 2,2 und 5,0 mg/100 g Boden sowie Phosphor zwischen 4,0 und 7,0 mg/ 100 g Boden wurde dieses Ziel weitestgehend erreicht. Der pH-Wert lag während der Versuchslaufzeit zwischen 5,6 und 6,2. Der C_{org}-Gehalt

des Oberbodens lag bei Messung zu Beginn des Versuches im Bereich der Saugsondenanlage im Mittel bei etwa 0,89 %, der N_t-Gehalt bei 0,07 % und das C/N-Verhältnis bei 13. Im Vergleich dazu lag bei der Wiederholungsmessung von 2024 der C_{org}-Gehalt bei 0,78 %, der N_t-Gehalt bei 0,07 % und das C/N-Verhältnis bei 12. Beim Einrichten der Saugsondenanlage zu Beginn des Versuchs wurden die Bodenprofile, an denen die Saugsonden eingebaut wurden, bodenkundlich beschrieben. Abbildung 2-2 zeigt beispielhaft das Bodenprofil an den Saugsonden S5-S8.

Tiefe [cm]	Hori-zont	Beschreibung
0-30	Ap	schwach schluffiger Sand, sehr schwach kiesig, schwach humos, carbonatfrei
30-50	Bv	schwach schluffiger Sand, mittel kiesig, sehr schwach humos, carbonatfrei
50-65	Sw	schwach schluffiger Sand, schwach kiesig, sehr schwach humos, carbonatfrei
65-100	IISd	stark lehmiger Sand, schwach kiesig, sehr schwach humos, carbonatfrei

Abbildung 2-2: Bodenprofil S5-8, Braunerde-Pseudogley

Die Feldkapazität (FK) in der effektiven Durchwurzelungstiefe (We = 8 dm) liegt bei 154 mm, der permanente Welkepunkt bei 33 mm. Mit Hilfe der Fachanwendung MeMaS Lite des NIBIS Kartenservers kann eine mittlere jährliche Sickerwasserrate für den Standort abgeschätzt werden (LBEG, 2017). Die Berechnung erfolgt nach dem TUB-BGR-Verfahren (DWA, 2016). Die Grundlage hierfür bilden die Bodenkarte 1:50.000, die potenzielle Verdunstung (FAO-Grasreferenzverdunstung) und mittlere Klimadaten des Zeitraumes 1961 – 1990. Für den Versuchsstandort ergibt sich eine mittlere Sickerwasserrate von 263 mm pro Jahr. Die mittlere Austauschhäufigkeit (Sickerwasserrate geteilt durch die Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, kurz: Ah) beträgt 1,7. Diese Zahl gibt an, wie oft das Wasser im effektiven Wurzelraum im Mittel jährlich durch das zugeführte Niederschlagswasser ausgetauscht wird. Die Nitratauswaschungsgefährdung am Standort ist als „groß“ einzustufen (Müller & Waldeck, 2011). Detaillierte Ergebnisse der Bodenanalysen sowie Informationen zur Ableitung der

Kennwerte von WE, FK_{WE} und PWP_{WE} können dem Versuchsbericht mit den Ergebnissen der Auswaschungsperioden 2014/2015 und 2015/2016 entnommen werden (Fier & Schäfer, 2016).

Die langjährige Jahresmitteltemperatur am Versuchsstandort liegt bei 9,5 °C (Mittelwert der DWD-Station Uelzen im Zeitraum 1991 – 2020, (DWD, 2022). Im selben Zeitraum fielen an dieser Station im langjährigen Mittel jährlich 672 mm Niederschlag (DWD, 2022). Die DWD-Station Uelzen liegt in der Nähe des Stadtteils Veerßen. An der, nur wenige Kilometer entfernten, DWD-Station Suderburg wurden im Zeitraum 1991 – 2020 im Mittel jährlich 721 mm Niederschlag gemessen (DWD, 2022). Diese Station liegt deutlich näher an der Versuchsfläche Hamerstorf als die Station Uelzen und wird daher für Vergleiche herangezogen, es liegen jedoch keine langjährigen Temperaturdaten für den Zeitraum 1991 – 2020 vor.

2.2 Versuchsaufbau und Bewirtschaftung

Die Versuchsanlage in Hamerstorf ist als zweifaktorielle Spaltanlage mit einer konventionellen (konv) und grundwasserschutzorientierten (gws) Fruchtfolge angelegt (vgl. Abbildung 2-3).

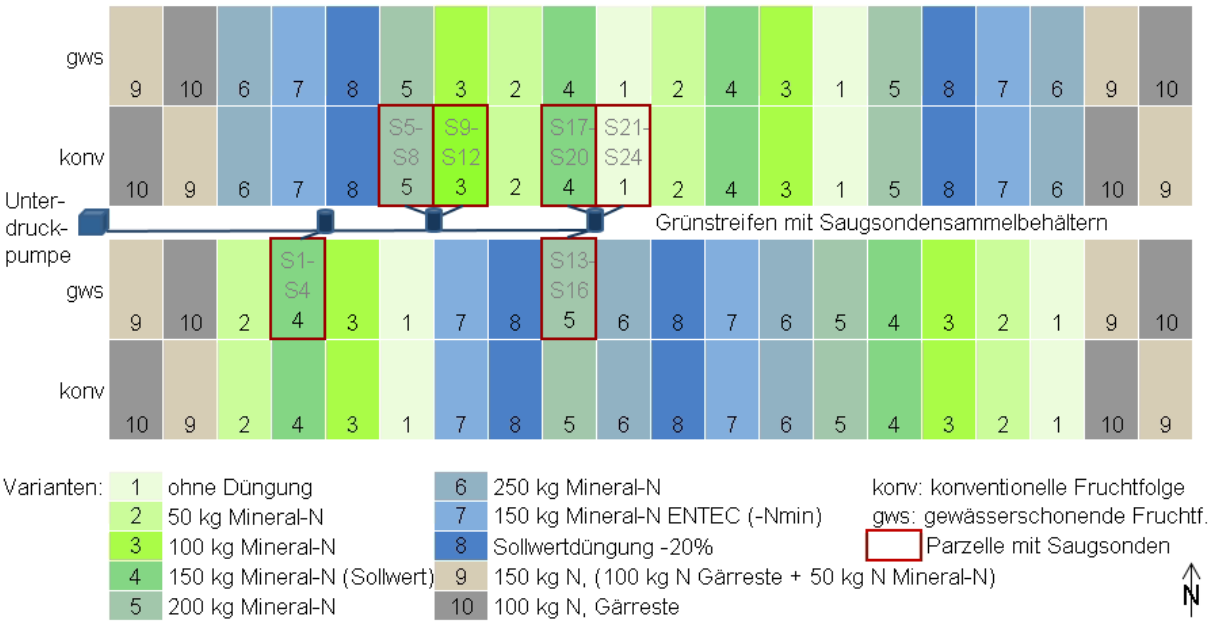

Abbildung 2-3: Versuchsaufbau des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf, dargestellte N-Düngevarianten beispielhaft für Winterroggen/Mais, nicht maßstabsgerecht

In beiden Fruchtfolgen werden 10 verschiedene Versuchsvarianten mit unterschiedlicher Höhe der N-Düngung sowie N-Düngerformen getestet.

Tabelle 2-1 zeigt die Fruchtfolge des Wasserschutzversuches in Hamerstorf. Es handelt sich sowohl in der konventionellen als auch in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge um

eine viergliedrige Fruchtfolge, die so geplant wurde, dass standort- und regionalspezifische Faktoren mit einbezogen wurden.

In der Region findet auf etwa 20 % der Ackerfläche der Anbau von Kartoffeln statt. Durch den Rodungsvorgang wird der Boden durchlüftet und die N-Mineralisierung des bodenbürtigen Stickstoffs angeregt. Dies führt häufig zu hohen Nitratausträgen. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge werden daher die Auswirkungen einer nahezu dauerhaften Begrünung der Versuchsfläche getestet, um den bodenbürtigen Stickstoff zu binden und vor Verlagerung zu schützen. Die dauerhafte Begrünung soll durch den Anbau von einer Zwischenfrucht nach Kartoffel und Untersaaten in Winterroggen, Silomais und Braugerste erreicht werden. Der Schwerpunkt in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge liegt neben dem Marktfruchtanbau auch auf der Biomasseproduktion. Neben dem Silomais, der in beiden Fruchtfolgen für eine Nutzung in der Biogasanlage angebaut wird, wird zusätzlich der Winterroggen als Ganzpflanzensilage (GPS) geerntet. Auch die Grasuntersaat im Winterroggen ist zur Schnittnutzung und Verwendung als Substrat in der Biogasanlage vorgesehen. Damit die Untersaat sich gut etablieren kann, wird der Winterroggen in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge mit reduzierter Saatstärke (150 Körner/m²) ausgesät. Im Versuchsjahr 2014 wurde in beiden Fruchtfolgen die gleiche Kartoffelsorte (Belana) angebaut. In 2018 wurde in der konventionellen Fruchtfolge eine Kartoffel (Wega) und in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge eine Frühkartoffel (Leyla) mit anschließender nicht überwinternder Zwischenfrucht (Ölrettich) angebaut. Der Ölrettich erreicht dabei eine Standzeit von ca. 7 Wochen.

Tabelle 2-1: Fruchtfolge auf dem Feldversuch

Jahr	Konventionelle Fruchtfolge	Grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge
2014	Kartoffel	Kartoffel
2015	Winterroggen	Winterroggen GPS (reduzierte Aussaatstärke), Untersaat Welsches Weidelgras
2016	Silomais	Silomais, Untersaat Rotschwingel
2017	Braugerste, ZF Ölrettich	Braugerste, Untersaat Rotschwingel
2018	Kartoffel	Frühkartoffel, ZF Ölrettich
2019	Winterroggen	Winterroggen GPS (reduzierte Aussaatstärke), Untersaat Welsches Weidelgras
2020	Silomais	Silomais, Untersaat Rotschwingel
2021	Braugerste, ZF Ölrettich	Braugerste, Untersaat Rotschwingel

In Tabelle 2-2 sind die Saat-/Pflanztermine und Erntetermine der einzelnen Kulturarten dargestellt. Teilweise unterscheiden sich die Erntetermine bei der Kartoffel und dem Winterroggen zwischen den beiden untersuchten Fruchtfolgen aufgrund der unterschiedlichen Nutzungen.

Tabelle 2-2: Saat- und Erntetermine der einzelnen Kulturen in den Versuchsjahren 2014 bis 2021 am Standort Hamerstorf

	2014/2018 Kartoffel		2015/2019 Winterroggen (GPS)		2016/2020 Silomais		2017/2021 Braugerste	
	Konv.	Gws	Konv.	Gws	Konv.	Gws	Konv.	Gws
Saat	24.04.2014		07.10.2014		13.05.2016		28.03.2017	
	18.04.2018		09.10.2018		07.05.2020		23.03.2021	
Ernte	Belana 01.09.2014	Belana 01.09.2014	14.08.2015	19.06.2015	30.09.2016		31.07.2017	
	Wega 25.09.2018	Leyla 16.08.2018	02.08.2019	23.05.2019	05.10.2020		29.07.2021	

Insgesamt werden an dem Versuchsstandort zehn verschiedene N-Düngungsvarianten getestet. Neben der festen N-Düngestaffel (Var. 1 bis 6) zur Ableitung des N-Optimums an dem Standort werden die Auswirkungen eines stabilisierten N-Düngers (ENTEC) geprüft (Var. 7). Der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren wie ENTEC soll zu einer Verringerung von Stickstoffverlusten führen. Die chemischen Verbindungen verzögern dabei die Umwandlung von Ammonium in Nitrat im Boden, indem sie die Aktivität der nitrifizierenden Bakterien unterdrücken. Folglich ist das Ziel beim Einsatz der stabilisierten N-Dünger, dass die N-Nutzungseffizienz erhöht wird und dadurch Nitratverluste über das Sickerwasser ins Grundwasser verringert werden. Studien zeigen, dass durch den Einsatz stabilisierter N-Dünger die Nitrat-Auswaschung bis zu 27 % reduziert werden kann im Vergleich zu herkömmlichen mineralischen N-Düngern (Quemada, et al., 2013).

Außerdem werden zwei Varianten mit organischer Düngung getestet. In Variante 9 erfolgt eine Gärrestdüngung mit mineralischer Ergänzung. Zur Ableitung des standort- und fruchtartenspezifischen Mineraldüngeräquivalents wird die Variante 10 ausschließlich mit Gärrest gedüngt (vgl. Tabelle 2-3).

Bei Berechnung der Düngergaben der Varianten 7 bis 10 wurde der Frühjahrs-N_{min}-Wert zur Ermittlung des N-Düngebedarfs einbezogen. Bis zum Versuchsjahr 2018 wurde für die beiden Fruchtfolgen ein einheitlicher Wert ermittelt und zum Abzug gebracht. Aufgrund starker

Abweichungen der Frühjahrs-N_{min}-Werte zwischen der grundwasserschutzorientierten und der konventionellen Fruchtfolge wurden seit 2019 die Varianten 7 bis 10 in den beiden Fruchtfolgen unterschiedlich gedüngt. Der fruchtartenspezifische N-Bedarfswert für die Variante 8 im Wasserschutzversuch Hamerstorf wurde bei der Kartoffel auf 180 kg N/ha und beim Silomais auf 150 kg N/ha festgelegt.

Tabelle 2-3: N-Düngestufen des Wasserschutzversuchs Hamerstorf

Variante	**Kulturart**		
	Braugerste	**Kartoffel**	**Winterroggen/Silomais**
1	0 kg N/ha	0 kg N/ha	0 kg N/ha
2	40 kg N/ha	80 kg N/ha	50 kg N/ha
3	80 kg N/ha	120 kg N/ha	100 kg N/ha
4	120 kg N/ha	160 kg N/ha	150 kg N/ha
5	160 kg N/ha	200 kg N/ha	200 kg N/ha
6	200 kg N/ha	240 kg N/ha	250 kg N/ha
7	120 kg N/ha (ENTEC) abzgl. Frühjahrs-N_{min}	180 kg N/ha (ENTEC) abzgl. Frühjahrs-N_{min}	150 kg N/ha (ENTEC) abzgl. Frühjahrs-N_{min}
8	Fruchtartenspezifischer N-Bedarfswert – 20% abzgl. Frühjahrs-N_{min}	Fruchtartenspezifischer N-Bedarfswert – 20% abzgl. Frühjahrs-N_{min}	Fruchtartenspezifischer N-Bedarfswert – 20% abzgl. Frühjahrs-N_{min}
9	120 kg N/ha (80 kg N (org.), 40 kg N (min.)) abzgl. Frühjahrs-N_{min}	180 kg N/ha (120 kg N (org.), 60 kg N (min.)) abzgl. Frühjahrs-N_{min}	150 kg N/ha (100 kg N (org.), 50 kg N (min.)) abzgl. Frühjahrs-N_{min}
10	80 kg N/ha (org.) abzgl. Frühjahrs-N_{min}	120 kg N/ha (org.) abzgl. Frühjahrs-N_{min}	100 kg N/ha (org.) abzgl. Frühjahrs-N_{min}

Saugsonden wurden aus Kostengründen nicht in allen Parzellen eingebaut. In der konventionellen Fruchtfolge ist je eine Parzelle der Varianten/Düngungsstufen 1, 3, 4 und 5 mit Saugsonden ausgestattet, in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge je eine Parzelle der Düngungsstufen 4 und 5. Detaillierte Angaben zum Aufbau der Sickerwasseranlage sind in Kap. 2.5 zu finden.

In den organisch gedüngten Varianten 9 und 10 wird ein Biogas-Gärrest aus einer NaWaRo-Anlage eingesetzt. Die Nährstoffgehalte sind in Tabelle 2-4 dargestellt. Die Ausbringung des Gärrestes erfolgt mittels Schleppschlauch.

Tabelle 2-4: Trockensubstanz, pH-Wert und Nährstoffgehalte der eingesetzten Gärreste in den Versuchsjahren 2014 bis 2021 am Standort Hamerstorf

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Trockensubstanz [%]	5,00	6,0	3,74	6,5	5,72	6,94	5,54	6,35

pH-Wert	-	-	-	-	8,0	8,1	7,8	-
Gesamt-N [kg/m³]	5,65	5,67	5,08	7,48	7,19	8,49	6,95	8,03
Ammonium-N [kg/m³]	3,13	3,29	3,28	5,75	4,78	4,87	4,83	4,98
N-Verfügbar [kg/m³]	3,13	3,29	3,28	5,75	4,79	4,88	4,83	4,98
Phosphor (P_2O_5) [kg/m³]	1,93	2,57	1,60	3,15	3,26	3,44	2,33	3,08

Die Versuchsfläche liegt außerdem in einem der intensivsten Beregnungsgebiete Deutschlands. Die Böden in der Region weisen eine sehr geringe Wasserhaltekapazität auf. Aufgrund der unterdurchschnittlichen Niederschläge wird die Entwicklung der Pflanzen durch Beregnung unterstützt. Die einzelnen Beregnungstermine sowie die verabreichten Mengen sind in Tabelle 2-5 aufgelistet. Im Jahr 2020 erfolgte eine Beregnung schon früh im Mai zur Aussaat der Untersaat im Silomais in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge, damit diese sich gut etablieren konnte. Das Versuchsjahr 2018 war ein sehr trockenes Jahr, daher wurde die Kartoffel siebenmal beregnet. Bis zum Versuchsjahr 2021 wurden die Kulturen auskömmlich beregnet, d.h. es wurde kein Beregnungskontingent berücksichtigt.

Tabelle 2-5: Beregnungstermine des Feldversuchs

Jahr	Termin	Datum	Fruchtart	BBCH	Beregnungsmenge [mm]
2014	1. Termin	04.06.2014	Kartoffel	40	30
	2. Termin	19.06.2014		50	30
	3. Termin	25.06.2014		65	30
2015	1. Termin	23.05.2015	Winterroggen	Nicht ermittelt	30
	2. Termin	03.06.2015		Nicht ermittelt	30
	3. Termin	17.06.2015		Nicht ermittelt	30
	4. Termin	03.07.2015		Nicht ermittelt	30
2016	1. Termin	15.07.2016	Silomais	39	30
	2. Termin	26.07.2016		51	30
	3. Termin	17.08.2016		69	30
2017	1. Termin	30.05.2017	Braugerste	Nicht ermittelt	30
	2. Termin	20.06.2017		Nicht ermittelt	30
2018	1. Termin	30.05.2018	Kartoffel	16	32
	2. Termin	06.06.2018		40	32

	3. Termin	18.06.2018		50	32
	4. Termin	26.06.2018		65	32
	5. Termin	05.07.2018		65	32
	6. Termin	20.07.2018		79	32
	7. Termin	27.07.2018		91	32
2019	1. Termin	28.05.2019	Winterroggen	65	30
	2. Termin	21.06.2019		75	30
2020	1. Termin	11.05.2020	Silomais	3	20
	2. Termin	23.07.2020		51	25
	3. Termin	07.08.2020		65	25
	4. Termin	15.08.2020		69	25
2021	1. Termin	16.06.2021	Braugerste	Nicht ermittelt	30

2.3 Witterung

Daten zur Witterung werden benötigt, um die unterschiedlichen Ertragsniveaus und Proteingehalte der Kulturen in den einzelnen Jahren zu bewerten sowie für die Berechnung des Bodenwasserhaushalts. Zur Gewinnung der Wetterdaten wurde je nach Verfügbarkeit der Daten auf unterschiedliche Wetterstationen zurückgegriffen. Bis Ende März 2016 wurde für die Messung der Globalstrahlung die Wetterstation der Bodendauerbeobachtungsfläche (BDF) in Barum verwendet. Temperatur und Niederschlag wurden mittels ISIP-Daten der Wetterstation Nr. 31 Hamerstorf bestimmt. Ab Ende März 2016 konnte auf die Wetterstation „Meteo 1“ der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Suderburg zurückgegriffen werden, um Daten zu Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung zu erhalten. Diese Station befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Versuchsfeld. Falls die Station Meteo 1 der Ostfalia keine Daten lieferte, wurden ersatzweise Daten anderer Stationen herangezogen. Tabelle 2-6 stellt für jeden Parameter dar, in welcher Reihenfolge Daten anderer Stationen abgefragt wurden, um Fehlwerte zu ersetzen und eine vollständige Zeitreihe mit Daten zu generieren. Die Priorität einer Station nimmt dabei mit zunehmender Entfernung vom Versuchsfeld ab. Um zu prüfen, ob die Daten der Ersatzstationen für die Charakterisierung des Standortes geeignet sind, wurden die Datenreihen der Ersatzstationen vor ihrer Verwendung mit der Station Ostfalia Meteo 1 abgeglichen.

Tabelle 2-6: Reihenfolge der verwendeten Wetterstationen je nach Datenverfügbarkeit des untersuchten Parameters

Parameter	Priorität	Station	Koordinaten (Dezimalgrad)	Entfernung zum Versuchsfeld
Nieder-schlag	1	Ostfalia Meteo 1	52.9058, 10.4539	50 m
	2	Ostfalia Am Campus	52.8981, 10.4437	1000 m
	3	ISIP-Station Nr. 31 Hamerstorf	52.9147, 10.4611	1150 m
	4	DWD-Station Nr. 5146 Uelzen	52.9414, 10.5289	6500 m
Temperatur	1	Ostfalia Meteo 1	52.9058, 10.4539	50 m
	2	ISIP-Station Nr. 31 Hamerstorf	52.9147, 10.4611	1150 m
	3	DWD-Station Nr. 5146 Uelzen	52.9414, 10.5289	6500 m
Global-strahlung	1	Ostfalia Meteo 1	52.9058, 10.4539	50 m
	2	ISIP-Station Nr. 31 Hamerstorf	52.9147, 10.4611	1150 m
	3	Ostfalia Am Campus	52.8981, 10.4437	1000 m
	4	BDF Barum	-*	ca. 16500 m

* die Koordinaten der BDF dürfen aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht veröffentlicht werden

Für die Parameter Niederschlag, Temperatur und Globalstrahlung wurden Tageswerte verwendet, die teils aus Stunden- oder 10-Minuten-Werten aggregiert wurden. Die potentielle Evapotranspiration wurde nach dem Verfahren von Turc-Wendling berechnet (vgl. Formel (2.1, nach Wendling et al. (1991)).

$$ETp = \frac{(R_G + 93 \cdot f_K) \cdot (T + 22)}{150 \cdot (T + 123)} \qquad (2.1)$$

mit ETp Potentielle Evapotranspiration [mm]

R_G Globalstrahlung, Tagessumme [J/cm^2]

f_K Küstenfaktor, im Küstenbereich von 50 km Breite als Mittelwert $f_K = 0{,}6$ und sonst $f_K = 1{,}0$ [-]

T Lufttemperatur, Tagesmittel [°C]

In Tabelle 2-7 sind die Wetterdaten für den Versuch Hamerstorf 643 im Mittel für unterschiedliche Zeiträume dargestellt. Hierbei wechselten sich im Verlauf des Versuchszeitraums trockene und nasse bzw. warme und kühlere Jahre ab. Vor allem die Jahre 2015 und 2017 waren mit 791 mm bzw. 894 mm sehr nass. Im Vergleich zum langjährigen Mittel des Niederschlags von 1991-2020 an der DWD-Station Suderburg *(DWD, 2022)* lag die Niederschlagssumme in diesen beiden Jahren bei 110 % bzw. 124 %. Da das Jahr 2017 eine

vergleichsweise geringe potenzielle Verdunstung aufwies, wurde mit 240 mm in diesem Jahr die höchste positive Wasserbilanz des gesamten Versuchszeitraumes festgestellt. Sehr warm und trocken war vor allem das Jahr 2018. Mit 433 mm gab es in diesem Jahr die geringsten Niederschläge des gesamten Versuchszeitraumes. In Kombination mit einer hohen potenziellen Verdunstung fiel hier eine negative klimatische Wasserbilanz von -354 mm an. Alle Versuchsjahre wiesen eine mittlere Temperatur oberhalb des langjährigen Mittels von 9,5 °C (DWD-Station Uelzen im Zeitraum 1991 – 2020, *(DWD, 2022)* auf. Die Niederschläge lagen hingegen in den meisten Jahren unterhalb des langjährigen Mittels von 721 mm der DWD-Station Suderburg *(DWD, 2022)*.

Die SWP 15/16 bzw. das WH 15/16 waren sehr nass und wiesen entsprechend eine deutlich positive Wasserbilanz von 189 mm bzw. 250 mm auf. Vor allem die 2015 sehr niederschlagsreichen Monate Juli und August führten zu den hohen Niederschlagssummen in den genannten Zeiträumen (Monatliche Witterungsdaten für den Versuch Hamerstorf
Tabelle A-1).

Tabelle 2-7: Wetterdaten für den Versuch Hamerstorf 643 im Jahresmittel, im Mittel einer Sickerwasserperiode (SWP, jeweils Juli – Juni) und eines Winterhalbjahres (WH, jeweils Juli – April). Auf die Niederschlagsdaten wurde kein Korrekturverfahren angewendet.

Zeitraum	**Mittlere Temperatur**	**Niederschlagssumme**			**$ETp_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potenzielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Jahr 2014	10,6	606	721	84	655	-49
Jahr 2015	10,1	791	721	110	664	128
Jahr 2016	9,8	589	721	82	691	-103
Jahr 2017	9,8	894	721	124	654	240
Jahr 2018	10,6	433	721	60	787	-354
Jahr 2019	10,8	667	721	93	719	-51
Jahr 2020	11,1	625	721	87	737	-112
Jahr 2021	9,9	798	721	111	682	117
Jahr 2022	11,1	548	721	76	795	-246
SWP 14/15	10,1	614	721	85	649	-35
SWP 15/16	10,3	868	721	120	679	189
SWP 16/17	9,7	708	721	98	681	27
SWP 17/18	10,1	648	721	90	696	-48
SWP 18/19	11,0	470	721	65	780	-310
SWP 19/20	10,8	747	721	104	725	21
SWP 20/21	10,2	649	721	90	698	-48
SWP 21/22	10,8	708	721	98	759	-51
WH 14/15	9,3	557	596	94	453	104
WH 15/16	9,1	702	596	118	452	250
WH 16/17	8,5	457	596	77	465	-8
WH 17/18	8,6	622	596	104	450	172
WH 18/19	10,0	385	596	60	554	-169
WH 19/20	9,9	667	596	112	509	158
WH 20/21	9,2	500	596	84	486	14
WH 21/22	9,6	647	596	109	511	135

*Mittelwerte 1991 – 2020 der Station Suderburg (DWD, 2022)

2.4 Aufbau der Sickerwasseranlage

Jede der sechs Parzellen mit Saugsonden birgt vier Borosilikatsaugkerzen(-sonden) mit 1 m Schaftlänge. Abbildung 2-4 zeigt den schematischen Aufbau einer Saugkerzenanlage. Der Einbau erfolgte auf 8 dm Tiefe, leicht schräg, mit einem Winkel von 10° zur Waagerechten, um einem Abfließen des Sickerwassers in den Kerzenschaft vorzubeugen. Die Spitze der

Saugsonden ist von ungestörtem Boden umgeben. Durch den unterirdischen Einbau kann die Parzelle problemlos bewirtschaftet werden, lediglich auf eine N_{min}-Probenahme muss im Bereich der Saugsonden verzichtet werden. Die Saugkerzen werden mittels einer Vakuumhauptleitung an eine zeitgesteuerte Unterdruckanlage der Firma UGT mit einem 20 Liter-Ausgleichsbehälter angeschlossen. Während des Betriebs liegt permanent ein Unterdruck von 0,2 bar (untere Schwelle) bis 0,3 bar (obere Schwelle) an. Durch den Ausgleichsbehälter ist die Vakuumversorgung der Anlage über lange Phasen konstant. Das gewonnene Sickerwasser wird in Flaschen aus Borosilikat gesammelt, die sich in drei Sammelbehältern befinden. Die Auffanggefäße werden während der Sickerwasserperiode ca. alle 14 Tage ausgetauscht und zur Nitratanalyse in ein Labor gebracht. Bei strengem Frost wird die Anlage ausgeschaltet, um eine Zerstörung der Auffanggefäße durch Frostsprengung zu verhindern. Außerdem würden die Unterdruckkabel an den Übergängen durch die Kälte undicht werden.

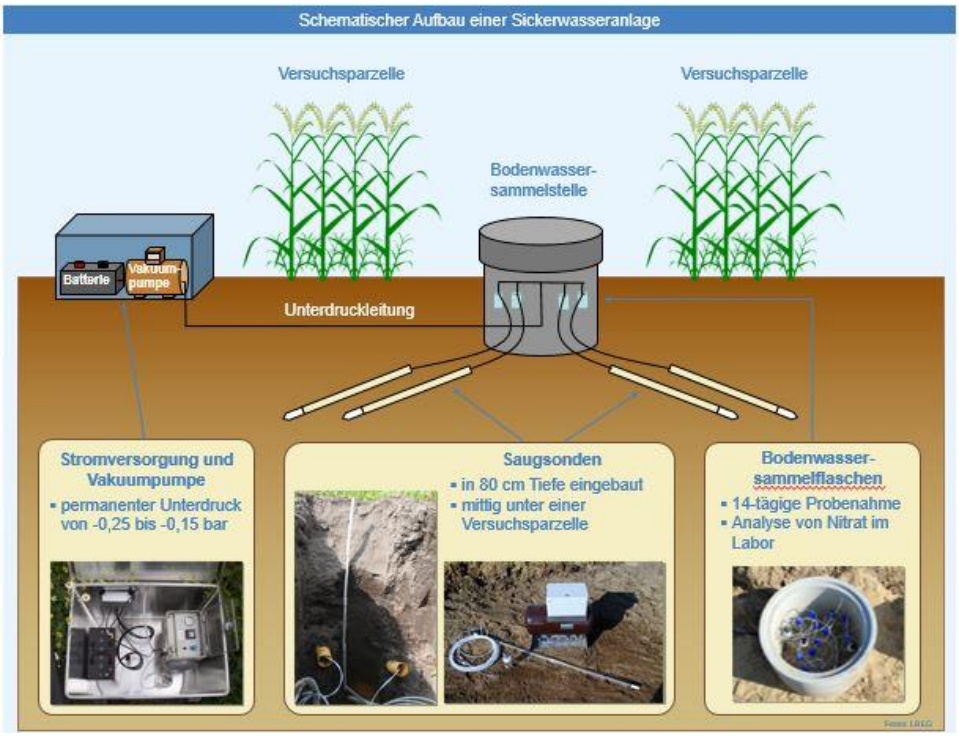

Abbildung 2-4:Aufbau der Sickerwasseranlage

2.5 Berechnungsverfahren

2.5.1 Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs zur Berechnung des ökonomischen Düngungs- und Ertragsoptimums

Das Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs nach Mitscherlich besagt, dass der Pflanzenertrag durch die Steigerung von Nährstoffgaben bis zu einem möglichen Höchstertrag ansteigt (Abbildung 2-5). Der Ertragszuwachs wird dabei mit jeder zusätzlichen Düngeeinheit kleiner. Werden die Nährstoffgaben über den Höchstertrag gesteigert, kann der Ertrag wieder zurückgehen. Um den Höchstertrag statistisch erfassen zu können, werden die Wasserschutzversuche mit einer festen Stickstoffdüngestaffel angelegt, das heißt, es werden bewusste niedrige sowie überhöhte Düngungsgaben als Versuchsvarianten appliziert. Dadurch ist es möglich, das ökonomische Optimum für den Ertrag und die eingesetzte Düngermenge nach der Ernte jahresspezifisch zu ermitteln. Zudem ist es möglich, den Zusammenhang zwischen optimaler N-Düngung und N_{min}-Gehalten darzustellen.

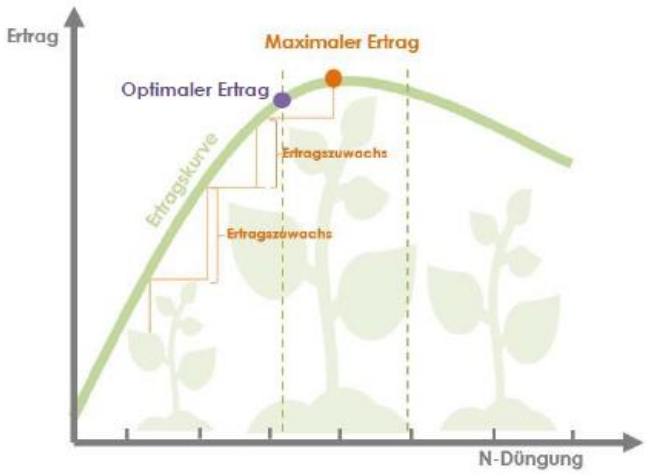

Abbildung 2-5: Das Gesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs, verändert nach Mitscherlich

Das ökonomische Optimum setzt sich aus einer bestimmten N-Düngung und dem dazugehörigen Ertrag zusammen. Es gibt die Höhe der N-Düngung an, bei der der Ertrag wirtschaftlich am meisten Gewinn bringt. Für die Berechnung werden Kosten für die N-Düngung in Relation zu den erwirtschafteten Erträgen gesetzt.

Mithilfe der mathematischen Gleichung entsprechend der Ertragskurve des Versuchsjahres lässt sich zunächst das N-Düngungsoptimum ermitteln. Dazu wird die erste Ableitung der Formel erstellt und der Produktpreis sowie der Faktorpreis zum Lösen der Formel eingesetzt. Der Punkt, an dem der Faktorpreis ist bei dieser Berechnung der Preis für ein kg N und der Produktpreis, der Preis für den eine dt des Ernteguts am Markt verkauft werden kann. Der

Faktorpreis ist konstant für alle Versuchsjahre, der Produktpreis variiert zwischen den Fruchtarten.

Tabelle 2-8: Angesetzte Faktor- und Produktpreise zur Ermittlung der N-Optima

	Preis	Einheit
Faktorpreis		
Stickstoffdünger	1,5	€/kg N
Produktpreise		
Speisekartoffel (früh)	40	€/dt FM
Speisekartoffel (spät)	18	€/dt FM
Winterroggen	19,5	€/dt FM
Winterroggen (GPS)	15,0	€/dt TM
Silomais	11,0	€/dt TM
Braugerste	24,6	€/dt FM

Das Ergebnis der Berechnung kann anschließend zur Ermittlung des Ertragsoptimums in die Ausgangsformel eingesetzt werden.

Beispiel (Kartoffel, konventionelle Fruchtfolge, Hamerstorf 2018):

Ertragsfunktion: $f(x)= -0{,}0045x^2 + 1{,}8399x + 568{,}97$

Faktorpreis: 1,5 € / kg N; Produktpreis: 30 €/dt

Berechnung N-Optimum:

$f'(x)= -0{,}009x + 1{,}8399$ *[Bildung 1. Ableitung]*

$1{,}5 = 30*(-0{,}009x + 1{,}8399)$ *[Einsetzen von Faktor- und Produktpreis]*

$1{,}5 = -0{,}27x + 55{,}197 \mid - 55{,}917$

$-53{,}697 = -0{,}27\ x \mid /(-0{,}27)$

$\boldsymbol{199 = x}$

Errechnetes N-Optimum: 199 kg N/ha

Die optimale Einsatzmenge für Stickstoff liegt in diesem Beispiel bei einem Produktpreis von 30 €/dt und einem Faktorpreis von 1,5 € /kg N bei 199 kg N/ha.

Berechnung Ertragsoptimum:

Zur Bestimmung des Ertragsoptimums wird in die Ertragsfunktion die optimale N-Einsatzmenge (x=199) eingefügt.

$f(x)= -0{,}0045*(199)^2 + 1{,}8399*199 + 568{,}97$ *[Einsetzen des ermittelten N-Optimums]*

$f(x)= 757$

Errechnetes Ertragsoptimum: 757 dt FM/ha

Alle für den Versuchsstandort Hamerstorf ermittelten N-Optima sind in Kapitel 3.4 abgebildet.

2.5.2 Stickstoff-Mineraldüngeräquivalente (N-MDÄ)

Die Stickstoff-Mineraldüngeräquivalente (N-MDÄ) dienen als Bezugsmaß für die Nährstoffwirksamkeit von organischen Düngemitteln. Die prozentuale Gewichtung errechnet sich aus dem Verhältnis der Nährstoffausnutzung des organischen Düngers im Vergleich zu einer gleich hohen Mineraldüngergabe. Die N-MDÄ wird auch als anrechenbare Wirksamkeit bezeichnet. Um die N-MDÄ berechnen zu können, wird eine mineralische N-Düngestaffel für die Ableitung der Ertragsfunktion (siehe 2.2) und eine rein organische Variante benötigt. Die Höhe der N-Düngung orientiert sich dabei an dem Nährstoff, der zuerst abgedeckt wird. Mit Hilfe der N-MDÄ ist es möglich, die N-Verfügbarkeit verschiedener organischer Dünger in verschiedenen Jahren und auf verschiedenen Standorten fruchtartenspezifisch zu vergleichen.

Beispiel (Winterroggen, konventionelle Fruchtfolge, Hamerstorf 2019):

Ertragsfunktion: $f(x)= -0{,}0016x^2 + 0{,}5899x + 35{,}263$

Die mit 144 kg Gesamt-N/ha organisch gedüngte Variante (Variante 10) hatte einen Ertrag von 58 dt TM/ha.

Berechnung:

$f(x)= -0{,}0016x^2 + 0{,}5899x + 35{,}263 \mid f(x)=58$

$58 = -0{,}0016x^2 + 0{,}5899x + 35{,}263 \mid / (-0{,}0016)$

$-36250 = x^2 - 369x - 22039 \mid +36250$

$0 = x^2 - 369x + 14211 \mid$ *Anwendung p/q-Formel*

$x_{1,2} = -(p/2) \pm \sqrt{(p/2)^2-q}$

$x_{1,2} = -(-369/2) \pm \sqrt{(-369/2)^2-14211}$

$x_{1,2} = 185 \pm \sqrt{19829}$

$x_{1,2} = 185 \pm 141$

$x_1 = 44 \qquad x_2=326$

Berechnung N-MDÄ [%]: $N\text{-}MDÄ= (x_1 / \text{eingesetzte Menge organischer Dünger}) *100$

$N\text{-}MDÄ = (44/144)*100$

Errechnete N-MDÄ [%]: 31

Die einzelnen N-Mineraldüngeräquivalente am Standort Hamerstorf für die konventionelle und grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge sind in Kapitel 3.5 abgebildet.

2.5.3 N-Gehalt im Erntegut

Die Höhe des Rohproteingehalts gibt Hinweise über die in der Pflanze enthaltene N-Menge. Der Umrechnungsfaktor von Rohprotein zum N-Gehalt liegt bei Getreide (außer Weizen) bei 6,25, bei Winterweizen ist dieser mit 5,7 etwas geringer. Der N-Gehalt im Erntegut kann mithilfe des Rohproteingehalts wie folgt berechnet werden:

$$\text{N-Gehalt [kg/dt]} = \frac{\text{Rohproteingehalt allgemein [\%]}}{6{,}25} \quad (2\text{-}2)$$

$$\text{N-Gehalt Winterweizen [kg/dt]} = \frac{\text{Rohproteingehalt allgemein [\%]}}{5{,}7} \quad (2\text{-}3)$$

N- und Rohproteingehalte beziehen sich beim Erntegut immer auf die Trockenmasse. Um die N-Aufnahme des Korns zu berechnen, werden die Faktoren Kornertrag, Trockensubstanz und Rohproteingehalt benötigt.

Beispiel: *Winterweizen mit 90 dt Korn-Ertrag/ha, TS-Gehalt 86,5 %, 11% Rohproteingehalt*
*Korn-N-Aufnahme Winterweizen: (90 dt/ha x 0,865) * (11% / 5,7) = 150,2 kg N/ha*

2.5.4 N-Angebot und N-Abfuhr

Mithilfe des ermittelten N-Gehalts einer Kultur und dem dazugehörigen Aufwuchs kann die N-Abfuhr berechnet werden. Durch die ermittelte N-Abfuhr kann beispielsweise näherungsweise berechnet werden, wie viel des gedüngten Stickstoffs durch eine Kultur aufgenommen wird.

$$\text{N-Abfuhr [kg N/ha]} = \text{N-Gehalt [kg N/dt TM]} \cdot \text{Ertrag [dt TM/ha]} \quad (2\text{-}4)$$

Das N-Angebot ergibt sich aus der N-Zufuhr und dem Frühjahrs-N_{min}.

$$\text{N-Angebot} = \text{Anrechenbare N-Zufuhr [kg N/ha]} + \text{Frühjahrs-Nmin [kg N/ha]} \quad (2\text{-}5)$$
[kg N/ha]

Die anrechenbare N-Zufuhr bezieht sich auf die Mindestwirksamkeit des organischen Nährstoffträgers im Jahr des Aufbringens. Am Versuchsstandort Hamerstorf wird in den Varianten 9 und 10 ein Gärrest eingesetzt. Dieser wird mit 70 % für die Berechnung der mineralischen Ergänzungsdüngung in Variante 9 angerechnet.

Es muss unbedingt beachtet werden, dass es sich um Exaktversuche handelt, in denen die Kernparzelle beerntet wird, um Randeffekte auszuschließen. Daher liegen die Erträge mit rd. 10 – 15 % (teilweise 20 %) deutlich über den regionalen Praxiserträgen. Für die Kartoffel wurden keine N-Gehalte im Versuch ermittelt, stattdessen wurden die standardisierten N-Gehalte aus der Düngeverordnung (DüV) für die Berechnungen herangezogen. Hierdurch entstehen Ungenauigkeiten, die bei der Bewertung von Maßnahmen berücksichtigt werden müssen.

2.5.5 N-Bilanzsaldo

Der N-Bilanzsaldo errechnet sich aus der N-Zufuhr der Düngung abzüglich der N-Abfuhr mit dem Erntegut. Hierbei wird kein Ertragsabschlag aufgrund der höheren Erträge in den Exaktversuchen im Vergleich zu Praxisflächen angewendet. Beim Brutto-N-Bilanzsaldo wird die organische N-Düngung zu 100 % angerechnet. Beim hier dargestellten Netto-N-Bilanzsaldo wird die Anrechenbarkeit der organischen Düngung berücksichtigt. Der Bilanzierungszeitraum bezieht sich dabei auf den in der Düngeverordnung (DüV) definierten Zeitraum, dem Düngejahr (DüV, 2017). Das Düngejahr ist nach § 2 Nummer 4 der DüV wie folgt definiert: „Zeitraum von 12 Monaten, auf den sich die Bewirtschaftung des überwiegenden Teiles der landwirtschaftlich genutzten Fläche, insbesondere die dazugehörige Düngung, bezieht.“ Bei der Bilanzierung muss - bei Abweichung des Zeitraums von der DüV - der gewählte Zeitraum, z.B. Kalenderjahr mit angegeben werden.

$$\text{Netto-N-Bilanzsaldo} = \text{anrechenbare N-Zufuhr [kg N/ha]} - \text{N-Abfuhr [kg N/ha]} \quad \text{[kg N/ha]} \tag{2-6}$$

2.5.6 N-Düngeeffizienz

Die N-Düngeeffizienz ergibt sich aus der N-Abfuhr einer Variante X unter Berücksichtigung der N-Abfuhr der ungedüngten Variante (hier Variante 1) sowie dem Gesamt-N bzw. anrechenbaren N bei organischer Düngung aus dem zugeführten Dünger der jeweiligen Variante X wie in folgender Gleichung gezeigt:

$$\text{N-Düngeeffizienz [\%]} = \frac{\text{N-Abfuhr VarX - N-Abfuhr Var1}}{\text{Nges-Dünger VarX}} \cdot 100\ \% \tag{2-7}$$

Damit gibt die N-Düngeeffizienz an, wie hoch der Anteil des N-Düngers an der N-Abfuhr ist. Ein Wert über 100 % gibt an, dass die N-Abfuhr über das Erntegut größer ist, als die N-Zufuhr über Düngung. Somit kann eine N-Ausnutzung aus Mineralisation unterstellt werden.

2.5.7 Getreideeinheiten

Damit die einzelnen angebauten Kulturarten besser miteinander verglichen werden können, werden die Erträge in Getreideeinheiten umgerechnet. Die Getreideeinheit bildet als gemeinsamer Nenner eine Einheit zur Berechnung des Energielieferungsvermögens eines landwirtschaftlichen Erzeugnisses. Als Referenz dient das Energielieferungsvermögen von Futtergerste (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, o. J.).
Die einzelnen Erträge der Kulturarten werden mit der Kennzahl als Faktor multipliziert.

Tabelle 2-9: Getreideeinheiten für die Kulturen am Versuchsstandort Hamerstorf für die Versuchsjahre 2014 bis 2021 (Abel, et al., 2010)

Kulturart	Getreideeinheitenschlüssel GE/dt Ertrag	Ertrag bezogen auf 1 dt
Kartoffel	0,22	Knollenertrag
Silomais	0,3	Frischmasse-Ertrag
Braugerste	1,0	Kornertrag
Winterroggen	1,0	Kornertrag
Winterroggen-GPS	0,3	Frischmasse-Ertrag
Untersaat (Welsches Weidelgras)	0,2	Frischmasse-Ertrag

2.5.8 N_{min}-Methode

Die N_{min}-Untersuchung in den drei Bodenschichte 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm dient zur Erfassung des pflanzenverfügbaren, mineralischen Stickstoffanteils des Bodens (löslicher, mobiler Anteil). Der mineralische Stickstoffgehalt im Boden, kurz N_{min}, setzt sich aus der Summe von Nitrat-Stickstoff (NO_3^-) und Ammonium-Stickstoff (NH_4^+) zusammen. Die Frühjahrs-N_{min}-Werte geben Auskunft über die im Frühjahr im Boden verfügbare Stickstoffmenge und werden in der Praxis für die Ermittlung einer bedarfsgerechten Stickstoffdüngung genutzt. Die Ernte-N_{min}-Werte geben den Reststickstoffgehalt im Boden direkt nach der Ernte wieder. Nach der Ernte unterliegt der Stickstoff im Boden Umbau- und Mineralisationsprozessen. Zur Abschätzung der potentiellen Nitrateinträge ins Grundwasser wird die Herbst-N_{min}-Beprobung zu Beginn der Sickerwasserperiode durchgeführt. Sie wird für

eine Bewertung des Stickstoff-Auswaschungspotentials vor Beginn der Sickerwasserspende sowie für eine Abschätzung der potenziellen Nitratkonzentration im Sickerwasser über Winter verwendet. In vielen niedersächsischen Wasserschutzkooperationen sind geringe Rest-N_{min}-Gehalte nach der Ernte bzw. im Herbst ein Erfolgskriterium für die Auszahlung von Mitteln für abgeschlossene freiwillige Vereinbarungen. Für die methodische Vorgehensweise wird auf die folgenden zwei Dokumente verwiesen:

- Untersuchung des mineralischen Stickstoffs im Boden - Empfehlung zur Nutzung der Herbst-N_{min}-Methode für die Erfolgskontrolle und zur Prognose der Sickerwassergüte; Grundwasser Band 8 (NLWKN, 2010)
- Hinweise zur Entnahme von Bodenproben auf N_{min} (LUFA Nord-West, 2017)

In jeder Variante werden Frühjahrs-, Ernte- und Herbst-N_{min}-Proben sowie in Variante 4 zusätzlich in monatlichen Abständen N_{min}-Proben gezogen. Dabei werden vier Einstiche pro Parzelle vorgenommen und es wird eine Mischprobe je Variante gebildet.

2.5.9 Nitratkonzentrationen

Da an den Saugsonden permanent Unterdruck anliegt, ist das in den zwei Wochen gesammelte Sickerwasser häufig eine Mischprobe über den gesamten Zeitraum. Für die Berechnung von Nitratfrachten werden tägliche Nitratkonzentrationen benötigt, daher wird zwischen den Messterminen stufenweise interpoliert. Die am Probenahmetermin gemessene Nitratkonzentration wird an allen Tagen der zurückliegenden zwei Wochen angenommen. Nur wenn das Probenahmeintervall zwei Wochen deutlich überschreitet und die Anlage aufgrund von Dauerfrost oder Trockenheit abgestellt werden musste, wird im verbleibenden Zeitraum linear interpoliert. Da es vorkommen kann, dass die Saugsonden an einigen Probenahmeterminen kein Wasser liefern, können bei der Mittelwertbildung über mehrere Saugsonden einer Variante unplausible Kurvenverläufe entstehen. In diesen Fällen müssen die Kurvenverläufe angepasst werden, entweder durch das Ausblenden der unplausiblen Werte oder durch das Ersetzen der fehlenden Werte durch interpolierte Werte. Um die Nitratkonzentrationen der Varianten miteinander vergleichen zu können, werden mittlere Nitratkonzentrationen über die Sickerwasserperiode (01.07. bis 30.06.) oder das Winterhalbjahr (01.07. bis 30.04.) berechnet. Ein Winterhalbjahr beginnt am 1. Juli und endet am 30. April des Folgejahres, da danach die Sickerwasserkonzentrationen nicht mehr durch die Vorfrucht, sondern bereits durch Düngung und Mineralisation der neuen Frucht beeinflusst sein können.

Die mittlere NO_3-Konzentration des Sickerwassers einer Periode ist nicht nur abhängig von der Konzentration des Sickerwassers, sondern auch von der Sickerwassermenge. Daher werden die gemessenen NO_3-Konzentrationen mit der angefallenen Sickerwassermenge gewichtet. Hierzu wird die NO_3-N-Fracht einer Periode durch die in diesem Zeitraum gebildete Sickerwassermenge dividiert (Formel (2-8):

$$NO_3\text{-N [mg/l]} = NO_3\text{-N-Fracht [kg/ha]} / (0{,}01 \cdot \text{Sickerwasser [l/m²]}) \quad (2\text{-}8)$$

Der Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TVO) von 50 mg NO_3/l (TRINKWV 2018) findet im Sickerwasser keine Anwendung und dient hier zur Orientierung.

2.5.10 Nitratfrachten

Um Nitratfrachten abschätzen zu können, wird die tägliche im Boden gebildete Sickerwassermenge benötigt. Sie wurde mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells modelliert (DVWK, 1996). Hierfür werden unter anderem tägliche Wetterdaten benötigt. Das Vorgehen der Auswertung der Wetterdaten ist in Kapitel 2.3 beschrieben. Für die Modellierung des Wasserhaushalts wurden die gemessenen Niederschläge zum Ausgleich systematischer Messfehler (Überwehung des Trichters, Verdunstung) mit Korrekturfaktoren nach Richter (1995) verrechnet. Die korrigierten Niederschläge (P) sind daher höher als die gemessenen Niederschläge (N).

Im ersten Schritt des Wasserhaushaltsmodells wurde die potentielle Evapotranspiration (ETp) ermittelt (Formel (2.1). Sie gibt die Verdunstung bei unbegrenzt verfügbarem Bodenwasser unter Grünland und den gegebenen meteorologischen Bedingungen an. Sie wurde nach Wendling et al. (1991) aus dem Tagesmittel der Lufttemperatur und der Tagessumme der Globalstrahlung berechnet. Die aktuelle Evapotranspiration (ETa) wurde nach Wendling et al. (1984) ermittelt und berücksichtigt den realen Wasservorrat im Boden. Sie ist daher in der Regel niedriger als die potentielle Evapotranspiration. Hierbei wurde das langjährige Mittel der ETp in der Vegetationsperiode (April bis September) berücksichtigt (in Hamerstorf 3,11 mm/d im Mittel der Jahre 2014 bis 2022) sowie kulturabhängige Bestandskoeffizienten (kc-Faktoren). Diese sind notwendig, um die ETp von Grünland in Werte für andere Feldfrüchte umzurechnen. Die verwendeten kc-Faktoren sind Monatsmittelwerte und gehen auf Dommermuth & Trampf (1990, 1991), DVWK (1996) und auf Erfahrungswerte des LBEG zurück (Bug, et al., 2020). Für die vorliegende Auswertung wurden für alle Varianten separat Werte für die aktuelle Evapotranspiration und folglich auch den Bodenwasservorrat und die Sickerwasserrate

ausgegeben. Begründet ist dies unter anderem damit, dass ein schlecht entwickelter Bestand weniger Wasser verbraucht als ein gut entwickelter Pflanzenbestand. Dem wird Rechnung getragen, indem die aktuelle Evapotranspiration bzw. der in die Formel eingehende kc-Faktor ertragsabhängig angepasst wurde (siehe Anhang: kC-Werte zur Umrechnung der ETp in die ETa
Tabelle A-2). Auch die nach Abfrieren der Zwischenfrucht dem Boden auflagernden organischen Reste können die Evapotranspiration verringern. Je mächtiger die Auflage, desto geringer die Evapotranspiration. Dies wurde über den Zwischenfruchtertrag berücksichtigt. Daher wurden für die Kulturen Winterroggen, Silomais, Sommergerste und für die Zwischenfrucht vier ertragsabhängige Klassen gebildet. Das Klassenmittel des normalen Ertrags richtet sich nach dem mittleren Ertrag der Jahre 2007 bis 2016 der Niedersächsischen Erntestatistik (LSN, 2017). Für die Zwischenfrucht basiert das Klassenmittel des normalen Ertrages auf Ergebnissen des grundwasserschutzorientierten Zwischenfruchtversuches in Wehnen (Noltemeyer, et al., 2021). Da die Erträge im Feldversuch unter optimalen Versuchsbedingungen erzielt wurden, war ein Praxisflächenabschlag von 15 % für Winterroggen, Silomais und Sommergerste erforderlich, bevor die Einstufung erfolgte. Für Kartoffeln der Reifegruppe I bzw. II lagen keine Daten zu mittleren Erträgen vor, so dass auf eine Ertragsabstufung für diese Kulturen verzichtet wurde.

Für die ertragsabhängige Abstufung der kC-Faktoren einer Kultur wurden zunächst die kC-Faktoren des normalen Ertrags wie oben beschrieben festgelegt. Zur Bestimmung der kC-Faktoren bei geringeren oder höheren Erträgen wurde der Vergleich zur Schwarzbrache gemacht und dabei folgende Abstufung herangezogen (Formeln (2-9), (2-10) und (2-11):

$$k_{C_{\text{hoher Ertrag}}} = k_{C_{\text{normaler Ertrag}}} + \left(\frac{k_{C_{\text{normaler Ertrag}}} - k_{C_{\text{Schwarzbrache}}}}{3}\right) \quad (2\text{-}9)$$

$$k_{C_{\text{gemindeter Ertrag}}} = k_{C_{\text{normaler Ertrag}}} - \left(\frac{k_{C_{\text{normaler Ertrag}}} - k_{C_{\text{Schwarzbrache}}}}{3}\right) \quad (2\text{-}10)$$

$$k_{C_{\text{stark geminderter Ertrag}}} = k_{C_{\text{normaler Ertrag}}} - 2 \cdot \left(\frac{k_{C_{\text{normaler Ertrag}}} - k_{C_{\text{Schwarzbrache}}}}{3}\right) \quad (2\text{-}11)$$

Im Weiteren wurden, wie in den Formeln (2-12), (2-13) und (2-14) gezeigt, die Mittelwerte der höheren bzw. niedrigeren Ertragsstufen ermittelt.

$$\text{Hoher Ertrag} = \frac{4}{3} \cdot \text{normaler Ertrag} \quad (2\text{-}12)$$

$$\text{Gemindeter Ertrag} = \frac{2}{3} \cdot \text{normaler Ertrag} \quad (2\text{-}13)$$

$$\text{Stark gemindeter Ertrag} = \frac{1}{3} \cdot \text{normaler Ertrag} \quad (2\text{-}14)$$

Die so errechneten Mittelwerte der Ertragsstufen wurden auf ganze Zahlen gerundet. Zur Bestimmung der Klassenweiten wurden die Grenzen zwischen den Ertragsstufen überschneidungsfrei ermittelt. Die so ermittelten kc-Faktoren ermöglichten eine kultur- und ertragsangepasste Abschätzung der aktuellen Evapotranspiration.

Im nächsten Schritt der Wasserhaushaltsmodellierung wurde ein Startwert für den Bodenwasservorrat (Wi) der Wurzelzone (in Hamerstorf 8 dm) festgelegt. Dabei wurde angenommen, dass der Bodenwasservorrat zu Berechnungsbeginn am 01.03.2014 Feldkapazität erreichte (Wi = FKWe). Die Wasserhaushaltsberechnung wurde kontinuierlich über alle Jahre fortgeführt. Zum Startwert Wi wurde am Beginn des (i+1)-ten Tages der Niederschlag (Pi) und ggf. Beregnungsgaben addiert und die aktuelle Verdunstung (ETai), sowie die Sickerwassermenge (SWi) abgezogen. Überstieg der Wassergehalt Wi+1 des Bodens die Feldkapazität in der effektiven Durchwurzelungstiefe (FKWe), trat Sickerwasser auf. Die täglichen Sickerwasserraten wurden für die Auswaschungsperiode bzw. das Winterhalbjahr aufsummiert und bildeten die jährliche Sickerwasserrate (SWR) des Standortes.

Zur Ermittlung der NO_3-N-Frachten, die der Auswaschung unterliegen, wurden die täglich berechneten Sickerwassermengen und die tageweise interpolierten NO_3-Konzentrationen im Bodenwasser der Saugsonden miteinander verrechnet:

$$NO_3\text{-N-Fracht [kg/ha]} = \text{Sickerwasser [l/m²]} \cdot NO_3\text{-N [mg/l]} \cdot 0{,}01 \quad (2\text{-}15)$$

Die täglichen NO_3-N-Frachten einer Sickerwasserperiode wurden aufsummiert. Die Summe bildet die NO_3-N-Fracht einer Sickerwasserperiode.

2.6 Statistik

Bei der Angabe von Mittelwerten handelt es sich, wenn nicht anders angegeben, um das arithmetische Mittel. Standardfehler sind dargestellt als Maß für die Schätzgenauigkeit der dargestellten Mittelwerte.

Mit Hilfe einer Regressionsanalyse wurde der Zusammenhang zwischen der mittleren NO_3-Konzentration im Winterhalbjahr und dem Herbst-N_{min} untersucht. Hierbei wurde die mittlere NO_3-Konzentration im Winterhalbjahr als abhängige Variable und der Herbst-N_{min} als unabhängige Variable bzw. fixer Effekt berücksichtigt. Beide Variablen wurden log_{10}-transformiert. Das Jahr und die Variante gingen als zufällige Effekte in das Modell ein, wobei für das Jahr ein *random slope* berücksichtigt wurde, während für die Variante lediglich ein *random intercept* sinnvoll war[1]. Die Variante ging aufgrund des nicht orthogonalen Designs bei den Sickerwasseruntersuchungen als Interaktion aus N-Düngevariante und Fruchtfolge, d.h. konv1, konv3, konv4, konv5, gws4 und gws5, in das Modell ein. Das marginale Bestimmtheitsmaß R^2m dieses Modells wurde nach der Methode von Nakagawa et al. (2017) ermittelt. Die Überprüfung der Residuen auf Normalverteilung erfolgte mit QQ-Diagrammen. Die Prüfung auf Homoskedastizität wurde mit Diagrammen durchgeführt, die die Residuen den angepassten Werten gegenüberstellen. Die Auswertung wurde in der R- Version 4.4.1 (R Core Team, 2024) umgesetzt mit den R-Paketen „lme4“ (Bates, et al., 2015), „lsmeans“ (Lenth, 2016), „lmerTest“ (Kuznetsova et al., 2017), „multcomp“ (Hothorn et al., 2008), „pbkrtest“ (Halekoh & Højsgaard, 2014) und „MuMIn“ (Barton, 2019). Die Abbildungen wurden mit dem R-Paket „ggplot2“ (Wickham, H., 2016) und Excel erstellt.

[1] Das angepasste Modell lautet wie folgt: $log_{10}(NO_3\text{-Konz. im WH}) = log_{10}(\text{Herbst-}N_{min}) + (1 + log_{10}(\text{Herbst-}N_{min}) \mid \text{Jahr}) + (1 \mid \text{Variante})$. Modellschreibweise nach Software R (R Core Team, 2024), Paket lme4 (Bates et al., 2015).

3 Ergebnisse (LWK)

Dieses Kapitel befasst sich mit der Darstellung der pflanzenbaulichen Ergebnisse aus der konventionellen und der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Standort Hamerstorf (Versuch 643). In beiden Fruchtfolgen werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die N-Dynamik im Boden, N-Bilanzen, Erträge und Qualitätsparameter untersucht. Zusätzlich finden in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge unter den Varianten 4 und 5 (überhöhte N-Düngung), sowie in der konventionellen Fruchtfolge und den Varianten 4, 5 sowie 3 (reduzierte N-Düngung) und 1 (Kontrolle, ohne N-Düngung) Untersuchungen des Sickerwassers auf Nitrat statt (vgl. Kapitel 4).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der konventionellen und der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge dargestellt. Die Ergebnisse werden überwiegend im Mittel über die acht Versuchsjahre mit zwei Fruchtfolgezyklen dargestellt. Das heißt, jede Kultur wurde innerhalb der acht Versuchsjahre zweimal angebaut. Das Versuchsjahr 2020 (Silomais) wird aufgrund eines Düngungsfehlers nicht in die Auswertungen miteinbezogen. Tabellen mit den Ergebnissen aus den einzelnen Versuchsjahren sind im Anhang zu finden. Für die Kulturart Silomais werden die Erträge Trockenmasseerträge (dt TM/ha) angegeben. Für die Kulturart Winterroggen werden der Kornertrag und der Rohproteingehalt normiert auf einen Trockenmassegehalt (TM) von 86 % angegeben. Dies ist beim Lesen und der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

3.1 Erträge, Qualitäten, N-Abfuhren

Kartoffel

In Abbildung 3-1 ist der Knollenertrag der Kartoffel im Mittel der zwei Versuchsjahre 2014 und 2018 dargestellt. Im ersten Versuchsjahr wurde in beiden Fruchtfolgen die gleiche Kartoffelsorte mit gleichem Pflanz- und Rodungszeitpunkt angebaut. Im Versuchsjahr 2018 wurden unterschiedliche Kartoffelsorten angebaut. Die Kartoffelsorte Wega in der konventionellen Fruchtfolge wurde im Versuchsjahr 2018 später gerodet (25.09.2018) als die Kartoffelsorte Leyla der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (16.08.2018). Die Erträge lagen in der konventionellen Fruchtfolge (525 dt/ha bis 676 dt/ha) in allen Varianten im Mittel der beiden Versuchsjahre deutlich über denen der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (390 dt/ha 558 dt/ha). Ab Var. 4 erfolgte nur noch ein minimaler Anstieg der Erträge mit

steigender Düngungshöhe. In beiden Fruchtfolgen wurden die höchsten Erträge in der Var. 7 erzielt, die mit einem stabilisiertem N-Dünger gedüngt wurde (konv: 676 dt/ha, gws: 558 dt/ha).

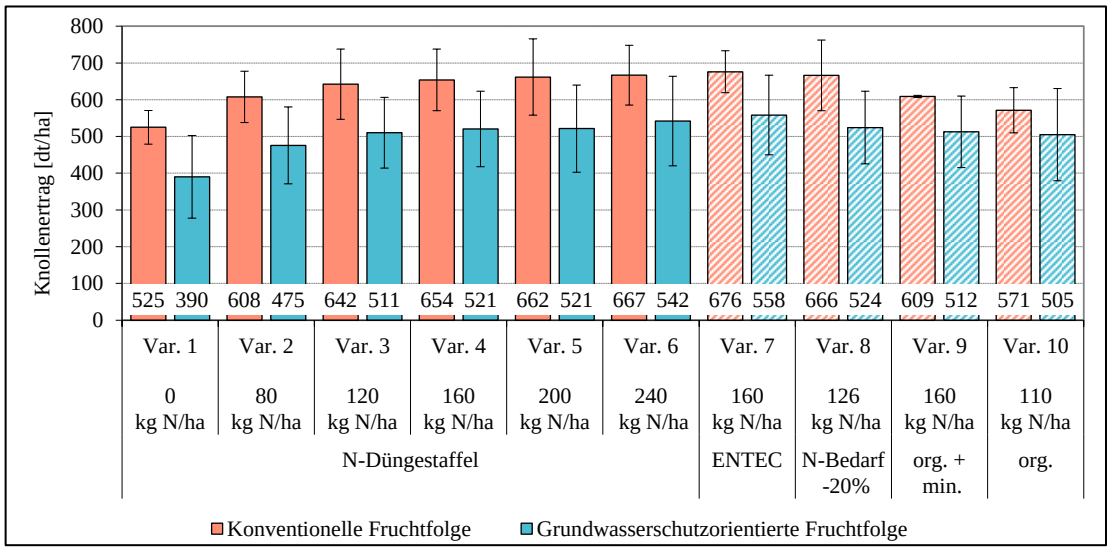

Abbildung 3-1: Knollenertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2014 und 2018

Die Relativerträge, die in Abbildung 3-2 in Bezug zur konventionellen Variante 4 dargestellt sind, verdeutlichen die Unterschiede der Ertragsleistung der beiden Fruchtfolgen. Die Unterschiede zwischen den Erträgen sind auf das Versuchsjahr 2018 zurückzuführen. Eine um 20 % reduzierte N-Düngung (Var. 8) hat auf den Knollenertrag in beiden Fruchtfolgen keinen negativen Einfluss. In der konventionellen Variante liegen die Erträge über denen der Variante 4 (160 kg N/ha).

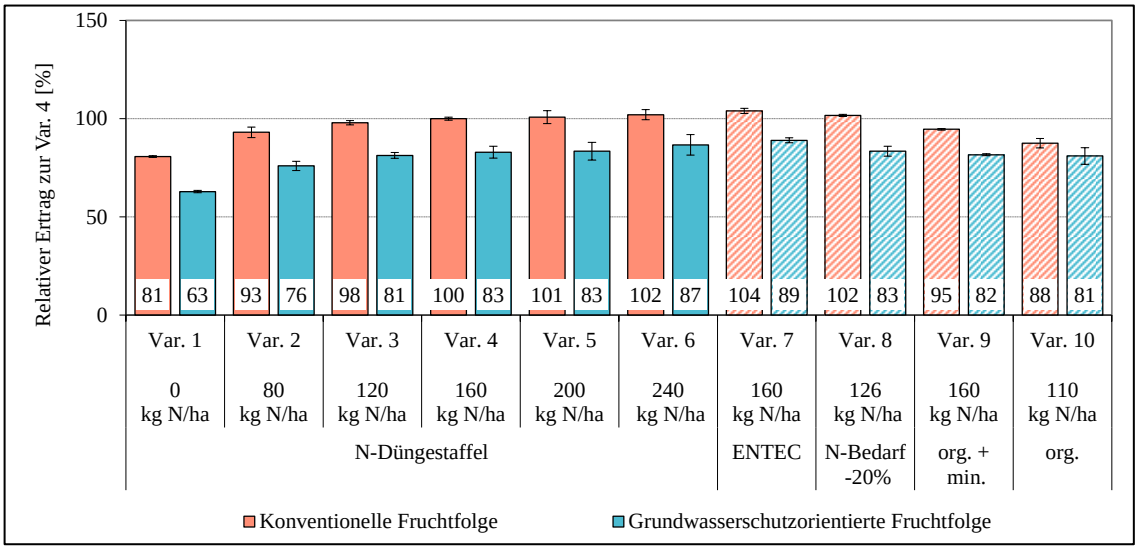

Abbildung 3-2: Relativer Ertrag zur konv. Var. 4 in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2014 und 2018

Der Stärkegehalt in der Kartoffelknolle (Abbildung 3-3) lag in den Varianten der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zwischen 11,0 und 11,7 % und somit über denen der konventionellen Fruchtfolge mit 10,6 und 11,5 %. Dabei wurden in beiden Fruchtfolgen die höchsten Stärkegehalte in der Variante ohne N-Düngung (Var. 1) erzielt. Die N-Düngung mit ENTEC hatte einen leicht negativen Einfluss auf den Stärkegehalt bei Vergleich der Var. 7 mit der Var. 4 mit gleicher N-Düngungshöhe (10,8 bzw. 11,0 %).

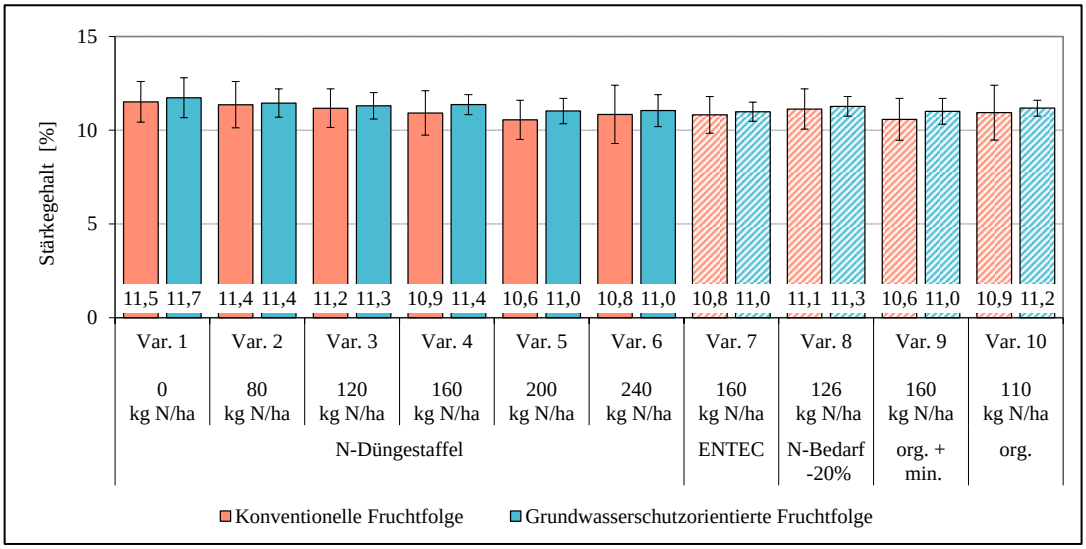

Abbildung 3-3: Stärkegehalt in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018

Die-N-Abfuhren der konventionellen Fruchtfolge lagen im Mittel der beiden Versuchsjahre in der N-Düngestaffel zwischen 184 kg N/ha (Var. 1) und 233 kg N/ha (Var. 6). In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge stiegen die N-Abfuhren von 137 kg N/ha auf 190 kg N/ha (vgl. Abbildung 3-4). Die N-Gehalte in der Knolle werden erst seit dem Versuchsjahr 2023 im Labor bestimmt, sodass die vorliegende Berechnung der N-Abfuhren auf Basis des Richtwerts aus der DüV erfolgte.

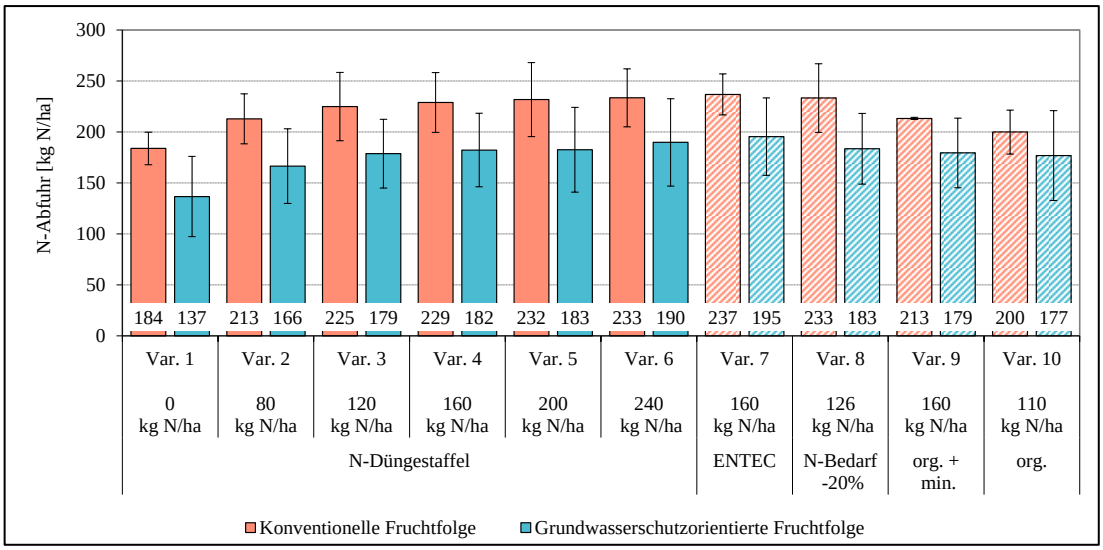

Abbildung 3-4: N-Abfuhr in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018

Braugerste

Die Braugerste wurde mit nachfolgender Zwischenfrucht Ölrettich (konv. FF) und mit Untersaat (gws. FF) angebaut. Die mittleren Erträge der Versuchsjahre 2017 und 2021 sind in der Abbildung 3-5 dargestellt. Der Kornertrag stieg in beiden Fruchtfolgen mit steigender N-Düngung an, wobei er in der konventionellen Fruchtfolge schon in Var. 4 leicht zurückging. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge war ein Anstieg bis Var. 5 (71 dt/ha) zu beobachten. Die ausschließlich organisch gedüngte Var. 10 wies in beiden Fruchtfolgen einen im Vergleich geringeren Kornertrag (50 bzw. 57 dt/ha) auf. In der Var. 8 mit einer um 20 % reduzierten N-Düngung vom Bedarfswert wurden hingegen hohe Erträge (68 bzw. 69 dt/ha) erzielt. Neben diesen hohen Erträgen lagen die Rohproteingehalte im Korn ebenfalls auf einem hohen Niveau (Abbildung 3-7).

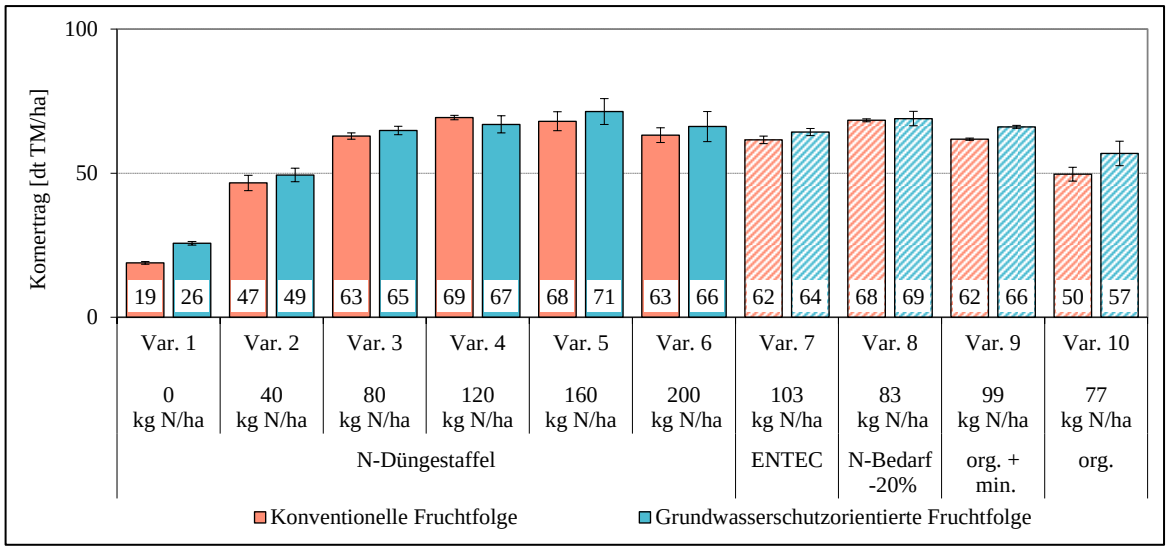

Abbildung 3-5: Kornertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) in Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2017 und 2021

Zum Vergleich der beiden Fruchtfolgen ist in Abbildung 3-6 der relative Kornertrag der beiden Fruchtfolgen im Vergleich zur konventionellen Variante 4 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die beiden organisch gedüngten Varianten im Vergleich zu den mineralischen mit ähnlicher N-Düngungshöhe niedriger sind (91 bzw. 94 % (Var. 3) 72 bzw. 82 % (Var. 10)). Insgesamt wirkte die organische N-Düngung in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge besser als in der konventionellen Furchtfolge.

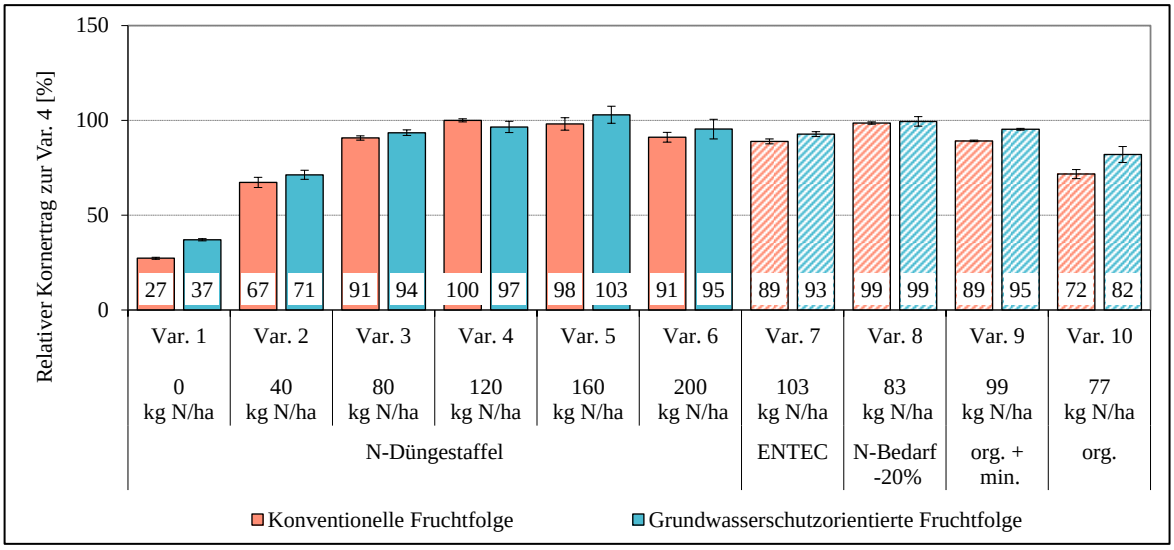

Abbildung 3-6: Relativer Kornertrag zur konv. Var. 4 in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf im Mittel der Jahre 2014 und 2018

Der Rohproteingehalt im Korn stieg ebenfalls mit steigender N-Düngung an, wobei die Var. 2 in beiden Fruchtfolgen mit einer leichten Abnahme im Vergleich zur Var. 1 eine Ausnahme

bildete (vgl. Abbildung 3-7). Ein deutlicher Unterschied von 1 % zwischen den beiden Fruchtfolgen wurde in der Var. 3 (9,7 bzw. 10,7 %) ermittelt. Für die Verwendung der Braugerste in der Bierproduktion ist ein Rohproteingehalt zwischen 9,5 und 11, 5 % anzustreben (Hüppe, 2022). Diese Gehalte wurden in allen Varianten bis auf die Varianten 5 und 6 in beiden Fruchtfolgen erreicht. In den hochgedüngten Varianten lagen die Rohproteingehalte über 11,5 %. Die Vermarktung der Braugerste ist in diesen Fällen nur noch als Futtergerste möglich, die geringere Marktpreise als die Braugerste aufweist.

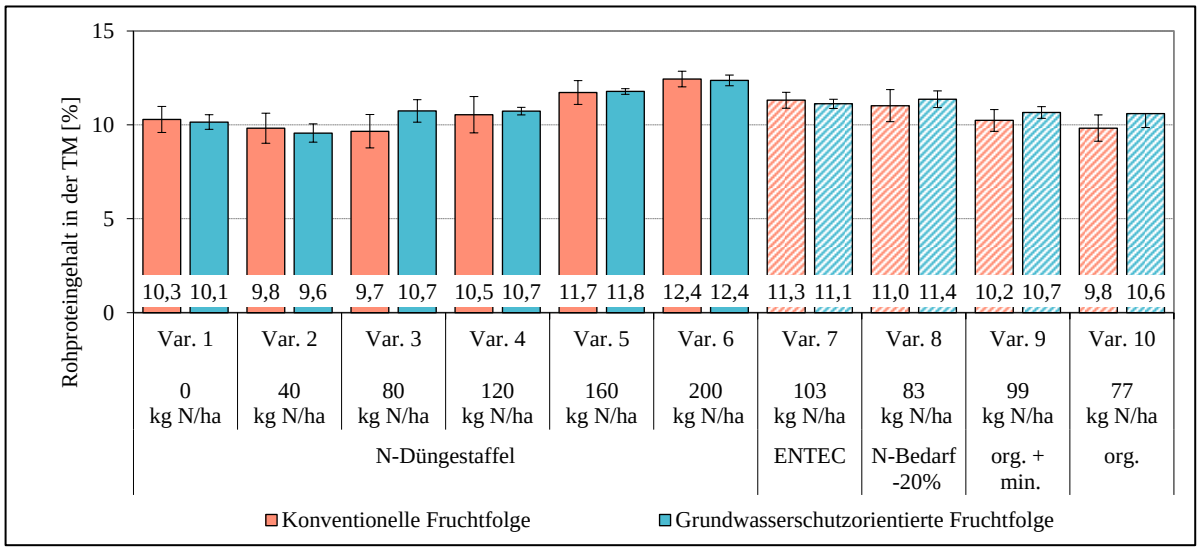

Abbildung 3-7: Rohproteingehalt in der TM ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021

Die N-Abfuhren stiegen mit steigender N-Düngung an und lagen in der N-Düngestaffel zwischen 31 kg N/ha und 126 kg N/ha (konventionelle Fruchtfolge) und 42 kg N/ha und 131 kg N/ha (grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge). Die höchsten Abweichungen von 21 kg N//ha zwischen den N-Abfuhren beider Fruchtfolgen konnten in Variante 10 (rein organisch gedüngte Variante) beobachtet werden (Abbildung 3-8).

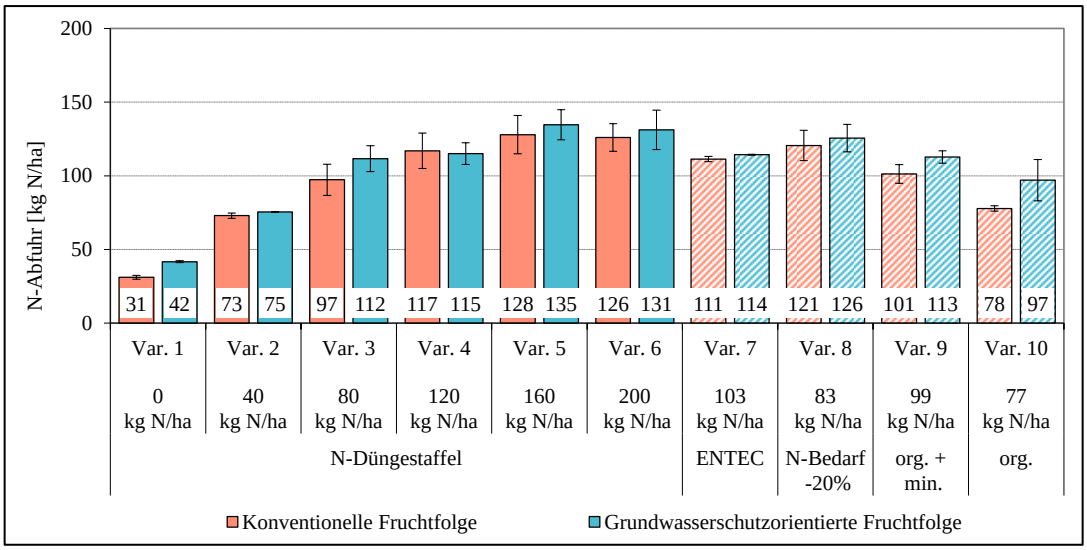

Abbildung 3-8: N-Abfuhr in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021

Im Versuchsjahr 2017 wurde nach der Braugerste in der konventionellen Fruchtfolge ein Ölrettich angebaut, in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurde eine Untersaat (Rotschwingel) gedrillt. Im November wurde der Aufwuchs ermittelt und daraus die N-Aufnahme berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-9 dargestellt. Die N-Aufnahme betrug bei der Untersaat im Mittel über alle Varianten 18 kg N/ha und beim Ölrettich mit 10 kg N/ha, ungefähr die Hälfte. Dies ist auf den höheren Ertrag (Biomasseaufwuchs) der Untersaat zurückzuführen, die N-Gehalte im Erntegut waren im Ölrettich höher.

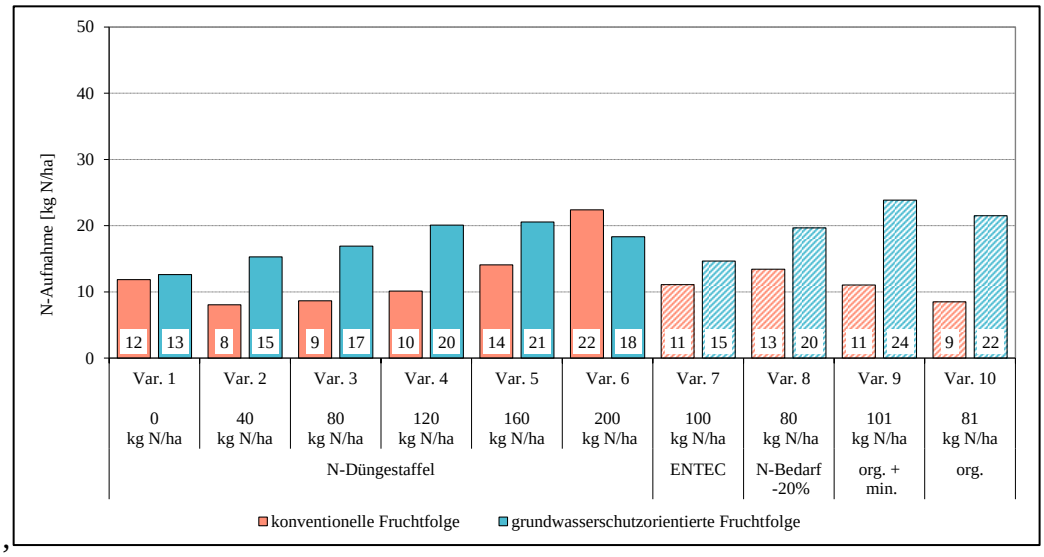

Abbildung 3-9: N-Aufnahme von Ölrettich (konv.) und Untersaat Rotschwingel (gws.) in kg N/ha (n=1) nach Braugerste im Versuchsjahr 2017

Winterroggen / Winterroggen GPS

In Abbildung 3-10 ist der Trockenmasse-Ertrag (TM-Ertrag) von Winterroggen dargestellt. In der konventionellen Fruchtfolge wurde das Korn gedroschen, wohingegen in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge die Ernte deutlich früher als Ganzpflanzensilage stattfand. In den Varianten der N-Düngestaffel waren keine großen Unterschiede im TM-Ertrag zwischen den beiden Fruchtfolgen zu erkennen. Extrem waren jedoch die Schwankungen der Jahreserträge in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge, die durch den Standardfehler dargestellt sind. Diese waren sehr ausgeprägt, im Vergleich zu denen in der konventionellen Fruchtfolge. Grund dafür waren die geringeren Erträge im Versuchsjahr 2019.

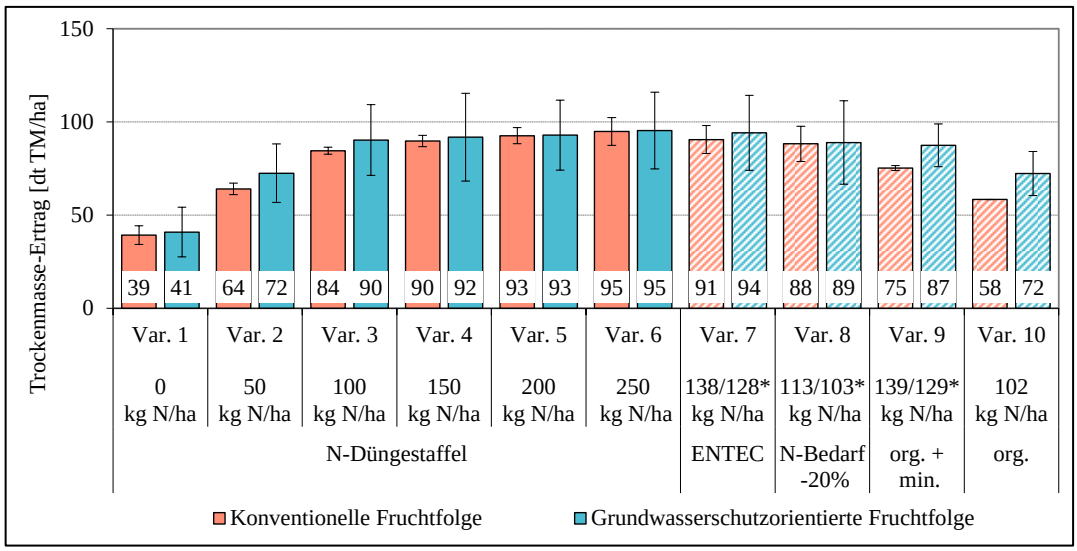

Abbildung 3-10: Trockenmasse-Ertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Der relative Ertrag zur konventionellen Variante 4, der in Abbildung 3-11 dargestellt wird, zeigt dass es trotz der unterschiedlichen Nutzungsarten nur geringe Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen gab und auch die Ertragsabweichungen der einzelnen Anbaujahre gering waren. Die höchsten Abweichungen waren ebenfalls in den Varianten 9 und 10 zu beobachten.

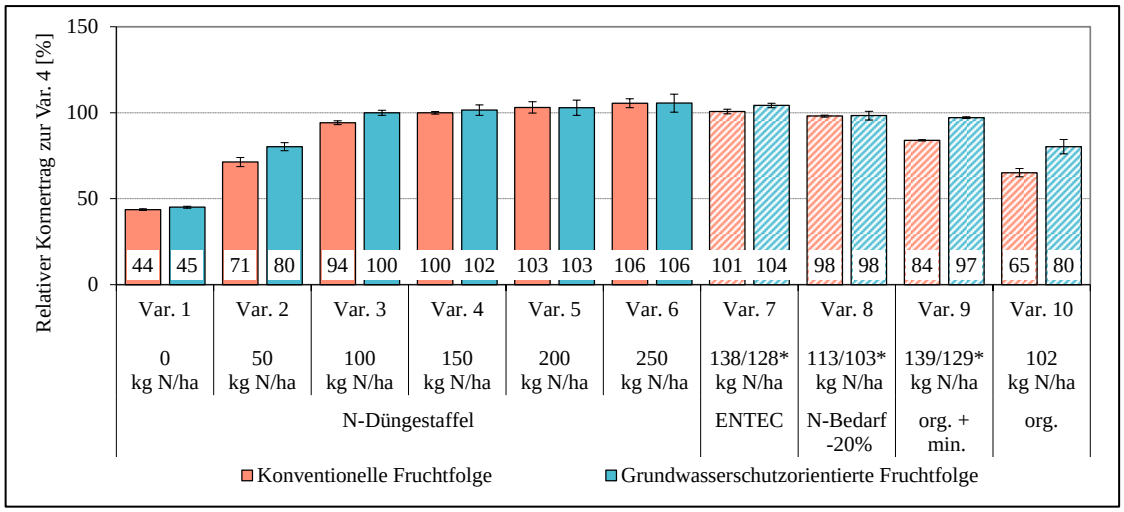

Abbildung 3-11: Relativer Kornertrag zur konv. Var. 4 in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Bei Betrachtung der mittleren Rohproteingehalte für die Kulturart Winterroggen zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen der konventionellen und der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (vgl. Abbildung 3-12). Diese Unterschiede lassen sich auf die verschiedenen Nutzungsrichtungen des Winterroggens in den zwei Fruchtfolgen zurückführen. Diese liegen bei der Nutzung als GPS deutlich unter denen der Kornnutzung. Der höchste Rohproteingehalt konnte in beiden Fruchtfolgen in der Var. 6 erreicht werden. Er lag bei 11,3 % in der konventionellen und bei 9,5 % in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge.

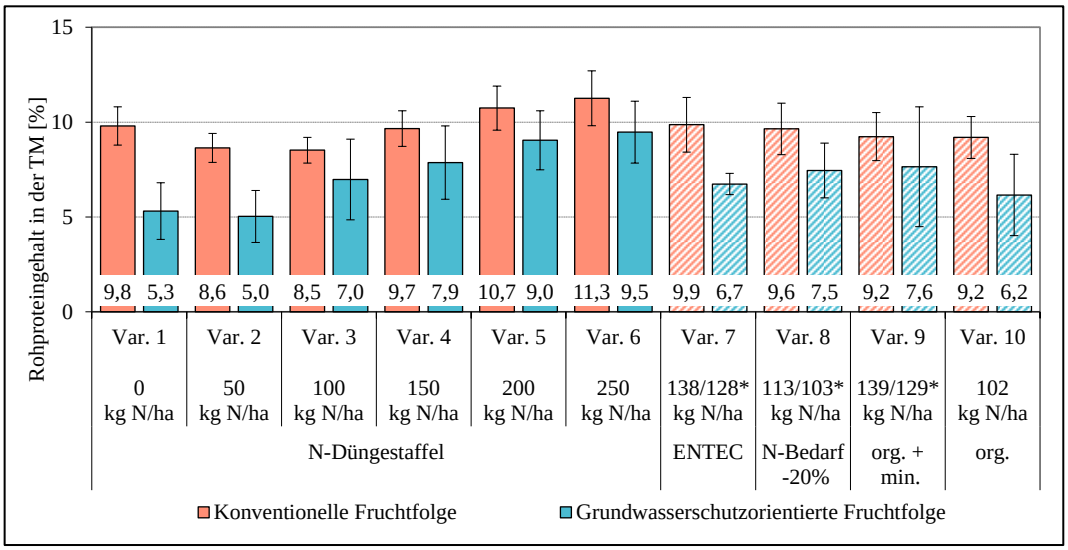

Abbildung 3-12: Rohproteingehalt in der TM ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

In die Darstellung der N-Abfuhren wurden die Erträge der Untersaat mit einbezogen, sodass die N-Abfuhren der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in allen Varianten mit Ausnahme der Variante 1 oberhalb derer der konventionellen Fruchtfolge liegen (Abbildung 3-13). Die höchste N-Abfuhr wurde in beiden Fruchtfolgen in Variante 6 (189 kg N/ha bzw. 259 kg N/ha) erreicht.

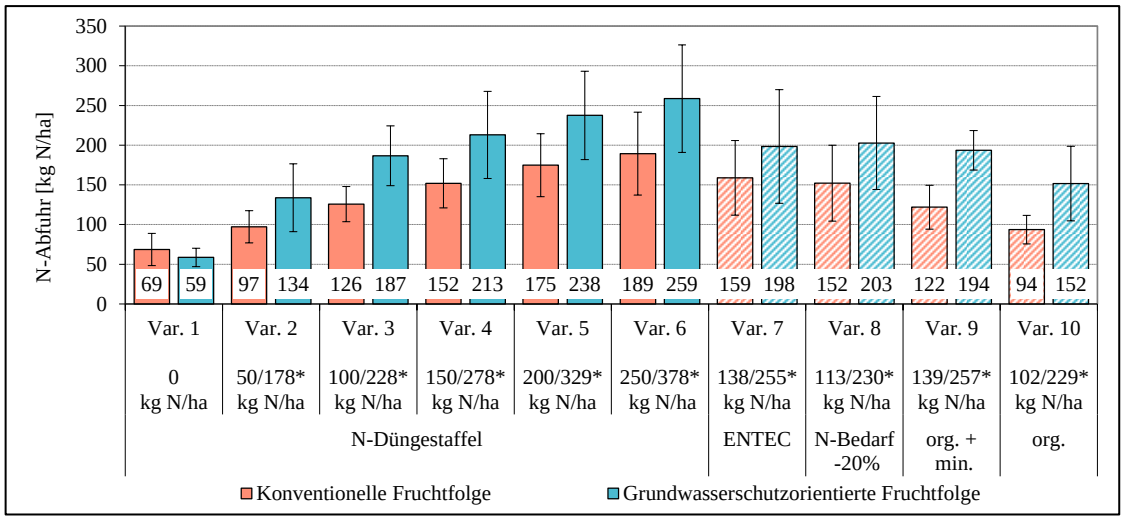

Abbildung 3-13: N-Abfuhr kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Silomais

Der TM-Ertrag vom Silomais ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Der Ertrag stieg mit steigender N-Düngung in der N-Düngestaffel an. In der konventionellen Fruchtfolge erfolgte ein Anstieg von 164 dt/ha auf 250 dt/ha (Var. 5). Der Ertrag nahm dann zur Variante 6 etwas ab und lag bei 248 dt/ha. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge stieg der Ertrag von 120 dt/ha in der ungedüngten Variante 1 bis auf 238 dt/ha in der sehr hoch gedüngten Variante 6 an. Die Erträge lagen in der konventionellen Fruchtfolge immer über denen der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge.

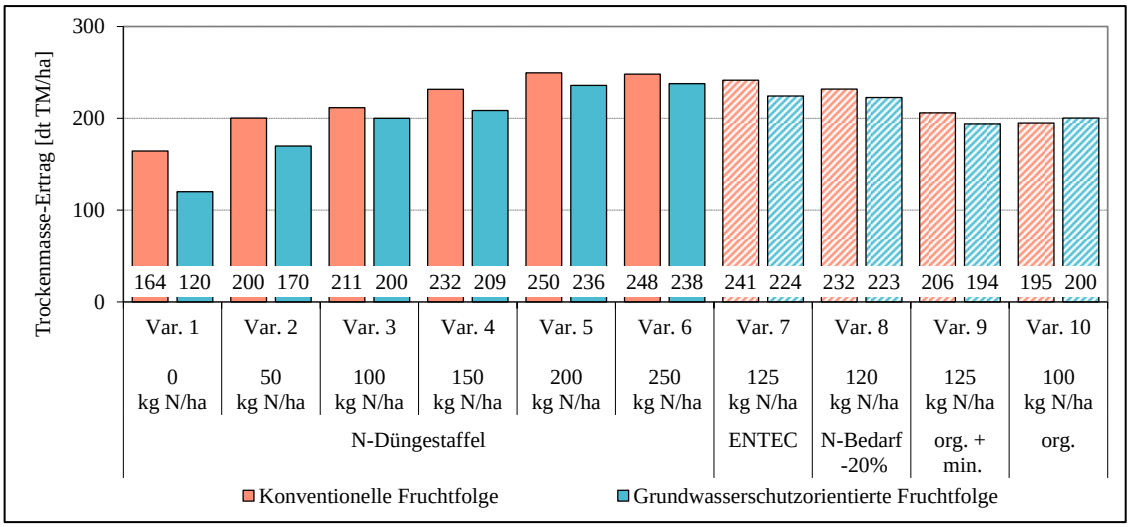

Abbildung 3-14: Trockenmasse-Ertrag in dt/ha (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016

In Abbildung 3-15 sind die TM-Erträge des Silomais aus der konventionellen Fruchtfolge für beide Anbaujahre dargestellt. Aufgrund des Düngungsfehlers im Versuchsjahr 2020 in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge ist eine Darstellung über beide Anbaujahre nicht möglich. Im Vergleich zur einjährigen Betrachtung (nur Versuchsjahr 2016) sanken die Erträge im Mittel, da im Versuchsjahr 2020 geringere Erträge erzielt wurden. Ebenfalls zu erwähnen ist, dass in den Varianten 8 – 10 im Jahr 2020 geringere N-Düngermengen pro ha aufgebracht wurden.

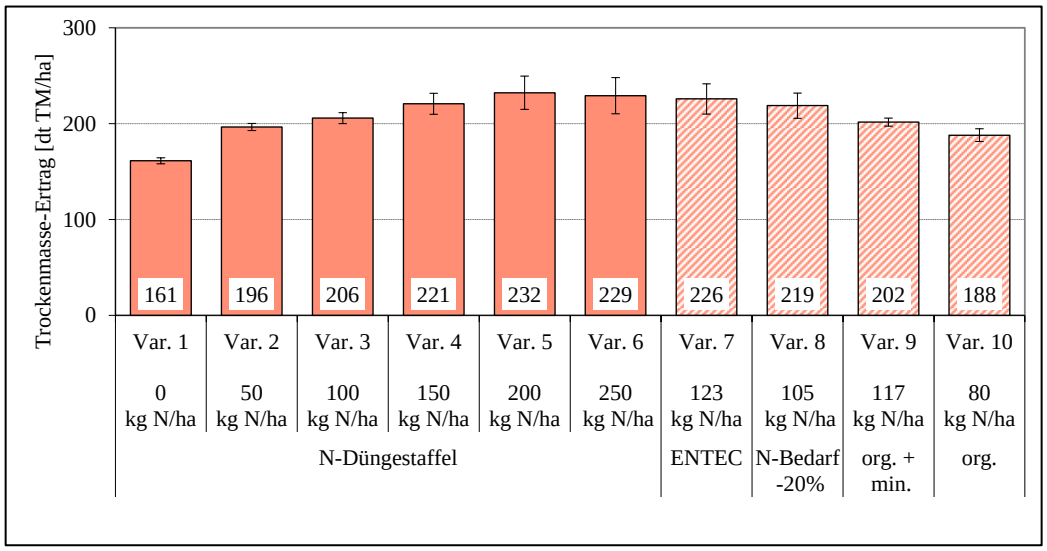

Abbildung 3-15: Trockenmasse-Ertrag in dt/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Silomais der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020

Die Relativerträge sind in Abbildung 3-16 dargestellt. Hier wird ebenfalls deutlich, dass die Erträge der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in diesem Jahr hinter denen der

konventionellen Fruchtfolge lagen. Auch hier konnte wie bei der Kartoffel eine gute Wirksamkeit einer N-Düng mit ENTEC beobachtet werden, wobei zu beachten ist, dass es sich um einjährige Ergebnisse handelt.

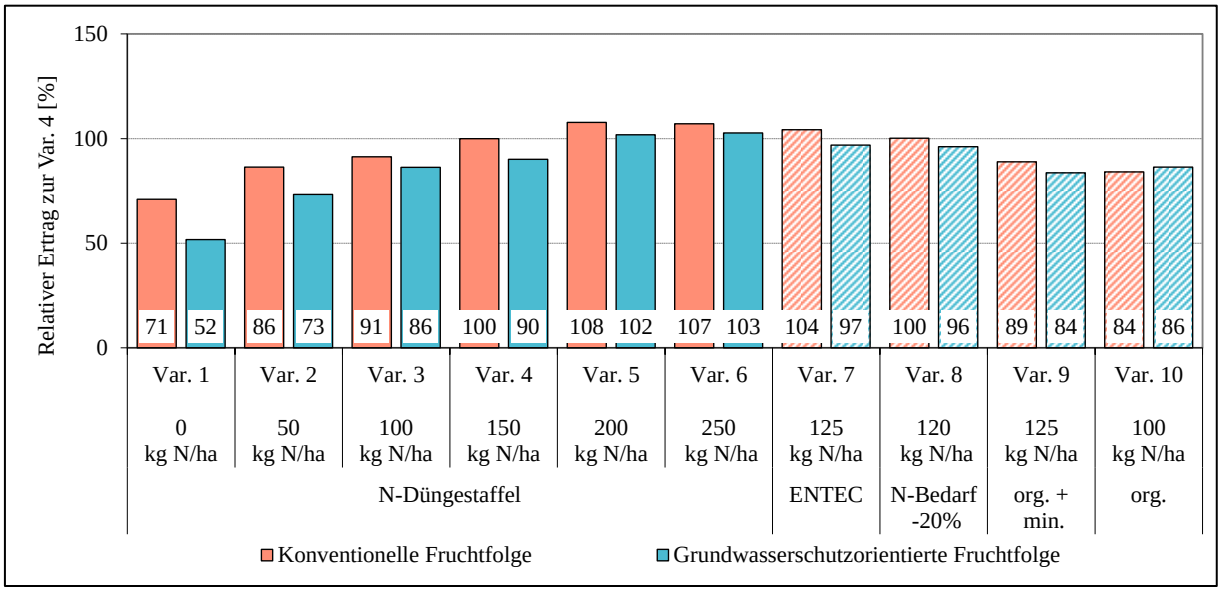

Abbildung 3-16: Relativer Ertrag zur konv. Var. 4 in % (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016

Beim Silomais zeigten sich im Versuchsjahr 2016 nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Fruchtfolgen (Abbildung 3-17). In der konventionellen Fruchtfolge lagen die Rohproteingehalte in den Var. 1 bis 3 auf dem gleichen Niveau (6 % RP in TM) und stiegen dann bis zur Var. 6 (7,8 % RP in TM) an. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge stiegen die Rohproteingehalte in der mineralischen N-Düngestaffel ab Var. 2 (5,6 % RP in TM) bis zu Var. 6 (8,0 % RP in TM) an. Die organische und organisch-mineralische N-Düngung hatten vor allem in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge einen positiven Effekt auf die Rohproteingehalte und lagen hier über denen der Var. 4.

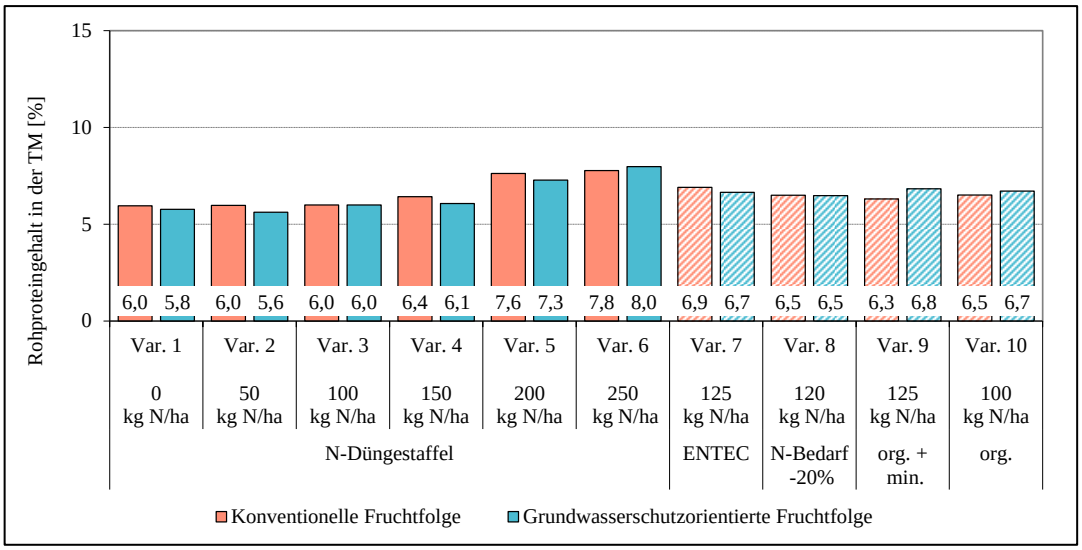

Abbildung 3-17: Rohproteingehalt in der TM (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016

In Abbildung 3-18 ist der Rohproteingehalt in der TM für den Silomais der konventionellen Fruchtfolge für beide Versuchsjahre dargestellt. Im Vergleich zu den Werten aus dem Einzeljahr 2016 können keine großen Unterschiede beobachtet werden. Der Rohproteingehalt in der TM stiegt mit steigender N-Düngung an und erreichte den höchsten Wert in Var. 6 (7,5 %).

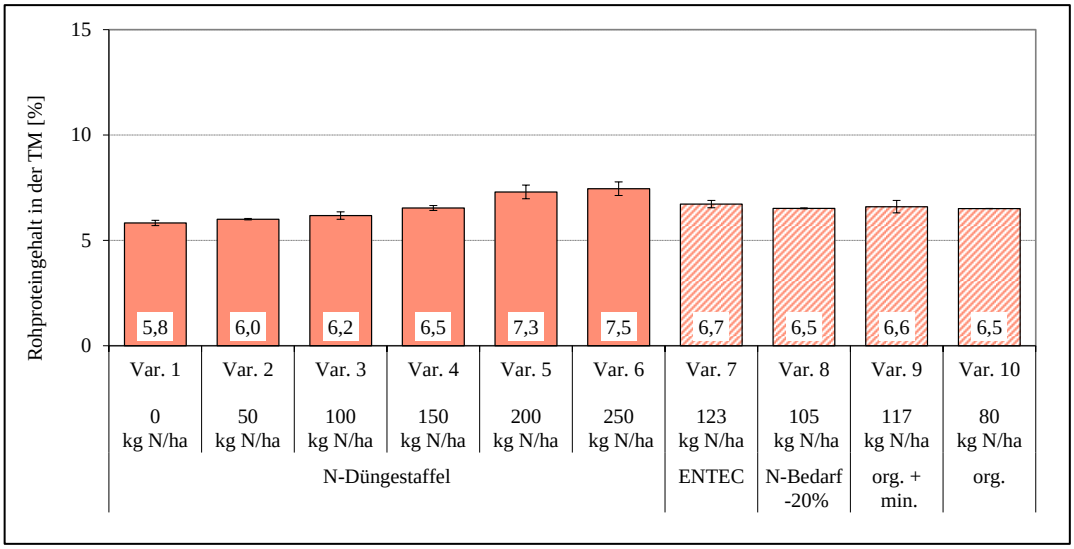

Abbildung 3-18: Rohproteingehalt in der TM ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Silomais der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020

Bei Betrachtung der N-Abfuhren vom Silomais im Versuchsjahr 2016 (Abbildung 3-19) zeigte sich, dass diese in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge ausschließlich in den Varianten 9 + 10 über denen der konventionellen Fruchtfolge lagen. Der größte Unterschied wurde in Variante 1 mit 46 kg N/ha ermittelt.

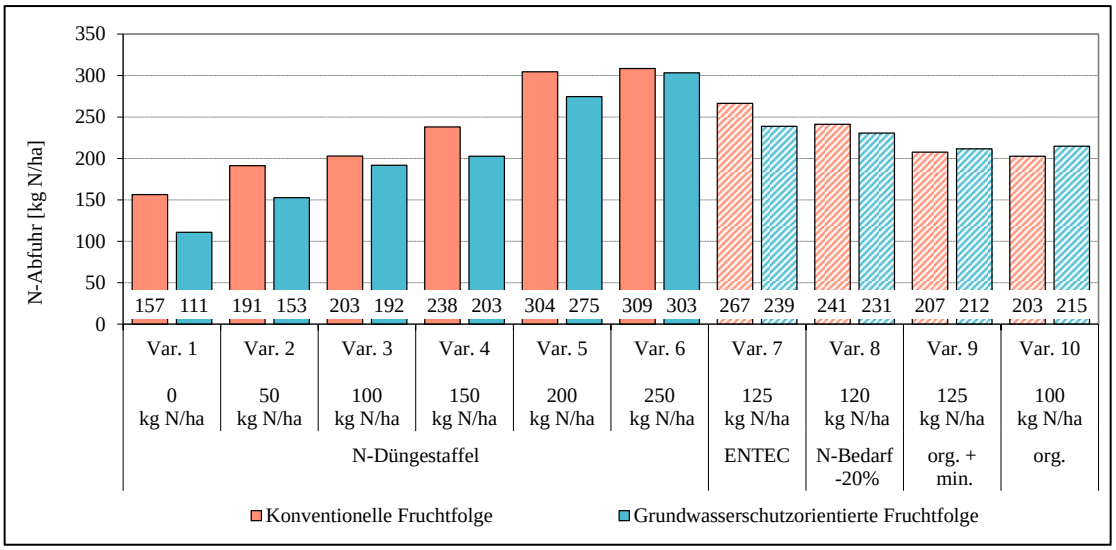

Abbildung 3-19: N-Abfuhr in kg N/ha (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Versuchsjahr 2016

Alle Kulturen

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ertragsleistung der unterschiedlichen Hauptkulturen zu ermöglichen, erfolgte eine Umrechnung der Erträge in Getreideeinheiten (vgl. Abbildung 3-20). Die Kennzahlen zur Umrechnung der Erträge in Getreideeinheiten sind in Tabelle 2-9 in Kapitel 2.5.7 aufgeführt.

Über alle Versuchsjahre von 2014 bis 2021 bestätigt sich das Ergebnis, dass die konventionelle Fruchtfolge – mit Ausnahme der Variante 9 und 10 - eine höhere Produktivität aufweist als die grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge. Als Hauptgrund dafür ist die sind die höheren Erträge der Kartoffel im Anbaujahr 2018 in der konventionellen Fruchtfolge zu nennen. Beim Winterroggen in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurden in den Anbaujahren 2015 und 2019 die Erträge der Untersaat mitberücksichtigt, da diese als Zweitfrucht mit Nutzung ein wichtiger Bestandteil der Fruchtfolge war.

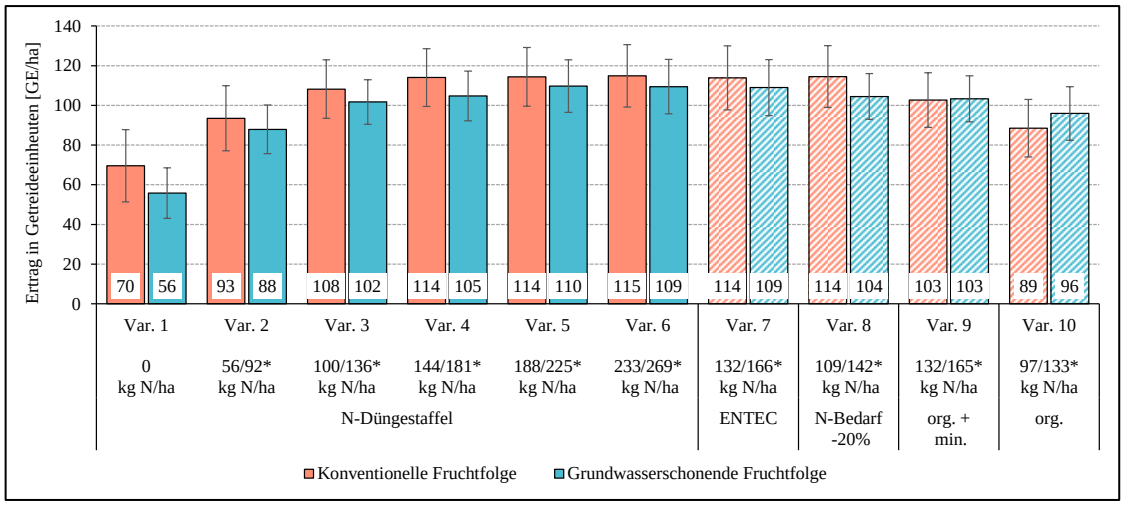

Abbildung 3-20: Erträge in Getreideeinheiten der Hauptkulturen inkl. Untersaat (gws) ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 7) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021

Zum Vergleich der einzelnen Fruchtarten in den Anbaujahre erfolgt in Abbildung 3-21 die Darstellung der einzelnen Kulturarten über die Versuchsjahre in der Var. 4. In den ersten Versuchsjahren 2014 und 2015 lag die Produktivität der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge oberhalb derjenigen aus der konventionellen Fruchtfolge. Bei der Braugerste zeigten sich nur geringe/keine Unterschiede in der Var. 4 zwischen den beiden Fruchtfolgen. Vor allem im Versuchsjahr 2018 (Kartoffel) waren deutliche Unterschiede in den Erträgen zu erkennen.

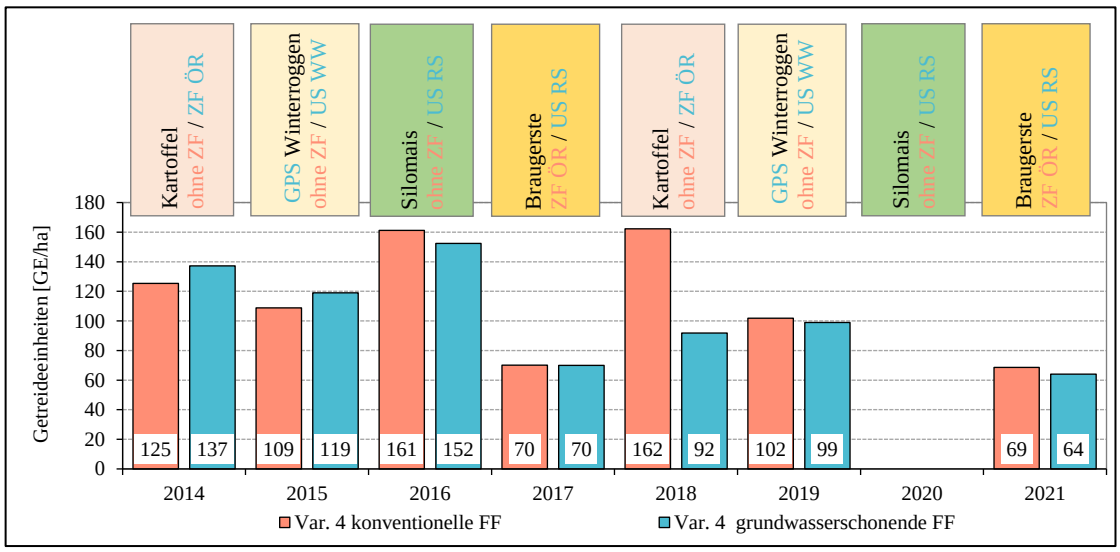

Abbildung 3-21: Erträge in Getreideeinheiten der Hauptkulturen inkl. Untersaat (gws) der Variante 4 der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2014 – 2021(WW=Welsches Weidelgras, RS=Rotschwingel, US=Untersaat, ÖR=Ölrettich)

Die N-Abfuhr über die gesamten zwei Fruchtfolgezyklen ist in Abbildung 3-22 dargestellt. Trotz einer im Mittel geringeren Produktivität der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge lagen die N-Abfuhren teilweise über denen der konventionellen Fruchtfolge.

Deutliche Unterschiede traten in den beiden organisch gedüngten Varianten 9 und 10 auf.

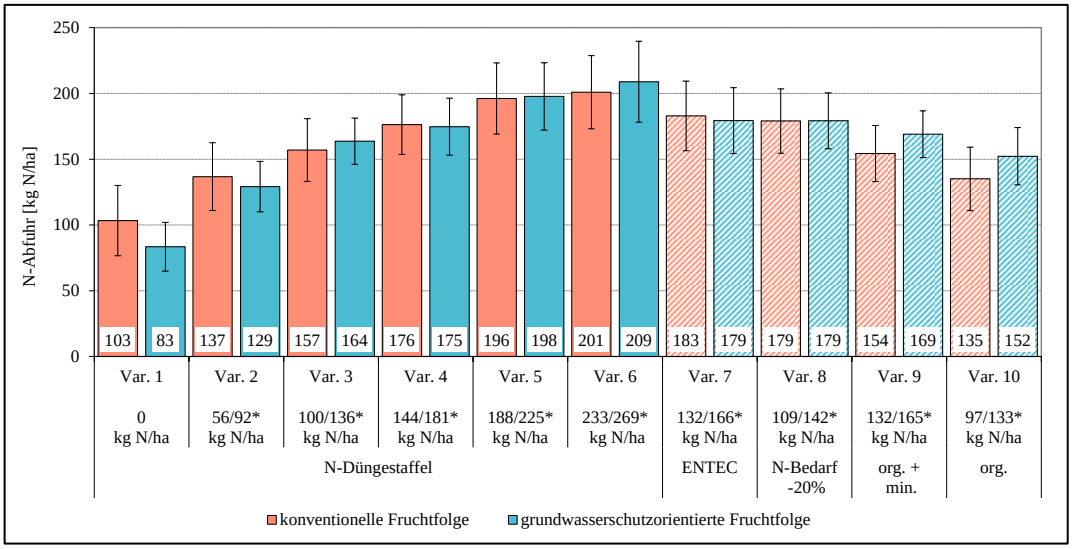

Abbildung 3-22: N-Abfuhr in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n= 7) der Hauptkulturen inkl. Untersaaten (gws) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021

3.2 N-Bilanzsalden und N-Düngeeffizienz

Kartoffel

Der Netto-N-Bilanzsaldo stieg mit der Erhöhung der N-Zufuhr an und war in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in allen Varianten höher als in der konventionellen Fruchtfolge (vgl. Abbildung 3-23). Aufgrund der hohen N-Abfuhr von der Fläche lagen die N-Bilanzsalden überwiegend im negativen Bereich. Eine Ausnahme bildete die Kartoffel in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Jahr 2018. Hier waren aufgrund der im Vergleich zur konventionellen Fruchtfolge schlechteren Erträge die N-Bilanzsalden im positiven Bereich (siehe auch Anhang 0). Die N-Salden lagen zwischen -184 und 7 kg N/ha in der konventionellen Fruchtfolge und -137 und 50 kg N/ha in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge.

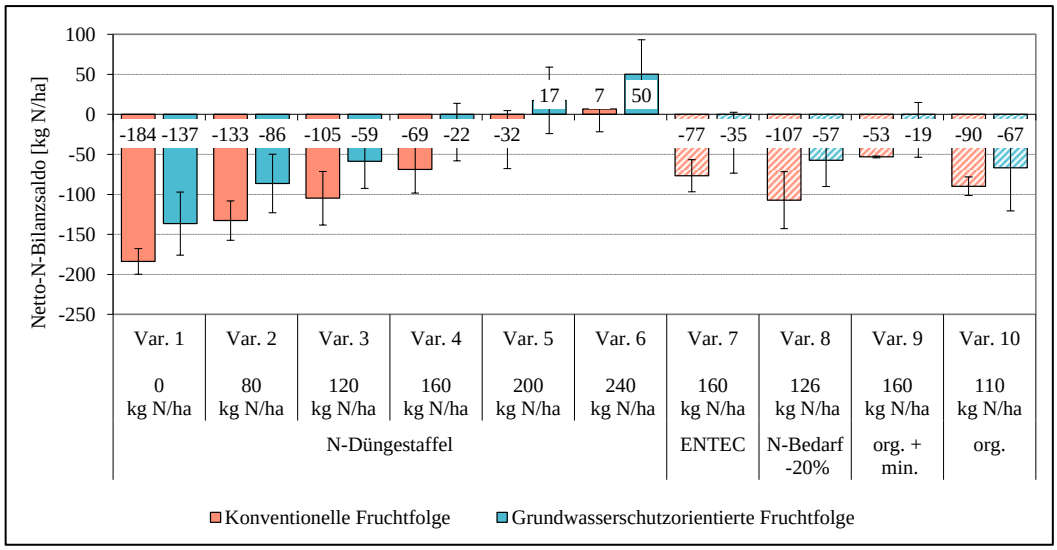

Abbildung 3-23: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018

Beim Vergleich der Effizienz der N-Düngung zur Kartoffel in beiden Fruchtfolgen (Abbildung 3-24) fällt auf, dass trotz der höheren Produktivität in der konventionellen Fruchtfolge die N-Düngung in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zur Kartoffel effizienter war. Eine sehr niedrige N-Effizienz wurde in den beiden organisch gedüngten Varianten vor allem in der konventionellen Fruchtfolge ermittelt. Mit steigender N-Zufuhr nahm die N-Effizienz in beiden Fruchtfolgen ab und lag in den Varianten der N-Düngestaffel in der konventionellen Fruchtfolge zwischen 36 und 21 % und in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zwischen 63 und 30 %.

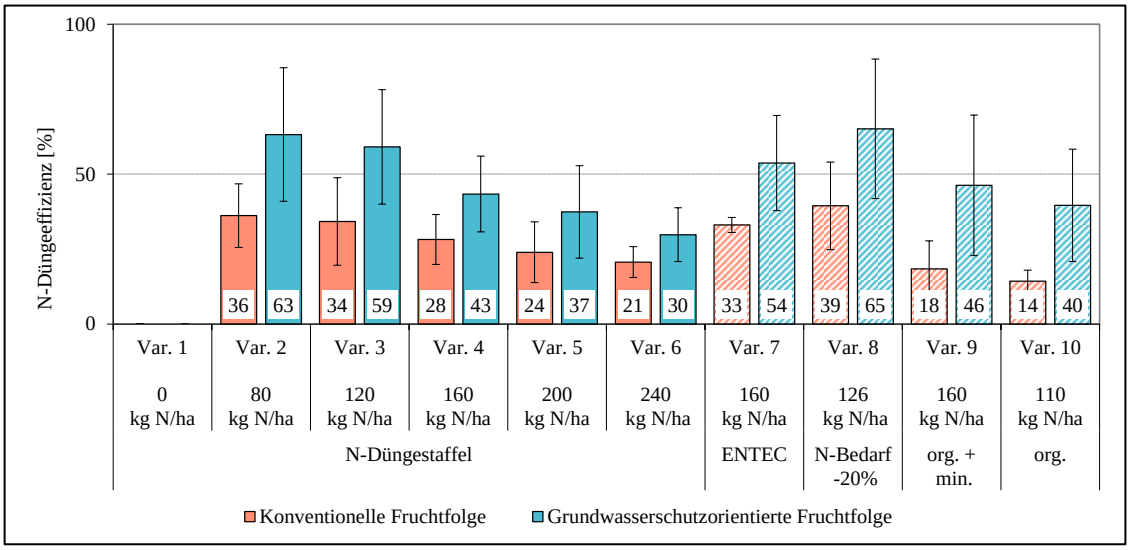

Abbildung 3-24: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Kartoffel der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018

Winterroggen / Winterroggen GPS

Die Netto-N-Bilanzsalden beim Winterroggen zeigen deutliche Unterschiede zwischen der konventionellen und der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (Abbildung 3-25). Die Salden der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge liegen – mit Ausnahme der Variante 1 (-59 kg N/ha) – im positiven Bereich. Der höchste Saldo wurde in Variante 6 ermittelt (119 kg N/ha) In der konventionellen Fruchtfolge wurden ab der hochgedüngten Variante 5 der N-Düngestaffel und in den organisch gedüngten Varianten 9 und 10 positive N-Salden ermittelt. Diese Unterschiede können auf die deutlich höhere N-Zufuhr in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zurückgeführt werden, die nicht durch eine hohe N-Abfuhr kompensiert werden konnte.

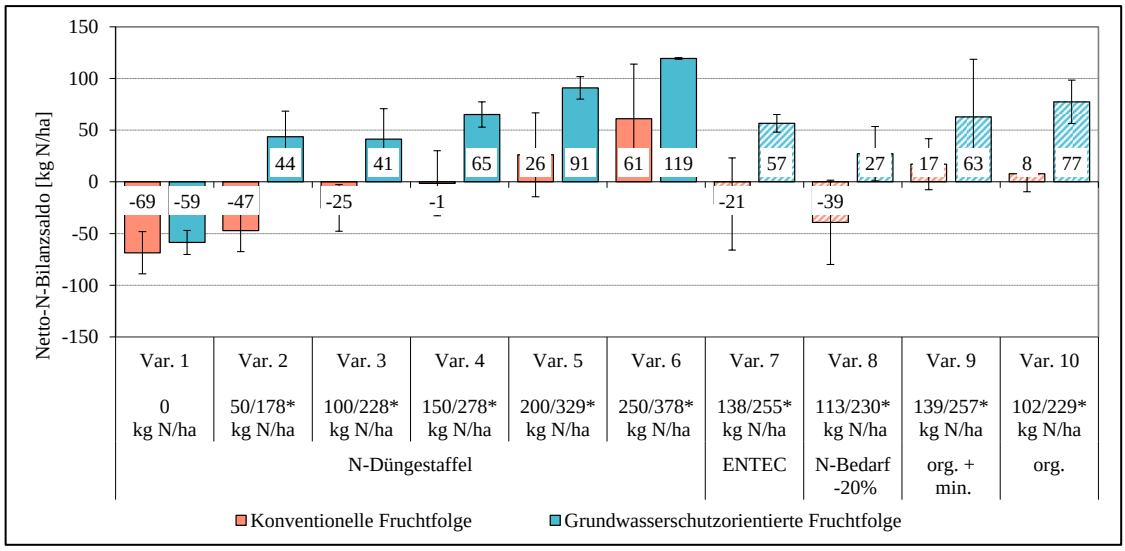

Abbildung 3-25: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Winterroggen (GPS + US) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Die N-Düngeeffizienz für den Winterroggen (GPS) – in diesem Fall wird nur die N-Düngung zur Hauptkultur betrachtet – befand sich überwiegend auf einem ähnlichen Niveau in beiden Fruchtfolgen. Größere Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen konnten in der Var. 7 (ENTEC) und Var. 9 (org. + min. N-Düngung) ermittelt werden. In den organisch gedüngten Varianten war die N-Effizienz in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge höher, lag aber deutlich unterhalb der Vergleichsvariante der mineralischen N-Düngestaffel (57 vs. 25 % bzw. 67 vs. 29 %).

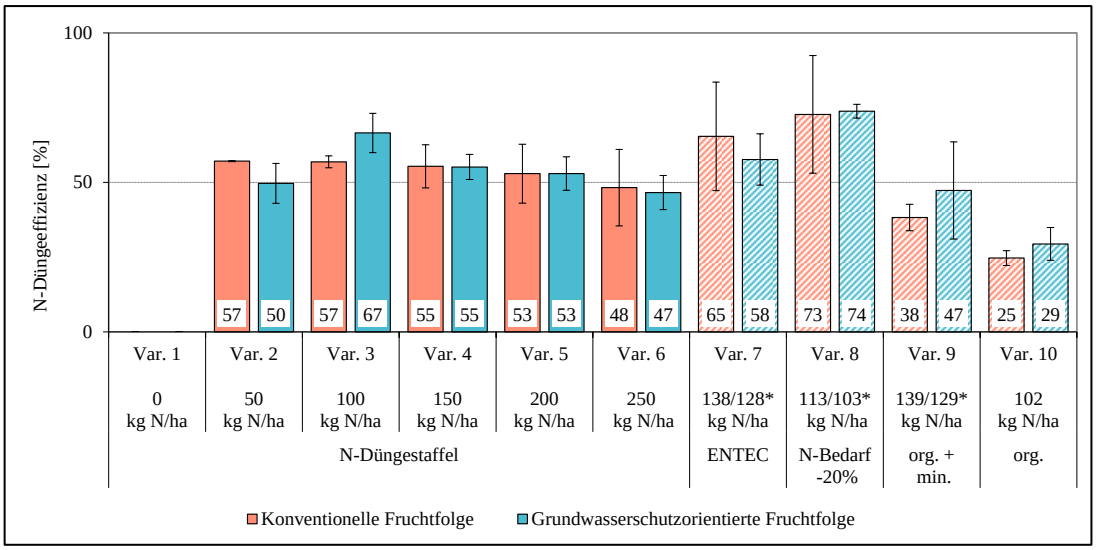

Abbildung 3-26: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Winterroggen (GPS) der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Braugerste

Bei der Braugerste waren die Netto-N-Bilanzsalden überwiegend auf einem niedrigen Niveau (Abbildung 3-27). In den Varianten 5 und 6 konnten hohe Bilanzüberschüsse ermittelt werden. Diese nahmen in der N-Düngestaffel mit steigender N-Düngung zu. In der Variante 8 (N-Bedarf -20%) wurden die niedrigsten Bilanzen erzielt. Die organisch gedüngten Varianten der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge lieferten bessere N-Bilanzsalden als die der konventionellen Fruchtfolge (15 vs. -14 kg N/ha und 16 vs. -21 kg N/ha).

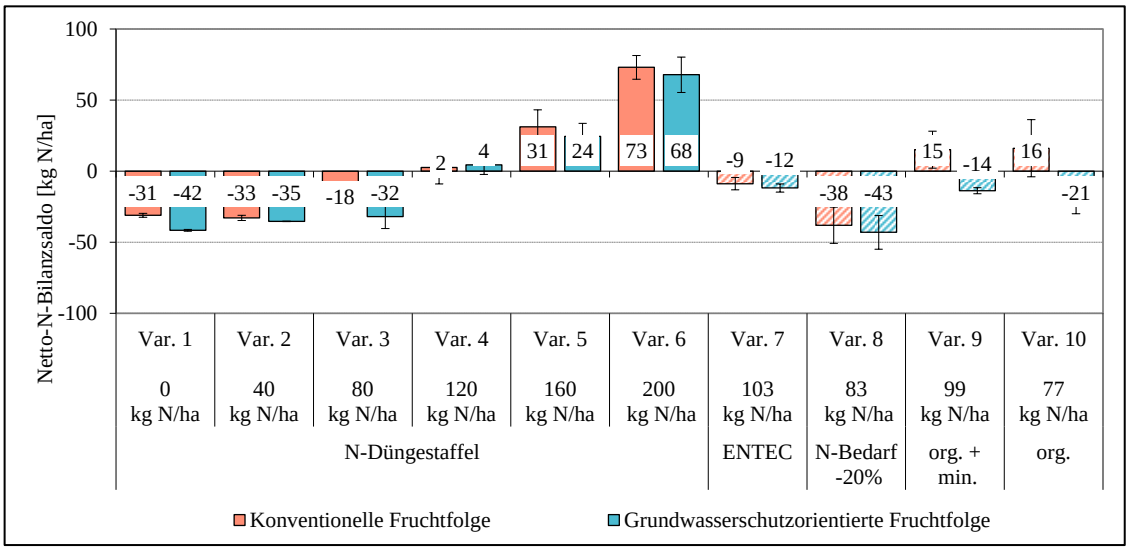

Abbildung 3-27: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021

Die N-Düngeeffizienz nimmt mit steigender N-Düngungshöhe in der mineralischen N-Düngestaffel mit Ausnahme der Variante 3 in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge ab (Abbildung 3-28). Die höchsten N-Düngeeffizienzen wurden in beiden Fruchtfolgen in der Variante 8 erreicht (konv.: 109 %, gws.: 102 %).

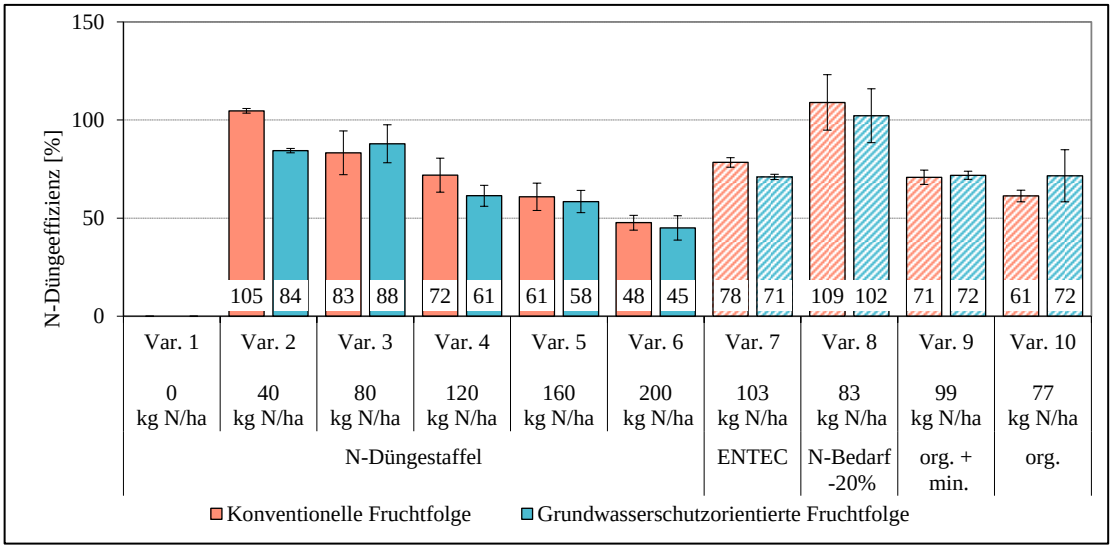

Abbildung 3-28: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) von Braugerste der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021

Silomais

Die Netto-N-Bilanzsalden vom Silomais im Versuchsjahr 2016 lagen in allen Varianten im negativen Bereich und schwankten in der konventionellen Fruchtfolge zwischen -157 kg N/ha (Var. 1) und -40 kg N/ha (Var. 9) und in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zwischen -115 kg N/ha (Var. 10) und -53 kg N/ha (Var. 4 und 6) (Abbildung 3-29). Selbst in den hochgedüngten Varianten konnten niedrige N-Salden erzielt werden. Mit Ausnahme der organisch gedüngten Varianten 9 und 10 lieferte die konventionelle Fruchtfolge bessere Saldenergebnisse.

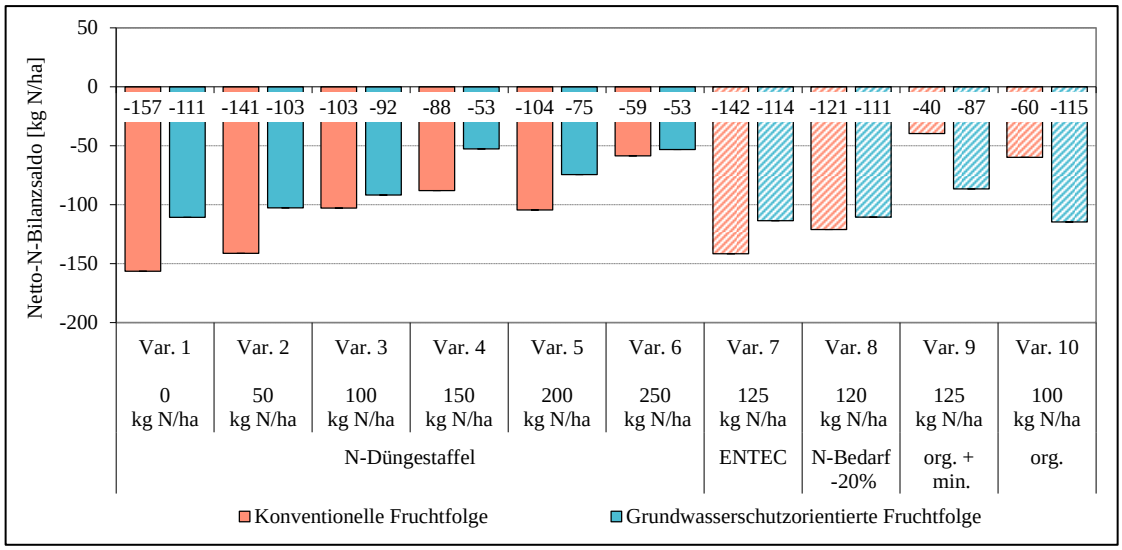

Abbildung 3-29: Netto-N-Bilanzsalden in % (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge für das Versuchsjahr 2016

In Abbildung 3-30 ist die N-Düngeeffizienz des Silomaises dargestellt. Diese schwankte in der konventionellen Fruchtfolge zwischen 88 % in der Variante mit stabilisiertem N-Dünger und 41 % in der organisch + mineralisch gedüngten Variante. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge konnte die höchste N-Effizienz in der organische gedüngte Variante 10 ermittelt werden. Diese lag bei 104 %. Die niedrigste N-Effizienz wurde in der Variante 4 mit 61 % beobachtet.

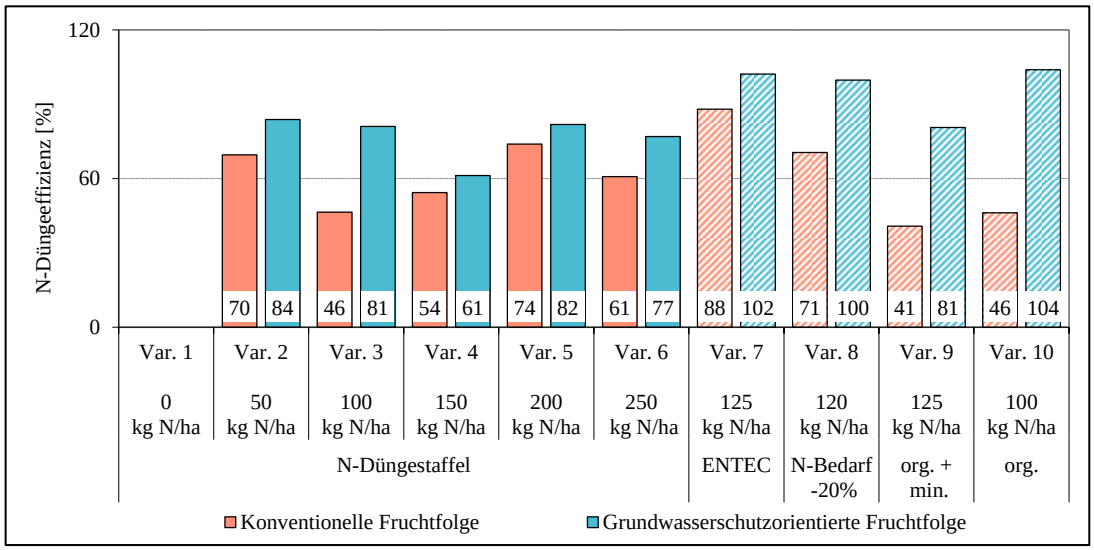

Abbildung 3-30: N-Düngeeffizienz in % (n=1) von Silomais der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge für das Versuchsjahr 2016

Alle Kulturen

Negative N-Bilanzsalden implizieren, dass die N-Abfuhr über der N-Zufuhr durch die N-Düngung liegt, d.h. dass möglicherweise eine N-Aufnahme aus dem Bodenvorrat stattgefunden

hat. Unter Einbeziehung der N-Zufuhren und -Abfuhren über die Untersaaten in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge werden die Unterschiede zwischen den beiden Fruchtfolgen größtenteils verstärkt (Abbildung 3-31). In Jahren mit geringen Ertragsniveaus und einem daraus resultierenden geringen Output vergrößert sich der N-Überschuss und die Summe der N-Bilanzsalden stieg an. Da die Untersaat zu jedem Schnitt gedüngt wurde, erhöhte sich die N-Zufuhr, welche bedingt durch die Versuchsjahre 2015 und 2019 um 255 kg N/ha in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge höher lag.

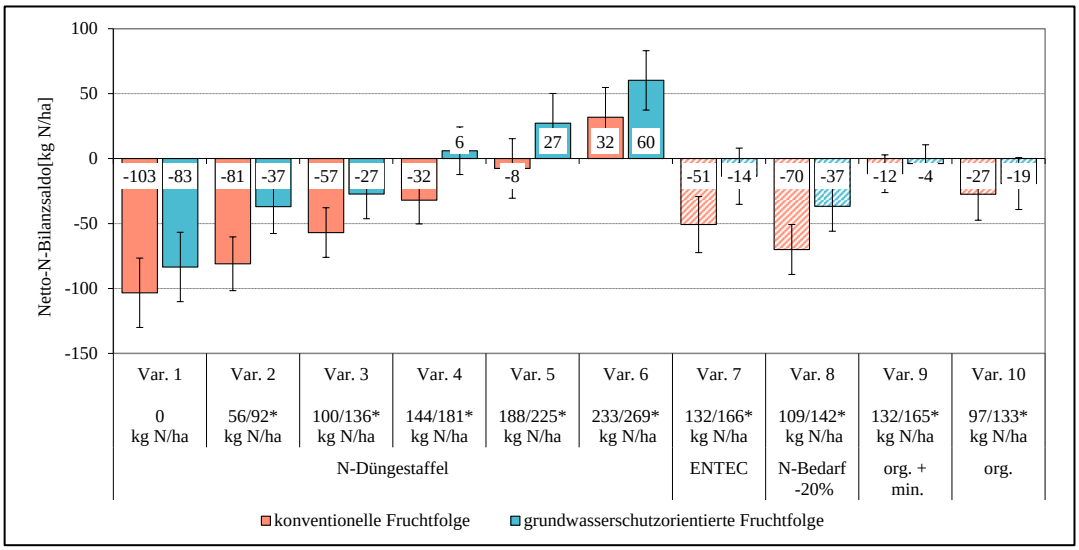

Abbildung 3-31: Netto-N-Bilanzsalden in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=7) der Hauptfrüchte inkl. Untersaat der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021

Die über beide Fruchtfolgezyklen ermittelte N-Düngeeffizienz – abgebildet in Abbildung 3-32 - nahm in der konventionellen Fruchtfolge im Verlauf der mineralischen N-Staffel mit steigender N-Düngung ab. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge war ein Anstieg in Var. 3 zu beobachten, bevor auch hier die N-Düngeeffizienz mit steigender N-Düngung abnahm. Bei Betrachtung aller Versuchsvarianten zeigte sich, dass die grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge eine höhere N-Düngeeffizienz aufweist als die konventionelle Fruchtfolge. Am niedrigsten war die N-Düngeeffizienz in der organisch gedüngten Variante 10 in der konventionellen Fruchtfolge (35 %). Insgesamt wies die ausschließlich mit Organik gedüngte Variante in beiden Fruchtfolgen eine niedrigere N-Düngeeffizienz auf als die vergleichbare mineralisch gedüngte Variante (Var. 3). Im Mittel zeigten sich die höchsten N-Düngeeffizienzen in beiden Fruchtfolgen bei der Braugerste und die niedrigsten bei der Kartoffel.

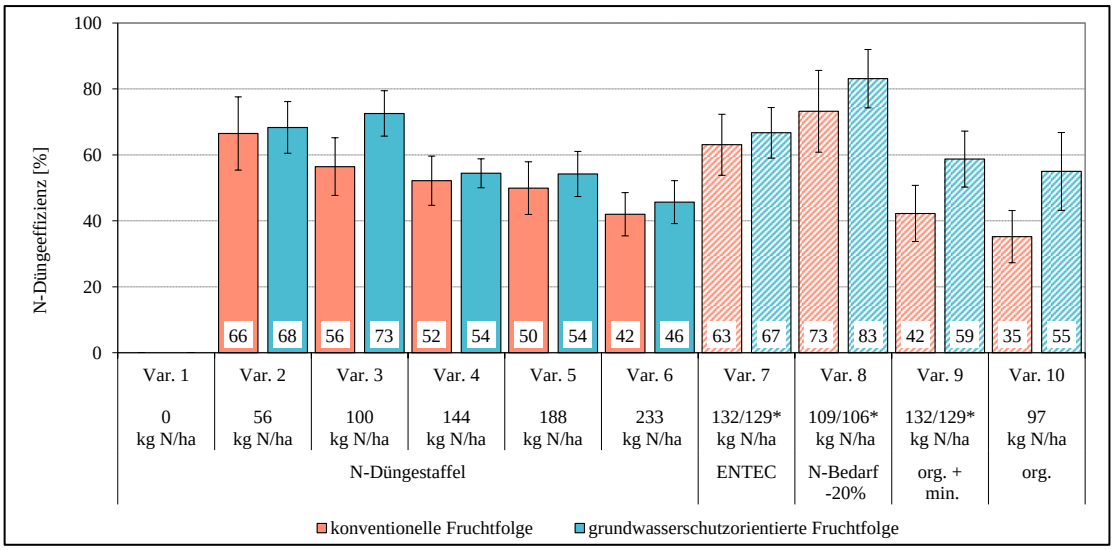

Abbildung 3-32: N-Düngeeffizienz in % ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=7) der Hauptfrüchte im Mittel der Versuchsjahre 2014 – 2021

3.3 N_{min}-Werte

Der $N_{min.}$-Gehalt im Boden wird am Versuchsstandort Hamerstorf in allen Versuchsvarianten im Frühjahr, nach der Ernte und im Herbst zu Beginn der Sickerwasserperiode bestimmt. Außerdem erfolgt eine monatliche Probenahme in der Variante 4 (mineralische N-Staffel). Im Frühjahr ist die Ermittlung des N_{min}-Werts ein wichtiger Teil der N-Düngebedarfsermittlung und gibt an, wie viel mineralischer, pflanzenverfügbarer Stickstoff zu Beginn der Vegetationsperiode im Boden ist. Der im Boden vorhandene mineralische Stickstoff besteht dabei überwiegend aus Nitrat-N. Nur ein kleiner Teil ist Ammonium-N. Höhere Anteile an Ammonium-N in der Bodenprobe können u.a. Hinweise auf eine organische Düngung, Staunässe oder Bodenverdichtungen geben (Aichner, et al., 2004). Herbst-N_{min}-Werte sind vor allem in Trinkwasserschutzkooperationen eine wichtige erfolgshonorierte Maßnahme. Durch einen geringen Stickstoffgehalt im Boden im Herbst kann die N-Auswaschung über das Sickerwasser im Winterhalbjahr möglicherweise reduziert werden.

Im folgenden Abschnitt werden die im Wasserschutzversuch in Hamerstorf ermittelten N_{min}-Werte dargestellt.

Kartoffel

In Abbildung 3-33 ist der Ernte-N_{min} der zehn Versuchsvarianten im Mittel über die Versuchsjahre 2014 und 2018 dargestellt. Die N_{min}-Werte lagen in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in allen Varianten über denen der konventionellen

Fruchtfolge. Die höchsten Werte wurden in den Varianten 5 und 6 der N-Düngestaffel gemessen.

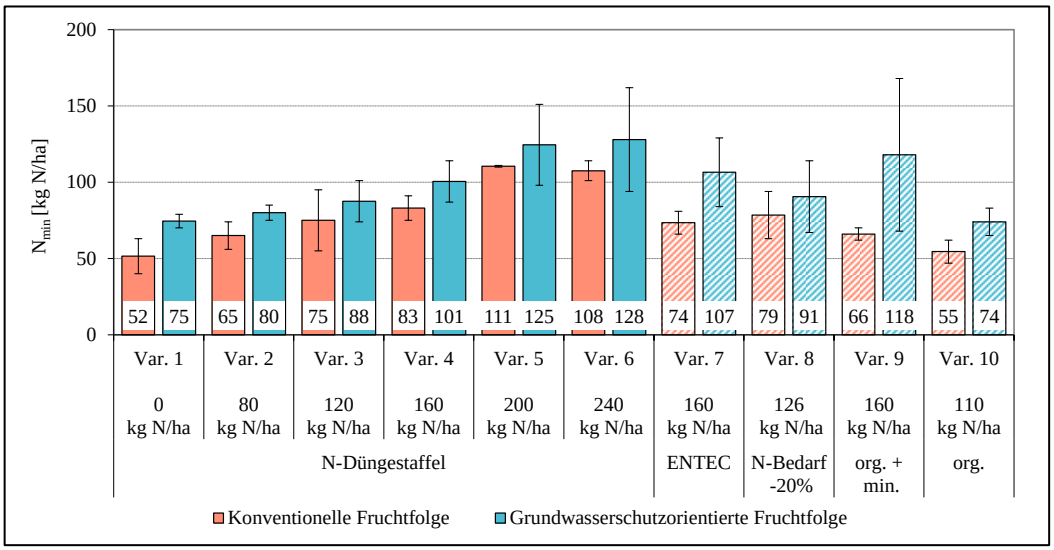

Abbildung 3-33: Ernte-N_{min}-Wert in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Kartoffel im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018

Die Herbst-N_{min}-Werte sind in Abbildung 3-34 dargestellt. Zum Beprobungstermin stiegen die Werte vor allem in der konventionellen Variante weiter an oder blieben auf einem ähnlichen Niveau. Wohingegen in einigen Varianten der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge die Werte reduziert werden konnten. So lag der Wert der Variante 9 in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge mit 74 kg N_{min}/ha an diesem Termin unterhalb dem der konventionellen Fruchtfolge mit 90 kg N_{min}/ha. Die Abweichungen zwischen den beiden Fruchtfolgen bewegten sich überwiegend in dem Bereich > 10 kg N_{min}/ha. Die höchsten Werte wurden in Variante 6 (240 kg N/ha) gemessen.

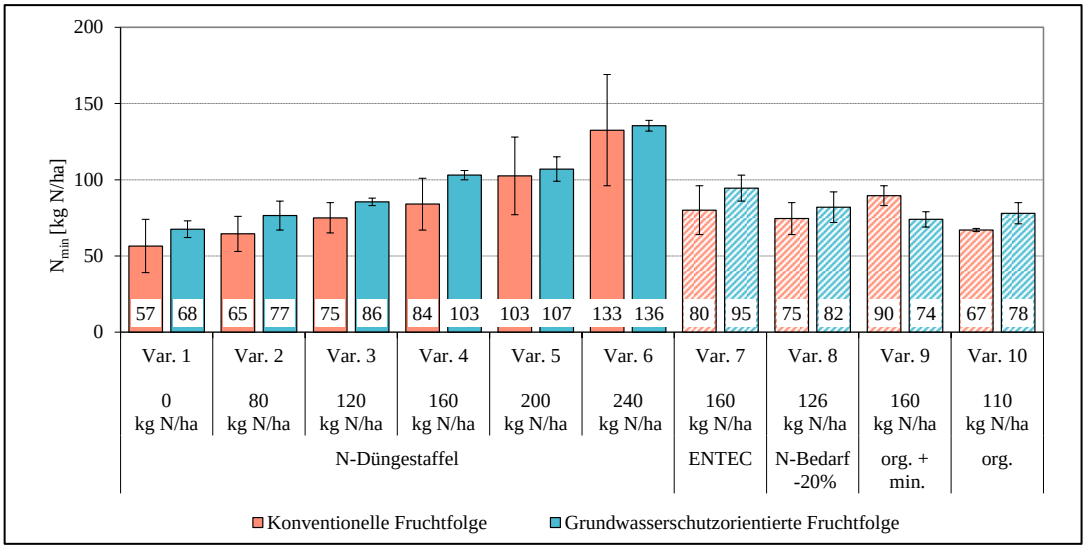

Abbildung 3-34: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Kartoffel im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018

Bei Betrachtung der Frühjahrs-N_{min}-Werte im Folgejahr ergibt sich ein noch homogeneres Bild zwischen den beiden Fruchtfolgen (vgl. Abbildung 3-35). Die Werte in der konventionellen Fruchtfolge lagen zwischen 11 und 23 kg N_{min}/ha. Die Werte in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge lagen wieder auf einem höheren Niveau zwischen 17 und 30 kg N_{min}/ha. Der höchste Wert wurde in beiden Fruchtfolgen in der Variante 6 ermittelt (23 bzw. 30 kg N_{min}/ha).

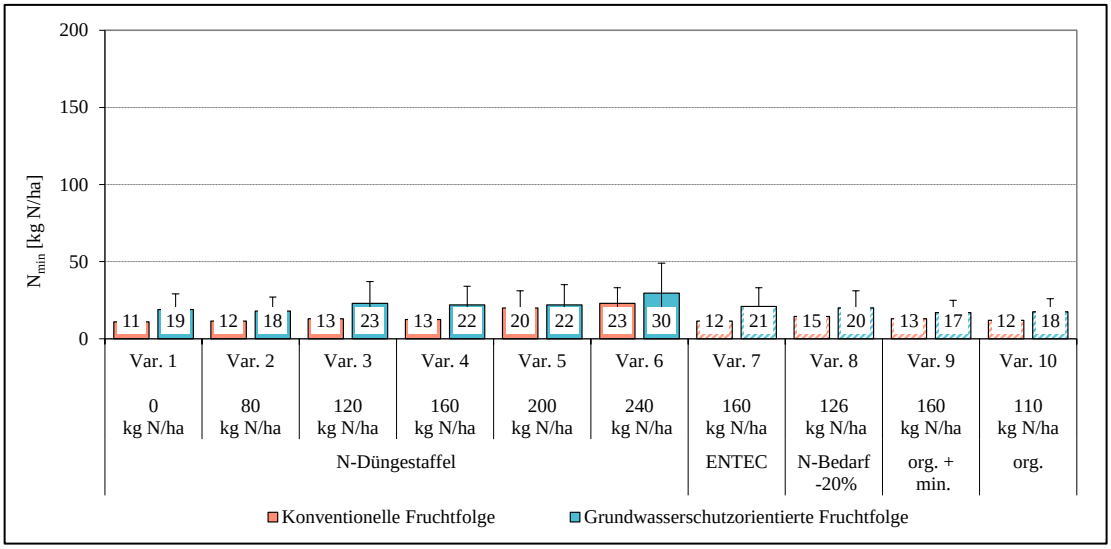

Abbildung 3-35: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Kartoffel im Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2018

Winterroggen/ Winterroggen GPS

In der konventionellen Fruchtfolge lagen die Ernte-N_{min}-Werte zwischen 20 und 32 kg N_{min}/ha in der N-Düngestaffel der konventionellen Fruchtfolge und zwischen 9 und 19 kg N_{min}/ha in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (vgl. Abbildung 3-36). Insgesamt lagen die Ernte-N_{min}-Werte in der konventionellen Fruchtfolge auf einem höheren Niveau (22 – 32 kg N/ha).

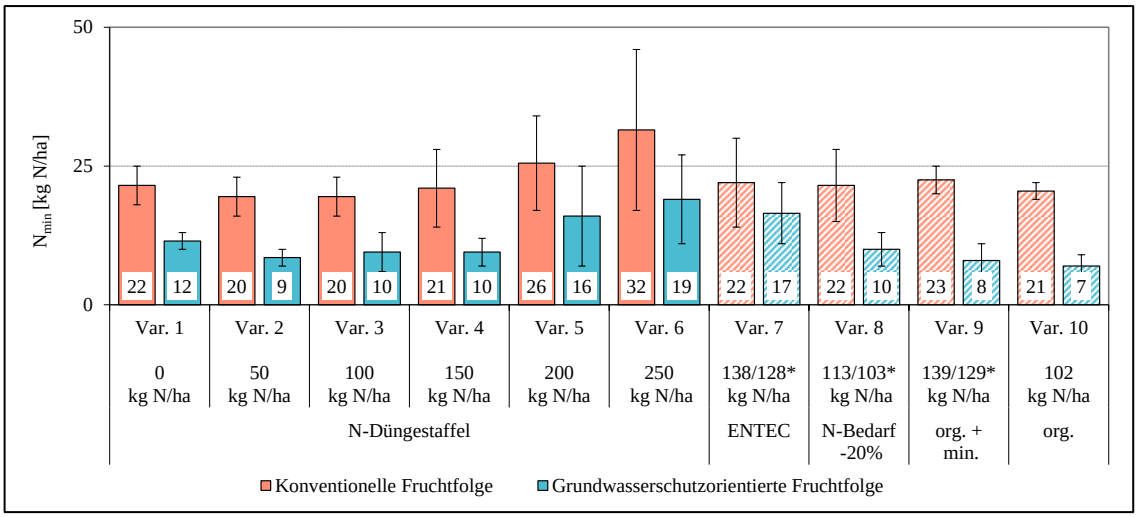

Abbildung 3-36: Ernte-N_{min}-Wert in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Winterroggen/ Winterroggen GPS im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Bis zur Probenahme im Herbst stiegen die Werte in allen Varianten in beiden Fruchtfolgen an, lagen nach wie vor aber auf einem niedrigen Niveau zwischen 20 und 27 kg N_{min}/ha in der konventionellen Fruchtfolge und 13 und 26 kg N_{min}/ha in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (vgl. Abbildung 3-37).

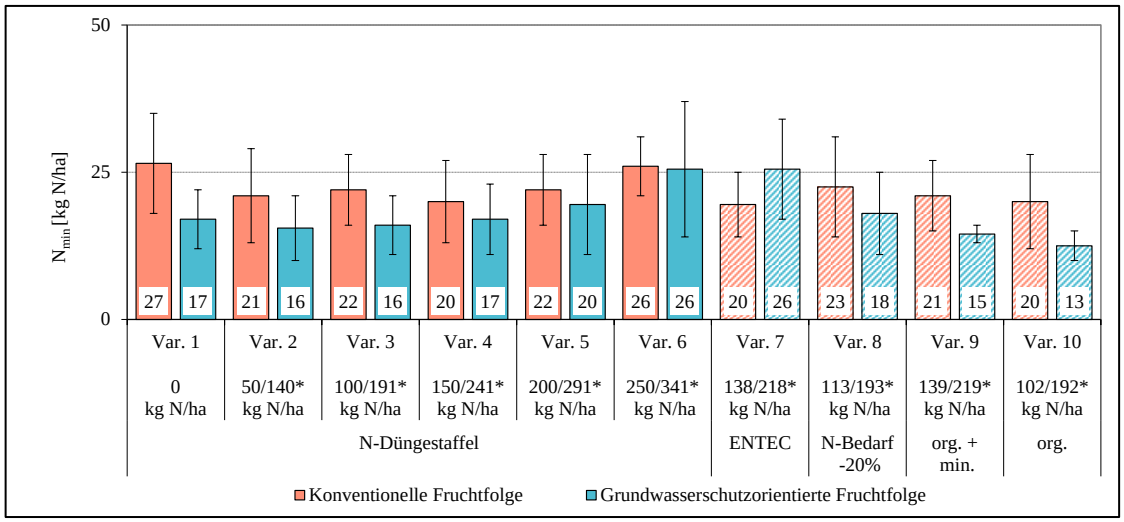

Abbildung 3-37: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Winterroggen/ Winterroggen GPS im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Die N_{min}-Werte in Frühjahr des Folgejahres lagen in fast allen Varianten in beiden Fruchtfolgen über denen im Herbst ermittelten N_{min}-Werten (vgl. Abbildung 3-38). In der Variante 1 ohne N-Düngung lag er in der konventionellen Fruchtfolge mit 26 kg N_{min}/ha deutlich über dem der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (11 kg N_{min}/ha).

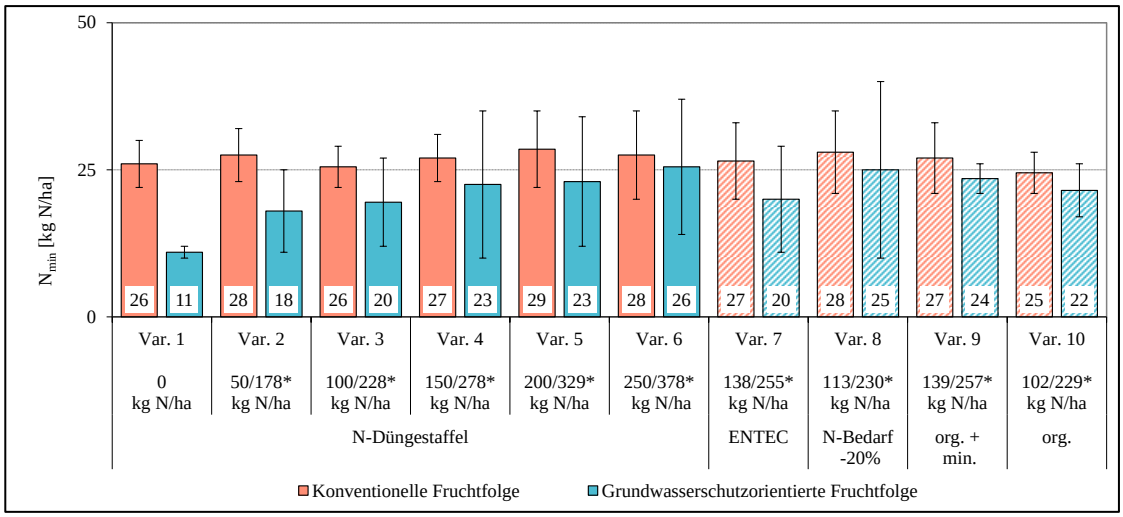

Abbildung 3-38: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Winterroggen/ Winterroggen GPS im Mittel der Versuchsjahre 2015 und 2019

Silomais

Die Ernte-N_{min}-Werte nach Silomais befanden sich in beiden Fruchtfolgen auf einem ähnlichen Niveau, wobei die Werte in der konventionellen Fruchtfolge etwas höher waren und stiegen mit steigender N-Düngung an (vgl. Abbildung 3-39).

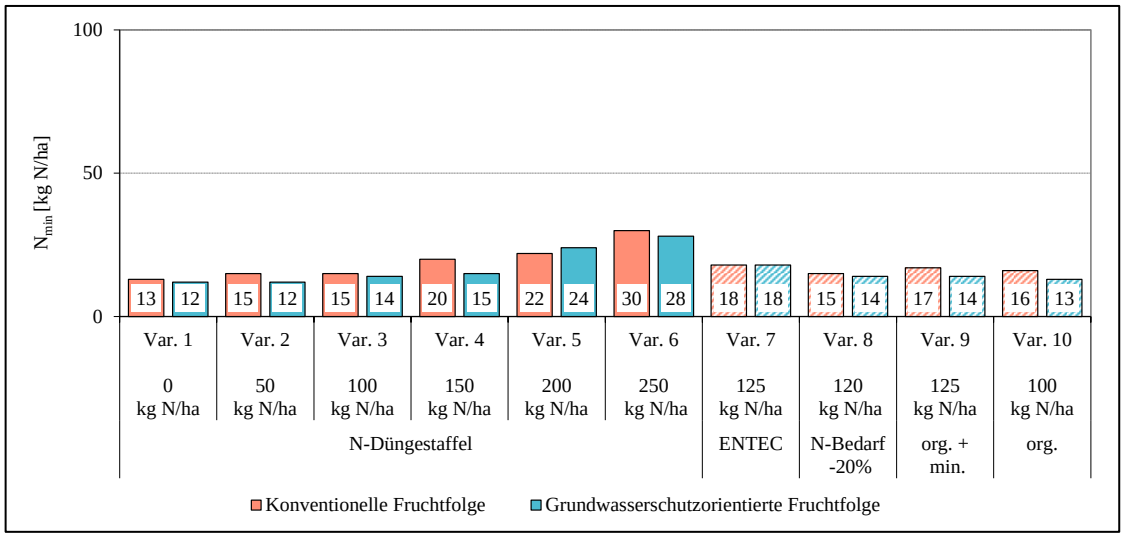

Abbildung 3-39: Ernte-N_{min}-Werte in kg N/ha (n=1) nach Silomais für das Versuchsjahr 2016

In Abbildung 3-40 sind für die konventionelle Fruchtfolge die Ernte-N_{min}-Werte im Mittel der beiden Versuchsjahre 2016 und 2020 dargestellt. Hier zeigte sich ein deutlicher Anstieg des Ernte-N_{min}-Werts in Variante 6 (+ 48 kg N_{min}/ha) im Vergleich zum Einzeljahr 2016.

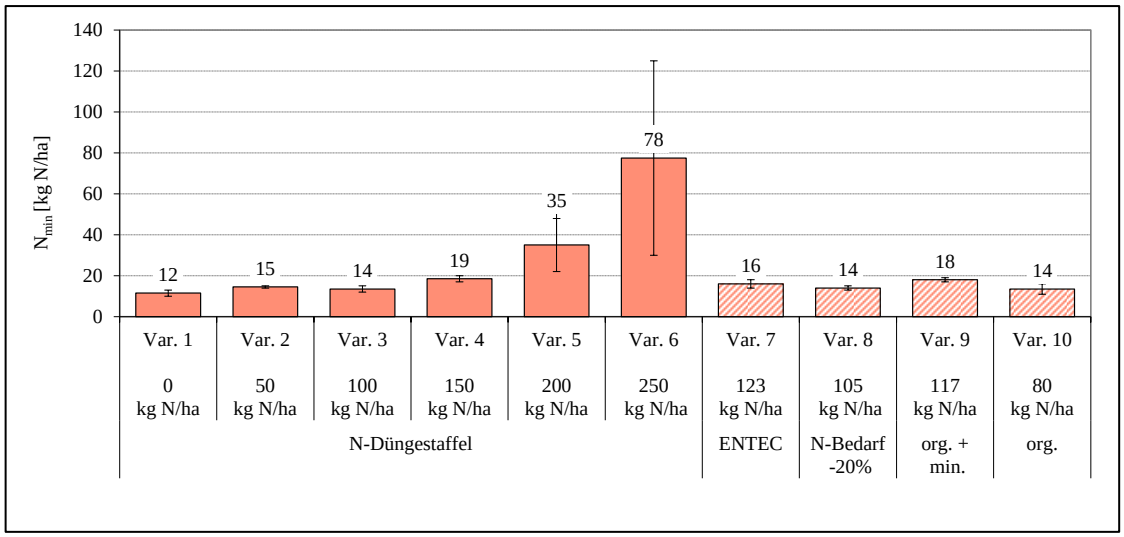

Abbildung 3-40: Ernte-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Silomais in der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020

Bis zur Probenahme im Herbst nahmen die Werte teilweise ab, aber auch teilweise zu. Vor allem in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge haben die Werte zugenommen, während sie sich in der konventionellen Fruchtfolge eher verringerten. In der Var. 6 der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge konnte ein deutlicher Anstieg von 22 kg N_{min}/ha beobachtet werden (Abbildung 3-41).

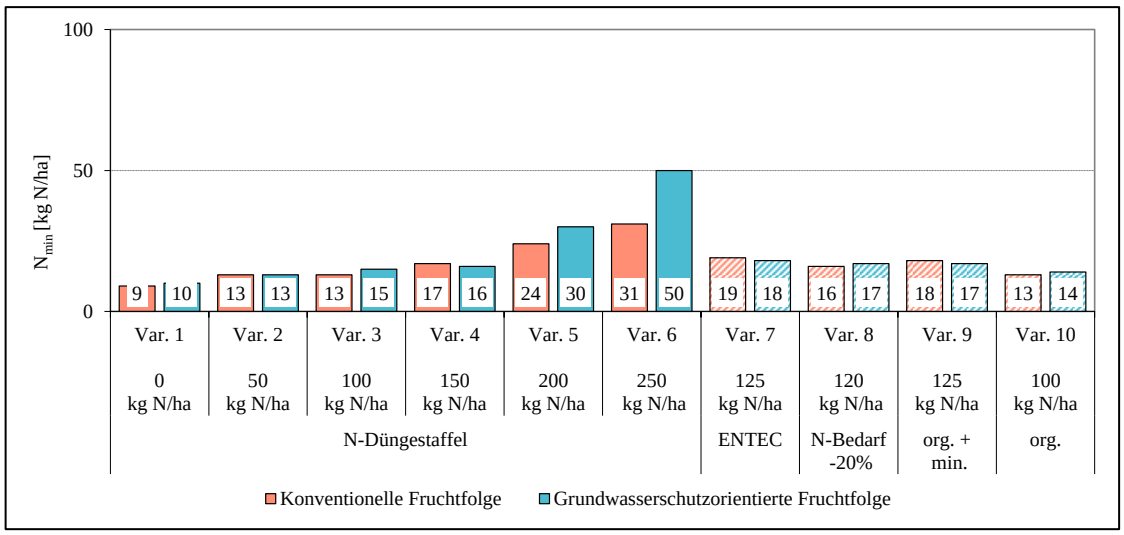

Abbildung 3-41: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha (n=1) nach Silomais für das Versuchsjahr 2016

Bei Betrachtung der Herbst-N_{min}-Werte im Mittel der beiden Versuchsjahre in der konventionellen Fruchtfolge zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Werte in den Varianten 5 und 6 (+ 19 bzw. 39 kg N_{min}/ha). Auch der Standardfehler deutet auf die hohe Schwankungsbreite der N_{min}-Werte in diesen Varianten hin. Ebenfalls größere Schwankungen

waren in den Varianten 9 und 10 mit organischer Düngung zu beobachten (vgl. Abbildung 3-42).

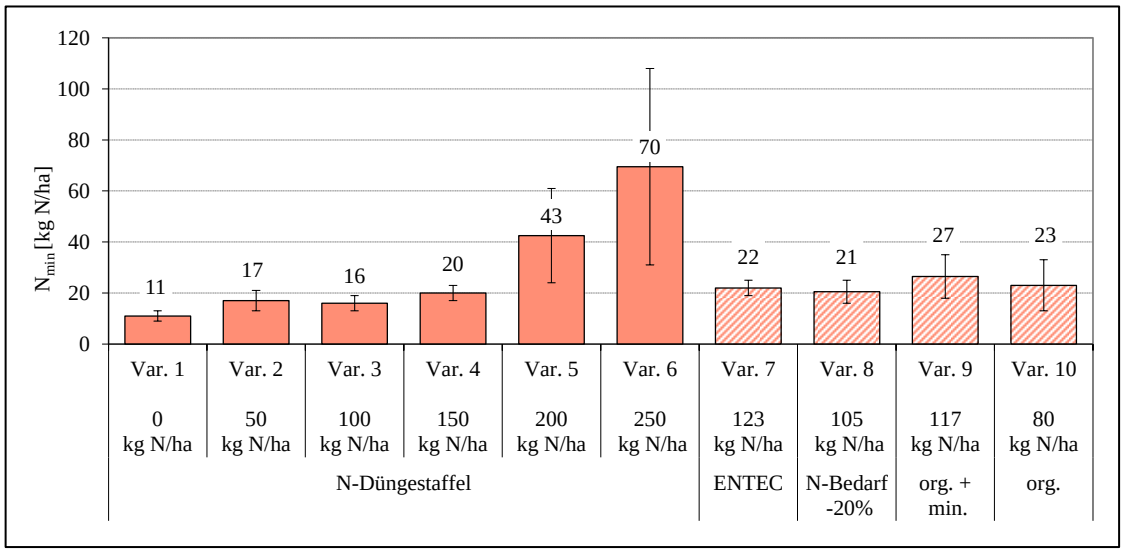

Abbildung 3-42: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Silomais in der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020

In Abbildung 3-43 sind die N_{min}-Werte im Frühjahr des Folgejahres dargestellt. Sie lagen in allen Varianten in beiden Fruchtfolgen auf einem ähnlichen, niedrigen Niveau. In den Varianten 5 und 6 der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurden die Werte um 12 bzw. 31 kg N_{min}/ha reduziert. Ob dies aufgrund einer Auswaschung oder durch eine Aufnahme durch die Untersaat erfolgte, wird durch die Auswertung der Nitrat-N-Frachten in Kapitel 4.3.3 dargestellt.

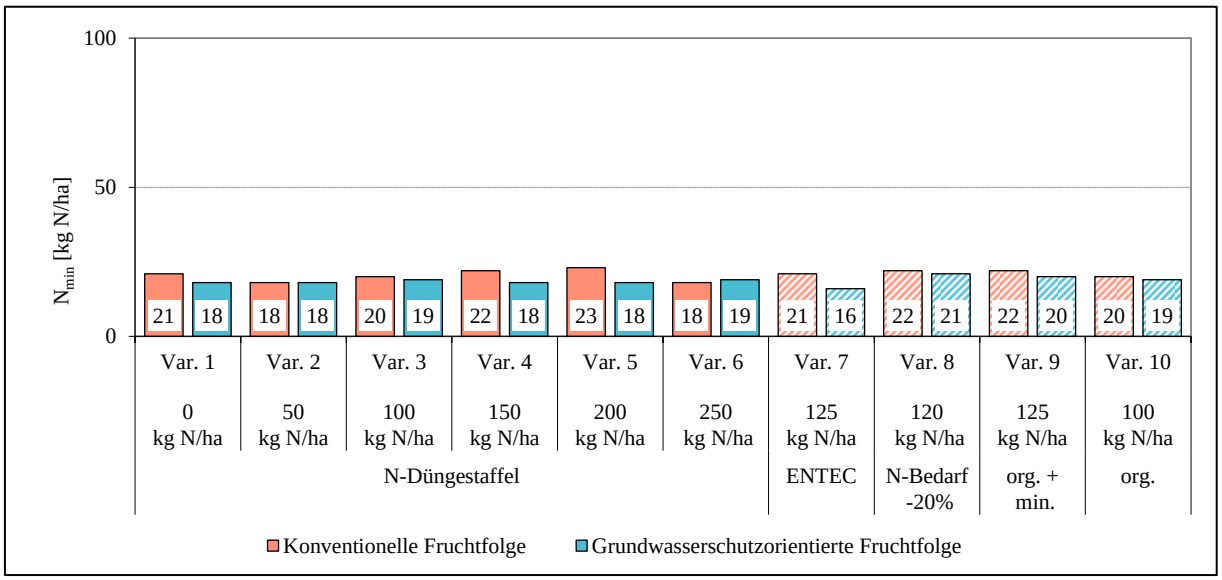

Abbildung 3-43: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha (n=1) nach Silomais für das Versuchsjahr 2016

Für die konventionelle Fruchtfolge sind die Frühjahrs-N_{min}-Werte im Mittel der beiden Versuchsjahre in Abbildung 3-44 dargestellt. Auch im Mittel der Jahre befanden sich die N_{min}-Werte im Folgejahr in allen Varianten auf einem niedrigen Niveau (16 – 22 kg N_{min}/ha).

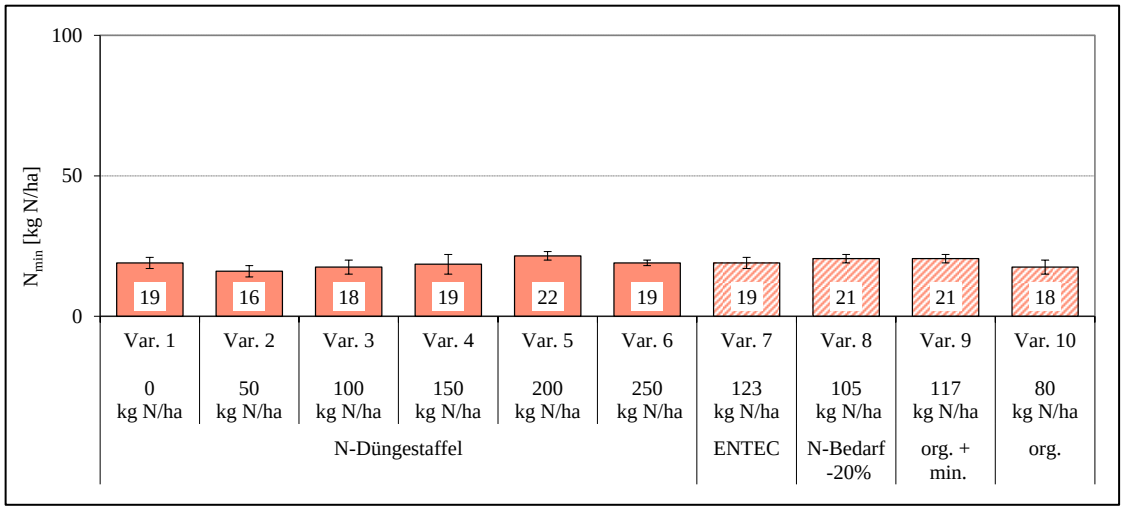

Abbildung 3-44: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Silomais in der konventionellen Fruchtfolge für die Versuchsjahre 2016 und 2020

Braugerste

Bei der Braugerste lagen die N_{min}-Werte nach der Ernte im Mittel der Versuchsjahre zwischen 18 und 29 kg N_{min}/ha in der konventionellen Fruchtfolge und 20 bis 27 kg N_{min}/ha in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (Abbildung 3-45). Die höchsten Wert 29/ 27 kg N_{min}/ha wurden in der hochgedüngten Variante 6 der N-Düngestaffel ermittelt. Generell liegen die Werte nach der Ernte der Braugerste auf einem ähnlichen Niveau.

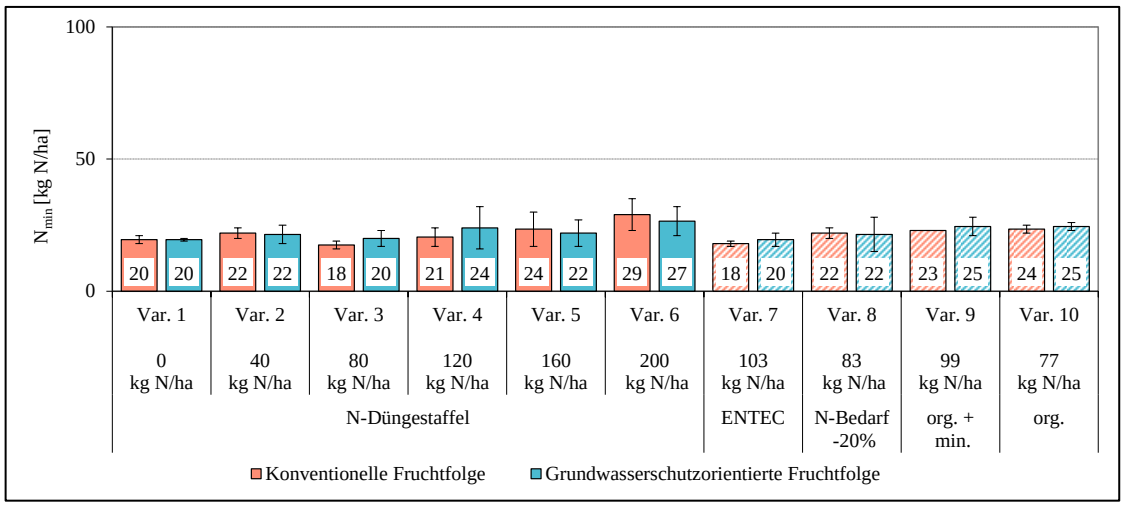

Abbildung 3-45: Ernte-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler(Fehlerbalken, n=2) nach Braugerste im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021

Bei Betrachtung der Herbst-N_{min}-Werte in Abbildung 3-46 fällt auf, dass diese in den Varianten 1 und 2 der konventionellen Fruchtfolge im Vergleich zur Ernte anstiegen (+ 7 bzw. 10 kg N_{min}/ha), in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge jedoch sanken (- 2 bzw. 1 kg N/ha). Mit Ausnahme der Variante 6 wurden in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge niedrigere Werte gemessen als in der konventionellen Fruchtfolge.

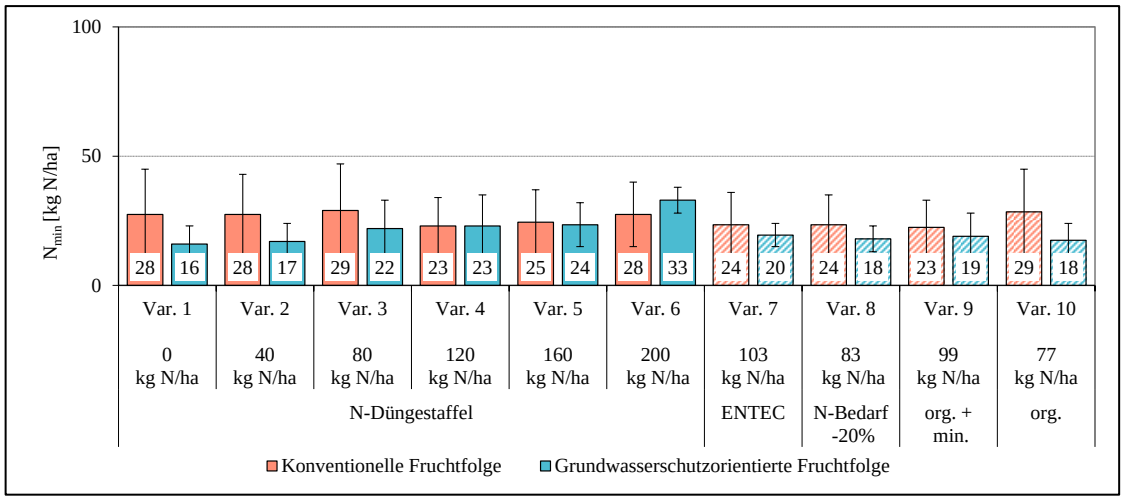

Abbildung 3-46: Herbst-N_{min}-Werte in kg N/ha ± Standardfehler(Fehlerbalken, n=2) nach Braugerste im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021

Bei Betrachtung der Frühjahrs-N_{min}-Werte im Folgejahr (Abbildung 3-47) zeigte sich, dass über Winter der N_{min}-Gehalt in fast allen Varianten abnahm. Über beide Fruchtfolgen wurden Werte von 12 bis 25 kg N_{min}/ha ermittelt.

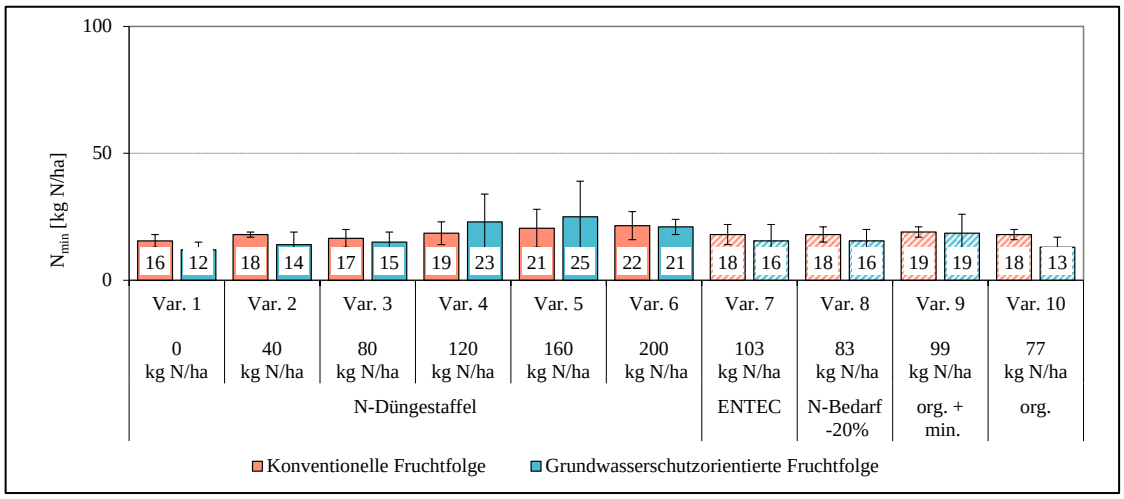

Abbildung 3-47: Frühjahrs-N_{min}-Werte (Folgejahr) in kg N/ha ± Standardfehler (Fehlerbalken, n=2) nach Braugerste im Mittel der Versuchsjahre 2017 und 2021

Alle Kulturen

In Abbildung 3-48 und Abbildung 3-49 sind die monatlichen N_{min}-Verläufe der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge dargestellt. Ebenfalls abgebildet ist der Verlauf der Temperatur und die Niederschlagshöhe im jeweiligen Monat. Mit steigender Temperatur stiegen auch die N_{min}-Werte über die Vegetationsperiode an. Nach der Kartoffelernte im Herbst zeigten sich sowohl im Jahr 2014 als auch 2018 Zunahmen im N_{min}-Gehalt des Bodens, wobei diese im Versuchsjahr 2018 in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge durch den Anbau des Ölrettichs reduziert werden konnten. Aufgrund des Anbaus des Winterroggens und der erneuten Bodenbewegung erfolgte im Herbst dann ein großer Mineralisationsschub, welcher sich durch einen starken Anstieg der N_{min}-Werte zeigte. Im Frühjahr 2015 war der N_{min}-Gehalt im Boden wieder auf einem niedrigen Niveau. Gleichzeitig dazu war ein Anstieg der Niederschlagsmenge vom November zum Dezember zu beobachten. Im Versuchsjahr 2015 zeigte sich der Effekt des Anbaus einer Untersaat in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge, die trotz zusätzlicher N-Düngung zur Untersaat deutlich geringere N_{min}-Werte im Verlauf aufwies als die konventionelle Variante. Beim Silomais zeigte sich im Versuchsjahr 2016 ein deutlich höherer Anstieg des N_{min}-Werts in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in den Sommermonaten. Der N_{min}-Gehalt nahm aber im Verlauf der Vegetationsperiode wieder ab. Nach der Ernte und im Frühjahr des Folgejahrs lagen die Werte unterhalb denen in der konventionellen Fruchtfolge. Dies ist möglicherweise ein Effekt der Untersaat, die noch vorhandenen Stickstoff aus dem Boden aufgenommen hat. Der Sommer 2017 war geprägt von hohen Niederschlägen im Sommer. Diese führten möglicherweise zu einer Auswaschung des im Boden vorhandenen Stickstoffs.

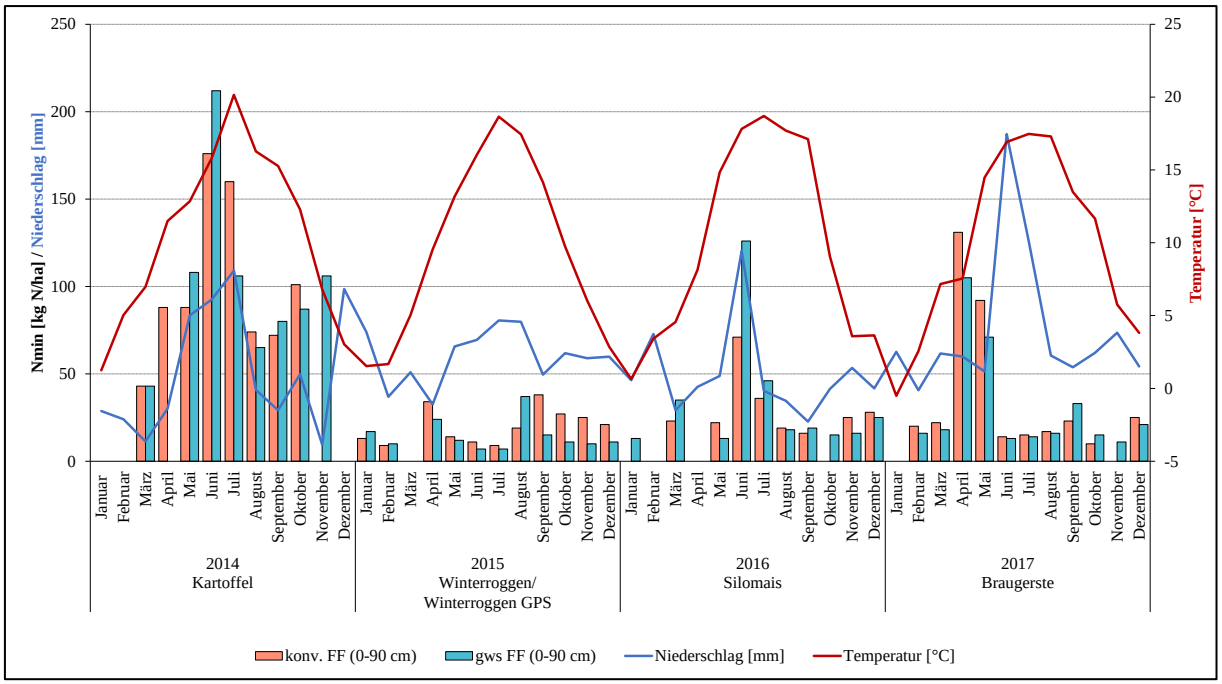

Abbildung 3-48: Verlauf der N_{min}-Werte, Temperatur und Niederschlagshöhe in den Versuchsjahren 2014 - 2017 in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge

Im Übergang vom Versuchsjahr 2018/2019 sind deutliche Unterschiede im Verlauf der N_{min}-Werte bei den beiden Fruchtfolgen zu erkennen (vgl. Abbildung 3-49).

In der konventionellen Fruchtfolge nahm der N_{min}-Gehalt im Boden über die Wintermonate ab, wohingegen er in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge auf einem gleichbleibenden hohen Niveau lag. Hier reduzierte sich der N_{min}-Gehalt erst im Februar mit einer steigenden Niederschlagsmenge. Beim Winterroggen traten im Verlauf der Vegetationsperiode höhere N_{min}-Werte in der konventionellen im Vergleich zur grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge auf. Zusätzlich trat eine starke N-Nachmineralisation im September in der konventionellen Fruchtfolge auf. Diese trat in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge nicht auf, sodass von einer N-Aufnahme durch die Untersaat ausgegangen werden kann. Im Versuchsjahr 2021 ist der Verlauf der N_{min}-Werte in beiden Fruchtfolgen auf einem ähnlichen Niveau. Nur im Mai nach einem Temperaturanstieg und ebenfalls im Dezember wurden in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge deutlich höhere Werte ermittelt.

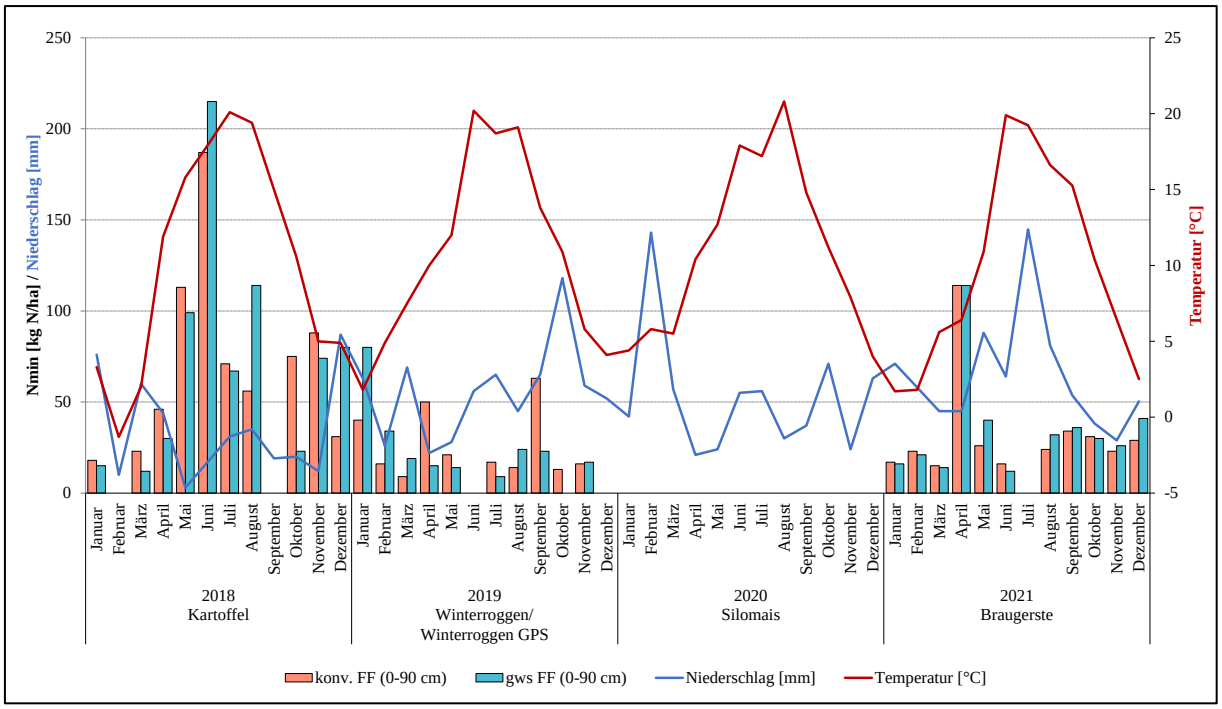

Abbildung 3-49: Verlauf der N_{min}-Werte, Temperatur und Niederschlagshöhe in den Versuchsjahren 2018 - 2021 in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge

3.4 Berechnung der standörtlichen optimalen N-Düngung

In allen Feldversuchen zum Wasserschutz und Düngerecht ist eine feste N-Düngestaffel angelegt, die es ermöglicht, Parameter wie die optimale N-Düngung und den optimalen Ertrag rechnerisch zu ermitteln.

Die errechnete optimale N-Düngung und die dazugehörigen Erträge sind im Folgenden für die beiden Fruchtfolgen dargestellt. Bei Betrachtung der Erträge muss berücksichtigt werden, dass es sich um Versuchsflächen mit Kernparzellendrusch handelt und die Erträge somit bis zu 20 % über den Praxiserträgen liegen können.

In Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 sind die jährlichen berechneten N-Düngungsoptima und Ertrags-Optima der einzelnen Kulturen der konventionellen und der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge dargestellt. Diese unterscheiden sich teilweise sehr stark voneinander, was auch mit den unterschiedlichen Nutzungsrichtungen der Kulturen zusammenhängt (Winterrogen vs. Winterroggen GPS, späte Speisekartoffel vs. Frühe Speisekartoffel), woraus sich unterschiedliche Produktpreise und damit auch unterschiedliche N-Düngungsoptima und Ertragsoptima ergeben. Für die Kartoffel im Versuchsjahr 2014 konnten in beiden Fruchtfolgen keine N-Optima bestimmt werden, da der Ertrag auch in der sehr hochgedüngten Variante 6 immer noch stark anstieg. Für den Silomais im Versuchsjahr 2020 ist auf Grund des Düngungsfehlers in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge nur das N-Optimum für die konventionelle Fruchtfolge dargestellt.

Tabelle 3-1: Berechnete ökonomisch optimale N-Düngung und optimale Erträge für die Versuchsjahre 2014 – 2021 (Konventionelle Fruchtfolge)

Konventionelle Fruchtfolge			
Kultur	Jahr	Berechnete optimale N-Düngung [kg N/ha]	Berechneter optimaler Ertrag [dt/ha] / [dt TM/ha]*
Kartoffel	2014	Nicht auswertbar	Nicht auswertbar
Winterroggen	2015	189	115
Silomais	2016	212	246
Braugerste	2017	133	72
Kartoffel	2018	195	757
Winterroggen	2019	162	105
Silomais	2020	144	204
Braugerste	2021	124	69

* für Kartoffel, Winterroggen und Braugerste werden die Knollen-/Kornerträge angegeben. Für Silomais werden Trockenmasseerträge dargestellt

Tabelle 3-2: Berechnete ökonomisch optimale N-Düngung und optimale Erträge für die Versuchsjahre 2014 – 2021 (Grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge)

Grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge			
Kultur	Jahr	Berechnete optimale N-Düngung [kg N/ha]	Berechneter optimaler Ertrag [dt/ha] / [dt TM/ha]*
Kartoffel	2014	Nicht auswertbar	Nicht auswertbar
Winterroggen GPS	2015	163	137
Silomais	2016	214	235
Braugerste	2017	141	75
Kartoffel	2018	184	421
Winterroggen GPS	2019	150	75
Silomais	2020	Nicht auswertbar	Nicht auswertbar
Braugerste	2021	122	68

* für Kartoffel und Braugerste werden die Knollen-/Kornerträge angegeben. Für Winterroggen GPS und Silomais werden Trockenmasseerträge dargestellt

Bei der Kartoffel lag die optimale N-Düngermenge zur Erreichung des optimalen Ertrags deutlich weiter auseinander. Das N-Düngungsoptimum lag im Versuchsjahr 2018 bei der Kartoffel in der konventionellen Fruchtfolge bei 195 kg N/ha bei einem optimalen Knollenertrag von 757 dt/ha. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge lag das N-Düngungsoptimum bei 184 kg N/ha und einem deutlich geringeren Knollenertrag von 421 dt/ha. Hier ist jedoch auch zu beachten, dass sich sowohl die Kartoffelsorte als auch der Rodungstermin unterscheiden und die Erträge der Kartoffel in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge deutlich unter denen der konventionellen Fruchtfolge liegen.

Beim Winterroggen in der konventionellen Fruchtfolge erfolgte eine Nutzung des Korns und in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurde der Roggen als Ganzpflanzensilage zwischen Beginn der Milchreife und Ende der Teigreife geerntet. Das N-Optimum in der konventionellen Fruchtfolge lag bei 173 kg N/ha und einem optimalen Ertrag von 109 dt/ha. Beim GPS Roggen lag die optimale N-Düngung bei 158 kg N/ha und einem optimalen Ertrag von 106 dt/ha.

Für den Silomais konnte in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge aufgrund eines Düngungsfehlers nur das Versuchsjahr 2016 ausgewertet werden. Hier zeigten sich beim Vergleich der beiden Fruchtfolgen nur kleine Unterschiede. So lag die optimale N-Düngungshöhe in der konventionellen Fruchtfolge bei 212 kg N/ha bei einem optimalen Ertrag von 246 dt/ha In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge lag das N-Optimum bei 214 kg N/ha und einem optimalen Ertrag von 235 dt TM/ha.

Bei der Braugerste konnte in der konventionellen Fruchtfolge ein optimaler Kornertrag von 71 dt/ha bei einer optimalen N-Düngung von 128 kg N/ha erreicht werden. Auch in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge lag das Ertragsoptimum bei 71 dt/ha bei einer optimalen N-Düngung von 131 kg N/ha.

Zur Einordnung der N-Optima sind in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 zusätzlich der N-Bedarfswert und der N-Düngebedarf gem. Anlage 4, Tabelle 2 der DüV und Anlage 1, Tabelle 1 der DüV (DüV 2017) im Vergleich zu den berechneten N-Optima für die am Standort Hamerstorf in den einzelnen Versuchsjahren angebauten Kulturen dargestellt. Die komplette Düngebedarfsermittlung für die einzelnen Kulturen kann im Anhang eingesehen werden.

Tabelle 3-3: N-Bedarfswert, N-Düngebedarf und berechnete N-Optima für die Kulturen der konventionellen Fruchtfolge in den Versuchsjahren 2014-2021 am Standort Hamerstorf

Konventionelle Fruchtfolge					
Kultur	Jahr	N_{min}-Frühjahr [kg N/ha]	N-Bedarfswert gem. DüV [kg N/ha]	Berechnete optimale N-Düngung [kg N/ha]	N-Düngebedarf gem. DüV [kg N/ha]
Kartoffel	2014	43	180	Nicht auswertbar	137
	2018	22		195	158
	Mittel	33		-	148
Winterroggen	2015	10	170	189	160
	2019	19		162	151
	Mittel	15		176	156
Silomais	2016	22	200	212	178
	2020	32		144	168
	Mittel	27		178	173
Braugerste	2017	21	140	133	129
	2021	17		124	123
	Mittel	19		129	126

Tabelle 3-4: N-Bedarfswert, N-Düngebedarf und berechnete N-Optima für die Kulturen der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in den Versuchsjahren 2014-2021 am Standort Hamerstorf

Grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge					
Kultur	Jahr	N_{min}-Frühjahr [kg N/ha]	N-Bedarfswert gem. DüV [kg N/ha]	Berechnete optimale N-Düngung [kg N/ha]	N-Düngebedarf gem. DüV [kg N/ha]
Kartoffel	2014	43	180	Nicht auswertbar	137
	2018	11		184	169
	Mittel	27		-	153
Winterroggen GPS	2015	9	170	163	161
	2019	33		150	137
	Mittel	21		157	149
Silomais	2016	29	200	214	171
Braugerste	2017	19	140	141	131
	2021	14		122	136
	Mittel	17		132	134

3.5 Standörtliche N-Mineraldüngeräquivalente (N-MDÄ)

Das N-Mineraldüngeräquivalent (N-MDÄ) gibt die Nährstoffwirksamkeit von Wirtschaftsdüngern in Bezug zur Wirkung von Mineraldüngern an. Das N-MDÄ ist abhängig von Standortfaktoren, der Witterung, der Fruchtart, der N-Düngungshöhe und der Art des eingesetzten organischen N-Düngers. Am Standort Hamerstorf wurde das N-MDÄ mit Hilfe der Variante 10 bestimmt, die ausschließlich mit Gärrest aus einer Biogasanlage gedüngt wurde. Ausgangstoffe für den Gärrest sind sowohl Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft als auch nachwachsende Rohstoffe. Die zugeführte Gesamt-N-Menge im Wasserschutzversuch war abhängig von der Fruchtart und des N-Gehalts des eingesetzten Gärrests. Das Ziel beim Einsatz von organischen Düngern ist es, eine möglichst hohe berechenbare N-MDÄ zu erreichen.

Die standörtlichen N-MDÄ für den Wasserschutzversuch Hamerstorf sind in Abbildung 3-50 dargestellt. Ebenfalls abgebildet ist die N-Düngung (N_{gesamt}) über Gärreste. Es zeigten sich starke Unterschiede in den Wirksamkeiten des Gärrest in den einzelnen Versuchsjahren und Fruchtfolgen. Die N-MDÄ lagen in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge mit Ausnahme des Versuchsjahrs 2021 über denen der konventionellen Fruchtfolge.

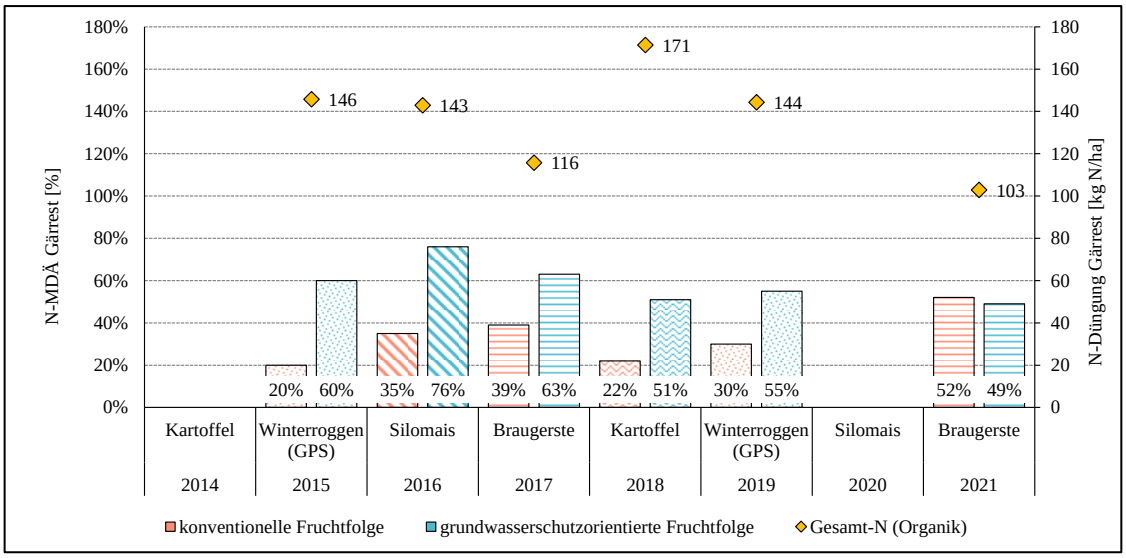

Abbildung 3-50: Standörtliche N-Mineraldüngeräquivalente und N-Düngung (Gesamt-N aus Organik) in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge der Versuchsjahre 2015 – 2021

In der DüV werden keine kulturartenspezifischen N-MDÄ vorgegeben. Die dort angegebenen Mindestwirksamkeiten (Anlage 3 DüV) beziehen sich ausschließlich auf die Art des organischen Nährstoffträgers. Daher sind in Tabelle 3-5 neben den Mittelwerten der einzelnen Fruchtarten auch der Mittelwert über alle Kulturen für die beiden Fruchtfolgen dargestellt. Die Mindestwirksamkeit nach DüV Anlage 3 liegt für Gärreste bei 60 %. Dieser wurde in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge am Standort Hamerstorf mit 59 % fast erreicht. In der konventionellen Fruchtfolge lag das N-MDÄ mit 33 % unterhalb der Vorgaben der DüV.

Tabelle 3-5: Standörtliche N-Mineraldüngeräquivalente und N-Gesamt-N aus Organik im Mittel für die Fruchtarten und über alle Fruchtarten in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge 2015 - 2021

Fruchtart	**Versuchsjahr**	**N-MDÄ [%]**		**N-Gesamt aus Organik [kg N/ha]**
		Konv. FF	**Gws. FF**	
Kartoffel	2018	22	51	171
Winterroggen (GPS)	2015, 2019	25	58	145
Silomais	2016	35	76	143
Braugerste	2017, 2021	46	56	109
Alle Kulturen	**2015 – 2021**	**33**	**59**	**142**

4 Sickerwasseruntersuchungen (LBEG)

4.1 Wasserhaushalt

In Tabelle 4-1 sind die Sickerwassermenge und die Austauschhäufigkeit als zentrale Kenngrößen für die Beurteilung der N-Austräge dargestellt.

Es zeigte sich in den Versuchsjahren eine deutlich höhere Sickerwassermenge und Austauschhäufigkeit bei Getreide (Winterroggen und Braugerste) im Vergleich zu Mais und Kartoffeln unabhängig von der Düngungsstufe. Ein Vergleich zwischen den Kulturen ist jedoch schwierig, da die Witterung der jeweiligen SWP stark variierte. So waren beide SWP, in denen Roggen angebaut wurde, sehr nass (siehe auch Kapitel 2.3 sowie Tabelle A-1). Nur bei der ungedüngten, konventionellen Variante konv1 waren die Sickerwassermenge und die Austauschhäufigkeit etwas höher als bei den anderen konventionellen Varianten.

Im Mittel lag die angefallene Sickerwassermenge in den grundwasserschutzorientierten Varianten mit 266 mm um 52 mm unterhalb der jeweiligen konventionellen Vergleichsvariante. Mit 354 mm im Mittel wies konv1 die höchste Sickerwassermenge auf (siehe Tabelle 4-1). Dies lag an einer geringeren Evapotranspiration durch den schwächeren Pflanzenaufwuchs in der ungedüngten Variante. Die generell geringere Sickerwasserbildung und Austauschhäufigkeit unter den grundwasserschutzorientierten Varianten dürfte mit der permanenten Begrünung durch die Hauptfrucht und die Grasuntersaat bzw. Zwischenfrucht zusammenhängen. Diese hat einen Teil des Niederschlagwassers aufgenommen und durch Evapotranspiration wieder der Atmosphäre zugeführt. Entsprechend stand weniger Wasser für die Sickerwasserbildung zur Verfügung.

Tabelle 4-1:Sickerwassermenge und Austauschhäufigkeit im Verlauf der Sickerwasserperioden (SWP) am Standort Hamerstorf

SWP	Fruchtart	konv1	konv3	konv4	gws4	konv5	gws5
		Sickerwassermenge [mm]					
2014/2015	Kartoffel	316	310	310	310	310	310
2015/2016	Winterroggen (+US)	481	436	436	342	436	342
2016/2017	Silomais (+US)	332	220	220	174	220	174
2017/2018	Braugerste +ZF/US	433	388	388	247	388	247
2018/2019	Kartoffel (+ZF)	154	151	151	148	151	148
2019/2020	Winterroggen (+US)	444	441	441	392	441	392
2020/2021	Silomais (+US)	273	240	240	202	240	202
2021/2022	Braugerste +ZF/US	396	358	358	313	358	313
Mittel		**354**	**318**	**318**	**266**	**318**	**266**
		Ah [-]					
2014/2015	Kartoffel	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
2015/2016	Winterroggen (+US)	3,1	2,8	2,8	2,2	2,8	2,2
2016/2017	Silomais (+US)	2,2	1,4	1,4	1,1	1,4	1,1
2017/2018	Braugerste +ZF/US	2,8	2,5	2,5	1,6	2,5	1,6
2018/2019	Kartoffel (+ZF)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2019/2020	Winterroggen (+US)	2,9	2,9	2,9	2,5	2,9	2,5
2020/2021	Silomais (+US)	1,8	1,6	1,6	1,3	1,6	1,3
2021/2022	Braugerste +ZF/US	2,6	2,3	2,3	2,0	2,3	2,0
Mittel		**2,3**	**2,1**	**2,1**	**1,7**	**2,1**	**1,7**

Die Sickerwassermengen unterschieden sich zwischen den Kulturen und Jahren sehr deutlich. Dabei waren die Unterschiede innerhalb einer Kultur, abgesehen von der Kartoffel, zwischen den Jahren gering. Generell lag die Sickerwassermenge in den Jahren 2015/2016 und 2019/2020 nach Winterroggen bzw. 2017/2018 und 2021/2022 nach Braugerste über der mittleren Sickerwassermenge während des Versuchs, nach Kartoffeln und Silomais darunter.

In Abbildung 4-1 wird die tagesgenaue Sickerwassermenge im Verlauf des Versuchzeitraumes beispielhaft für die Variante gws4 dargestellt.

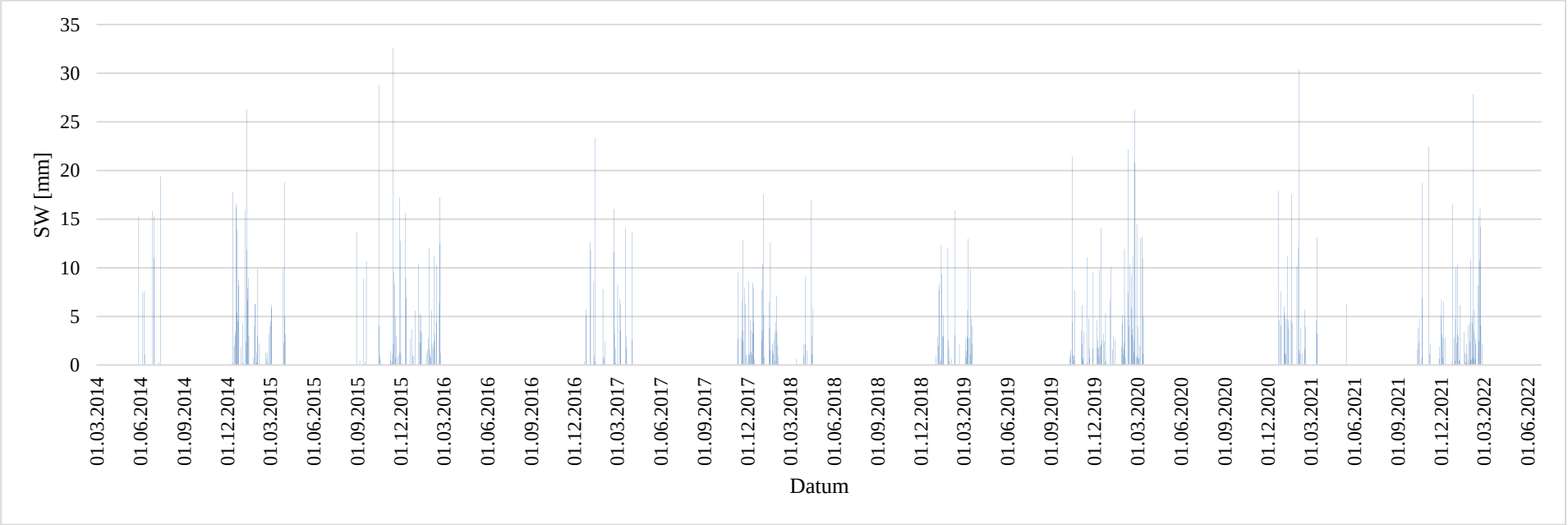

Abbildung 4-1: Tagesgenaue Werte der Sickerwassermenge im Versuchszeitraum 2014-2022 am Beispiel von gws4.

4.1.1 Kartoffel

Die Sickerwassermenge nach Kartoffeln war in der SWP 2014/2015 über alle Varianten etwa doppelt so hoch wie 2018/2019. Die höhere Sickerwassermenge in der SWP 2014/2015 wurde einerseits durch hohe Niederschläge im Sommer 2014 begünstigt, während andererseits die geringe Sickerwasserbildung in der SWP 2018/2019 auf die Trockenjahre 2018 und 2019 zurückgeht. Da für Kartoffeln keine ertragsabhängigen kc-Faktoren vorliegen, sind die Variantenunterschiede gering. Die grundwasserschutzorientierten Varianten unterschieden sich in der SWP 2014/2015 außerdem nicht von den konventionellen Varianten, da noch keine Grasuntersaat vorhanden war. Auch die Austauschhäufigkeit war folglich bei allen Varianten nahezu identisch bei etwa 2,0 und damit als „groß“ einzustufen (Bug, et al., 2020). Die niedrige Sickerwasserbildung in der SWP 2018/2019 lag an einem sehr späten Beginn der Sickerwasserperiode. Diese begann erst deutlich nach dem Umbruch der Zwischenfrucht. Die SWP 2018/2019 war in der gesamten Versuchsreihe die trockenste Periode, was sich ebenfalls auf die Bildung des Sickerwassers ausgewirkt hat (siehe Tabelle 4-1). Trotz mehrfacher Beregnung im Sommer 2018 (siehe Tabelle 2-5) kam es hier zur geringsten Sickerwasserbildung in der gesamten Versuchsreihe. Auch in der SWP 2018/2019 gab es nur geringe Unterschiede bei der Sickerwasserbildung zwischen den Varianten. Die Austauschhäufigkeit lag bei 1,0 und gilt damit als „gering“ (Bug, et al., 2020).

4.1.2 Winterroggen

Nach Winterroggen fiel die Sickerwasserbildung in den SWP 2015/2016 und 2019/2020 deutlich höher aus als nach Kartoffeln.

Die SWP 2015/2016 und 2019/2020 waren die niederschlagsreichsten in der gesamten Versuchsreihe. Hier gab es eine Sickerwasserbildung zwischen 337 und 483 mm bzw. 392 und 444 mm sowie eine Austauschhäufigkeit zwischen 2,2 und 3,1 bzw. 2,5 und 2,9 (siehe Tabelle 4-1). Die Austauschhäufigkeit war demnach als „groß“ bis „sehr groß“ einzustufen (Bug, et al., 2020). Nach Winterroggen lag die Fläche in den konventionellen Varianten über Winter brach bis der Silomais ausgesät wurde. Dies begünstigte die Sickerwasserbildung zusätzlich.

Die Sickerwasserbildung fiel in beiden Anbaujahren unter den konventionellen Varianten deutlich höher aus als bei den grundwasserschutzorientierten Varianten. Dies hängt mit der erhöhten Wasseraufnahme und Evapotranspiration der Untersaat zusammen.

4.1.3 Silomais

Ebenso wie nach Winterroggen bzw. Winterroggen GPS mit Untersaat konnten auch nach Silomais deutliche Unterschiede zwischen den konventionellen und den grundwasserschutzorientierten Varianten festgestellt werden. Bei konv4 und konv5 fielen in SWP 2016/2017 221 mm und in SWP 2020/2021 240 mm Sickerwasser an. Unter gws4 und gws5 waren es in der SWP 2016/2017 jeweils 172 mm bzw. 202 mm in der SWP 2020/2021. Die geringere Sickerwasserrate unter den grundwasserschutzorientierten Varianten lässt sich auf eine erhöhte Wasseraufnahme und Evapotranspiration der Untersaat zurückführen.

4.1.4 Braugerste

Auch bei der Braugerste ist die unterschiedliche Sickerwassermenge zwischen den konventionellen und grundwasserschutzorientierten Varianten deutlich erkennbar. In der SWP 2017/2018 lag die Sickerwasserbildung der grundwasserschutzorientierten Varianten mit 247 mm um mehr als 140 mm unter der der konventionellen Varianten mit 388 mm. In der SWP 2021/2022 war der Unterschied mit etwa 80 mm zwischen den konventionellen und grundwasserschutzorientierten Varianten deutlich geringer, aber immer noch klar erkennbar. Die Austauschhäufigkeit veränderte sich vom ersten zum zweiten Anbaujahr geringfügig bei allen Varianten.

4.2 NO_3-Konzentration

Abbildung 4-2 stellt die NO_3-Konzentrationen der einzelnen Varianten über den gesamten Versuchszeitraum im zeitlichen Verlauf dar. In der SWP 2014/2015 kam es mit der Ernte der Kartoffeln im September zu einem rapiden Anstieg der NO_3-Konzentration bei allen Varianten. Im Verlauf des Januars und Februars 2015 sinkt die NO_3-Konzentration aufgrund der Stickstoffauswaschung stark ab. Insbesondere gws4 hatte einen extremen Verlauf von sehr hohen zu sehr niedrigen NO_3-Konzentrationen. Ende 2015 nach Winterroggen gab es bei den konventionellen Varianten einen Peak, bei dem zwar der Grenzwert überschritten wurde, allerdings weit unterhalb der Werte nach Kartoffeln lag. Ab Oktober 2015 bis September 2017 lagen die grundwasserschutzorientierten Varianten deutlich unter den konventionellen Varianten. Dies lässt vermutlich darauf schließen, dass die Grasuntersaat viel überschüssigen und auch bodenbürtigen Stickstoff aufgenommen hat. Im Oktober 2017 nach Braugerste stieg die NO_3-Konzentration der grundwasserschutzorientierten Varianten an, während es in den konventionellen Varianten eher zu einem Rückgang der NO_3-Konzentration kam.

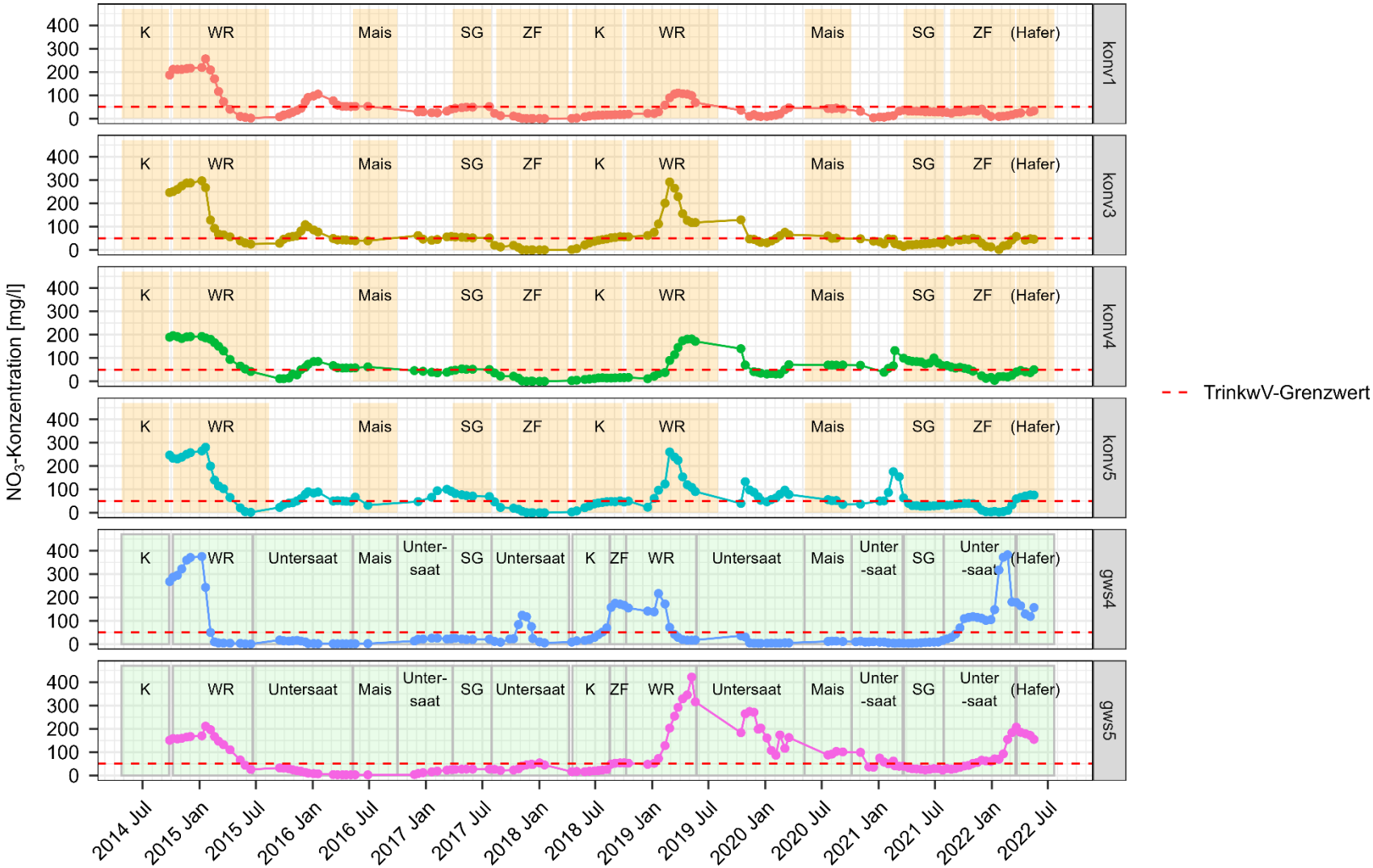

Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf der NO_3-Konzentration im Untersuchungszeitraum von der SWP 2014/2015 bis 2021/2022 über alle Kulturen

Die in den konventionellen Varianten nach Braugerste angebaute Zwischenfrucht hatte vermutlich den Stickstoff nach der Ernte sehr effizient aufgenommen, während die Grasuntersaat den Reststickstoff weniger gut fixieren konnte. Dafür sprechen auch die niedrigen Herbst-N_{min}-Werte um 17 kg N/ha nach Braugerste in den konventionellen Varianten (Kap. 3.3). Nach der Kartoffelernte 2018 kam es bei allen Varianten zu Beginn des Jahres 2019 zu einem erneuten Anstieg der NO_3-Konzentration, insbesondere in den grundwasserschutzorientierten Varianten. Die Nitratpeaks nach Winterroggen 2019 waren im September erkennbar. Nur die hochgedüngten Varianten hatten ihre Peaks erst später, konv5 Ende Oktober und gws5 Ende November 2019. Wie in SWP 2015/2016 waren die Nitratpeaks nach Winterroggen auch 2019/2020 deutlich geringer als nach den Kartoffeln. Im Frühling 2020 gab es einen leichten Anstieg der NO_3-Konzentrationen. Dieser könnte auf die Düngergabe im Frühjahr zurückzuführen sein (siehe Abbildung 4-2).
In der SWP 2020/2021 nach Silomais waren deutliche Variantenunterschiede erkennbar. Die Varianten konv4, konv5 und gws5 wiesen deutliche Nitratpeaks auf. Bei gws5 waren die NO_3-Konzentrationen bereits im stehenden Maisbestand erhöht und nahmen erst in der darauffolgenden Untersaat ab. Dies ist ein möglicher Hinweis auf eine effektive N-Aufnahme der Grasuntersaat, wodurch die NO_3-Konzentrationen bei dem grundwasserschutzorientierten Anbau auf einem niedrigen Niveau gehalten wurden. Nach Ernte der Braugerste im Juli 2021 gab es bei den konventionellen Varianten einen kurzfristigen leichten Anstieg der NO_3-Konzentrationen. Der anschließende Rückgang dürfte an der Stickstoffaufnahme durch die Zwischenfrucht gelegen haben. Bis zum Unterpflügen der abgefrorenen Zwischenfrucht im März 2022 blieben hier die NO_3-Konzentrationen auf einem niedrigen Niveau. Bei den grundwasserschutzorientierten Varianten gab es hingegen einen starken Anstieg der NO_3-Konzentrationen. Hierbei waren sowohl der Anstieg als auch der Peak im Februar 2021 bei gws4 deutlich höher als bei gws5. Möglicherweise wurde der durch die Untersaat im Humus fixierte Stickstoff freigesetzt und ausgewaschen (siehe Abbildung 4-2).

Abbildung 4-3 stellt die mittleren Nitratkonzentrationen nach den jeweiligen Kulturen je nach SWP und Variante im Verlauf des Versuchs dar. Auf die Konzentrationen nach den jeweiligen Kulturen wird in den folgenden Unterkapiteln näher eingegangen.

Abbildung 4-3: Mittlere *NO_3-Konzentration je Kultur und SWP in Abhängigkeit von der Düngungsstufe. Die rot gestrichelte Linie stellt den Grenzwert nach TrinkwV von 50 mg NO_3/l als Orientierungswert dar.*

4.2.1 Kartoffel

Nach der Kartoffelernte in der SWP 2014/2015 wurde bei allen Varianten eine sehr hohe NO_3-Konzentration gemessen. Hierbei konnte kein Zusammenhang zwischen der Höhe der N-Düngung und der NO_3-Konzentration festgestellt werden.

Die grundwasserschutzorientierten Varianten wiesen in beiden Anbaujahren sehr hohe NO_3-Konzentrationen auf und lagen auf einem ähnlichen Niveau wie die Varianten konv4 und konv5. Abgesehen von der NO_3-Konzentration unter gws5 gab es von der SWP 2014/2015 zur SWP 2018/2019 einen deutlichen Rückgang. Auffällig war die vergleichsweise hohe NO_3-Konzentration unter konv3. In beiden Anbaujahren wurde nach Kartoffeln der Grenzwert der TrinkwV bei allen Varianten überschritten, oft sogar um ein Vielfaches (siehe Abbildung 4-3). Wahrscheinlich stammt der Stickstoff von einer erhöhten Mineralisation. Diese könnte durch die Einarbeitung des Kartoffelkrautes sowie einer erhöhten Aktivität von Mikroorganismen

durch Bodenbewegung im Rahmen der Rodung sowie dem Aufbrechen von Bodenaggregaten induziert worden sein.

Die hohe NO_3-Konzentration der Variante konv3 könnte die hohe räumliche Variabilität der NO_3-Konzentration nach Kartoffel widerspiegeln, die sich durch den rodungsinduzierten Mineralisationsschub ergibt, jedoch mit den Saugsondenuntersuchungen nicht auseichend erfasst werden konnte.

Aufgrund der geringen Standzeit der Zwischenfrucht nach Kartoffeln im Jahr 2018 von nur etwa sieben Wochen konnte die Zwischenfrucht nicht genügend Stickstoff aufnehmen und konservieren, so dass die NO_3-Konzentration durch die Zwischenfrucht nicht gesenkt werden konnte.

4.2.2 Winterroggen

Nach Winterroggen GPS mit Untersaat wiesen die grundwasserschutzorientierten Varianten in der SWP 2015/2016 eine deutlich geringere NO_3-Konzentration auf als die konventionellen Varianten. Bei gws4 konnten in beiden Anbaujahren mit 9 mg NO_3/l die niedrigsten NO_3-Konzentrationen festgestellt werden. In Variante gws5 lag die NO_3-Konzentration in der SWP 2015/2016 mit 13 mg NO_3/l ebenfalls unter der NO_3-Konzentration aller konventioneller Varianten. Selbst mit der zusätzlichen N-Düngung der Grasuntersaat von 120 kg N/ha in drei Gaben blieb die NO_3-Konzentration sehr niedrig. Es ist davon auszugehen, dass sowohl der gedüngte als auch der im Boden freigesetzte Stickstoff fast vollständig aufgenommen wurde. In der SWP 2019/2020 wurde bei gws5 eine mittlere NO_3-Konzentration von 168 mg NO_3/l gemessen. Vermutlich wurde der während der Versuchslaufzeit in der organischen Substanz akkumulierte Stickstoff freigesetzt und ausgewaschen. Nach Winterroggen lagen die NO_3-Konzentrationen von gws4 in beiden Anbaujahren unterhalb des Grenzwertes der TrinkwV. Ebenso wurde in der SWP 2015/2016 bei gws5 und in der SWP 2019/2020 in den Varianten konv1 und konv4 der Grenzwert unterschritten. Ansonsten kam es in beiden Anbaujahren in allen Varianten zu einer Überschreitung des Grenzwertes (siehe Abbildung 4-3).

Die geringe NO_3-Konzentration bei beiden gws-Varianten im Vergleich zu den konventionellen dürfte an einer Stickstoffaufnahme durch die Grasuntersaat liegen.

Der Zusammenhang zwischen der Düngungsstufe und der NO_3-Konzentration war nach Winterroggen nur in der SWP 2019/2020 tendenziell erkennbar. Die hohe NO_3-Konzentration bei gws5 in der SWP 2019/2020 könnte an einer erhöhten N-Mineralisation aufgrund eines von der Grasuntersaat induzierten erhöhten Humusgehaltes liegen. Zusätzlich zur Düngung konnte

der überschüssige Stickstoff möglicherweise nicht vollständig von der Untersaat aufgenommen werden.

4.2.3 Silomais

Nach Silomais konnte in der konventionellen Fruchtfolge 2020/2021 ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der N-Düngungsstufe und der NO_3-Konzentration festgestellt werden. In der SWP 2016/2017 war hingegen die NO_3-Konzentration bei konv3 etwas höher als bei konv4. Im Mittel beider Versuchsjahre war mit zunehmender N-Düngung ein Anstieg der NO_3-Konzentration erkennbar, der bei einer N-Düngung oberhalb von 150 kg N/ha stärker ausfiel. Im Hinblick auf den grundwasserschutzorientierten Anbau konnte ein positiver Effekt festgestellt werden. Sowohl Variante 4 als auch Variante 5 wiesen im grundwasserschutzorientierten Anbau eine weit geringere NO_3-Konzentration auf als im konventionellen Anbau. Verfügbarer, auswaschungsgefährdeter Stickstoff im Boden wurde von der Grasuntersaat aufgenommen. Der Grenzwert der TrinkwV wurde bei gws5 nur in der SWP 2020/2021 überschritten (siehe Abbildung 4-3). Im Jahr 2020 war die Grasuntersaat nur schwach etabliert, was möglicherweise zu der hohen NO_3-Konzentration bei gws5 geführt hat. Durch die Andüngung der vor dem Silomais etablierten Grasuntersaat im Frühjahr 2020 standen in der SWP 2020/2021 bei den grundwasserschutzorientierten Varianten 60 kg N/ha mehr zur Verfügung. Da die ursprünglich geplante Ernte der Grasuntersaat aufgrund des geringen Aufwuchses nicht stattgefunden hat, erhöhte sich das N-Angebot im Vergleich zu den jeweiligen konventionellen Varianten um jeweils etwa 60 kg N/ha. Dies wurde bei der N-Düngung allerdings nicht angerechnet. Trotz des erhöhten N-Angebotes lag die jeweilige NO_3-Konzentration bei den grundwasserschutzorientierten Varianten deutlich unter der NO_3-Konzentration der konventionellen Varianten.

4.2.4 Braugerste

Im Vergleich zu den NO_3-Konzentrationen nach Silomais fielen unter Braugerste in beiden Anbaujahren bei allen konventionellen Varianten (mit Zwischenfrucht) deutlich geringere NO_3-

Konzentrationen an. Die grundwasserschutzorientierten Varianten (mit Grasuntersaat) wiesen hingegen einen sehr starken Anstieg auf.
Nach Braugerste wiesen nur die grundwasserschutzorientierten Varianten in der SWP 2021/2022 NO_3-Konzentrationen oberhalb des Grenzwertes der TrinkwV auf (siehe Abbildung 4-3).

Die geringe NO_3-Konzentration unter den konventionellen Varianten kann mit einem größeren Effekt der Zwischenfrucht im Vergleich zur Grasuntersaat bei den grundwasserschutzorientierten Varianten begründet werden. Die ständige Begrünung ab 2015 (Untersaaten, Zwischenfrucht) in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge könnte zu einer Anreicherung von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden geführt haben, welcher zum Ende des Versuchszeitraums langsam wieder freigesetzt wurde und zu einer erhöhten N-Auswaschung führte, da dieser zusätzliche Stickstoff bei der Düngung nicht angerechnet wurde

4.2.5 Mittel über beide Fruchtfolgezyklen

In Abbildung 4-4 wurde die NO_3-Konzentration im Mittel über alle Kulturen beider Fruchtfolgezyklen von der SWP 2014/2015 bis 2017/2018 und 2018/2019 bis 2021/2022 mit Standardfehlern dargestellt.
Während die mittlere NO_3-Konzentration von Fruchtfolgezyklus 1 (FF1) zu Fruchtfolgezyklus 2 (FF2) in der Variante konv1 abnahm, war sie unter Berücksichtigung der Fehlertoleranz in den übrigen konventionellen Varianten über beide Fruchtfolgezyklen in etwa konstant. Bei konv1 kam es zu einer Halbierung von FF1 zu FF2, was an einer Aushagerung der Parzellen liegen könnte. Bei den grundwasserschutzorientierten Varianten kam es von FF1 zu FF2 zu einem Anstieg. Bei gws5 wurde eine Verdopplung der NO_3-Konzentration beobachtet und in gws4 stieg die NO_3-Konzentration zur zweiten Fruchtfolge um etwa 30 %. Dies könnte an einer Anreicherung von leicht verlagerbaren N im Humus durch die dauerhafte Begrünung der Parzellen liegen.
Sowohl beim konventionellen als auch grundwasserschutzorientierten Anbau lag eine höhere Streuung im zweiten Fruchtfolgezyklus vor. Außer in den Varianten konv1 und konv4 im Fruchtfolgezyklus 2 wurde der Grenzwert der TrinkwV im Mittel immer überschritten (siehe Abbildung 4-4).

Anhand des Mittels über die gesamte Versuchsreihe ist kein positiver Effekt der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge auf die NO_3-Konzentration erkennbar. Es sollte jedoch beachtet werden, dass in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge aufgrund der

zusätzlichen N-Düngung zur Untersaat insgesamt mehr Stickstoff gedüngt wurde als in der konventionellen Fruchtfolge. In der Summe über den gesamten Versuchszeitraum von 2014 bis 2022 beläuft sich diese zusätzliche N-Zufuhr auf insgesamt 315 kg N/ha.

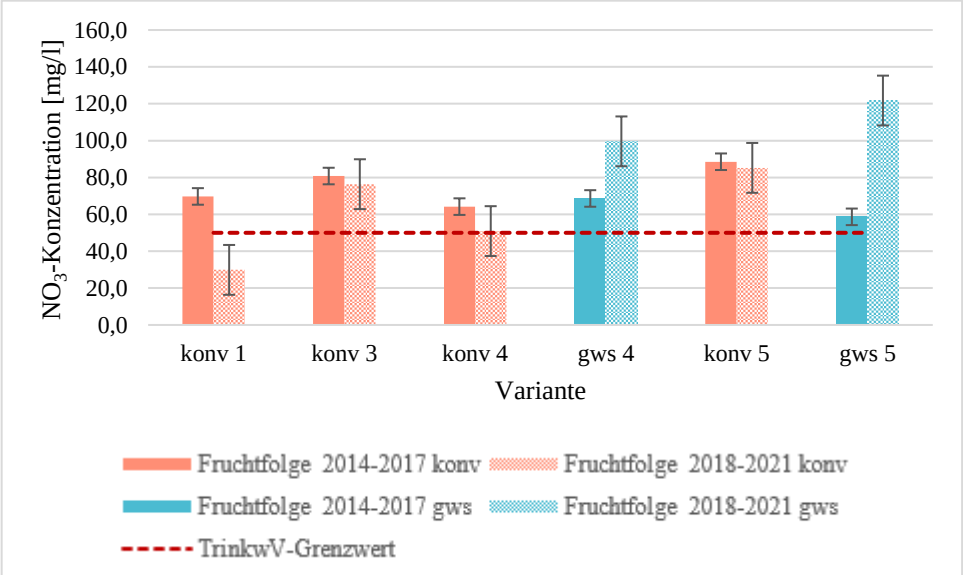

Abbildung 4-4: NO_3-Konzentration im Mittel über alle Kulturen je Fruchtfolgezyklus von der SWP 2014/2015 bis 2017/2018 und 2018/2019 bis 2021/2022 mit Standardfehlern. Der TrinkwV-Grenzwert dient hier nur zur Orientierung.

4.3 NO_3-N-Frachten im Sickerwasser

Im Folgenden werden die NO_3-N-Frachten der einzelnen Kulturen und Varianten im Rahmen des Versuchs betrachtet. In Abbildung 4-5 sind die NO_3-N-Frachten unter den einzelnen Kulturen je SWP und Variante dargestellt. Eine nähere Erläuterung zu den N-Frachten nach den jeweiligen Kulturen ist in den folgenden Unterkapiteln zu finden.

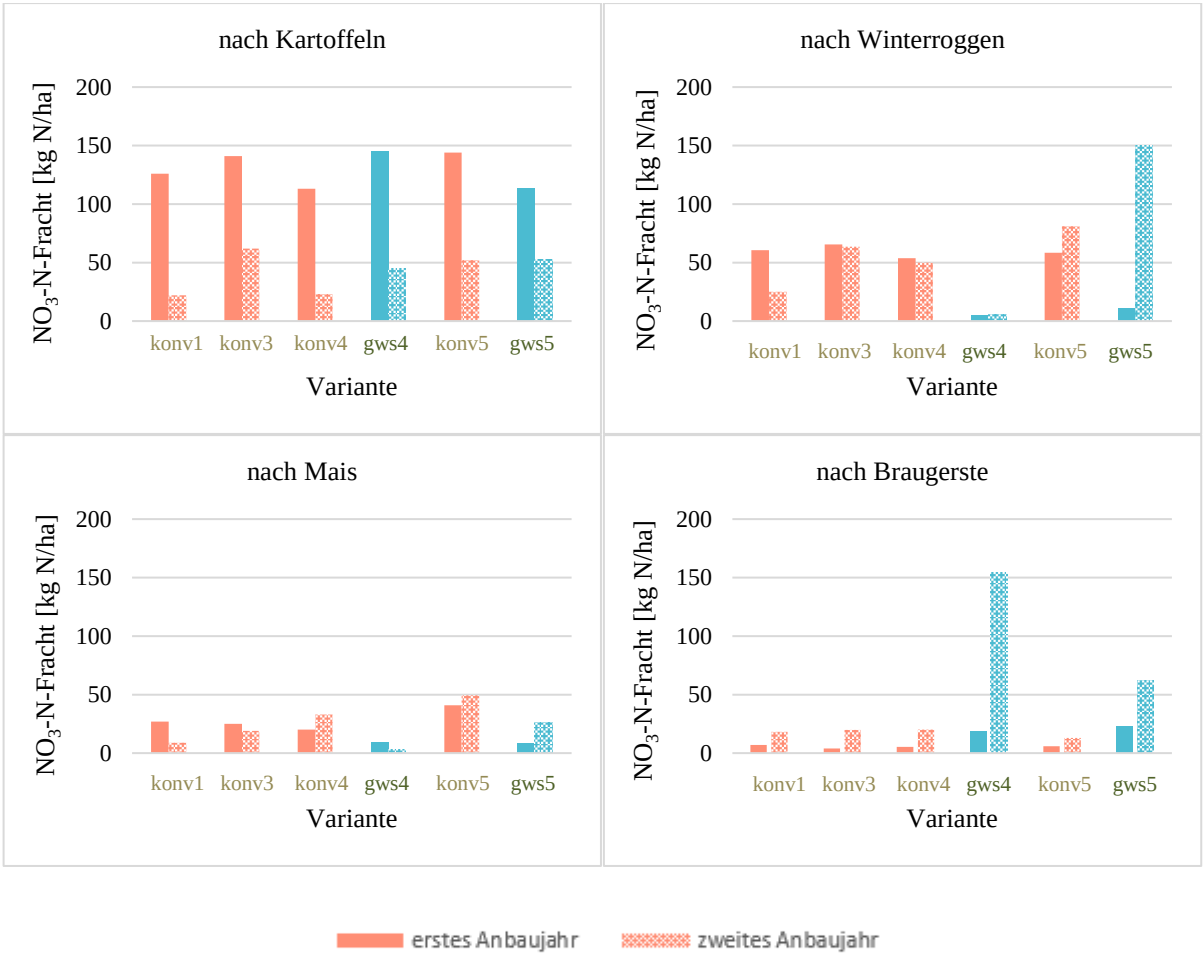

Abbildung 4-5: NO_3-N-Frachten der einzelnen Kulturen im Verlauf des Versuchszeitraumes von 2014 bis 2022

4.3.1 Kartoffel

Die hohen NO_3-N-Frachten in der SWP 2014/2015 (siehe Abbildung 4-5) nach Kartoffeln dürften mit der intensiven Bodenbewegung und Belüftung des Bodens im Rahmen der Rodung zusammenhängen. Hierdurch kam es zu einer verstärkten Mineralisierung und Auswaschung des überschüssigen Stickstoffs.

Auffällig sind die hohen NO_3-N-Frachten nach Kartoffeln bei der Variante konv3 von 141 bzw. 62 kg N/ha im Vergleich zu der Variante konv4. Dies könnte mit der hohen Heterogenität sowohl des Standortes als auch der N-Auswaschung nach Kartoffel im Allgemeinen zusammenhängen, die mit den Sickerwasseruntersuchungen nicht ausreichend abgebildet werden konnte.

Die hohen N-Austräge der SWP 2018/2019 in den grundwasserschutzorientierten Varianten dürften auf den geringen Effekt der Zwischenfrucht zurückzuführen sein. In dem Jahr ist die

Zwischenfrucht erst Mitte August ausgesät und bereits Anfang Oktober wieder umgebrochen worden. So wurde der von der Zwischenfrucht aufgenommene Stickstoff nicht ausreichend fixiert und beim Umbruch wieder freigesetzt.
Die großen Unterschiede der NO_3-N-Frachten zwischen SWP 2014/2015 und 2018/2019 dürften vor allem auf die unterschiedlich hohen Sickerwassermengen zurückzuführen sein (siehe Tabelle 4-1). Da in der SWP 2018/2019 nur etwa die Hälfte an Sickerwasser angefallen war wie in der SWP 2014/2015, kam es entsprechend zu deutlich geringeren NO_3-N-Frachten.

4.3.2 Winterroggen

Nach Winterroggen fiel auch der N-Austrag bei den grundwasserschutzorientierten Varianten in der SWP 2015/2016 deutlich geringer aus als bei den konventionellen Varianten (siehe Abbildung 4-5).
Der positive Effekt der Grasuntersaat war bei gws4 auch in der SWP 2019/2020 deutlich erkennbar. Wahrscheinlich wurde der überschüssige Stickstoff sehr gut von der Grasuntersaat aufgenommen, so dass diese der Schwarzbrache in der konventionellen Fruchtfolge deutlich überlegen war.
In Variante gws5 gab es in der SWP 2019/2020 hingegen mit 150 kg N/ha einen um das 15-fache höheren N-Austrag als in der SWP 2015/2016. Eventuell wies die hoch gedüngte Variante durch den hohen Begrünungsanteil und den damit verbundenen Eintrag von organischem Material ein erhöhtes Mineralisationspotential auf, welches zu den hohen N-Austrägen führte.

4.3.3 Silomais

Nach Silomais konnte in der SWP 2020/2021 ein klarer Zusammenhang zwischen den Düngungsstufen und den N-Austrägen festgestellt werden sowie in beiden SWP ein reduzierender Effekt der Grasuntersaat in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge. In der SWP 2016/2017 war erst bei überhöhter N-Düngung in Variante konv5 ein deutlicher Anstieg des N-Austrags erkennbar (siehe Abbildung 4-5).
Da die NO_3-N-Frachten unter den grundwasserschutzorientierten Varianten deutlich unterhalb der NO_3-N-Frachten der jeweiligen konventionellen Varianten lagen, kann von einer N-Aufnahme durch die Grasuntersaat ausgegangen werden. Wahrscheinlich wurde der überschüssige Stickstoff aufgenommen und somit dem Sickerwasser entzogen.

4.3.4 Braugerste

Nach Braugerste stieg der N-Austrag deutlich von der SWP 2017/2018 zur SWP 2021/2022 bei allen Varianten. Besonders hoch war der N-Austrag im zweiten Anbaujahr bei den grundwasserschutzorientierten Varianten mit 166 kg N/ha in gws4 bzw. 67 kg N/ha in gws5. Ein positiver Effekt auf eine Reduzierung der N-Austräge war bei den grundwasserschutzorientierten Varianten demnach nicht zu beobachten. Möglicherweise wurde der durch die Untersaaten im Humus fixierte Stickstoff wieder freigesetzt und ausgewaschen (siehe Abbildung 4-5). Demgegenüber waren die N-Austräge in den konventionellen Varianten durch den Zwischenfruchtanbau relativ gering. Der Zwischenfruchtanbau war dem Anbau einer Grasuntersaat demnach hinsichtlich des N-Austrages überlegen.

4.3.5 Mittel über beide Fruchtfolgezyklen

Im konventionellen Anbau fand im Mittel ein deutlich höherer N-Austrag im ersten Fruchtfolgezyklus (FF1) statt als im zweiten Fruchtfolgezyklus (FF2, Abbildung 4-6). Bei konv1 war der N-Austrag in FF1 sogar mehr als dreimal so hoch. Bei den gws-Varianten fand in der zweiten Fruchtfolge ein höherer N-Austrag statt. In gws5 war dieser etwa doppelt so hoch wie in Fruchtfolge 1. In allen Varianten gab es in der zweiten Fruchtfolge eine deutlich größere Streuung.

Im Vergleich zwischen konventioneller und grundwasserschutzorientierter Fruchtfolge war im Mittel von FF1 und FF2 kein positiver Effekt der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge auf den N-Austrag zu erkennen. Wie bei der NO_3-Konzentration ist hier zu bedenken, dass die grundwasserschutzorientierten Varianten eine höhere N-Zufuhr erhalten haben als die konventionellen Varianten. Dazu kamen bei den Kartoffeln in der SWP 2018/2019 Mindererträge durch Drahtwurmbefall sowie Grasbulten, was zu entsprechend geringeren N-Aufnahmen bzw. –Abfuhren führte. Dies spiegelte sich ebenfalls in erhöhten Reststickstoffgehalten wider.

Durch den erhöhten Begrünungsanteil durch Untersaat und Zwischenfrucht kam es vermutlich zu einem erhöhten Eintrag an organischem Material in den Boden, der folglich zu einem erhöhten Humusgehalt bei den grundwasserschutzorientierten Varianten geführt haben könnte. Dadurch kam es zu einem erhöhten N-Mineralisationspotenzial, das den N-Austrag auch in den grundwasserschutzorientierten Varianten im Laufe der Versuchszeit erhöht haben könnte.

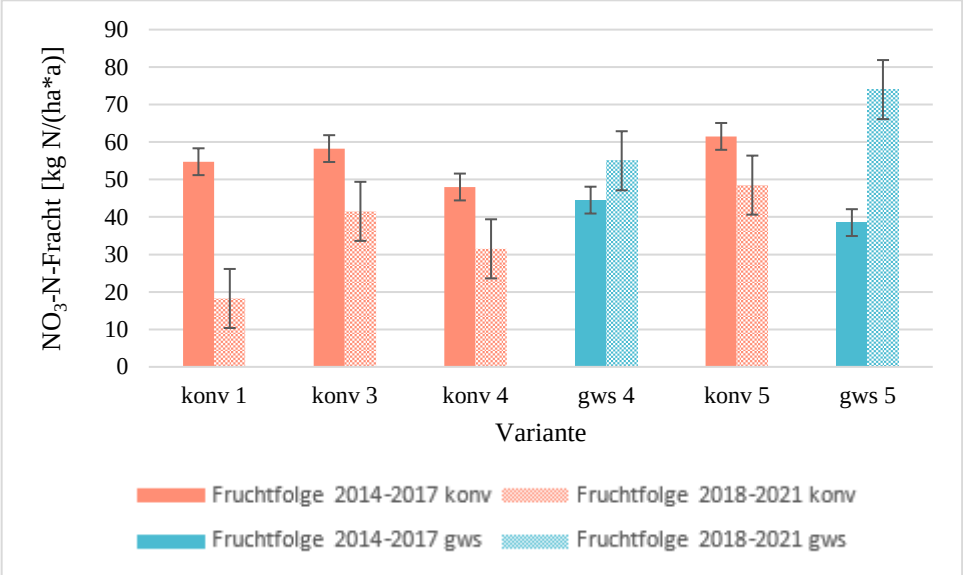

Abbildung 4-6: NO_3-N-Fracht im Mittel über alle Kulturen je Fruchtfolgezyklus von der SWP 2014/2015 bis 2017/2018 und 2018/2019 bis 2021/2022 mit Standardfehlern

4.4 Zusammenhang zwischen NO_3-Konzentration und Herbst-N_{min}

Der Herbst-N_{min} soll die Höhe des verlagerbaren Stickstoffs am Beginn der Auswaschungsperiode abbilden. Daher ist ein Zusammenhang zwischen dem Herbst-N_{min} und der mittleren NO_3-Konzentration im Sickerwasser zu erwarten. Abbildung 4-7 stellt den Zusammenhang zwischen beiden Parametern in allen mit Saugsonden ausgestatteten Varianten für den Zeitraum seit Versuchsbeginn (SWP 2014/2015) bis zur SWP 2021/2022 dar. Die mittlere NO_3-Konzentration bezieht sich hier auf das Winterhalbjahr (01.07. – 30.04.), da dieser Zeitraum besser dem Herbst-N_{min} zugeordnet werden kann, als eine gesamte Sickerwasserperiode (01.07. – 30.06.). Dies liegt daran, dass in einer gesamten SWP auch die Monate Mai und Juni enthalten sind, in denen mit dem Sickerwasser verlagerter Stickstoff vermutlich nicht auf hohe Herbst-N_{min}-Vorräte zurückzuführen ist, sondern auf N-Düngemaßnahmen im Frühjahr oder die N-Freisetzung aus dem Humus infolge sommerlicher Mineralisation.

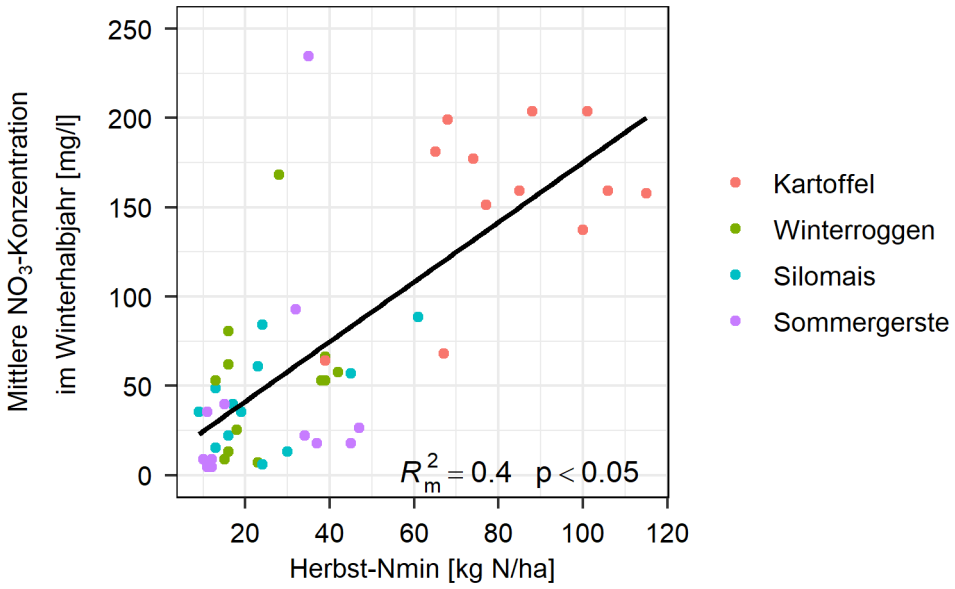

Abbildung 4-7: Zusammenhang zwischen der mittleren NO_3-Konzentration im Winterhalbjahr und dem Herbst-N_{min}. Dargestellt sind alle mit Saugsonden ausgestatteten Varianten über den Zeitraum 2014/2015 – 2021/2022. Die statistischen Kennwerte wurden anhand log-transformierter Daten ermittelt.

Der Zusammenhang zwischen dem Herbst-N_{min}-Vorrat und der mittleren NO_3- Konzentration im Winterhalbjahr ist signifikant positiv ($p < 0.05$) mit einem R^2_m von 0,40. Das marginale Bestimmtheitsmaß R^2_m gibt in linearen gemischten Modellen an, welchen Anteil der fixe Effekt (hier der Herbst-N_{min}-Vorrat) an der Variabilität der abhängigen Variable (hier die NO_3-Konzentration) erklärt (Nakagawa et al., 2017). Mit einem R^2_m von 0,40 bzw. 40 % erklärter Variabilität ist dieser Anteil als groß einzustufen. Am Standort Hamerstorf ist der Herbst-N_{min}-Vorrat daher im Mittel der Jahre geeignet, um die NO_3-Konzentration eines bevorstehenden Winterhalbjahres abzuschätzen. Zu beachten ist jedoch, dass der Zusammenhang zwischen dem Herbst-N_{min}-Vorrat und der mittleren NO_3-Konzentration jährlich stark variieren kann und dass sowohl Jahre mit sehr starkem als auch sehr schwachem Zusammenhang auftreten. Dies hat z. B. witterungsbedingte Gründe. So führen Jahre mit frühem Sickerwasserbeginn und warmem Herbst/Winter tendenziell zu einem schwachen Zusammenhang, während Jahre mit spätem Sickerwasserbeginn und kaltem Herbst/Winter einen stärkeren Zusammenhang erkennen lassen (Bischoff et al. 2022).

Anhand von Abbildung 4-7 kann abgelesen werden, bei welchen Herbst-N_{min}-Vorräten der Grenzwert für Nitrat nach TrinkwV (2020) von 50 mg/l am Standort Hamerstorf mit hoher Wahrscheinlichkeit über- oder unterschritten wird. Bei Herbst-N_{min}-Vorräten von kleiner 15 kg N/ha wurde in nur einem Fall eine Überschreitung des TrinkwV-Grenzwertes beobachtet. Oberhalb von ca. 45 kg N/ha wurde der Grenzwert hingegen immer überschritten. Werte

zwischen etwa 15 und 45 kg N/ha führten je nach Hauptkultur und Witterung (Jahreseffekt) zu einer Über- oder Unterschreitung des TrinkwV-Grenzwertes. Diese Ergebnisse entsprechen in etwa der Einteilung in drei Klassen durch Bischoff et al. (2022) für den Standort Thülsfelde. Entsprechend kann diese Einteilung, leicht angepasst, auch für den Standort Hamerstorf übernommen werden. Hierbei dient Tabelle 4-2 zur Orientierung.

Tabelle 4-2: Wahrscheinlichkeit der Überschreitung einer mittleren NO_3-Konzentration im Sickerwasser von 50 mg/l in Abhängigkeit der Herbst-N_{min}-Vorräte am Standort Hamerstorf.

Herbst-N_{min} (kg N/ha)	**Wahrscheinlichkeit der Überschreitung einer mittleren NO_3-Konzentration von 50 mg/l**
≤ 15	sehr unwahrscheinlich
> 15 – < 45	möglich, je nach Bewirtschaftung und Witterung
≥ 45	sehr wahrscheinlich

4.5 Eignung der Herbst-N_{min}-Methode zur Abschätzung der NO_3-Konzentration

In Kap. 4.4 wurde gezeigt, dass am Standort Hamerstorf ein starker Zusammenhang zwischen dem Herbst-N_{min}-Vorrat und der mittleren NO_3-Konzentration eines Winterhalbjahres besteht. Der Herbst-N_{min}-Vorrat ist am Standort Hamerstorf folglich geeignet, um die NO_3-Konzentration abzuschätzen. Eine Möglichkeit hierfür bietet die Formel (4.1) (verändert nach DWA-M 911 2013):

$$\text{mg } NO_3\text{/l im Sickerwasser} = \frac{\text{Herbst-Nmin (kg N/ha) x Ah (-)}}{\text{Sickerwasserrate SWR (mm/a)}} \cdot 443 \qquad (4.1)$$

N_{min} Nitrat-N + Ammonium-N in kg N/ha für die Tiefe 0 – 90 cm

Ah Austauschhäufigkeit des Bodenwassers, wenn >1 den Wert 1 einsetzen

443 Umrechnungsfaktor von N zu Nitrat (4,43) kombiniert mit dem Faktor 100 zur Einheit-Umrechnung (mm zu Liter Sickerwasser/ha und kg zu mg Nitrat)

SWR jährliche Sickerwasserrate in mm – im Optimalfall einzeljahresbezogen, ansonsten langjähriges Mittel

Die Herbst-N_{min}-Probenahme sowie die folgende Berechnung der potentiellen NO_3-Konzentration mithilfe obiger Formel ist auch als Herbst-N_{min}-Methode bekannt. Diese über

die Herbst-N_{min}-Methode berechneten NO_3-Konzentrationen werden im Folgenden den mittleren NO_3-Konzentrationen eines Winterhalbjahres gegenübergestellt, die anhand der Saugsonden-Methode ermittelt wurden (zur Methodik siehe Kapitel 2.5.9 Nitratkonzentrationen). Hierbei handelt es sich um die mit der Sickerwassermenge gewichteten mittleren NO_3-Konzentrationen. Die mit der Saugsonden-Methode ermittelten NO_3-Konzentrationen werden folgend als tatsächlich gemessene NO_3-Konzentrationen erachtet. Das Verhältnis zwischen den mit der Saugsonden-Methode und der Herbst-N_{min}-Methode berechneten NO_3-Konzentrationen lässt daher Aussagen zu, wie genau sich die NO_3-Konzentration mithilfe der Herbst-N_{min}-Methode abschätzen lässt. Zur Berechnung der NO_3-Konzentration mit der Herbst-N_{min}-Methode wurde eine mittlere langjährige Sickerwasserrate von 263 mm verwendet (siehe Kapitel 2.1). Auf die Verwendung der jahresspezifischen Sickerwasserrate wurde verzichtet, da die Berechnung in der Praxis üblicherweise zur Risikoabschätzung im Herbst einer bevorstehenden Sickerwasserperiode durchgeführt wird und die jahresspezifische Sickerwasserrate zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorliegt.

Bei der Auswertung der Daten zeigte sich, dass das Verhältnis zwischen gemessener und berechneter NO_3-Konzentration zwischen den Varianten nicht signifikant verschieden ist (α = 5 %). In Abbildung 4-8 sind die Werte daher beispielhaft nur für Variante 4 der konventionellen Fruchtfolge dargestellt.

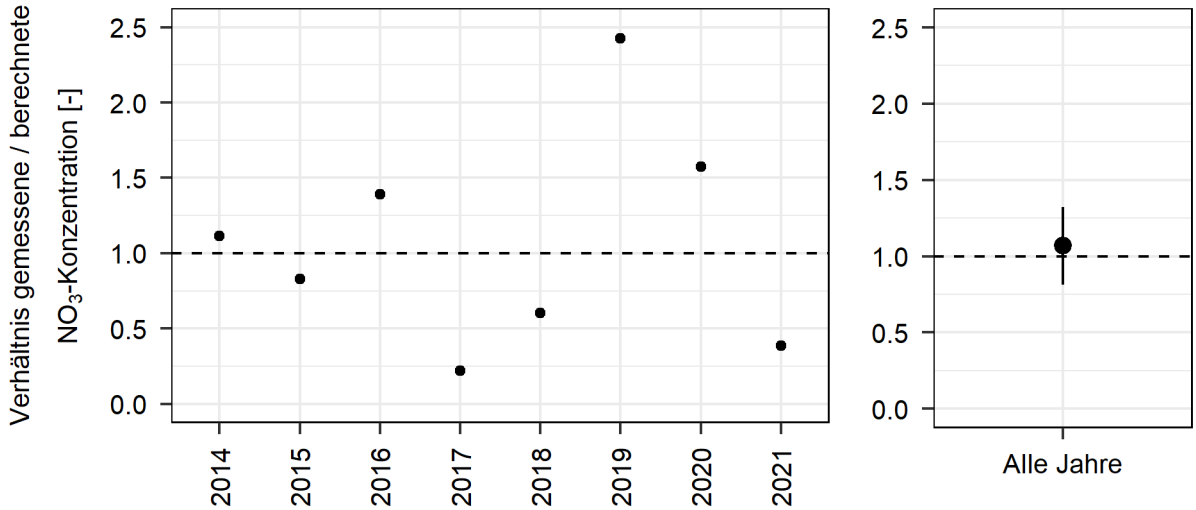

Abbildung 4-8: Verhältnis von mit Saugsonden-Methode gemessener zu mit Herbst-N_{min}-Methode berechneter NO_3-Konzentration für Variante konv4 der konventionellen Fruchtfolge. Die berechnete NO_3-Konzentration wurde mit einer mittleren langjährigen Sickerwasserrate von 263 mm ermittelt.

Das Verhältnis zwischen gemessener und berechneter NO_3-Konzentration schwankte jährlich und erreicht bei Variante konv4 Werte zwischen etwa 0,25 und 2,50. In einigen Jahren stimmten die gemessene und die berechnete NO_3-Konzentration sehr gut überein (2014, 2015), während die gemessene NO_3-Konzentration in anderen Jahren deutlich oberhalb (2019, 2020) oder unterhalb (2017, 2021) der berechneten lag. Als Ursache für diese Schwankungen können insgesamt drei Gründe genannt werden. Erstens, die jährlich variierende Sickerwasserrate. Diese ist zwar in der gemessenen NO_3-Konzentration berücksichtigt, jedoch nicht in der berechneten NO_3-Konzentration, für die eine mittlere langjährige Sickerwasserrate angenommen wurde (s. oben). Wird bei der Berechnung der NO_3-Konzentration mit der Herbst-N_{min}-Methode die jahresspezifische Sickerwasserrate verwendet, können die gemessenen und die berechneten NO_3-Konzentrationen in einigen Jahren besser übereinstimmen. Ein zweiter Grund für die Abweichung zwischen gemessener und mit der Herbst-N_{min}-Methode berechneter NO_3-Konzentration ist die nach der Herbst-N_{min}-Probenahme auftretende N-Freisetzung aus der Humusmineralisation, die zu zusätzlichen N-Austrägen führt und die NO_3-Konzentration erhöht. Bischoff et al. (2022) stellten anhand einer langjährigen Datenreihe aus dem Versuch in Thülsfelde fest, dass die gemessene NO_3-Konzentration insbesondere in Jahren mit warmem Winter und frühem Sickerwasserbeginn größer war als die berechnete NO_3-Konzentration. Die Autoren führten dies auf die hohe N-Mineralisation nach der Herbst-N_{min}-Probenahme zurück. Das Gleiche ist auch für den Standort Hamerstorf zu vermuten. Ein dritter Grund für die Abweichung zwischen der gemessenen und der berechneten NO_3-Konzentration kann eine Ungenauigkeit bei der Ermittlung der gemessenen NO_3-Konzentration anhand der Saugsonden-Methode sein. Noltemeyer et al. (2020) diskutierten z. B., dass präferentielle Flüsse des Bodenwassers mit geringen NO_3-Konzentrationen mit der Saugsonden-Methode nicht oder nur unzureichend erfasst werden. In Kombination mit der Berechnung der Sickerwassermenge über die Bodenwasserbilanzierung kann dies zu einer Überschätzung der gemessenen NO_3-Konzentration führen. Dies macht sich vermutlich besonders in nassen Jahren bemerkbar. Zusammenfassend wird jedoch die N-Mineralisation aus dem Humus als entscheidender Grund dafür erachtet, dass die gemessenen NO_3-Konzentrationen im Mittel größer sind, als die mit der Herbst- N_{min}-Methode berechneten.

Im Mittel der acht Sickerwasserperioden liegt die gemessene NO_3-Konzentration etwa um das 1,1-fache über der berechneten NO_3-Konzentration. Das heißt, dass die NO_3-Konzentration, die mit der Herbst-N_{min}-Methode berechnet wurde, die tatsächliche NO_3-Konzentration geringfügig unterschätzt. Dies liegt vermutlich primär an der N-Freisetzung aus der

Humusmineralisation, die auch nach der Herbst-N_{min}-Probenahme stattfindet und die NO_3-Konzentration erhöht.

5 Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus Kapitel 3 und Kapitel 4 zusammengeführt und diskutiert, um Gesamtaussagen für den Versuchszeitraum 2014 – 2021 einschließlich der Sickerwasserperioden zu treffen. Damit können die in Kapitel 1 formulierten Fragestellungen für den untersuchten Zeitraum beantwortet werden.

F1: Welchen Einfluss hat die N-Düngung und die Fruchtfolgegestaltung auf Ertrag und Qualität der angebauten Kulturen, die N-Dynamik im Boden und den N-Austrag mit dem Sickerwasser?

Der Einfluss der oben genannten Faktoren unterscheidet sich bei Betrachtung der einzelnen Kulturarten. Im Folgenden werden die Effekte für jede einzelne Kulturart gesondert betrachtet. Die grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge zeichnet sich durch eine dauerhafte Begrünung entweder durch Zwischenfrüchte (im Jahr 2018 Ölrettich nach Kartoffel) oder Untersaat (Welsches Weidelgras/Rotschwingel) aus. Zwischenfrüchte und Untersaaten sollen u.a. den Rest-Stickstoff nach Ernte der Hauptkultur aus dem Boden aufnehmen und so vor der Auswaschung schützen. Die Untersaat wurde nach der Ernte des Winterroggens als GPS in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in den Versuchsjahren 2015 und 2019 als Zweitfrucht genutzt. Im Versuchsjahr 2017 fand nur eine Aufwuchsermittlung der Untersaat statt, um einen Vergleich der N-Aufnahme mit dem in der konventionellen Fruchtfolge angebauten Ölrettich durchzuführen.

Kartoffel

Die Gestaltung der Fruchtfolge hatte einen starken Einfluss auf den Ertrag aber nur einen geringen auf den Stärkegehalt. In der konventionellen Fruchtfolge war in der mineralischen N-Düngestaffel eine leichte Abnahme der Stärkegehalte mit steigender N-Düngung zu beobachten. In der Variante 1 ohne N-Düngung waren die Stärkegehalte in beiden Fruchtfolgen am höchsten. In der konventionellen Fruchtfolge wurden im Mittel deutlich höhere Knollenerträge erreicht. Diese resultieren aus den höheren Erträgen im Jahr 2018. Die Erträge lagen im ersten Versuchsjahr in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge noch über denen der konventionellen Fruchtfolge. In beiden Fruchtfolgen wirkt sich eine N-Düngung mit ENTEC positiv auf die Knollenerträge aus. Bedingt durch die höheren Erträge und damit auch

höheren N-Abfuhren vom Feld konnten in der konventionellen Fruchtfolge geringere N-Bilanzen erreicht werden.

Bei der Kartoffel im Versuchsjahr 2018 erfolgte die Pflanzung Ende April. Die Rodung der Kartoffeln erfolgte in den beiden Fruchtfolgen dann zu unterschiedlichen Zeitpunkten. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurde die Kartoffel nach einer Wachstumszeit von 120 Tagen Mitte August geerntet. Hingegen erfolgte die Rodung der Kartoffel in der konventionellen Fruchtfolge erst nach 160 Tagen Ende September. Diese deutlich längere Standzeit könnte ein Grund für die erheblichen Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen sein. Zudem erschwerten die Grassoden der vorherigen Untersaat in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge sowohl die Pflanzung als auch das Anhäufeln der Dämme. Positive Ertragseffekte in der konventionellen Fruchtfolge sind gegebenenfalls auch auf den Anbau eines Ölrettichs nach der Braugerste vor der Kartoffel zurückzuführen. Diese positiven Effekte konnten in Versuchen der LWK NRW beobachtet werden (Berendonk, 2006). Bei einem langjährigen Anbau einer Grasuntersaat kann es zum Auftreten von phytosanitären Problemen (u.a. Drahtwurm) und damit Ertragsminderung kommen. Deswegen waren 2018 beim grundwasserschutzorientierten Anbau der Ertrag und die N-Aufnahme der Kartoffel vermindert.

Die hohen Rest-N_{min}-Gehalte, die nach dem Anbau der Kartoffel in beiden Fruchtfolgen im Herbst gemessen wurden, bestätigen einen hohen N-Überschuss und weisen auf einen starken Mineralisationsschub hin, welcher durch die Durchlüftung des Bodens und das Aufbrechen von Bodenaggregaten bei der Rodung induziert wurde. Über Winter reduzierten sich die N-Gehalte im Boden. Die Analysen des Sickerwassers zeigten, dass hier ein N-Austrag mit dem Sickerwasser stattgefunden hat. Die im Jahr 2018 nach Kartoffel angebaute Zwischenfrucht (Ölrettich) der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge führte zwar zu einer Verringerung der Rest-N_{min}-Gehalte nach der Ernte im Vergleich zur konventionellen Fruchtfolge, allerdings erfolgte dann ein deutlicher Anstieg der N_{min}-Gehalte im Boden im Verlauf des Herbstes. Die höheren N_{min}-Gehalte im Herbst in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge deuten darauf hin, dass die geringe Standzeit des Ölrettichs und die zusätzlichen Bodenbearbeitungsgänge einen negativen Einfluss auf die N-Dynamik im Boden hatten. Zusätzlich kam es durch die Einarbeitung des Ölrettichs zu einem Anstieg der organischen Substanz im Boden und in Verbindung damit auch zu einer Erhöhung der Nährstoffkonzentration.

Der N-Austrag nach Kartoffel war aufgrund des N-Mineralisationsschubes während des Rodungsprozesses nach der Ernte grundsätzlich, auch in der ungedüngten konventionellen Variante, hoch. Dieser rodungsinduzierte Mineralisationsschub überlagerte vermutlich auch den Effekt der N-Düngung auf den N-Austrag. In der SWP 2014/2015 waren die N-Austräge in allen Varianten auf einem ähnlichen Niveau. In der SWP 2018/2019 zeigten die Varianten 1 und 4 der konventionellen Fruchtfolge die geringsten NO_3-N-Frachten im Sickerwasser, während in den Varianten 3 und 5 die N-Austräge im Vergleich bereits etwa doppelt so hoch waren. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge waren die NO_3-N-Frachten gleich hoch (Variante 5) bzw. höher (Variante 4) als in der konventionellen Fruchtfolge, wobei auch hier die hohe Variabilität der gemessenen NO_3-Konzentrationen berücksichtigt werden sollte. Die mittleren NO_3-Konzentrationen lagen in allen Varianten beider Fruchtfolgen, auch bei ausbleibender N-Düngung, oberhalb des Grenzwertes der TrinkwV (2016) von 50 mg NO_3/l. Die ausbleibende Wirkung auf den N-Austrag mit dem Sickerwasser der im Anschluss an die Kartoffel gesäten Zwischenfrucht in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurde insbesondere darauf zurückgeführt, dass die Zwischenfrucht 2018 erst Mitte August ausgesät wurde und anschließend nicht überwinterte, sondern noch im Herbst nach einer Standzeit von nur sieben Wochen fruchtfolgebedingt umgebrochen wurde.

Neumann et al. (2012) zeigten auf einem Sandstandort in Südschweden, dass der N-Austrag nach Kartoffel substanziell reduziert werden kann, wenn eine Frühkartoffel angebaut wird und die Aussaat der Zwischenfrucht bereits Ende Juni oder Juli stattfindet sowie ihr Umbruch erst Ende November/Anfang Dezember. Dann hat die Zwischenfrucht genügend Zeit, um ausreichend Stickstoff vor Beginn der Sickerwasserperiode aufzunehmen. Außerdem wird der aufgenommene Stickstoff aufgrund des späten Umbruchs möglichst lange vor erneuter Freisetzung und damit Auswaschung geschützt. Die Autoren zeigten weiterhin, dass eine Kartoffelernte im August/September mit nachfolgendem Wintergetreide (Triticale) zu hohen N-Austrägen führte, was die hier gezeigten Ergebnisse in der konventionellen Fruchtfolge bestätigen. Auf Grundlage der Ergebnisse von Neumann et al. (2012) lässt sich für die grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge vermuten, dass die Wirkung der Zwischenfrucht besser gewesen wäre, wenn diese nicht erst Mitte August, sondern bereits deutlich früher ausgesät worden wäre und ihr Umbruch deutlich später stattgefunden hätte. Dies wäre allerdings nur unter Verwendung einer früheren Kartoffelsorte möglich gewesen und bei Anbau einer Sommerung als Nachfrucht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der N-Austrag bei Düngung unterhalb des N-Bedarfs nicht reduzierte. Unter Berücksichtigung der oben dargestellten Ergebnisse zu Erträgen und Qualitäten lässt sich ableiten, dass eine reduzierte N-Düngung im konventionellen Kartoffelanbau sinnvoll sein kann, um höhere Qualitäten zu erreichen. Aus Wasserschutzsicht ist die reduzierte N-Düngung zu Kartoffel jedoch nicht unbedingt erforderlich, da der N-Austrag nach Kartoffel aufgrund des N-Mineralisationsschubes bei der Kartoffelrodung i.d.R hoch ist und die N-Düngung nur einen geringen Effekt auf den N-Austrag hat. Der Anbau einer Zwischenfrucht nach Kartoffel zur Minderung des N-Austrags ist möglicherweise nur bei sehr frühen Sorten mit Erntetermin im Juni oder Juli oder dem Nachbau einer Sommerung, die den Anbau einer überwinternden Zwischenfrucht ermöglicht, zielführend. Die Zwischenfrucht kann dann früher ausgesät werden und ermöglicht eine längere Standzeit, so dass sie vermehrt Stickstoff aufnehmen und vor Auswaschung schützen kann.

Winterroggen / Winterroggen GPS

Der Vergleich der beiden Fruchtfolgen hinsichtlich Ertrags- und Qualitätsunterschieden von Winterroggen ist aufgrund der unterschiedlichen Produktionsziele beider Fruchtfolgen (Körnernutzung vs. GPS) nicht möglich.

Beim Anbau von Winterroggen/Winterroggen GPS stiegen die Erträge in beiden Fruchtfolgen mit steigender N-Düngung bis zur höchsten N-Gabe in der mineralischen N-Düngestaffel an. Dabei wurde in der konventionellen Fruchtfolge neben der Variante 1 ohne N-Düngung der niedrigste Ertrag in der Var. 10 mit alleiniger Gärrest-Düngung erzielt. Auch die Variante mit organischer N-Düngung und mineralischer Ergänzung (Var. 9) lieferte geringe Erträge im Vergleich zu den anderen Varianten. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge konnten in Var. 9 höhere Erträge im Vergleich zu der rein mineralisch gedüngten Variante (Var. 4) mit ähnlichem N-Angebot der N-Düngestaffel erzielt werden. Der Rohproteingehalt im Winterroggen in der konventionellen Fruchtfolge nahm mit steigender N-Düngung ab Var. 3 (100 kg N/ha) der N-Düngestaffel zu. Die Rohproteingehalte in der konventionellen Fruchtfolge lagen im Versuchsjahr 2015 deutlich über denen des zweiten Versuchsjahrs mit Winterroggenanbau im Jahr 2019. Grund hierfür könnte der Anbau unterschiedlicher Sorten in den beiden Versuchsjahren gewesen sein. Zusätzlich dazu waren die Aussaatbedingungen für den Winterroggen im Jahr 2018 durch einen sehr trockenen und lockeren Boden suboptimal. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge stiegen die Rohproteingehalte ab Var. 2 konstant an. Der Effekt der ENTEC-Düngung war in dieser Fruchtfolge nicht zu erkennen.

Es zeigte sich, dass in den Versuchsjahren mit Winterroggenanbau als GPS mit Untersaat die N_{min}-Gehalte in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge über Winter deutlich unter denen der konventionellen Fruchtfolge lagen. Hier ist eine Aufnahme des im Boden verfügbaren N durch die Untersaat wahrscheinlich.

Die N-Austräge der grundwasserschutzorientierten Varianten waren in der SWP 2015/2016 nach Winterroggen deutlich niedriger als die N-Austräge der konventionellen Varianten. Ebenso wurde der Grenzwert der TrinkwV (2016) in den grundwasserschutzorientierten Varianten deutlich unterschritten, während die NO_3-Konzentrationen in den konventionellen Varianten etwa auf Höhe des Grenzwertes nach TrinkwV lagen. Trotz der zusätzlichen Düngung von 195 kg mineralischem Stickstoff, davon 120 kg N/ha im Sommer 2015, hat die Grasuntersaat den gedüngten und im Boden freigesetzten Stickstoff offensichtlich fast vollständig aufgenommen. In der SWP 2019/2020 waren die N-Austräge der grundwasserschutzorientierten Varianten sehr variabel. Während gws4 einen Austrag von 6 kg NO_3-N/ha aufwies, war dieser bei gws5 mit 150 kg NO_3-N/ha um ein Vielfaches höher. Der Unterschied im N-Austrag zwischen Variante 4 und 5 ist jedoch vermutlich nicht direkt auf die unterschiedliche N-Düngehöhe zum Winterroggen zurückzuführen. Es erscheint auch im Vergleich mit der SWP 2015/2016 plausibler, dass sich aufgrund des hohen Begrünungsanteils in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge und dem damit verbundenen Eintrag an organischem Material, Humus sowie rasch zersetzbare organische Substanz aufgebaut hat und damit ein hohes N-Mineralisationspotential entstanden ist. Dieses ist schwer kalkulierbar und räumlich sehr variabel (u.a. ungleichmäßige Verteilung der Grassoden) und konnte mit der im Versuch eingebauten Anzahl an Saugsonden nicht ausreichend erfasst werden. Die großen Unterschiede zwischen den Varianten gws4 und gws5 werden daher vielmehr auf die fruchtfolgebedingt während der Versuchslaufzeit entstandene räumliche Variabilität zurückgeführt als auf den reinen Effekt der N-Düngung. Das räumlich sehr variable und hohe N-Mineralisationspotential kann letztlich in Kombination mit einer überhöhten N-Düngung zu den hohen gemessenen N-Austrägen geführt haben.

Wird mit dem Winterroggen eine Untersaat angebaut, ist im Bereich der bedarfsgerechten N-Düngung nicht mit erhöhten N-Austrägen zu rechnen. Eine reduzierte N-Düngung ist daher für einen GPS-genutzten Winterroggen mit anschließender Untersaat aus Sicht des Wasserschutzes nicht notwendig und mit Blick auf das Erreichen hoher Erträge und Qualitäten auch nicht sinnvoll. Eine Überdüngung sollte jedoch vermieden werden, da diese in Kombination mit dem hohen Begrünungsanteil der Fruchtfolge und dem damit verbundenen schwer kalkulierbaren

N- Mineralisationspotential zu hohen N-Austrägen führen kann. Da die N-Austräge bei Körnernutzung des Winterroggens im Bereich der bedarfsgerechten N-Düngung ebenfalls auf niedrigem bis moderatem Niveau liegen, ist aus Wasserschutzsicht auf einem Standort wie Hamerstorf weder eine reduzierte N-Düngung noch der Anbau einer Untersaat unbedingt notwendig.

Der Anbau der **Untersaaten** wirkte sich positiv auch auf die N-Bilanzsalden der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge in den Versuchsjahre 2015 und 2019 aus. Auswirkungen auf die N-Bilanzsalden konnten für die weiteren Versuchsjahre mit Untersaaten nicht ermittelt werden, da keine Ernte erfolgte.

Silomais

Für den Silomais erfolgte eine Gegenüberstellung der Ertrags- und Qualitätsparameter in der konventionellen und grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge nur für das Versuchsjahr 2016. Die Erträge lagen in der konventionellen Fruchtfolge in der N-Düngestaffel mit Ausnahme der Var. 5 über denen der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge. Auch bei der N-Düngung mit einem stabilisierten N-Dünger konnten in der konventionellen Fruchtfolge höhere Erträge erzielt werden. Die Untersaat der grundwasserschutzorientieren Fruchtfolge könnte zu einem geringeren Silomaisertrag geführt haben. Auch in anderen Versuchen mit Untersaaten im Silomaisanbau wurde festgestellt, dass diese einen negativen Effekt auf den Ertrag haben kann (Aufhammer & Kühler, 1997). Eine rein organische N-Düngung mit Gärresten zeigte in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge eine bessere Wirkung als in der konventionellen Fruchtfolge. Anhand der N-Abfuhr und der N-Bilanzsalden wird neben der Wirkung der N-Düngung auch der Effekt der Untersaat deutlich. Es zeigt sich, dass in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge die N-Abfuhren etwas geringer sind als in der konventionellen Fruchtfolge und demzufolge die N-Bilanzsalden etwas höher. Weiterhin bestätigte sich, dass der Silomais den Stickstoff aus dem Boden und der Düngung gut verwerten konnte und auf unterschiedliche N-Düngungshöhen mit nur geringen Ertragsschwankungen reagierte. Die Erträge und Qualitäten im Versuchsjahr 2020 lagen in der konventionellen Fruchtfolge unter denen von 2016. Wie auch beim Winterroggen ist eine mögliche Erklärung die Verwendung unterschiedlicher Sorten in den Jahren. In den hochgedüngten Varianten 5 und 6 wurde zusätzlich eine deutlich geringere N-Düngeeffizienz ermittelt. Zu beachten ist die Beregnung im Versuch, die zu abgesicherten hohen Entzügen führte. Ohne Beregnung würden sich in Jahren mit geringen Sommerniederschlägen deutlich niedrigere N-Entzüge einstellen.

Im Silomaisanbau zeigte sich am Standort Hamerstorf, dass eine Untersaat zu niedrigeren N_{min}-Gehalten im Boden führen kann, wobei nur einjährige Ergebnisse betrachtet wurden. Grasuntersaaten können im Maisanbau dazu beitragen, nach der Ernte im Boden verbliebene Reststickstoffgehalte während der Sickerwasserperiode vor Auswaschung zu schützen. Auch nach der Maisernte nimmt die Untersaat weiter Stickstoff auf und trägt so dazu bei, Nitrateinträge in das Grundwasser zu verringern (LWK Niedersachsen, 2016).
Andere Versuchsergebnisse zeigen aber auch, dass aufgrund der zusätzlichen N-Aufnahme der Untersaat insgesamt ein höherer N-Düngungsaufwand nötig ist (Büchter, et al., 2003). Dies zeigt sich im Versuchsjahr 2016. Trotz einheitlicher N-Düngung wurden in der Variante 4 (150 kg N/ha) der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge geringere Erträge erzielt als in der konventionellen Fruchtfolge. Auch im Feld zeigten sich diese Unterschiede schon während der Vegetation. Diese Beobachtungen weisen möglicherweise darauf hin, dass neben einer Konkurrenz um Nährstoffe auch eine Konkurrenz um Wasser von Silomais und Rotschwingel (Untersaat) herrschte. Im Versuchsjahr 2016 kam es durch einen trockeneren Boden in den Varianten der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zu Verzögerungen im Aufwuchs, die sich auch im Laufe der Vegetationsperiode nicht egalisieren ließen. Der geringere Bodenwassergehalt im Vergleich zur konventionellen Fruchtfolge könnte auf den erhöhten Wasserbedarf durch die vorherige Untersaat nach dem Winterroggen zurückzuführen sein. Zudem entwickelte sich die Untersaat im Silomais sehr gut, sodass es möglicherweise zu einer Konkurrenz um Nährstoffe kam.

Der N-Austrag war sowohl in der SWP 2016/2017 als auch 2020/2021 in den vergleichbaren Varianten der konventionellen Fruchtfolge größer als in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge. Das heißt, dass die Untersaat nach Mais den N-Austrag reduzierte. Während in der SWP 2016/2017 in der konventionellen Fruchtfolge nur die überdüngte Variante 5 höhere N-Austräge als die übrigen Varianten aufwies, war in der SWP 2020/2021 eine Zunahme der N-Austräge mit steigender N-Düngung erkennbar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Untersaat im Silomais am Standort Hamerstorf eine effektive Maßnahme zur Senkung der NO_3-Konzentration im Sickerwasser sein kann. Eine Kombination der Untersaat mit einer reduzierten N-Düngung zu Mais erscheint jedoch nicht sinnvoll, da die NO_3-Konzentration bereits bei bedarfsgerechter N-Düngung durch die Untersaat deutlich gesenkt werden kann und eine reduzierte N-Düngung in Kombination mit einer Untersaat deutliche Ertrags- und Qualitätseinbußen zur Folge haben kann. Dies liegt vermutlich daran, dass die Untersaat bei reduzierter N-Düngung in Konkurrenz mit dem Mais

um den Stickstoff steht. Wird Silomais konventionell ohne Untersaat angebaut, ergibt sich ein anderes Bild. Hier erscheint eine Düngung unterhalb des N-Bedarfs nach DüV (2020) zur Reduzierung der N-Austräge sinnvoll. Allerdings ist am Standort Hamerstorf mit Ertrags- und Qualitätseinbußen zu rechnen, sodass der Anbau einer Untersaat an diesem Standort einer reduzierten N-Düngung vorzuziehen ist. Aus dem Vergleich mit Variante 8 lässt sich ableiten, dass diese Ertrags- und Qualitätseinbußen vermieden werden können, wenn die reduzierte N-Düngung in zwei Gaben erfolgt. Daher erscheint am Standort Hamerstorf sowohl aus ökonomischer als auch aus Wasserschutzsicht im Silomaisanbau entweder eine reduzierte N-Düngung in zwei Gaben sinnvoll oder bei bedarfsgerechter N-Düngung der Anbau einer Untersaat (*vgl. F4: Wie wirkt eine reduzierte N-Düngung (Variante 8) auf Ertrag, Qualität und Nmin-Werte in den unterschiedlichen Fruchtfolgen?*).

Braugerste

Nur beim Anbau von Braugerste waren die Erträge in beiden Fruchtfolgen gleich bzw. unterschieden sich nur im geringen Maße. Auch auf die Rohproteingehalte hatte die Gestaltung der Fruchtfolge keinen großen Einfluss. Bei der Variante mit organischer und organisch-mineralischer N-Düngung wurden in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge höhere Erträge erzielt. Nach der Hauptfrucht wurde in der konventionellen Fruchtfolge eine Zwischenfrucht (Ölrettich) angebaut und in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge blieb die Untersaat (Rotschwingel) stehen. Durch eine Analyse des Aufwuchses (erfolgte nur im Versuchsjahr 2017) konnte die N-Aufnahme der jeweiligen Kultur abgeleitet werden. Der Anbau einer Untersaat nach Braugerste (grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge) führte am Standort Hamerstorf zu einer höheren N-Aufnahme im Vergleich zum Anbau von Ölrettich in der konventionellen Fruchtfolge. Es ist aber zu beachten, dass nur der oberirdische Aufwuchs beprobt wurde und keine Beprobung der Wurzel-Biomasse erfolgte.

Im Gegensatz zum Spross speichern die Wurzeln allerdings nur geringe Mengen an N. Der Ölrettich nutzt jedoch die vorhandenen Bioporen sehr effektiv zur Durchwurzelung des Bodens, um in tiefere Bodenschichten vorzudringen und so zügig das nach unten verlagerte Nitrat aufzunehmen (Kemper, et al., 2024).

In anderen Feldversuchen konnte beobachtet werden, dass durch das Abfrieren einer nicht winterharten Zwischenfrucht die Gefahr der N-Nachmineralisation und dadurch einer verstärkten Auswaschung von Nitrat besteht (Böldt, et al., 2021). Beim Vergleich von winterharten Zwischenfrüchten und Untersaaten sind die Wirkungen gleichzusetzen, wobei

sich gerade in Gebieten mit Sommertrockenheit der Anbau einer Untersaat bewährt hat, da teilweise die Bodenfeuchtigkeit für den Aufwuchs einer Zwischenfrucht nach der Ernte zu gering war (LfL, 2024). Diese Ergebnisse konnten im Versuch am Standort Hamerstorf nicht bestätigt werden.

Sowohl in der SWP 2017/2018 als auch 2021/2022 waren die NO_3-N-Frachten in der konventionellen Fruchtfolge deutlich geringer als in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge. Auffällig war der starke Anstieg der NO_3-Konzentration und der N-Austräge 2021/2022 unter gws4. Möglicherweise kam es, bedingt durch den hohen Begrünungsanteil in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge, zu einer Anreicherung von Stickstoff im Humus, welcher möglicherweise nach der Ernte der Braugerste wieder freigesetzt und ausgewaschen wurde. Es zeigte sich allerdings eindeutig der positive Effekt auf eine Reduzierung der N-Austräge durch den Anbau einer Zwischenfrucht in der konventionellen Fruchtfolge. Der Anbau einer Zwischenfrucht war demzufolge dem Anbau einer Grasuntersaat hinsichtlich der Reduzierung der Nitratausträge am Standort Hamerstorf deutlich überlegen.

Da die N-Austräge mit dem Sickerwasser nach Braugerste keinen Zusammenhang mit der Höhe der N-Düngung zeigten und die Nitratkonzentration selbst in der überdüngten Variante 5 der konventionellen Fruchtfolge deutlich unterhalb des TrinkwV-Grenzwertes von 50 mg NO_3/l lag, erscheint eine reduzierte N-Düngung zu Braugerste aus Wasserschutzsicht am Standort Hamerstorf nicht erforderlich. Bei gemeinsamer Betrachtung von Produktivität und Wasserschutz erwies sich daher der Anbau einer Braugerste mit bedarfsgerechter N-Düngung und nachfolgender Zwischenfrucht als sinnvollste Anbaualternative.

Gesamter Versuchszeitraum

Gegenüber der geringeren Produktivität in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge steht die höhere N-Düngeeffizienz im Vergleich zur konventionellen Fruchtfolge. Dabei bezieht sich die N-Düngeeffizienz auf den Anteil des N-Düngers an der N-Abfuhr unter Berücksichtigung der N-Abfuhr der ungedüngten Variante (vgl. Formel (2-7)). Diese ist vor allem in den organisch gedüngten Varianten 9 und 10 deutlich höher. Die N-Düngeeffizienzen werden von vielen Faktoren wie z.B. der organischen Substanz im Boden und atmosphärischer Deposition beeinflusst (Congreves, et al., 2021). Daher könnte in diesem Fall auch die Erhöhung der organischen Substanz im Boden durch die Untersaaten und Zwischenfrüchte einen positiven Effekt auf die N-Düngeeffizienzen in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge gehabt haben.

Gründe für die Rückgänge in der Produktivität der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge über die acht Versuchsjahre könnten zum einen die dauerhafte Begrünung sein, die zu einem Drahtwurmbefall der Kartoffel und des Silomaises führten und zum anderen die Grassoden der Untersaat, die eine Pflanzung und Rodung der Kartoffeln erschwerten. Auch die Konkurrenz der Untersaaten um Nährstoffe und Wasser, vor allem in der frühen Jugendentwicklung der Kulturpflanzen führte möglicherweise zu den niedrigeren Erträgen.

Über den gesamten Versuchszeitraum erhielten die Varianten der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge 320 kg N/ha mehr über die Düngung als die Varianten der konventionellen Fruchtfolge. Da sich dies nicht in gleichermaßen höheren N-Abfuhren über die Beerntung der Untersaaten ausglich, waren die N-Bilanzsalden in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge etwas höher als in der konventionellen Fruchtfolge. In Variante 4 fand sich dieser überschüssige Stickstoff nur zum Teil im Sickerwasser wider, während der restliche Teil vermutlich während der Versuchslaufzeit im Zuge des Humusaufbaus festgelegt wurde.

Weder die NO_3-Konzentrationen im Sickerwasser noch die N-Frachten konnten über den gesamten Versuchszeitraum durch die grundwasserschutzorientierte Bewirtschaftung gesenkt werden. Im Gegenteil, kam es insbesondere während des zweiten Fruchtfolgezyklus zu einem starken Anstieg der NO_3-Konzentrationen und N-Frachten. Dies wird auf die dauerhafte Begrünung und den damit verbundenen hohen Eintrag an organischer Substanz zurückgeführt. Die organische Substanz erhöhte während der Versuchslaufzeit das N-Mineralisationspotential und infolgedessen vermutlich die N-Auswaschung. Die grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge kann daher bei bedarfsgerechter N-Düngung am Standort Hamerstorf aus Wasserschutzsicht nicht empfohlen werden. Lediglich Einzelmaßnahmen, wie z. B. der Anbau einer Untersaat nach Silomais, können sinnvoll sein.

F2: Wie wirkt sich die Fruchtfolgegestaltung auf die wirtschaftlichen N-Düngungsoptima aus?

Die Varianten 1 bis 6 der festen N-Düngestaffel ermöglichen es die optimale N-Düngung und den dazugehörigen optimalen Ertrag für den jeweiligen Standort zu ermitteln.

Bei der **Kartoffel** konnte nur das Versuchsjahr 2018 zur Auswertung herangezogen werden. In der konventionellen Fruchtfolge lag der ermittelte N-Düngebedarf nach DüV mit 37 kg N/ha deutlich unter der ermittelten optimalen N-Düngung. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge war dies ebenfalls zu beobachten. Die optimale N-Düngung hätte in dem Versuchsjahr 15 kg N/ha über dem N-Düngebedarf gelegen. Die ermittelten N-Optima für den

Winterroggen (GPS) lagen in beiden Fruchtfolgen über den N-Düngebedarfen nach DÜV. Die Unterschiede lagen hier bei bis zu 29 kg N/ha (konv) und 13 kg N/ha (gws). Im **Silomais** lagen die ermittelten N-Optima im Versuchsjahr 2016 sehr deutlich über dem nach DüV berechneten N-Düngebedarf. Die Abweichungen betrugen zwischen 34 kg N/ha (konv) und 43 kg N/ha (gws). Im Versuchsjahr 2020 lag die optimale N-Düngung in der konventionellen Fruchtfolge hingegen 24 kg N/ha unterhalb des nach DüV berechneten N-Düngebedarfs. Bei der **Braugerste** lag der ermittelte N-Düngebedarf über die zwei Versuchsjahren in beiden Fruchtfolgen etwas über (1-7 kg N/ha) dem ermittelten N-Düngungsoptimum.

Bei Betrachtung der beiden Fruchtfolgezyklen und der errechneten N-Optima für den Standort Hamerstorf lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die Fruchtfolgegestaltung sowie Verwertungsrichtung der Kulturart einen Einfluss auf die kulturartenspezifischen N-Optima hatten. Unter geringerem Faktoreinsatz in der konventionellen Fruchtfolge konnte trotzdem ein höheres Ertragsoptimum erzielt werden als in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge. Gründe hierfür können die unterschiedlichen Verwertungsrichtungen des Winterroggens und der Kartoffel sein. Im Versuchsjahr 2018 wurden unterschiedliche Kartoffelsorten mit verschiedenen Reifegruppen angebaut, beim Winterroggen unterscheidet sich die Nutzungsrichtung (Drusch vs. GPS) sodass eine Vergleichbarkeit der N-Optima nur bedingt möglich ist. Beim Vergleich der N-Optima der beiden Fruchtfolgen für Silomais und Braugerste konnten keine erheblichen Unterschiede festgestellt werden.

F3: Wie beeinflusst ein stabilisierter N-Dünger (ENTEC) (Variante 7) Ertrag, Qualität und N_{min}-Werte im Vergleich zu einem konventionellen Stickstoffdünger in den unterschiedlichen Fruchtfolgen?

In Hamerstorf zeigten sich Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen und den Effekten der N-Düngung mit ENTEC. Dabei wird die Variante mit ENTEC verglichen mit der Variante 4 der mineralischen N-Staffel. Dabei ist zu beachten, dass im Mittel der Versuchsjahre in beiden Fruchtfolgen die N-Düngung in der Variante 7 etwas über der N-Düngung der Variante 4 lag. Es zeigte sich, dass die Wirkung von ENTEC sehr jahresspezifisch ist. Positive Auswirkungen von 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP), dem Wirkstoff von ENTEC, waren in anderen Studien besonders ausgeprägt auf Standorten mit hohen Niederschlagsmengen oder intensiver Bewässerung und/oder leichten Sandböden (Pasda, et al., 2001). Im Mittel aller Versuchsjahre zeigt sich kein Ertragsvorteil der N-Düngung mit stabilisiertem N-Dünger gegenüber einer N-

Düngung mit nicht stabilisiertem N-Dünger. Im Versuchsjahr 2016 zeigte sich bei der N-Düngung zu Silomais ein Ertragsvorteil in beiden Fruchtfolgen. Zur Kartoffel zeigten sich 2014 in beiden Fruchtfolgen Ertragsunterschiede, im zweiten Anbaujahr 2018 nur noch in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge. Außerdem ließen sich leicht geringere Stärkegehalte in der ENTEC Variante in beiden Fruchtfolgen beobachten. Bei der Betrachtung des Rohproteingehalts in Braugerste zeigt sich ein höherer Gehalt in der mit ENTEC gedüngten Variante. Dieser Effekt war sowohl in der konventionellen als auch in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zu beobachten. Im Mittel über alle Kulturen (ohne Kartoffel) ist dieser Effekt nicht mehr zu erkennen. Durchschnittlich lagen die Ertragsunterschiede bei Kartoffel in der konventionellen Fruchtfolge bei 3 % und in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge bei 7 %. Im Vergleich zur guten Wirkung des stabilisierten N-Düngers in der Kartoffel konnte diese in der Braugerste nicht festgestellt werden. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus einer Studie bei der kein signifikanter Einfluss von DMPP auf den Ertrag von Sommergerste und Silomais festgestellt wurde (A. Weiske, 2001). Eine Erklärung dafür könnte sein, dass die Kartoffel Ammonium-Stickstoff bevorzugt (Amberger, 1997). Im stabilisierten N-Dünger ENTEC liegt knapp ¾ des Stickstoffs als Ammonium-N vor, welches durch den Wirkstoff DMPP stabilisiert wird und so zur Hemmung des bakteriellen Nitrifikationsprozesses im Boden beiträgt. In den anderen Versuchsjahren konnten keine deutlichen Unterschiede ermittelt werden. Die ermittelte N-Düngeeffizienz liegt im Vergleich zur Variante 4 in beiden Fruchtfolgen um 13 % höher.

Im Vergleich der Varianten 4 und 7 zeigte sich nur marginale Einflüsse der N-Düngung mit ENTEC auf die N_{min}-Gehalte im Boden nach der Ernte, im Herbst zum Beginn der Sickerwasserperiode und im Frühjahr. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge liegen die Werte nach der Ernte und im Herbst etwas höher als in der konventionellen Variante.

Im Vergleich zum herkömmlichen N-Dünger lassen sich am Versuchsstandort Hamerstorf somit größtenteils keine positiven Ertragseffekte und Effekte auf die N_{min}-Gehalte im Boden erkennen. In anderen Feldversuchen hingegen konnten positive Effekte einer Verwendung von stabilisierten N-Düngern auf die Nitrat-Konzentration im Boden nachgewiesen werden (A. Weiske, 2001). Beim Einsatz von Nitrifikationshemmstoffen besteht die Gefahr, dass sie aufgrund ihrer Molekülstruktur eine hohe Stabilität und damit verbunden eine hohe Mobilität im Wasserkreislauf aufweisen. Dies kann zu einer potentiellen Belastung des Trinkwassers führen. Einige Nitrifikationshemmstoffe konnten bereits in Oberflächengewässern nachgewiesen werden. Belastungsschwerpunkte waren hierbei Regionen mit hoher

landwirtschaftlicher Aktivität. DMPP lag jedoch bei diesen Messungen immer unterhalb der Belastungsgrenze von 0,25 µg/l und konnte nicht nachgewiesen werden (NLKWN, 2019).

F4: Wie wirkt eine reduzierte N-Düngung (Variante 8) auf Ertrag, Qualität und N_{min}-Werte in den unterschiedlichen Fruchtfolgen?

Die applizierte N-Düngermenge wird in Variante 8, anders als bei der N-Düngestaffel, vom N-Düngebedarf der jeweiligen Kultur unter Einbeziehung der Zu- und Abschläge nach DüV (z.B. N_{min}), abgeleitet.

Neben den Auswirkungen auf Ertrag und Qualitäten ist der Einfluss einer Reduktion des N-Düngereinsatzes auf die Reststickstoffgehalte im Boden nach der Ernte und im Herbst zu Beginn der Sickerwasserperiode für den Wasserschutz von großer Bedeutung.

Als Vergleichsvariante wird ebenfalls die Variante 4 herangezogen. Die anrechenbare N-Düngung über die zwei Fruchtfolgezyklen von 144 kg N/ha entspricht in etwa dem für den Versuchsstandort ermittelten mittleren N-Düngebedarf von 150 kg N/ha. In Variante 8 wurde zu den Kulturen im Mittel der Versuchsjahre 109 kg N/ha gedüngt. Diese N-Düngung liegt unterhalb des für den Standort ermittelten N-Düngebedarf – 20 %. Bei voller Ausschöpfung hätte im Mittel der Versuchsjahre 120 kg N/ha gedüngt werden können. Somit wurde der N-Düngebedarf in Variante 8 im Mittel um 27 % reduziert.

Im Mittel der Versuchsjahre ergab sich bei Vergleich der Variante 4 und 8 kein Einfluss der reduzierten N-Düngung auf die Erträge. Auch auf die Qualität der Produkte hatte die reduzierte N-Düngung keinen Einfluss. Bei der alleinigen Betrachtung der Braugerste im Mittel der Anbaujahre 2017 und 2021 zeigten sich sogar höhere Rohproteingehalte in der Variante mit einer reduzierten N-Düngung in beiden Fruchtfolgen. Daraus resultiert, dass sowohl die Brutto-N-Bilanzen als auch die Netto-N-Bilanzen der Variante 8 mit reduzierter N-Düngung besser sind als die der Variante 4.

Bei Betrachtung der N_{min}-Werte nach der Ernte, im Herbst und im Frühjahr konnten keine Unterschiede zwischen den beiden Varianten beobachtet werden, sodass für den Versuchsstandort Hamerstorf die Aussage getroffen werden kann, dass in den dargestellten zwei Fruchtfolgezyklen eine reduzierte N-Düngung in Var. 8 sowohl auf Ertrag und Qualitäten der Ernteprodukte als auch auf die N_{min}-Werte im Boden keinen Einfluss hat. Wird jedoch der Vergleich zwischen der Var. 8 und der Var. 3 der N-Düngestaffel angestellt, deren N-Angebot etwa auf der gleichen Höhe wie das der Var. 8 liegt, ergeben sich deutliche Unterschiede. In der Var. 3 hat die reduzierte N-Düngung in allen Kulturen einen deutlichen Effekt auf Ertrag

und Qualität der Ernteprodukte. Eine Erklärung dafür könnte die N-Düngungsstrategie sein: in der Var. 3 erfolgt die gesamte N-Düngung zu Vegetationsbeginn, wohingegen in Var. 8 eine Gabenteilung erfolgt und die Kulturen während der Vegetationsperiode eine weitere N-Gabe erhalten. Somit lässt sich am Standort Hamerstorf über die Verteilung des N-Düngers in mehreren Gaben zu physiologisch sinnvollen Terminen die N-Effizienz deutlich steigern und eine reduzierte N-Düngung ist auch ohne Rückgänge in Ertrag und Qualität möglich.

Andere Versuche, die im Rahmen der landesweiten Aufgaben im Trinkwasserschutz durchgeführt werden, zeigen, dass eine Reduzierung der N-Düngung zu Silomais auf Standorten mit einem hohen Nachlieferungspotential (langjährig organisch gedüngt) ebenfalls ohne hohe Ertragseinbußen möglich ist (Noltemeyer et al., 2021).

F5: Wie hoch sind die N-Mineraldüngeräquivalente des organischen Düngemittels und ist ein Einfluss der Fruchtfolge erkennbar?

Anhand der N-MDÄ kann die kurzfristige N-Wirkung der organischen N-Dünger im Vergleich zum mineralischen N-Dünger verglichen werden. Im Versuch am Standort Hamerstorf wird ein Gärrest aus einer Biogasanlage verwendet, die als Inputstoffe sowohl nachwachsende Rohstoffe als auch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft verwendet.

Die für den Versuchsstandort Hamerstorf ermittelten N-MDÄ weisen große Schwankungen zwischen den Kulturarten und Fruchtfolgen auf.

In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge wurden mit Ausnahme des Versuchsjahrs 2021 (Braugerste) höhere N-MDÄ erreicht als in der konventionellen Fruchtfolge. Bei der Kartoffel ist jedoch auch ein Sortenunterschied denkbar, wohingegen die Winterroggensorte in beiden Fruchtfolgen gleich war und die Fruchtfolgen sich hier nur in Standzeit und Nutzungsart unterschieden.

Die höheren N-MDÄ in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge könnten eine Folge eines höheren Gehaltes an organischer Substanz im Boden sein, die sich vermutlich durch die dauerhafte Begrünung über die Jahre aufbaute und zu einer größeren und aktiveren mikrobiellen Bodengemeinschaft führte. Dadurch kann es zu einer Erhöhung des verfügbaren N-Potentials der organischen Dünger gekommen sein. Zusätzlich es möglich, dass der bestehende N-Vorrat im Boden den Effekt der organischen Düngung überlagert. In der Literatur gibt es Hinweise darauf, dass nach mehrjähriger Anwendung von organischen Düngemitteln die N-MDÄ ansteigen (Gutser, et al., 2005). Dies bestätigt sich bei Betrachtung der zwei Fruchtfolgezyklen

in Hamerstorf so nicht. Die N-MDÄ unterliegen jährlichen Schwankungen, die wahrscheinlich in Zusammenhang mit der Witterung stehen.

Die Wirkung organischer Nährstoffträger ist stark abhängig von verschiedenen Faktoren, wie Ausbringtechnik und Witterung, die sich auf die N-Mineralisation und N-Verluste auswirken. So können z.B. geringere Temperaturen aber auch Trockenheit zu einer reduzierten N-Nachlieferung aus organischen Düngemitteln führen (Albert & Schliephake, 2015). Die verschiedenen Einflussfaktoren beeinflussen auch die N-Effizienz der Gärrestdüngung und machen sie insgesamt sehr variabel. Literaturergebnisse zeigen für Gärreste N-MDÄ in einem Bereich von 34-69 % auf (Hoffmann, 2018) (Gutser, et al., 2005).

Laut Düngeverordnung muss die N-Menge des Gärrestes mit 60 % angerechnet werden (DüV, 2017). Diese Anrechenbarkeiten bestätigten sich am Versuchsstandort bei einjähriger Betrachtung der einzelnen Kulturarten nicht. Mit einem mittleren N-MDÄ von 59 % lag diese in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge etwa auf dem Niveau der Mindestwirksamkeit nach DüV. Die N-MDÄ in der konventionellen Fruchtfolge hingegen lagen mit im Mittel 33 % deutlich darunter. Die Ergebnisse zu den N-MDÄ decken sich mit denen aus der Auswertung zu den Getreideeinheiten, die ebenfalls zeigten, dass die ausschließlich organisch gedüngte Variante 10 in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge eine höhere Produktivität aufweist als in der konventionellen Fruchtfolge. Ergänzend dazu lag auch die ermittelte N-Düngeeffizienz in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge über der der konventionellen Fruchtfolge.

6 Schlussfolgerung

Im Mittel der Versuchsjahre 2014 bis 2021 war die Produktivität der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge geringer als die der konventionellen Fruchtfolge, ohne dass es zu einer Senkung der mittleren N-Austräge kam. Ursächlich hierfür war insbesondere die intensive Begrünung in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge, die zu Problemen bei der Bewirtschaftung führte. Dies zeigte sich insbesondere im zweiten Fruchtfolgezyklus an den deutlich reduzierten Erträgen der Kartoffel und an den Ertragsausfällen durch Drahtwurmbefall im Silomais. Daher kann das im Versuch umgesetzte Anbausystem der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge für die Praxis nicht empfohlen werden. Allerdings erwiesen sich einzelne Maßnahmen, die im Versuch getestet wurden, als sinnvoll, um die N-Austräge zu reduzieren, ohne zu beträchtlichen Ertrags- und Qualitätseinbußen der landwirtschaftlichen Erzeugnisse zu führen. Dies umfasst die auf zwei Gaben aufgeteilte reduzierte N-Düngung im konventionellen Silomaisanbau oder bei bedarfsgerechter N-Düngung den Anbau einer Untersaat zu Silomais. Ob langfristig eine Reduktion der N-Düngung auch bei Silomaisanbau mit Untersaat notwendig ist, müssen langjährige (> 10 Jahre) Versuchsergebnisse zeigen. Nach Winterroggen liegen die N-Austräge eher auf niedrigem bis moderatem Niveau, so dass eine Untersaat oder eine reduzierte N-Düngung zur Senkung der N-Austräge nicht notwendig ist. Empfehlenswert ist jedoch auch nach Winterroggen (Körnernutzung) der Anbau einer Zwischenfrucht, insofern eine Sommerung im Folgejahr geplant ist, wie Ergebnisse weiterer Feldversuche zum Wasserschutz und Düngerecht, wie z. B. in Thülsfelde oder Wehnen, zeigen. Ob der Winterroggen als GPS genutzt und anschließend eine Untersaat mit dem Ziel der Beerntung angebaut werden soll, sollte sich nach betrieblichen Gesichtspunkten richten. Nach Sommerbraugerste mit Untersaat oder nachfolgender Zwischenfrucht liegen die N-Austräge über das Sickerwasser auf eher niedrigem Niveau, so dass eine reduzierte N-Düngung aus Wasserschutzsicht nicht notwendig ist. Allerdings kann eine reduzierte N-Düngung qualitätssteigernd wirken, birgt jedoch die Gefahr von Ertragseinbußen. Hinsichtlich der N-Austräge war die Zwischenfrucht der Untersaat überlegen, so dass diese aus Wasserschutzsicht zu favorisieren ist. Nach Kartoffel ist, unabhängig vom Anbausystem, mit hohen N-Austrägen zu rechnen, wenn diese erst im August oder September geerntet wird. Auch eine im Anschluss an die Kartoffel gesäte Zwischenfrucht kann den N-Austrag dann nicht mehr reduzieren, wenn sie bereits im Herbst umgebrochen wird und ihre Standzeit nur etwa sieben Wochen beträgt. Es steht dann nicht genügend Wachstumszeit zur Verfügung, um ausreichend Stickstoff aufzunehmen bzw. der

aufgenommene Stickstoff wird schon während der Sickerwasserperiode wieder mineralisiert und ausgewaschen. Eine reduzierte N-Düngung wirkt sich bei Kartoffel positiv auf die Produktqualität aus, hat jedoch nur ein geringes Potential zur Minderung der N-Austräge aufgrund des hohen N-Mineralisationsschubes nach der Kartoffelrodung.

Über den gesamten Versuchszeitraum erhielten die Varianten der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge 320 kg N/ha mehr über die Düngung als die Varianten der konventionellen Fruchtfolge. Da sich dies nicht in gleichermaßen höheren N-Abfuhren über die Beerntung der Untersaaten ausglich, waren die N-Bilanzsalden in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge etwas höher als in der konventionellen Fruchtfolge. In Variante 4 fand sich dieser überschüssige Stickstoff zum Teil im Sickerwasser wider, während der restliche Teil vermutlich während der Versuchslaufzeit im Zuge des Humusaufbaus festgelegt wurde.

Der Versuch machte deutlich, dass auch in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zeitweise und insbesondere nach längerer Laufzeit hohe N-Austräge auftreten können, da sich vermutlich aufgrund des höheren Eintrags an organischem Material ein hohes N-Mineralisationspotential aufbaut, das schwer kalkulierbar ist. Weiterhin können die Mindererträge zu höheren Reststickstoffgehalten nach der Ernte führen, so dass ein erhöhtes Auswaschungsrisiko besteht. Nicht zuletzt führt auch die in Summe höhere N-Düngung zu höheren N-Austrägen mit dem Sickerwasser, wenn sich die N-Abfuhr nicht gleichermaßen erhöht und zu geringeren N-Bilanzsalden führt.

Am Standort Hamerstorf zeigte sich im Mittel über den gesamten Versuchszeitraum ein starker Zusammenhang (R^2_m = 0,40) zwischen der NO_3-Konzentration im Sickerwasser und dem Herbst-N_{min}-Vorrat. Bei Herbst-N_{min}-Vorräten größer 45 kg N/ha wurde eine NO_3-Konzentration von 50 mg/l stets überschritten. Wurde die NO_3-Konzentration auf Grundlage der Herbst-N_{min}-Methode berechnet, kam es im mehrjährigen Mittel zu einer leichten Unterschätzung der tatsächlich gemessenen NO_3-Konzentrationen. Ursächlich hierfür ist wahrscheinlich primär die N-Mineralisation im Boden, die noch nach der Herbst-N_{min}-Probenahme stattfindet. In Einzeljahren kann es zu starken Abweichungen zwischen der mit der Herbst-N_{min}-Methode berechneten NO_3-Konzentration und der tatsächlich gemessenen NO_3-Konzentration kommen, so dass von Jahr zu Jahr entschieden werden muss, inwieweit die Herbst-N_{min}-Methode sinnvoll angewendet werden kann.

Ein Einsatz von stabilisiertem N-Dünger (ENTEC) hatte in dem Versuch in beiden Fruchtfolgen keinen Einfluss auf die Rest-N_{min}-Gehalte im Boden. Auch eine Ertragssteigerung konnte im Mittel der beiden Fruchtfolgezyklen nicht erzielt werden. Es waren jedoch fruchtartenspezifische Unterschiede zu beobachten. In der Kartoffel konnte eine Ertragssteigerung erzielt werden, bei den anderen Kulturen hatte die Nutzung von ENTEC keinen Einfluss auf die Erträge. Auch die reduzierte N-Düngung in der Variante 8 hatte auf diesem Standort nur in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge einen leicht senkenden Effekt auf die Rest-N_{min}-Gehalte im Boden im Herbst und nach der Ernte.

Die ermittelte optimale N-Düngung lag in der konventionellen Fruchtfolge überwiegend oberhalb des N-Düngebedarfs nach DüV. Nur sehr geringe Abweichungen zwischen N-Optimum und N-Düngebedarf nach DüV zeigten sich bei der Braugerste. In der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge zeigten sich ähnliche Tendenzen.

Die N-MDÄ vom Biogasgärrest war bei den Kulturarten in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge höher als bei denen der konventionellen Fruchtfolge. Im Mittel der Versuchsjahre lagen die N-MDÄ in der konventionellen Fruchtfolge bei 33 % und in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge bei 59 %. Der hohe Begrünungsanteil und der infolge dessen größere Anteil organischer Masse in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge kann zu einer größeren und aktiveren mikrobiellen Bodengemeinschaft geführt haben, was im Laufe der zwei Fruchtfolgezyklen zu einer besseren Wirksamkeit des Gärrestes geführt haben könnte. Die in der DüV vorgegebenen Mindestanrechenbarkeiten von 60 % für Gärrest konnten in diesem Versuch nur in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge bestätigt bzw. in Einzeljahren übertroffen werden. Es traten jedoch starke jährlichen Schwankungen auf, die in der konventionellen Fruchtfolge stärker ausgeprägt waren, als in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse lässt sich folgende Optimierung der untersuchten Fruchtfolge ableiten:

Fruchtfolge 1:

Kartoffeln – Winterroggen mit anschließender Zwischenfrucht – Mais mit reduzierter N-Düngung in zwei Gaben oder bedarfsgerecht gedüngt mit Untersaat – Braugerste mit anschließender Zwischenfrucht.

Fruchtfolge 2:

Frühkartoffeln – Zwischenfrucht – Braugerste mit anschließender Zwischenfrucht – Mais mit reduzierter N-Düngung in zwei Gaben oder bedarfsgerecht gedüngt mit Untersaat – Winterroggen mit anschließender Zwischenfrucht.

Diese Fruchtfolgen sind allerdings an die Standortbedingungen von Hamerstorf angepasst. Unter anderen Bedingungen (Witterung, Bodenart, Humusgehalt) könnten andere Fruchtfolgen optimaler sein. Darüber hinaus ist aus ökonomischer Sicht und unter Beachtung der regionaltypischen Anbauverhältnisse die Integration einer Zuckerrübe am Standort Hamerstorf unumgänglich, weshalb diese bei der Fortführung des Versuches ab 2023 berücksichtigt wurde.

7 Ausblick

Aufgrund der im Bericht dargestellten bewirtschaftungsbedingten Probleme in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge (u. a. Drahtwurm) und um einen besseren Systemvergleich zu gewährleisten, fand nach Abschluss des Versuchsjahres 2021 eine Anpassung des Wasserschutzversuchs am Standort Hamerstorf statt. Außerdem entsprach die alte Fragestellung der Biogas-Fruchtfolge nicht mehr den aktuellen Entwicklungen, sodass bei der Konzeption der neuen Fruchtfolge sowohl auf den Aspekt der Regionalität als auch auf den Gedanken des Wassersparens Wert gelegt wurde. Zudem wurden in beiden Fruchtfolgen Zwischenfrüchte integriert. Einmal um dem Zwischenfruchtanbaugebot nach § 13a DüV zu entsprechen, aber auch um die Effekte einer Leguminosen-Zwischenfrucht zu testen. In der Übergangszeit im Jahr 2022 wurde die Fläche einheitlich mit Sommerhafer in beiden Fruchtfolgen bestellt und es fand ausschließlich eine N-Düngung mit 60 kg N/ha in allen Varianten (Ausnahme Variante 1) statt. Durch dieses Jahr sollten mögliche Unterschiede zwischen den beiden Fruchtfolgen ausgeglichen werden. Ab dem Jahr 2023 wurde der Versuch neu aufgestellt und die Fragestellung angepasst. Es wurde eine regionaltypische Fruchtfolge etabliert und die Zuckerrübe in die Fruchtfolge integriert, die den regional weniger vorhandenen Silomais ersetzt. Außerdem folgt nun nach der Kartoffel eine Sommerung, einmal mit Begrünung über Winter und einmal mit Schwarzbrache (vgl. Abbildung 7-1).

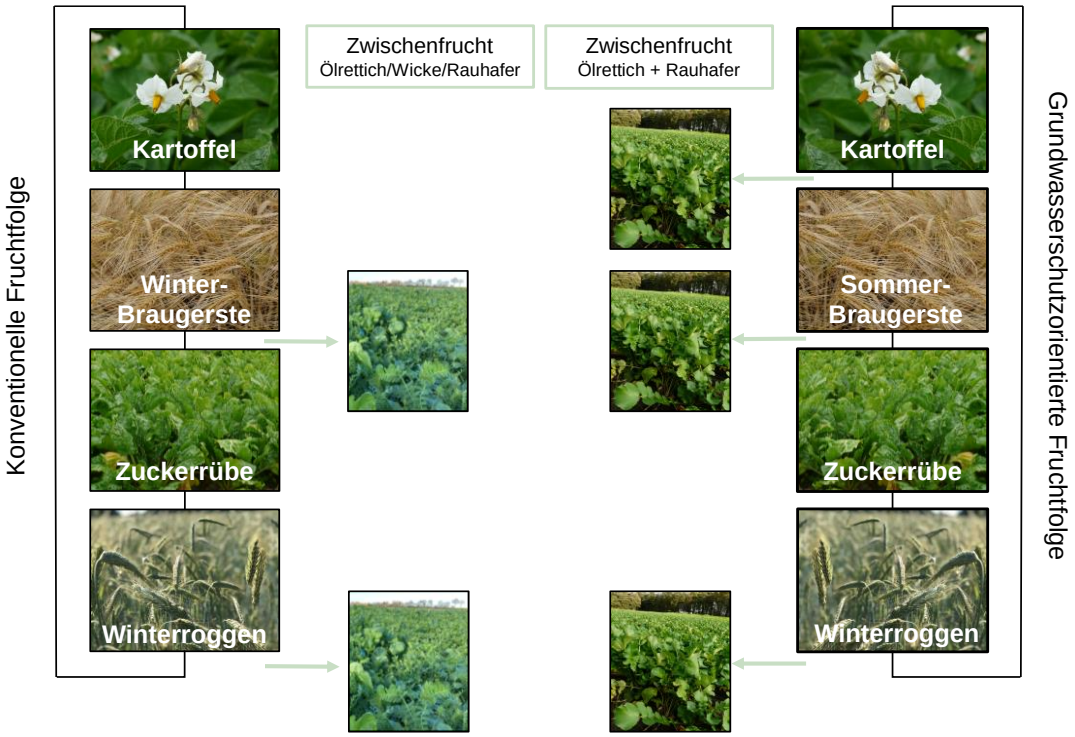

Abbildung 7-1: Neue konventionelle und grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge am Versuchsstandort Hamerstorf ab 2023

Um in der neuen Versuchsanstellung ab dem Jahr 2023 die räumliche Variabilität am Standort auch mit den Saugsondenuntersuchungen besser erfassen zu können, wurden alle mit Saugsonden ausgestatteten Varianten bereits im November 2021 um eine zweite Wiederholung (Parzelle) mit Saugsonden erweitert (Abbildung 7-2). Zusätzlich wurden auch die Varianten gws1 und gws3 in zwei Parzellenwiederholungen mit Saugsonden ausgestattet, um einen Vergleich zu den Varianten konv1 und konv3 zu ermöglichen.

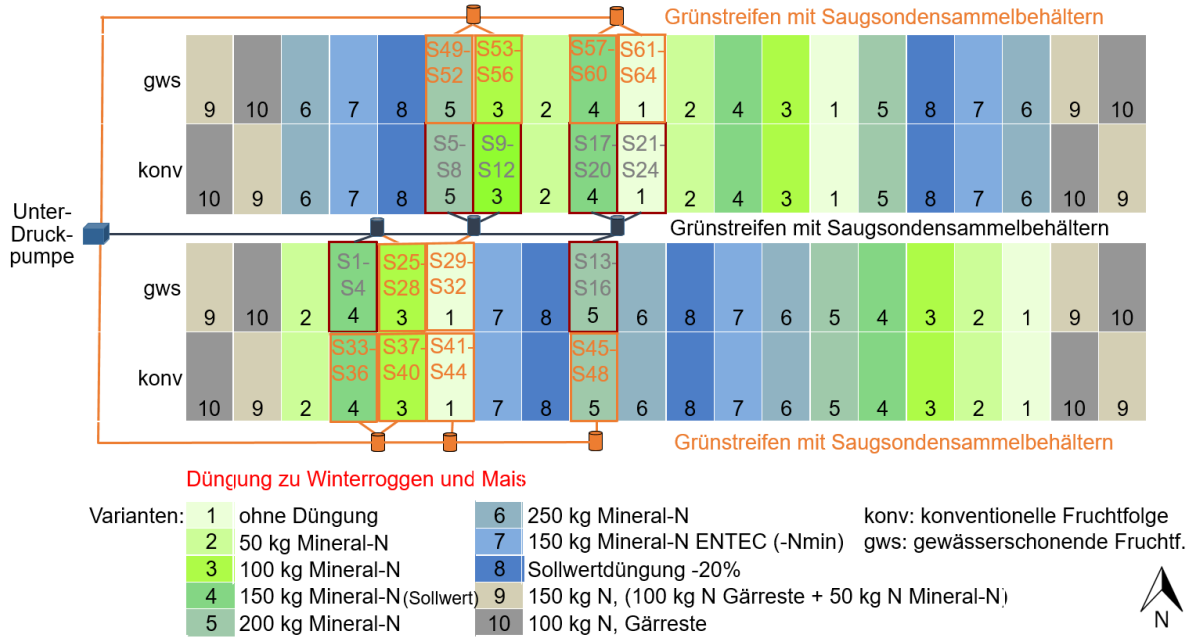

Abbildung 7-2: Versuchsaufbau des Wasserschutzversuchs 643 Hamerstorf ab dem Jahr 2023, dargestellte N-Düngevarianten beispielhaft für Winterroggen/Mais. Rot umrandet: Parzellen, die seit 2014 mit Saugsonden ausgestattet sind, Orange umrandet: Parzellen, die im Nov. 2021 mit Saugsonden ausgestattet wurden. nicht maßstabsgerecht

Zusätzlich wurden im Versuchsjahr 2024 in der obersten Bodenschicht (0-30 cm) Untersuchungen mit der heißwasserlöslichen Extraktion von Stickstoff und Kohlenstoff durchgeführt, um die beiden Fruchtfolgen hinsichtlich des N-Mineralisationspotentials und dessen Auswirkung auf die N_{min}-Werte im Boden und die N-Auswaschung mit dem Sickerwasser vergleichen zu können. Grund ist, dass die im Bericht dargestellten Ergebnisse aufgrund der dauerhaften Begrünung in der grundwasserschutzorientierten Fruchtfolge auf ein erhöhtes Mineralisierungspotential aus dem Boden hindeuten. Die Ergebnisse dazu liegen noch nicht vor und werden in einem gesonderten Bericht veröffentlicht.

8 Ergebnistransfer

Bereits seit 1995 führt die Landwirtschaftskammer Niedersachsen, beauftragt vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, landesweite Aufgaben im kooperativen Trinkwasserschutz durch. Grundwasserschutzorientierte Maßnahmen werden untersucht und mithilfe von Versuchsergebnissen in die Praxis umgesetzt. In den Versuchen werden die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren (Fruchtfolge, Düngung, Produktionstechniken etc.) auf den Austrag von Nitrat mit dem Sickerwasser und auf die Stickstoffdynamik im Boden untersucht. Seit Jahren sind die Versuchsergebnisse die Basis für die Beurteilung und Weiterentwicklung freiwilliger grundwasserschutzorientierter Bewirtschaftungsmaßnahmen. Auf Grundlage der langjährigen Versuche können belastbare Daten als Maßstab für die Erfolgskontrolle regionalspezifisch gewonnen werden. Die jährlich ermittelten Werte dienen als Vergleichsmaßstab für die Wasserschutzberatung, unterstützen das landesweite Monitoring und dienen u.a. als Grundlage für die Umsetzung von Maßnahmen der Wasserrahmenrichtlinie.
In einem Arbeitskreis mit Beratungsträgern, Wasserversorgern, Kooperationslandwirten und dem NLWKN werden die durchgeführten Arbeiten besprochen und die Anregungen der Teilnehmer konzeptionell berücksichtigt. Interessierten Kooperationspartnern wie Beratern, Landwirten, Wasserversorgern, beteiligten Behörden und Berufsschulen, werden die Ergebnisse in regelmäßigen Abständen vorgestellt. Dies wird in Form von Arbeitskreissitzungen, Informationsveranstaltungen, überregionalen Vorträgen auf Fachveranstaltungen oder Feldtagen umgesetzt. Insbesondere in Hamerstorf wird in Zusammenarbeit mit der örtlichen BBS ein überregionaler Feldtag organisiert.

Zusätzlich wird für die Versuchsstandorte mit Sickerwasseranlagen jährlich eine Bodenwasserhaushaltsbilanzierung mittels BOWAB durchgeführt. Dieses vom LBEG entwickelte Modell ermöglicht es, den Bodenwasserhaushalt tagesaktuell nachzustellen, um daraus den Zeitpunkt des Beginns der Sickerwasserbildung und damit den errechneten optimalen Termin zur Nmin-Probennahme im Herbst ermitteln zu können. Ziel ist es, eine Einschätzung für die Praxis zu liefern, wann in einer Region und in dem jeweiligen Boden-Klima-Raum mit Sickerwasser zu rechnen ist. Zu Beginn des Sickerwasseraustritts soll die Herbst-Nmin-Beprobung durchgeführt werden, da zu diesem Zeitpunkt noch kein Nitrat ausgewaschen wurde.

9 Danksagung

Besonderer Dank gilt den Mitarbeitern im Versuchswesen, insbesondere der Versuchsstation Hamerstorf für ihre Arbeit und die präzisen Beobachtungen innerhalb der Vegetationsperiode im Wasserschutzversuch Hamerstorf. Besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern des LBEGs die im Herbst 2013 die Sickerwasseranlage installiert haben und über den Versuchszeitraum die Funktion der Anlage stets sichergestellt haben. Bedanken möchten wir uns ebenso beim NLWKN für die langjährige, erfolgreiche Zusammenarbeit im Rahmen der landesweiten Aufgaben nach § 28 NWG.

Dank gilt darüber hinaus Dominic Meinardi und Klaus Röttcher von der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften Suderburg für die Bereitstellung der Wetterdaten von den Stationen „Meteo 1“ und „Am Campus“.

Die Versuche werden durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU) mit Mitteln aus der Wasserentnahmegebühr sowie die hoheitlichen Aufgaben im Bereich Düngerecht durch das Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML) finanziert. Dafür möchten wir unseren besonderen Dank aussprechen.

Literaturverzeichnis

Abel, H.-J., Theuvsen, L., Schulze Mönking, S.; Klapp, C. (2010). „*Überarbeitung des Getreide- und Vieheinheitenschlüssels.“* Endbericht zum Forschungsprojekt, Göttingen.

Affelt, L. T., Fier, A., Höper, H., Schäfer, W. (2017). *Einfluss unterschiedlich gedüngter Zwischenfrüchte auf die Nitratkonzentration im Sickerwasser und die Nitratfrachten am Standort Wehnen (Versuch 645 WSG). Auswaschungsperioden 2012/2013 bis 2016/2017*. Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie

Albert, E. und Schliephake, W. (2015). *Effizienter Wirtschaftsdüngereinsatz*. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft

Amon, T., et al. (2016). *Qualität und Verwertung des Gärrückstandes.* In Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, von Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Herausgeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 248. Gülzow-Prüzen

Bartoń, K. (2013). *MuMIn: Multi-model inference. R manual*

Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). *Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4.* Journal of Statistical Software, *67*(1), 1–48. https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01

Beisecker, R., & Piegholdt, C. (2021). *Metaanalyse: Empirischer Zusammenhang zwischen N-Flächenbilanzsaldo, Herbst-Nmin-Gehalt und der Stickstofffracht des Sickerwassers* [DVGW-Forschungsbericht W201625]. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches.

Bischoff, N., Fier, A., & Noltemeyer, L. (2022). *Eignung von Herbst-Nmin-Werten und schlagbezogenen N-Bilanzsalden zur Abschätzung des N-Austrags mit dem Sickerwasser am Beispiel des Dauerfeldversuches Thülsfelde* (1. Auflage, GeoBerichte

44). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. https://doi.org/10.48476/GEOBER_44_2022

Büchter, M., Wachendorf, M., Volkers, K., & Taube, F. (2003). *Silomaisanbau auf sandigen Böden Norddeutschlands—Einfluss von Untersaat, Gülle- und Mineral-N-Düngung auf den Nitrataustrag*. Pflanzenbauwissenschaften, 7(2), 64–74.

Bug, J., Heumann, S., Müller, U., & Waldeck, A. (2020). *Auswertungsmethoden im Bodenschutz: Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®* (GeoBerichte 19). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (o.J.) „*Fachbegriffe Beschreibung: Getreideeinheiten*.“ Internetartikel

Dandl, S., Hothorn, T., Seibold, H., Sverdrup, E., Wager, S., Zeileis, A. (2022). *What Makes Forest-Based Heterogeneous Treatment Effect Estimators Work?*

Dommermuth, H., & Trampf, W. (1990). *Die Verdunstung in der Bundesrepublik Deutschland Zeitraum 1951-1980 Teil 1*. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.

Dommermuth, H., & Trampf, W. (1991). *Die Verdunstung in der Bundesrepublik Deutschland Zeitraum 1951-1980 Teil 2*. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.

DüV. (2017). *Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung—DüV):* Bd. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 32.

DüV. (2020). *Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung—DüV):* Bd. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 20.

DVWK. (1996). *Merkblätter zur Wasserwirtschaft—Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.* DVWK-Merkblatt, 238/1996.

DWA. (2016). *Bodenfunktionsansprache. Teil 1: Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushaltes*. Arbeitsblatt DWA-A 920-1.

DWD. (2022). *Vieljährige Stationsmittelwerte für die Klimareferenzperiode 1991—2020*. DWD Climate Data Center (CDC).

Gutser, R., Ebertseder, Th., Weber, A., Schraml, M., und Schmidhalter, U. (2005). *Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application.* Journal for Plant Nutrition and Soil Science, 06. Juni 2005: 439-446.

Halekoh, U., Højsgaard, S. (2014). *A Kenward-Roger Approximation and Parametric Bootstrap Methods for Tests in Linear Mixed Models - The R Package pbkrtest*. Journal of Statistical Software 59(9)

Hoffmann, Marieke. (2018). *Effekte der Düngung mit Gärresten*. Dissertation, Berlin.

Fiedler, A., Fier, A., & Meyer, K. (2018). *Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche—Berechnung des Wasserhaushaltes, der Nitratkonzentrationen und der Nitratfrachten am Standort Hamerstorf—Auswaschungsperiode 2016/2017 und 2017/2018*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Fier, A., & Schäfer, W. (2016). *Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche—Berechnung des Wasserhaushaltes, der Nitratkonzentrationen und der Nitratfrachten am Standort Hamerstorf—Auswaschungsperiode 2014/2015 und 2015/2016*. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B., Christensen, R. H. B. (2015). *LmerTest: Tests in linear mixed effects models.* Journal of Statistical Software 2(13)

LBEG. (2014). *NIBIS Kartenserver. Bodenzahl der Bodenschätzung von Niedersachsen 1:5000*.

LBEG. (2017). *NIBIS Kartenserver. Fachanwendung MeMaS Lite*.

Lenth, R. V. (2016). *Least-Squares Means: The R Package lsmeans.* Journal of Statistical Software 69(1)

LSN. (2017). *Statistische Berichte Niedersachsen: Bodennutzung und Ernte 2016* (S. 1–21). Landesamt für Statistik Niedersachsen.

LWK Niedersachsen. (2018). *Empfehlungen zur Grunddüngung—Stand Februar 2018*.

LWK Nordrhein-Westfalen (2022). *Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz*. 2022.

Müller, U., & Waldeck, A. (2011). *Auswertungsmethoden im Bodenschutz: Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®)* (GeoBerichte 19). Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Nakagawa, S., Johnson, P. C. D., & Schielzeth, H. (2017). *The coefficient of determination R2 and intra-class correlation coefficient from generalized linear mixed-effects models revisited and expanded.* J. R. Soc. Interface, *14*, 1–11.

Neumann, A., Torstensson, G., & Aronsson, H. (2012). *Nitrogen and phosphorus leaching losses from potatoes with different harvest times and following crops*. Field Crops Research, 133, 130–138. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.011

NLWKN. (2010). *Untersuchung des mineralischen Stickstoffs im Boden - Empfehlungen zur Nutzung der Herbst-N_{min}-Methode für die Erfolgskontrolle und zur Prognose der Sickerwassergüte.* Reihe Grundwasser Band 8. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN).

Noltemeyer, L., Bischoff, N., Fier, A., Albers, M. C., & Knigge-Sievers, A. (2021). *Zwischenfruchtversuch (645) am Standort Wehnen—Auswaschungsperioden 2012/2013 bis 2020/2021* (Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche). Landwirtschaftskammer Niedersachsen und Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Noltemeyer, L., Fier, A., Bischoff, N., Meyer, K., Albers, M. C., Peters, K., & Knigge-Sievers, A. (2020). *Thülsfelde (644) - Auswaschungsperioden 1998/1999 bis 2018/2019* (Grundwasserschutzorientierte Dauerversuche). Landwirtschaftskammer Niedersachsen und Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie.

Quemada, M, Baranski, M., Nobel-de Lange, M.N.J., Vallejo, A., und Cooper, J.M. (2013). *Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield.* Agriculture, Ecosystems & Environment, 15. Juli 2013: 10.

R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*. https://www.R-project.org/

Richter, D. (1995). *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers* (Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, S. 1–93).

Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt. (2003). *Gesunde Kartoffeln. Hinweise zur Erzeugung von Qualitätskartoffeln.* Erfurt

TrinkwV. (2016). *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung—TrinkwV): Bd. BGBl. I S. 459*.

Wachendorf, M., Buchter, M., Volkers, K. C., Bobe, J., Rave, G., Loges, R., & Taube, F. (2006). *Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. V. Impact of grass understorey, slurry application and mineral N fertilizer on nitrate leaching under maize for silag*e. Grass and Forage Science, 61(3), 243–252. https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00528.x

Wendland, M., Schmidt, M., Offenberger, M., und Euba, M. (o.J.). *Versuchsergebnisse 2008-2011: N-Düngungsversuch zu Kartoffeln.* Versuchsbericht, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.

Wendling, U., Müller, J., & Schwede, K. (1984). *Ergebnisse von Verdunstungsmessungen über Gras mit einem Off-line-Datenerfassungssystem (2. Mitteilung).* Z. Meteorol., *34*, 190–202.

Wendling, U., Schellin, H.-G., & Thömä, M. (1991). *Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung.* Z. Meteorol., 41, 468–475.

Wickham, H. (2016). *ggplot2.* ISBN: 978-3-319-24275-0

Anhang

A. Monatliche Witterungsdaten für den Versuch Hamerstorf

Tabelle A-1: Monatliche Witterungsdaten für den Versuch Hamerstorf 643 (ohne Beregnung). Auf die Niederschlagsdaten wurde kein Korrekturverfahren angewendet.

Monat	**Temp.**	**Niederschlag**			**$ETp_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potentielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Mrz 14	7,0	11	57	19	43	-32
Apr 14	11,5	30	56	54	68	-38
Mai 14	12,8	83	60	138	81	2
Jun 14	15,8	93	70	133	99	-6
Jul 14	20,2	109	72	151	108	1,5
Aug 14	16,3	41	52	79	81	-40
Sep 14	15,3	29	57	51	56	-27
Okt 14	12,3	50	46	109	31	19
Nov 14	6,8	9	53	17	17	-7
Dez 14	3,0	99	72	138	9	90
Jan 15	2,9	90	72	125	11	78
Feb 15	1,7	29	59	49	18	11

Monat	**Temp.**	**Niederschlag**			**ETp$_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potentielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Mrz 15	5,6	75	57	132	43	31
Apr 15	8,5	27	56	48	79	-52
Mai 15	12,0	34	60	57	89	-55
Jun 15	15,6	23	70	33	108	-85
Jul 15	18,1	108	72	150	108	-1
Aug 15	19,0	138	52	265	95	44
Sep 15	12,9	53	57	93	54	-1
Okt 15	8,3	64	46	139	30	34
Nov 15	7,8	104	53	196	16	88
Dez 15	7,9	47	72	65	13	35
Jan 16	0,6	48	72	67	11	37
Feb 16	3,4	71	59	120	20	52
Mrz 16	4,6	29	57	51	36	-7
Apr 16	8,1	40	56	71	68	-29
Mai 16	14,8	76	60	127	108	-32
Jun 16	17,8	91	70	130	114	-23
Jul 16	18,7	45	72	63	110	-65

Monat	**Temp.**	**Niederschlag**			**ETp$_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potentielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Aug 16	17,3	30	52	58	94	-64
Sep 16	16,6	23	57	40	72	-49
Okt 16	8,8	43	46	93	25	17
Nov 16	3,5	54	53	102	15	39
Dez 16	3,5	41	72	57	11	30
Jan 17	-0,5	62	72	86	11	51
Feb 17	2,5	41	59	69	18	23
Mrz 17	7,0	86	57	151	50	37
Apr 17	7,3	33	56	59	62	-29
Mai 17	14,5	83	60	138	101	-18
Jun 17	16,9	168	70	240	111	57
Jul 17	17,3	120	72	167	100	20
Aug 17	17,1	60	52	115	92	-32
Sep 17	13,5	54	57	95	55	-1
Okt 17	11,7	63	46	137	31	32
Nov 17	5,9	68	53	128	13	55
Dez 17	3,9	56	72	78	9	47

Monat	**Temp.**	**Niederschlag**			**ETp$_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potentielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Jan 18	3,3	76	72	105	11	64
Feb 18	-1,3	7	59	17	22	-15
Mrz 18	2,0	52	57	105	36	16
Apr 18	11,9	67	56	79	81	-14
Mai 18	15,8	6	60	5	131	-125
Jun 18	17,9	20	70	24	115	-95
Jul 18	20,1	31	72	43	143	-112
Aug 18	19,4	35	52	68	110	-75
Sep 18	15,0	19	57	34	71	-52
Okt 18	10,6	20	46	44	43	-23
Nov 18	5,0	12	53	23	16	-4
Dez 18	4,9	87	72	121	9	78
Jan 19	1,8	63	72	87	12	51
Feb 19	4,9	26	59	44	27	-1
Mrz 19	7,5	69	57	121	40	29
Apr 19	10,0	22	56	38	83	-62
Mai 19	12,0	28	60	47	86	-58

Monat	**Temp.**	**Niederschlag**			**ETp$_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potentielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Jun 19	20,2	56	70	81	139	-83
Jul 19	18,7	65	72	90	109	-44
Aug 19	19,1	45	52	87	102	-57
Sep 19	13,8	65	57	113	60	5
Okt 19	10,9	118	46	257	35	83
Nov 19	5,8	59	53	111	14	45
Dez 19	4,1	52	72	73	12	40
Jan 20	4,4	42	72	59	14	29
Feb 20	5,8	143	59	243	21	122
Mrz 20	5,5	57	57	100	49	8
Apr 20	10,4	21	56	38	95	-73
Mai 20	12,7	24	60	41	104	-79
Jun 20	17,9	55	70	79	112	-57
Jul 20	17,2	56	72	78	107	-51
Aug 20	20,8	30	52	58	107	-77
Sep 20	14,8	37	57	65	70	-33
Okt 20	11,2	71	46	154	32	39

Monat	**Temp.**	**Niederschlag**			**ETp$_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potentielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Nov 20	7,9	24	53	45	17	7
Dez 20	4,0	63	72	88	10	54
Jan 21	1,7	71	72	99	12	59
Feb 21	1,8	58	59	98	23	36
Mrz 21	5,6	45	57	79	44	1
Apr 21	6,4	45	56	80	66	-20
Mai 21	10,9	88	60	147	87	1
Jun 21	19,9	54	70	77	125	-70
Jul 21	19,5	55	72	76	109	-55
Aug 21	16,8	80	52	154	71	8
Sep 21	15,3	74	57	130	32	41
Okt 21	10,4	49	46	107	8	41
Nov 21	6,9	40	53	75	13	28
Dez 21	3,0	55	72	76	9	45
Jan 22	5,2	44	72	61	11	34
Feb 22	5,8	119	59	202	21	99
Mrz 22	5,1	6	57	11	61	-55

Monat	**Temp.**	**Niederschlag**			**ETp$_{Turc-Wendling}$**	**KWB**
	Luft (2 m)	Summe	langjähriges Mittel*	% des langj. Mittels	potentielle Verdunstung	klimatische Wasserbilanz
	[°C]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
Apr 22	8,2	47	56	84	92	-45
Mai 22	14,5	24	60	40	116	-92
Jun 22	18,2	37	70	53	134	-96

B. kC-Werte zur Umrechnung der ETp in die ETa

Tabelle A-2: Verwendete teils ertragsabhängige kC-Werte zur Umrechnung der ETp in die ETa für den Versuch Hamerstorf 643

Fruchtart	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Klassenweite Ertrag (dt FM/ha)*
Gras (Untersaat)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Kartoffel Reifegruppe I	0,65	0,65	0,65	0,60	0,90	1,40	1,10	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
Kartoffel Reifegruppe II	0,65	0,65	0,65	0,60	0,80	1,30	1,30	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
Mais (Silomais) hoher Ertrag	0,65	0,65	0,60	0,45	0,60	0,98	1,32	1,18	1,18	0,85	0,65	0,65	> 549
Mais (Silomais) normaler Ertrag	0,65	0,65	0,60	0,45	0,60	0,90	1,15	1,05	1,05	0,80	0,65	0,65	393 - 549
Mais (Silomais) geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,60	0,45	0,60	0,82	0,98	0,92	0,92	0,75	0,65	0,65	236 - 392
Mais (Silomais) stark geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,60	0,45	0,60	0,73	0,82	0,78	0,78	0,70	0,65	0,65	< 236
Schwarzbrache	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
Schwarzbrache, frisch nach Bodenbearbeitung	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
Sommergerste hoher Ertrag	0,65	0,65	0,85	0,98	1,38	1,58	1,38	0,60	0,65	0,58	0,65	0,65	> 61
Sommergerste normaler Ertrag	0,65	0,65	0,80	0,90	1,20	1,35	1,20	0,60	0,65	0,60	0,65	0,65	44 - 61
Sommergerste geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,75	0,82	1,02	1,12	1,02	0,60	0,65	0,62	0,65	0,65	27 - 43
Sommergerste stark geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,70	0,73	0,83	0,88	0,83	0,60	0,65	0,63	0,65	0,65	< 27
Winterroggen hoher Ertrag	0,65	0,65	0,92	0,98	1,38	1,52	1,45	0,65	0,65	0,72	0,65	0,65	> 70
Winterroggen normaler Ertrag	0,65	0,65	0,85	0,90	1,20	1,30	1,25	0,65	0,65	0,70	0,65	0,65	51 - 70
Winterroggen geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,78	0,82	1,02	1,08	1,05	0,65	0,65	0,68	0,65	0,65	31 - 50
Winterroggen stark geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,72	0,73	0,83	0,87	0,85	0,65	0,65	0,67	0,65	0,65	< 31

Winterroggen GPS hoher Ertrag	0,65	0,65	0,92	0,98	1,38	1,52	1,45	0,65	0,65	0,72	0,65	0,65	> 375
Winterroggen GPS normaler Ertrag	0,65	0,65	0,85	0,90	1,20	1,30	1,25	0,65	0,65	0,70	0,65	0,65	268 - 375
Winterroggen GPS geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,78	0,82	1,02	1,08	1,05	0,65	0,65	0,68	0,65	0,65	161 - 267
Winterroggen GPS stark geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,72	0,73	0,83	0,87	0,85	0,65	0,65	0,67	0,65	0,65	< 160
Zwischenfrucht (nicht abgefroren) hoher Ertrag	1,12	1,12	1,12	1,12	1,58	1,58	1,25	0,60	0,92	1,12	1,12	1,12	> 34
Zwischenfrucht (nicht abgefroren) normaler Ertrag	1,00	1,00	1,00	1,00	1,35	1,35	1,10	0,60	0,85	1,00	1,00	1,00	25 - 34
Zwischenfrucht (nicht abgefroren) geminderter Ertrag	0,88	0,88	0,88	0,88	1,12	1,12	0,95	0,60	0,78	0,88	0,88	0,88	15 - 24
Zwischenfrucht (nicht abgefroren) stark geminderter Ertrag	0,77	0,77	0,77	0,77	0,88	0,88	0,80	0,60	0,72	0,77	0,77	0,77	< 14
Zwischenfrucht (abgefroren) hoher Ertrag	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30						0,30	0,30	> 34
Zwischenfrucht (abgefroren) normaler Ertrag	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30						0,30	0,30	25 - 34
Zwischenfrucht (abgefroren) geminderter Ertrag	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42						0,42	0,42	15 - 24
Zwischenfrucht (abgefroren) stark geminderter Ertrag	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65						0,65	0,65	< 14

*Ertrag für Zwischenfrüchte in dt TM/ha

C. Überblick über alle Versuchsergebnisse der Jahre 2014 bis 2021

Tabelle A-3: Versuchsjahr 2014, Kulturart: Kartoffel, Sorte: Belana

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]		Ertrag [dt TM/ha]		Stärkegehalt in der Knolle [%]		N-Gehalt Haupt-erntegut* [kg N/dt]		N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha	
Frucht-folge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	0	0	43	43	479	503	105	111	12,6	12,8	0,35	0,35	168	176	-168	-176
Var. 2	80	80	123	123	538	580	118	128	12,6	12,2	0,35	0,35	188	203	-108	-123
Var. 3	120	120	163	163	547	607	120	133	12,2	12	0,35	0,35	191	212	-71	-92
Var. 4	160	160	203	203	570	624	125	137	12,1	11,9	0,35	0,35	200	218	-40	-58
Var. 5	200	200	243	243	558	640	123	141	11,6	11,7	0,35	0,35	195	224	5	-24
Var. 6	240	240	283	283	586	664	129	146	12,4	11,9	0,35	0,35	205	232	35	8
Var. 7	160	160	203	203	619	667	136	147	11,8	11,5	0,35	0,35	217	233	-57	-73
Var. 8	128	128	171	171	570	623	125	137	12,2	11,8	0,35	0,35	200	218	-72	-90
Var. 9	160	160	203	203	606	610	133	134	11,7	11,7	0,35	0,35	212	214	-52	-54
Var. 10	100	100	143	143	509	631	112	139	12,4	11,6	0,35	0,35	178	221	-78	-121

*Es handelt sich hierbei um Richtwerte aus der DüV und nicht um tatsächliche, im Versuch ermittelte Werte.

	Ernte N_{min} [kg N/ha]		Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	63	70	74	73	9	9	316	-	177	-	126	-
Var. 2	74	75	76	86	10	9	-	-	-	-	-	-
Var. 3	95	74	85	88	9	9	310	-	202	-	141	-
Var. 4	91	87	101	106	9	10	310	310	161	207	113	145
Var. 5	110	98	128	99	9	9	310	310	205	161	144	113
Var. 6	101	94	169	139	13	10	-	-	-	-	-	-
Var. 7	81	84	96	86	9	9	-	-	-	-	-	-
Var. 8	94	67	85	92	9	9	-	-	-	-	-	-
Var. 9	62	68	83	79	9	9	-	-	-	-	-	-
Var. 10	62	65	68	71	9	9	-	-	-	-	-	-

Tabelle A-4: Versuchsjahr 2015, Kulturart: Winterroggen (konv), Winterroggen GPS mit Untersaat (gws)

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]			Ertrag [dt TM/ha]			Rohprotein in der TM [%]		N-Gehalt Haupterntegut [kg N/dt]			N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha	
Frucht -folge	konv	gws GPS	konv	gws GPS*	konv	gws GPS	gws US	konv	gws GPS	gws US	konv	gws GPS	konv	gws GPS	gws US	konv	gws GPS + US	konv	gws GPS + US
Var. 1	0	0	9	9	52	63	31	44	54	8	10,8	3,8	1,7	0,61	1,37	89	70	-89	-70
Var. 2	50	50	60	59	78	102	121	67	88	27	9,4	3,7	1,5	0,59	1,41	117	177	-67	53
Var. 3	100	100	109	109	100	127	137	86	109	30	9,2	4,8	1,5	0,78	1,37	148	224	-48	56
Var. 4	150	150	159	160	108	134	131	93	115	29	10,6	5,9	1,7	0,95	1,59	183	268	-33	62
Var. 5	200	200	209	209	113	130	139	97	112	31	11,9	7,5	1,9	1,20	1,48	214	293	-14	87
Var. 6	250	250	263	260	119	135	143	102	116	31	12,7	7,8	2,0	1,26	1,72	242	326	8	104
Var. 7	140	140	149	149	114	133	136	98	114	30	11,3	6,2	1,8	0,99	1,52	206	270	-66	50
Var. 8	120	120	129	129	114	129	136	98	111	31	11	6,0	1,8	0,96	1,49	200	261	-80	39
Var. 9	142	142	151	151	89	115	143	77	99	32	10,5	4,5	1,7	0,72	1,37	150	218	-8	104
Var. 10	102	102	111	111	68	98	141	58	84	31	10,3	4,0	1,6	0,64	1,41	112	199	-10	83

*Die Untersaat wurde in den Varianten 2 bis 10 mit 60 kg N/ha pro Schnitt bzw. beim 3 Schnitt mit 75 kg N/ha gedüngt. (d.h. N-Düngung gesamt zur Untersaat 195 kg N/ha).

	Ernte N_{min} [kg N/ha]					Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws GPS	gws US			konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
			1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt										
Var. 1	25	10	18	16	12	35	12	22	12	483	-	56	-	61	-
Var. 2	23	7	15	15	25	29	10	23	25	-	-	-	-	-	-
Var. 3	23	6	18	18	27	28	11	22	27	437	-	66	-	65	-
Var. 4	28	7	17	15	35	27	11	23	35	437	341	55	7	54	5
Var. 5	34	7	15	16	34	28	11	22	34	437	341	59	14	58	11
Var. 6	46	11	10	22	37	31	14	20	37	-	-	-	-	-	-
Var. 7	30	11	17	22	29	25	17	20	29	-	-	-	-	-	-
Var. 8	28	7	9	12	40	31	11	21	40	-	-	-	-	-	-
Var. 9	25	5	10	14	26	27	13	21	26	-	-	-	-	-	-
Var. 10	22	5	11	14	26	28	10	21	26	-	-	-	-	-	-

Tabelle A-5: Versuchsjahr 2016, Kulturart: Silomais (konv), Silomais mit Untersaat (gws)

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]		Ertrag [dt TM/ha]		Rohprotein in der TM [%]		N-Gehalt Haupterntegut [kg N/dt]		N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha	
Frucht-folge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	0	0	22	12	420	307	164	120	6,0	5,8	0,95	0,92	157	111	-157	-111
Var. 2	50	50	73	75	478	417	200	170	6,0	5,6	0,96	0,90	191	153	-141	-103
Var. 3	100	100	122	127	501	450	211	200	6,0	6,0	0,96	0,96	203	192	-103	-92
Var. 4	150	150	173	185	537	508	232	209	6,4	6,1	1,03	0,97	238	203	-88	-53
Var. 5	200	200	222	234	521	544	250	236	7,6	7,3	1,22	1,16	304	275	-104	-75
Var. 6	250	250	270	287	540	519	248	238	7,8	8,0	1,24	1,28	309	303	-59	-53
Var. 7	125	125	145	154	546	537	241	224	6,9	6,7	1,10	1,06	267	239	-142	-114
Var. 8	120	120	141	160	548	481	232	223	6,5	6,5	1,04	1,04	241	231	-121	-111
Var. 9	125	125	146	151	501	474	206	194	6,3	6,8	1,01	1,09	207	212	-40	-87
Var. 10	100	100	121	126	440	470	195	200	6,5	6,7	1,04	1,07	203	215	-60	-115

	Ernte N_{min} [kg N/ha]		Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	13	12	9	10	21	18	331	-	36	-	27	-
Var. 2	15	12	13	13	18	18	-	-	-	-	-	-
Var. 3	15	14	13	15	20	19	221	-	50	-	25	-
Var. 4	20	15	17	16	22	18	221	172	41	24	20	9
Var. 5	22	24	24	30	23	18	221	172	82	20	41	8
Var. 6	30	28	31	50	18	19	-	-	-	-	-	-
Var. 7	18	18	19	18	21	16	-	-	-	-	-	-
Var. 8	15	14	16	17	22	21	-	-	-	-	-	-
Var. 9	17	14	18	17	22	20	-	-	-	-	-	-
Var. 10	16	13	13	14	20	19	-	-	-	-	-	-

Versuchsjahr 2017

Tabelle A-6: Versuchsjahr 2017, Kulturart: Braugerste mit ZwF (konv.), Braugerste mit Untersaat (gws.)

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]		Ertrag [dt TM/ha]		Rohprotein in der TM [%]		N-Gehalt Haupterntegut [kg N/dt]		N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha	
Frucht-folge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	0	0	21	18	18	25	16	22	11,0	10,5	1,8	1,69	32	42	-32	-42
Var. 2	40	40	58	58	44	47	38	40	10,6	10,0	1,7	1,61	75	76	-35	-36
Var. 3	80	80	100	99	64	66	55	57	10,5	11,3	1,7	1,81	108	120	-28	-40
Var. 4	120	120	142	138	70	70	60	60	11,5	10,9	1,8	1,75	129	122	-9	-2
Var. 5	160	160	183	178	71	76	61	65	12,4	11,9	2,0	1,91	141	145	19	15
Var. 6	200	200	218	219	66	71	57	61	12,9	12,7	2,1	2,02	135	145	65	55
Var. 7	100	100	121	116	60	63	52	54	11,7	11,4	1,9	1,82	113	115	-13	-15
Var. 8	80	80	102	101	69	71	59	61	11,9	11,8	1,9	1,89	131	135	-51	-55
Var. 9	101	101	123	121	62	67	53	57	10,8	11,0	1,7	1,76	108	117	28	-16
Var. 10	81	81	101	100	47	61	41	53	10,5	11,3	1,7	1,82	80	111	36	-30

	Ernte N_{min} [kg N/ha]			Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws Ernte Winterroggen GPS	gws Ernte Untersaat	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	18	19	9	10	9	18	9	432	-	7	-	7	-
Var. 2	20	18	10	12	10	19	9	-	-	-	-	-	-
Var. 3	16	17	11	11	11	20	11	386	-	4	-	4	-
Var. 4	17	16	11	12	11	23	12	386	246	6	34	5	19
Var. 5	17	17	15	12	15	28	11	386	246	7	41	6	23
Var. 6	23	21	28	15	28	27	18	-	-	-	-	-	-
Var. 7	17	17	15	11	15	22	9	-	-	-	-	-	-
Var. 8	20	15	13	12	13	21	11	-	-	-	-	-	-
Var. 9	23	21	10	12	10	21	11	-	-	-	-	-	-
Var. 10	22	23	11	12	11	20	9	-	-	-	-	-	-

Tabelle A-7: Versuchsjahr 2018, Fruchtart Kartoffel, Sorte Wega (konv); Sorte Leyla + Zwischenfrucht (gws)

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]		Ertrag [dt TM/ha]		Stärkegehalt in der Knolle [%]		N-Gehalt Haupterntegut* [kg N/dt]		N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha	
Frucht-folge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	0	0	18	9	571	278	126	61	10,4	10,7	0,35	0,35	200	97	-200	-97
Var. 2	80	80	99	89	678	371	149	82	10,1	10,7	0,35	0,35	237	130	-157	-50
Var. 3	120	120	140	131	738	414	162	91	10,1	10,6	0,35	0,35	258	145	-138	-25
Var. 4	160	160	183	172	738	418	162	92	9,7	10,8	0,35	0,35	258	146	-98	14
Var. 5	200	200	228	211	765	403	168	89	9,5	10,3	0,35	0,35	268	141	-68	59
Var. 6	240	240	267	258	748	420	165	92	9,3	10,2	0,35	0,35	262	147	-22	93
Var. 7	160	160	182	169	734	450	161	99	9,8	10,5	0,35	0,35	257	158	-97	3
Var. 8	124	124	145	135	762	425	168	94	10,1	10,7	0,35	0,35	267	149	-143	-25
Var. 9	160	160	181	171	612	415	135	91	9,5	10,3	0,35	0,35	214	145	-54	15
Var. 10	120	120	140	129	633	379	139	83	9,5	10,8	0,35	0,35	221	133	-101	-13

*Es handelt sich hierbei um Richtwerte aus der DüV und nicht um tatsächliche, im Versuch ermittelte Werte.

	Ernte N_{min} [kg N/ha]		Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	40	79	39	62	13	29	155	-	64	-	22	-
Var. 2	56	85	53	67	13	27	-	-	-	-	-	-
Var. 3	55	101	65	83	17	37	152	-	180	-	62	-
Var. 4	75	114	67	100	16	34	152	148	68	136	23	45
Var. 5	111	151	77	115	31	35	152	148	151	158	52	53
Var. 6	114	162	96	132	33	49	-	-	-	-	-	-
Var. 7	66	129	64	103	14	33	-	-	-	-	-	-
Var. 8	63	114	64	72	20	31	-	-	-	-	-	-
Var. 9	70	168	96	69	17	25	-	-	-	-	-	-
Var. 10	47	83	66	85	15	26	-	-	-	-	-	-

Tabelle A-8:Versuchsjahr 2019, Kulturart: Winterroggen (konv), Winterroggen GPS mit Untersaat (gws)

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]			Ertrag [dt TM/ha]			Rohprotein in der TM [%]		N-Gehalt Haupterntegut [kg N/dt]			N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha	
Frucht-folge	konv	gws GPS	konv	gws GPS*	konv	gws GPS	gws US	konv	gws GPS	gws US	konv	gws GPS	konv	gws GPS	gws US	konv	gws GPS + US	konv	gws GPS + US
Var. 1	0	0	13	29	40	99	44	34	28	16	8,8	6,8	1,4	1,2	1,1	48	47	-48	-47
Var. 2	50	50	63	77	71	208	82	61	57	33	7,9	6,4	1,3	1,2	1,0	77	91	-27	19
Var. 3	101	101	118	138	96	288	80	83	71	32	7,8	9,1	1,3	1,4	1,4	104	149	-3	12
Var. 4	151	151	167	185	101	277	79	87	68	32	8,7	9,8	1,4	1,7	1,6	121	158	30	53
Var. 5	202	202	233	237	103	315	81	88	74	33	9,6	10,6	1,5	2,1	1,7	135	182	67	80
Var. 6	251	251	284	300	102	326	78	87	75	32	9,8	11,1	1,6	2,2	1,8	137	191	114	120
Var. 7	135	115	149	148	97	302	78	83	74	34	8,4	7,3	1,3	1,5	1,2	112	127	23	48
Var. 8	106	85	126	116	92	272	84	79	67	35	8,3	8,9	1,3	1,4	1,4	104	144	2	1
Var. 9	136	116	153	141	86	302	61	74	76	22	8,0	10,8	1,3	1,3	1,7	94	169	42	6
Var. 10	101	101	116	127	68	235	51	58	61	19	8,1	8,3	1,3	1,1	1,3	76	105	25	55

*Die Untersaat wurde nach Ernte des Winterroggens in den Varianten 2 bis 10 mit 60 kg N/ha gedüngt.

	Ernte N_{min} [kg N/ha]			Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws GPS	gws US	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	18	13	14	18	18	13	18	444	-	25	-	25	-
Var. 2	16	10	17	13	16	10	13	-	-	-	-	-	-
Var. 3	16	13	47	16	16	13	16	441	-	64	-	63	-
Var. 4	14	12	24	13	14	12	13	441	392	51	7	50	6
Var. 5	17	25	36	16	17	25	16	441	392	81	169	81	150
Var. 6	17	27	46	21	17	27	21	-	-	-	-	-	-
Var. 7	14	22	31	14	14	22	14	-	-	-	-	-	-
Var. 8	15	13	16	14	15	13	14	-	-	-	-	-	-
Var. 9	20	11	61	15	20	11	15	-	-	-	-	-	-
Var. 10	19	9	16	12	19	9	12	-	-	-	-	-	-

Tabelle A-9:Versuchsjahr 2020, Kulturart: Silomais (konv), Silomais mit Untersaat (gws)

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]		Ertrag [dt TM/ha]		Rohprotein in der TM [%]		N-Gehalt Haupt-erntegut [kg N/dt]		N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha]	
Frucht-folge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	0	0	30	10	383	367	158	143	5,7	6,1	0,91	0,98	144	140	-144	-140
Var. 2	50	110	82	121	449	464	193	183	6,0	6,3	0,97	1,01	186	185	-136	-65
Var. 3	101	161	130	173	471	465	200	193	6,4	6,3	1,02	1,00	204	194	-103	-33
Var. 4	151	211	182	221	497	550	210	226	6,7	6,8	1,07	1,09	224	246	-73	-35
Var. 5	202	262	237	274	518	544	215	221	7,0	7,3	1,12	1,17	240	258	-38	4
Var. 6	252	309	287	323	519	585	210	230	7,1	7,2	1,14	1,15	240	265	12	44
Var. 7	120	200	153	211	499	534	210	223	6,6	6,6	1,05	1,06	220	236	-100	-36
Var. 8	90	172	125	182	482	494	206	210	6,5	6,7	1,05	1,08	215	226	-125	-54
Var. 9	109	151	142	172	474	513	197	213	6,9	6,7	1,10	1,07	218	227	-109	-76
Var. 10	59	101	87	118	433	504	181	207	6,5	6,5	1,04	1,03	189	214	-130	-113

	Ernte N_{min} [kg N/ha]		Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	10	10	13	14	17	11	273	-	15	-	9	-
Var. 2	14	13	21	28	14	14	-	-	-	-	-	-
Var. 3	12	12	19	17	15	16	240	-	35	-	19	-
Var. 4	17	20	23	24	15	14	240	202	61	6	33	3
Var. 5	48	65	61	45	20	13	240	202	91	57	49	26
Var. 6	125	138	108	83	20	16	-	-	-	-	-	-
Var. 7	14	18	25	19	17	15	-	-	-	-	-	-
Var. 8	13	16	25	29	19	13	-	-	-	-	-	-
Var. 9	19	41	35	18	19	13	-	-	-	-	-	-
Var. 10	11	16	33	28	15	18	-	-	-	-	-	-

Tabelle A-10:Versuchsjahr 2021, Kulturart: Braugerste mit ZwF (konv.), Braugerste mit Untersaat (gws)

	Anrechenbare N-Düngung [kg N/ha]		N-Angebot [kg N/ha]		Ertrag [dt FM/ha]		Ertrag [dt TM/ha]		Rohprotein in der TM [%]		N-Gehalt Haupt-erntegut [kg N/dt]		N-Abfuhr [kg N/ha]		Netto-N-Bilanzsaldo [kg N/ha	
Frucht-folge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	0	0	17	11	19	26	17	23	9,6	9,8	1,53	1,56	30	41	-30	-41
Var. 2	40	40	54	54	49	52	42	45	9,0	9,1	1,44	1,45	71	75	-31	-35
Var. 3	79	79	94	95	62	63	53	54	8,8	10,1	1,40	1,62	87	103	-8	-24
Var. 4	119	119	134	133	69	64	59	55	9,6	10,5	1,53	1,68	105	108	14	11
Var. 5	158	158	178	171	65	67	56	58	11,1	11,6	1,77	1,86	115	124	43	34
Var. 6	198	198	218	214	61	61	52	52	12,0	12,1	1,92	1,93	117	118	81	80
Var. 7	105	105	122	120	63	66	54	56	10,9	10,9	1,74	1,74	110	114	-5	-9
Var. 8	85	85	104	98	68	66	58	57	10,2	10,9	1,63	1,75	110	116	-25	-31
Var. 9	97	97	116	110	61	66	53	56	9,7	10,3	1,54	1,66	95	109	2	-12
Var. 10	72	72	87	90	52	53	45	45	9,1	9,9	1,46	1,58	76	83	-4	-11

	Ernte N_{min} [kg N/ha]		Herbst-N_{min} [kg N/ha]		Frühjahrs-N_{min} (Folgejahr) [kg N/ha]		Sickerwassermenge je SWP [mm]		Mittlere NO_3-Konzentration im Sickerwasser je SWP [mg/L]		N-Fracht je SWP [kg N/ha]	
Fruchtfolge	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws	konv	gws
Var. 1	21	20	45	23	13	15	426	-	19	-	18	-
Var. 2	24	25	43	24	17	19	-	-	-	-	-	-
Var. 3	19	23	47	33	13	19	351	-	25	-	20	-
Var. 4	24	32	34	35	14	34	351	269	25	254	20	154
Var. 5	30	27	37	32	13	39	351	269	16	102	13	62
Var. 6	35	32	40	38	16	24	-	-	-	-	-	-
Var. 7	19	22	36	24	14	22	-	-	-	-	-	-
Var. 8	24	28	35	23	15	20	-	-	-	-	-	-
Var. 9	23	28	33	28	17	26	-	-	-	-	-	-
Var. 10	25	26	45	24	16	17	-	-	-	-	-	-

D. N-Düngebedarfsermittlungen für die angebauten Kulturen

Kartoffel

Kartoffel (konventionelle Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2014	**2018**
Kultur		KA	KA
N-Bedarfswert	kg N/ha	180	180
Basis-Ertrag	dt/ha	450	450
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	451	470,2
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	-	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	43	22
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	**kg N/ha**	**137**	**158**
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	110	126

Kartoffel (grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2014	**2018**
Kultur		KA	KA
N-Bedarfswert	kg N/ha	180	180
Basis-Ertrag	dt/ha	450	450
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	451	470,2
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	-	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	43	11
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	**kg N/ha**	**137**	**169**
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	110	135

Winterroggen / Winterroggen GPS

Winterroggen (konventionelle Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2015	2019
Kultur		WR	WR
N-Bedarfswert	kg N/ha	170	170
Basis-Ertrag	dt/ha	70	70
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	63,1	65
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	-	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	10	19
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	kg N/ha	160	151
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	128	121

Winterroggen-GPS (grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2015	**2019**
Kultur		WR GPS	WR GPS
N-Bedarfswert	kg N/ha	170	170
Basis-Ertrag	dt/ha	350	350
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	313,4	339,7
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	-	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	9	33
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	**kg N/ha**	**161**	**137**
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	129	110

Silomais

Silomais (konventionelle Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2016	**2020**
Kultur		SM	SM
N-Bedarfswert	kg N/ha	200	200
Basis-Ertrag	dt/ha	450	450
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	480	450
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	-	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	22	32
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	**kg N/ha**	**178**	**168**
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	142	134

Silomais (grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2016	**2020**
Kultur		SM	SM
N-Bedarfswert	kg N/ha	200	200
Basis-Ertrag	dt/ha	450	450
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	480	450
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	-	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	29	13
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	**kg N/ha**	**171**	**187**
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	137	150

Braugerste

Braugerste (konventionelle Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2017	**2021**
Kultur		BG	BG
N-Bedarfswert	kg N/ha	140	140
Basis-Ertrag	dt/ha	50	50
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	62,4	55,3
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	10	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	21	17
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	kg N/ha	129	123
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	103	98

Braugerste (grundwasserschutzorientierte Fruchtfolge)			
Faktoren für die Düngebedarfsermittlung	**Einheit**	**Versuchsjahr**	
		2017	**2021**
Kultur		BG	BG
N-Bedarfswert	kg N/ha	140	140
Basis-Ertrag	dt/ha	50	50
Ø 5-jähriges Ertragsniveau Betrieb	dt/ha	62,4	55,3
Zu- und Abschläge			
Ertragsdifferenz	kg N/ha	10	-
N_{min}-Vorrat im Frühjahr (0-90 cm)	kg N/ha	19	14
N-Nachlieferung aus dem Bodenvorrat	kg N/ha	-	-
N-Nachlieferung aus organischer Düngung im Vorjahr	kg N/ha	-	-
Vor-/ Zwischenfrucht	kg N/ha	-	-
N-Düngebedarf	**kg N/ha**	**131**	**126**
N-Düngebedarf - 20 %	kg N/ha	105	101