



Schlussbericht zum Thema

**Nährstoffmanagement im Ökologischen
Gemüsebau mit neuen Düngestrategien und
EDV-gestützten Tools**

**FKZ: 2818OE013, 2818OE057, 2818OE058; 2818OE059,
2818OE060, 2818OE061, 2818OE062, 2818OE063,
2818OE064**

**Projektnehmer: Landwirtschaftliches Technologiezentrum
Augustenberg, Technische Universität München, Staatliche Lehr-
und Versuchsanstalt für Gartenbau, Landesforschungsanstalt für
Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern,
Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen,
Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) –
Rheinpfalz, Universität Hohenheim, Bayerische Landesanstalt für
Weinbau und Gartenbau, Leibniz-Institut für Gemüse- und
Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V. (IGZ)**

**Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung
und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des
Deutschen Bundestages im Rahmen des
Bundesprogramms Ökologischer Landbau.**

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau Landwirtschaft (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische und nachhaltige Land- und Lebensmittelwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der BÖL-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in Bonn in die Praxis umgesetzt. Das Programm untergliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder, den Forschungs- und den Informationsbereich.

Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter www.bundesprogramm.de

Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Tel: 0228-6845-3280
E-Mail: boel@ble.de

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Nährstoffmanagement im Ökologischen Gemüsebau mit neuen Düngestrategien und EDV-gestützten Tool – Nutri@ÖkoGemüse

Förderkennzeichen	Zuwendungsempfänger
2818OE013	Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ)
2818OE057	Technische Universität München (TUM) Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme
2818OE058	Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG)
2818OE059	Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV (LFA)
2818OE060	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK NRW)
2818OE061	Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum – Rheinpfalz (DLR)
2818OE062	Universität Hohenheim (UHOH) Zentrum für Ökologischen Landbau (309)
2818OE063	Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG)
2818OE064	Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ)

Laufzeit:

01.03.2019 bis 31.12.2022

Monat der Erstellung:

02/2023

Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Projektpartner

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ)

Kutschenweg 20, 76287 Rheinstetten-Forchheim

PD Dr. Kurt Möller, Projektleiter

Andrea Heckenberger

Dr. Andreas Butz

Technische Universität München (TUM)

Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

Liesel-Beckmann-Str. 2, 85350 Freising-Weißenstephan

Dr. Hans-Jürgen Reents

Dipl. Agr. Biol. Robert Kahle

Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz (DLR)

Queckbrunnerhof, 67105 Schifferstadt

Dr. Karin Postweiler

Nikola Lenz, MSc. Agr.

Dr. Sebastian Weinheimer

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ)

Theodor-Echtermeyer-Weg 1, 14979 Großbeeren

Dr. Carmen Feller

Dr. André Sradnick

Sarah Tietjen, MSc.

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV (LFA)

Dorfplatz 1 OT Gülzow, 18276 Gülzow-Prüzen

Dr. Kai-Uwe Katroschan

Felix Besand, MSc.

Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG)

Diebsweg 2, 69123 Heidelberg

Dr. Karin Rather

Rebecca Frank

Ansgar Geisen

Janik Nußbaum

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG)

Galgenfuhr 21, 96050 Bamberg

Andreas Schmitt

Birgit Rascher, Dipl. Ing. (FH)

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (LWK NRW)

Nevinghoff 40, 48147 Münster

Dr. Karl Kempkens

Rachel Fischer, MSc.

Dr. Konrad Egenolf

Philipp Schad, MSc.

Universität Hohenheim (UHOH)

Zentrum für Ökologischen Landbau (309)

Fruwirthstr. 14, 70593 Stuttgart

Dr. Sabine Zikeli

Sophie Stein, MSc.

Carolin Weiler, MSc.

Bodengesundheitsdienst GmbH (BGDBAD)

97199 Ochsenfurt, Marktbreiter Str. 74

Dr. Dietmar Horn

Taifun Tofu GmbH (Taifun)

Bebelstraße 8, 79108 Freiburg

Dr. Kristina Bachteler

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Forschungsbedarf	1
1.1	Herausforderungen des ökologischen Gemüsebaus.....	1
1.2	Wissenschaftliche Ziele und Forschungsbedarf	3
1.3	Organisationsstruktur des Projekts	5
1.4	Literatur	6
2	Forschungsberichte der Arbeitsgruppen.....	8
2.1	Situationsanalyse des ökologischen Freiland-Gemüsebaus	8
2.1.1	Einleitung.....	8
2.1.2	Methodische Voraussetzungen zur Berechnung von Nährstoffbilanzen im ökologischen Gemüsebau	8
2.1.3	Zielsetzung der Untersuchung	12
2.1.4	Material und Methoden	13
2.1.4.1	Betriebsauswahl für Hoftorbilanzen	13
2.1.4.2	Datenerhebung, Dokumentation und Datenauswertung.....	14
2.1.5	Ergebnisse und Diskussion.....	17
2.1.5.1	Bilanzen der Betriebe	17
2.1.5.2	Diskussion	27
2.1.5.3	Schlussfolgerungen	29
2.1.6	Literaturverzeichnis.....	30
2.2	Implementierung und Weiterentwicklung EDV-gestützter Systeme im gärtnerischen Düngungsmanagement	33
2.2.1	Einleitung.....	33
2.2.2	Material und Methoden	34
2.2.2.1	Vergleich der Datenbanken und Modelle (NDICEA, N-Expert).....	34
2.2.2.1.1	Vergleich der Datenbanken.....	34
2.2.2.1.2	Vergleich mit in der Praxis erhobenen Daten	34
2.2.3	Weiterentwicklung und Validierung der Modelle (NDICEA, N-Expert)	35
2.2.3.1	Validierung	35
2.2.3.1.1	N-Expert.....	35
2.2.3.1.2	NDICEA	35
2.2.3.2	Erweiterung und Anpassung der Datenbanken.....	35
2.2.3.3	Praxisvergleich verschiedener Düngungskonzepte.....	35
2.2.3.4	Berechnungen	39
2.2.3.5	Datenverarbeitung und statistische Auswertung	40
2.2.4	Ergebnisse und Diskussion.....	40
2.2.4.1	Vergleich der Modelle und Datenbanken	40

2.2.5	Vergleich mit in der Praxis erhobenen Daten	45
2.2.5.1	Frischmasse	45
2.2.5.2	Stickstoffgehalte	46
2.2.6	Weiterentwicklung und Validierung der Programme.....	47
2.2.6.1	N-Expert	47
2.2.6.1.1	Offline Version	47
2.2.6.1.2	Datenbankaktualisierungen.....	48
2.2.6.1.3	Algorithmen.....	48
2.2.6.1.4	Berücksichtigung der N-Mineralisierung aus organischen Düngern und Ernteresten des Vorjahres	50
2.2.6.1.5	Validierung und Implementierung des Algorithmus zur Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz.....	50
2.2.6.1.6	Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit/Implementierungshürden	50
2.2.6.1.7	Webbasierte Version von N-Expert	51
2.2.6.1.8	Schwefelschätzrahmen nach N-Expert.....	51
2.2.6.2	NDICEA.....	52
2.2.6.2.1	Neuprogrammierung und Weiterentwicklung.....	52
2.2.6.2.2	Einblick in den neuen Rechenkern	54
2.2.6.2.3	Kalibrierungsalgorithmus.....	56
2.2.6.2.4	Initialisierungsalgorithmus	60
2.2.6.2.5	Neuerungen in der aktuellen Webversion von NDICEA 7.....	60
2.2.6.2.6	Validierung.....	63
2.2.6.3	Vergleich der verschiedenen Düngekonzepte in Praxisversuchen	65
2.2.7	Schlussfolgerungen	67
2.2.7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	68
2.2.7.2	Potentiale der EDV-gestützten Programme	68
2.2.8	Literatur	68
2.3	Ansätze zur Erhöhung der N-Inputs über biologische N ₂ -Fixierung in gärtnerischen Systemen	70
2.3.1	Legume Lebendmulche	71
2.3.1.1	Einleitung.....	71
2.3.1.2	Material und Methoden	72
2.3.1.3	Ergebnisse	73
2.3.1.4	Weizennachbau.....	77
2.3.1.5	Diskussion	78
2.3.2	Legume Winterzwischenfrüchte	79

2.3.2.1	Einleitung.....	79
2.3.2.2	Versuche in Süd- und Westdeutschland	81
2.3.2.2.1	Material und Methoden	81
2.3.2.2.2	Ergebnisse.....	82
2.3.2.2.3	Diskussion	87
2.3.2.3	Versuche in Norddeutschland.....	89
2.3.2.3.1	Material und Methoden	89
2.3.2.3.2	Versuchsaufbau	90
2.3.2.3.3	Analytik	91
2.3.2.3.4	Ergebnisse.....	92
2.3.2.4	Diskussion.....	96
2.3.3	Integration von Klee gras in gemüsebauliche Fruchtfolgen	97
2.3.3.1	Einleitung.....	97
2.3.3.2	Material und Methoden	98
2.3.3.2.1	Standort	98
2.3.3.2.2	Analytik	98
2.3.3.3	Ergebnisse	100
2.3.3.4	Diskussion	105
2.3.4	Literatur	106
2.4	Alternative N-Düngemittel: Nährstoffverfügbarkeit, -input im Boden und Einfluss des Ausbringungsverfahrens	110
2.4.1	Einleitung.....	110
2.4.2	Ergebnisse Versuche alternative N-Düngemittel in Kleinhohenheim (UHOH) und Grötzingen (LTZ)	113
2.4.2.1	Material und Methoden.....	113
2.4.2.1.1	Standorte und Behandlungen.....	113
2.4.2.1.2	Bonituren und Feldmessungen	114
2.4.2.1.3	Statistik	115
2.4.2.2	Ergebnisse	115
2.4.2.2.1	Zusammensetzung der Düngemittel.....	115
2.4.2.2.2	Erträge.....	117
2.4.2.2.3	Nitratgehalte im Boden.....	120
2.4.2.2.4	Nährstoffabfuhr und Bilanzen	121
2.4.2.3	Diskussion.....	125
2.4.2.4	Literatur	127
2.4.3	Ergebnisse Versuche alternative N-Düngemittel am Queckbrunnerhof (DLR) 129	

2.4.3.1	Material und Methoden	129
2.4.3.1.1	Kohl als 1. Kultur	130
2.4.3.1.2	Herbst-Spinat als 2. Kultur	130
2.4.3.1.3	Winterweizen als 3. Kultur	130
2.4.3.1.4	Bewässerung	130
2.4.3.1.5	Bodenproben	131
2.4.3.1.6	Flächenkennwerte	131
2.4.3.1.7	Pflanzenproben	131
2.4.3.1.8	Düngemittel	131
2.4.3.1.9	SPAD-Messung	132
2.4.3.2	Ergebnisse	132
2.4.3.2.1	Weißkohl	132
2.4.3.2.2	Spinat	133
2.4.3.2.3	Winterweizen	134
2.4.3.2.4	SPAD-Messungen	134
2.4.3.3	Diskussion	135
2.4.3.4	Schlussfolgerungen	136
2.4.3.5	Literaturverzeichnis	136
2.4.4	Ergebnisse des Systemversuchs Cut & Carry in Gülzow (LFAMV)	139
2.4.4.1	Einleitung	139
2.4.4.2	Material und Methoden	140
2.4.4.2.1	Standort	140
2.4.4.2.2	Versuchsaufbau	140
2.4.4.2.3	Probenahme und Analytik	141
2.4.4.2.4	Kulturführung	141
2.4.4.3	Ergebnisse	144
2.4.4.4	Diskussion	148
2.4.4.5	Literatur	149
2.4.5	Ergebnisse Gewächshausversuche in Bamberg (LWG)	149
2.4.5.1	Versuchsfrage und Versuchshintergrund	149
2.4.5.2	Kultur- und Versuchshinweise	149
2.4.5.3	Ergebnisse	151
2.5	Düngewirkung als Interaktion von Dünger und Bodeneigenschaften	154
2.5.1	Einleitung	154
2.5.2	Material und Methoden	155
2.5.2.1	Böden	156
2.5.2.2	Düngemittel	157

2.5.2.3	Versuchsansätze	157
2.5.2.3.1	Inkubationsversuche	159
2.5.2.3.2	Pflanzenversuche	161
2.5.2.4	Untersuchungsmethoden.....	162
2.5.2.5	Datenverarbeitung und statistische Auswertung	163
2.5.3	Ergebnisse	164
2.5.3.1	Einfluss der Bodenart auf die N-Mineralisation	164
2.5.3.2	Einfluss von Bodenart und Düngemittel-C/N-Verhältnis auf die Netto-N-Mineralisation	172
2.5.3.3	Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungspotentials	178
2.5.4	Diskussion	180
2.5.4.1	Einfluss des Tongehalts auf die N-Mineralisation.....	180
2.5.4.2	Einfluss des Tongehalts auf die Netto-N-Mineralisation und Wechselwirkung mit dem Düngemittel	181
2.5.4.3	Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungspotentials	184
2.5.5	Zusammenfassung	184
2.5.6	Fazit	186
2.5.7	Literatur	186
3	Ökologischer Gemüsebau - Herausforderungen und Lösungsansätze	189
3.1	Literatur	195
4	Übersicht über Veröffentlichungen zum Projekt.....	196
5	Zusammenfassung.....	196
6	Anhang.....	203
6.1	Anhang 2.2.-1: Fragebogen Hoftorbilanzierung	203

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1-1: Ertragsrelationen von ökologischem zu konventionellem Freilandgemüsebau in verschiedenen Statistiken und Datensammlungen	8
Tabelle 2.1-2: Herausforderungen und Festlegungen für Nährstoffbilanzierung ökologischer Gemüsebaubetriebe	12
Tabelle 2.1-3: Übersicht der teilnehmenden Gemüsebau-Betriebe inklusive Verbandszugehörigkeit, Betriebsgröße (ha), durchschnittliche Anzahl der Kulturen, Anteil des Gemüses an Gesamtfläche und Fruchtfolge (FF), Nutzung einer Futter-Mist-Kooperation (FMK) und Anzahl der untersuchten Jahre. Durch die Farbgebung der einzelnen Betriebe sind sie in späteren Tabellen und Abbildungen leichter zu identifizieren.	14
Tabelle 2.1-4 Anteil der biologischen N ₂ -Fixierung (BNF) und Kategorisierung der verwendeten Düngemittel der Einzelbetriebe. LPM = Landschaftspflegematerial, HTK = Hühnertrockenkot.....	15
Tabelle 2.1-5 Aufteilung der erfassten Betriebsjahre (und Betriebe) in verschiedenen Bewirtschaftungskategorien	16
Tabelle 2.1-6: Nährstoff Input, Output, Saldo nach verschiedenen Bewirtschaftungskategorien	27
Tabelle 2.1-7: Nährstoffsalden pro Jahr in Ackerbaubetrieben in Sachsen (Kolbe, 2015).....	28
Tabelle 2.2-1: Übersicht zu den im AP 3 durchgeführten Versuchen	37
Tabelle 2.2-2: Probenumfang der im AP3 durchgeführten Praxisversuche. Für die Beprobung des Bodens wurde je Variante eine Mischprobe aus 16 Einstichen gezogen.....	39
Tabelle 2.2-3: Liste für Methoden der Bodenuntersuchungen.....	39
Tabelle 2.2-4: Eigenschaften und Unterschiede von N-Expert und NDICEA.....	40
Tabelle 2.2-5: Vergleich der in N-Expert und NDICEA hinterlegten Standarddaten zur Frischmasse von Feldabfuhr und Ernteresten [dt ha ⁻¹] mit den Versuchsdaten des AP3.....	46
Tabelle 2.2-6: Vergleich der in N-Expert und NDICEA hinterlegten N-Gehalte in Feldabfuhr und Ernteresten [ppm] mit den Versuchsdaten des AP3.....	47
Tabelle 2.2-7: Überblick über im Projektkontext veröffentlichte Offline-Versionen von N-Expert	48
Tabelle 2.2-8: Ausgewählte NDICEA Parameter zur Kalibrierung.....	56
Tabelle 2.2-9: Mit Modellen berechnete Mittelwerte und Standardfehler für Düngergaben und Frischmasseerträge der Versuche	65
Tabelle 2.3-1: LM-Biomasseaufwuchs, N-Konzentration, C/N-Verhältnis und N-Gehalt der oberirdischen Biomasse der verschiedenen LM-Behandlungen zum Zeitpunkt des Umbruchs bzw. der Kohlpflanzung. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen der LM-Arten ($\alpha = 0,05$).	74
Tabelle 2.3-2: Einfluss der LM-Behandlungen auf den Boden-N _{min} -Gehalt in kg ha ⁻¹ während des Vegetationsverlaufs. Werte mit mindestens einem identischen	

Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen der LM-Arten ($\alpha = 0,05$).	77
Tabelle 2.3-3: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf deren Biomasseaufwuchs, die N-Konzentration und das C/N-Verhältnis der oberirdischen Biomasse sowie die N-Aufnahme kurz vor dem Umbruch und der Einarbeitung der WZF. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF- Varianten ($\alpha = 0,05$).	83
Tabelle 2.3-4: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf den Ertrag eines nachfolgenden Weißkohls, unterteilt in marktfähige und nicht- marktfähige Köpfe, sowie auf die Masse an Ernterückständen. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).	83
Tabelle 2.3-5: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf den N_{\min} - Gehalt im Boden zu unterschiedlichen Terminen in den Bodentiefen 0-30, 30-60 und 60-90 cm. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha =$ 0,05).....	85
Tabelle 2.3-6: Untersuchte Winterzwischenfruchtarten am Standort Gülzow (LFA).	90
Tabelle 2.3-7: Beprobungstermine der Winterzwischenfrüchte	91
Tabelle 2.3-8: ANOVA Ergebnisse der WZF-Biomassebeprobungen.	94
Tabelle 2.3-9: N_{\min} -Gehalte 14 (2019) bzw. 13 (2020) Tage nach KAS-Düngung zur Realisierung des hohen Ansaat- N_{\min} -Niveaus.	94
Tabelle 2.3-10: Näherungsweise N_2 -Fixierungsleistung und C/N-Verhältnis (in Klammern) der Varianten bei niedrigem Ansaat- N_{\min} -Niveau.....	94
Tabelle 2.3-11: Netto-N-Wiederfindung des oberirdischen Winterzwischenfrucht-N (zum Umbruchtermin (im nachgebauten Weißkohl (zur Ernte))).	95
Tabelle 2.3-12: Faktoren und Faktorausprägungen Satellitenversuch Kleegrasnutzung.....	98
Tabelle 2.3-13: Beprobungstermine (T1 – T4) der Gründungsphase (V1 2018 – 2020; V2 2019 – 2021).....	99
Tabelle 2.3-14: Mittelwerte (n=3) der N_f -Mengen, C/N-Verhältnisse und N_2 - Fixierungsleistungen des jeweils letzten Schnitttermins vor Umbruch.	102
Tabelle 2.3-15: p-Werte kleiner 0,1 aus ANOVA der N_2 -Fixierungsleistung zu den jeweiligen Schnittzeitpunkten (T1-T4) bzw. des C/N Verhältnisses zum Umbruchtermin T4.	102
Tabelle 2.4-1: Mittelwerte (MW) der Nährstoffkonzentrationen und des C/N- Verhältnisses der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 (n=4, Tofumolke n=6).	116
Tabelle 2.4-2: Mittelwerte (MW) der Spurenelementkonzentrationen und der Gehalte an potentiell toxischen Elementen der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 (n=4, Tofumolke n=6).	116
Tabelle 2.4-3: Varianztabelle der Biomasseerträge, der N-Konzentration und der N- Abfuhr von Kohl, Spinat und Winterweizen, und ggf. von der N-Aufnahme	

von deren Ernteresten - gemeinsame Auswertung der Standorte Grötzingen und Kleinhohenheim.	117
Tabelle 2.4-4: Varianztabelle der Nitratgehalte im Boden zu unterschiedlichen Zeitpunkten - gemeinsame Auswertung der Standorte Grötzingen und Kleinhohenheim.	120
Tabelle 2.4-5: Niederschlag und Beregnungsmenge der Jahre 2019-2021 in den Kulturen Weißkohl und Spinat.....	130
Tabelle 2.4-6: Boden-Analyseergebnisse der Versuchsfelder der Jahre 2019-2021	131
Tabelle 2.4-7: Gesamt-Stickstoffgehalt und Gesamt-Kohlenstoffgehalt der am Queckbrunnerhof verwendeten Düngemittel	131
Tabelle 2.4-8: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils ± Standardabweichung des Weißkohls 2019.....	132
Tabelle 2.4-9: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils ± Standardabweichung des Weißkohls 2020.....	133
Tabelle 2.4-10: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils ± Standardabweichung des Weißkohls 2021.....	133
Tabelle 2.4-11: Gesamtaufwuchs ± Standardabweichung der Zweitkultur Spinat der Jahre 2019-2021.....	134
Tabelle 2.4-12: Kornertrag und Strohertrag ± Standardabweichung der Erntejahre 2020 und 2021.....	134
Tabelle 2.4-13: SPAD-Messwerte des Weißkohls zu Beginn der Kopfbildung ± Standardabweichung des Weißkohls der Jahre 2019-2021.....	134
Tabelle 2.4-14: Analyseergebnisse der einzelnen Fraktionen der Tofumolke 2019.	136
Tabelle 2.4-15: N_{\min} -Werte der Kulturfolge 2019-2020.....	137
Tabelle 2.4-16: N_{\min} -Werte der Kulturfolge 2020-2021	138
Tabelle 2.4-17: N_{\min} -Werte des Jahres 2021.....	139
Tabelle 2.4-18: Übersicht der Varianten und der Fruchtfolge.....	141
Tabelle 2.4-19: N-Zufuhr mit Haarmehlpellets (HMP)	142
Tabelle 2.4-20: Annahmen zur Schätzung der N_2 -Fixierungsleistung (N_{dfa}).	143
Tabelle 2.4-21: Mittels linearer Regression aus Annahmen in Tabelle 2.4-18 berechnete N_{dfa} -Anteile am pflanzlichen Gesamtstickstoff (N_t) über Schnitthöhe bzw. oberirdisch.....	143
Tabelle 2.4-22: N_{\min} , N-Zufuhr, N-Abfuhr und N-Saldo aller vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder und Wiederholungen. Fruchtfolgefeld (n der Datensätze): Porree (6), Salat (4), Brokkoli (4), Rote Bete (2).....	146
Tabelle 2.4-23: N-Konzentration und C/N-Verhältnis der oberirdischen Kleegrassbiomasse sowie geschätzte N_2 -Fixierungsleistung für einzelne Schnitttermine bei Schnittgutabfuhr (C&C) und Mulchnutzung (Mulch).....	148
Tabelle 2.4-24: N-Gehalt in FM der Grunddüngung mit 70 kg N ha ⁻¹ als Kleepura, Kleegrassilage und Horngries nach Versuchsplan	150
Tabelle 2.4-25: Einfluss der Dünger auf die N_{\min} -Gehalte, kulturbegleitend:	150
Tabelle 2.5-1: Herkunft der Böden.....	156
Tabelle 2.5-2: Korngrößenverteilung und Bodenart	156

Tabelle 2.5-3: Bodeneigenschaften	157
Tabelle 2.5-4: Düngemittel	157
Tabelle 2.5-5: Inkubationsversuche	159
Tabelle 2.5-6: Pflanzenversuche	161
Tabelle 2.5-7: verwendete Methoden nach VDLUFA Methodenbuch I.....	162

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1-1: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha^{-1}	18
Abbildung 2.1-2: Einzelbetriebliche Hoftorbilanzen für Stickstoff, Phosphor und Kalium in kg ha^{-1}	18
Abbildung 2.1-3: Anteil (%) der Herkunft des Inputs für die jeweiligen Nährstoffe.....	19
Abbildung 2.1-4: P- und K-Frachten je Einheit Stickstoff der auf den Betrieben eingesetzten Düngemittel im Vergleich zum mittleren Bedarf von Gemüse- und Nicht-Gemüse-Kulturen.	20
Abbildung 2.1-5: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha^{-1}) und N-Saldo (kg ha^{-1}).	21
Abbildung 2.1-6: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha^{-1}) und N-Output (kg ha^{-1}).....	21
Abbildung 2.1-7: Zusammenhang zwischen N-Input durch Keratindünger (kg ha^{-1}) und N-Saldo (kg ha^{-1}).	22
Abbildung 2.1-8: Anteile (%) des N-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.	23
Abbildung 2.1-9: Zusammenhang zwischen P-Input durch Grunddünger (kg ha^{-1}) und P-Saldo (kg ha^{-1}).	23
Abbildung 2.1-10: Zusammenhang zwischen P-Input durch Grunddünger (kg ha^{-1}) und P-Effizienz. Betrieb TUM1 nicht berücksichtigt, weil keine P-Düngung erfolgte.	24
Abbildung 2.1-11: Zusammenhang zwischen K-Input (kg ha^{-1}) und K-Saldo (kg ha^{-1}).....	24
Abbildung 2.1-12: Anteile des K-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.	25
Abbildung 2.1-13: Nährstoffeffizienz der Nährstoffe in den verschiedenen Betrieben.	26
Abbildung 2.1-14: Beziehung zwischen N-Input und N-Saldo in ökologischen und konventionellen Pilotbetrieben (Hülsbergen et al., 2022; Hülsbergen und Rahmann, 2015)	29
Abbildung 2.2-1: Schema des Aufbaus der kulturspezifischen Daten von N-Expert und NDICEA	42
Abbildung 2.2-2: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA (n = 47)	43
Abbildung 2.2-3: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA mit den durchschnittlichen Angaben zur ökologischen Feldabfuhr in NDICEA (n = 47)	44
Abbildung 2.2-4: Korrelation der Nährstoffkonzentrationen (N, P, K) identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA (n = 47).....	45
Abbildung 2.2-5: N-Aufnahme von Wintergemüse in N-Expert 4.5.4.....	49
Abbildung 2.2-6: N-Aufnahme von Winterkulturen in N-Expert 4.5.4.....	49
Abbildung 2.2-7: Nutzeroberfläche und Test Schnittstelle zur Überprüfung des neuen Rechenkerns. Die beiden Zeitlichen N_{\min} Verläufe für NDICEA 6 (pink) und NDICEA 7 (blau) liegen genau übereinander.....	53
Abbildung 2.2-8: Softwarearchitektur der NDICEA 7 Webanwendung	54
Abbildung 2.2-9: Übersicht über die modulare Struktur des Rechenkerns	55
Abbildung 2.2-10: Python Code für die Methode zur Berechnung der Stickstofffixierung aus dem Stickstoffteilmodell	55

Abbildung 2.2-11: Kalibrierungsbutton NDICEA 7.....	57
Abbildung 2.2-12: Verlauf der Parameterwerte (Y-Achse) für jede Iteration (X-Achse) eines Kalibrierungslaufes für zwölf unterschiedliche Szenarien mit ihrer dazugehörigen Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE).....	59
Abbildung 2.2-13: Erste Ansicht des Boden-Menüs.....	60
Abbildung 2.2-14: Ausführliches Boden-Menü.....	61
Abbildung 2.2-15: Auswahl des Standortes, für den Wetterdaten abgerufen werden.....	61
Abbildung 2.2-16: Kumulative Stickstoffverfügbarkeit & Pflanzenaufnahme in einer Fruchtfolge. Berechnungen in der Zukunft erfolgen über Nutzung von Wetterdaten aus vier Vorjahren, für die jeweils ein Szenario gerechnet wird. Dargestellt werden Minimum, Maximum und der Mittelwert.....	62
Abbildung 2.2-17: Verlauf der Kohlenstoffmenge im Oberboden und jährliche Bilanzen als Balkendiagramme des Abbaus und Eintrags von organischer Substanz.....	63
Abbildung 2.2-18: Verteilung der mittleren absoluten Abweichung (RMSE) gemessenem zu mineralischem Stickstoff. A vor schlagweise Kalibrierung, B nach Kalibrierung.....	64
Abbildung 2.2-19: N-Effizienz der Praxisversuche.....	66
Abbildung 2.2-20: Ergebnisse der Praxisversuche (N_{\min} -N [kg ha ⁻¹] im Boden zur Ernte in 0-30 und 30-60 cm Tiefe).....	66
Abbildung 2.3-1: Einfluss der LM-Behandlungen und der Wachstumsmanagement- Behandlungen auf den Gesamt-Frischmasseertrag des Kohls in t ha ⁻¹ . Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht- signifikante Unterschiede zwischen den LM-Behandlungen ($\alpha = 0,05$). K=Kontrolle, WG=Dt. Weidelgras, WK-H=Weißklee im Herbst gesät, WK- F=Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H=Mikroklee im Herbst gesät, MK- F=Mikroklee im Frühjahr gesät.....	74
Abbildung 2.3-2 : Einfluss der Wachstumsmanagement-Behandlungen (A) und der LM- Behandlungen (B) auf das Gewicht der Erntereste des Kohls in t TM ha ⁻¹ . Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht- signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen ($\alpha = 0,05$). K=Kontrolle, WG=Dt. Weidelgras, WK-H=Weißklee im Herbst gesät, WK- F=Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H=Mikroklee im Herbst gesät, MK- F=Mikroklee im Frühjahr gesät.....	75
Abbildung 2.3-3: Einfluss der LM-Behandlungen auf die N-Aufnahme durch die Kohlköpfe, die Erntereste und die Lebendmulche in kg ha ⁻¹ zum Ende der Kohlvegetation. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den LM-Behandlungen (α = 0,05). K=Kontrolle, WG=Dt. Weidelgras, WK-H=Weißklee im Herbst gesät, WK-F=Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H=Mikroklee im Herbst gesät, MK-F=Mikroklee im Frühjahr gesät.....	76
Abbildung 2.3-4: Einfluss der Wachstumsmanagement-Behandlungen auf den Weizenertrag in t ha ⁻¹ für die Erntejahre 2020 und 2021. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante	

Unterschiede zwischen den Wachstumsmanagement-Behandlungen ($\alpha = 0,05$).....	78
Abbildung 2.3-5: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf die N-Aufnahme des Weißkohls zu Kulturende. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).....	84
Abbildung 2.3-6: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) vor Weißkohl auf den Ertrag eines nachfolgenden Winterweizens in $t\ ha^{-1}$ für die Erntejahre 2020 und 2021. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).	86
Abbildung 2.3-7: Aufwuchs-Trockenmasse verschiedener Winterzwischenfrüchte zu unterschiedlichen Terminen (1: 07.04.2020, 2: 23.04.2020, 3: 07.05.2020, 4: 20.05.2020), Mittelwert aus vier Wiederholungen \pm Standardabweichung.....	87
Abbildung 2.3-8: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf den Ertrag eines nachfolgenden Weißkohls, Mittelwert aus vier Wiederholungen \pm Standardabweichung. Balken mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten.....	87
Abbildung 2.3-9: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) vor Weißkohl auf den Korn- (links) und Strohtrockenmasseertrag (rechts) eines nachfolgenden Winterweizens in $dt\ ha^{-1}$. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten.	87
Abbildung 2.3-10: Lufttemperaturen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gülzow im Vergleich zum langjährigen Mittel (grün) der Wetterstation in Gülzow.	89
Abbildung 2.3-11: Niederschlagssummen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gülzow im Vergleich zum langjährigen Mittel der Wetterstation in Gülzow (graue Fläche).....	90
Abbildung 2.3-12: N-Menge im oberirdischen Aufwuchs unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte (WZF) sowie dessen C/N-Verhältnis zu jeweils 5 Beprobungsterminen in den Jahren 2020 und 2021.	93
Abbildung 2.3-13: Mittlere N-Aufnahmen des nach unterschiedlichen Winterzwischenfrüchten (WZF) angebauten Weißkohls in Abhängigkeit der WZF-Variante („CTRL“ Brache, „GR“ Grünroggen, „WR“ Wickroggen, „LG“ Landberger Gemenge, „WE“ Wintererbse, „WW“ Winterwicke) und des Faktors Ansaat-N _{min} -Niveau („hoch“ und „niedrig“). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).	95
Abbildung 2.3-14: N ₂ -Fixierungsleistung in Abhängigkeit von Herbst-N _{min} -Niveau „hoch“ = Ausgangsniveau $112\ kg\ N_{min}\ ha^{-1}$ (2018) bzw. $56\ kg\ N_{min}\ ha^{-1}$ (2019) + $100\ kg\ N\ ha^{-1}$ als KAS. Mittelwerte ohne gemeinsamen	

Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).....	101
Abbildung 2.3-15: N-Aufnahme des nachgebauten Weißkohls unterschieden in Erntegut („Kohl-N“) und Ernterest. Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).....	103
Abbildung 2.3-16: Mittlere Fraktionsanteile (Gras, Beikraut, Klee) und N_t -Mengen in der Schnittguttrockenmasse aller Versuchsvarianten zu allen abfuhrdifferenzierten Schnittterminen.	104
Abbildung 2.4-1: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel auf den Mittelwert der Weißkohlerträge ($t\ ha^{-1}$) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2019 und 2020. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.....	118
Abbildung 2.4-2: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die Nachwirkung bei Spinat – Mittelwert der Spinaterträge ($t\ ha^{-1}$) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2019 und 2020. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen.....	119
Abbildung 2.4-3: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die Nachwirkung Winterweizen – Mittelwert der Winterweizenerträge ($t\ ha^{-1}$) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	120
Abbildung 2.4-4: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel auf die N-Aufnahme von Weißkohl – Mittelwert an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	121
Abbildung 2.4-5: relativen N-Düngewirkung verschiedener organischer Düngemittel zu Weißkohl im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle – Mittelwert an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle.	122
Abbildung 2.4-6: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Nachwirkung zur ungedüngten Zweitfrucht Spinat – Mittelwert der N-Abfuhrn ($kg\ N\ ha^{-1}$) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der	

Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	123
Abbildung 2.4-7: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Abfuhr bei der Messung der N-Nachwirkung zum ungedüngten Winterweizen als zweite Nachfrucht – Mittelwert der Korn-N-Abfuhr (kg N ha^{-1}) aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	124
Abbildung 2.4-8: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Abfuhr bei der Messung der N-Nachwirkung zum ungedüngten Winterweizen als zweite Nachfrucht – Mittelwert der Korn-N-Abfuhr (kg N ha^{-1}) getrennt ausgewiesen für die Standorte Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	124
Abbildung 2.4-9: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die zusätzlichen N-Abfuhr von Weißkohl – Spinat und Winterweizen – (kg N ha^{-1}). Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	125
Abbildung 2.4-11: Erträge der vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder und Wiederholungen. Fruchtfolgefeld (in Klammern: n der Datensätze): Porree (6), Salat (4), Brokkoli (4), Rote Bete (2).	145
Abbildung 2.4-12: Mittlere N-Nutzungseffizienz der jeweiligen Gesamtfruchtfolge (NUE_{FF}) mit Standardabweichung. Berücksichtigt wurden alle vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder.	147
Abbildung 2.4-13: Mittlere N-Versorgungseffizienz (NSE) der Fruchtfolgefelder der Systeme mit Standardabweichungen.	147
Abbildung 2.4-14: Schattenwurf im Bestand durch die Konstruktion des GWH.	151
Abbildung 2.4-15: Einfluss der Düngung auf Ertrag Tomate und gebildete Grünmasse.	151
Abbildung 2.4-16: Gewächshaus mit umfangreichen Einbauten im Dachbereich am 9.3.2020 bei der Ausbringung der organischen Düngemittel nach Versuchsplan.	152
Abbildung 2.4-17: Erträge in Stück/Einzelpflanze, absolute und relative Reihenerträge.	153
Abbildung 2.5-1: Inkubationsversuche und Pflanzenversuche. a = Respirometer-Brutschrank, b = Probengefäße im Respirometer, c = Wuchshöhe Roggen, d = großblättrige Kresse.	158

Abbildung 2.5-2: Verlauf der N_{min} -Vorräte und der mikrobiellen Aktivität in Abhängigkeit von der Bodenart; Mittelwerte aller Böden der 4 Standorte (VH, HK, ED, ZF); Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	164
Abbildung 2.5-3: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart. Wuchshöhe sowie Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen; Mittelwerte der Böden der 4 Standorte (VH, HK, ED, ZF); Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	165
Abbildung 2.5-4: Verlauf der N_{min} -Entwicklung und der mikrobiellen Aktivität ackerbaulich und gartenbaulich genutzter Böden in Abhängigkeit von der Bodenart; Mittelwerte der Böden der ackerbaulich genutzten Standorte (VH, HK), links oben N_{min} und links unten R_h (Basalatmung) sowie der gartenbaulich genutzten Standorte (ED, ZF), rechts oben N_{min} und rechts unten R_h ; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	166
Abbildung 2.5-5: Verlauf der Pflanzenentwicklung ackerbaulich und gartenbaulich genutzter Böden in Abhängigkeit von der Bodenart; Wuchshöhe sowie Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte (Mittelwert für VH und HK), Wuchshöhe links oben und SPAD links unten sowie der gartenbaulich genutzten Standorte (Mittelwert für ED und ZF), Wuchshöhe rechts oben und SPAD unten rechts; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	167
Abbildung 2.5-6: Verlauf der N_{min} -Entwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; ackerbaulich genutzte Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	168
Abbildung 2.5-7: Verlauf der mikrobiellen Aktivität in Abhängigkeit von Bodenart je Standort; ackerbaulich genutzte Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	169
Abbildung 2.5-8: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; Wuchshöhe von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und der gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	170
Abbildung 2.5-9: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und der	

gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	171
Abbildung 2.5-10: Pflanzliche N-Aufnahme von Roggen nach 42 Tagen in Abhängigkeit von der Bodenart; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.....	172
Abbildung 2.5-11: Maximale Netto-N-Mineralisation in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart; Daten aus dem Inkubationsversuch 2, links und dem Inkubationsversuch 5, rechts; mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm; Hornmehl, Glu = Glutaminsäure, KG10 = Kleegrasschnitt mit C/N 11, KG15 = Kleegrasschnitt mit C/N 15, KG20 = Kleegrasschnitt mit C/N 20.	173
Abbildung 2.5-12: Verlauf der Netto-N-Mineralisation in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart; Daten aus dem Inkubationsversuch 5; mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.....	174
Abbildung 2.5-13: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von Düngemittel und Bodenart des Standorts VH; Wuchshöhe von Roggen; Daten aus dem Pflanzenversuch 2, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.	176
Abbildung 2.5-14: Düngereffekt in Abhängigkeit von der Bodenart und Dünger-C/N auf Pflanzen-Netto-N-Aufnahme von Roggen im Verhältnis zur ungedüngten Kontrolle nach 42 Tagen; Ackerbaustandorte VH oben links und HK oben rechts, Feldgemüsestandorte ZF unten links und ED unten rechts. Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Düngemittel geordnet nach aufsteigendem C/N-Verhältnis mit C/N 3,5 = Haarmehlpellets, C/N 10,8 = Ackerbohenschrot, C/N 13,1 = Kleepellets und C/N 15,1 = Sonnenblumensamenpresskuchen.	177
Abbildung 2.5-15: Korrelation unterschiedlicher Boden- und Pflanzenparameter. Daten aus Pflanzenversuch 3, über alle Böden und Standorte (VH, HK, ED, ZF). Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität – Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizienten), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. Höhe = finale Pflanzenwuchshöhe, SPAD = finaler Pflanzen N-Status, TM = finale Pflanzen-Biomasse, FM = finale Pflanzen-Frischmasse, NMenge = finale aufgenommene Pfl.-N-Menge, NetNAufnahme = finale Pfl. Netto-N-Aufnahme, Nmin = Start-Nmin, CorgNt = Corg/Nt-Verhältnis, Clay = Tongehalt, Silt = Schluffgehalt, Sand = Sandgehalt, Nt = Boden-Nt-Gehalt, Corg = Boden-Corg-Gehalt, CHWL = CHWL, NHWL = NHWL, CNHWL = CHWL/NHWL-Verhältnis, CNDuenger = Dünger-C/N-Verhältnis, NtDuenger = Dünger-Nt-Gehalt, P_EA = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K_EA = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse), pH = Boden-pH-Wert, NO3_DE = Start-Nitrat-Gehalt (EUF-Analyse), Norg_DE = Boden-Norg-Gehalt (EUF-	

Analyse, 1.+2. Extraktion), Norg1_DE = Boden-Norg-Gehalt (EUF-Analyse,
1. Extraktion), Norg2_DE = Boden-Norg-Gehalt (EUF-Analyse, 2.
Extraktion).....179

1 Problemstellung und Forschungsbedarf

1.1 Herausforderungen des ökologischen Gemüsebaus

Im Rahmen der allgemeinen Debatte zu Natur- und Ressourcenschutz sowie des nachhaltigen Handelns werden alle Bereiche von Landwirtschaft und Gartenbau kritisch betrachtet. Ein Aspekt ist die Nutzung der Nährstoffe für das Pflanzenwachstum und die möglichen Auswirkungen auf Boden, Wasser und Luft. Die Praxis des ökologischen Landbaus versucht die Anforderungen unter anderem mit dem Prinzip des Nährstoffkreislaufes innerhalb eines Betriebes zu erfüllen (oekolandbau 2022, Deumlich et al. 2016).

Nährstoffbilanzen werden genutzt, um Nährstoffflüsse von und zum Betrieb zu beurteilen und zu bewerten. Eine ausgeglichene Bilanz wird als Zeichen eines angestrebten Nährstoffkreislaufs bewertet. (LfL, 2022) Wie weit ein solcher Kreislauf geschlossen sein kann, hängt stark ab vom Betriebstyp und dessen innerbetrieblichen Nährstoffströme.

Einige Erhebungen zeigen, dass es im Nährstoffmanagement von Sonderkulturen im ökologischen Landbau zu erheblichen Nährstoffungleichgewichten kommen kann (von Fragstein et al. 2004, Cuijpers et al. 2008, Voogt 2014, Titarelli et al. 2017, Zikeli et al. 2017, Möller 2018). Spezialisierte Gemüsebetriebe haben einen sehr hohen Nährstoffbedarf durch das schnelle Massenwachstum der Gemüsearten und die Menge der verkauften pflanzlichen Produkte. In der Regel haben diese Betriebe keine oder nur eine geringe Tierhaltung und deshalb spielt ein außerbetrieblicher Nährstoffaustausch eine ungleich größere Rolle als in Gemischtbetrieben mit Tierhaltung. Bei zahlreichen Gemüsekulturen ist insbesondere der N- und K-Bedarf deutlich höher als in Ackerkulturen, sodass bei der Produktion von Gemüsearten mit einem sehr hohen N-Bedarf (z. B. Blumenkohl, Brokkoli, Rosenkohl) sowohl die Ertrags- als auch die Qualitätssicherung bei den gegebenen Ertragserwartungen unter den Bedingungen des ökologischen Anbaus eine besondere Herausforderung darstellen.

Eine primäre Ausrichtung der Düngung auf den N-Bedarf auf der Basis von Wirtschaftsdüngern führt auf längere Sicht zu einer Anreicherung von P im Boden, da Festmist und Komposte einen relativ höheren P-Gehalt haben, der über der Pflanzenabfuhr liegt. Der K-Gehalt von in Festmist kann je nach Aufstallung geringer sein als der Bedarf von Gemüsepflanzen, so dass das Niveau des verfügbaren Kaliums im Boden mit kontrolliert werden sollte. P-Salden können die Kontrollwerte nach der DüV überschreiten. Zusätzlich können auch S-Überschüsse entstehen (von Fragstein et al. 2004, Titarelli et al. 2017, Zikeli et al. 2017, Möller 2018).

Die Nutzung von Leguminosen zur Stickstoffversorgung im Gemüsebau wird in den letzten Jahren zunehmend diskutiert und ausprobiert. Sie reicht bisher noch nicht aus und hat viele Folgewirkungen im Betriebszusammenhang.

Unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit sind nicht nur die Nährstoffmengen, sondern auch die Effizienz in der Anwendung in Betracht zu ziehen. Die N-Nutzungseffizienz des ökologischen Gemüseanbaus ist teilweise sehr niedrig (Cuijpers et al. 2008, Zikeli et al. 2017), besonders in Systemen mit hohen Anteilen an Festmist oder Komposten. Systeme auf Basis von N-reichen organischen Handelsdüngemitteln zeigen dagegen N-Nutzungseffizienzen, die an die

von konventionellen Systemen heranreichen (Zikeli et al. 2017). Allerdings basieren ausgerechnet jene Handelsdünger mit der höchsten N-Nutzungseffizienz wie Hornprodukte, Federmehle und Schweineborsten auf Reststoffen aus der intensiven konventionellen Tierhaltung oder werden aus Entwicklungsländern importiert. Dadurch ergibt sich ein systemimmanenter Widerspruch zu den übergeordneten Zielen des ökologischen Landbaus, der sich mit den aktuell verfügbaren Düngemitteln nur schwer auflösen lässt (Möller und Schultheiß 2014, Sradnick et al. 2017, Zikeli et al. 2017).

Es können auch Effizienzwerte >1 auftreten, d.h. die Abfuhr von Nährstoffen mit den Pflanzen ist größer als die Zufuhr, die Differenz wird aus der Bodenreserve entnommen. Im Sinne einer nachhaltigen Bewirtschaftung ist das ebenfalls kritisch zu bewerten.

Die Düngebedarfsermittlung ist eine Maßnahme, die die Düngermengen dem Bedarf anpassen soll. Es stellt sich aber die Frage, ob die Berechnungsansätze für den ökologischen Anbau anwendbar sind. Da organische Dünger eine Düngewirkung haben, die über das Jahr der Anwendung hinausgeht und damit eine kumulative Wirkung über die Jahre eintritt, sind EDV-Programme in der Entwicklung, die die mehrjährige Wirkung modellieren und daraus eine aktuelle Düngeempfehlung für aktuelle Kulturen berechnen. Damit könnte eine höhere Effizienz bei gleichzeitig höherer Umweltverträglichkeit erreicht werden. Das verdeutlicht den akuten Handlungsbedarf im Bereich der Nährstoffversorgung und Düngung ökologischer Gemüsekulturen. Es besteht die Herausforderung, die heutigen Anbau- und Düngungssysteme so weiter zu entwickeln,

- dass letztlich eine ausgewogenere Gesamtdüngung (bessere Übereinstimmung der Nährstoffzufuhren und -abfuhren) erreicht wird,
- dass eine zielgenaueren und effizienteren N-Düngung, d.h. stärkere Synchronisation von N-Freisetzung und Nährstoffbedarf erreicht wird,
- dass Leguminosen-N zeitlich und räumlich flexibler sowie effizienter genutzt wird, und
- dass die anderen Hauptnährstoffe P, K und S, eine höhere Nährstoffnutzungseffizienz erzielen.

1.2 Wissenschaftliche Ziele und Forschungsbedarf

Ziel des Vorhabens war es, zur Verbesserung des Nährstoffmanagements im ökologischen Gemüseanbau im Sinne ausgewogener Bilanzen für die Hauptnährstoffe sowie hoher N-Effizienz bei Freilandkulturen beizutragen. Für den geschützten Anbau in Deutschland gibt es eine exemplarische Untersuchung von Zikeli et al. 2017. Der aktuelle Wissenstand zur Düngungspraxis im ökologischen Freiland-Gemüsebau ist allerdings eher gering. Damit ist es die Aufgabe, durch exemplarische Erhebungen von Nährstoffimporten (v.a. Düngemittel) und -exporten (v.a. Produkte und deren Inhaltsstoffe) in ökologischen Gemüsebaubetrieben den aktuellen Stand des Nährstoffmanagements zu erfassen und zu beurteilen.

Um das Problem der Abhängigkeit von Düngemitteln zu verringern, die kritisch angesehen aber vielfach verwendet werden, sollten alternative Düngemittel in Versuchen hinsichtlich ihrer Ertragswirkung und Nutzungseffizienz untersucht und bewertet werden. In einem zweiten Ansatz werden Strategien zur Erhöhung und verbesserten Nutzung der betrieblichen N_2 -Bindung durch Leguminosen untersucht. Dazu zählen die zielgerechte Etablierung von Klee gras und Verfahren zur nachfolgenden Düngernutzung wie Transfermulch, Silage etc., Verbesserung der Verfahren Nutzung von leguminen Zwischenfrüchten und Untersaaten. Verfahrensänderungen zur Einbringung von Leguminosen werden hinsichtlich ihrer Düngewirkung und damit Ertragspotential geprüft.

Zentrale Bedeutung hat die Weiterentwicklung und Prüfung modellgestützter Systeme zur Düngeberechnung im ökologischen Gemüsebau. Die System NDICEA aus den Niederlanden und N-Expert vom IGEZ basieren auf unterschiedlichen Modellen zur Kalkulation der Stickstoffdüngewirkung, sowie der Wirkung von Gründüngung und Ernteresten auf die N-Freisetzung in Abhängigkeit von Standort und Witterung. Die EDV-Tools sollen die Gärtner dabei unterstützen den Verlauf und die Höhe der N-Mineralisierung im Verhältnis zum Verlauf der N-Aufnahme der Kulturen zu schätzen und daraus Düngempfehlungen abzuleiten. Dabei sollen ausgewogene Bilanzen nicht nur für N, sondern auch für die übrigen Hauptnährstoffe berücksichtigt werden. Zur Überprüfung der Modelle und Vergleich mit anderen Düngeberechnungen (DüV, betriebseigene Kalkulation) wurden Versuche an verschiedenen Standorten in Deutschland durch die Projektpartner durchgeführt.

Der gemüsebaulichen Beratung und Praxis soll dadurch ein Instrument übergeben werden, mit dessen Hilfe eine bedarfsgerechte und ausgewogene Düngung ermöglicht wird, die nicht nur den Nährstoff Stickstoff, sondern zugleich auch die übrigen Makronährstoffe berücksichtigt.

Ergänzend wird in Labor- und Gewächshausversuchen die N-Dynamik und damit die Düngewirkung von Klee grasprodukten und anderer organischer Dünger untersucht. Der Fokus liegt dabei auf Bodeneigenschaften – speziell der Tongehalt und die Bodenart – und das CN-Verhältnis der Düngemittel. Die Ergebnisse werden Teil einer verbesserten Modellbildung in den EDV-Tools sein.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsziele bearbeitet

- Analyse und Bewertung des derzeitigen Stands der Nährstoffversorgung und -dynamik von ökologischen Gemüseanbausystemen durch Erfassung und Bilanzierung der Importe und Exporte von Nährstoffen im Gemüseanbau
- Anpassung von Düngungsstrategien mit dem Ziel der Erhöhung der N-Effizienz
 - der Erfassung der Nährstoffdynamik von organischen Düngemitteln sowie Ernterückständen und Gründüngung unter spezieller Berücksichtigung von a) Wechselwirkungen mit Bodeneigenschaften, b) neueren Düngemitteln aus der Lebensmittelverarbeitung und c) optimierte Ausbringungsverfahren wie Strip-Till, Unterfußdüngung, etc.
 - der Bewertung und Weiterentwicklung Futterleguminosen-basierter Düngungsverfahren – Optimierung von N₂-Fixierung und betrieblicher N-Nutzungseffizienz durch Cut & Carry-Verfahren (Transfermulch, Silage)
- Weiterentwicklung von Düngestrategien und Kalkulationsverfahren für Bedingungen des ökologischen Gemüsebaus auf Basis der EDV-gestützten Kalkulationsverfahren N-Expert, NDICEA für die Berechnung der Düngung (N, P, K, S), Berechnung der N-Freisetzung in Abhängigkeit von Standort, Düngung, Witterung und Nährstoffbilanzen
 - Validierung der EDV-gestützten Kalkulationsverfahren anhand von Daten aus Versuchen der verschiedenen Kooperationspartner sowie aus Praxisbetrieben aus den verschiedenen Bundesländern
 - Anpassung der Datengrundlagen für die Modelle N-Expert und NDICEA auf die Bedingungen des ökologischen Gemüsebaus durch a) Ergänzung von Düngemitteln und Düngeverfahren und deren Wirkung auf die Nährstoffdynamik, b) Informationen aus Bodenuntersuchungen als Faktor für die Berechnung von Nährstoffverfügbarkeit und Düngewirkung
 - Berechnung von N-, P-, K- und S-Bilanzen im Nährstoffmanagement der Schläge sowie Reduktion von möglichen P- und ggf. auch S-Überschüssen
 - Mögliche Hürden in der Akzeptanz der Kalkulationsverfahren in der gemüsebaulichen Praxis

1.3 Organisationsstruktur des Projekts

Für die Bearbeitung des Forschungspakets wurde die Arbeit in verschiedene Themenschwerpunkte aufgliedert und jeweils zu Arbeitspaketen zusammengefasst, wobei die Projektpartner jeweils an mehreren Arbeitspaketen mitarbeiteten.

Arbeitspaket 1: Koordination

Verantwortet und strukturiert die Kommunikation nach innen – Projektplattform OLAT, regelmäßige Treffen, Video Konferenzen, etc. - und außen – Homepage, Öffentlichkeitsarbeit, Feldtage, führt die Ergebnisse zusammen

Arbeitspaket 2: Situationsanalyse des ökologischen Gemüsebaus

Erfassung der Situation des ökologischen Freilandgemüsebaus, exemplarische Betriebserhebungen, Beurteilung des Status des Nährstoffmanagements mit Hilfe von Nährstoffbilanzen

Arbeitspaket 3: Implementierung und Weiterentwicklung EDV-gestützter Systeme im gärtnerischen Düngungsmanagement

Weiterentwicklung, Prüfung und Validierung EDV-gestützter Düngemanagementsysteme NDICEA und N-Expert für den ökologischen Gemüseanbau; Vergleich und Test der Modelle in Anbauversuchen, Abschätzung der N-Verfügbarkeit, Berechnung der Düngeempfehlungen, Validierung und Bewertung der Ergebnisse

Arbeitspaket 4: Ansätze zur Erhöhung der N-Inputs über biologische N₂-Fixierung in gärtnerischen Systemen

Erhöhung des betriebseigenen N-Inputs durch Maximierung legumer N₂-Fixierung und N-Nutzungseffizienz; Kombination mit unterschiedlichen Anbauverfahren: Grünschnitttransfer Cut&Carry, Lebendmulch, Untersaaten, Winterzwischenfrüchte

Arbeitspaket 5: Alternative N-Düngemittel: Nährstoffverfügbarkeit, -input im Boden und Einfluss des Ausbringungsverfahrens

Verbesserung der N-Effizienz und N-Bilanzen durch klee-grasbasierte Düngemittel, wie Silage, Pellets, Gärreste durch Nutzung von Reststoffen aus der Lebensmittelverarbeitung hier Tofumolke, sowie Komposte; Einfluss der Ausbringungsverfahren - Unterfuß-, Reihendüngung, Einarbeitung) auf die N-Düngewirkung

Arbeitspaket 6: Düngewirkung als Interaktion von Dünger und Bodeneigenschaften

Ursachen für unterschiedliche N-Freisetzung verschiedener Böden und Düngemittel identifizieren, Prüfung von Untersuchungsmethoden zur verlässlicheren Prognostizierung der N-Mineralisation der organischen Düngung; ergänzende Informationen für Düngemodelle

1.4 Literatur

- Benke, A.P., Rieps, A.-M., Wollmann, I., Petrova, I., Zikeli, S., Möller, K., 2017: Fertilizer value and nitrogen transfer efficiencies with clover-grass ley biomass based fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 107, 395-411.
- Cooper, J., Reed, E.Y., Hörtenhuber, S., Lindenthal T., Løes, A.-K., Mäder, P., Magid, J., Oberson, A., Kolbe, H., Möller, K., 2018: Phosphorus availability on organically managed farms in Europe. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (im Druck).
- Cuijpers, W.J.M., van der Burgt, G.J.H.M., Voogt, W., 2008: Nitrogen balances in Dutch organic greenhouse production. In: Proc. 16th IFOAM World Congress, Modena, Italy, and June 16–20, 2008.
- De Notaris C., Rasmussen J., Sørensen P., Olesen J.E., 2018: Nitrogen leaching: A crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 255, 1-11.
- Deumlich, M., Lux, G., Schmidtke, K., 2016. Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau, Bericht zum Teilprojekt im Vorhaben BOELN 2811OE109
- Katroschan, K.-U., Stützel, H., 2017: Narrow-leaved lupine as an N source alternative to grass-clover swards in organic vegetable rotations *Biol Agric Hort* 33, 125-142.
- Katroschan, K.-U., Teixeira, G., Kahlen, K., Stützel, H., 2012: Decomposition of lupine seeds and seedlings as N fertilizer in organic vegetable production. *Plant Soil* 357, 59–71.
- Laber, H. 2003: N-Freisetzung aus organischen Handelsdüngern – Übersicht und eigene Versuchsergebnisse im ökologischen Gemüsebau. In: Rahmann G, Nieberg H eds) Ressortforschung für den ökologischen Landbau. *Landbauforschung Völkenrode, Braunschweig, Sonderheft 259*, 17–20.
- LfL Bayern 2022. Nährstoffbilanzen im landwirtschaftlichen Betrieb. <https://lfl.bayern.de/naehrstoffbilanz>
- Manzoni, S., Porporato, A., 2009: Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology & Biochemistry* 41, 1355-1379.
- Möller, K., Schultheiß, U., 2014: Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau – Charakterisierung und Empfehlungen für die Praxis. *KTBL-Schrift 499*. KTBL Darmstadt, 392 Seiten.
- Möller, K., 2018: Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 112, 147–164.
- Müller, T., von Fragstein und Niemsdorff, P., 2006: Organic fertilizers derived from plant materials part I: turnover in soil at low and moderate temperatures. *J Plant Nutr Soil Sci* 169, 255–264.
- Oekolandbau, 2022. Kreislaufwirtschaft? Was ist das? <https://www.oekolandbau.de/bildung-und-beratung/lehmaterialien/allgemein-bildende-schulen/wissen/biolandwirtschaft/biopflanzenbau/kreislaufwirtschaft/>
- Stadler, C., von Tucher, S., Schmidhalter, U., Gutser, R., Heuwinkel, H., 2006: Nitrogen release from plant-derived and industrially processed organic fertilizers used in organic horticulture. *J Plant Nutr Soil Sci* 169, 549–556.
- Sradnick, A., Feller, C., Fink, M., 2017: Entwicklung eines Prognosemodells für den N-Düngebedarf im ökologischen Gemüsebau. In: S. Wolfrum, H. Heuwinkel, H.J. Reents, u.a. (Hrsg.), 2017: Beiträge der 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Freising-Weihenstephan, 7.-10. März 2017. Verlag Dr. Köster, Berlin. <http://orgprints.org/31860/>.
- Schomberg, H.H., Wietholter, S., Griffin, T.S., Reeves, Tyler, D.D., 2009: Assessing Indices for Predicting Potential Nitrogen Mineralization in Soils under Different Management Systems. *Soil Science Society of America Journal* 73, 1575.
- Stadler, C., Von Tucher, S., Schmidhalter, U., Gutser, R., Heuwinkel, H., 2006: Nitrogen release from plant derived and industrially processed organic fertilizers used in organic horticulture. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 549-556.
- Stadler, D., Heuwinkel, H., 2008: Vegetabile N-Dünger im Ökologischen Gemüsebau. - Schule und Beratung. Heft I-2/08, III-8-11.
- Stumm, C., Köpke, U., 2016: Ertragswirkung und Klimarelevanz alternativer Nutzungsformen von Futterleguminosen im viehlosen Acker- und Gemüsebau. In: *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 28, 72-73.
- Tittarelli, F., Bath, B., Ceglie, F.G., Garcia, M.C., Möller, K., Reents, H.J., Vedio, H., Voogt W., 2017: Soil fertility management in organic greenhouse: an analysis of the European context. *Acta Hort.* 1164, 113-126.

- Van der Burgt, G.J., Rietberg, P., 2012: Toepassing van maaimeststoffen. Publikationsnummer 2012-027. Louis Bolk Instituut, Driebergen, Nederlande.
- von Fragstein und Niemsdorff, P.; Geyer, B.; Reents, H.J., 2004: Status quo Ökologischer Gemüsebau – Betriebsbefragungen. Unveröffentlichter Endbericht BLE-Projekt 02OE222.
- Voogt, W., 2014: Soil fertility management in organic greenhouse crops; a case study on fruit vegetables. In: II International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture 1041, 21-35.
- Zikeli, S., Deil, L., Möller, K., 2017: The challenge of imbalanced nutrient flows in organic farming systems: A study of Organic greenhouses in Southern Germany. *Agric., Ecosyst Environ* 244, 1-13.

2 Forschungsberichte der Arbeitsgruppen

2.1 Situationsanalyse des ökologischen Freiland-Gemüsebaus

H.J. Reents (TUM), S. Stein, S. Zikeli (UHOH), K. Möller (LTZ), K. Rather (LVG), N. Lenz (DLR), R. Fischer, K. Egenolf (LWK NRW)

2.1.1 Einleitung

Der ökologische Gemüsebau nimmt innerhalb des ökologischen Pflanzenbaus hinsichtlich der Nährstoffnutzung und des Nährstoffmanagements eine besondere Stellung ein. Die Kulturen weisen in der Regel ein schnelles Wachstum auf und erfordern damit eine hohe Verfügbarkeit der Nährstoffe sowie hohe Nährstoffmengen in kurzer Zeit, Anforderungen die deutlich höher sind als bei Ackerkulturen. Gleichzeitig werden mit dem Verkauf der frischen Produkte hohe Nährstoffmengen von den Flächen exportiert. In einigen Untersuchungen (Cuijpers et al., 2008; Möller, 2018a; Tittarelli et al., 2017; von Fragstein und Niemsdorff et al., 2004; Voogt, 2014; Zikeli et al., 2017) wird gezeigt, dass es zu erheblichen Ungleichgewichten in der Nährstoffversorgung im ökologischen Gemüsebau kommen kann. Ob und wie weit dies für die derzeitige Situation in Deutschland zutrifft, ist kaum untersucht. Um die Situation beurteilen und Empfehlungen für die Zukunft entwickeln zu können, ist es notwendig, in Betrieben mit Freilandgemüsebau das Nährstoffmanagement hinsichtlich Input, Output, Bilanz und Nährstoffnutzung bzw. -effizienz zu evaluieren.

2.1.2 Methodische Voraussetzungen zur Berechnung von Nährstoffbilanzen im ökologischen Gemüsebau

Die Analyse von Nährstoffbilanzen und Nährstoffeffizienzen verlangt möglichst genaue betriebsspezifische Daten, bei Datenlücken kann evtl. auf Datensammlungen der Länder bzw. deren Berechnungsprogramme zum Düngbedarf zurückgegriffen werden. Diese Datensammlungen und Kalkulationsunterlagen basieren weitgehend auf Daten aus konventionellem Anbau. Eine Bilanz auf einem ökologischen Betrieb anhand eigener Daten sollte die Situation am besten kennzeichnen. Bei fehlenden sollten Datensammlungen bevorzugt werden, in denen die Ertragsdaten an die Bedingungen des ökologischen Anbaus angepasst sind.

Zur Einordnung der Erträge aus den Betriebserhebungen sind verschiedene Datensammlungen, statistische Erhebungen und einige publizierte Daten zur Ertragsrelation vom ökologischen im Vergleich zum konventionellen Anbau verglichen worden. Das Ertragsniveau ökologischer landwirtschaftlicher Marktfrüchte liegt nach Angaben bei oekolandbau.de (2022) im Durchschnitt bei relativ 0,48 des konventionellen Anbaus, für ökologischen Freilandgemüsebau wird ein Wert von 0,77 angegeben, ohne dabei jeweils nach Kulturarten zu differenzieren). Ein Vergleich für 2019 und 2020 von Ertragserhebungen des Statistischen Bundesamts im konventionellen und ökologischen Anbau (destatis.de, 2022) ergibt eine Ertragsrelation von 0,70 (Tabelle 2.1-1) bei großen Unterschieden zwischen den Kulturen. N-Expert, 2022 verwendet die gleiche Relation.

Tabelle 2.1-1: Ertragsrelationen von ökologischem zu konventionellem Freilandgemüsebau in verschiedenen Statistiken und Datensammlungen

Prüfgröße	Vergleich	Relation
Öko destatis 2020	Konv. destatis 2020	0,70
Konv. Destatis 2020	Konv. DüV SN	0,74
Öko destatis 2020	Standard DüV SN	0,53

Konventioneller Anbau (konv.), ökologischer Anbau (öko), Daten Statistisches Bundesamt (destatis), Düngeverordnung (DüV), Sachsen (SN), Versuche Öko = ausgewählte Versuche im ökologischen Anbau in hortigate

Im Vergleich zu den Standarderträgen der DüV in den Datensammlungen der Länder liegen die vom Statistischen Bundesamt erfassten konventionellen Erträge bei 0,74, die ökologischen Erträge bei 0,53-0,51 (je nach Jahr), d.h. sie sind noch mal niedriger als der direkte Vergleich der Daten aus der gleichen Datenquelle (Tabelle 2.1-1). In der DüV werden somit Standarderträge angenommen, die über den bei statistischen Erhebungen ermittelten Ertrag liegen.

Die Auswertung von 22 Versuchen im ökologischen Gemüseanbau (Hortigate, 2022) mit Fragestellungen zu Sorteneigenschaft oder Düngerwirkung ergab für elf vergleichbare Kulturen eine Ertragsrelation von 1,59 zu ökologischen Betriebserträgen. Das widerspricht zunächst den Ertragsvergleichen auf betrieblicher Ebene. Es ist aber eine häufige Erfahrung, dass Versuchserträge deutlich über Betriebserträgen liegen. Versuchsbedingungen sind optimal gestaltet, die Ertragserhebung ist komplett und nicht durch Marktbedingungen beeinflusst. Damit sind Ertragsergebnisse aus Versuchen keine Grundlage, um Standarderträge für Betriebsbilanzen zu erarbeiten.

Im Falle von Lücken bei den Ertragserhebungen (z.B. unzureichende Dokumentation bei Direktvermarktung) sollte mit der Ertragsrelation von 0,51 zu den Standarderträgen nach DüV der ökologische Gemüseertrag für die Bilanzrechnung festgelegt werden, ohne Kulturarten spezifisch zu differenzieren.

Bei einer Betriebsuntersuchung ist die exakte Ermittlung eines flächenbezogenen Naturalertrages kaum möglich. Auf betrieblicher Ebene lassen sich verkaufte Mengen einer Gemüseart auf Basis der Buchführung feststellen, mit Bezug auf den Anbauplan können dann mittlere Erträge über Flächen (meist ohne Aufschlüsselung nach Sätzen) berechnet werden. Die Verkaufsmenge wird aber nicht nur von Aufwuchs und Qualität (marktfähige Produkte), sondern auch von der Marktlage beeinflusst d.h. welche Produktmengen sich jeweils aktuell vermarkten lassen.

Diese aufgezeigten Unterschiede in den Erträgen können Konsequenzen für Düngung in den Betrieben nach sich ziehen. Aus der Düngerbedarfsberechnung nach DüV mit den dort hinterlegten Erträgen ergeben sich „erlaubte“ Nährstoffmengen, die in den Betrieben nur in Ausnahmefällen mit den Produkten von den Betrieben exportiert werden. Für die konkrete Düngerbemessung wäre das zu berücksichtigen und in die Interpretation von Nährstoffbilanzen mit einzubeziehen.

Eine weitere Schwierigkeit und damit Ungenauigkeit der Ertragserfassung liegt in der Art der Vermarktungseinheiten bei verschiedenen Gemüsearten. Sie werden in Bund, Kisten oder Stück gehandelt, für die Umrechnung in Nährstoffmengen werden aber Massen benötigt. Das

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) hat ein Screening von Stückgewichten von Gemüse durchgeführt und publiziert (Prüße et al., 2003). Die auf der Seite „Lebensmittelwissen“ publizierten Daten ergänzen die BVL Daten (Lebensmittelwissen, 2022) durch eine größere Anzahl Gemüsearten. Das Programm „N-Expert“ stellt für einige Gemüsearten ebenfalls Stückgewichte zur Verfügung. Daten zu verschiedenen Salaten sind im Rahmen einer studentischen Arbeit ergänzt worden (Seifert, 2020). Bei mehreren Werten für eine Kultur sind diese Werte dokumentiert, damit betriebliche Angaben eingeordnet werden konnten.

Für die Berechnung der Nährstoffbilanzen sind neben den Gemüsemengen Angaben zu den Nährstoffgehalten der Produkte notwendig. Die Angaben in den Datensammlungen zur DüV beruhen in der Regel auf Produkten aus konventionellem Anbau. Sachsen stellt für Ackerkulturen jeweils Daten für konventionellen und ökologischen Anbau zur Verfügung (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2022). Der Vergleich der Daten für konventionellen und ökologischen Anbau zeigt für die ökologischen Ackerkulturen einen relativen Stickstoffgehalt von 0,95, für Phosphor und Kalium jeweils 1,02 (Öko Hackfrüchte sind mit höheren Kaligehalten aufgeführt), für Gemüse liegen keine Vergleichsdaten vor. Im Bilanzierungstool Hunter (2022) werden für eine kleine Anzahl Gemüsearten die relativen Gehalte von N mit 0,98 für Öko-Produkte angegeben, für P und K gibt es keine Unterschiede. In einem internationalen Review (Dangour et al., 2009) ist der relative N-Gehalt mit 0,93, für P mit 1,08 aufgeführt, für K besteht kein Unterschied. Insgesamt sind mögliche systematische Unterschiede so gering, dass sie bei der Unsicherheit der Ertragserfassung kaum eine Rolle spielen. Da die Datensätze der Länder für Gemüse mit denen vom IGZ in den meisten Fällen identisch sind, ist anzunehmen, dass die IGZ-Daten (Fink and Feller, 2001) die ursprüngliche Quelle sind. Somit werden die Daten vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für die Bilanzrechnungen verwendet, da sie die Vielfalt der Kulturen weitgehend vollständig abbilden.

Allgemein ist für den ökologischen Anbau die N_2 -Fixierung durch die Leguminosen eine wichtige Stickstoffquelle. In ökologischen Gemüsebaubetrieben können andere Stickstoffherkünfte aber überwiegen, deshalb wird gerade für diese Betriebe ein höherer Anteil betriebseigenen Stickstoffs gefordert, mindestens aber eine Herkunft aus ökologischer Bewirtschaftung. In Hof- oder Bilanzen wird Stickstofffixierung als Input einbezogen. Sie kann aber auf der betrieblichen Ebene nicht durch Messungen erfasst werden. Es sind deshalb Verfahren notwendig, die die fixierte N-Menge im betrieblichen Zusammenhang möglichst realistisch abbilden. Im einfachsten Fall werden ebenfalls die Datensammlungen zur DüV genutzt. In der DüV sind Standardwerte für verschiedene Arten und Anbauverfahren berücksichtigt, aber keine Erträge und damit keinen ertragsbezogenen Wert. Das in dem Projekt genutzte Bilanzierungstool von Reimer et al. (2020a) verwendet für die meisten Kulturen das Berechnungsverfahren von Kolbe (2008), dem eigene Feldversuche zu Grunde liegen und mit Literaturquellen verglichen wurden. Für Klee gras wurde die Berechnung der Fixierungsleistung nach Bachinger et al. (2013) genutzt. Da dieses Berechnungsverfahren auch die Fixierleistung der Wurzel mitberücksichtigt, sind die fixierten N-Mengen höher als nach der Methode von Kolbe. Daraus ergibt sich die Forde-

rung nach einem einheitlichen Verfahren für alle Kulturen, bei denen die Erträge und Mischungen berücksichtigt werden. Da im parallel bearbeiteten BÖLN Projekt WEBMAN ebenfalls eine Schätzung der N₂-Fixierung erfolgt, ist das Verfahren für das vorliegende Projekt übernommen worden, um so eine Vereinheitlichung über die Projekte hinweg zu erreichen. Es beruht auf dem von Hülsbergen (2003) publizierten Berechnungsalgorithmen für die N₂-Fixierung. Ausgehend von der Leguminosen-Art wird die fixierte N-Menge in Abhängigkeit von Ertrag und Bestandeszusammensetzung geschätzt. Die Berechnung der Fixierungsleistung von Wurzeln beruht auf Relationen von Sprossertrag zu Wurzelertrag und von N-Gehalt im Spross zu N-Gehalt in der Wurzel. Die gesamte fixierte N-Menge der Kultur (BNF= biologische N₂-Fixierung) ergibt sich aus der fixierten N-Menge im Spross und in der Wurzel.

Ein weiterer Teil des Nährstoffinputs im Gemüsebau können Jungpflanzen mit ihren Wurzelballen sein. Die Schwierigkeit, diese in die einheitliche Bilanzrechnung einzubeziehen, liegt in der Handelsnorm für Substrate, die in Volumen berechnet werden. Die Nährstoffgehalte werden bezogen auf Volumina angegeben und in verfügbaren Formen (für Stickstoff als NH₄⁺-N und NO₃⁻-N).

Für die Jungpflanzenanzucht werden die Substrate in der Regel zu Erdpresstöpfen verdichtet. Bei Annahme eines bestimmten Verdichtungsverhältnisses lässt sich dann der Nährstoffgehalt auf Gewicht bezogen angeben und die Zufuhr von Nährstoffen durch Jungpflanzen berechnen. Die Umrechnung von Volumen auf Masse erfolgte nach Angaben vom FIBL (Koller et al., 2001), Angaben zu Nährstoffgehalte in Substrate wurden bei den wichtigen Substratanbietern erfragt und dann für die Berechnung festgelegt.

Der Input von Nährstoffen durch Saatgut ist im Gemüsebau außer bei Pflanzkartoffeln und grobkörnigen Leguminosen weitgehend zu vernachlässigen, da die Tausendkornmasse von Gemüsearten sehr klein ist.

Die Übersicht Tabelle 2.1-1 zeigt, wo die speziellen Herausforderungen einer Nährstoffbilanzierung für den ökologischen Gemüsebau liegen und mit welchen Festlegungen zu den Kalkulationsdaten eine angepasste Berechnung möglich ist.

Tabelle 2.1-2: Herausforderungen und Festlegungen für Nährstoffbilanzierung ökologischer Gemüsebaubetriebe

Herausforderung	Praktikable Lösung und Festlegung
Keine flächenbezogenen Erträge	Verkaufsmengen der jeweiligen Kultur bezogen auf jährliche Kulturfläche Keine Mengen – Standarderträge nach DüV *0,51
Keine spezifischen Nährstoffgehalte für ökologisch erzeugtes Gemüse	Nach Literaturvergleich – Nutzung der Daten aus Tabellen der Länder zur DüV
Volumen- ; Zahlen bezogene Vermarktungseinheit	Zusammengefasste Vergleichstabellen – Volumen/Stück zu Masse
Ertragsbezogene N ₂ -Fixierung	Berechnung auf der Basis von Hülsbergen (2003), N ₂ -Fixierung für Sprosserträge und Wurzelanteile
Jungpflanzen mit Erdballen, Presstopf	Berechnung nach FibL (Koller et al. 2001)
Saatgut	Vernachlässigung bei den feinsamigen Gemüse, großkörnige Leguminosen, evtl. Getreide berücksichtigt

Für eine weitergehende Beurteilung des Nährstoffmanagements kann die Kenntnis des Nährstoffstatus im Boden im Vergleich zu den Bilanzen wichtig sein. Kolbe (2019, 2010) hat Bilanzen und Bodenuntersuchungen für zahlreiche Ackerbaubetriebe ausgewertet und dabei einen korrelativen Zusammenhang zwischen P- und K-Bilanzen und dem Versorgungsgrad im Boden festgestellt, der sich nach Bodeneigenschaften differenzieren lässt. Solche Untersuchungen liegen für gärtnerische Betriebe bisher nicht vor. Einzelne Erfahrungen aus betrieblichen Untersuchungen zeigen, dass sich Düngestrategien sowohl in Bilanzen als auch in Nährstoffgehalten im Boden gut abbilden und damit Anlass zur kritischen Prüfung des Nährstoffmanagements geben können.

2.1.3 Zielsetzung der Untersuchung

Die ökologischen Gemüsebaubetriebe stellen hinsichtlich der Grundprinzipien des ökologischen Landbaus und speziell des Nährstoffmanagements eine besondere Herausforderung dar, die Importe und Exporte der Betriebe sind hoch, der innerbetriebliche Kreislauf ist häufig nicht sehr ausgeprägt. Diese Bedingungen sind bekannt, es gibt jedoch kaum Informationen, wie groß der Nährstofffluss in den Betrieben wirklich ist und wie gut ein Ausgleich erreicht wird.

In exemplarischen Betriebserhebungen sollte erfasst werden, wieviel Nährstoffe (N, P, K) durch die Produkte die Betriebe verlassen, wie und in welchem Umfang sie durch Düngereinfuhr, der biologischen N₂-Fixierung wieder ersetzt werden. Die Bilanzen werden dabei nach einheitlicher für den ökologischen Gemüsebau angepassten Methode als Hoftorbilanzen berechnet.

Es ist das Ziel, die Nährstoffzufuhren und -abfuhren und die Salden zu bewerten, insbesondere nach Nährstoffüberschüssen und –defiziten, die potentiell umweltgefährdend sein können bzw. ein Risiko für eine nachhaltige Bewirtschaftung bedeuten (geringere Gehalte verfügbarer

Nährstoffe im Boden). Nährstoffeffizienzen zeigen, in welchen Umfang die gedüngten Nährstoffmengen verwertet werden bzw. Bodenreserven in Anspruch genommen werden.

2.1.4 Material und Methoden

2.1.4.1 Betriebsauswahl für Hoftorbilanzen

Für die Hoftorbilanzerhebung konnten über Internetrecherche und Kontaktdaten der Berater der örtlichen Öko-Landbauberatung aus den jeweiligen Bundesländern sowie über persönliche Kontakte 12 Betriebe gefunden werden, die zu Auskunft bereit waren. Kriterien für die Teilnahme waren (i) der ökologische Anbau von Gemüse, entweder intensiv als Gärtnerei oder extensiv als Gemüse-Ackerbau-Mischbetrieb und (ii) keine Tierhaltung bzw. mit einer max. Großvieheinheit (GVE) $< 0,2 \text{ ha}^{-1}$. Da das Projekt speziell auf den Gemüsebau ausgerichtet ist, wird Gemüsebau in landwirtschaftlichen Betrieben nicht berücksichtigt, deren Nährstoffbilanzen nicht dem Gemüse zuordenbar sind.

Die Betriebe lagen in Nordrhein-Westfalen (NRW), in Rheinland-Pfalz (RLP), in Baden-Württemberg (BW) und in Bayern (BY). Ziel war es, in jedem Betrieb Daten für drei Jahre (zwischen 2017 und 2020) zu erheben. In einigen Fällen konnten aufgrund der Datenverfügbarkeit oder zeitlicher Beschränkungen des Betriebs nur ein bis zwei Jahre erhoben werden. Daten von Gewächshäusern und Folientunneln wurden soweit möglich von der Auswertung ausgeschlossen; sie sollten für die Budgetierung in Freilandgemüsebetrieben nicht berücksichtigt werden. Nährstoffbilanzen im geschützten Gemüsebau wurden bereits von Zikeli et al. (2017) untersucht.

Die Betriebe deckten eine weite Spanne in der Betriebsgröße (2 bis 363 ha) und Umfang der angebauten Kulturen (5 bis 49) in einzelnen Jahren ab (Tabelle 2.1-3). Es wurden zwar Betriebe aus allen Verbänden gewonnen, aber nicht entsprechend der Größe der Verbände. Fünf der zwölf Betriebe sind Mitglied im biologisch-dynamischen Anbauverband Demeter e. V. Ein wesentlicher Unterschied dieses Verbandes zu anderen deutschen Öko-Verbänden ist die verpflichtende Anwendung von tierischem Dünger aus eigener Tierhaltung oder Futter-Mist-Kooperationen (FMK), allerdings wird das z. T. auch von anderen Betrieben praktiziert. Anhand der Anteile des Gemüses bezogen auf die Gesamtanbaufläche bzw. auf die Fruchtfolge (FF) wurden die Betriebe in die Systeme „gärtnerisch“ (= intensiver Gemüsebau) und „Feldgemüse“ (= extensiver Gemüsebau) klassifiziert. Liegt einer der beiden Anteile unter 75%, wird er als „extensiver“ Anbau bezeichnet.

Tabelle 2.1-3: Übersicht der teilnehmenden Gemüsebau-Betriebe inklusive Verbandszugehörigkeit, Betriebsgröße (ha), durchschnittliche Anzahl der Kulturen, Anteil des Gemüses an Gesamtfläche und Fruchtfolge (FF), Nutzung einer Futter-Mist-Kooperation (FMK) und Anzahl der untersuchten Jahre. Durch die Farbgebung der einzelnen Betriebe sind sie in späteren Tabellen und Abbildungen leichter zu identifizieren.

#	Ken-nung	Verband	Betriebs-größe (ha)	Anzahl Kulturen Ø	Anteil Ge-müse an Flä-che (%)	Anteil Ge-müse an FF (%)	FMK	An-zahl Jahre
1	BW1	Demeter	13	5	33	100	N	3
2	BW2	Demeter	39	45	100	90	J	3
3	BW3	Demeter	5	49	100	100	J	3
4	DLR	Anderer	59	8	100	97	N	3
5	LWK1	Anderer	30	30	100	100	N	1
6	LWK2	Anderer	239	14	100	38	J	2
7	LWK3	Demeter	9	35	100	100	J	2
8	TUM1	Anderer	2	30	100	100	N	3
9	TUM2	Demeter	108	9	75	100	N	1
10	TUM3	Anderer	60	12	96	74	J	3
11	TUM4	Anderer	58	29	47	90	N	2
12	TUM5	Anderer	363	13	22	50	N	1

2.1.4.2 Datenerhebung, Dokumentation und Datenauswertung

Im Jahr 2021 wurden die Gemüsebaubetriebe befragt, um einen Einblick in ihr Nährstoffmanagement zu erhalten und eine Betriebsbilanz für die Nährstoffe N, P und K zu erstellen. Die Erhebung erfolgte in halbstrukturierten Interviews und beinhalteten auch offene Fragen zur Nutzung von Futter-Mist-Kooperationen (FMK), zu Vermarktungswegen und zum Einsatz von IT-Tools für das Betriebsmanagement. Für den Gesamtnährstoffinput wurden die zugekauften Düngemittel (Mineraldünger, organische Handelsdünger auf tierischer oder pflanzlicher Basis, Wirtschaftsdünger, Recyclingdünger), Substrate aus den Presstöpfen der Setzlinge, Saatgut und, falls vorhanden, Biogassubstrat, Veränderung des Tierbestands und Futtermittel sowie die Menge der biologischen N₂-Fixierung aus dem Leguminosenanbau erfasst. Für den Gesamtnährstoffoutput wurden die verkauften pflanzlichen Produkte, Futtermittel und, falls vorhanden, Biogassubstrate, tierische Produkte und Düngemittel zusammengestellt. Die Angaben der Betriebe stammten aus Unterlagen der Betriebsplanung, Öko-Zertifizierung und der Düngebedarfsrechnung sowie der Buchführung für die verkauften Produkte.

Auf Basis der in den Betrieben erfassten Verkaufsmengen wurden Erträge, die Nährstoffzufuhren, -abfuhren und -bilanzen mit dem von Reimer et al. (2020a) für ökologische Ackerbaubetriebe entwickelten und vom Projekt DüngungsNetzwerkBW (LTZ Augustenberg) erweiterten Tabellenkalkulationsprogramm "Nutri gadget-Hohenheim Organic Nutrient Budget Calculator" berechnet. Das ursprüngliche Tool ist online verfügbar (<https://orgprints.org/38025/>). Das Programm wurde im Rahmen des Projekts hinsichtlich der Daten für ökologischen Gemüseanbau angepasst und erweitert. Das überarbeitete Excel Tool ist ebenfalls auf Organic Eprints verfügbar (<https://orgprints.org/id/eprint/44772/>).

Die Nährstoffgehalte von organischen Handelsdüngern wurden nach Möller and Schultheiß (2014) überprüft und ergänzt, wenn spezielle Hersteller- und Produktangaben vorlagen. Wenn vorhanden, wurden betriebspezifische Daten für organische Düngemittel genutzt. Eine Übersicht der verwendeten Düngemittel der einzelnen Betriebe findet sich in (Tabelle 2.1-4).

Tabelle 2.1-4 Anteil der biologischen N₂-Fixierung (BNF) und Kategorisierung der verwendeten Düngemittel der Einzelbetriebe. LPM = Landschaftspflegematerial, HTK = Hühnertrockenkot.

Düngemittel und Biologische N ₂ -Fixierung			Düngemittel					Mineraldünger
			N-Dünger		Mehrnährstoffdünger			
			Handelsdünger		Grunddünger			
#	Ken-nung	% BNF Input an Gesamt-N-Input	Keratin	Handelsdünger pflanzlich	Kompost (pflanzlich)	Mist	Cham-post/ Gärrest	Mineraldünger
1	BW1	54	Haarmehl			HTK		Kalisop
2	BW2	31	Horndünger	Biosol		Festmist (Rind)		Kalium-sulfat, Patentkali
3	BW3	15	Haarmehl, Diaglutin			Festmist (Rind)		
4	DLR	15	Nitroderm	Nitroplant, Vinasse	Kompost			
5	LWK1	10	Hornmehl, Haarmehl		Frischkompost			Patentkali
6	LWK2	48			Kompost	Festmist (divers), HTK	Champost	Kalisop
7	LWK3	49		Ackerbohnen		Festmist (Rind)		
8	TUM1	7	Horndünger					
9	TUM2	37	Haarmehl, Keratine	Vinasse		Festmist (Schaf), HTK		
10	TUM3	31		Vinasse		Festmist (Schwein)		Patentkali
11	TUM4	28		Biosol, Bio-Agenasol	Kompost, LPM		Gärreste	Patentkali, Kalisop
12	TUM5	28	Bioilsa	Kartoffelsirup		Festmist (Rind)	Gärreste	

Auf der Basis des in 2.1.2 beschriebenen Abgleichs verschiedener Datensammlungen wurden die Nährstoffgehalte für die Gemüsearten in dem Kalkulationstool festgelegt und für die Berechnung der Nährstoffmengen der Hoftorbilanz verwendet. Die Berechnung der durch die Leguminosen fixierten N₂-Menge erfolgte in Anlehnung an Hülsbergen (2003), wie in 2.1.2 erläutert.

Erträge in Mengenangaben wurden in Gewichtsangaben umgerechnet (s. Excel Tool Tabelle „UmrechVolGew“).

Der Nährstoffeintrag durch Jungpflanzen mit ihren Substrat-Wurzelballen wurde ebenfalls entsprechend der Erläuterung in Kapitel 2.1.2 und der Dokumentation im Kalkulationstool berechnet (s. Excel Tool Tabelle „SubstratBedarf“).

Fehlende Angaben zu einzelnen Erträgen wurden durch Öko-Standarderträge ergänzt, die aus einem Abgleich von statistischen Erhebungen des Bundes und Datensammlungen der Länder erarbeitet wurden (Kapitel 2.1.2).

Kulturen, für die in den vorgenannten Datensätzen keine Daten zu Ertrag und Nährstoffgehalt verfügbar waren, die aber in größeren Mengen produziert wurden, wurden mit Daten aus der Literatur ergänzt. Nicht berücksichtigt wurden Kulturen, für die in den vorher genannten Datensätzen bei geringer Produktionsmenge keine Daten zu Ertrag und Nährstoffgehalt vorlagen, sowie ab Hof verarbeitete Verkaufsprodukte (z. B. Sauerkraut).

In der Übersicht lassen sich die Betriebe nach unterschiedlichen Merkmalen gruppieren (Tabelle 2.1-5). Die Gruppierung erfolgte so, dass sich eine Gruppengröße für eine zusammenfassende Auswertung ergab. Für die Verbandszugehörigkeit wurde unterteilt in „Demeter“ und „andere Verbände“, da einerseits Demeter mit der Verpflichtung zum Einsatz tierischer Dünger eine besondere Bewirtschaftung fordert und andererseits sich von den anderen Verbandsbetrieben keine ausreichend große verbandsbezogene Gruppe bilden ließ. Für Umstellungsjahr, Nutzfläche und Kulturen wurden jeweils möglichst drei ähnlich große Gruppen gebildet (beim Umstellungsjahr konnte das nicht ganz erreicht werden). Die Merkmale zur Gruppenbildung werden als Einflussfaktoren für die Auswertung genutzt.

Tabelle 2.1-5 Aufteilung der erfassten Betriebsjahre (und Betriebe) in verschiedenen Bewirtschaftungskategorien

		Demeter e. V.	Andere Verbände	Summe
Gesamtanzahl		15 (5)	12 (7)	27 (12)
ha Anbaufläche	< 30 ha	8 (3)	3 (1)	11 (4)
	30-100 ha	5 (1)	7 (4)	12 (5)
	> 100 ha	2 (1)	2 (2)	4 (3)
Anzahl Kulturen	< 10	4 (2)	4 (1)	8 (3)
	11-30	3 (0)	6 (6)	9 (6)
	> 30	8 (3)	2 (0)	10 (3)
Jahr Umstellung	< 1990	8 (3)	4 (3)	12 (6)
	1990-1999	7 (2)	5 (3)	12 (5)
	> 1999	0 (0)	3 (1)	3 (1)

Berechnung der Hoftorbilanzen und Statistische Auswertung

Für die Berechnung der Nährstoffbilanz für die Nährstoffe N, P und K, die Salden und Nährstoffeffizienzen wurden folgende Gleichungen genutzt. Die angegebenen Salden beziehen sich jeweils auf die Basis eines Jahres (a^{-1}).

Saldo [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$] = Input - Output (Gleichung 1)

Der Gesamtnährstoffinput für jeden der drei Makronährstoffe N, P und K wurde anhand der folgenden Gleichungen (Gl. (2) und (3)) berechnet:

Input [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$] = BNF + Dünger + Saatgut + Jungpflanzensubstrat + Biogasanlagensubstrat + Tiere + Futtermittel (Gleichung 2)

Dünger = Mist + Keratindünger + Handelsdünger (pflanzlich) + Kompost (pflanzlich) + Biogasgärreste + Champost + Mineraldünger (Gleichung 3)

Der Gesamtnährstoffoutput der drei Makronährstoffe N, P und K wurde wie folgt berechnet (Gl. (4)):

Output [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$] = Pflanzliche Produkte + Tierische Produkte + Biogassubstrate + Futtermittel + Düngemittel (Gleichung 4)

Die Mittelwerte wurden mit dem Statistikprogramm SAS berechnet, wobei die Anzahl der teilnehmenden Jahre berücksichtigt wurde. Das Modell kann wie folgt beschrieben werden (Gl. (5)):

$y_{ij} = \mu + f_i + e_{ij}$ (Gleichung 5)

Dabei ist y_{ij} die Beobachtung des Betriebs i im Jahr j , μ ist der Achsen-Schnittpunkt, f_i ist der Effekt des i -ten Betriebs und e_{ij} ist der Fehler von y_{ij} . Das Modell wurde einmal angepasst, indem der Betrieb als zufälliger Effekt gewählt wurde, um Aussagen über zukünftige Betriebsergebnisse zu machen, und einmal, indem der Betrieb als fester Effekt in das Modell aufgenommen wurde, um Aussagen über die tatsächlichen Betriebsergebnisse zu machen. Die Nährstoffnutzungseffizienz für N, P und K wurden berechnet, indem die Variable Input als Kovariable in das Modell aus Gleichung 5 aufgenommen wurde.

2.1.5 Ergebnisse und Diskussion

2.1.5.1 Bilanzen der Betriebe

Die Bilanzen für die Hauptnährstoffe N, P, K zeigten über alle Betriebe ein unterschiedliches Niveau. Für Stickstoff lag das mittlere Niveau bei $67,5\ kg\ ha^{-1}$, für Phosphor bei $2,1\ kg\ ha^{-1}$ und für Kalium bei $0,3\ kg\ ha^{-1}$ (Abbildung 2.1-1). Spannen vom niedrigsten Wert zum höchsten Wert in einzelnen Jahren waren erheblich; für N von -13 bis $+177\ ha^{-1}$, für P von -11 bis $+14\ ha^{-1}$, für K von -87 bis $+61\ ha^{-1}$.

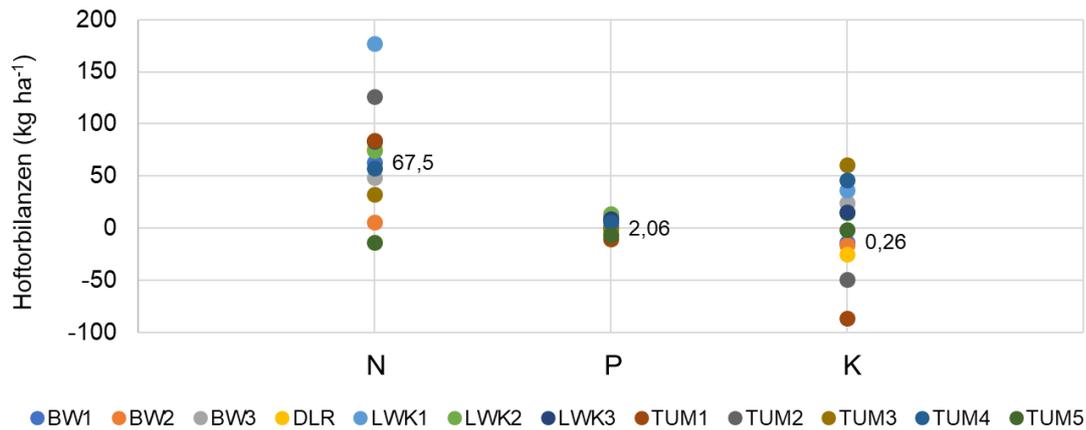


Abbildung 2.1-1: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha^{-1} .

Im Rahmen einer einzelbetriebliche Auswertung wurden die Bilanzsalden der drei Nährstoffe der jeweiligen Betriebe betrachtet (Abbildung 2.1-2). Es gab Betriebe mit erheblichen Unterschieden zwischen den verschiedenen Nährstoffsalden. Die Betriebe mit den am wenigsten ausgeglichenen Gesamtsalden (N, P und K) waren LWK1, TUM1 und TUM2. Bei der Betrachtung der einzelnen Nährstoffe fallen für N zusätzlich noch LWK3, DLR und LWK2 mit über 70 kg ha^{-1} Saldo, für P BW3, LWK2 und LWK3 mit über 7 kg ha^{-1} Saldo sowie für K TUM3 und TUM4 mit über 45 kg ha^{-1} Saldo auf. Die Betriebe BW2 und TUM5 wiesen die ausgeglichensten Gesamtsalden auf.

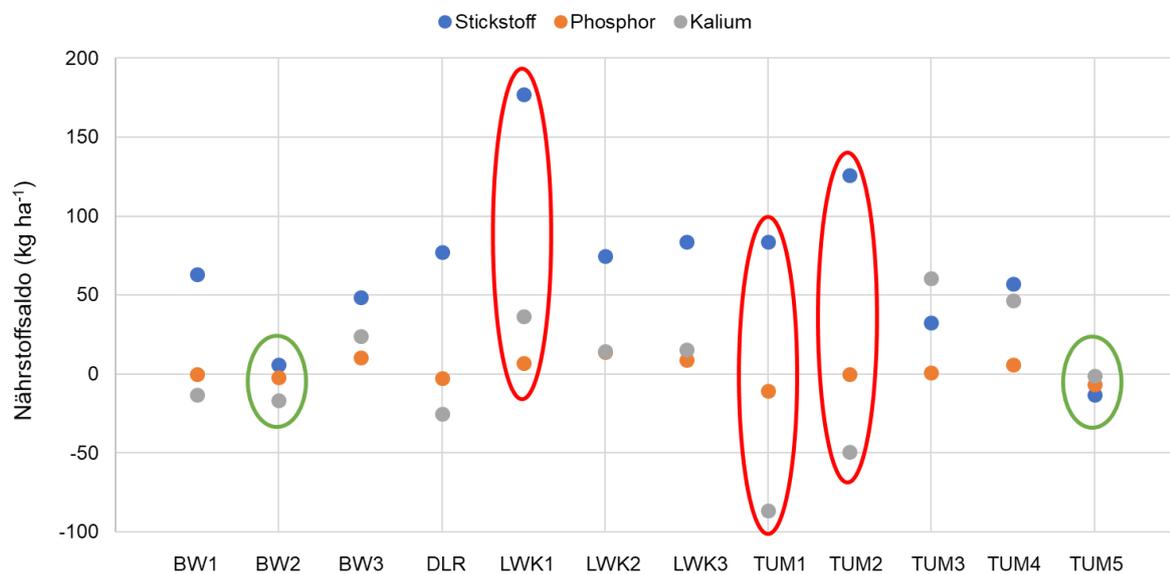


Abbildung 2.1-2: Einzelbetriebliche Hoftorbilanzen für Stickstoff, Phosphor und Kalium in kg ha^{-1} .

Die Aufschlüsselung der Herkünfte der verschiedenen Inputs zeigten unterschiedliche Verhältnisse für die drei Hauptnährstoffe (Abbildung 2.1-3). Für Stickstoff stellten einerseits die BNF und andererseits die Keratindünger die größten Anteile dar. Der Phosphor stammte größtenteils aus der Zufuhr von Festmist, aber auch Kompost auf Pflanzenbasis. Das Kalium wurde im Wesentlichen mit dem Festmist und Mineraldünger zugeführt. Untergeordnete Rollen der

Inputs aller drei Nährstoffe spielten Biogasgärreste und Champost als Düngemittel, Saatgut, Pflanzsubstrat, Biogasanlagenssubstrat, Tiere und Futtermittel über alle Betriebe betrachtet. Im Einzelfall konnten Substrate allerdings bedeutend sein.

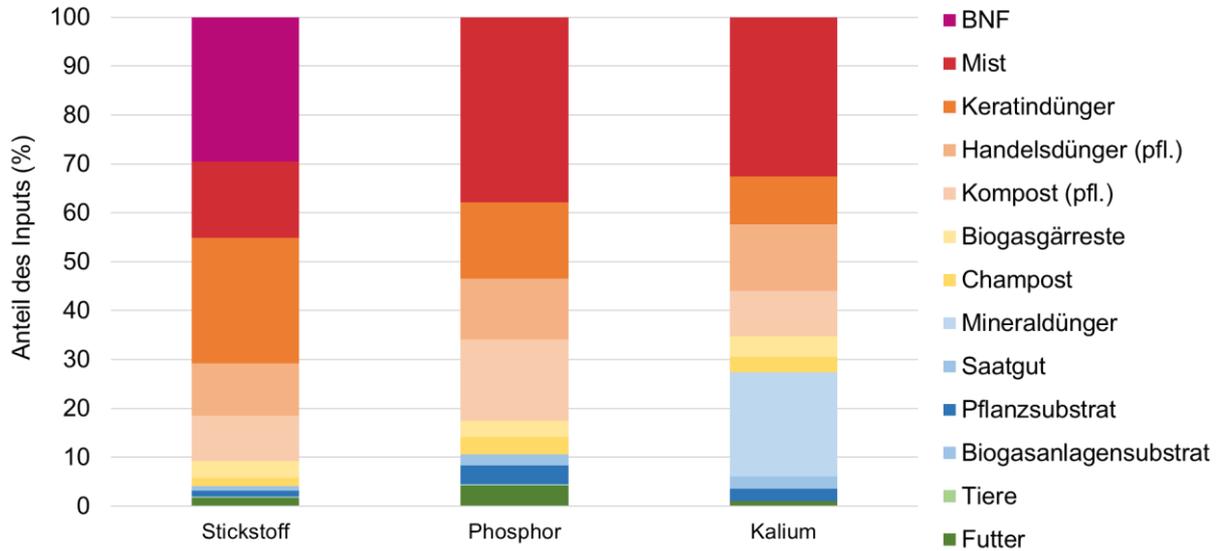


Abbildung 2.1-3: Anteil (%) der Herkunft des Inputs für die jeweiligen Nährstoffe.

Der Vergleich der P- und K-Frachten je Einheit Stickstoff der auf den Betrieben eingesetzten Düngemittel zum Mittelwert des Nährstoffbedarfs von Gemüse- und Nicht-Gemüse-Kulturen verdeutlicht die unterschiedliche Qualität der Düngemittel (Abbildung 2.1-4) und gleichzeitig die unterschiedlichen Ansprüche von Gemüsekulturen im Vergleich zu Ackerkulturen (kein Gemüse). Bei Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung ist der P-Anteil in der Regel höher als der Bedarf der Gemüsepflanzen. Die P-Salden aller Betriebe waren weitgehend ausgeglichen (Tabelle 2.1-6), so dass hier durch die unterschiedlichen Anteile der Dünger ein Ausgleich erreicht wurde. Der K-Bedarf der Gemüsekulturen war deutlich höher als der Bedarf von Ackerkulturen und beim Kalium traten große Abweichungen von einer ausgeglichenen Bilanz auf (Tabelle 2.1-6). Negative Kaliumsalden können eher bei einer stark Keratin-betonen N-Düngung auftreten, positive K-Salden bei der Verwendung von Mineraldüngern, letztlich wird aber auch hier die Düngemittelwahl entscheidend sein.

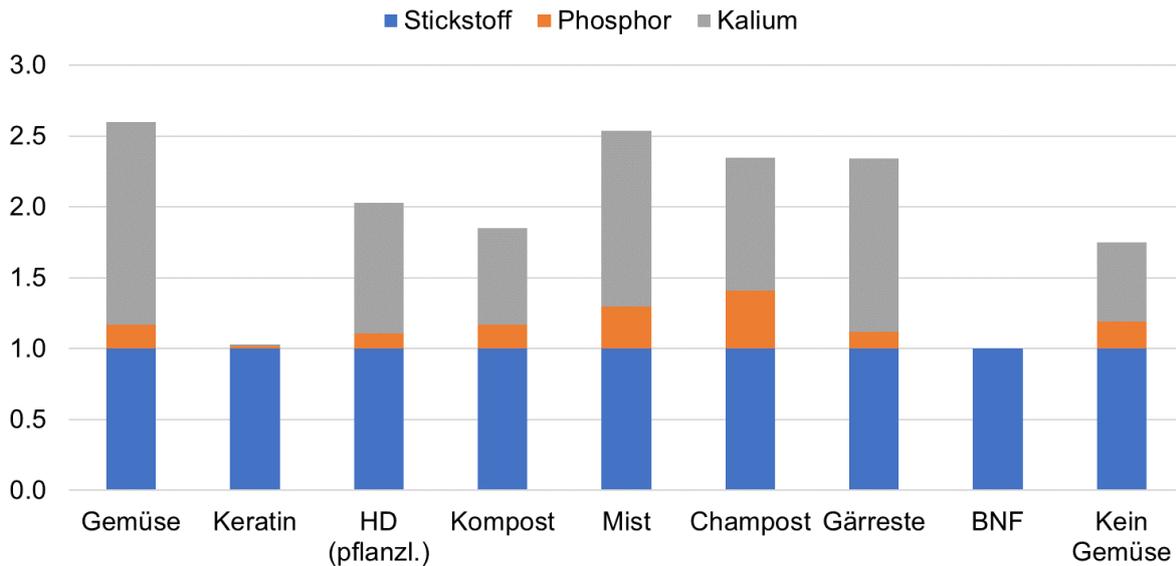


Abbildung 2.1-4: P- und K-Frachten je Einheit Stickstoff der auf den Betrieben eingesetzten Düngemittel im Vergleich zum mittleren Bedarf von Gemüse- und Nicht-Gemüse-Kulturen.

Über alle Betriebe bestand ein deutlicher Zusammenhang zwischen N-Input und N-Saldo (Abbildung 2.1-5). Je mehr Stickstoff in den Betrieb zugeführt wurde, desto höher fiel der N-Saldo aus. Eine Gemeinsamkeit der Betriebe mit hohem N-Saldo war ein hoher Einsatz von stickstoffreichen Handelsdüngemitteln, wobei die Keratine im Vordergrund standen (Abbildung 2.1-7, Abbildung 2.1-8). Ein ähnlicher, wenn auch etwas schwächerer Zusammenhang war auch zwischen dem N-Input und dem N-Output, jeweils in kg ha^{-1} , zu erkennen (Abbildung 2.1-6). Auch wenn die Argumente für den Anteil an Handelsdüngern in den Betrieben etwas unterschiedlich war, so wurden die hohen Gaben doch für die Ertrags- und Qualitätsbildung als notwendig erachtet.

Ein Betrieb (TUM 5) wich deutlich von der Beziehung - hoher Input, hoher Saldo - ab (Abbildung 2.1-5). Trotz eines N-Inputs von 129 kg ha^{-1} ergab sich ein (und die einzige) negativer N-Saldo von $-13,4 \text{ kg ha}^{-1}$. Bei diesem Betrieb handelt es sich um einen Betrieb mit extensivem Gemüsebau mit lediglich 22 % Gemüse bezogen auf die Fläche und 50 % bezogen auf die Fruchtfolge und starker Gärreste-Düngung (damit eine Ausnahme von anfangs genannten Kriterien). Die Erträge lagen sehr hoch, einerseits wohl durch die hohe Düngewirkung der Gärreste und andererseits durch die Erfassung der Gesamterträge für die Verwertung in der betriebseigenen Verarbeitung. Allerdings standen für diesen Betrieb nur einjährige Daten zur Verfügung.

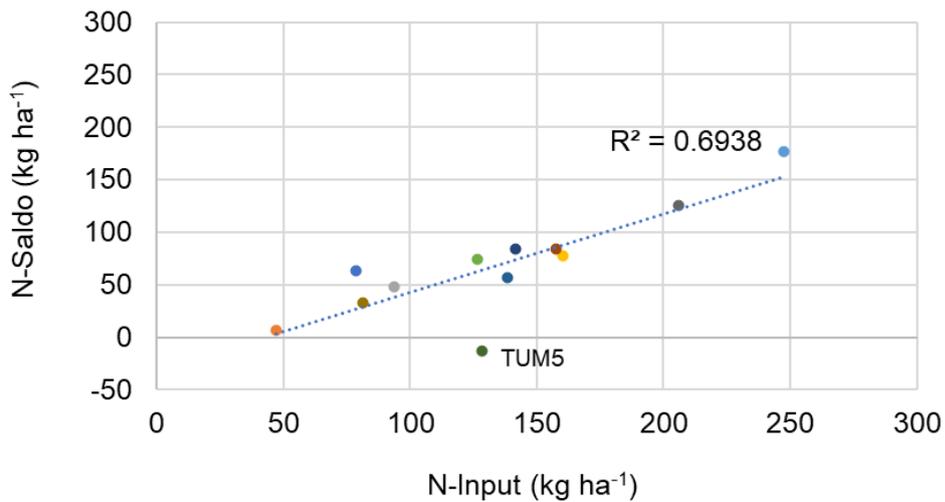


Abbildung 2.1-5: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha⁻¹) und N-Saldo (kg ha⁻¹).

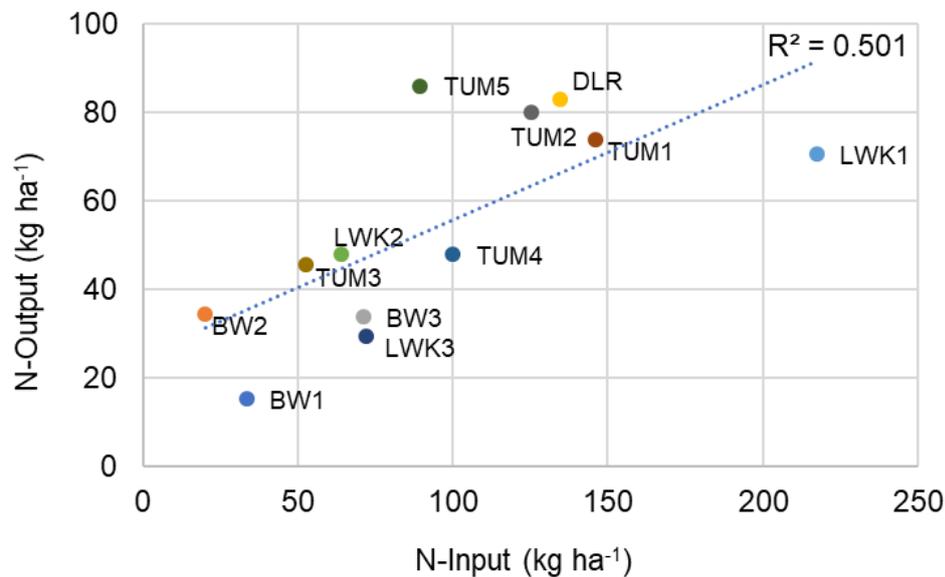


Abbildung 2.1-6: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha⁻¹) und N-Output (kg ha⁻¹).

Die Betriebe mit dem höchsten Einsatz von Keratindünger (TUM1, LWK1 und TUM2) zeigten alle hohe N-Salden (Abbildung 2.1-7). Aber auch einige Betriebe ohne jegliche Verwendung von N-reichem Keratindünger wiesen hohen N-Salden auf (LWK3 und LWK2). Der Grund für diese hohen Salden könnte sich durch die Kombination aus hohen Festmist-Importen und höheren BNF-Anteil erklären lassen (Abbildung 2.1-8, Abbildung 2.1-3).

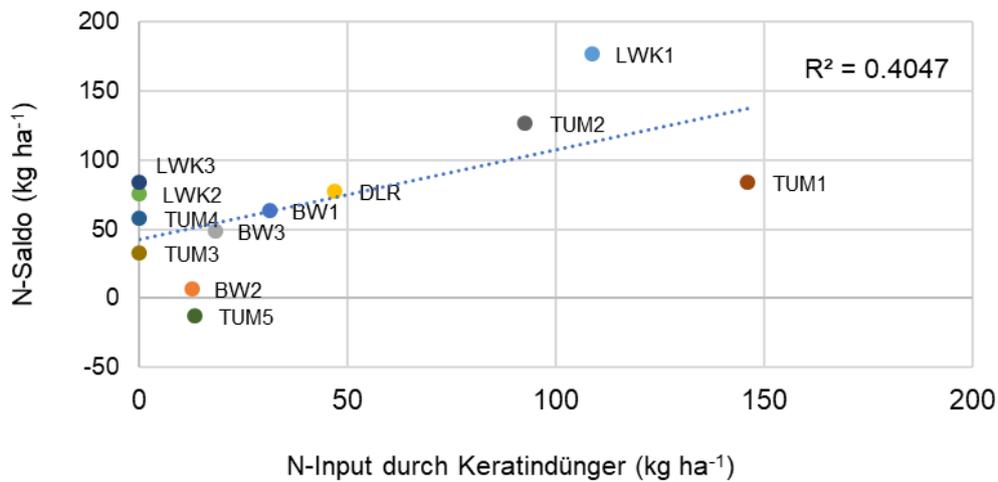


Abbildung 2.1-7: Zusammenhang zwischen N-Input durch Keratindünger (kg ha⁻¹) und N-Saldo (kg ha⁻¹).

Die Anteile des N-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe zeigten sehr deutlich, wie unterschiedlich die Düngestrategien auf den Betrieben ausfallen (Abbildung 2.1-3). Besonders schwierig war der Anteil der BNF zu bewerten, der betriebsindividuell von 7 % bis 57% der zugeführten N-Menge reichte. Auf einigen der Betriebe spielte der Anbau von Leguminosen als N-Quelle eine wichtige Rolle und wurde dementsprechend in die Düngestrategie eingeplant. Im ökologischen Gemüsebau sind Leguminosen jedoch selten eine Hauptfrucht und durch den Mangel an Tierhaltung finden sie als Futterleguminose in der Fruchtfolge keine Verwendung, außer sie werden in einer Futter-Mist-Kooperation oder für Biogas verwendet. Die in Tabelle 2.1-6 aufgelisteten Betriebe mit Anteilen von Gemüse an der Fläche bzw. der Fruchtfolge von > 95 % spiegelten sich in Abbildung 2.1-8 als Betriebe mit dem niedrigsten Anteil an BNF wieder (BW3, DLR, LWK1, TUM1). LWK3 fiel hierbei aus der Reihe; er wies einen hohen Anteil an BNF auf, gleichzeitig führte er dem Betrieb keine Keratindünger zu.

Angesichts der hohen N-Salden stellte sich die Frage, ob und wie weit die Regeln der Düngemittelverordnung eingehalten wurden und welche Umweltrelevanz sie haben. In den aufgeführten Salden war die BNF mit berechnet. Der N-Input mit organischen Dünger lag im gewichteten Mittel der Betriebe bei 85 kg N ha⁻¹, mit einer Spanne von 20 – 218 kg N ha⁻¹. (Daten nicht aufgeführt), d.h. ein Betrieb hatte hier die Obergrenze nach den vorliegenden Angaben und Berechnungen überschritten, während alle anderen im Rahmen der Norm gedüngt hatten. Neben einer tatsächlich zu hohen Düngung, könnte evtl. auch Fehler bei der Düngerzuordnung entstanden sein, da hier nur ein einjähriger Datensatz von dem Betrieb vorlag. Positive N-Salden von 50 kg N ha⁻¹ werden in manchen Bewertungssystemen als tolerierbare Obergrenze angesehen, im Mittel der Betriebe wurde diese Grenze überschritten. Ob und wie weit die daraus möglichen Emissionen (Nitrat, Lachgas) entstehen, müsste genauer untersucht werden.

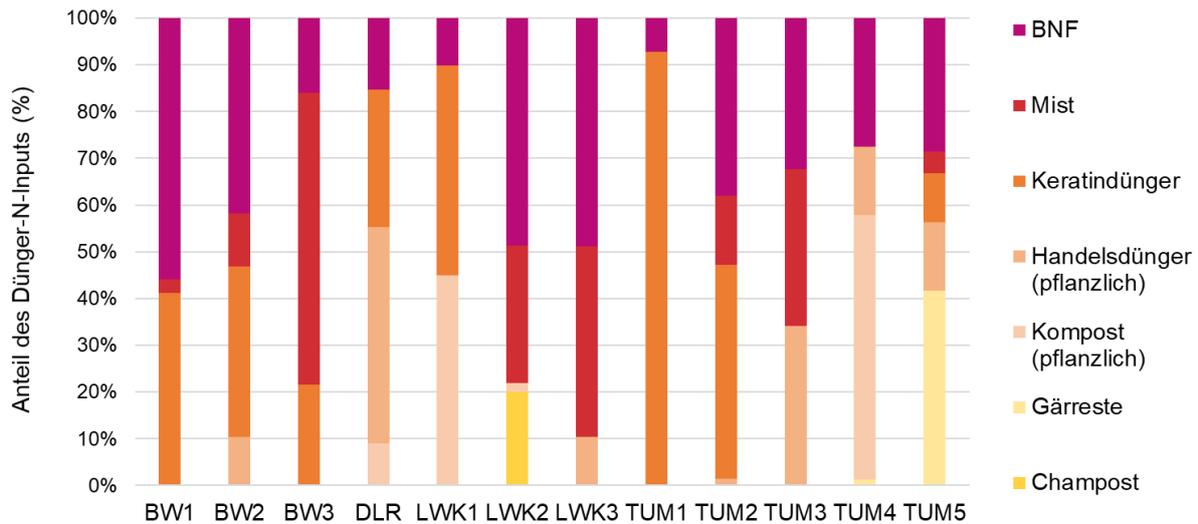


Abbildung 2.1-8: Anteile (%) des N-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.

Es bestand ein Zusammenhang zwischen dem P-Input durch Grunddünger und dem P-Saldo (Abbildung 2.1-9). Betriebe mit einem P-Input durch Grunddünger $> 10 \text{ kg ha}^{-1}$ wiesen ein P-Saldo $> 5 \text{ kg}$ auf. Im Gegensatz dazu hatte der Betrieb, der gar keinen Grunddünger zuführte, ein negatives P-Saldo. Eine gezielte P-Düngung mit mineralischen Düngemitteln erfolgte nicht. In den Gesprächen während der Befragungen entstand der Eindruck, dass man eine Begrenzung der N-Düngung aufgrund der Beschränkungen der P-Düngung in der DüV befürchtete.

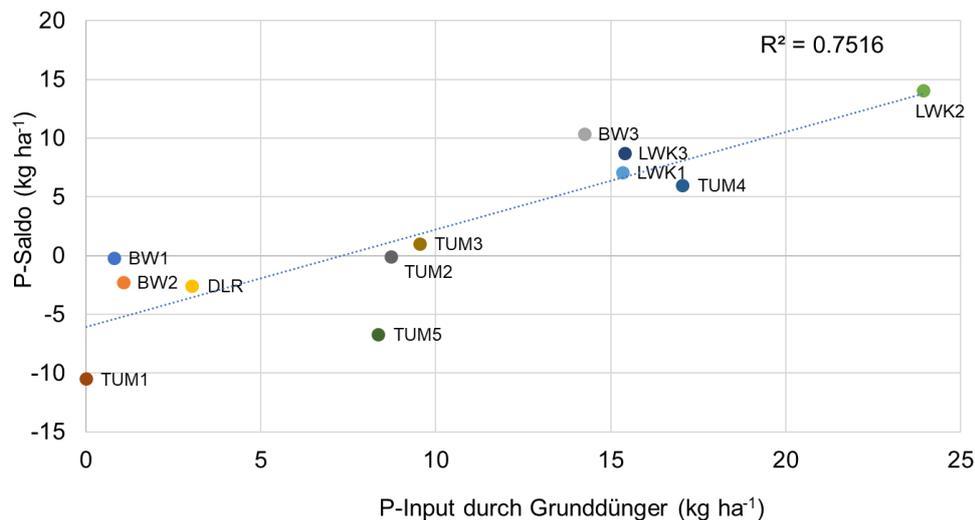


Abbildung 2.1-9: Zusammenhang zwischen P-Input durch Grunddünger (kg ha^{-1}) und P-Saldo (kg ha^{-1}).

Da die wesentliche P-Zufuhr durch die Grunddünger erfolgte, war die P-Effizienz (Output/Input) abhängig vom Anteil des P-Inputs der Grunddünger. In den Betrieben lag die P-Effizienz < 1 , was eine Anreicherung von P im Boden bedeuten würde, im Umkehrschluss wurden bei

einer P-Effizienz > 1 die Bodenvorräte stärker genutzt (Abbildung 2.1-10). In solchen Fällen dann die Ergebnisse der Bodenuntersuchung beachtet.

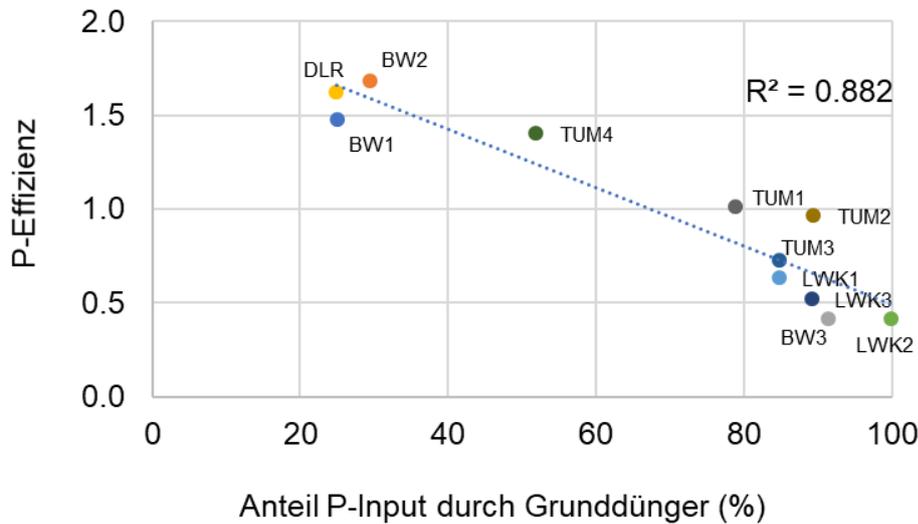


Abbildung 2.1-10: Zusammenhang zwischen P-Input durch Grunddünger (kg ha^{-1}) und P-Effizienz. Betrieb TUM1 nicht berücksichtigt, weil keine P-Düngung erfolgte.

Bei den K-Salden war die Varianz zwischen den Betrieben am höchsten, von deutlich negativen Salden in Betrieb TUM1 (hier über drei Jahre) und TUM2 (ein Jahr) zu mittleren positiven Salden in TUM3. Es bestand ein Zusammenhang ($R^2 = 0,57$) zwischen dem K-Input und dem K-Saldo (Abbildung 2.1-11).

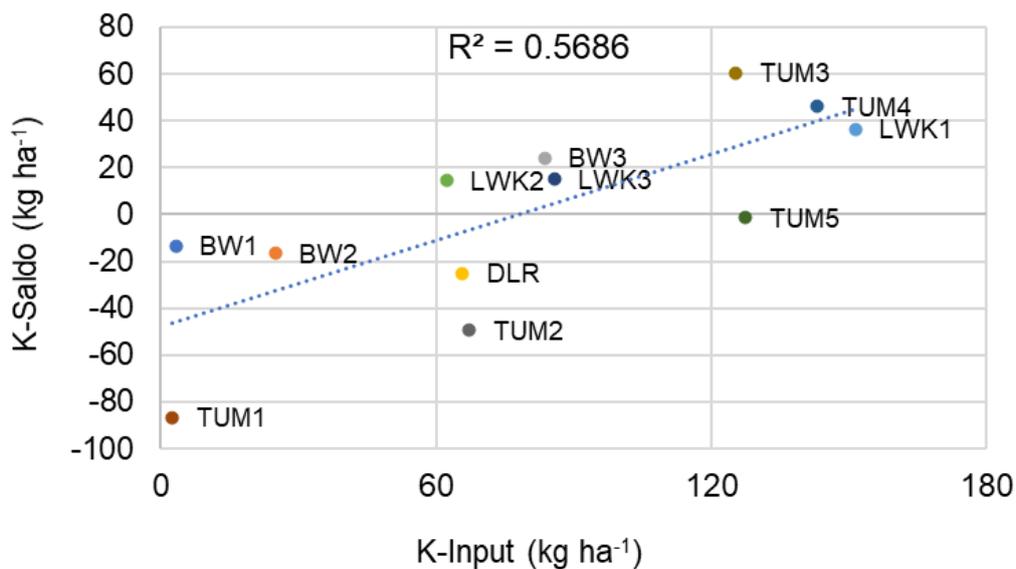


Abbildung 2.1-11: Zusammenhang zwischen K-Input (kg ha^{-1}) und K-Saldo (kg ha^{-1}).

Betriebe, die hier besonders herausstachen (Abbildung 2.1-11), zeichneten sich durch ein teilweise einseitiges K-Düngemanagement aus (Abbildung 2.1-12). TUM1 verwendete beispielsweise ausschließlich Keratindünger und konnte dadurch seinen K-Bedarf nicht decken. TUM2 führte dem Betrieb hauptsächlich durch Festmist Kalium zu, jedoch enthielt dieser zu wenig K um die Abfuhr der Gemüsekulturen abzudecken.

In beiden Fällen wurde keine mineralische Ergänzungsdüngung vorgenommen. Betriebe mit positiven K-Salden (TUM3, TUM4, LWK1) hatten Mineraldünger-K-Inputs > 40%. Es kam aber auch immer auf die K-Ausfuhr an. Betriebe mit einseitigem K-Düngemanagement (LWK3) oder hohem Input durch Mineraldünger (BW2) konnten trotzdem vergleichsweise ausgeglichene Salden aufweisen. Betrieb TUM5 erreichte mit Gärresten und K-reichen pflanzlichen Handelsdüngern einen hohen K-Umsatz bei gleichzeitig völlig ausgeglichenem Saldo (-1,6 kg ha⁻¹).

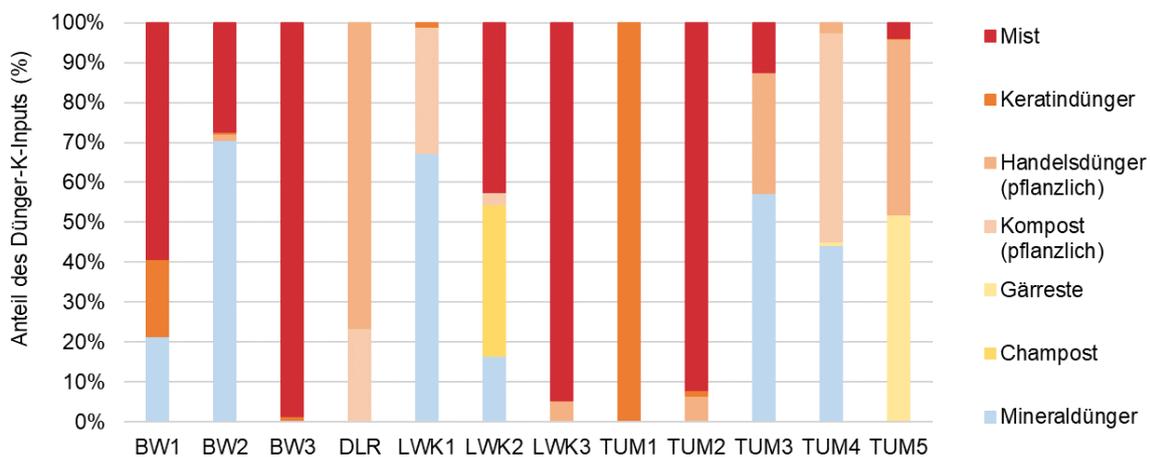


Abbildung 2.1-12: Anteile des K-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.

Die Nährstoffeffizienzen für N, P und K waren weitere Merkmale, das Düngemanagement der Betriebe zu beurteilen (Abbildung 2.1-13). Ein großer Teil der in dieser Studie untersuchten Betriebe lag mit seiner N-Effizienz unter 0,5, d.h. ein größerer Teil der N-Düngung wurde nicht in Ertrag umgesetzt. Das spricht für eine Anreicherung im Boden. Eine genauere Bewertung hinsichtlich Auswaschungs- oder Emissionsverlusten wäre bei einer gleichzeitigen Humus- bzw. Kohlenstoffbilanzierung möglich. Die P-Effizienz lag in der Hälfte der Betriebe unter 1, d.h. die P-Abfuhr war durch die Zufuhr mehr als ausgeglichen. Ein Effizienzwert >1 weist darauf hin, dass P-Reserven des Bodens für das Wachstum genutzt wurden. Die K-Effizienz zeigte ähnlich der P-Effizienz (Abbildung 2.1-13) hohe Effizienzwerte in drei Betrieben - BW2 mit 3,7, BW1 mit 6,7 und TUM1 mit 38,0-, was bedeutet, dass die Bodenreserve erheblich zur K-Versorgung der Pflanzen beiträgt. Die Bewertung für die langfristige Entwicklung sollte in diesen Fällen stets gemeinsam mit den Ergebnissen von Bodenuntersuchungen erfolgen. Nur so lässt sich eine längerfristige Entwicklung auf dem Betrieb einschätzen.

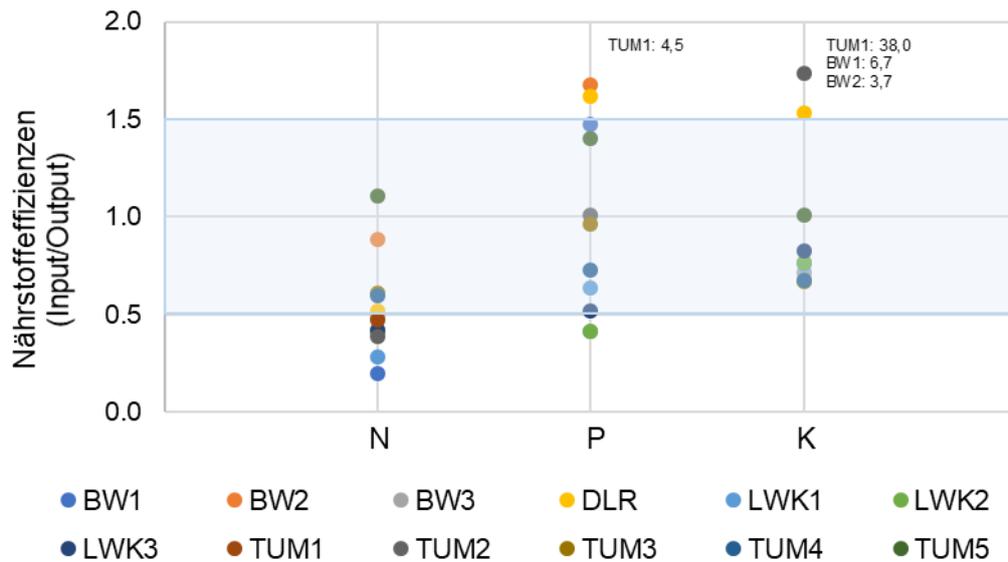


Abbildung 2.1-13: Nährstoffeffizienz der Nährstoffe in den verschiedenen Betrieben.

Neben der Einzelauswertung nach Betrieb und Nährstoff sollte eine Betrachtung nach differenzierbaren Bewirtschaftungskategorien innerhalb der Stichprobe erfolgen. Hier wurden genannt: Verbandszugehörigkeit, Umstellungsjahr, Betriebsgröße, Zahl der Kulturen, Intensität der gemüsebaulichen Produktion und Futter-Mist-Kooperation als eine „Form“ der indirekten Tierhaltung (Tabelle 2.1-3). Die Outputs zeigten zunächst die enge gegenseitige physiologische Kopplung der Nährstoffe innerhalb der Pflanzen und dabei die höhere Abgabe von Kalium im Vergleich zum Stickstoff (Tabelle 2.1-6). Höhere Outputs ergaben sich mit Zunahme der Betriebsfläche, der Intensität des Gemüsebaus und der Anzahl der Kulturen. Der Unterschied zwischen Demeter-Betrieben mit insgesamt geringerem Nährstoffumsatz und negativem Saldo beim Kalium im Vergleich zu den anderen Betrieben, war ein interessantes Ergebnis. Hier müsste geprüft werden, ob neben Demeter-typischen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Verpflichtung zu tierisch-organischen Düngern) auch betriebsstrukturelle Unterschiede zwischen den Gruppen vorlagen. Bezogen auf die Inputs waren sonst kaum Effekte sichtbar, die auf der Gruppierung beruhen. Bemerkenswert war der geringer K-Input in Betrieben mit Futter-Mist-Kooperation. Zwar zeigte die Gesamtauswertung, dass die K-Zufuhr durch Wirtschaftsdünger relativ bedeutend war, aber nur einen geringen Gesamtbeitrag leistete. Die Ursache könnte in der Art des Austauschs der Materialien – Futter gegen Mist - liegen. Gärtnereien werden vorzugsweise Futterleguminosen liefern und dann Wirtschaftsdünger als Feststoffe zurückbekommen. Da Kalium aber in den flüssigen Ausscheidungen anfällt, hängt der Kaliumanteil von dem Aufstallungssystem ab, was bei den Betriebsangaben zu gering berücksichtigt wurde. Betriebssysteme mit höheren Erträgen hatten tendenziell eher ein Kalium-Defizit als andere Betriebe.

Tabelle 2.1-6: Nährstoff Input, Output, Saldo nach verschiedenen Bewirtschaftungskategorien

Bewirtschaftungs- kategorie	Input			Output			Saldo			
	n	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Demeter	5	112	10,8	52,2	47,4	7,5	60,7	64,6	3,3	-6,5
Andere Verbände	7	148	14,6	94,6	78,1	13,4	90,2	69,6	1,2	5,2
Umstellung < 1990	6	139	13,8	94,6	56,4	9,8	77,9	82,6	4,0	19,1
Umstellung 1990- 1999	5	120	13,0	58,4	72,6	12,4	75,4	47,5	0,7	-16,6
Umstellung > 1999	1	160	8,4	65,8	82,8	11,0	90,9	77,3	-2,6	-25,1
Fläche ≤ 30 ha	5	142	11,8	62,7	52,3	8,9	69,9	90,0	3,0	-6,8
Fläche 31-100 ha	4	107	11,0	89,3	63,4	10,5	73,4	43,2	0,5	15,9
Fläche > 100 ha	3	153	17,9	84,8	90,5	15,3	97,5	62,7	2,7	-10,7
Gemüse- & Ackerbau	4	103	13,4	78,1	63,3	11,4	64,1	40,0	2,2	16,0
Gärtnerei	8	148	12,8	76,5	66,5	10,8	84,8	81,2	2,0	-7,6
≤ 10 Kulturen	3	121	8,7	79,5	63,1	10,1	73,2	56,5	-1,3	3,4
11-30 Kulturen	6	137	15,4	84,7	71,3	12,2	78,6	65,7	3,0	4,8
> 30 Kulturen	3	139	13,6	64,0	59,4	10,0	81,1	80,2	3,8	-8,0
FM-Kooperation	5	158	11,5	77,4	77,3	12,6	92,9	81,2	-1,1	-15,0
Keine FM-Kooperation	7	98	15,0	76,5	49,0	8,7	56,9	48,8	6,3	19,7
Mittel*	12	132,9	13	76,9	65,4	11	77,9	67,5	2,06	0,26

*Mittel ergibt sich aus Berechnung aller 12 Betriebe, kein Mittel aus den Tabellenwerten

2.1.5.2 Diskussion

Zur Einordnung der vorliegenden Ergebnisse der eher kleinen Stichprobe von Öko-Gemüsebaubetrieben sollen Vergleiche zu anderen Erhebungen dienen. Kolbe (2015) fasst verschiedene Bilanz-Untersuchungen auf Öko-Ackerstandorten (Betriebe, Schläge, Dauerbeobachtungspunkte, insgesamt 3770 Einzelwerte) aus dem ganzen Bundesgebiet zusammen. Die N-Salden erreichten in der Studie von Kolbe $+27 \text{ kg N ha}^{-1}$ bei einer Spanne von -23 kg N ha^{-1} bis $+137 \text{ kg N ha}^{-1}$. Die mittleren P-Bilanzen betragen -5 kg P ha^{-1} , die Spanne reichte von -16 kg P ha^{-1} bis $+26 \text{ kg P ha}^{-1}$. Die K-Bilanzen hatten einen Mittelwert von -14 kg K ha^{-1} mit einer Spanne von -84 kg K ha^{-1} bis $+134 \text{ kg K ha}^{-1}$ (Kolbe 2015).

Im Vergleich zeigt sich, dass die Ergebnisse im Durchschnitt der Gemüsebaubetriebe (Tabelle 2.1-6) von den Erhebungen der Ackerstandorte in der Höhe abweichen, die Rangfolge der Nährstoff aber gleichartig ist – positiver N-Saldo, P-Saldo gering negativ, K-Saldo deutlicher negativ. Die Spannen der Stichproben sind für P und K sehr ähnlich, die Mittelwerte im Gemüsebau liegen etwas höher und damit näher an einer ausgeglichenen Bilanz von Null. Eine eingeschränkte Betrachtung auf bestimmte Betriebstypen im Bundesland Sachsen zeigt deutliche negativere P- und K-Bilanzen (Tabelle 2.1-7) als die oben genannten Werte für Betriebe in ganz Deutschland.

Tabelle 2.1-7:Nährstoffsalden pro Jahr in Ackerbaubetrieben in Sachsen (Kolbe, 2015).

Betriebstyp	N kg ha ⁻¹	P kg ha ⁻¹	K kg ha ⁻¹	Humus-Äquivalent kg ha ⁻¹
Feldgemüse	40	-7	-25	270
Marktfrucht	25	-9	-39	147
Futterbau	30	-6	-35	337

Die Feldgemüsebetriebe dieser separaten Erhebung in Sachsen wiesen eine mittlere Bilanz von P = -7 kg ha⁻¹ und K = -25 kg ha⁻¹, damit war deren Bilanz ungünstiger als in der im vorliegenden Projekt untersuchten Stichprobe.

Im Projekt „Pilotbetriebe“ (Hülsbergen et al., 2022) sind Nährstoffsalden über verschiedene Jahre und landwirtschaftliche Betriebstypen erhoben worden. Im Mittel ergaben sich Salden für ökologische Betriebe von N = -44 bis +33 kg ha⁻¹, P = -4 bis 0 kg ha⁻¹, K = -6 bis -3 kg ha⁻¹. Die P- und K-Salden waren damit geringfügig und der N-Saldo deutlich niedriger als in der vorliegenden Erhebung in Gemüsebaubetrieben.

Watson et al. (2002) hat Bilanzdaten zu ökologischen Betrieben von Publikationen aus verschiedenen Ländern zusammengefasst und kam zu durchschnittlichen Nährstoffsalden von N = 83 kg ha⁻¹, P = 3,6 kg ha⁻¹, K = 14 kg ha⁻¹, die drei gärtnerischen Betriebe aus UK wichen mit Salden von N = 194 kg ha⁻¹, P = 38,9 kg ha⁻¹, K = 122 kg ha⁻¹ sehr stark davon ab; die Düngepraxis entsprach noch nicht den heutigen Restriktionen für N mit organischen Düngern. In einem neueren Review von Reimer et al. (2020b) zu Nährstoffbilanzen in ökologischen Betrieben aus 56 Studien und über 600 Betrieben wurden mittlere Salden von -77 bis +18 kg N ha⁻¹, -4 bis +1 kg P ha⁻¹ und -31 bis +2 kg K ha⁻¹ für landwirtschaftliche Betriebe angeführt, die etwas höheren Salden wurden in tierhaltenden Betrieben gefunden. In den zwei Studien aus der Meta-Analyse von Reimer et al. (2020b) mit 23 gemüsebaulichen Betrieben waren die Salden mit 117 kg N ha⁻¹, 12 kg P ha⁻¹ und -44 kg K ha⁻¹ deutlich unausgeglichener im Vergleich zur Gesamtauswertung über alle Studien. Das gilt ebenfalls im Vergleich zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie, auch wenn die Tendenz – hohe Salden für N, gering positive bis ausgeglichene für P und eher negative bei K - übereinstimmt. Sehr viel extremer, aber mit gleichartiger Rangfolge, sind die Ergebnisse aus geschütztem Bio-Anbau in elf Betrieben in Baden-Württemberg (Zikeli et al., 2017). Die N-Salden erreichten im Mittel einen Wert von 197 kg ha⁻¹, K-Salden von -143 kg ha⁻¹, wobei es extreme Spannen für beide Nährstoffe gab. Phosphor hatte einen mittleren Saldo von 48 kg P ha⁻¹.

Der N-Saldo der zwölf untersuchten Gemüsebetriebe in Süd- und Westdeutschland ist höher als der anderer landwirtschaftlicher Betriebstypen, aber nicht so hoch und ausgeprägt wie in anderen Studien. Die Tendenz zum deutlich positiven N-Saldo zeigt die Bedeutung der N-Versorgung für den Gemüsebau. In den Betrieben ist man sich der hohen N-Aufnahme in kurzer Zeit und als Gesamtmenge bewusst und setzen die N-reichen Handelsdünger in entsprechender Menge ein, um Ertrag und Qualität in ausreichendem Maße zur erzielen.

Die N-Salden haben eine relativ starke positive Korrelation zum N-Input, insbesondere durch die Handelsdünger (Abbildung 2.1-5). Eine ähnliche Beziehung berichten (Hülsbergen et al., 2022; Hülsbergen and Rahmann, 2015) von den Pilotbetriebe auf der Basis von mehrjährigen

Beobachtungen (Abbildung 2.1-14). Die höheren Salden in Relation zum Input sind dabei wesentlich durch die konventionellen Betriebe und N-Düngung verursacht. Übertragen auf die vorliegenden Daten der Öko-Gemüsebaubetriebe nehmen die N-haltigen Handelsdünger (speziell die Keratine) eine den mineralischen N-Düngern ähnliche Funktion ein und zeigen eine vergleichbare Systemreaktion.

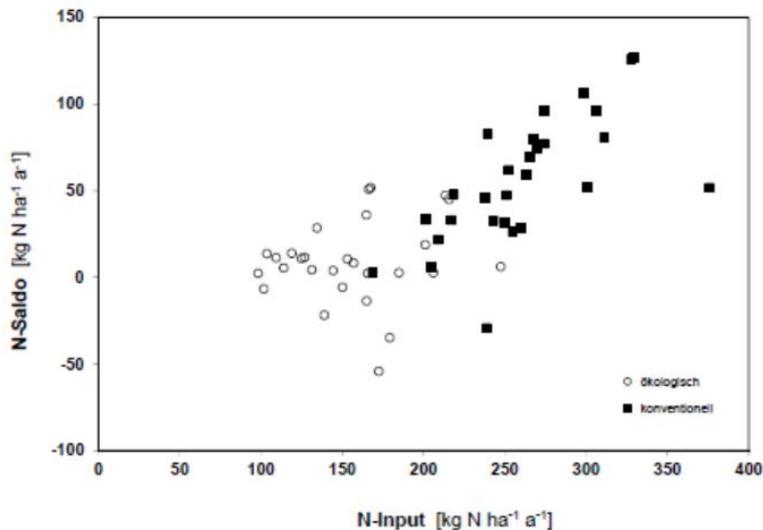


Abbildung 2.1-14: Beziehung zwischen N-Input und N-Saldo in ökologischen und konventionellen Pilotbetrieben (Hülsbergen et al., 2022; Hülsbergen und Rahmann, 2015)

Die mittleren P- und K-Salden der Öko-Gemüsebaubetriebe in der untersuchten Stichprobe liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie in anderen landwirtschaftlichen Betrieben. Die stark negativen K-Salden, die in den genannten Studien im Mittel für die Betriebe aufgeführt werden, findet man in der vorliegenden Stichprobe nur in einzelnen Gemüsebaubetrieben. Man könnte vermuten, dass die Bedeutung des Kaliums für das Wachstum für Bewirtschaften nicht so offensichtlich ist, obwohl der K-Export aus dem Betrieb mit Gemüse höher ist als Stickstoff. Die Kaliumversorgung kann je nach Standort über einen größeren Zeitraum vom Boden erfolgen, ohne dass gravierende Mangelsymptome beobachtet werden. Letztlich scheinen die Unterschiede doch sehr vom individuellen Management abhängig zu sein (es gibt keine Korrelationen zu anderen Düngeparametern); manche halten die ausreichende K-Versorgung für sehr wichtig, sie düngen gezielt und dann meist mineralisch und kontrollieren dies anhand der Bodenuntersuchungen. Andere setzen vorwiegend auf die Versorgung aus der Bodenreserve oder messen dem hohen Kaliumumsatz, der sich auch auf die Stickstoffeffizienz auswirken kann, nicht so große Bedeutung bei.

2.1.5.3 Schlussfolgerungen

Für die Berechnung und Auswertung von Nährstoffbilanzen konnte nur eine begrenzte Anzahl von ökologischen Gemüsebaubetrieben gewonnen werden. Gründe lagen in den schwierigen Bedingungen der Untersuchungsjahre 2019-2022 (Covid 19), aber auch an der Arbeitssituation. Entschädigungen für die zusätzliche Arbeit zur Datenbereitstellung konnte die Zahl der

teilnehmenden Betriebe nicht erhöhen. Vergleiche mit anderen Betriebsuntersuchungen zeigen aber, dass die Struktur der Ergebnisse aus den 12 Betrieben den Ergebnissen anderer Untersuchungen ähneln. Die Stickstoffsalden sind deutlich positiv und werden als Folge einer vorsorgenden Düngung für die stickstoffbedürftigen Gemüsekulturen gesehen. Die Phosphor-Salden liegen im Mittel der Betriebe und Untersuchungsjahre mit $+2 \text{ kg P ha}^{-1}$ fast bei einem Ausgleich von Null. Spezielle P-Düngung ist eher unüblich, der P-Ausgleich wird durch die P-Zufuhr v.a. in Festmistern und Komposten erreicht. Allerdings gibt es in einzelnen Betrieben deutliche Abweichungen mit negativen Salden, in denen der Trend der P-Verfügbarkeit im Boden kontrolliert werden sollte. Für Kalium ist die Situation vergleichbar zum Phosphor mit einem Saldo von fast Null ($+0,3 \text{ kg K ha}^{-1}$), allerdings mit weiteren Spannen im K-Saldo. Das K-Saldo kann nicht allein durch die organischen Dünger ausgeglichen werden, mit einer mineralischen Ergänzung ist es erreichbar.

Nährstoffbilanzen in Zusammenhang mit der Auswertung der Nährstoffeffizienz – möglichst über mehrere Jahre – wären ein gutes Instrument für das betriebliche Nährstoffmanagement. Sie geben Aufschluss über den Trend der Nährstoffreserven und -verfügbarkeiten im Betrieb. Sie können zur besseren Beurteilung der Werte der Bodenuntersuchung beitragen und Hinweise geben für den Einsatz von Systemen zur genaueren Düngeberechnungen.

2.1.6 Literaturverzeichnis

- Bachinger, J., Reckling, M., Stein-Bachinger, K., 2013. N-Saldo Rechner. https://www.zalf.de/en/forschung_lehre/software_downloads/Pages/default.aspx.
- Canali, S., Campanelli, G., Ciaccia, C., Diacono, M., Leteo, F., Fiore, A., Montemurro, F., 2015. Living mulch strategy for organic cauliflower (*Brassica oleracea* L.) production in central and southern Italy. *Ital J Agronomy* 10, 90. <https://doi.org/10.4081/ija.2015.644>
- Cuijpers, W.J.M., van de Burgt, G.J.H.M., Voogt, W., 2008. Nitrogen balances in Dutch organic greenhouse production. Presented at the 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italy.
- Dangour, A.D., Dohia, S.K., Hayter, A., Allen, E., Lock, K., Uauy, R., 2009. Nutritional quality of organic foods: a systematic review. *The American Journal of Clinical Nutrition* 90, 680–685. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2009.28041>
- destatis.de, 2022. Anbauflächen und Erntemengen von ökologisch angebautem Gemüse.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Bailey, B.A., 2005. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36, 2733–2757. <https://doi.org/10.1080/00103620500303939>
- Fink, M., Feller, C., 2001. Düngung im Freilandgemüsebau. IGZ.
- Hartwig, N.L., Ammon, H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Science* 50, 688–699. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0688:AIACCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0688:AIACCA]2.0.CO;2)
- Hortigate, 2022. Versuchsberichte [WWW Document]. URL <https://www.hortigate.de/versuchsberichte/gemuesebau/> (accessed 3.5.23).
- Hülsbergen, K.-J., 2003. Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme: Zugl.: Halle (Saale), Univ., Habil-Schr., 2002, Berichte aus der Agrarwissenschaft. Shaker, Aachen.
- Hülsbergen, K.-J., Rahmann, G. (Eds.), 2015. Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben: Forschungsergebnisse 2013-2014, Thünen-Report. Johann Heinrich von Thünen-Institut. https://doi.org/10.3220/REP_29_2015
- Hülsbergen, K.-J., Schmid, H., Paulsen, H.M. (Eds.), 2022. Steigerung der Ressourceneffizienz durch gesamtbetriebliche Optimierung der Pflanzen- und Milchproduktion unter Einbindung von Tierwohlaspekten: Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben, Thünen-Report. Johann-Henrich-von-Thünen-Institut, Braunschweig. <https://doi.org/10.3220/REP1646034190000>

- Hunter, 2022. HUNTER - Humus-Nährstoff-Treibhausgas-Energie-Rechner [WWW Document]. URL <http://www.pilotbetriebe.de/wissenstransfer.php> (accessed 2.5.23).
- Kolbe, D.H., 2008. Einfache Verfahren zur Berechnung der Humusbilanz für konventionelle und ökologische Anbaubedingungen.
- Kolbe, H., 2019. Einfluss mineralischer P- und K-Düngung auf die Ertragsreaktion der Fruchtarten in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung des Bodens unter den Anbaubedingungen des ökologischen Landbaus in Deutschland. *Journal für Kulturpflanzen* 71, 161–181. <https://doi.org/10.5073/JFK.2019.06.02>
- Kolbe, H., 2015. Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt: Nährstoffversorgung und Humusstatus? *Bodenfruchtbarkeit - Grundlage erfolgreicher Landwirtschaft*. BAD Tagungsband 2015.
- Kolbe, H., 2010. Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien.
- Koller, M., Fritzsche-Martin, A., Lichtenhahn, M., van den Berge, P., 2001. Biogemüsebau - Anzucht und Einsatz von Jungpflanzen. FiBL.
- Larkin, R.P., 2020. Effects of cover crops, rotation, and biological control products on soil properties and productivity in organic vegetable production in the Northeastern US. *Org. Agr.* 10, 171–186. <https://doi.org/10.1007/s13165-019-00257-3>
- Lebensmittelwissen, 2022. Gemüse - Portionsgrößen und Küchenmaße [WWW Document]. URL <https://www.lebensmittelwissen.de/tipps/haushalt/portionsgroessen/gemuese.php> (accessed 3.5.23).
- Løes, A.-K., Bünemann, E.K., Cooper, J., Hörtenhuber, S., Magid, J., Oberson, A., Möller, K., 2017. Nutrient supply to organic agriculture as governed by EU regulations and standards in six European countries. *Org. Agr.* 7, 395–418. <https://doi.org/10.1007/s13165-016-0165-3>
- Möller, K., 2018a. Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutr Cycl Agroecosyst* 112, 147–164. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9946-2>
- Möller, K., 2018b. Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutr Cycl Agroecosyst* 112, 147–164. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9946-2>
- Möller, K., Schultheiß, U., 2014. Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau: Charakterisierung und Empfehlungen für die Praxis, KTBL-Schrift. KTBL, Darmstadt.
- N-Expert, 2022. N-Expert – Düngungsberatung und Nährstoffbilanzierung im Freilandgemüsebau [WWW Document]. URL <https://n-expert.igzev.de/> (accessed 3.5.23).
- Oelofse, M., Jensen, L.S., Magid, J., 2013. The implications of phasing out conventional nutrient supply in organic agriculture: Denmark as a case. *Org. Agr.* 3, 41–55. <https://doi.org/10.1007/s13165-013-0045-z>
- Prüße, U., Hüther, L., Hohgardt, K., 2003. Mittlere Gewichte einzelner Obst- und Gemüseerzeugnisse. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Braunschweig.
- Reimer, M., Hartmann, T.E., Oelofse, M., Magid, J., Bünemann, E.K., Möller, K., 2020a. Reliance on Biological Nitrogen Fixation Depletes Soil Phosphorus and Potassium Reserves. *Nutr Cycl Agroecosyst* 118, 273–291. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10101-w>
- Reimer, M., Möller, K., Hartmann, T.E., 2020b. Meta-analysis of nutrient budgets in organic farms across Europe. *Org. Agr.* 10, 65–77. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00300-8>
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2022. Datensammlung Düngerecht.
- Seifert, D., 2020. Eigenbetriebliche Stickstoffversorgung in einem Demeter-Gemüsebaubetrieb (Bachelor-Thesis). TU München, Weihenstephan. Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme.
- Tittarelli, F., Båth, B., Ceglie, F.G., García, M.C., Möller, K., Reents, H.J., Védie, H., Voogt, W., 2017. Soil fertility management in organic greenhouse: an analysis of the European context. *Acta Hortic.* 113–126. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1164.15>
- von Fragstein und Niemsdorff, P., Geyer, B., Reents, H.J., 2004. Status quo Ökologischer Gemüsebau - Betriebsbefragungen. Unveröffentlichter Endbericht BLE-Projekt 02OE222.
- Voogt, W., 2014. Soil fertility management in organic greenhouse crops; A case study on fruit vegetables. *Acta Hortic.* 21–35. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1041.1>

- Watson, C. a., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L. r., Rayns, F. w., 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239–247. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00265.x>
- Watson, C. A.; Bengtsson, H.; Ebbesvik, M.; Løes, A-K.; Myrbeck, A.; Salomon, E. et al., 2002. A review of farm-scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. In: *Soil Use and Management* 18, S. 264–273. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2002.tb00268.x.
- Zikeli, S., Deil, L., Möller, K., 2017. The challenge of imbalanced nutrient flows in organic farming systems: A study of organic greenhouses in Southern Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 244, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.017>
- Fink M., F. C., Scharpf H.-C., Weier U., Maync A., Ziegler J., Schlaghecken J., Paschold P.-J., Strohmeyer K., Ed. 2001. Stickstoff-, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte in der Feldabfuhr (IGZ Großbeeren 2001). Gartenbauliche Berichte Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt,
- destatis.de, 2022. Anbauflächen und Erntemengen von ökologisch angebautem Gemüse (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/oekologisches-gemuese.html>)
- Hortigate, 2022. Versuchsberichte <https://www.hortigate.de/versuchsberichte/gemuesebau/> (www.hortigate.de)
- Hunter, 2022. HUNTER - Humus-Nährstoff-Treibhausgas-Energie-Rechner (<http://www.pilotbetriebe.de/wissenstransfer.php>)
- Koller, M.; Fritzsche-Martin, A.; Lichtenhahn, M.; van den Berge P., 2001. Biogemüsebau - Anzucht und Einsatz von Jungpflanzen. FIBL (<https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1212-gemuesejungpflanzen.pdf>),
- Lebensmittelwissen, 2022. Gemüse - Portionsgrößen und Küchenmaße (<https://www.lebensmittelwissen.de/tipps/haushalt/portionsgroessen/gemuese.php>)
- N-Expert, 2022. N-Expert – Düngungsberatung und Nährstoffbilanzierung im Freilandgemüsebau (<https://n-expert.igzev.de/>)
- Oekolandbau, 2022. Das Informationsportal. Hrsg: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (<https://www.oekolandbau.de/>)
- Prüße, U.; Hüther, L.; Hohgardt, K., 2003. Mittlere Gewichte einzelner Obst- und Gemüseerzeugnisse. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. Braunschweig. (https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/rueckst_gew_obst_gem%C3%BCde_pdf.html)
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2022. Datensammlung Düngerecht, (https://www.landwirtschaft.sachsen.de/umsetzungshinweise-dungeverordnung-20300.html?_cp=%7B%7D)

2.2 Implementierung und Weiterentwicklung EDV-gestützter Systeme im gärtnerischen Düngungsmanagement

A. Sradnick (IGZ), S. Tietjen (IGZ), R. Fischer (LWK NRW), C. Feller (IGZ), K. Kempkens (LWK NRW), K. Egenolf (LWK NRW), P. Schad (LWK NRW), E. Schulte-Eickhoff (LWK NRW), K. Postweiler (DLR), K. Rather (LVG), K.-U. Katroschan (LFA), K. Möller (LTZ), B. Rascher (LWG), A. Schmitt (LWG), S. Zikeli (UHOH)

2.2.1 Einleitung

Für die Entwicklung und Anwendung von EDV-gestützten Tools für ausgewogenere Düngungssysteme müssen zahlreiche Daten miteinander verknüpft werden. Dazu zählen unter anderem die Zusammensetzung der Düngemittel, der Nährstoffbedarf und Nährstoffentzug der Kulturen und der standortspezifische N-Freisetzungsverlauf. Dies muss für das Einzeljahr wie auch überjährig zur Abschätzung der Nachwirkung vorangegangener Düngungsmaßnahmen erfolgen. Auf diese Weise konnten in den Niederlanden durch den Einsatz eines Excel-basierenden EDV-Programms die N-Überschüsse in Gewächshaussystemen im Durchschnitt von etwa 50 % auf unter 10 % gesenkt werden (Cuijpers et al. 2008). Zwei Möglichkeiten, um das Nährstoffmanagement gärtnerischer Anbausysteme zu optimieren, stellen die Programme N-Expert und NDICEA dar. Beide Programme unterscheiden sich an wichtigen Punkten voneinander. N-Expert wurde entwickelt, um eine kulturspezifische N-Düngeempfehlung für Gemüsekulturen im Freiland zu geben. NDICEA hat die überjährige Modellierung von C- und N-Flüssen im Boden zum Ziel.

Die Software „N-Expert“ wurde 1992 am Leibniz Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V. in Großbeeren entwickelt und seitdem mehrfach überarbeitet, ergänzt und weiterentwickelt. N-Expert berechnet Düngungsempfehlungen für Gemüsekulturen im Freiland. Ziel von N-Expert ist es, den N-Bedarf einer Kultur so zu berechnen, dass die Düngung die Produktqualität sichert und eine übermäßige N-Düngung mit negativen Umweltauswirkungen vermindert wird. Die Basis der Stickstoffdüngungsempfehlungen bildet eine Kalkulation des täglichen N_{\min} -Vorrates (N_{\min} = mineralischer Stickstoff) im Boden unter Berücksichtigung der Pflanzenaufnahme (Modell). Die Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz, organischen Düngern und Ernterückständen wird unter Einbeziehung langjähriger Temperaturmittelwerte des Standorts und weiterer Einflussgrößen kalkuliert (Sradnick et al. 2017). Aktuelle Temperaturen, Niederschlag und Beregnung werden für die tägliche N_{\min} -Kalkulation nicht berücksichtigt. Die tägliche N_{\min} -Kalkulation startet mit bodenartabhängigen Werten jährlich neu. In N-Expert kann auch der N-Düngebedarf gemäß DüV 2020 berechnet werden sowie Düngungsempfehlungen und Nährstoffbilanzen für Phosphor, Kalium und Magnesium gerechnet werden.

Das in den Niederlanden entwickelte Programm „NDICEA“ bietet eine integrierte Abschätzung der N-Verfügbarkeit für die Kulturen im Verlauf des Jahres. Es kalkuliert die kulturartspezifische Nährstoffaufnahme einerseits und andererseits die erwartete N-Freisetzung aus Düngemitteln, Ernterückständen, Gründüngung und organischer Substanz im Boden. Die Minerali-

sierung der verschiedenen Arten organischen Materials im Boden wird je nach Bodentyp, aktueller Temperatur und Niederschlag (plus Berechnung) berechnet. Zusätzlich werden Verluste aufgrund von Auswaschung und Denitrifikation berücksichtigt. Während der Vegetationsperiode wird der verfügbare Stickstoff mit dem Erntebedarf in täglichen Zeitschritten abgeglichen.

Im Arbeitspaket 3 wurden beide Programme hinsichtlich einer Optimierung des Düngemanagement verglichen, validiert und weiterentwickelt. Im Fokus stand dabei eine Reduzierung des Düngemiteleinsatzes durch die Verwendung der EDV-basierten Systeme, die Erweiterung der Datenbasis bezüglich neuer Kulturen und des Nährstoffes Schwefel sowie Anpassungen zur Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit. Zum Vergleich beider Programme wurden deutschlandweite Exaktversuche auf Praxisbetrieben angelegt, in denen die Programme getestet und hinsichtlich ihres Einflusses auf die betriebsübliche Düngung beurteilt wurden. Ein weiteres übergeordnetes Ziel stellte die Entwicklung einer App zur Düngbedarfsermittlung direkt auf dem Schlag dar.

Für beide Tools wurden während der Projektlaufzeit webbasierte Versionen mit Schnittstellen aufgesetzt.

2.2.2 Material und Methoden

2.2.2.1 Vergleich der Datenbanken und Modelle (NDICEA, N-Expert)

2.2.2.1.1 Vergleich der Datenbanken

Für einen Vergleich von NIDCEA und N-Expert wurden die Daten über Kulturpflanzen aus den Versionen N-Expert 4.5.4 (Januar 2022) und NDICEA 6.2 (2014) entnommen. Die in N-Expert gespeicherten kulturspezifischen Daten wurden aus zwei verschiedenen Tabellen zusammengestellt: nex_crops_RDV und nex_organic_fertiliser_RDV. Die Daten für NDICEA wurden aus der Tabelle GewasExport entnommen.

Um die Anzahl der verschiedenen Kulturen zu zählen, wurden Spezifikationen ausgeschlossen und die entsprechenden Einträge zusammengefasst. So wurden zum Beispiel Früh-, Sommer- und Herbstblumenkohl alle als Blumenkohl gezählt. Eine Liste mit Kulturen, welche jeweils in nur einer der Datenbanken enthalten sind, wurde am IGZ erstellt und der LWK NRW übergeben. Für den Vergleich der Datenbanken wurden nur Gemüsekulturen betrachtet. Die Korrelationen der in den beiden Datensätzen gespeicherten Daten wurden mit identischen Kulturpflanzen (zum Beispiel Blumenkohl, früh) durchgeführt.

2.2.2.1.2 Vergleich mit in der Praxis erhobenen Daten

Für den Abgleich der in den Datenbanken hinterlegten Werte zu Frischmasse (Feldabfuhr und Erntereste, für NDICEA Werte aus dem ökologischen Anbau der Niederlande) und N-Gehalten (Feldabfuhr und Erntereste) mit in der Praxis erhobenen Daten, wurden Versuchsdaten des AP3s zusammengestellt und ausgewertet. Dabei wurden nur Versuche berücksichtigt, welche von mindestens zwei Versuchsstandorten stammen und in denen in jedem Treatment eine ausreichende N-Versorgung und gesundes Pflanzenwachstum gewährleistet war (vier Wiederholungen pro Betrieb). Die in die Auswertung einbezogenen Versuche wurden mit Brokkoli,

n = vier, Weißkohl, n = sieben, Blattsalate gemischt, n = fünf, Blattsalate grün, n = sechs, Blattsalate rot, n = vier, und Kopfsalat, n = zwei, durchgeführt.

2.2.3 Weiterentwicklung und Validierung der Modelle (NDICEA, N-Expert)

2.2.3.1 Validierung

2.2.3.1.1 N-Expert

Für die Validierung des Algorithmus zur Vorhersage der standortabhängigen Mineralisierung von N aus der organischen Bodensubstanz wurden die mit N-Expert geschätzten N_{\min} -N Gehalte (Verlauf des N_{\min} -N Wertes ab dem Zeitpunkt der letzten N_{\min} -N-Analyse vor Kulturstart) in den verschiedenen Bodentiefen mit den Versuchsdaten für alle drei Jahre abgeglichen. Als Maßzahl für die Validierung wurde der Root-mean-square Error (RMSE), welcher die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme abbildet, verwendet.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{t=n} (y' - y)^2}$$

Mit y' = Messdaten, y = die Vorhersage durch N-Expert, n = Anzahl der Beobachtungen

2.2.3.1.2 NDICEA

Zweistufige Validierung der Neu-Implementation:

1. Validierung der neu programmierten Basisversion 6, die der bis dato letzten Version 6.4.1 entspricht, anhand von 12 verfügbaren Output Größen.
2. Validierung der neuen Version 7 mit Neuerungen (Klimadaten, Initialisierung und weitere) und Vergleich mit der Basisversion.

2.2.3.2 Erweiterung und Anpassung der Datenbanken

Auf Basis des unter 4.2.2.1 beschriebenen Vergleichs der Datenbanken wurden Abweichungen, Ergänzungspotentiale und Lücken in den Datenbanken identifiziert. Um Erweiterungen und Änderungen in den Datenbanken vorzunehmen, wurden a) Daten untereinander ausgetauscht und b) Literaturdaten und unveröffentlichten Versuchsdaten ausgewertet.

2.2.3.3 Praxisvergleich verschiedener Düngungskonzepte

Zwischen 2019 und 2021 wurden bundesweit 40 Versuche auf elf Betrieben (neun Praxisbetriebe, zwei Versuchsanstalten) zum Vergleich der vier Düngungskonzepte (Treatments) 1) betriebliche Düngung, 2) Stickstoffdüngedbedarf gemäß Düngeverordnung (DüV), 3) N-Düngeempfehlung nach N-Expert und 4) N-Düngung abgeleitet aus NDICEA durchgeführt (Tabelle 2.2-1). Optional wurde ab 2020 eine Nulldüngung als fünfte Variante durchgeführt. Die Be-

triebe befanden sich in den Bundesländern RLP, BW, BY, MV und NRW. Neun von elf Betrieben waren ökologisch wirtschaftende Praxisbetriebe in denen die Versuche ohne Wiederholung (On-Farm-Versuche) angelegt wurden. Die Versuche wurden mit Kohl (*Brassica oleracea*; Weißkohl, Rosenkohl, Brokkoli, Blumenkohl) und Salat (*Lactuca Sativa* L.) durchgeführt. In 2019 wurden vier Versuche mit Möhren durchgeführt (*Daucus carota*), die in den Betrieben nicht gedüngt wurden. Deshalb fanden in 2020 und 2021 nur noch Versuche mit Salat und Kohl statt. Die Parzellen (Treatments) wurden in jedem Betrieb, für jeden Standort und jedes Jahr randomisiert. Zur Berechnung der Düngeempfehlungen wurden Informationen über die Fruchtfolge und Düngungsmaßnahmen der letzten drei Jahre, die Bodenart des Oberbodens (0 - 30 cm), das voraussichtliche Pflanzdatum, die erwartete Anbaudauer sowie der zu erwartende Ertrag von der versuchsbetreuenden Institution erhoben. Die organische Substanz und der N_{\min} -Gehalt des Bodens wurden vor der Pflanzung gemessen und in der Berechnung der Düngeempfehlungen berücksichtigt. Als Dünger wurden ausschließlich stickstoffreiche und schnell mineralisierende Keratin-basierte Dünger (Haar-, Horn-, Federbasis) eingesetzt. Die Tabelle 2.2-2 gibt einen Überblick zu den in den Praxisversuchen des AP3 erfassten Parametern. Die Analysemethoden sind in Tabelle 2.2-3 angegeben. Für die Frischmassebestimmung zur Ernte (Feldabfuhr und Ernterest) wurden das Gewicht von jeweils 16 – 20 Pflanzen in drei Ernteteilparzellen pro Treatment (ausschließlich der Randreihen) erfasst. Aus der Feldabfuhr und den Ernteresten wurde im Anschluss eine Mischprobe pro Treatment gebildet, in der die TM sowie der N- und C-Gehalt gemessen wurde.

Tabelle 2.2-1: Übersicht zu den im AP 3 durchgeführten Versuchen

Betriebs ID	Bundesland	Versuchsansteller	Jahr	Versuchs ID *	Kultur	Kommentar
Betrieb_1	BW	UHOH	2019	1	Kohl (Weißkohl)	Starkregen (> 50 L) am 28. und 29. Juni; nur 1/3 Ernteteilparzellen geerntet
			2020	2	Kohl (Weißkohl)	
			2021	XXX	Kohl (Weißkohl)	
Betrieb_2	BW	LTZ	2019	4	Kohl (Rosenkohl)	Phytophthora in Treatments NDICEA und DÜV mit 40 % Fehlstellen
			2020	5	Kohl (Rosenkohl)	
			2019	24	Salat (Blattsalate, grün)	
			2020	25	Salat (Kopfsalat)	
			2021	27	Salat (Kopfsalat)	
Betrieb_3	BW	LVG	2019	7	Kohl (Brokkoli)	
			2020	8	Kohl (Brokkoli)	
			2021	9	Kohl (Blumenkohl)	
Betrieb_4	BY	LWG	2019	10	Kohl (Weißkohl)	Versuch vor Ernte abgebrochen, da Parzellen überschwemmt (Starkregen)
			2020	11	Kohl (Weißkohl)	
			2021	XXX	Kohl (Weißkohl)	
Betrieb_5	BY	LWG	2019	12	Kohl (Weißkohl)	
			2020	13	Kohl (Weißkohl)	
			2021	14	Kohl (Weißkohl)	
Betrieb_6	NRW	LWKNRW	2020	16	Kohl (Brokkoli)	
			2021	17	Kohl (Brokkoli)	
			2019	18	Salat (Blattsalate, rot)	
			2020	19	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2021	20	Salat (Salate, verschiedene Arten)	

Betriebs ID	Bundesland	Versuchsansteller	Jahr	Versuchs ID *	Kultur	Kommentar
			2019	XXX	Möhren (Waschmöhre)	Nulldüngung in Treatments Betrieb und N-Expert Fehler in Berechnung der Düngempfehlung
			2019	XXX	Kohl (Blumenkohl)	
Betrieb_7	BW	UHOH	2019	21	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2020	22	Salat (Blattsalate, grün)	
			2021	23	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
Betrieb_9	BW	LVG	2019	28	Salat (Blattsalate, grün)	
			2021	29	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2020	XXX	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2021	XXX	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
Betrieb_10	BW	LVG	2020	31	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2021	XXX	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
Betrieb_11	MV	LFA MV	2021	33	Salat (Kopfsalat)	
			2020	XXX	Salat (Kopfsalat)	
Betrieb_12	RLP	DLR	2019	34	Salat (Blattsalate, grün)	
			2020	35	Salat (Blattsalate, grün)	
			2021	36	Salat (Blattsalate, grün)	
			2019	37	Salat (Blattsalate, rot)	
			2020	38	Salat (Blattsalate, rot)	
			2021	39	Salat (Blattsalate, rot)	
Betrieb_13	BW	UHOH	2019	XXX	Möhren (Waschmöhre)	Nulldüngung in allen Treatments, keine Ernteerfassung
Betrieb_14	BW	LTZ	2019	XXX	Möhren (Waschmöhre)	Nulldüngung in allen Treatments, keine Ernteerfassung
Betrieb_15	BW	LVG	2019	XXX	Möhren (Lagermöhre)	Nulldüngung in Treatments Betrieb, DüV und N-Expert

* Versuchs ID = XXX: Versuch nicht zur Gesamtauswertung verwendet. Begründung siehe Kommentar.

Tabelle 2.2-2: Probenumfang der im AP3 durchgeführten Praxisversuche. Für die Beprobung des Bodens wurde je Variante eine Mischprobe aus 16 Einstichen gezogen

Zeitpunkt (Kürzel und Beschreibung)	Parameter Boden
T1.1 Beginn der Aktivität des Bodenlebens (ca. März)	<input type="checkbox"/> pH (0-30 cm) <input type="checkbox"/> Humus/C _{org} (0-30 cm) <input type="checkbox"/> P (0-30 cm) <input type="checkbox"/> K (0-30 cm) <input type="checkbox"/> Mg (0-30 cm) <input type="checkbox"/> N _{min} (0-30, 30-60, 60-90 cm) <input type="checkbox"/> S _{min} (0-30, 30-60 cm)
T1.2 zwei, max. drei Wochen vor Düngung zur Pflanzung	<input type="checkbox"/> Salat N _{min} (0-30 cm) <input type="checkbox"/> Kohl:N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T2 Ein bis zwei Wochen nach Pflanzung	<input type="checkbox"/> N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T3 Nur Kohl! 4-6 Wochen nach Pflanzung	<input type="checkbox"/> N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T4 Ernte	<input type="checkbox"/> N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T5 Vier Wochen nach Ernte	<input type="checkbox"/> N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T6 Ende der Aktivität des Bodenlebens (Ende November)	<input type="checkbox"/> N _{min} (0-30, 30-60, 60-90 cm) <input type="checkbox"/> S _{min} (0-30, 30-60 cm)

Tabelle 2.2-3: Liste für Methoden der Bodenuntersuchungen

Parameter	Extraktion	Labormethode VDLUFA
pH	Extraktion in 0,01 mol/l CaCl ₂	A 5.1.1 nach VDLUFA
Humus/ C_{org}	-	A 4.1.3.1 nach VDLUFA, A 4.1.3.2 nach VDLUFA
P_{CAL/DL}	CAL-Methode, ggf. DL-Methode	A 6.2.1.1 nach VDLUFA / A 6.2.1.2 nach VDLUFA
K_{CAL/DL}	CAL-Methode, ggf. DL-Methode	A 6.2.1.1 nach VDLUFA / A 6.2.1.2 nach VDLUFA
Mg_{CaCl2}	CaCl ₂ -Auszug, 0,0125 mol/l	A 6.2.4.1 nach VDLUFA
N_{min}	Extraktion mit 0,0125 mol/l CaCl ₂	A 6.1.4.1 nach VDLUFA
S_{min}	Extraktion mit 0,0125 mol/l CaCl ₂	A 6.3.1 nach VDLUFA

2.2.3.4 Berechnungen

Ertrag

Aus den ermittelten Frischmassegewichten wurden Feldabfuhr und Ernterest [dt ha⁻¹] wie folgt berechnet:

$$\text{Biomasse [dt ha}^{-1}\text{]} = \text{Mittelwert Stückgewicht}_{\text{Treatment}}^* \text{ [kg]} * \text{Pflanzendichte [Anzahl-Pflanzen ha}^{-1}\text{]} / 100$$

* jeweils für Feldabfuhr und Ernterest

N-Effizienz

Zum Vergleich der Düngemanagementstrategien wurde die N-Effizienz der Varianten auf Basis der in den Praxisversuchen erhobenen Daten wie folgt berechnet:

$$\text{N-Effizienz} = N_{\text{Feldabfuhr}} [\text{kg ha}^{-1}] / N_{\text{Dünger}} [\text{kg ha}^{-1}]$$

2.2.3.5 Datenverarbeitung und statistische Auswertung

Alle Daten wurden in Excel erfasst und mit R Version 4.1.1 (RCoreTeam, 2021) verarbeitet (Wickham et al., 2019) und ausgewertet. Für die statistische Auswertung wurden jeweils für die Kohl- und Salatversuche gemischte lineare Modelle erstellt (Bates et al., 2015), welche den Versuch als Random-Faktor beinhalten. Die Modellvoraussetzungen wurden mit dem DHARMA Packet (Hartig, 2021) überprüft. Zur Auswertung wurde eine ANOVA durchgeführt (Fox und Weisberg, 2019). Dabei wurden die modellbasierten Mittelwerte und der Standardfehler (SE) mit dem Scheffé Post-Hoc-Test berechnet (Signifikanz Level $p < 0.05$) (Hothorn et al., 2008; Lenth, 2021).

2.2.4 Ergebnisse und Diskussion

2.2.4.1 Vergleich der Modelle und Datenbanken

Während in N-Expert als Output kulturspezifische N-Düngeempfehlungen berechnet werden, ist es das Ziel von NDICEA überjährige N- und C-Verläufe im Boden abzubilden. Dieser spezifische Fokus der beiden Tools zeigt sich auch in ihren Eigenschaften und Unterschieden (Tabelle 2.2-4). Vor diesem Hintergrund arbeitet N-Expert mit Mittelwerten der Bodentemperaturen, da die N-Düngeempfehlung vor Kulturbeginn berechnet wird und das Wetter nicht vorhergesagt werden kann. Auch die Wasserdynamik im Boden wird aus diesen Gründen nicht modelliert. Verluste werden nur anhand eines einfachen Algorithmus abgeschätzt. Für NDICEA bilden tagesaktuelle Temperatur- und Wetterdaten eine Grundlage, anhand derer die überjährigen C- und N-Flüsse im Boden berechnet werden.

Tabelle 2.2-4: Eigenschaften und Unterschiede von N-Expert und NDICEA

	N-Expert	NDICEA
Output	N-Düngeempfehlung	N-Verläufe im Boden
Kalkulationszeiträume	Einjährig (unter Einbezug des Vorjahres) und überjährige Kulturen	Überjährig
Wetter- und Temperaturdaten	Mittelwerte der Bodentemperatur der letzten 15 Jahre (nächstgelegene Wetterstation)	Tagesaktuelle Temperatur- und Wetterdaten; Durchschnittsjahr für Zukunftsberechnungen
Wasserdynamik im Boden	Algorithmus für Verluste	Leaching-Modell

Die kulturspezifischen Daten der beiden Programme N-Expert und NDICEA weisen vielfach Unterschiede auf, welche in Abbildung 2.2-1 zusammengefasst dargestellt sind. In beiden Datensätzen sind Spezifikationen wie früh und spät oder Frühling, Sommer und Herbst für einige Kulturen definiert. In N-Expert werden auch Angaben zum Anbaumanagement gemacht (z. B. gepflanzt, gesät, Bündel) und ob die Kultur für den Frisch- oder Industriemarkt produziert wird (z. B. Spinat oder Buschbohne). Aus entwicklungstechnischen Gründen werden mehrjährige Kulturen (z. B. Spargel erstes Jahr, Spargel zweites Jahr) und Kulturen, die mehrfach geerntet werden (z. B. Schnittlauch erster Schnitt, Schnittlauch Folgeschnitt) in N-Expert als separate Kulturen (Einträge in der Datenbank) aufgeführt. In NDICEA wird dieses Konzept zum Beispiel

für Kräuter mit mehreren Schnitten, Klee gras, Luzerne oder Grasland verwendet. Die 417 Einträge in der kulturspezifischen Datentabelle von N-Expert setzen sich aus 173 unterschiedlichen Kulturen zusammen. In NDICEA sind 127 Einträge gelistet, welche 84 verschiedene Kulturen umfassen.

Die Einträge in beiden Datentabellen setzen sich überwiegend aus gartenbaulichen Kulturen (N-Expert 31 %, NDICEA 48 % der gelisteten Kulturen) zusammen. Dazu kommen Kulturen des Ackerbaus, Gründüngungskulturen, Kräuter und sonstige Kulturen. Die sonstigen Kulturen umfassen in N-Expert Erdbeeren, Tabak sowie Tomaten und Gurken im Gewächshausanbau (2 % der Kulturen). Für NDICEA wurden Leinsamen, Grassamen, CCM, Grünland und Brache als "Sonstige" gezählt (6 % der Kulturen). In NDICEA werden darüber hinaus 15 % der gelisteten Kulturen der Kulturgruppe Blumen zugeordnet (u. a. Hyazinthen, Krokusse, Lilien, Tulpen). Die ackerbaulichen Kulturen weisen in beiden Datensätzen einen Anteil von jeweils 20 % auf. Im Bereich der Gründüngungspflanzen und Kräuter wurden Ergänzungspotentiale für NDICEA identifiziert. N-Expert listet 54 Gründüngungspflanzen und 29 Kräuter im Vergleich zu vier bzw. fünf Einträgen in NDICEA.

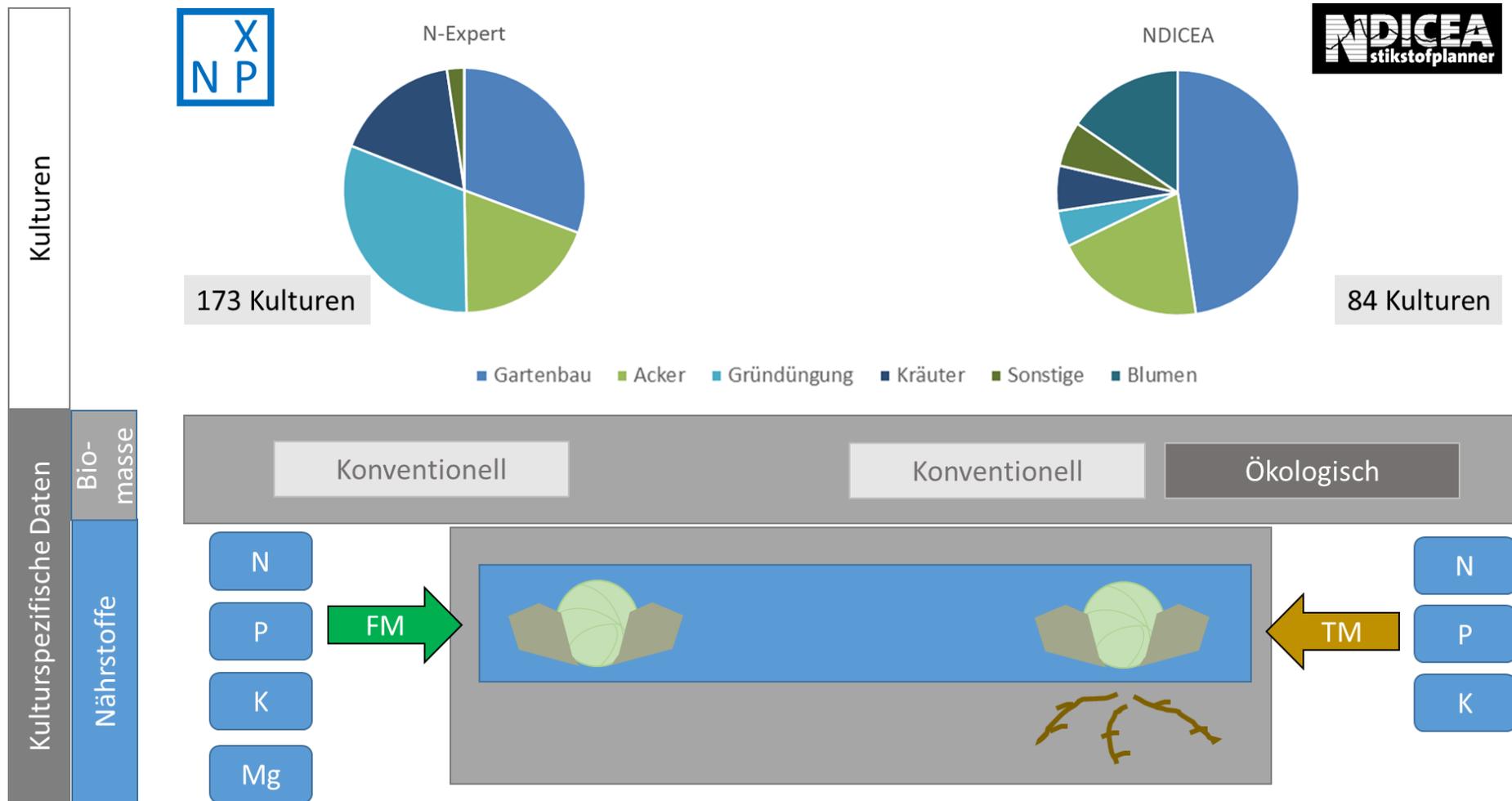


Abbildung 2.2-1: Schema des Aufbaus der kulturspezifischen Daten von N-Expert und NDICEA

Während N-Expert Biomassedaten auf Grundlage des konventionellen Landbaus bereitstellt, listet NDICEA auch Standardwerte für den ökologischen Landbau. In N-Expert sind Daten zu Feldabfuhr und Ernteresten enthalten. In NDICEA werden diese noch durch Feinwurzeln ergänzt. Die Standarderträge in N-Expert waren für identische Gemüsekulturen im Mittel 18 % höher als in NDICEA (Abbildung 2.2-2). Diese Standarderträge können in N-Expert jedoch innerhalb von Ober- und Untergrenzen an das betriebsübliche Niveau angepasst werden. Die ökologischen Erträge innerhalb NDICEAs sind in der Regel um 17 % gegenüber den konventionellen Erträgen reduziert. Die in NDICEA gelisteten Standarderträge für den ökologischen Gemüsebau liegen 30 % unterhalb der in N-Expert gelisteten Standarderträge.

Durchschnittliche Feldabfuhr nach N-Expert und NDICEA

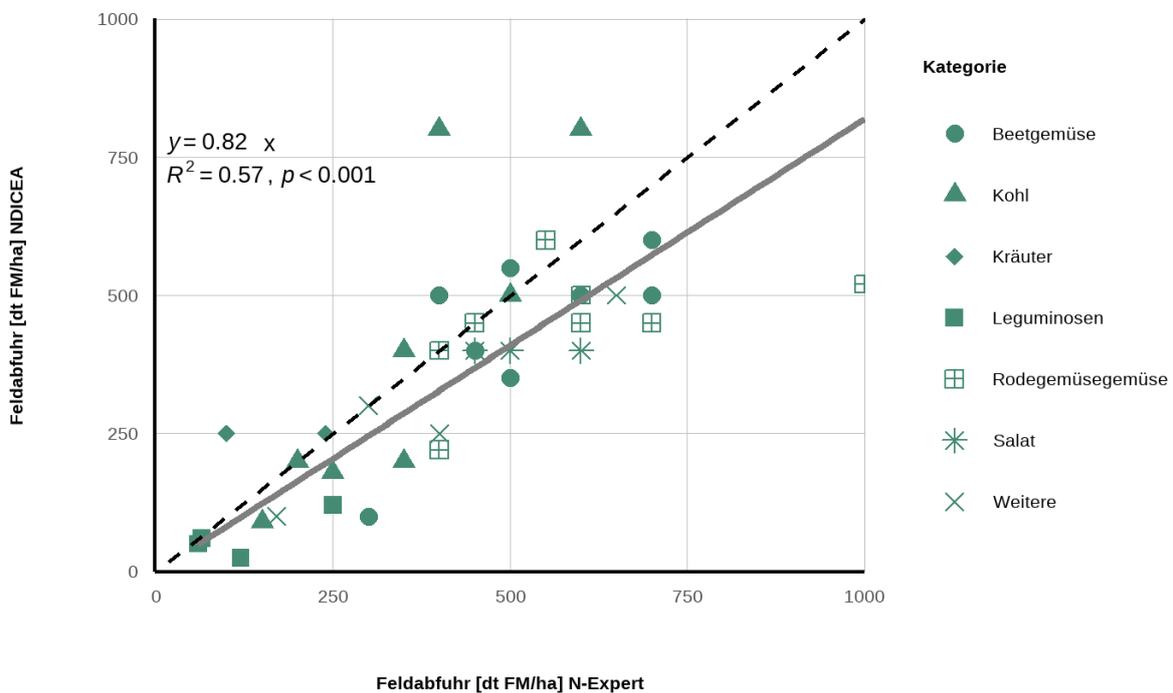


Abbildung 2.2-2: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA (n = 47)

(a) Durchschnittliche Feldabfuhr konventionell und ökologisch nach NDICEA (b) Durchschnittliche Feldabfuhr konventionell (N-Expert) und ökologisch (NDICEA)

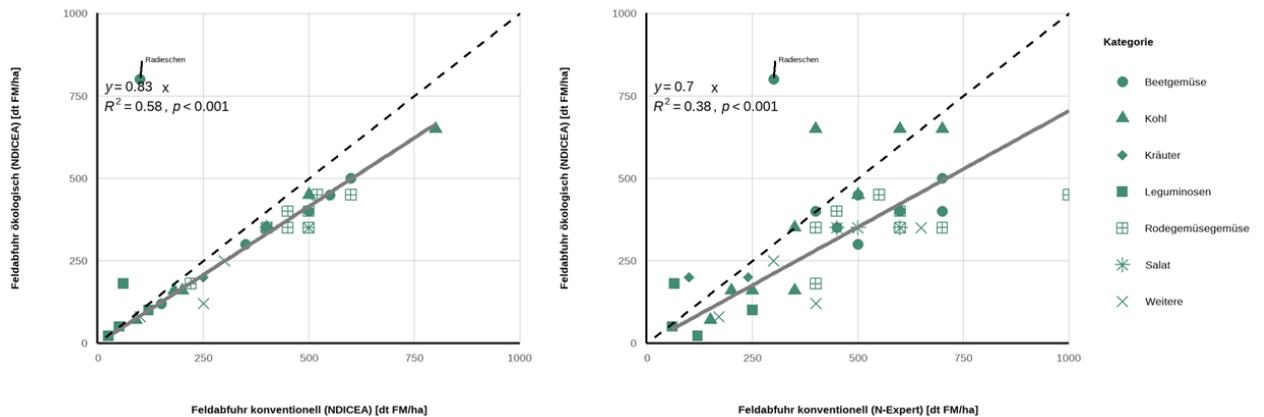
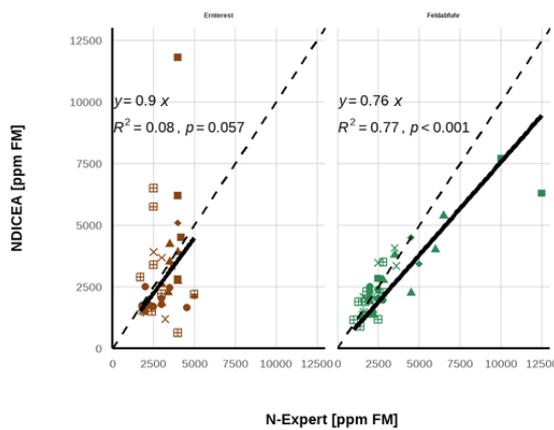


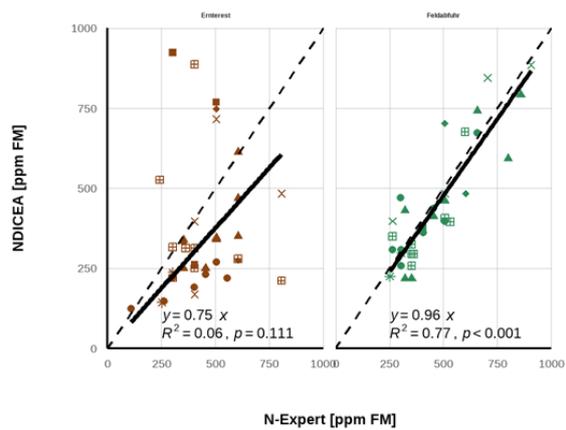
Abbildung 2.2-3: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA mit den durchschnittlichen Angaben zur ökologischen Feldabfuhr in NDICEA (n = 47)

Die Nährstoffgehalte (N, P, K) sind in beiden Tools für die Feldabfuhr und Erntereste hinterlegt. Außerdem sind in N-Expert Werte für die Mg-Gehalte im Aufwuchs hinterlegt. In N-Expert sind die Nährstoffgehalte in Bezug auf die Frischmasse angegeben. Die Datenbank enthält keine Angaben zur Trockenmasse. In NDICEA werden die Nährstoffgehalte auf die Trockenmasse bezogen. Da die Datenbank von NDICEA auch Trockenmassegehalte enthält, wurden die Angaben in ppm (Frischmasse) umgerechnet. Die Analyse der in den Datenbanken hinterlegten Nährstoffvergleiche zeigt, dass die Angaben in beiden Tools für N, P und K in der Feldabfuhr mit Korrelationskoeffizienten von 0.43 bis 0.77 sehr gut korrelieren (Abbildung 2.2-4). Die absoluten Abweichungen von N in den Ernteresten, P in der Feldabfuhr und K in beiden waren gering, von drei bis zehn %. Für N in der Feldabfuhr und P in den Ernteresten betrug die Abweichungen für die betrachteten Kulturen jedoch bis zu 25 %. Diese Werte wurden für beide Systeme einer Prüfung unterzogen und bei Bedarf angepasst.

(a) Vergleich der N-Gehalte



(b) Vergleich der P-Gehalte



(c) Vergleich der K-Gehalte

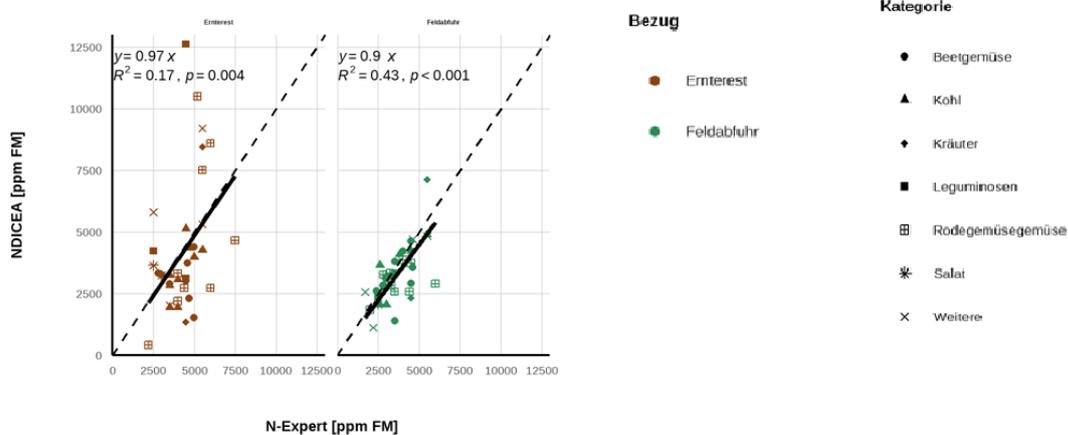


Abbildung 2.2-4: Korrelation der Nährstoffkonzentrationen (N, P, K) identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA (n = 47)

2.2.5 Vergleich mit in der Praxis erhobenen Daten

2.2.5.1 Frischmasse

Der Vergleich der Versuchsdaten mit den Default-Werten zur Frischmasse aus N-Expert und NDICEA zeigte ein heterogenes Bild (Tabelle 2.2-5). Für beide Kohlarten wurden große prozentuale Abweichungen für die Feldabfuhr und die Erntereste festgestellt. Die standardmäßige Feldabfuhr für Weißkohl liegt in beiden Programmen deutlich oberhalb der in den Versuchen erzielten Werte (73 – 99 %). Auch für die Erntereste liegen als Standard höhere Werte vor, hier beträgt der Unterschied jedoch mit 15 - 23 % deutlich weniger.

Von den in den Versuchen verwendeten Salatarten sind in NDICEA nur Standardwerte für Kopfsalat hinterlegt. Während die Default-Frischmasse für den Ertrag hier gut mit den in der Praxis erhobenen Daten übereinstimmt, wird die Höhe der Erntereste um 45 % überschätzt. Für N-Expert zeigten sich erhebliche Überschätzungen bei den gemischten Salaten bezüglich Feldabfuhr und Erntereste (38 und 141 %).

Die Frischmassedaten können jedoch in beiden Tools angepasst werden. Unterschiede von bis zu zehn Prozent können dabei immer auch durch die biologische Variabilität verursacht sein (Wissmeier und Olf, 2019). Die Ergebnisse deuten eine große Heterogenität an und ein umfassender Abgleich der Standardwerte mit Praxisdaten müsste mit einer größeren Stichprobe durchgeführt werden.

Tabelle 2.2-5: Vergleich der in N-Expert und NDICEA hinterlegten Standarddaten zur Frischmasse von Feldabfuhr und Ernteresten [dt ha⁻¹] mit den Versuchsdaten des AP3

Feldabfuhr					
Kultur	N-Expert	NDICEA	Versuchsdaten	N-Expert	NDICEA
	Mittelwert	Mittelwert	MW (SD)	%-Abweichung	
Frischmasse [dt ha⁻¹]					
Brokkoli	150	70	127 (66)	17.9	-45
Weißkohl, Frischmarkt	566.7 (400-700)	650	327 (125)	73.1	98.6
Salate, mix	450		327 (144)	37.6	
Blattsalate, gr.	350		340 (89)	2.9	
Blattsalate, r.	300		363 (90)	-17.4	
Kopfsalat	500	350	324 (111)	54.3	8

Erntereste					
Kultur	N-Expert	NDICEA	Versuchsdaten	N-Expert	NDICEA
	Mittelwert	Mittelwert	MW (SD)	%-Abweichung	
Brokkoli	550	280	424.7 (129)	29.5	-34.1
Weißkohl, Frischmarkt	466.7 (400–500)	497.1	405.8 (160)	15	22.5
Salate, mix	150		62.3 (38)	140.8	
Blattsalate, gr.	100		155.6 (111)	-35.7	
Blattsalate, r.	100		164.1 (123)	-39.1	
Kopfsalat	100	120.1	82.9 (12)	20.6	44.9

2.2.5.2 Stickstoffgehalte

Im Gegensatz zu den Frischmassedaten, können die N-Gehalte in der Feldabfuhr und den Ernteresten durch die Anwender*innen von N-Expert und NDICEA nicht angepasst werden. Die Daten sind essentiell um die N-Aufnahme der Kulturen zu modellieren.

Der Vergleich der in den Tools hinterlegten Daten mit den Praxiswerten (Tabelle 2.2-6) zeigt zum Teil erhebliche Abweichungen der N-Gehalte der Feldabfuhr für Brokkoli, Weißkohl und Kopfsalat mit Unterschieden von 49, 33 und 29 % in NDICEA und 22 bzw. 36 % geringeren Werte für gemischte Salate und Kopfsalat in N-Expert. Die N-Gehalte in der Feldabfuhr des Kopfsalats weisen dabei jedoch eine hohe Standardabweichung auf. Diese ist auf die geringe Versuchsanzahl (n = 2) mit stark voneinander abweichenden Werten zurückzuführen.

Die Abweichungen der N-Gehalte in den Ernteresten waren deutlich geringer und bewegten sich überwiegend im Rahmen von ± 15 %. Größere Abweichungen im Vergleich zu den Praxisdaten konnten für NDICEA bei Brokkoli (Überschätzung der N-Gehalte um 24 %) und Weißkohl (Unterschätzung der N-Gehalte von 27 %) festgestellt werden. Eine breite Datenbasis wäre auch hier wichtig, um gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

Tabelle 2.2-6: Vergleich der in N-Expert und NDICEA hinterlegten N-Gehalte in Feldabfuhr und Ernteresten [ppm] mit den Versuchsdaten des AP3.

Feldabfuhr					
Kultur	N-Expert	NDICEA	Versuchsdaten	N-Expert	NDICEA
			MW (SD)		
N-Gehalte [ppm in FM]					
Brokkoli	4500	2200	4300 (500)	4.7	-48.8
Weißkohl, Frischmarkt	2100	1400	2100 (600)	0	-33.3
Salate, mix	1800		2300 (400)	-21.7	
Blattsalate, gr.	1900		2100 (500)	-9.5	
Blattsalate, r.	1900		1900 (400)	0	
Kopfsalat	1800	2000	2800 (1400)	-35.7	-28.6
Erntereste					
Brokkoli	3500	4200	3400 (600)	2.9	23.5
Weißkohl	3000	1900	2600 (700)	15.4	-26.9
Salate, mix	1800		2000 (300)	-10	
Blattsalate, gr.	1900		2200 (700)	-13.6	
Blattsalate, r.	1900		1700 (400)	11.8	
Kopfsalat	1800	1500	1600 (500)	12.5	-6.3

2.2.6 Weiterentwicklung und Validierung der Programme

2.2.6.1 N-Expert

2.2.6.1.1 Offline Version

Im Rahmen des Projektes wurde die Offline- und die webbasierte Version von N-Expert weiterentwickelt. Dabei standen neue Funktionen, die Implementierung neuer Algorithmen, Verbesserungen hinsichtlich der Anwenderfreundlichkeit, Erweiterungen der Datenbanken und Aktualisierungen von Datenbeständen im Vordergrund. Die Tabelle 2.2-7 gibt einen Überblick über die im Projektkontext veröffentlichten Offline-Versionen von N-Expert. Die aktuelle Version von N-Expert mit Installationsprogramm kann unter <http://n-expert.igzev.de/downloads/> kostenfrei für Windowsbetriebssysteme heruntergeladen werden.

Tabelle 2.2-7: Überblick über im Projektkontext veröffentlichte Offline-Versionen von N-Expert

Datum	Version	Wichtige Neuerungen
20.07.2020	4.5.2	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung neuer Gemüsekulturen • Datenbankaktualisierung (Beispielbetrieb) • Fehlerbehebungen
20.04.2021	4.5.3	<ul style="list-style-type: none"> • Aktualisierung der Wetterdaten • Implementierung von Überwinterungskulturen • Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit • Fehlerbehebungen
07.01.2022	4.5.4	<ul style="list-style-type: none"> • Überarbeitung des Algorithmus zur N-Mineralisierung aus organischen Düngemitteln und Ernteresten des Vorjahres • Implementierung eines Algorithmus zur Vorhersage der N-Aufnahme überwinternder Zwischenfrüchte • Anpassung der Kulturdauer und Standarderträge von Zwischenfrüchten • Fehlerbehebungen
20.09.2022	4.6.0	<ul style="list-style-type: none"> • Überarbeitung des Algorithmus zur P-, K-, Mg-Düngeempfehlung • Nährstoffeinsatz nach DüV 2020, entfall des Nährstoffvergleichs
12.2022	4.7.0	<ul style="list-style-type: none"> • Implementierung des Algorithmus zur standortspezifischen Abschätzung der N-Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz

2.2.6.1.2 Datenbankaktualisierungen

Folgende Gemüsekulturen wurden in N-Expert ergänzt und angepasst: Pak Choi, Pak Choi Mini, Dicke Bohne, überwinterndes Gemüse (Zwiebel trocken, Bundzwiebeln, Porree, Feldsalat, Spinat, Petersilie), Rhabarber und Spargel. Zudem wurde die umfassende Datensammlung zu Zwischenfrüchten aktualisiert und nach Feedback aus dem Projektkonsortium hinsichtlich der Kulturdauer angepasst. Eine Aktualisierung des Beispielbetriebs sowie der hinterlegten Bodentemperaturen wurden vorgenommen (Durchschnitt der Jahre 2004 - 2019). Außerdem wurde die Liste der organischen Düngemittel aktualisiert und vervollständigt.

2.2.6.1.3 Algorithmen

Überwinterungskulturen

Im Projektverlauf wurden Anpassungen der Algorithmen vorgenommen, welche die Anwendung N-Experts für den ökologischen Gemüsebau verbessern. Dabei lag ein Fokus auf Überwinterungskulturen. Bis zur Version 4.5.3 konnte N-Expert den N_{\min} -Gehalt im Boden immer nur bis zum 31.12. des entsprechenden Jahres berechnen. Für das Folgejahr wurde der eingetragene N_{\min} -Schätzwert (bodenartabhängige Schätzwerte oder Referenzwerte der Bundesländer) als Startwert für die Modellierung verwendet. In einem ersten Schritt wurde die Möglichkeit realisiert verkettete Kulturen einzutragen (Abbildung 2.2-5). Dafür wurden die überwinternden Gemüsekulturen Spinat, Porree, Zwiebeln, Petersilie und Feldsalat ausgewählt.

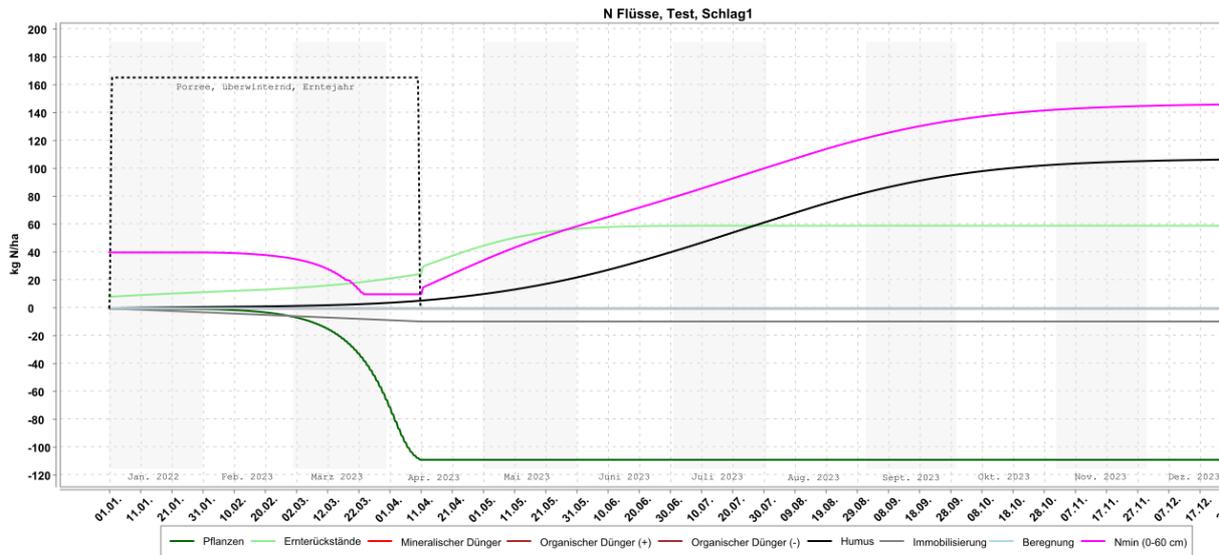


Abbildung 2.2-5: N-Aufnahme von Wintergemüse in N-Expert 4.5.4

Für N-Expert 4.5.4 wurde ein Algorithmus zur Vorhersage der N-Aufnahme der Winterkulturen (Zwischenfrüchte und Ackerkulturen) entwickelt und implementiert. Die N-Aufnahme der Pflanzen findet nur an Tagen mit Bodentemperaturen von mindestens 7 °C statt. Für alle Zwischenfrüchte und Ackerkulturen, welche als überjährige Kulturen eingesetzt werden, wurde die maximale Kulturdauer auf 350 Tage festgelegt. Somit kann eine Fruchtfolge mit überwinternden Zwischenfrüchten, wie sie im ökologischen Gemüsebau teilweise praktiziert wird, in N-Expert dargestellt werden (Abbildung 2.2-6). Damit kann die Mineralisierung aus den Ernteresten der Vorkultur vollumfänglich in der N-Düngeempfehlung berücksichtigt werden.

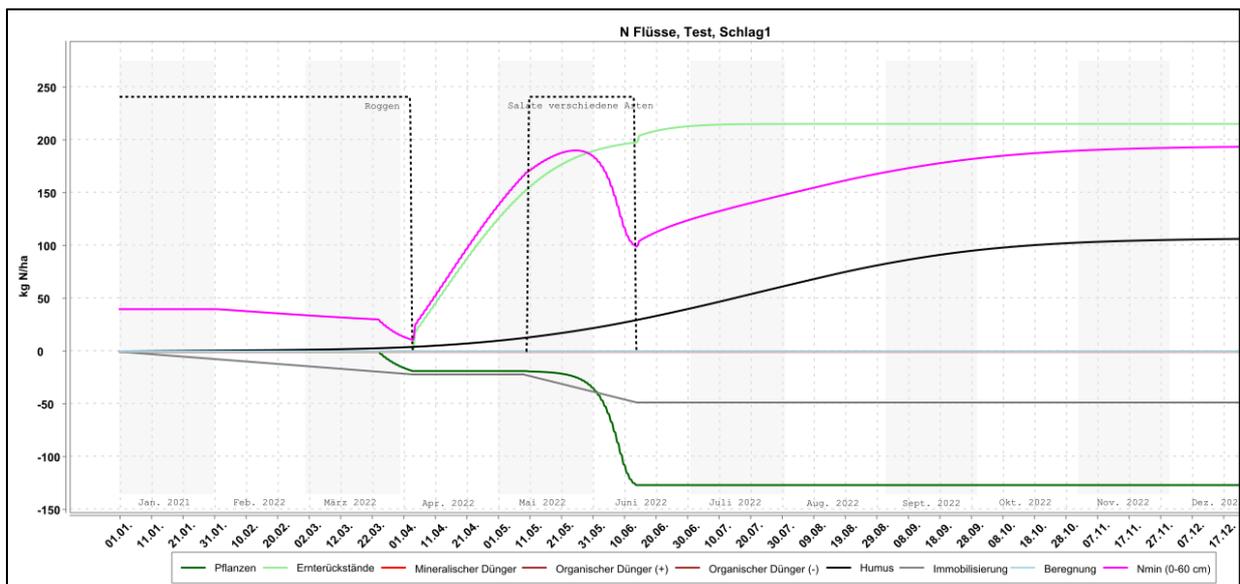


Abbildung 2.2-6: N-Aufnahme von Winterkulturen in N-Expert 4.5.4

2.2.6.1.4 Berücksichtigung der N-Mineralisierung aus organischen Düngern und Ernteresten des Vorjahres

N-Expert wurde für den konventionellen Gemüsebau entwickelt. Daher wurden im Programm bisher einjährige N-Flüsse für die Vorhersage des im Boden verfügbaren N_{\min} betrachtet. Die Mineralisierung von N aus dem N_t aufgebracht organischer Dünger wurde daher bisher nur im Jahr der Ausbringung berücksichtigt. In diesem Zeitraum werden bis zu 95 % des N, was maximal aus diesen Düngern mineralisiert wird, umgesetzt (Sradnick et al., 2017). Im ökologischen Gemüsebau werden über Jahre organische Dünger auf die Flächen ausgebracht. Um den Mineralisierungsprozessen in diesen Böden gerecht zu werden, wurde ein Algorithmus zur Berücksichtigung der N-Mineralisierung von organischen Düngern und aus den Ernterückständen aus dem Vorjahr entwickelt und in N-Expert 4.5.4 implementiert. Die Mineralisierung von N aus diesen beiden Größen wird nun vom Zeitpunkt der Ausbringung bis zum 30.06. des Folgejahres berücksichtigt.

2.2.6.1.5 Validierung und Implementierung des Algorithmus zur Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz

Die Mineralisierung von N aus der organischen Bodensubstanz wird von N-Expert pauschal mit fünf kg N ha^{-1} und Woche in 0 bis 30 cm Bodentiefe im Sommer (bei 20°C Bodentemperatur) angenommen. Hieraus errechnet das Programm den Zeitverlauf der Mineralisierung während des Jahres. Dazu werden die Bodentemperaturen der dem Betrieb zugeordneten Wetterstation verwendet. Der voreingestellte Wert basiert auf Literaturwerten. Zwar bietet N-Expert die Möglichkeit diesen Wert zu überschreiben, die Abfrage bei den Landwirten vor Beginn der Versuche des AP3's zeigte jedoch, dass keiner der Praxisbetriebe hierzu eine Größe angeben konnte.

Zudem zeichnete sich im ersten Projektjahr ab, dass die Implementierung einer standortspezifischen Abschätzung der N-Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz zu einer besseren Abschätzung der N-Flüsse im ökologischen Gemüsebau beitragen und somit die N-Effizienz steigern könnte. Beispielsweise war in den Praxisversuchen ein Betrieb vertreten, welcher auch trocken gelegten Moorböden mit Humusgehalten von 12 bis 20 % wirtschaftet. Eine pauschale Annahme der Mineralisierung von fünf kg N ha^{-1} und Woche im Sommer würde der tatsächlichen Mineralisierung von N aus der organischen Bodensubstanz hier nicht gerecht werden. Daher wurde am IGZ im ersten Versuchsjahr ein Algorithmus zur standortabhängigen Abschätzung (Bodenart, Humusgehalt und lokale Bodentemperatur) der N-Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz entwickelt. Die Parametrisierung wurde mit den im AP3 erhobenen Versuchsdaten durchgeführt. Unter Anwendung des Algorithmus zur Düngebedarfsermittlung in 2021 reduzierte sich der mit N-Expert berechnete N-Bedarf gegenüber der DüV Variante für Weißkohl um 52 bis 100 % (drei Versuche) und für die Salate durchschnittlich 25 % (sieben bis 56 %, neun Versuche).

2.2.6.1.6 Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit/Implementierungshürden

In allen im Projekt realisierten Versionen wurden die Hilfestellungen in N-Expert ergänzt bzw. angepasst. Außerdem wurde die Übersetzung in Englisch und Niederländisch komplettiert. Es

wurden Schulungen/Webinare zur Anwendung von N-Expert angeboten, welche von Projektpartnern angenommen wurden:

- 18.08.2020 LVG Heidelberg, Landratsamt Karlsruhe
- 17.09.2020 Universität Hohenheim, DLR, Stenon
- 04.12.2020 LWG
- 26.03.2021 Workshop zu N-Expert und NDICEA, LTZ Augustenberg, LWG, LFA MV, Universität Hohenheim, DLR, LVG
- 21.02.2022 LVG Heidelberg, Landratsamt Karlsruhe

In Vor- und Nachbereitung dieser Workshops wurden anhand der Rückmeldung der Teilnehmer*innen Implementierungshürden identifiziert. Um den Einstieg in die Arbeit mit N-Expert zu erleichtern, wurden eine Klickanleitung im Videoformat (https://www.youtube.com/playlist?list=PLN3y-L9dk5q07QiAU0paplrO_zKsF9Uge) sowie ein Handbuch (<http://n-expert.igzev.de/wp-content/uploads/2022/02/Handbuch-N-Expert-454.pdf>) erstellt und aktualisiert. Um den Bekanntheitsgrade von N-Expert zu erhöhen wurden Artikel in praxisnahen Zeitschriften über N-Expert und organischer Düngung (Tietjen et al., 2021) sowie der Aktualisierung des Programms (Tietjen, 2022) veröffentlicht. Das Programm wurde zusätzlich auf verschiedenen Tagungen im Rahmen von Vorträgen vorgestellt:

- Bioland Wintertagung in NRW, Februar 2020
- Feldtag LFA MV, September 2020
- Treffen des Arbeitskreises Ökologischer Gemüsebau, Februar 2021
- Tagung „Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau“, TUM, August 2021
- Feldtag LFA MV, August 2021
- Landscape, September 2021

2.2.6.1.7 Webbasierte Version von N-Expert

Hinsichtlich der Erfüllung des Meilensteins „Bereitstellung einer App zum Düngemanagement im ökologischen Gemüsebau“ wurde der Fertiliser Demand Service (FDS) als webbasierte Version von N-Expert programmiert, welche in ihren Funktionen N-Expert 4.7 entspricht. Über die Schnittstelle des FDS können webbasierte Anwendungen auf die Funktionalitäten zugreifen. Eine Dokumentation der Schnittstelle liegt am IGZ vor und kann unter N-Expert@igzev.de angefragt werden.

2.2.6.1.8 Schwefelschätzrahmen nach N-Expert

Teilziel des Projektes war es, ein hinsichtlich N, P, K, Mg und S ausgeglichenes Düngemanagement zu ermöglichen. Am IGZ wurde daher ein Schwefelschätzrahmen für den Freilandgemüsebau entwickelt und als kostenfreie Webanwendung im Januar 2022 bereitgestellt. Der Zugang zur Webanwendung sowie in diesem Kontext veröffentlichte Daten sind unter <http://n-expert.igzev.de/schwefelschaetzrahmen/> abrufbar.

Die Algorithmen der des Schwefelschätzrahmen nach N-Expert basieren auf wissenschaftlichen Arbeiten (Kost et al., 2007; Niknahad Gharmakher et al., 2008). Zudem wurden anhand umfangreicher Literaturrecherchen Daten zu Schwefel- und Nährstoffgehalten sowie der S-Mineralisierung organischer Düngemittel (Tietjen et al., 2022a) und zu den Schwefelgehalten

in den Ernteprodukten von Gemüse (Tietjen et al., 2022b) zusammengestellt und öffentlich zugänglich gemacht.

Aus Kostengründen wurde die Webanwendung als R-Shiny-App realisiert. Für die Berechnung der S-Düngeempfehlung mit der Webanwendung muss eine in N-Expert angelegte Datenbank mit allen relevanten Angaben erstellt und eingelesen werden. Für die Testung der Webanwendung wurden in einer ersten Phase Daten der LWG aus Schwefeldüngungsversuchen bereitgestellt. Im Anschluss wurden Projektpartner*innen eingebunden und eine online Umfrage zur systematischen Erfassung des Feedbacks erstellt. Die Webanwendung wurde im Rahmen der Dienstbesprechung und Fachtagung der Gartenbauberatung in den Bereichen Wasserschutz, Wasserrahmenrichtlinie und Düngeverordnung der Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Heidelberg (LVG) am 05.04.2022 vorgestellt. Außerdem wurde die Webanwendung in der Zeitschrift Gemüse (vsl Februar 2023) vorgestellt.

2.2.6.2 NDICEA

2.2.6.2.1 Neuprogrammierung und Weiterentwicklung

Für das Modell NDICEA war eine komplette Neu-Implementierung notwendig, da der alte Quellcode unübersichtlich und somit schwer zu erweitern und zu warten war. Die Zielsetzung war eine neue Version 7 mit verbesserter Berechnung als frei verfügbare Webanwendung.

Die erste Phase der Neuprogrammierung des NDICEA wurde im Herbst/Winter 2020/21 durchgeführt. Seit Ende Januar 2021 stand der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen eine Testversion zur Verfügung. Für die Optimierung der Vorhersagbarkeit der Stickstoffverfügbarkeiten des Modells wurden die Daten zu organischen Düngern aus N-Expert in die Datenbank von NDICEA eingearbeitet.

In 2021 erfolgte die Neuprogrammierung von NDICEA zu einem webbasierten Tool. Das Modell wurde an die deutschen Gegebenheiten angepasst und die Überarbeitung der Datenbanken im Hintergrund startete.

Die Programmierung des Rechenkerns für NDICEA 7 konnte in 2021 an Christoph Reimann in Auftrag gegeben (21.03.2021) und bis Februar 2022 abgeschlossen werden. Die Programmierung beinhaltete die Entwicklung einer Basis Version, die Festlegung und automatische Konvertierung der Dateiformate und das Aufsetzen einer graphischen Oberfläche zur Überprüfung der Ergebnisse.

Die Überprüfung erfolgte durch automatisierte End-to-End Tests und im Anschluss zusammen mit dem Louis Bolk Institut in wöchentlichen Online-Meetings. Bei den automatisierten Tests wurde ein Ordner mit über 30 Test-Szenarien mit NDICEA 6 Ergebnissen angelegt und gegen die Ergebnisse von NDICEA 7 verglichen. Für die Größen mineralischen Stickstoff (Ober- und Unterboden), Denitrifikation, N-Fixierung, N-Aufnahme und N-Auswaschung wurde eine maximale tägliche Abweichung von zwei kg ha⁻¹ im Vergleich der beiden Versionen für diese Szenarien nicht überschritten. Die Nutzeroberfläche für NDICEA in einfacher Version wurde fertig gestellt, um den Rechenkern für Testläufe ansteuern zu können (Abbildung 2.2-7) Die Test-

Schnittstelle kann weiterhin unter <https://api.ndicea.nl/> mit entsprechender Zugangsberechtigung aufgerufen werden.

Die Entwicklung dieser webbasierten Nutzeroberfläche erfolgte durch Vergabe des Partnerprojektes am Louis Bolk Institut (Unterauftragnehmer im Projekt Nutri@ÖkoGemüse seit 04.12.2019).

Die Phase 3 der Neuprogrammierung von NDICEA wurde gestartet. Sie beinhaltet die Optimierung des NDICEA-Modells sowie die Bereitstellung einer API (Datenschnittstelle). Die Ausschreibung und Vergabe mit den Programmierern wurden 2021 abgeschlossen.

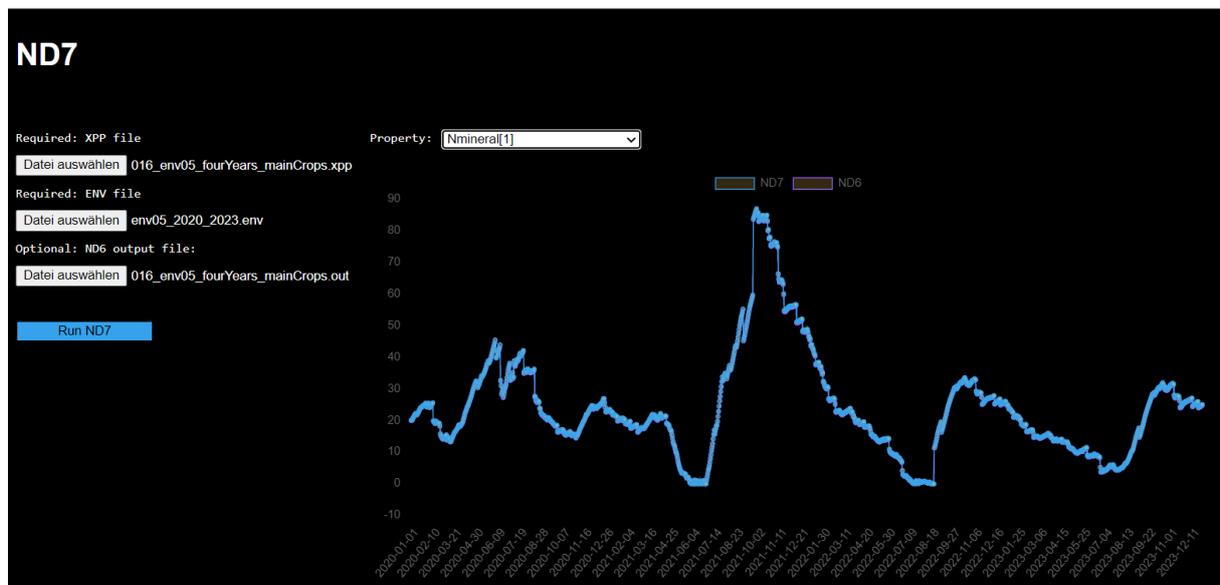


Abbildung 2.2-7: Nutzeroberfläche und Test Schnittstelle zur Überprüfung des neuen Rechenkerns. Die beiden zeitlichen N_{\min} Verläufe für NDICEA 6 (pink) und NDICEA 7 (blau) liegen genau übereinander.

Ein Szenario, mit NDICEA 6 erstellt, wird die alte Input Datei (*.xpp) zusammen mit der dazugehörigen Wetter Datei (*.env) und der NDICEA 6 Output Datei (*.out) hochgeladen. Die *.xpp wird in das neue *.json Format konvertiert und dem NDICEA 7 Rechenkern übergeben. Anschließend werden beide Ergebnisse (ND6, ND7) dargestellt, die wie hier dargestellt exakt übereinanderliegen.

Im Mai 2022 wurde die neue Python Version „NDICEA 7“ fertiggestellt, die dem Pascal-Rechenkern (NDICEA 6.4.1) entspricht und als Ausgangspunkt der Validierung dient.

Es folgte die Implementierung des Price-Algorithmus, wie er auch in der alten Version verwendet wird.

Von Mai bis Juni 2022 schloss sich das Aufsetzen einer Postgres/Postgis Datenbank mit Niederschlag, Temperatur und Evapotranspiration des ERA5-Land Datensatzes des Copernicus Climate Data Services mit einer räumlichen Auflösung von 9x9 km an (Munoz-Sabater, 2021).

Im Zeitraum von Mai bis Juli 2022 wurde die Implementierung einer verbesserten Initialisierung des zugrundeliegenden Kohlenstoffmodells in Absprache mit dem Louis Bolk Institut durchgeführt.

In der zweiten Jahreshälfte 2022 erfolgte die Zusammenführung des Rechenkerns mit der Nutzeroberfläche (Abbildung 2.2-8).

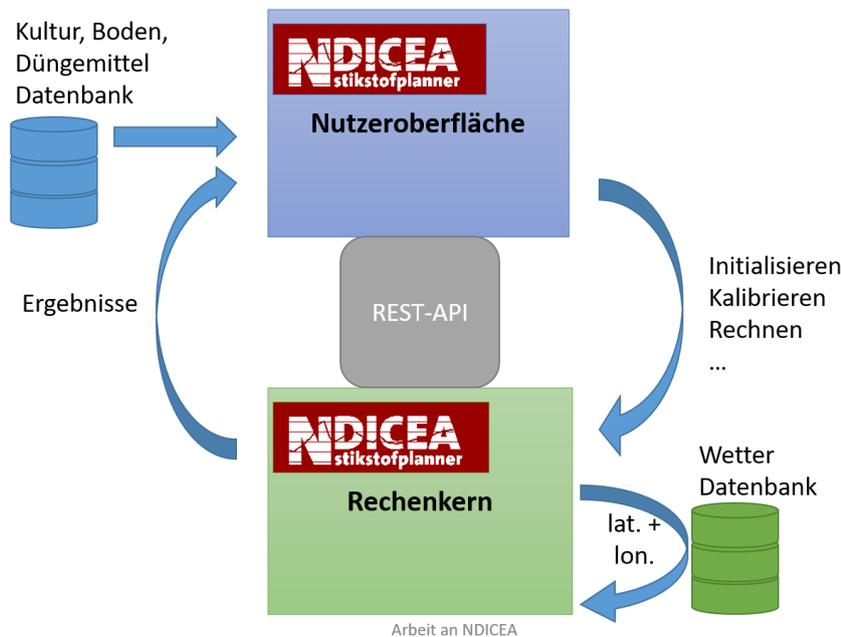


Abbildung 2.2-8: Softwarearchitektur der NDICEA 7 Webanwendung

Die Nutzeroberfläche und der Rechenkern funktionieren unabhängig voneinander und kommunizieren über eine sogenannte Representational State Transfer Schnittstelle (REST-API). Der Datenaustausch erfolgt über definierte Input- und Output-Dateien im JSON-Format.

2.2.6.2.2 Einblick in den neuen Rechenkern

Die Software-Architektur des Rechenkerns wurde entsprechend 7 organisiert. Jedes Teilmodell ist in einer eigenen Datei als Python-Klasse definiert. Jedes Teilmodell enthält eigene Methoden oder Funktionen, die analog zu einer mathematischen Funktion funktionieren. Funktionsargumente sind je nach Teilmodell Tag, Kulturindex, Düngemittelindex und Bodentiefe. Außerdem sind die meisten Methoden von Ergebnissen anderer Methoden oder Teilmodellen abhängig, gewissermaßen als weitere Funktionsparameter (Abbildung 2.2-9). Beispielsweise benötigt das Stickstoffmodell Ergebnisse aus dem Bodenwassermodell, die zuvor berechnet werden. Methoden, die in mehreren Modellen Verwendung finden, werden vererbt.

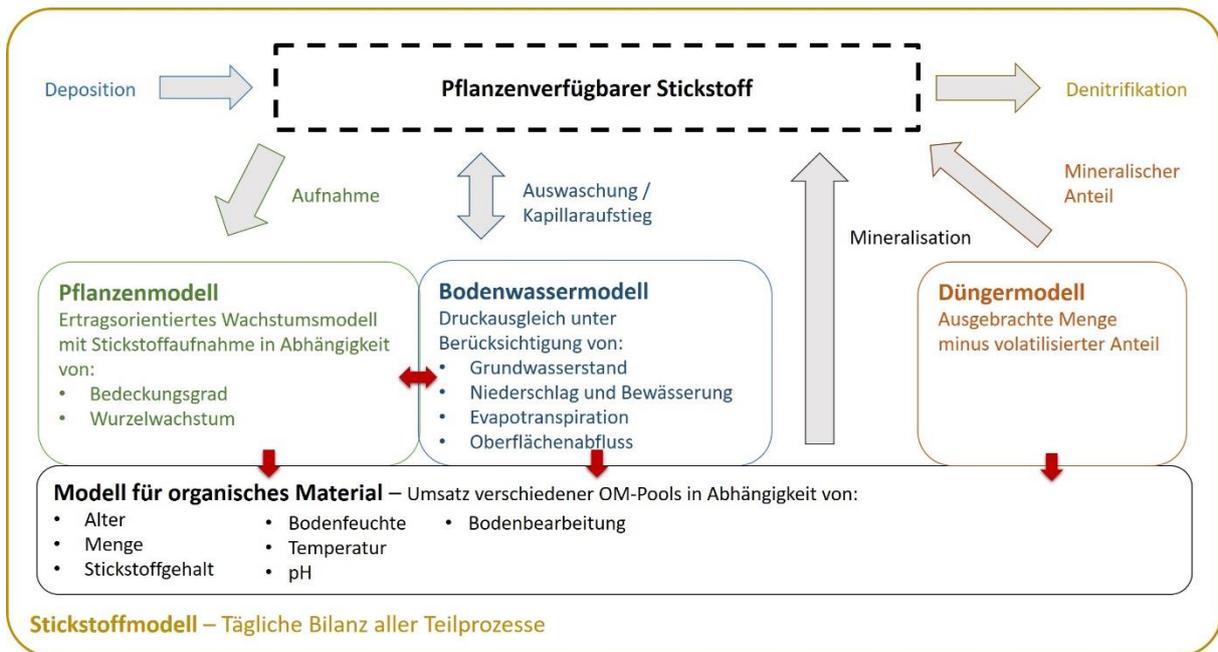


Abbildung 2.2-9: Übersicht über die modulare Struktur des Rechenkerns

```

528     def N_fix(self, day, crop_idx):  _____ Methoden Name und Argumente
529         """
530         Corresponds to NFixi
531         _____ Methoden Dokumentation
532         Depends: N_fix_potential N_mineral
533         """
534         # l. 1595 {mineral N in TopSoil above NFix0 reduces intended fixation}
535         # l. 1596 if (N[1]>=2*NFix0) then NFixi:=0 else if (N[1]>=NFix0) then NFixi:=2*NFixi-N[1]*NFixi/NFix0;
536         NFixi = self._results['Nitro']['N_fix_potential'][crop_idx, day]
537         N_fix_thresh = float(self.input["Soil"]["NFixThreshold"])
538         N1 = self._results['Nitro']['N_mineral'][TOPSOIL, day]
539         if N1 >= 2 * N_fix_thresh:
540             return 0
541         elif N1 >= N_fix_thresh:
542             return 2 * NFixi - N1 * NFixi / N_fix_thresh _____ Berechnung und
543         else: _____ Methoden Ausgabe
544             return NFixi

```

Kommentare (hier: Betreffende NDICEA 6 Zeilen aus dem alten Quellcode)

Zwischenergebnisse anderer Methoden

Abbildung 2.2-10: Python Code für die Methode zur Berechnung der Stickstofffixierung aus dem Stickstoffteilmodell

Der Austausch von Berechnungsergebnissen zwischen den Teilmodellen und Methoden findet über ein Objekt statt, in dem alle Ergebnisse gespeichert werden (Python-Dictionary) und das für alle Klassen verfügbar ist. Die Aufbereitung der Ergebnisse (z. B. kumulative Aufsummierung der Stickstoffverfügbarkeit, jährliche Summen der organischen Substanz, etc.) erfolgt in einem nachgelagerten Modul. Die Abfrage der Wetterdaten nach Zeit und Standort des Szenarios als SQL Query erfolgt in einem vorgelagerten Modul des Rechenkerns. Alle Datenbankabfragen zur Erstellung der Input-Datei laufen in der Programmumgebung der Nutzeroberfläche (Abbildung 2.2-10).

2.2.6.2.3 Kalibrierungsalgorithmus

Ziel der Kalibrierung ist es, die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE, siehe 2.2.3.1 Validierung) der berechneten N_{\min} -Werte sowie den gemessenen N_{\min} -Werten zum selben Tag zu minimieren. Mathematisch ausgedrückt entspricht dies dem Minimierungsproblem.

$$\theta_{opt} = \underset{\theta \in D}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{i=0}^n (y'_i - y_i(\theta))^2 \right)$$

Mit y' = Messdaten, y = die Vorhersage durch N-Expert, n = Anzahl der Beobachtungen. Wobei θ Parameter des NDICEA Modells sind, NDICEA hier als Funktion $y(\theta)$ in Abhängigkeit der Parameter aufgefasst werden kann. Es wurden sechs Parameter mit ihrem jeweiligen Minimum und Maximum bzw. Optimierungsraum D festgelegt. Die ausgewählten Parameter bestimmen maßgeblich die modellierte Aktivität des Bodenlebens und N-Nachlieferung sowie das Auswaschungs- und Denitrifikationsverhalten von NDICEA.

Die Begrenzung folgt aus den physikalischen oder biologischen Eigenschaften des Parameters, z. B. kann das C/N Verhältnis des Bodenmikrobioms selten unter fünf oder über neun liegen. Ein weiteres Argument für die Begrenzung ist die Überanpassung des Modells im Falle einiger wenigen N_{\min} -Werte zu vermeiden, da es dann nicht mehr generalisierbar ist.

Tabelle 2.2-8: Ausgewählte NDICEA Parameter zur Kalibrierung

Parameter DE	Parametername NDICEA	Minimum	Maximum
Denitrifikationsfaktor	DenitrificationFactor[1]	0	0,15
Zerfallsfaktor	DecayFactor[1]	0,6	1,2
C/N Bodenleben	C/N_SoilLife	5	9
A:D Bodenleben	A/D_SoilLife	0,2	0,5
Auswaschungsfaktor Oberboden	NLeachingFactor[1]	0,5	1,2
Auswaschungsfaktor Unterboden	NLeachingFactor[2]	0,5	1,2

Über die Schaltfläche „Kalibrieren“ werden die Parameter innerhalb ihrer Grenzen mittels eines Gradienten-Suchverfahrens (Nelder-Mead Methode, Nelder & Mead 1965) so verschoben, dass der RMSE minimal ist.

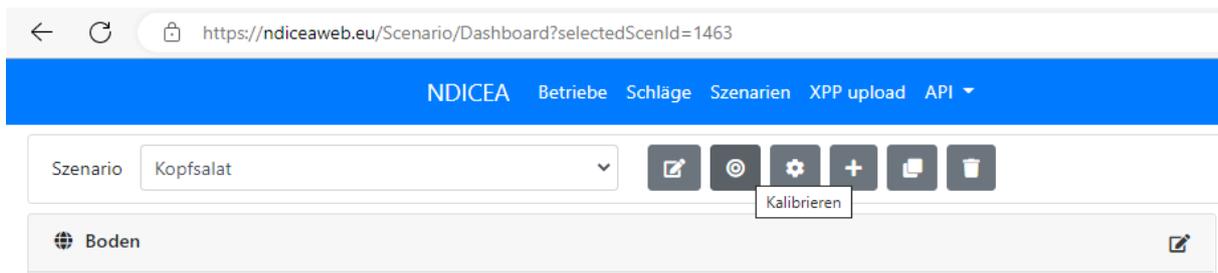
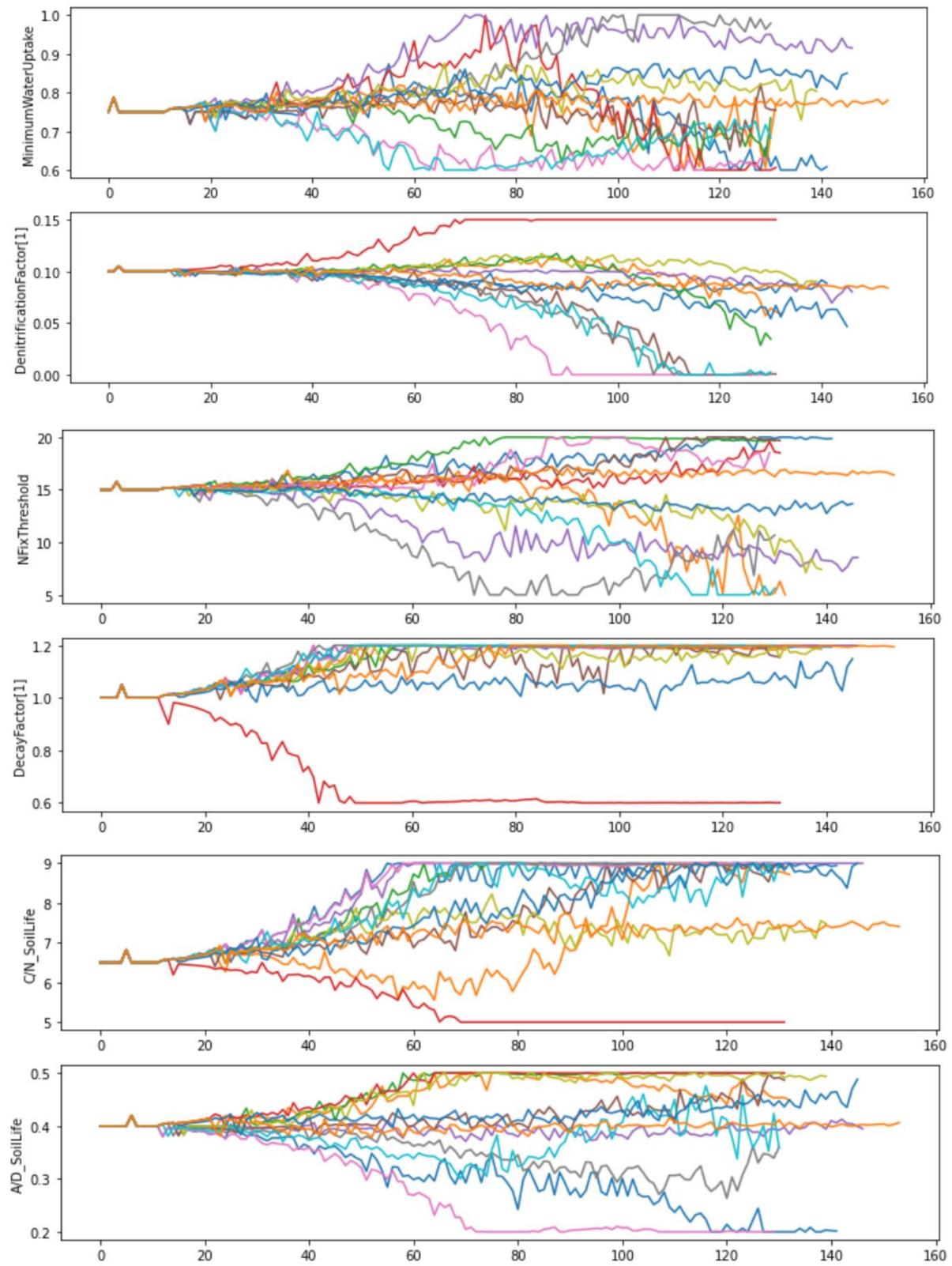


Abbildung 2.2-11: Kalibrierungsbutton NDICEA 7

Bei NDICEA 6 (PC Version) konnten elf Parameter kalibriert werden (Burgt, et al. 2006). Die sogenannte Spur der Kalibrierung dieser elf Parameter ist in 10 für Version 7 dargestellt. Für zwölf Szenarien für verschiedene Fruchtfolgen und ihre dazugehörigen N_{\min} -Werte wurde jeweils der Verlauf der elf Parameter sowie deren dazugehöriger RMSE aufgezeichnet. Diese zeigen, dass der Algorithmus nach ca. 80 Iterationen jeweils zu einem minimalen RMSE konvergiert. Die sechs selektierten Parameter zeigen bis auf wenige Ausnahmen eine deutliche Tendenz in eine Region (z. B. Abbaufaktor bleibt zwischen 0,9 und 1,1), wohingegen die anderen (z. B. „MinimumWaterUptake“) auch nach 80 Iterationen hin- und herspringen. Daraus lässt sich schließen, welche Parameter wichtig sind für ein minimales RMSE. Auf die Unwichtigeren wurde verzichtet, um den „Such-Raum“ der Kalibrierung zu vereinfachen und auf die wesentlichen sechs Parameter zu reduzieren.



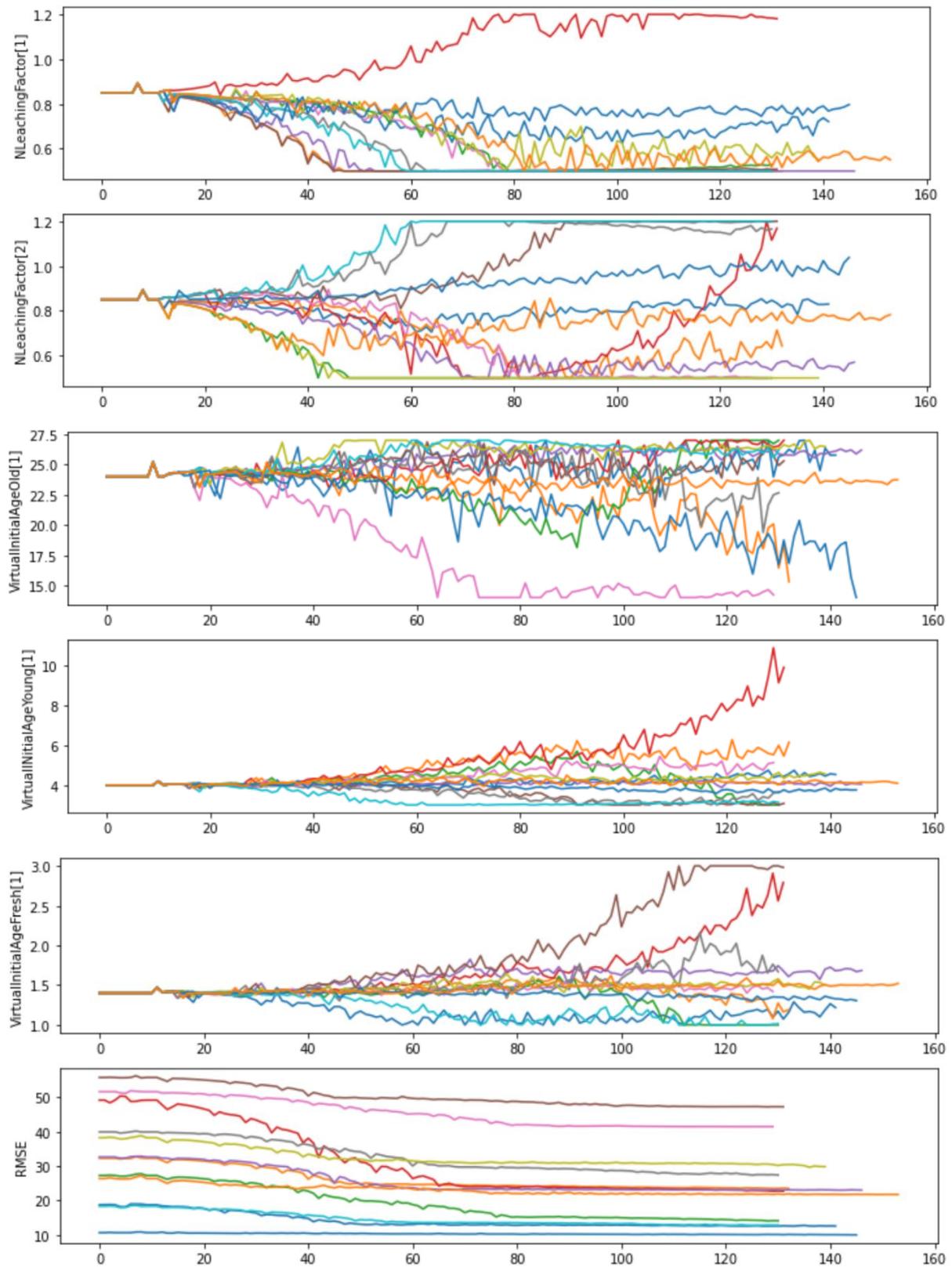


Abbildung 2.2-12: Verlauf der Parameterwerte (Y-Achse) für jede Iteration (X-Achse) eines Kalibrierungslaufes für zwölf unterschiedliche Szenarien mit ihrer dazugehörigen Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE)

2.2.6.2.4 Initialisierungsalgorithmus

NDICEA 6 wurde mit Standardwerten für die anfängliche organische Substanz (OS) im Boden initialisiert. Dabei gibt es die drei OS Unterteilungen „alt“, „jung“ und „frisch“ die sich in Alter, N-Gehalt und OS-Menge unterscheiden. Alle drei Parameter haben Einfluss auf die tägliche N-Nachlieferung. Bei NDICEA 7 gibt es nun die Möglichkeit, über Eingabe einer typischen Fruchtfolge diese Standardwerte zu ersetzen um das OS Bodenmodell zu initialisieren. Dabei wird das angegebene Fruchtfolge-Szenario zehnmal aneinandergereiht und durchgerechnet. Am Ende werden alle Teilmengen organischer Substanz aus Erntereste, Boden und Düngemittel, die am letzten Szenario-Tag vorhanden sind, nach ihrem Alter in Jahren aufgeteilt: alt: > sechs, frisch: < zwei, sonst: jung. Die Teilmengen werden summiert, deren Alter als gewichtetes Mittel und deren N-Gehalt bestimmt. Anschließend werden die neuen Initialwerte angezeigt und beim Speichern analog zur Kalibrierungsfunktionalität in einem neuen Szenario abgelegt.

2.2.6.2.5 Neuerungen in der aktuellen Webversion von NDICEA 7

Die Webversion steht unter <https://ndiceaweb.eu> zur Verwendung bereit, das Hosting und die Instandhaltung wird vom Luis-Bolk Institut organisiert und verantwortet. Fragen können per Email an info@ndiceaweb.eu gestellt werden.

Viele wichtige Funktionen wurden von NDICEA 6 in der neuen Version 7 beibehalten. Darunter die Möglichkeit des Vergleichs zweier Szenarien und die Strukturierung der Dateneingabe. Es gibt Boden-, Düngemittel- und Pflanzenmenüs, bei dem jeweils nur das Nötigste ausgewählt werden muss und alle weiteren Parameter z. B. der Bodenart entsprechend aus der Datenbank abgerufen werden (Abbildung 2.2-13). Durch Klicken auf „Ausführlich“ können diese Parameter jedoch bei Bedarf angepasst werden (Abbildung 2.2-14).

Boden bearbeiten		
Krumentiefe	<input type="text" value="30"/>	cm
pH	<input type="text" value="6.5"/>	-
OS zu Anfang	<input type="text" value="3.00"/>	%
Durchwurzelungstiefe Boden	<input type="text" value="70"/>	cm
niedrigster Grundwasserstand Sommer	<input type="text" value="120"/>	cm
Höchster Grundwasserstand Winter	<input type="text" value="80"/>	cm
Bodenbearbeitung	<input type="text" value="Herkömmliche Bodenbearbeitung"/>	
<input type="button" value="Speichern"/> <input type="button" value="Ausführlich"/>		
Eigenschaften Ackerkrume		
	<input type="text" value="Lehmiger Schluff"/>	<input type="button" value="Ausführlich"/>
Eigenschaften Unterboden		
	<input type="text" value="Lehmiger Schluff"/>	<input type="button" value="Ausführlich"/>
<input type="button" value="Schließen"/>		

Abbildung 2.2-13: Erste Ansicht des Boden-Menüs

Boden bearbeiten

Krumentiefe	30	cm	Evaporationsfaktor Brache	0.25	-	N-Gehalt Grundwasser	5	mg/L
pH	6.5	-	Schwellenwert reduzierte N-Aufnahme bei Wassermangel	0.75	-	Maximaler kapillarer Aufstieg	3.00	mm/L
OS zu Anfang	3.00	%	C/N Bodenleben	8.30	-	Tagesnummer niedrigster Grundwasserstand	196	-
Durchwurzelungstiefe Boden	70	cm	Assimilation/Dissimilation Bodenleben	0.50	-	Tagesnummer Höchster Grundwasserstand	46	-
niedrigster Grundwasserstand Sommer	120	cm	N-Bindungsgrenze	15	kg/ha			
Höchster Grundwasserstand Winter	80	cm						

Bodenbearbeitung Herkömmliche Bodenbearbeitung ▼

Speichern
Ausführlich

Eigenschaften Ackerkrume

Lehmiger Schluff ▼ Ausführlich

Nmin zu Anfang	40.00	kg/ha	Wasserdruck am Anfang	100.00	cm	Präferentielle-Fließbahnen-Schwelle	0.00	mm/Tag
Abbaufaktor	0.89	-	Wassergehalt bei Sättigung	0.43	L/L	Präferentielle-Fließbahnen-Faktor	0.00	-
N-Auswaschungsfaktor	0.85	-	pF-Kurve-Faktor	0.01	-	KAK-Faktor	0.60	-
Denitrifikationsfaktor	0.10	-	Kapillaraufstieg Distanz	120.20	cm	Lagerungsdichte	1.35	kg/L
Denitrifikationsschwelle	0.00	-	Abnahme des kapillaren Aufstiegs	33.59	cm			

Scheinbares Alter der organischen Substanz

Anfangsalter frische OS 1.4 Jahr

Anfangsalter junge OS 4.0 Jahr

Anfangsalter alte OS 24.0 Jahr

Menge OS

Menge an frischer OS 2800 kg/ha

Menge an junger OS 6600 kg/ha

Menge an alter OS 112100 kg/ha

N-Gehalt OS

N-Gehalt frische OS 3.0 %

N-Gehalt junge OS 4.5 %

N-Gehalt alte OS 5.8 %

Speichern

Abbildung 2.2-14: Ausführliches Boden-Menü

Standortauswahl

Neue Struktur: Betrieb > Schlag > Szenario. Für einen Schlag kann der Längen- und Breitengrad ausgewählt werden, für den bei der Berechnung Wetterdaten zum nächstgelegenen Punkt abgerufen werden (Abbildung 2.2-15).

NDICEA Betriebe Schläge Szenarien XPP upload API Logout DE

Schlag bearbeiten

Betrieb AP3 ▼

Schlag Beispielschlag

Breite 51.00032

Längengrad 6.84467

Abbrechen
Speichern

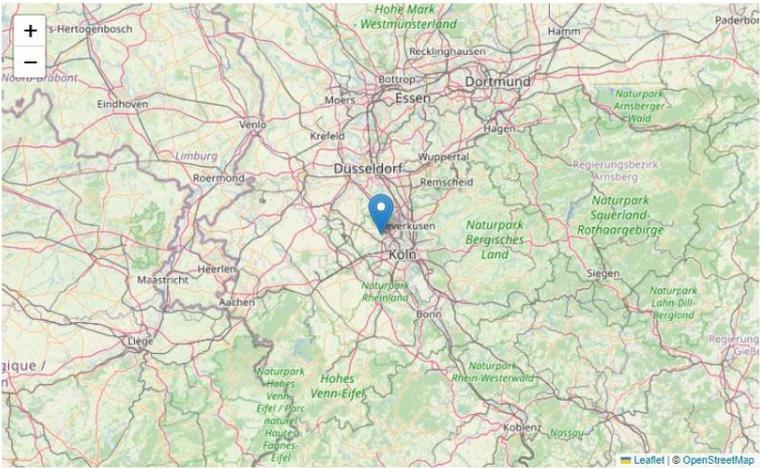


Abbildung 2.2-15: Auswahl des Standortes, für den Wetterdaten abgerufen werden

Szenarien in der Zukunft

NDICEA 7 bietet die Möglichkeit zur Berechnung von „Ensembles“ für Szenarien, die in die Zukunft reichen: Gerade zur Düngplanung ist die Berücksichtigung witterungsbedingter Unsicherheiten wichtig. Die Verwendung von gemittelten Wetterdaten ist nicht sinnvoll für NDICEA, da dabei z. B. Niederschlagsspitzen abgeflacht werden. Eine Heuristik um diesem Problem in NDICEA 7 zu begegnen, ist jeweils ein Szenario für vier mögliche Witterungen (aus den Vorjahren) zu berechnen und anschließend die modellierten Ergebnisse zu mitteln (Abbildung 2.2-16). Zum Beispiel würden für die Planung des Jahres 2023 Wetterdaten von 2019, 2020, 2021 und 2022 herangezogen werden. Die witterungsbedingte Modellunsicherheit wird dann als Minimum und Maximum der Modellgrößen als „Band“ angezeigt, damit kann der Nutzer das Risiko einschätzen.

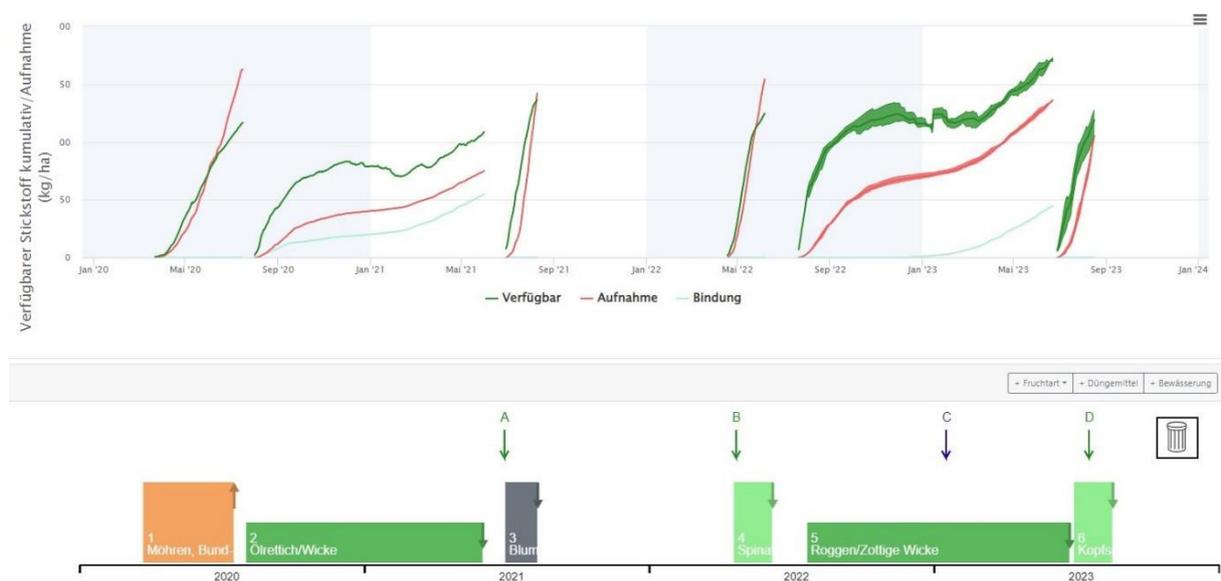


Abbildung 2.2-16: Kumulative Stickstoffverfügbarkeit & Pflanzenaufnahme in einer Fruchtfolge. Berechnungen in der Zukunft erfolgen über Nutzung von Wetterdaten aus vier Vorjahren, für die jeweils ein Szenario gerechnet wird. Dargestellt werden Minimum, Maximum und der Mittelwert.

Jährliche Kohlenstoff Bilanzen

In Zusammenarbeit mit dem Louis-Bolk Institut wurde die Grafik zum Verlauf der Organischen Substanz durch einen Kohlenstoff-Verlauf erweitert. Außerdem wurden jährliche Abbau- und Aufbau Bilanzen als Balkendiagramme visualisiert, um einen besseren Eindruck der Humuswirkung der Fruchtfolge Elementen zu bekommen (Abbildung 2.2-17).

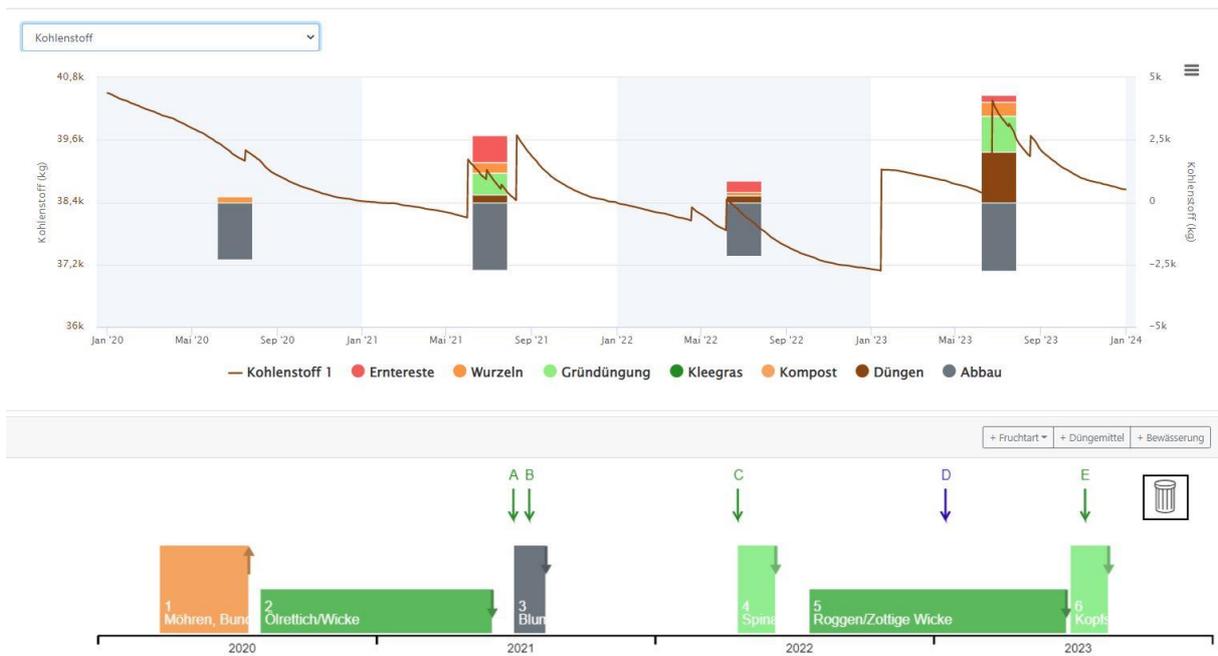


Abbildung 2.2-17: Verlauf der Kohlenstoffmenge im Oberboden und jährliche Bilanzen als Balkendiagramme des Abbaus und Eintrags von organischer Substanz

2.2.6.2.6 Validierung

Für NDICEA war der erste Schritt der Validierung (Validierung zum alten Rechenkern) im Mai 2022 abgeschlossen, wie in Abschnitt 2.2.6.1 weiter ausgeführt. Im zweiten Schritt wurde der RMSE für mineralischen Stickstoff im Ober- und Unterboden für jede einzelne Fläche berechnet. Die Validierung beschränkte sich hier lediglich auf die Untersuchung dieser Größe. In Abbildung 2.2-18 sind die Ergebnisse vor Kalibration, also mit den Standardparametern als Histogramm dargestellt. Dies verdeutlicht, dass nur in etwa 40% der Szenarien ein $RMSE < 20 \text{ kg ha}^{-1}$ (~ Ziel RMSE) erreicht werden konnte. Das NDICEA-Modells schnitt bei dieser Validierung anhand der Anzahl ökologische Gemüsefruchtfolgen damit deutlich schlechter ab als bei der durch Burgt et al. (2006) durchgeführte Validierung anhand einer ackerbaulichen Fruchtfolge des Müncheberg-Experiments, wo die Abweichung zwischen modellierten und beobachteten N_{\min} -Werten für 80% der Beobachtungen $< 20 \text{ kg ha}^{-1}$ betrug. Nach Kalibration von hier lediglich 5 Parametern (Abbildung 2.2-18) liegen 60% der Beobachtung unter 20 kg ha^{-1} . Mehr zur Kalibration wird unter 2.2.6.2 ausgeführt.

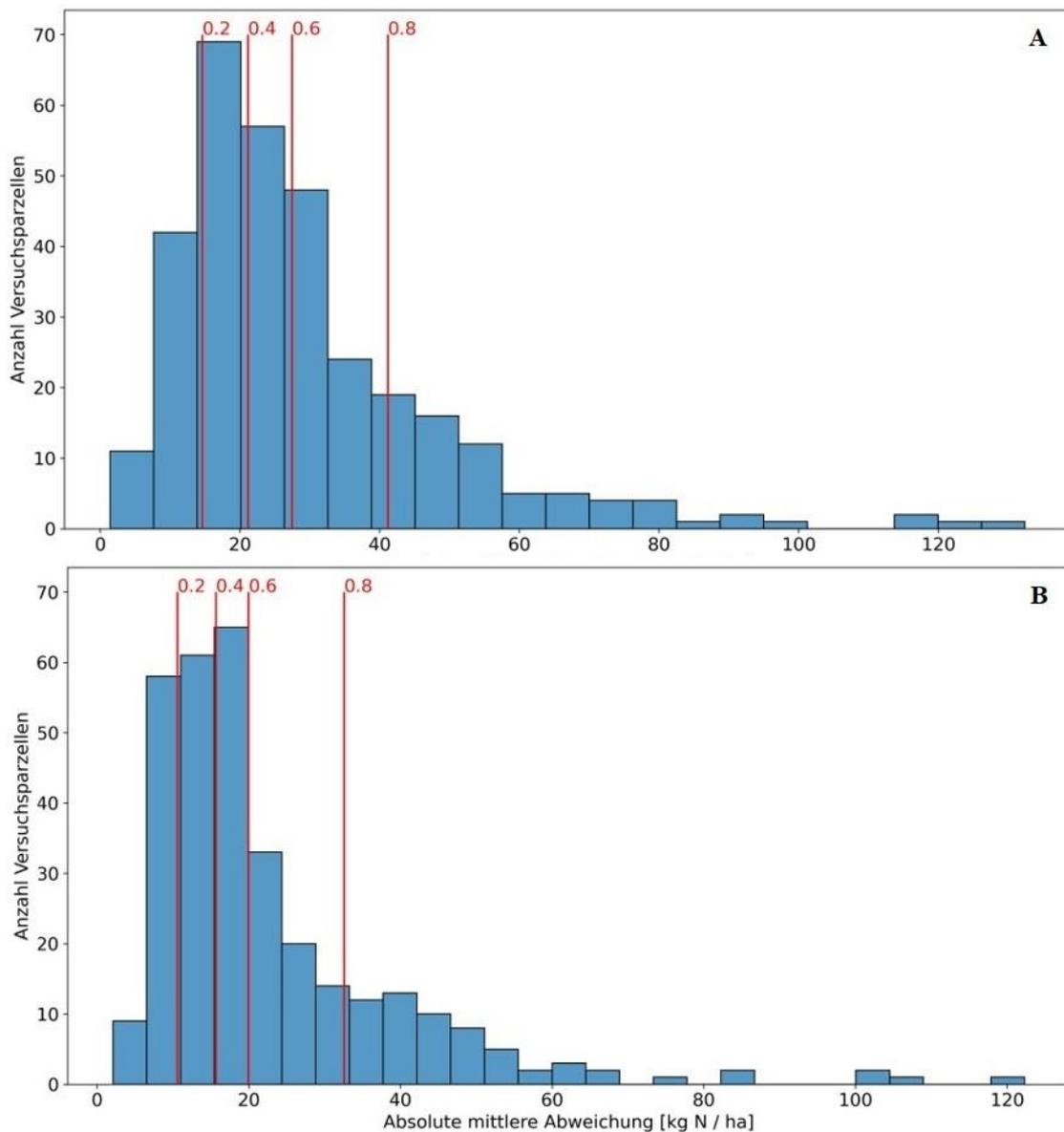


Abbildung 2.2-18: Verteilung der mittleren absoluten Abweichung (RMSE) gemessenem zu mineralischem mineralischen Stickstoff. A vor schlagweise Kalibrierung, B nach Kalibrierung

Weiter wurde beobachtet, dass die bewirtschafteten Flächen mit geringem organischen Input generell vom Modell unterschätzt wurden. Verschiedene Erklärungsansätze wurden hier entwickelt, die zusammen mit dem Louis-Bolk Institut auch in einem Beitrag zur Wissenschaftstagung für Ökologischen Landbau 2023 diskutiert werden (Schad et al. 2023). Der geringere mineralische Stickstoff im Modell könnte einerseits durch fehlende Modellierung der Dynamik, die durch mechanischen Unkrautregulierung entsteht erklärt werden. Andererseits könnte sich eine Feinjustierung der Bodenart abhängigen Auswaschung positiv auf die Modellgüte auswirken. Zur Weiterverfolgung beider Ansätze werden die Projektpartner weiter mit dem Louis-Bolk Institut im Austausch stehen.

2.2.6.3 Vergleich der verschiedenen Düngekonzepte in Praxisversuchen

Der Kohl wurde auf den Betrieben im Durchschnitt mit 107 kg N ha^{-1} gedüngt (Standardfehler SE 29) wobei mittlere Ernten von 243 dt ha^{-1} (SE 38) erzielt wurden. Dabei ist zu beachten, dass unterschiedliche Kohllarten (Brokkoli, Blumenkohl, Weißkohl und Rosenkohl) miteinander verglichen wurden, welche unterschiedliche Standarderträge und Sollwerte aufweisen (Feller et al., 2011). Die betriebliche N-Düngung unterschied sich nicht signifikant von den Treatments N-Expert und NDICEA. Die Daten wiesen eine erhebliche Streuung auf.

Die Salate wurden auf den Betrieben im Durchschnitt mit 66 kg N ha^{-1} (SE 7) gedüngten. Die mittlere betriebliche Salaternte betrug 330 dt ha^{-1} (SE 26). Die mit N-Expert und NDICEA berechnete Düngung für die Salate unterschied sich nicht von der betriebsüblichen Düngung. Die N-Düngung im Treatment NDICEA (54 kg ha^{-1}) war jedoch signifikant niedriger als die N-Düngung nach N-Expert (83 kg ha^{-1}). Es konnte kein Unterschied im Frischmasseertrag der Salate zwischen Treatments festgestellt werden (Tabelle 2.2-9).

Tabelle 2.2-9: Mit Modellen berechnete Mittelwerte und Standardfehler für Düngergaben und Frischmasseerträge der Versuche

		Betrieb	DüV	N-Expert	NDICEA	SE
		MW				
Kohl						
N _t , gedüngt	[kg ha ⁻¹]	107 ^a	241 ^b	153 ^a	88 ^a	39
Feldabfuhr						
FM	[dt ha ⁻¹]	243 ^{ab}	265 ^c	249 ^a	219 ^b	38
Salat						
N _t , gedüngt	[kg ha ⁻¹]	66 ^{ab}	111 ^a	83 ^{ab}	54 ^b	7
Feldabfuhr						
FM	[dt ha ⁻¹]	330	343	344	336	26

Sowohl für Kohl als auch für Salat, war die N-Düngung der DüV Variante mit im Mittel 241 bzw. 111 kg N ha^{-1} am höchsten. Im Vergleich mit den Frischmasseerträgen im Treatment DüV führte diese geringere Düngung nur beim Kohl im Treatment NDICEA (- 17 %) zu signifikant reduzierten Ernten.

Die betriebliche N-Effizienz konnte in den Kohlversuchen im Treatment N-Expert und in den Salatversuchen im Treatment NDICEA gesteigert werden (Abbildung 2.2-19). Die N-Effizienz für Kohl und Salat war im Treatment DüV am geringsten.

Die N_{min}-Gehalte zur Ernte unterschieden sich zwischen den Treatments nur in den Salatversuchen in einer Tiefe von 0-30 cm signifikant ($p < 0.01$) voneinander (Abbildung 2.2-20). Die Gehalte im Treatment NDICEA waren hier im Mittel um 17 kg ha^{-1} niedriger als in der Variante DüV.

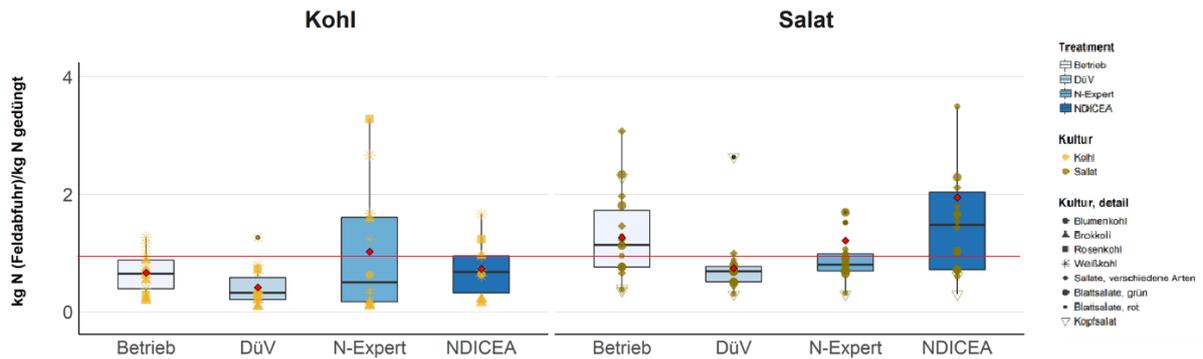


Abbildung 2.2-19: N-Effizienz der Praxisversuche

Obwohl die durchschnittliche Düngung der Kohlversuche in der betriebsüblichen Variante nicht statistisch signifikant von der mit den Tools berechneten Düngung abwich, war die mit N-Expert und NDICEA berechnete Düngeempfehlung teilweise niedriger als die betriebsübliche Düngung.

In den Salatversuchen führte eine Erhöhung der betriebsüblichen Düngung bis zur maximal zulässigen Düngung nach DüV nicht zu höheren Erträgen, sondern zu messbar höheren N_{\min} -N-Gehalten im Boden zum Zeitpunkt der Ernte, welche potentiell ausgewaschen werden.

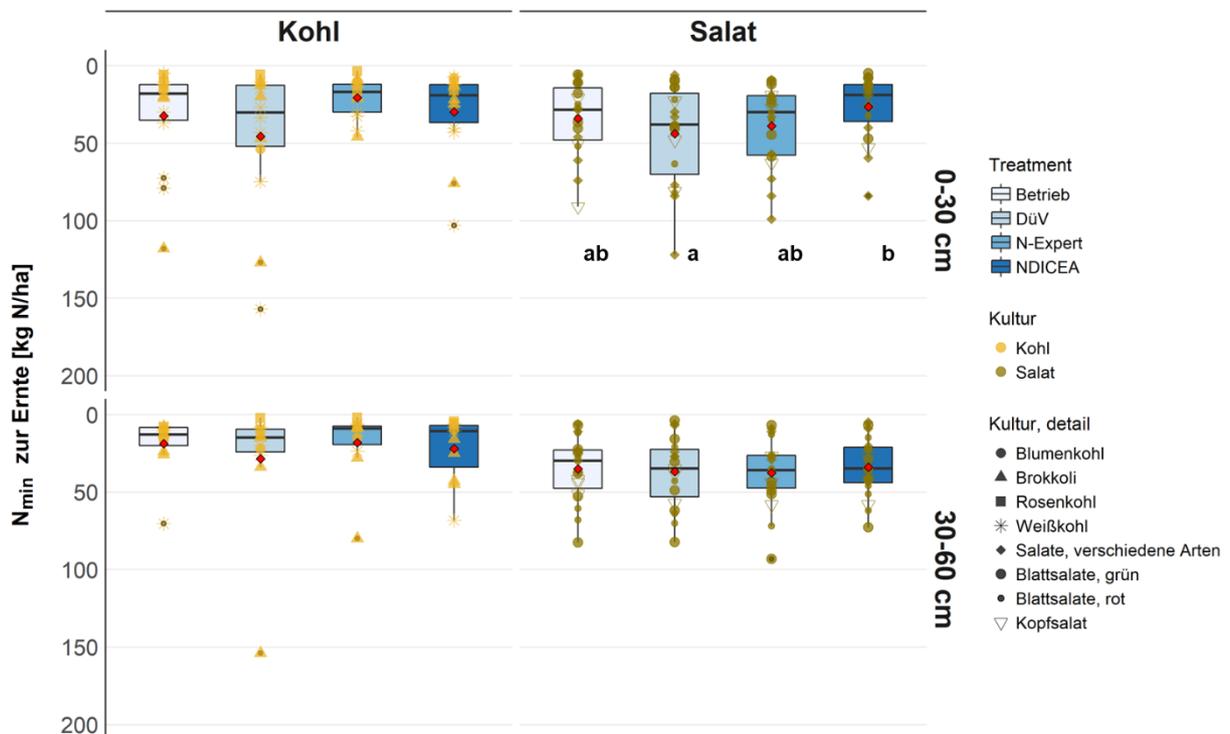


Abbildung 2.2-20: Ergebnisse der Praxisversuche (N_{\min} -N [kg ha⁻¹] im Boden zur Ernte in 0-30 und 30-60 cm Tiefe)

Im Vergleich der ausgebrachten Düngermenge ist es wichtig mit einzubeziehen, dass sowohl für N-Expert als auch für das Treatment DüV eine reduzierte Verfügbarkeit für organische Dünger angenommen wurde, d.h. eine Anrechenbarkeit von 55 bzw. 60 % angenommen wurde (Sradnick und Feller, 2020). Der in den beiden Treatments berechnete N-Bedarf der Kultur lag also deutlich unterhalb der Menge des aufgebrauchten Düngers (Tabelle 2.2-9). In zwei (N-Expert) bzw. drei (DüV) Brokkoli-Versuchen führte die angenommene geringere Verfügbarkeit von gedüngtem N_t zu extrem hohen Düngergaben ($> 350 \text{ kg N ha}^{-1}$). Der mittlere N_{\min} -Gehalt im Boden zur Ernte unterschied sich im Treatment N-Expert jedoch nicht von den Treatments NDICEA und betriebsüblich. In einigen Fällen war der N_{\min} -Gehalt des Bodens vor der Pflanzung höher als vom Landwirt erwartet. Die N_{\min} -Analyse führte dann zu einer Verringerung des Düngemittleinsatzes im Treatment Betriebsüblich.

Die betriebsübliche Düngung erfolgte in der Regel basierend auf Erfahrungswerten des Landwirtes und wurde nur selten an die standortspezifischen Bedingungen (Klima und Boden) angepasst. Im Gegensatz dazu wird bei der Berechnung der Düngeempfehlung durch die Computerprogramme das Potenzial des Bodens, Stickstoff zu liefern, entweder durch eine Messung der aktuellen N_{\min} -Werte (N-Expert) oder durch Schätzung des Umsatzes organischer Substanz im Boden (NDICEA und teilweise N-Expert) berücksichtigt. Dies ermöglicht die Anpassung der betriebsüblichen Düngung an die aktuell vorherrschenden Bedingungen. Trotz dieses großen Potenzials der Computerprogramme für eine Optimierung des Düngemanagements schnitt die betriebsübliche Düngung für alle betrachteten Variablen gleich gut ab wie die Tools N-Expert und NDICEA.

Eine N_{\min} -Analyse zur Pflanzung oder zur Düngung sowie eine durchdachte Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten und Folgekulturen stellen im praktischen Anbau sinnvolle Maßnahmen zur Vermeidung von N-Verlusten im ökologischen Freilandgemüsebau dar, während mit den Tools die aktuelle Düngung und deren Effekt auf die Stickstoffverfügbarkeit beeinflusst wird.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die N-Düngung auf den teilnehmenden Biobetrieben deutlich unter dem gesetzlichen Grenzwert (DüV) lag. Das erfahrungsbasierte Düngungsmanagement schnitt im Vergleich mit N-Expert und NDICEA gleich gut ab. In einigen Fällen führte die Berechnung einer Düngeempfehlung mit einem Computerprogramm jedoch zu einer reduzierten Ausbringung von N-Dünger gegenüber der betriebsüblichen Variante, ohne die Erträge negativ zu beeinflussen. Sobald sich der Landwirt mit der Handhabung der Tools vertraut gemacht hat, kann deren Anwendung also zu einer Verringerung der ausgebrachten Düngermenge führen, was sich positiv auf finanzielle und ökologische Faktoren auswirkt.

2.2.7 Schlussfolgerungen

- N-Expert und NDICEA bieten für die Betriebe Vorteile, sobald sich diese mit Ihrer Anwendung vertraut gemacht haben
- Beide Tools wurden umfassend überarbeitet
- N-Expert: Aktuelle Version 4.7 mit Anpassungen an den ökologischen Gemüsebau (Highlights) als kostenloser Download:
 - Überwinternde Zwischenfrüchte und Gemüsekulturen

- Überjährige Berücksichtigung der Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz, Ernteresten und organischen Düngern
- Standortabhängige Vorhersage der Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz
- Webbasierte Version mit Schnittstelle programmiert und einsatzfähig
- Schwefeldüngeempfehlung als webbasierte App, Daten zu S-Gehalten in Gemüse und Düngern publiziert
- NDICEA: Aktuelle Version 7.0 als kostenlose Webversion:
 - Simulation der Stickstoffdynamik im Unter- und Oberboden eines Schlags anhand dessen historischer Fruchtfolge und automatisch abgerufener Wetterdaten
 - Schlagspezifische Kalibrierung zur Absicherung der Ergebnisse durch Eintragung von N_{\min} Messungen
 - Berechnung und Vergleich von Düngestrategien in verschiedenen Szenarien
 - Kostenlose Webversion mit vollständig überarbeiteter Benutzeroberfläche und neuer API-Schnittstelle

2.2.7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Beim Kohl war in den Versuchen durch den Einsatz von N-Expert und NDICEA teilweise eine Reduzierung der betriebsüblichen Düngung um 50 - 100 % möglich bei keinen oder nur geringen Ertragseinbußen.
- Beim Salat war durch den Einsatz von NDICEA eine Reduzierung der betrieblichen N-Düngung ohne Ertragseinbußen möglich, durch den Einsatz von N-Expert konnten die Erträge bei einer Erhöhung der Düngung gesteigert werden.
- Es wurde kein Einfluss des Dünge-Managements auf die Gehalte an mineralischem Stickstoff im Boden zur Ernte gemessen.

2.2.7.2 Potentiale der EDV-gestützten Programme

- Ein Überprüfen der betriebsüblichen Düngung mit N-Expert und NDICEA unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten kann die N-Düngung reduzieren und das Risiko von Ertragseinbußen minimieren.
- Beide Programme stehen für die Anwendung kostenfrei zur Verfügung.
- Ihr Einsatz kann Messungen von mineralischem Stickstoff im Boden jedoch nicht ersetzen.

2.2.8 Literatur

- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., und 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>.
- Fox, J., und Weisberg, S., 2019: *An {R} Companion to Applied Regression*, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion>
- Feller, C., Fink, M., Laber, H., Maync, A., Paschold, P., Scharpf, H.C., Schlaghecken, J., Strohmeyer, K., Weier, U., und Ziegler, J., 2011: *Düngung im Freilandgemüsebau*. Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ). 3. Auflage. Heft 4, Großbeeren 2011 (Fink, M.)
- Hartig, F., 2021: DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. R package version 0.4.4. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>
- Hothorn, T., Bretz, F., und Westfall, F., 2008: Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal* 50(3), pp. 346-363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>

- Kost, D., Chen, L., und Dick, W.A., 2007: Predicting plant sulfur deficiency in soils: results from Ohio. *Biol Fertil Soils*, 2008) 44: 1091-1098.
- Lenth, R.V., 2021: emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.7.1-1. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Muñoz Sabater, J., 2021: ERA5-Land hourly data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < DD-MMM-YYYY >), 10.24381/cds.e2161bac.
- Niknahad Gharmakher, H., Machet, J.M., Beaudoin, und N., Recous, S., 2008: Estimation of sulfur mineralization and relationships with nitrogen and carbon in soils. *Biol Fertil Soils*, 2009, 45: 297-304.
- Nelder, J.A., & Mead, R., 1965: A Simplex Method for Function Minimization. *Comput. J.*, 7, 308-313.
- R CoreTeam, 2021. Software platform R (version 4.1.1). URL: <https://www.rproject.org/contributors.html>
- Sradnick, A., Feller, C., und Fink, M., 2017: Nährstoffgehalte und N-Mineralisierung organischer Düngemittel. URL: http://www.igzev.de/publikationen/IGZ_Organische_Duenger.pdf
- Sradnick, A., und Feller, C., 2020: A Typological Concept to Predict the Nitrogen Release from Organic Fertilizers in Farming Systems. *Agronomy* 10(9), 1448. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091448>
- Schad, P. D., Timmermans, B. G. H., Burgt, G. J. H. M van der, Fischer, R., 2023: Das NDICEA-Modell zur Abbildung der Stickstoffdynamik im ökologischen Gemüsebau. Beitrag zur 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, demnächst einsehbar auf <http://orgprints.org>.
- Tietjen, S., Heistermann, K., und Sradnick, A., 2021: Entscheidungsfindung mit N-Expert. *Gemüse* 57 (3), S. 35-37.
- Tietjen, S., Heistermann, K., Feller, C., und Sradnick, A., 2022a: Schwefel- und Nährstoffgehalte sowie S-Mineralisierung organischer Düngemittel, <http://nexpert.igzev.de/wp-content/uploads/2022/01/Nährstoffgehalte-und-S-Mineralisierung-organischer-Düngemittel.pdf>, Version vom 26.01.2022.
- Tietjen, S., Heistermann, K., Feller, C., und Sradnick, A., 2022b: Schwefelgehalte in den Ernteprodukten von Gemüse. <http://n-expert.igzev.de/wp-content/uploads/2022/01/S-GehalteFeldabfuhr.pdf>, Version vom 26.01.2022.
- Tietjen, S. 2022. N-Expert 4.5.4 und Anwendungsunterstützung veröffentlicht. *Gemüse* 3/2022, S. 7.
- Burgt G.J.H.M. van der, Oomen G.J.M., Habets A.S.J. & Rossing W.A.H., 2006: The NDICEA model, a tool to improve nitrogen use efficiency in cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74: 275-294.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L.D., François, R., Grolemond, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T.L., Miller, E., Bache, S.M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D.P., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., und Yutani, H., 2019: Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wissemeier, A., Olf, H.W., 2019: Diagnose des Ernährungszustands von Kulturpflanzen. Agrimedia.

2.3 Ansätze zur Erhöhung der N-Inputs über biologische N₂-Fixierung in gärtnerischen Systemen

K.-U. Katroschan (LFA), F. Besand (LFA), A. Heckenberger, A. Butz und K. Möller (LTZ), B. Rascher (LWG), S. Stein, S. Zikeli und S. Grubert (UHOH)

Viele Gemüsekulturen besitzen, insbesondere im Vergleich zu ackerbaulichen Kulturen, einen hohen Bedarf an Stickstoff (N) innerhalb eines kurzen Zeitraums (Feller et al., 2011). Stickstoffbetonte organische Handelsdünger (z. B. „Keratindünger“) sind aufgrund ihrer schnellen und vergleichsweise hohen N-Freisetzungsrates aus Sicht der Pflanzenernährung grundsätzlich geeignet, um diesem Anspruch gerecht zu werden. Im ökologischen Gemüsebau sind die Mengen und Quellen der erlaubten Düngemittel jedoch durch die Vorgaben der EU-Öko-Verordnung sowie zusätzlich durch die Richtlinien einzelner nationaler Öko-Verbände beschränkt (Bio Austria, 2021; Demeter e.V., 2021; European Commission, 2007). Da organische Handelsdünger oftmals Nebenprodukte der intensiven, konventionellen Tierhaltung sind, gelten diese als sogenannte "umstrittene Betriebsmittel", deren Einsatz schrittweise reduziert werden soll und bereits jetzt in einigen Fällen einer gesonderten Genehmigung des entsprechenden Anbauverbands bedarf (Bio Austria, 2021). Weitere Einschränkungen beim Einsatz bestimmter Düngemittel sind in den nächsten Jahren zu erwarten (Demeter e.V., 2021).

Auch ökologisch wirtschaftende Gemüsebaubetriebe verfügen aufgrund der vollzogenen Spezialisierung und Intensivierung zumeist über wenig oder keine Tierhaltung, sodass Wirtschaftsdünger häufig im Rahmen von Futter-Mist-Kooperationen zugekauft werden. Wirtschaftsdünger sind Mehrnährstoffdünger, deren Nährstoffstöchiometrie nicht mit dem oben beschriebenen Nährstoffbedarf von Gemüsekulturen übereinstimmt. Aufgrund dieser Nährstoffdysbalance auf der einen und der geringen kurzfristigen N-Wirkung von Wirtschaftsdüngern auf der anderen Seite, führt deren Einsatz als vornehmliche N-Quelle im Gemüsebau langfristig zu Nährstoffungleichgewichten, insbesondere zu einem Überangebot an Phosphor (P) im Boden (Cooper et al., 2018; Möller, 2018). Wirtschaftsdünger eignen sich daher nur in begrenztem Umfang als geeignete Nährstoffquelle im Gemüsebau.

Aufgrund ihrer Fähigkeit zur biologischen N₂-Fixierung (BNF) stellen Leguminosen ein wesentliches Element ökologischer Düngungsstrategien dar und können wesentlich zur N-Versorgung von u.a. gemüsebaulichen Kulturen beitragen. Die BNF ermöglicht den exklusiven Import von N in das Anbausystem, sodass ein hoher Anteil BNF am gesamten N-Input zu einer Reduzierung von P- und K-Überschüssen beitragen kann (Reimer et al., 2020). Neben ihrem Beitrag zur N-Versorgung der Gemüsekulturen können Leguminosen darüberhinausgehende Ökosystemleistungen erbringen sowie pflanzenbaulich positive Effekte erzielen. Hierzu zählen u.a. die Verringerung von Bodenerosion (Kainz et al., 2009) und Nitratauswaschung (Askegaard et al., 2011) sowie die Verbesserung physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften (Baddeley et al., 2017). Leguminosen werden üblicherweise als mehrjährige Gründüngung oder Zwischenfrucht (ZF) in die Fruchtfolge integriert. Insbesondere bei Reihenkulturen können sie potentiell aber auch auf Kulturbene als „Lebendmulch“ (Living Mulch) bzw. Untersaat etabliert werden.

Im Rahmen von Arbeitspaket 4 des Projektes Nutri@ÖkoGemüse wurden an mehreren Standorten und über mehrere Jahre sowohl Lebendmulche als auch legume Winterzwischenfrüchte sowie verschiedene Managementvarianten überjähriger Futterleguminosenbestände hinsichtlich ihres potentiellen Beitrags zur N-Versorgung von Gemüsekulturen untersucht. In sämtlichen Versuchen diente Weißkohl als Modellkultur.

2.3.1 Legume Lebendmulche

2.3.1.1 Einleitung

Anbausysteme mit Lebendmulchen (LM) werden in erster Linie aufgrund ihrer unkrautunterdrückenden Wirkung während der gemeinsamen Kultivierung mit der Hauptkultur verwendet, wodurch die für den ökologischen Gartenbau typische intensive Bodenbearbeitung verringert wird. Solche Systeme wurden bereits für potentiell geeignete Gemüse-LM-Kombinationen untersucht, z. B. Kohl mit Wicke oder Brokkoli mit Winterroggen (Brainard et al., 2004; Brainard und Bellinder, 2004). Der Gemüseanbau ist im Hinblick auf die Konkurrenz um Licht und Wasser vermutlich besonders geeignet für LM-Systeme: Viele Gemüsekulturen werden in weiten Reihen angebaut und zusätzlich bewässert, wodurch das Risiko von Wasserstress für die Hauptkulturen minimiert wird. Aufgrund ihrer Fähigkeit zur biologischen N₂-Fixierung (BNF) sind Leguminosen geeignete Partner in diesen Anbausystemen, da die Konkurrenz um Nährstoffe, zumindest um N, im Vergleich zu nicht N₂-fixierenden Pflanzen reduziert ist. Mehrere Studien deuten an, dass legume LM-Systeme im Gemüseanbau ohne signifikante Ertragsverluste funktionieren können, insbesondere mit *Brassicacea* als Hauptkultur, z. B. Brokkoli mit Weißklee (*Trifolium repens* L.) (Hooks et al., 2007; Infante und Morse, 1996), Blumenkohl mit einjährigem Klee (*T. resupinatum* L.) (Tempesta et al., 2019), Brokkoli mit Rotklee (*T. pratense* L.) (Thériault et al., 2009), Blumenkohl mit Klee gras (Xie und Kristensen, 2016) oder Blumenkohl mit Schneckenklee (*Medicago polymorpha* L.) (Montemurro et al., 2017). Ergebnisse früherer Studien haben gezeigt, dass auch der Aussattermin und das Wachstumsmanagement der LM einen entscheidenden Einfluss auf die Ertragsbildung der Hauptkultur haben. Die Aussaat des LM erst zur oder nach der Pflanzung der Hauptkultur verringert die Konkurrenz, eine erfolgreiche Etablierung des LM im vorangegangenen Herbst könnte jedoch für eine Bodenbedeckung, eine geringere Nitratauswaschung im Winter und einen geringeren Unkrautdruck im Frühjahr sorgen. Ferner ist zu erwarten, dass eine frühere Aussaat aufgrund einer verlängerten Wachstumsperiode der Leguminosen eine höhere N₂-Fixierung mit sich bringt. Ein weiterer Aspekt ist das Wachstumsmanagement der LM während des Anbaus der Hauptkultur. Eine frühe Aussaat der LM könnte aufgrund ihrer hohen Biomasse zum Zeitpunkt der Pflanzung des Gemüses zu einer stärkeren Konkurrenz führen. Um diese Konkurrenz in den ersten Wochen der Entwicklung der jungen Gemüsepflanzen abzuschwächen, könnte die Biomasse der LM geschnitten werden. Darüber hinaus reduziert das Mulchen der LM-Biomasse die Produktion von Unkrautsamen und kann sich somit auch langfristig auf die Verringerung der Unkrautsamenbank im Boden im ökologischen Landbau auswirken (Gibson et al., 2011). Weiterführende Forschungsaktivitäten zu LM-Systemen sollten zum Ziel haben, Ertragseinbußen zu vermeiden oder zumindest einen möglichen Ertragsrückgang bei der Hauptgemüsekultur auszugleichen und gleichzeitig die zusätzlichen Ökosystemleistungen wie die Erhöhung

der biologischen Vielfalt, die Verhinderung von Erosion und die Unterdrückung von Unkraut zu erhalten (Canali et al., 2017; Fracchiolla et al., 2020). Dies erfordert Lösungen zur Verringerung der Konkurrenz innerhalb der Systeme. Im Rahmen von Arbeitspaket 4 wurde daher die Frage untersucht, ob (1) die Pflanzung von Kohl im Strip-till-Verfahren in einen Leguminosen-LM zu einer Konkurrenz zwischen LM und Kohl während des Anbaus und demnach zu einem signifikanten Ertragsrückgang im Vergleich zur Einarbeitung des LM vor der Kohlpflanzung führt, (2) das Schneiden von legumen LM zwischen den Reihen die Konkurrenz mit dem Kohl verringert, was zu höheren Erträgen im Vergleich zu den entsprechenden nicht geschnittenen LM-Varianten führt, und (3) ein dichter und niedrig wachsender legumer LM, wie z.B. Mikroklee, im Vergleich zu einer Weißkleeart mit „normalem“ Wuchstyp weniger Konkurrenz auf die Kohlpflanzen ausübt, was zu einem höheren Kohlertrag führen sollte.

2.3.1.2 Material und Methoden

Zwei Feldversuche wurden im Südwesten Deutschlands auf der Öko-Versuchsstation Kleinhohenheim (KH) der Universität Hohenheim für drei Jahre (2019-2021) und auf dem Öko-Versuchsfeld Grötzingen (GR) des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg für zwei Jahre (2019-2020) durchgeführt.

Die Versuche wurden in einem zweifaktoriellen Split-Plot-Design mit vier Wiederholungen durchgeführt (der Großteilstück-Faktor LM-Wachstumsmanagement mit drei Stufen und der Kleinteilstück-Faktor LM-Arten mit vier Stufen). Für den Faktor LM-Wachstumsmanagement waren die Stufen (i) Umbruch des LM vor der Kohl-Pflanzung, (ii) Pflanzen des Kohls im Strip-till-Verfahren in den LM ohne Mulchen der LM (Strip till + kein Mulchen) und (iii) Pflanzen des Kohls im Strip-till-Verfahren in den LM mit Mulchen der LM während der Wachstumsperiode des Kohls; (Strip till + Mulchen). Für den Faktor LM-Arten wurden die folgenden LM verwendet: zwei Weißkleearten *Trifolium repens* cv. (i) 'Rivendel' (Weißklee=WK, wüchsig/Sorte für die Futterproduktion) und (ii) *T. repens* cv. (ii) 'Pipolina' (Mikroklee=MK, geringere Höhe, aber dichter Wuchs), (iii) Deutsches Weidelgras (=WG) (*Lolium perenne* cv. 'Premium') als nicht-legume Referenz und (iv) unbegrünter Boden als Kontrolle (=K). Am Standort KH mussten beide Kleearten Anfang April 2019 und 2020 nachgesät werden, da Wasserstress zu einer unzureichenden Etablierung geführt hatte. Dies führte zu zwei weiteren Stufen des Faktors LM-Arten mit beiden Weißkleearten: Etablierung des Klees im (v) Herbst (-H) des Vorjahres und (vi) Frühjahr (-F) des aktuellen Versuchsjahres. Die LM wurden im September des Vorjahres mit Aussaatmengen von 40 kg ha⁻¹ für das Deutsche Weidelgras, 20 kg ha⁻¹ für Weißklee cv. 'Rivendel', und 10 (2019) sowie 20 kg ha⁻¹ (2020 und 2021) für Mikroklee cv. 'Pipolina' etabliert. Für den Umbruch wurden die LM kurz vor der Kohlpflanzung gemulcht und in den Boden eingearbeitet. Ein später Weißkohl (*Brassica oleracea* convar. *capitata* var. *alba* cv. 'Rivera') wurde zwischen Ende Mai und Mitte Oktober angebaut. Um den hohen N-Bedarf des Weißkohls von mindestens 200 kg N ha⁻¹ (Feller et al., 2011) zu decken, wurden 150 kg N ha⁻¹ in Form von Hornspänen gedüngt. In beiden Strip-till-Behandlungen wurde der Kohl in Streifen von 0,25 m Breite gepflanzt. In den ersten Wochen wurden die Versuche zum Schutz vor Schädlingen mit einem Netz abgedeckt. Bei Bedarf wurden im ökologischen Landbau zugelassene Pflanzenschutzmittel eingesetzt, um den Schädlings- und Krankheitsdruck zu kontrollieren. Während der Wachstumsperiode des Kohls wurde die Unkrautbekämpfung in der

Umbruch-Behandlung zwischen den Reihen mit einer Bodenfräse sowie in den Reihen der Strip-till-Behandlungen von Hand durchgeführt. Die Kontrollparzellen innerhalb der Strip-till-Behandlungen wurden auf die gleiche Weise reguliert wie die Behandlungen mit LM und daher nicht mechanisch bearbeitet. Für weitere Untersuchungen zum Carry-Over-Effekt des LM-Systems wurde Winterweizen (*Triticum aestivum* cv. 'KWS Livius') als Folgekultur nach dem Weißkohl gesät.

Die Beprobung des Bodens auf mineralischen Stickstoff (N_{\min}) wurde während der Versuche sechsmal durchgeführt. Die N_{\min} -Ausgangsgehalte in 90 cm Tiefe (D1) für die einzelnen Jahre und Standorte sind in Tabelle 2.3-2 aufgeführt. Die darauffolgenden Bodenproben wurden zu Beginn der Vegetationsperiode im März (D2, 0-90 cm), kurz vor dem Pflanzen des Kohls Ende Mai (D3, 0-90 cm), zum Zeitpunkt der Kohlkopfbildung ab Mitte Juli (D4, 0-60 cm), zum Zeitpunkt der Kohlernte im Oktober (D5, 0-60 cm) und vier Wochen nach der Kohlernte im November (D6, 0-90 cm) entnommen. Die Bodenproben wurden auf Nitrat-N (NO_3^- -N) und Ammonium-N (NH_4^+ -N) analysiert. Beide Parameter wurden als Gesamt-Boden- N_{\min} aufsummiert.

Die Biomasse der LM wurde in der Umbruch-Behandlung vor der Einarbeitung der LM beprobt. Der Weißkohlertrag wurde anhand der Kopf- und Erntereste-Gewichte bewertet. Die Trockenmasse (TM) der LM, der Kohlköpfe und der Erntereste wurde durch Trocknung bei 40 °C bis zur Gewichtskonstanz erfasst. Nach dem Trocknen wurden die Pflanzenproben gemahlen und mittels Trockenverbrennung auf den Kohlenstoff- (C) und N-Gehalt untersucht.

Alle Merkmale wurden mit Hilfe eines gemischten Modells statistisch analysiert, wobei das Management der LM und die LM-Arten als feste Faktoren und das Jahr und der Standort als Zufallsfaktoren verwendet wurden. Für die Daten der Bodenproben wurde eine separate Analyse für jede Tiefe durchgeführt. In den Fällen, in denen mittels des globalen F-Tests signifikante Unterschiede festgestellt wurden, wurde der LSD-Test nach Fisher durchgeführt und die Mittelwertvergleiche wurden mittels einer Buchstabendarstellung gekennzeichnet, wobei eine Fehlerquote vom Typ 1 von 0,05 angenommen wurde. Alle Analysen wurden mit SAS durchgeführt.

2.3.1.3 Ergebnisse

Der Aufwuchs der LM-Biomasse zum Zeitpunkt der Pflanzung des Kohls in die umgebrochene bzw. via Strip-till gefrästen Behandlungen ist in Tabelle 2.3-1 dargestellt. Signifikante Unterschiede gab es zwischen den LM-Behandlungen in der N-Konzentration und dem C/N-Verhältnis. Die legumen Varianten weisen jeweils höhere Konzentrationen und dadurch auch niedrigere C/N-Verhältnisse auf.

Tabelle 2.3-1: LM-Biomasseaufwuchs, N-Konzentration, C/N-Verhältnis und N-Gehalt der oberirdischen Biomasse der verschiedenen LM-Behandlungen zum Zeitpunkt des Umbruchs bzw. der Kohlpflanzung. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen der LM-Arten ($\alpha = 0,05$).

LM-Behandlungen ¹	Biomasse-Ertrag (t TM ha ⁻¹)	N-Konzentration (% in TM)	C/N-Verhältnis	N-Aufnahme der Biomasse (kg N ha ⁻¹)
K	1,87	1,86 bc	19,5 b	31,8
WG	3,46	1,52 c	28,6 a	44,1
WK-H	3,07	2,78 a	14,7 c	78,8
WK-F	0,90	2,76 ac	12,6 c	20,8
MK-H	2,70	2,56 a	15,1 c	62,6
MK-F	0,77	3,11 ab	11,7 c	19,8

¹ K = Kontrolle, WG = Dt. Weidelgras, WK-H = Weißklee im Herbst gesät, WK-F = Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H = Mikroklee im Herbst gesät, MK-F = Mikroklee im Frühjahr gesät.

Im Kohlertrag gab es keine Unterschiede zwischen den LM-Wachstumsmanagement-Behandlungen (Abbildung 2.3-1). Dafür führte das Dt. Weidelgras jeweils zu den geringsten Erträgen, unabhängig davon, ob es vor der Kohlpflanzung umgebrochen wurde oder der Kohl in den Weidelgras-Lebendmulch gepflanzt wurde. Die Erträge des Kohls, welcher im legumen Lebendmulch gewachsen ist, unterscheiden sich nicht von den Erträgen des Kohls, der nicht in einer Konkurrenz zu legumen Lebendmulch, also der Kontrolle (K), stand.

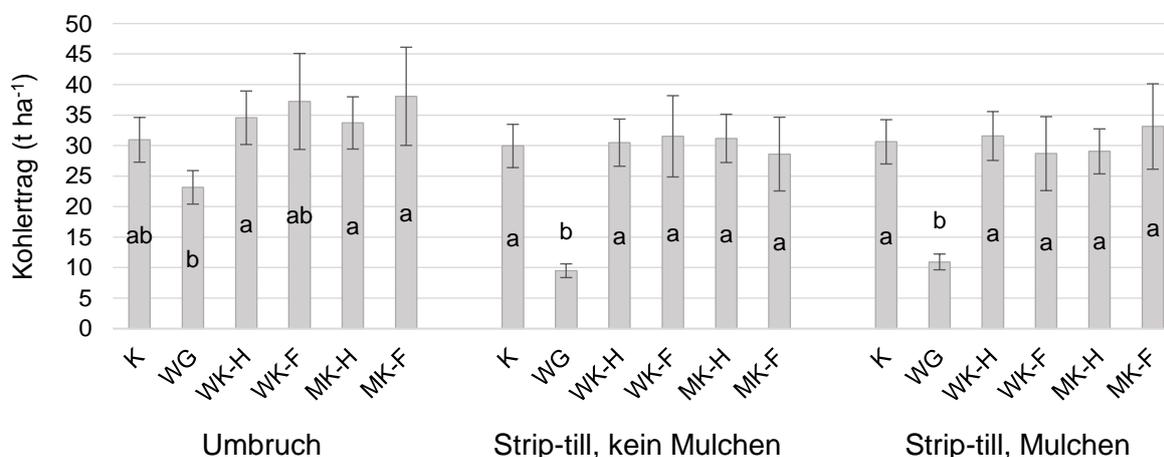


Abbildung 2.3-1: Einfluss der LM-Behandlungen und der Wachstumsmanagement-Behandlungen auf den Gesamt-Frischmasseertrag des Kohls in t ha⁻¹. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den LM-Behandlungen ($\alpha = 0,05$). K=Kontrolle, WG=Dt. Weidelgras, WK-H=Weißklee im Herbst gesät, WK-F=Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H=Mikroklee im Herbst gesät, MK-F=Mikroklee im Frühjahr gesät.

Das Gewicht der Erntereste zeigte sowohl im Vergleich der Wachstumsmanagement-Behandlungen als auch im Vergleich der LM-Behandlungen signifikante Unterschiede (Abbildung 2.3-2, A und B). Der Kohl, der im Lebendmulch gewachsen ist, zeigte geringere Erntereste-

Gewichte als die Behandlung, bei der der Lebendmulch vor der Kohlpflanzung umgebrochen wurde. Ähnlich wie bei dem Kopfertrag wies auch hier im Vergleich zu den anderen Behandlungen das Dt. Weidelgras die geringsten Gewichte der Erntereste auf.

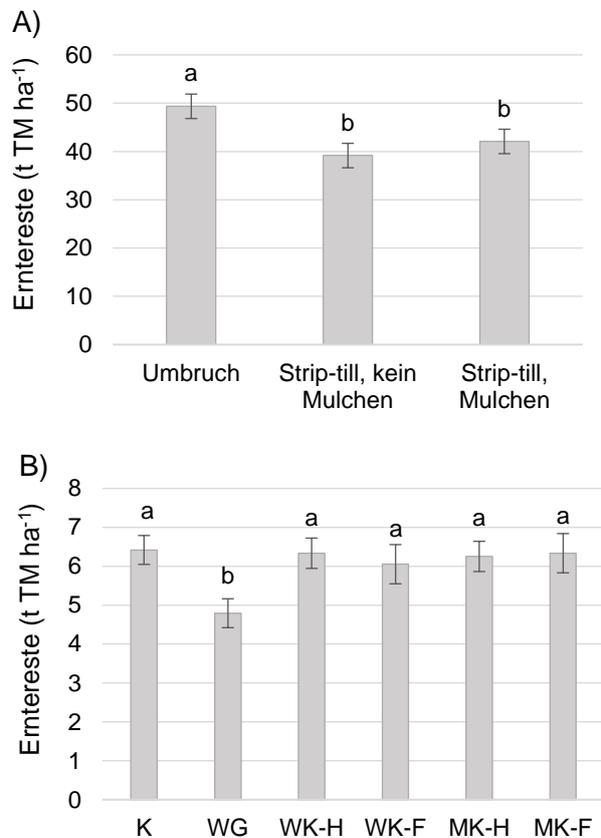


Abbildung 2.3-2 : Einfluss der Wachstumsmanagement-Behandlungen (A) und der LM-Behandlungen (B) auf das Gewicht der Erntereste des Kohls in t TM ha⁻¹. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen ($\alpha = 0,05$). K=Kontrolle, WG=Dt. Weidelgras, WK-H=Weißklee im Herbst gesät, WK-F=Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H=Mikroklee im Herbst gesät, MK-F=Mikroklee im Frühjahr gesät.

Der Kohl zeigte eine deutlich geringere N-Aufnahme in der Behandlung des Dt. Weidelgrases sowohl für die Köpfe als auch die Erntereste (Abbildung 2.3-4). Die Aufnahmen der Kontrolle und der legumen LM unterschieden sich nicht. Ebenso gab es keine Unterschiede in der N-Aufnahme der LM-Biomasse zwischen dem Weidelgras und den legumen Behandlungen.

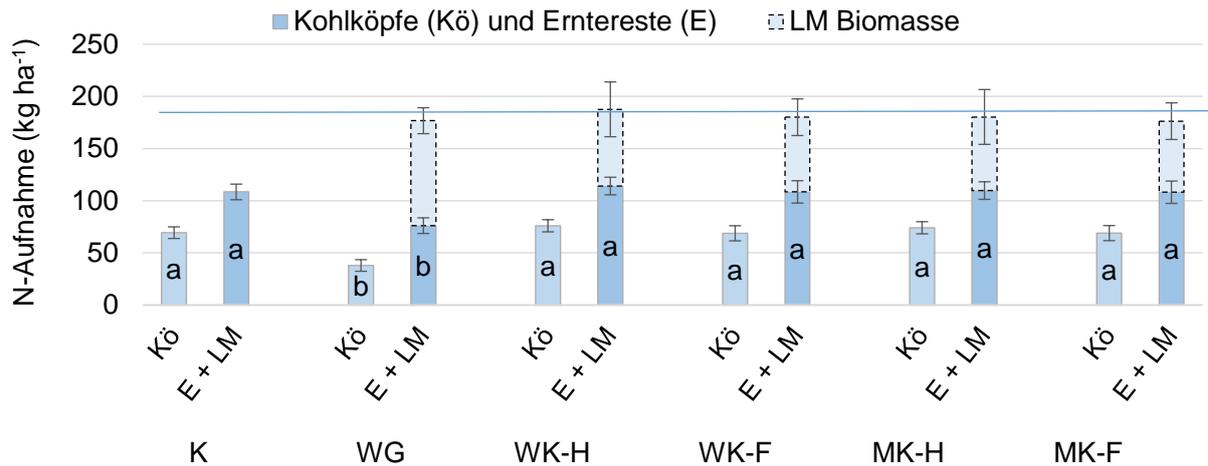


Abbildung 2.3-3: Einfluss der LM-Behandlungen auf die N-Aufnahme durch die Kohlköpfe, die Erntereste und die Lebendmulche in kg ha^{-1} zum Ende der Kohlvegetation. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den LM-Behandlungen ($\alpha = 0,05$). K=Kontrolle, WG=Dt. Weidelgras, WK-H=Weißklee im Herbst gesät, WK-F=Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H=Mikroklee im Herbst gesät, MK-F=Mikroklee im Frühjahr gesät.

Zur Versuchsetablierung lagen die N_{\min} -Gehalte des Bodens auf dem Standort Hohenheim bei 91, 38 und 45 kg ha^{-1} in 2019, 2020 und 2021 und auf dem Standort Grötzingen bei 106 und 119 kg ha^{-1} in 2019 und 2020. Die N_{\min} -Gehalte im Verlauf der Vegetation sind in Tabelle 2.3-2 dargestellt. Auch hier weist das Dt. Weidelgras zu den Terminen D3 und D4 die geringsten Gehalte auf, gefolgt von den legumen LM, welche im Herbst gesät wurden.

Tabelle 2.3-2: Einfluss der LM-Behandlungen auf den Boden-N_{min}-Gehalt in kg ha⁻¹ während des Vegetationsverlaufs. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen der LM-Arten ($\alpha = 0,05$).

Boden-N _{min} (kg ha ⁻¹)	Beginn der Vegetation	Kohlpflanzung	Kopfbildung	Kohlernte	Ende der Ve- getation
LM-Behandlungen	D2	D3	D4	D5	D6
0-30 cm					
K	9,8	16,6 a	13,5	11,9	15,8
WG	7,6	8,5 c	12,3	12,1	19,2
WK-H	10,1	11,9 b	13,6	14,6	16,7
WK-F	-	18,2 a	15,6	12,1	15,8
MK-H	10,1	11,3 b	14,3	14,9	19,0
MK-F	-	18,7 a	14,6	12,5	15,6
30-60 cm					
K	9,2	14,5 a	9,5 a	5,9	12,7
WG	6,0	7,5 c	5,8 c	5,3	12,5
WK-H	8,3	10,5 b	8,2 ab	5,8	12,3
WK-F	-	15,1 a	9,2 ab	5,9	14,0
MK-H	7,8	10,6 b	7,5 b	5,8	13,9
MK-F	-	14,9 a	8,4 ab	5,7	12,2
60-90 cm					
K	8,8	9,8			5,8
WG	5,0	5,1			5,4
WK-H	8,9	7,2			5,8
WK-F	-	10,9			5,5
MK-H	8,3	7,3			5,9
MK-F	-	10,4			5,8

K = Kontrolle, WG = Dt. Weidelgras, WK-H = Weißklee im Herbst gesät, WK-F = Weißklee im Frühjahr gesät, MK-H = Mikroklee im Herbst gesät, MK-F = Mikroklee im Frühjahr gesät.

2.3.1.4 Weizennachbau

Die Einarbeitung der Erntereste zusammen mit der verbleibenden LM-Biomasse nach der Kohlernte entsprach in den Strip-till-Behandlungen einer Gründüngung. Bei allen Behandlungen mit LM lagen in der Summe dieser Biomassefraktionen 70 kg ha⁻¹ mehr vor als bei der Kontrolle ohne LM (Abbildung 2.3-3). Dieses zusätzliche Angebot stand nach der Mineralisation der Folgekultur, dem Winterweizen, offensichtlich zum Teil zur Verfügung. In der Behandlung „Strip-till, kein Mulchen“ führte die Einarbeitung der Ernterest- und LM-Biomasse zu signifikant höheren Kornerträgen im Vergleich zu den anderen beiden Behandlungen (Tabelle 2.3-4). Grund für den höheren Ertrag im Vergleich zu „Strip-till, Mulchen“ könnte das längere, ungestörte Wachstum der LM sein. Der Lebendmulch musste ohne das Mulchen keine Nährstoffe aufwenden, um neue Biomasse zu bilden.

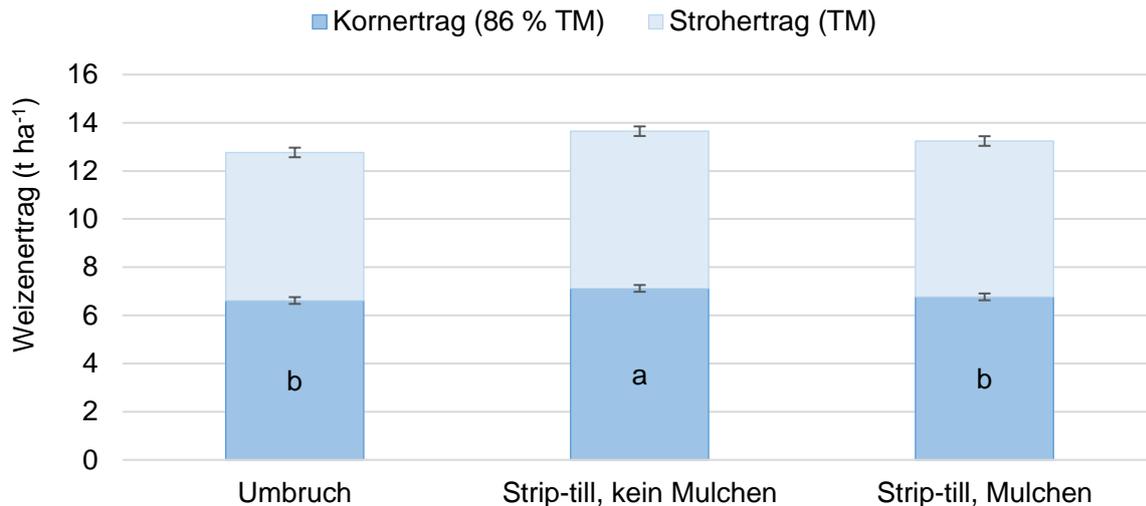


Abbildung 2.3-4: Einfluss der Wachstumsmanagement-Behandlungen auf den Weizenertrag in t ha⁻¹ für die Erntejahre 2020 und 2021. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Wachstumsmanagement-Behandlungen ($\alpha = 0,05$).

2.3.1.5 Diskussion

Hypothese 1: Die Pflanzung von Kohl im Strip-till-Verfahren in einen Leguminosen-Lebendmulch führt zu einer Konkurrenz zwischen Lebendmulch und Kohl während des Anbaus und demnach einem signifikanten Ertragsrückgang im Vergleich zur Einarbeitung des LM vor der Kohlpflanzung.

Die Ergebnisse der Lebendmulch-Versuche zeigen, dass der Anbau von Kohl im Strip-Till-Verfahren in LM nicht zwingend zu einer signifikanten Verringerung des Gesamtertrags der Köpfe führen muss (Abbildung 2.3-1). Allerdings gibt es einige Anzeichen für eine Konkurrenz um Licht und Nährstoffe durch die Biomasse der LM. Dies zeigt sich anhand der geringeren Biomasse der Kohlerntereste im Vergleich zum vorherigen Umbruch und Einarbeitung der LM-Biomasse (Abbildung 2.3-2A). Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit denen von Ilnicki und Enache (1992), Hooks et al. (2007), Tempesta et al. (2019) und Thériault et al. (2009). Einige Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Einfluss der LM auf die N-Dynamik die treibende Kraft für die Auswirkungen auf das Kohlwachstum ist. So wurden beispielsweise bei den Weidelgras-Behandlungen der niedrigsten N_{min}-Gehalte vor der Pflanzung (Tabelle 2.3-3) sowie die niedrigsten N-Aufnahmen (Abbildung 2.3-3) beobachtet. Das Fehlen von Unterschieden in der N-Aufnahme zwischen legumen LM und Kontrolle deutet darauf hin, dass der Kohl in allen LM-Behandlungen außer Weidelgras in der Lage war, ausreichend N aufzunehmen (Abbildung 2.3-3).

Hypothese 2: Das Schneiden von legumen Lebendmulch zwischen den Reihen verringert die Konkurrenz mit dem Kohl, was zu höheren Erträgen im Vergleich zu den nicht geschnittenen Lebendmulch führt.

Ein Einfluss des Mulchens auf den N-Gehalt des Bodens wurde weder erwartet noch gefunden (Tabelle 2.3-3). Unsere Ergebnisse stehen damit im Einklang mit den Resultaten von Thériault et al. (2009) und Brandsæter et al. (1998), die zeigen, dass das Mulchen von LM-Biomasse keinen positiven Einfluss auf den Ertrag der Gemüsekultur hat. Ein Hinweis auf eine geringere Konkurrenz von LM durch Mulchen konnte in unserer Arbeit ebenfalls nicht gefunden werden.

Hypothese 3: Eine dichter und niedrig wachsender legumer Lebendmulch, wie z.B. Mikroklee, übt im Vergleich zu einer Weißkleeorte mit „normalem“ Wuchstyp weniger Konkurrenz auf die Kohlpflanzen aus, was zu einem höheren Kohlertrag führt.

Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Etablierung der Leguminosen können nur Behandlungen mit demselben Aussaattermin verglichen werden. In keiner der Ergebnisse sind jedoch Anzeichen für eine geringere Konkurrenz durch den Mikroklee im Vergleich zum Weißklee mit regulärem Wachstum erkennbar (Abbildung 2.3-1, Abbildung 2.3-2B, 3, Tabelle 2.3-3). Unsere Erklärung ist, dass es keinen tatsächlichen Unterschied im Höhen- oder Biomassewachstum zwischen den beiden Sorten gibt. Einen solchen Unterschied würde man voraussichtlich nur erkennen, wenn der Mikroklee, z. B. als Rasenklee, regelmäßig geschnitten wird. Da der Kohl jedoch ab einer bestimmten Größe beginnt, die Reihen zu schließen, unterdrückt er den Klee zum Ende seiner Vegetation hin selbst.

2.3.2 Legume Winterzwischenfrüchte

2.3.2.1 Einleitung

Ein Ansatz zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit im ökologischen Landbau basiert auf einer Fruchtfolge mit dem Einsatz von Winterzwischenfrüchten (WZF) und der Einarbeitung ihrer Biomasse als Gründung bzw. N-Quelle in den Boden (Canali et al., 2015; C. A. Watson et al., 2002). Winterzwischenfrüchte unterliegen selten einem Vermarktungsinteresse, sondern dienen dem Bodenschutz und der Nährstoffversorgung: Im Herbst ausgesät, schützen sie vor der Auswaschung von Nitrat (NO_3^-) und anderen Nährstoffen, vor Wind- und Wassererosion, verbessern biologische, chemische und physikalische Bodeneigenschaften und speichern Nährstoffe (Fageria et al., 2005; Hartwig und Ammon, 2002; Larkin, 2020).

Ein spezifischerer Ansatz besteht darin, in gemüsebauliche Anbausysteme einen höheren Anteil an Leguminosen zu integrieren, um deren Fähigkeit zur exklusiven N-Versorgung über die biologische N_2 -Fixierung (BNF) zu nutzen (Løes et al., 2017; Möller, 2018b; Oelofse et al., 2013). Wenn der WZF-Aufwuchs im Frühjahr gemulcht und in den Boden eingearbeitet wird, werden die während des Wachstums aufgenommenen Nährstoffe durch Mineralisierung freigesetzt und dienen der Nährstoffversorgung der Folgekultur. Den Landwirten steht eine breite Palette von WZF für unterschiedliche Zwecke zur Verfügung. Leguminosen werden vor allem wegen ihres Beitrags zum N-Eintrag in den Boden über die BNF gewählt und bieten somit das Potenzial, den N-Düngemittelbedarf für die Folgekulturen zu verringern. *Poaceae* werden hauptsächlich wegen ihrer guten Überwinterungseigenschaften, ihrer hohen Biomasseproduktion sowie zur Verringerung von NO_3^- -Auswaschung und Bodenerosion eingesetzt. Getreide

als Zwischenfrucht führt jedoch oftmals zu Ertragseinbußen der Folgekultur. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Bestand nicht rechtzeitig umgebrochen wird und die Folgekultur mit dem eingearbeiteten Zwischenfruchtaufwuchs aufgrund dessen hohem C/N-Verhältnis im Boden um mineralischen N konkurriert (Alonso-Ayuso et al., 2014; Canali et al., 2013; Hefner et al., 2020; Thorup-Kristensen und Dresbøll, 2010; Willumsen und Thorup-Kristensen, 2001). Eine Mischung aus Leguminosen und Getreide vereint die Vorteile beider Kulturarten (Frasier et al., 2017; Nyfeler et al., 2011), begrenzt jedoch im Vergleich zu einer Leguminosen-Reinsaat die BNF. Leguminosen als Zwischenfrucht steigerten nachweislich den Ertrag und die N-Verfügbarkeit für verschiedene nachfolgende Gemüsekulturen, z. B. Weißkohl, Paprika, Endivie, Wirsing oder Aubergine (Bento et al., 2020; Campiglia et al., 2014b; Cordeiro et al., 2018; Larkin, 2020, Radicetti et al., 2016; Thorup-Kristensen, 2006; Willumsen und Thorup-Kristensen, 2001). Positive Ertragseffekte fanden sich zum Teil auch bei mehr als einer Folgekultur (Pinto et al., 2017; Rosa et al., 2020; Vargas et al., 2017). Legume WZF können somit neben zahlreichen anderen positiven Wirkungen die N-Versorgung der Folgekultur maßgeblich unterstützen oder sogar vollständig gewährleisten. Doch auch bei der Etablierung der WZF selbst spielt die Höhe des im Boden verfügbaren Stickstoffs vermutlich eine entscheidende Rolle. Während ein zu niedriges N-Angebot die kritische Jugendentwicklung hemmen kann, kann bei Leguminosen bzw. leguminosenhaltigen Mischungen ein zu hohes N-Angebot den Leguminosenanteil negativ beeinflussen und die BNF senken. Aufgrund des vergleichsweise hohen N-Bedarfs vieler Gemüsekulturen, einer Ernte im physiologisch unreifen Zustand sowie teils hoher N-Mengen in verbleibenden Ernteresten (Feller et al., 2011) sind die Boden-N_{min}-Gehalte nach gemüsebaulicher Flächennutzung oftmals erhöht. Ferner ist davon auszugehen, dass die N-Wirkung einer WZF aufgrund ihrer fortschreitenden Bestandesentwicklung im frühen Frühjahr wesentlich von deren Umbruchzeitpunkt abhängt.

Wesentliches Ziel der Versuche war es, den Einfluss verschiedener WZF-Varianten auf die N-Versorgung und den Ertrag einer gemüsebaulichen Folgekultur und damit das Einsparpotenzial an organischen N-Düngemitteln zu quantifizieren. Die Versuche wurden an verschiedenen Standorten in Deutschland mit teils leicht unterschiedlichem Variantenspektrum und differenzierter inhaltlicher Schwerpunktsetzung durchgeführt. Sämtliche Versuche umfassten Nicht-Leguminosen, Leguminosen-Reinsaaten sowie Mischungen beider Pflanzengruppen als WZF, auf welche stets Weißkohl als gemüsebauliche Modellkultur folgte.

Den Untersuchungen lagen u. a. folgende Hypothesen zugrunde (Versuche Süd- u. West-D): (1) Leguminosen als Gründüngung führen im Vergleich zu Nicht-Leguminosen-Gründüngung oder einer Mischung aus beiden aufgrund einer höheren und schnelleren N-Verfügbarkeit durch die Einarbeitung ihrer Biomasse zu höheren Kohlerträgen. (2) Grünroggen als nicht-legume Zwischenfrucht mindert den N_{min}-Gehalt im Boden vor der Kohlpflanzung, was in der Folge zu einem geringeren Kohlertrag führt. (3) Legume WZF weisen aufgrund der höheren N-Aufnahme durch den Kohl ein höheres Potenzial für NO₃-Auswaschung nach der Kohlernte auf, wenn die auf dem Feld verbleibenden Erntereste eingearbeitet werden.

Um die gegebenenfalls negativen Effekt erhöhter Herbst-N_{min}-Werte auf die BNF und die Bestandsqualität der WZF-Bestände sowie deren N-Vorfruchtwirkung zu bewerten, wurde bei ausgewählten Versuchen das Variantenspektrum um den zusätzlichen Faktor „Ansaat-N_{min}-

Niveau“ ergänzt (Versuche Nord-D). Auf die Berücksichtigung des Faktors „Umbruchtermin“ wurde aufgrund begrenzter Versuchs- und Flächenkapazitäten hingegen verzichtet. Um den Einfluss früherer Umbruchtermin auf o.g. Effekte trotzdem abschätzen zu können, wurde die Bestandesentwicklung der WZF vor Umbruch durch zeitlich engmaschige Aufwuchsbeprobungen untersucht.

2.3.2.2 Versuche in Süd- und Westdeutschland

2.3.2.2.1 Material und Methoden

Die Feldversuche wurden für zwei bzw. drei aufeinanderfolgende Jahre im Zeitraum von 2019 bis 2021 an drei verschiedenen Standorten in Süd- und Westdeutschland durchgeführt: an der Versuchsstation Kleinhohenheim (KH) der Universität Hohenheim bei Stuttgart und in Forchheim am Kaiserstuhl (FH) bei Emmendingen-Hochburg, einer Außenstelle des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg und am Versuchszentrum Gartenbau Straelen/Köln-Auweiler (KA) der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Die WZF-Varianten (I) Grünschnittroggen (*Secale cereale* L.), (II) Mischung von Grünschnittroggen mit Ungarischer Wicke (*Vicia pannonica* Crantz), (III) Ungarische Wicke, (IV) Wintererbse (*Pisum sativum* L.) und (V) Winterackerbohne (*Vicia faba* L.) wurden mit einem unbegrüntem Boden über Winter als Kontrolle verglichen. Die Versuche waren jeweils als randomisierter Blockversuch (KA) oder Reihen-Spalten-Versuch (KH, FH) mit einem Faktor von fünf Varianten und vier Wiederholungen angelegt. Das Variantenspektrum beinhaltete an jedem Standort neben der Kontrolle Grünschnittroggen und Wintererbse. Die Variante Wickroggen wurde zusätzlich in FH und KH, Winterwicke in FH und KA und Ackerbohne in KH und KA untersucht. Der Versuch in KH wurde in den Jahren 2019, 2020 und 2021, in FH in den Jahren 2019 und 2020 und in KA in den Jahren 2020 und 2021 durchgeführt.

Die Aussaat der WZF erfolgte im Oktober bzw. November. Die WZF wurden Mitte Mai durch Mulchen abgetötet und durch Fräsen eingearbeitet. Ein später Weißkohl (*Brassica oleracea* convar. *capitata* var. *alba* L.) wurde zwischen Ende Mai bzw. Anfang Juni und Mitte Oktober angebaut. Hornspäne (150 kg N ha^{-1}) wurden als zusätzliche Düngung vor der Pflanzung eingesetzt, um einen N-Mangel des Kohls zu vermeiden. Während der Vegetationsperiode erfolgte die Unkrautbekämpfung mit einer Bodenfräse zwischen den Reihen und innerhalb der Reihen von Hand. Der Versuch wurde zum Schutz vor Schädlingen mit einem Netz abgedeckt, bei KH in den ersten Wochen, bei FH bis wenige Wochen vor der Kohlernte und bei KA während der gesamten Vegetationsperiode des Kohls.

Der Boden wurde während der Versuchsdauer sechsmal auf den Gehalt an mineralischem Stickstoff (N_{\min}) beprobt. Die anfänglichen N_{\min} -Gehalte für die einzelnen Jahre und Standorte vor der Anlage des Versuchs wurden für jede Wiederholung im Oktober beprobt (0-90 cm). Anschließend erfolgte die Beprobung (D2) zu Beginn der Vegetationsperiode im März (0-90 cm), (D3) vor der Pflanzung des Kohls im Mai (0-60 cm), (D4) zur Zeit der Kopfbildung im Juli (0-60 cm), (D5) kurz nach der Ernte des Kohls im Oktober und (D6) vier Wochen nach der Ernte am Ende der Vegetationsperiode im November (0-90 cm). Die Proben wurden mittels Durchflussanalysator auf die Parameter Nitrat-N und Ammonium-N analysiert. Beide Parameter wurden addiert, um den N_{\min} -Gehalt zu erhalten.

Vor dem Umbruch der WZF wurde das Biomassewachstum anhand von 0,5 m² großen Proben pro Parzelle ermittelt. Der Ertrag des Kohls wurde als Gesamtertrag des Kohls und Gewicht der Erntereste bewertet. Die Biomasse der Pflanzenproben wurde getrocknet, gemahlen und durch Trockenverbrennung auf den Kohlenstoff- (C) und Stickstoffgehalt analysiert. Für weitere Untersuchungen zum Carry-Over-Effekt des WZF-Systems wurde Winterweizen (*Triticum aestivum* cv. 'KWS Livius') als Folgekultur nach dem Kohl gesät.

Alle Merkmale wurden mit einem gemischten Modell analysiert, wobei die WZF als fester Faktor und das Jahr und der Standort als Zufallsfaktoren verwendet wurden. Für die Daten der Bodenproben wurde eine separate Analyse für jede Tiefe durchgeführt. Wurden mittels des globalen F-Tests signifikante Unterschiede festgestellt, wurde der Fishers-LSD-Test durchgeführt und die Mittelwertvergleiche wurden als Buchstaben dargestellt, wobei eine Fehlerquote vom Typ1 von 0,05 angenommen wurde. Alle Analysen wurden mit SAS durchgeführt.

Ein weiterer Winterzwischenfruchtversuch wurde zusätzlich einjährig (2019/2020) am Standort Bamberg der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) durchgeführt. Aufgrund der geringeren Datenlage und Abweichungen in der Versuchsdurchführung wurde dieser Versuch nicht in die Gesamtauswertung der süd- und westdeutschen Versuche aufgenommen und wird daher nachfolgend gesondert dargestellt. Der Versuch wurde ebenfalls als randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen auf einem Standort mit sandigem Lehm angelegt. Als Varianten wurden die WZF Grünroggen, Wickroggen, Winterwicke und Wintererbse Mitte September 2019 ausgesät und am 26.05.2020 umgebrochen. Als Hauptfrucht wurde Weißkohl der Sorte ‚Burato‘ am 09.06.2020 gepflanzt und am 22.10.2020 geerntet. Der Kohl wurde mit zusätzlichen 80 kg N ha⁻¹ in Form von Horngries gedüngt.

2.3.2.2.2 Ergebnisse

Kohl

Der Aufwuchs der WZF-Biomasse zum Zeitpunkt des Umbruchs und der kurz darauffolgenden Pflanzung des Kohls ist in Tabelle 2.3-2 dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten gab es in der N-Konzentration und dem C/N-Verhältnis. Die legumen Reinsaaten wiesen jeweils höhere Konzentrationen und dadurch auch niedrigere C/N-Verhältnisse als Roggen oder Wickroggen auf.

Tabelle 2.3-3: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf deren Biomasseaufwuchs, die N-Konzentration und das C/N-Verhältnis der oberirdischen Biomasse sowie die N-Aufnahme kurz vor dem Umbruch und der Einarbeitung der WZF. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).

WZF	Biomasse-aufwuchs (t TM ha ⁻¹)	N-Konzentration (% TM)	C/N-Verhältnis	N-Aufnahme in der Biomasse (kg N ha ⁻¹)
Kontrolle	3,27	2,00 b	19,8 b	56,2
Roggen	7,77	1,08 c	42,7 a	85,2
Wickroggen	8,42	1,23 bc	40,8 a	112,5
Wicke	5,38	3,31 a	10,3 b	184,9
Erbse	5,66	3,34 a	13,4 b	177,2
Ackerbohne	5,54	3,21 a	15,5 b	159,2

Beim Kohlertrag sowie bei der Trockenmasse der Ernterückstände gab es keine Unterschiede zwischen den WZF-Varianten (Tabelle 2.3-4). Die Erträge des Kohls mit Vorfrucht über Winter unterschieden sich nicht von den Kohlerträgen der Kontrolle ohne WZF. Allerdings lassen sich deutliche Tendenzen zu höheren Erträgen bei marktfähigen Köpfen (>1,0 kg) und geringeren Erträgen bei nicht marktfähigen Köpfen (<1,0 kg) bei legumenen WZF (Wicke, Erbse und Ackerbohne) erkennen. Auch bei den Ernteresten, die im Anschluss an die Kohlernte eingearbeitet wurden, weisen die legumenen WZF-Varianten höhere Gewichte auf.

Tabelle 2.3-4: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf den Ertrag eines nachfolgenden Weißkohls, unterteilt in marktfähige und nicht-marktfähige Köpfe, sowie auf die Masse an Ernterückständen. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).

WZF	Kohlertrag (t ha ⁻¹)		Erntereste (TM)
	marktfähige Köpfe (>1,0 kg)	nicht-marktfähige Köpfe (<1,0 kg)	
Kontrolle	21,6	15,8	6,99
Roggen	11,5	19,7	6,43
Wickroggen	14,4	19,2	6,70
Wicke	25,5	14,0	7,06
Erbse	25,9	14,1	7,37
Ackerbohne	28,1	13,6	7,21

Die N-Menge in der Kopfbiomasse war nach Roggen und Wickroggen im Vergleich zu allen anderen Varianten signifikant geringer (Abbildung 2.3-5), während sich die Kontrolle nicht von den legumenen WZF unterschied. Die legumenen WZF wiesen im Vergleich zur Kontrolle jedoch tendenziell höhere N-Menge in den Ernterückständen auf.

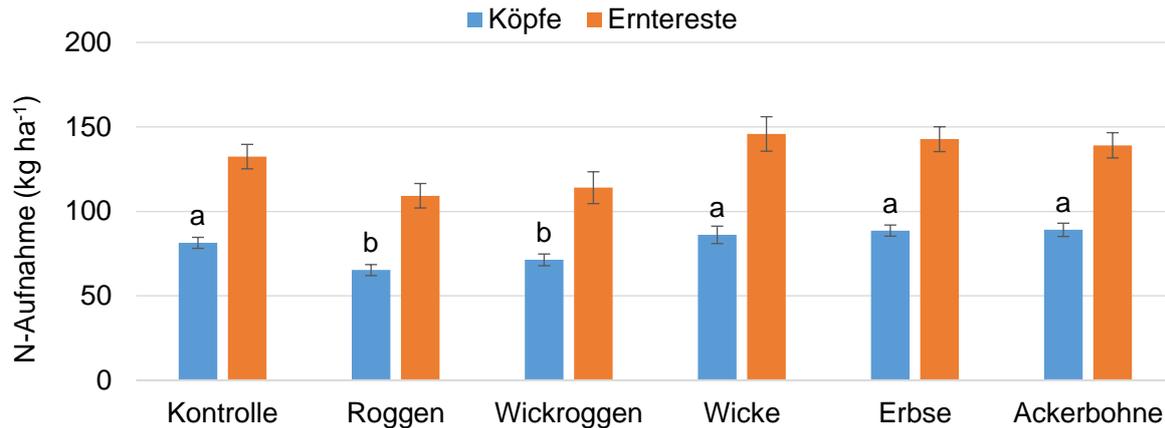


Abbildung 2.3-5: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf die N-Aufnahme des Weißkohls zu Kulturende. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).

Zur Versuchsetablierung lagen die N_{\min} -Gehalte des Bodens am Standort Hohenheim bei 90, 28 und 53 kg ha⁻¹ in 2019, 2020 und 2021, auf dem Standort Forchheim bei 86 und 55 kg ha⁻¹ in 2019 und 2020 und am Standort Köln-Auweiler bei 147 und 161 kg ha⁻¹. Die N_{\min} -Gehalte im Verlauf der Vegetation sind in Tabelle 2.3-5 dargestellt. Hier zeichneten sich bereits zum Zeitpunkt des Vegetationsbeginns Unterschiede ab: Roggen wies gemeinsam mit Wickroggen die geringsten Gehalte an den Terminen D2, D3 und D4 auf. Zwischen der Kontrolle und den legumen WZF ließen sich keine signifikanten Unterschiede im N_{\min} -Gehalt finden.

Tabelle 2.3-5: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf den N_{\min} -Gehalt im Boden zu unterschiedlichen Terminen in den Bodentiefen 0-30, 30-60 und 60-90 cm. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).

Boden-N_{\min} (kg ha⁻¹)	Beginn der Vegetation		Kohl-pflan- zung		Beginn der Kopfbildung		Kohlernte	Ende der Vegetation
WZF	D2		D3		D4		D5	D6
0-30 cm								
Kontrolle	16,7	a	13,2		17,8		10,4	11,8
Roggen	8,5	c	6,6		15,7		9,93	11,6
Wickroggen	9,5	bc	8,2		15,7		9,84	12,3
Wicke	15,4	a	16,4		19,0		11,1	13,0
Erbse	13,8	ab	15,2		19,0		9,79	12,6
Ackerbohne	12,6	ac	14,9		18,6		11,7	13,8
30-60 cm								
Kontrolle	22,5	a	12,4	a	13,5	ab	5,2	7,9
Roggen	9,4	c	5,9	c	9,9	bc	5,6	8,2
Wickroggen	11,7	bc	6,2	bc	8,9	c	4,4	8,5
Wicke	19,2	ab	13,1	a	14,9	a	5,5	8,2
Erbse	18,4	ab	13,1	a	16,2	a	5,1	8,6
Ackerbohne	17,7	ab	11,3	ab	16,5	a	5,0	10,3
60-90 cm								
Kontrolle	22,5		15,3					3,5
Roggen	15,3		4,9					4,2
Wickroggen	16,9		4,9					4,6
Wicke	19,4		13,1					4,8
Erbse	20,7		13,5					5,1
Ackerbohne	21,0		13,9					4,5

Weizennachbau

Die Ergebnisse der Weizenerträge als Folgekultur des Weißkohls nach verschiedenen WZF-Gründungen zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten (Abbildung 2.3-6). Trotzdem gibt es Anzeichen für reduzierte Erträge bei den Varianten Grünroggen und Wickroggen. Grund hierfür können die geringeren N-Mengen in den Ernterückständen des Kohls sein (Abbildung 2.3-5), die nach dessen Ernte eingearbeitet wurden.

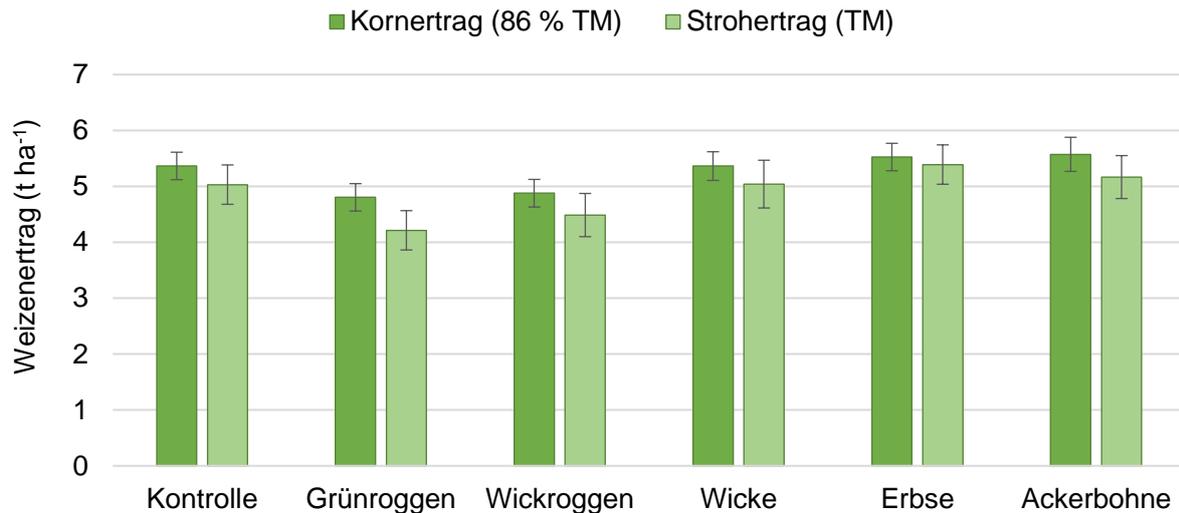


Abbildung 2.3-6: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) vor Weißkohl auf den Ertrag eines nachfolgenden Winterweizens in t ha⁻¹ für die Erntejahre 2020 und 2021. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).

Standort Bamberg

Am Standort Bamberg erwies sich der Aufwuchs des Wickroggens bei allen vier Biomasse-schnitten im Vergleich zu allen anderen WZF als höher (Abbildung 2.3-7). Der Ertrag des im Frühjahr 2020 nachfolgenden Weißkohls war nach Winterwicke signifikant höher als nach Grünroggen (Abbildung 2.3-8). Beim nachfolgenden Getreide konnten in den Kornerträgen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, jedoch waren die Stroherträge in der Variante Winterwicke höher als in der Variante Grünroggen (Abbildung 2.3-9). Die Ergebnisse spiegelten sich auch im Verlauf des N_{\min} -Gehaltes im Boden wider. In der Variante Winterwicke waren die N_{\min} -Gehalte im Sommer 2020 während der Weißkohlkultur signifikant höher als in den anderen Varianten. Weiterführende Detailinformationen zum Versuch sind bei Vikuk und Rascher (2022) beschrieben.

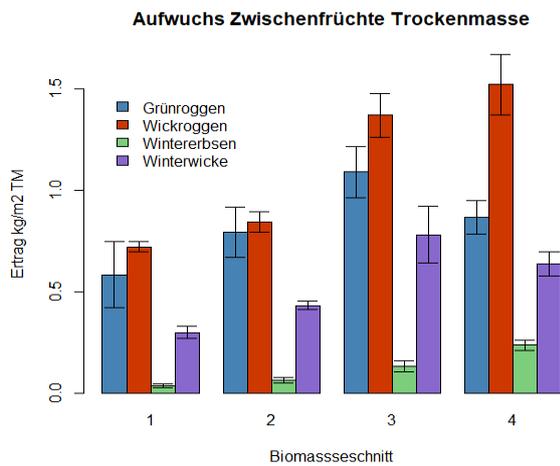


Abbildung 2.3-7: Aufwuchs-Trockenmasse verschiedener Winterzwischenfrüchte zu unterschiedlichen Terminen (1: 07.04.2020, 2: 23.04.2020, 3: 07.05.2020, 4: 20.05.2020), Mittelwert aus vier Wiederholungen \pm Standardabweichung

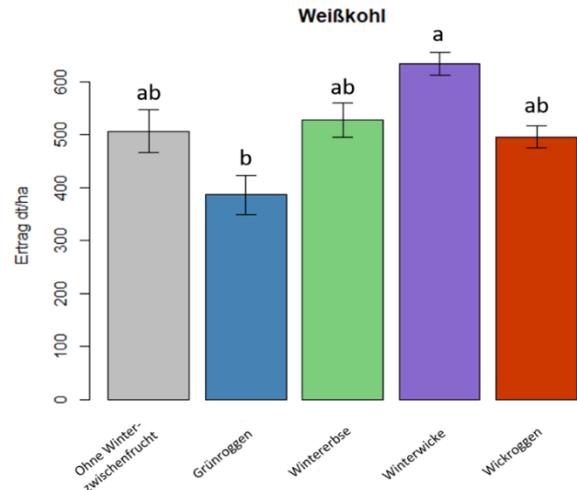


Abbildung 2.3-8: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf den Ertrag eines nachfolgenden Weißkohls, Mittelwert aus vier Wiederholungen \pm Standardabweichung. Balken mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten.

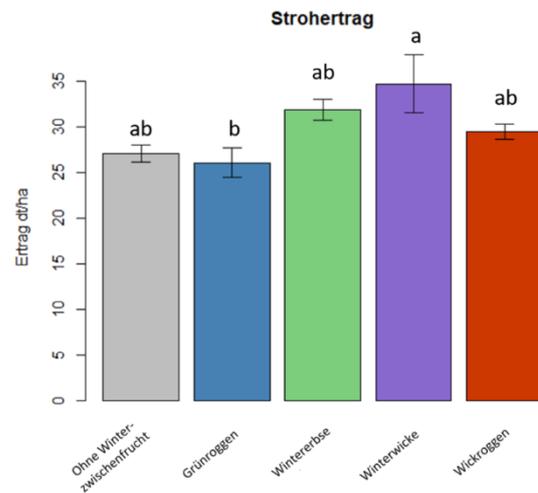
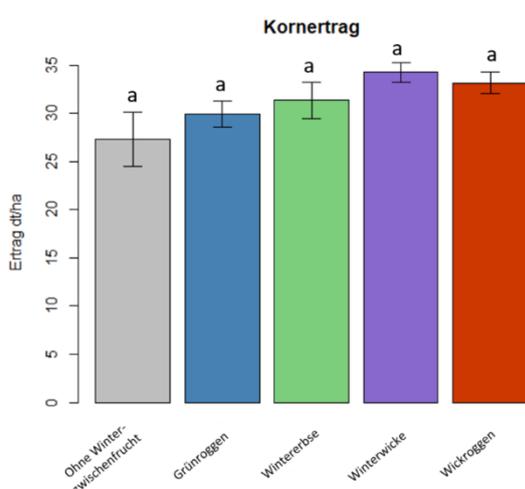


Abbildung 2.3-9: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) vor Weißkohl auf den Korn- (links) und Strohtrockenmasseertrag (rechts) eines nachfolgenden Winterweizens in dt ha⁻¹. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten.

2.3.2.2.3 Diskussion

Hypothese 1: Leguminosen als Gründüngung führen im Vergleich zu Nicht-Leguminosen-Gründüngung oder einer Mischung aus beiden aufgrund einer höheren und schnelleren N-Verfügbarkeit durch die Einarbeitung ihrer Biomasse zu höheren Kohlerträgen.

Das Ergebnis dieser Studie zeigt keine signifikante Erhöhung des Kohlertrags durch eine vorherige Gründüngung mit Leguminosen (Tabelle 2.3-5). Dieser Mangel an Unterschieden lässt sich zum Teil durch die hohen Standardfehler sowohl für den marktfähigen als auch für den nicht-marktfähigen Kopfsertrag erklären. Es ist augenscheinlich, dass einerseits vor allem Roggen und Wickroggen zu einem geringeren marktfähigen Ertrag führten, während alle drei legumenen Winterzwischenfruchtvarianten im Vergleich zur Kontrolle tendenziell einen höheren marktfähigen Ertrag aufwiesen. Das Ertragsniveau des Kohls ist dabei vergleichbar mit ähnlichen Studien, welche den Einfluss legumener Gründüngungen auf den Ertrag eines nachfolgenden Weißkohls unter ökologischen Anbaubedingungen untersuchten (z. B. Haas et al., 2007; Hefner et al., 2020). Der Kohlertrag variiert in diesen Studien u.a. in Abhängigkeit der Pflanzdichte zwischen etwa 20 und 50 t ha⁻¹.

Unterstützen lässt sich die Hypothese durch die hohen N-Gehalte in der Biomasse der legumenen WZF bei gleichzeitig niedrigem C/N-Verhältnis zum Zeitpunkt ihres Umbruchs kurz vor der Kohlpflanzung (Tabelle 2.3-4) was eine schnelle Mineralisation nach der Einarbeitung erwarten lässt. Die wenn auch geringen aber teils signifikanten Unterschiede in den Boden-N_{min}-Gehalten zu Beginn der Kopfbildung (Tabelle 2.3-5, D4) stützen die Annahme einer raschen N-Freisetzung aus dem legumenen Zwischenfruchtaufwuchs.

Hypothese 2: Grünroggen als nicht-legume Zwischenfrucht mindert den N_{min}-Gehalt im Boden vor der Kohlpflanzung, was in der Folge zu einem geringeren Kohlertrag führt.

Neben der N-Versorgung über die Gründüngungsbiomasse spielt der bereits zu Kulturbeginn im Boden verfügbare Stickstoff eine wichtige Rolle für die Etablierung der Gemüsekultur und je nach Düngestrategie auch für die erste Kulturphase. Eine Konkurrenz um den Boden-N_{min} vor der Pflanzung kann insbesondere bei anspruchsvollen Gemüsekulturen zu Ertragseinbußen führen (Hefner et al., 2020; Willumsen und Thorup-Kristensen, 2001). Vor allem Getreide, das im Winter bevorzugt als WZF genutzt wird, besitzt ein hohes N-Aufnahmepotenzial. Der aufgenommene Stickstoff steht anschließend nicht oder erst spät nach der Einarbeitung der WZF der nachfolgenden Kultur zur Verfügung. Dies kann auch in der vorliegenden Studie für die Termine D2 und D3 beobachtet werden (Tabelle 2.3-6). Die Varianten mit Roggen und Wickroggen zu Beginn der Vegetationsperiode und zum Zeitpunkt des Kohlanbaus die geringsten Boden-N_{min}-Gehalte auf, hinsichtlich der Reduzierung von NO₃-Austrägen mit dem Sickerwasser als günstig zu beurteilen ist. Die Leguminosen hingegen senkten den N_{min}-Gehalt im Vergleich zur Kontrolle nicht signifikant. Als Zwischenfrüchte mit dem Ziel der Vermeidung von NO₃-Auswaschung sind sie daher weniger geeignet.

Hypothese 3: Legume WZF weisen aufgrund der höheren N-Aufnahme durch den Kohl ein höheres Potenzial für NO₃-Auswaschung nach der Kohlernte auf, wenn die auf dem Feld verbleibenden Erntereste eingearbeitet werden.

Zur Kohlernte ließen sich keine Unterschiede im Boden-N_{min}-Gehalt zwischen den verschiedenen WZF-Varianten feststellen (Tabelle 2.3-5, D5). Aufgrund des hohen N-Aufnahmepotentials des Kohls (vgl. Tabelle 2.3-5) wurde der verfügbare Boden-N_{min} weitestgehend aufgebraucht. Auch einige Wochen nach der Kohlernte und der Einarbeitung der Ernterückstände waren die N_{min}-Gehalte im Boden am Ende der Vegetationsperiode immer noch gering (Tabelle 2.3-5, D6), aber im Vergleich zum Erntetermin (D5) leicht erhöht. Zwar konnten keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden, die tendenziell höheren N-Mengen in den Kohlrückständen bei in den legumen WZF-Varianten (Abbildung 2.3-5) deuten jedoch auf ein leicht erhöhtes NO₃-Auswaschungsrisikos hin.

2.3.2.3 Versuche in Norddeutschland

2.3.2.3.1 Material und Methoden

Der Versuch wurde auf der gemüsebaulichen Versuchsfläche des Gartenbaukompetenzzentrums der LFA MV „An der Nebel“ (53°49' N, 12°03' E) angelegt. Der Bodentyp ist als Parabraunerde-Haftpseudogley klassifiziert und wies zum Zeitpunkt der ersten WZF-Aussaat einen C_{org}-Gehalt von 0,85±0,22 % auf. Der Standort ist durch einen Jahresniederschlag von 552 mm und eine Jahresmitteltemperatur von 9,2 °C (30-jähriges Mittel, 1990-2021) charakterisiert (vgl. Abbildung 2.3-10 und Abbildung 2.3-11).

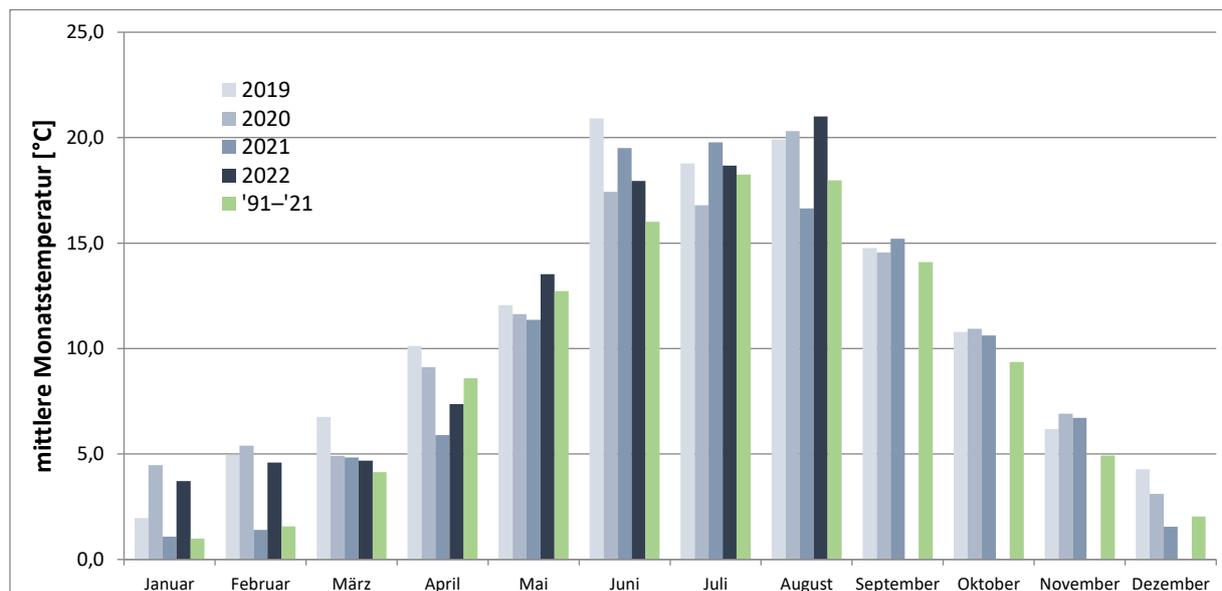


Abbildung 2.3-10: Lufttemperaturen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gülzow im Vergleich zum langjährigen Mittel (grün) der Wetterstation in Gülzow.

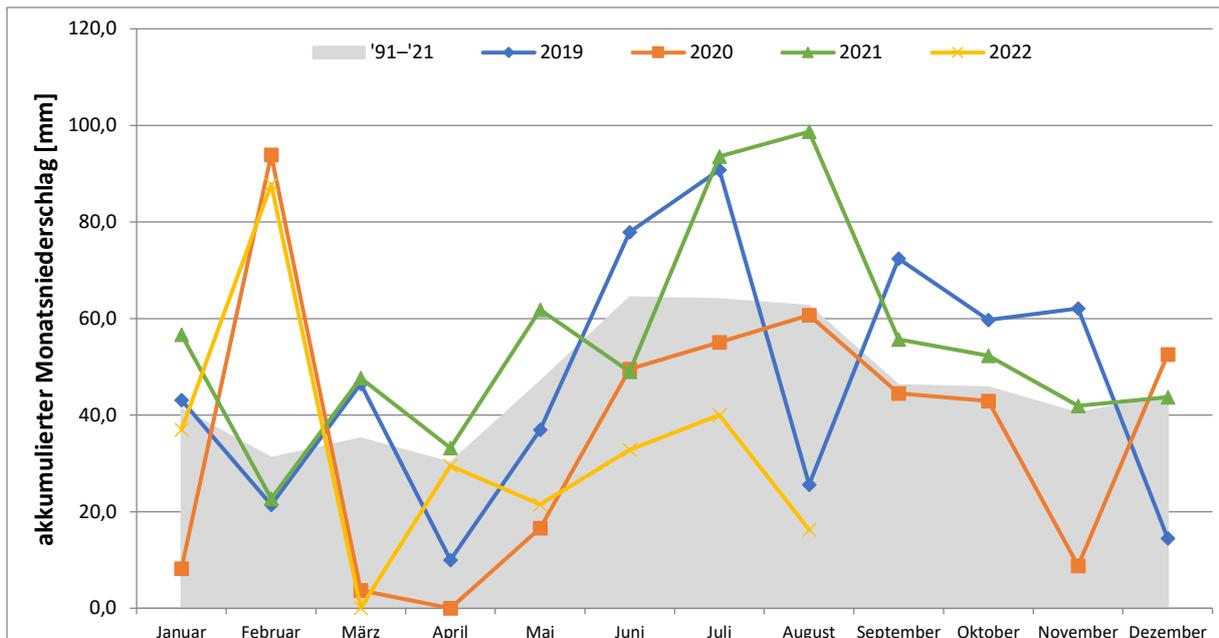


Abbildung 2.3-11: Niederschlagssummen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gülzow im Vergleich zum langjährigen Mittel der Wetterstation in Gülzow (graue Fläche).

2.3.2.3.2 Versuchsaufbau

Der hier dargestellte Versuch wurde zweimal im Zeitraum von 2019-2021 durchgeführt. Die Versuche unterscheiden sich zu den Versuchen an den Standorten in Süd- und Westdeutschland durch den zusätzlichen Faktor „Ansaat-N_{min}-Niveau“ und teils abweichende Winterzwischenfruchtarten (Tabelle 2.3-6). Hierfür wurden die Winterzwischenfrüchte nach einer Getreidevorfrucht einerseits ohne Zudüngung (Variante „niedrig“) sowie andererseits zusätzlich nach Zudüngung von 100 kg N ha⁻¹ in Form von Kalkammonsalpeter (Variante „hoch“) ausgesät. Die Düngung erfolgte jeweils am Vortag der Aussaat. Die Versuchsglieder des niedrigen Herbst-N_{min}-Niveaus entsprechen den Versuchen der anderen Standorte und sind grundsätzlich mit diesen vergleichbar. Der Versuch wurde im Split-Plot-Design mit 3 Wiederholungen angelegt. Der Faktor Winterzwischenfruchtart wurde als Großteilstück und die Herbst-N_{min}-Niveaus als Kleinteilstück festgelegt. Die Parzellengröße betrug 4,5 m x 8 m (3 Beete á 8 m). Die Biomasseerhebungen der WZF wurden ausschließlich auf den äußeren beiden Beeten durchgeführt. Je Schnitttermin und Parzelle wurden 4 Flächen (50 x 50 cm) bei einer Schnitthöhe von 5 cm beprobt. Um einen homogenen Vorfruchteffekt zu gewährleisten, wurden nur das mittlere Beet und die jeweils angrenzenden Randreihen der benachbarten Beete mit Weißkohl

Tabelle 2.3-6: Untersuchte Winterzwischenfruchtarten am Standort Gülzow (LFA).

WZF	Sorte/Handelsname	Leguminosenanteil*
Grünroggen	‘Bonfire’	0%
Wickroggen	‘Wickroggen-GPS’	10%
Wintererbse	‘Arkta’ (2019), ‘E.F.B. 33’ (2020)	100%
Winterwicke	‘Otsaat’	100%
Landsberger Gemenge	‘Landsberger Gemenge’	50%

*im Saatgut lt. Hersteller

2.3.2.3.3 Analytik

Bodenproben

Nach WZF-Aussaat und Düngung der Varianten mit hohem Herbst-N_{min}-Niveau, unmittelbar vor Umbruch und nach der Weißkohlernte wurden Bodenproben (0-90 cm) entnommen und auf ihren N_{min}-Gehalt untersucht (Summe aus Nitrat- und Ammoniumstickstoff; VDLUFA N_{min}-Methode). Zur allgemeinen Flächencharakterisierung erfolgten für die Bodenschicht 0-30 cm Analysen auf C_{org} (durch Verbrennung und Gasanalyse), N_t (nach Kjeldahl), pH (elektrometrisch in CaCl₂-Suspension), P (photometrisch; NaHCO₃-Auszug) und K (spektrometrisch; CaCl₂-Auszug)

Pflanzenproben

Alle WZF wurden zu 5 Zeitpunkten beprobt (Tabelle 2.3-7). Bei jeder Beprobung wurde die Gesamtaufwuchsfrischmasse sowie der TS-, N_t- und C_t-Gehalt (TS jeweils bei 70°C, C_t und N_t durch Verbrennungsmethode nach Dumas) analysiert. Der nachfolgende Weißkohl wurde jeweils zum Erntetermin beprobt. Dabei wurde Gesamtaufwuchs- und Ertragsfrischmasse getrennt erfasst sowie TS- und N_t-Gehalt (Verbrennungsmethode nach Dumas) der parzellenweisen Mischproben analysiert.

Tabelle 2.3-7: Beprobungstermine der Winterzwischenfrüchte

Beprobungstermin	2020	2021
T1	08.04.	14.04.
T2	15.04.	21.04.
T3	22.04.	28.04.
T4	29.04.	05.05.
T5	06.05.	12.05.

Kulturführung

Die zeitgleiche Aussaat der WZF erfolgte in beiden Jahren im September nach wendender Bodenbearbeitung (Pflug) beetweise mittels Parzellendrillmaschine (Wintersteiger Hege 80). Um eine Verunkrautung der Kontrollbrache zu verhindern, wurde diese nach Bedarf gestriegelt und abgeflammt. Zur Vorbereitung des Umbruchs wurden nach der jeweils letzten Beprobung der WZF sämtliche Parzellen tief gemulcht und mittels Scheibenegge bearbeitet. 6 (2020) bzw. 13 (2021) Tage später erfolgte eine N-Grunddüngung von 150 kg N ha⁻¹ als Horngrieß (händisch, alle VG) sowie eine ggf. notwendige Grunddüngung mit Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel und Kalk als Patent-Kali, Dolophos 15 und Naturkalk. Im Anschluss erfolgte der eigentliche Umbruch durch die Bearbeitung mittels Bodenfräse. Die Pflanzung des Weißkohls der Sorte 'Drago F1' erfolgte händisch im Abstand 50 x 50 cm. Die Beikrautregulierung im Kulturverlauf erfolgte mechanisch mittels an einem Geräteträger montierten Hackelementen sowie händisch. Tierische Schädlinge wurden mit den Wirkstoffen Azadirachtin, Pyrethrine, Rapsöl, *Bacillus thuringiensis* und Kali-Seife reguliert. Die Weißkohljungpflanzen wurden am Tag vor der Pflanzung protektiv gegen die Kleine Kohlflye mit Spinosad im Angießverfahren behandelt.

Die Gesamt-N₂-Fixierungsleistung der legumen WZF wurde aus der Differenz der N_t-Mengen der oberirdischen legumen WZF- und nicht-legumer Referenzbiomasse zu T5 zuzüglich der Differenz der zugehörigen N_{min}-Werte (0-90 cm) berechnet. Da nur zum letzten Termin T5 N_{min}-Proben genommen wurden, entsprechen die genannten N₂-Fixierungsleistungen zu der Termine T1-T4 der einfachen Differenz ohne N_{min}.

Die statistische Auswertung erfolgte in R (Version 4.1.3). Post-hoc Tests wurden bei linearen Modellen mit der Implementierung von Fisher's LSD des R-Pakets ‚agricolae‘ durchgeführt. Gemischte Modelle wurden mit den R-Paketen ‚lme4‘, ‚lmerTest‘ und ‚emmeans‘ erzeugt und ausgewertet.

2.3.2.3.4 Ergebnisse

Die WZF-Biomassequalitäten (N_t-Gehalt und C/N-Verhältnis) der WZF-Arten unterschieden sich zu allen Terminen signifikant (Tabelle 2.3-8). Im Jahr 2020 erzielte die Winterwicke unter hohem Ansaat-N_{min}-Niveau die höchste maximale (T5) N-Aufnahme von 290 kg N ha⁻¹ sowie eine näherungsweise N₂-Fixierungsleistung von 156 kg N ha⁻¹ (Tabelle 2.3-10). Diese Werte unterschieden sich signifikant von allen anderen WZF-Arten jedoch nicht von der Variante mit niedrigem Ansaat-N_{min}-Niveau. Zugleich wurde bei den Varianten der Winterwicke das niedrigste C/N-Verhältnis (9,3) festgestellt, welches sich signifikant von den Varianten Grünroggen, L. Gemenge und Wickroggen unterschied. Das höchste mittlere C/N-Verhältnis (41,3) wurde bei Grünroggen unter niedrigem Ansaat-N_{min}-Niveau festgestellt und unterschied sich innerhalb T5 signifikant von allen anderen WZF-Arten, jedoch nicht von der Variante mit hohem Ansaat-N_{min}-Niveau. Innerhalb der WZF-Arten unterschieden sich die C/N-Verhältnisse hinsichtlich des Ansaat N_{min}-Niveaus nur signifikant beim Landsberger Gemenge (T3, T4) und beim Wickroggen (T4).

Im Jahr 2021 gab es zum letzten Beprobungstermin T5 keine signifikanten Mittelwertunterschiede hinsichtlich der N-Aufnahme. Positive N₂-Fixierungsleistungen wurden lediglich bei den Varianten Wickroggen und Winterwicke festgestellt. Die C/N-Verhältnisse der Winterwickenvarianten unterschieden sich jedoch signifikant von den anderen WZF-Arten. Hinsichtlich der Ansaat-N_{min}-Niveaus unterschieden sich ausschließlich die Mittelwerte des Landsberger Gemenges zu T3 signifikant. Bei der Wintererbse kam es 2021 durch einen starken Befall mit *Sclerotinia sclerotiorum* zum Totalausfall. An den übrigen WZF-Arten konnte zwar kein sichtbarer Befall festgestellt werden, bei einer stichprobenartigen Kontrolle am 16.03.2021 wurden jedoch auch in den Parzellen des Landsberger Gemenges Sklerotien gefunden.

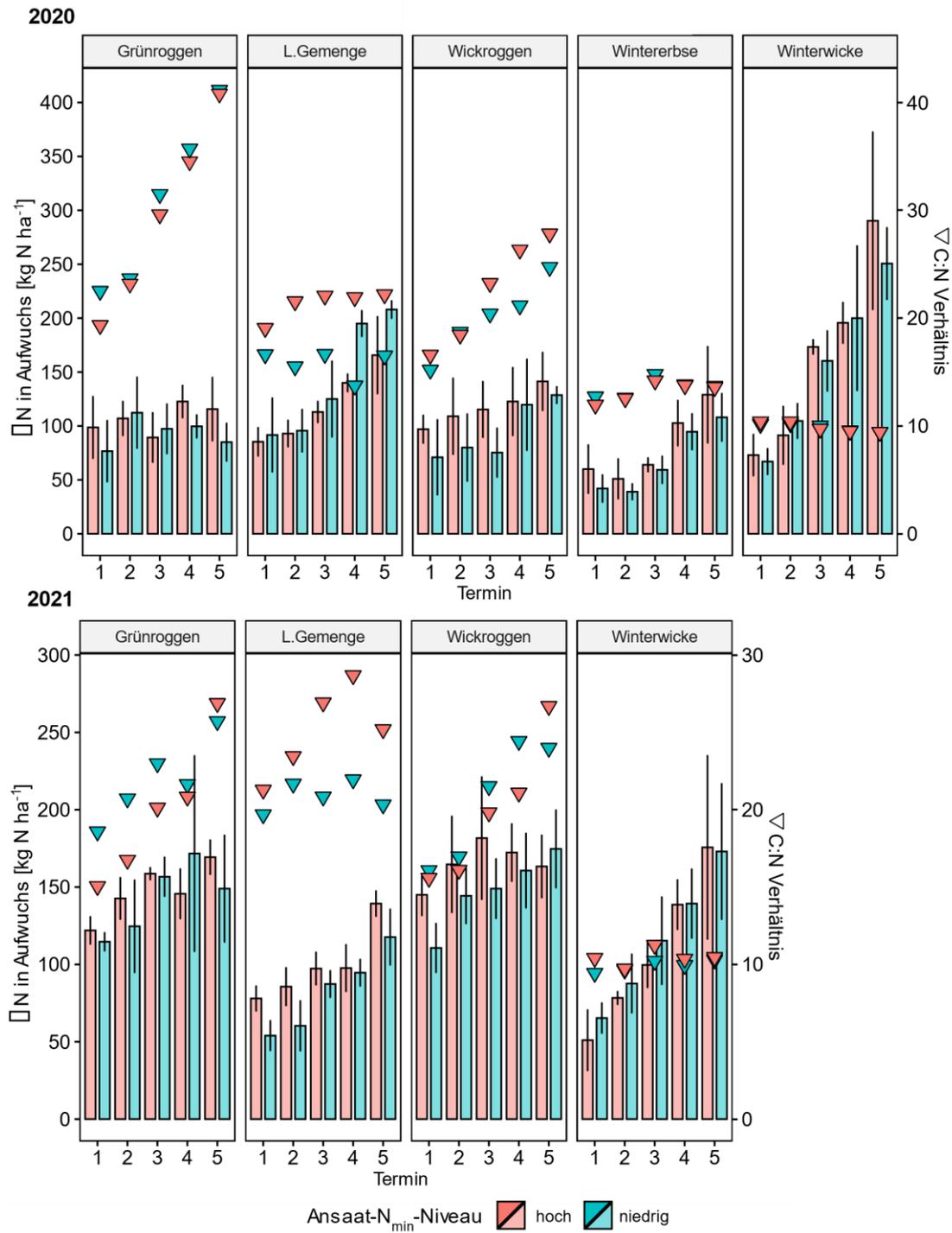


Abbildung 2.3-12: N-Menge im oberirdischen Aufwuchs unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte (WZF) sowie dessen C/N-Verhältnis zu jeweils 5 Beprobungsterminen in den Jahren 2020 und 2021.

Tabelle 2.3-8: ANOVA Ergebnisse der WZF-Biomassebeprobungen.

	N-Aufnahme					C/N-Verhältnis				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
2020										
Ansaat-N _{min} -Niveau (ANN)	.	ns	ns	ns	ns	ns	ns	.	*	ns
WZF	*	***	***	***	***	***	***	***	***	***
ANN*WZF	ns	ns	*	.	ns	*	.	*	***	.
2021										
Ansaat-N _{min} -Niveau (ANN)	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
WZF	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***
ANN*WZF	*	ns	ns	ns	ns	*	.	**	.	ns

., *, **, ***, ns: signifikant bei $p \leq 0.1$, 0.05, 0.01, 0.001 bzw. nicht signifikant

Die N_{min}-Beprobung nach Zudüngung der Variante mit hohem Ansaat-N_{min}-Niveau ergab ein im Mittel um 59 kg N_{min} ha⁻¹ (Versuch 1, Ansaat 2019) bzw. um 139 kg N_{min} ha⁻¹ (Versuch 2, Ansaat 2020) erhöhtes Niveau (Tabelle 2.3-9).

Tabelle 2.3-9: N_{min}-Gehalte 14 (2019) bzw. 13 (2020) Tage nach KAS-Düngung zur Realisierung des hohen Ansaat-N_{min}-Niveaus.

Ansaat	Ansaat-N _{min} -Niveau	N _{min} [kg ha ⁻¹]			
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	0-90 cm
2019	niedrig	7	20	21	47 ± 1,7
	hoch	19	52	20	106 ± 26,2
2020	niedrig	56	66	10	133 ± 15,2
	hoch	169	90	13	272 ± 47,3

Tabelle 2.3-10: Näherungsweise N₂-Fixierungsleistung und C/N-Verhältnis (in Klammern) der Varianten bei niedrigem Ansaat-N_{min}-Niveau.

	Wickroggen		Landsberger Gemenge		Winterwicke		Wintererbse		AUSFALL
	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	
T1	-23 (15)	-33 (16)	-3 (17)	-89 (20)	-27 (10)	-78 (9)	-52 (13)		
T2	-14 (19)	1 (17)	1 (16)	-83 (22)	11 (10)	-56 (10)	-55 (13)		
T3	-19 (20)	6 (22)	31 (17)	-56 (21)	66 (10)	-28 (10)	-35 (15)		
T4	26 (21)	17 (24)	101 (14)	-48 (22)	106 (10)	-4 (10)	1 (14)		
T5	34 (25)	31 (24)	114 (17)	-25 (20)	156 (9)	30 (10)	14 (14)		

Die Erträge der Versuche lagen mit $1066 \pm 39,6$ dt FM ha⁻¹ (2020) und $1177 \pm 36,8$ dt FM ha⁻¹ (2021) bzw. $95 \pm 4,4$ dt TM ha⁻¹ (2020) und $95 \pm 5,2$ dt TM ha⁻¹ (2021) auf vergleichbarem Niveau. Im Jahr 2020 erzielten nur die Varianten der Winterwicke und das hohe Ansaat-N_{min}-Niveau der Wintererbse höhere N-Aufnahmen im Vergleich zur Kontrolle (Abbildung 2.3-13). In 2021 war dies außerdem bei Grünroggen (ANN: hoch), Wickroggen (ANN: niedrig) und Landsberger Gemenge (ANN: niedrig) der Fall. Die höchste Netto-N-Wiederfindung konnte mit $122 \pm 24,9$ kg N ha⁻¹ 2021 in der Variante Winterwicke mit hohem Ansaat-N_{min}-Niveau beobachtet werden (Tabelle 2.3-12).

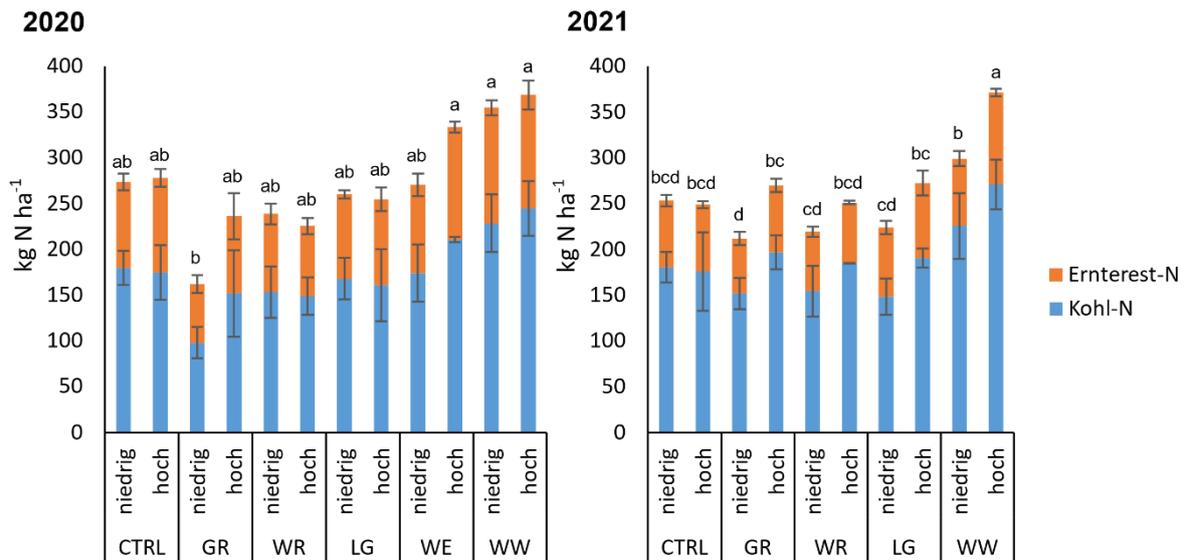


Abbildung 2.3-13: Mittlere N-Aufnahmen des nach unterschiedlichen Winterzwischenfrüchten (WZF) angebauten Weißkohls in Abhängigkeit der WZF-Variante („CTRL“ Brache, „GR“ Grünroggen, „WR“ Wickroggen, „LG“ Landsberger Gemenge, „WE“ Wintererbse, „WW“ Winterwicke) und des Faktors Ansaat-N_{min}-Niveau („hoch“ und „niedrig“). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).

Tabelle 2.3-11: Netto-N-Wiederfindung des oberirdischen Winterzwischenfrucht-N (zum Umbruchtermin (im nachgebauten Weißkohl (zur Ernte))).

WZF	Aussaat-N _{min} -Niveau	2020		2021	
		[kg N ha ⁻¹]		[kg N ha ⁻¹]	
Grünroggen	niedrig	-112 ± 26,7	e	-37 ± 22,2	d
	hoch	-37 ± 72,2	de	21 ± 14,9	bc
Wickroggen	niedrig	-35 ± 37,8	bcd	-29 ± 33,2	cd
	hoch	-48 ± 32,8	abc	2 ± 1,4	bcd
Landsberger Gemenge	niedrig	-13 ± 26,7	cd	-25 ± 25,4	cd
	hoch	-19 ± 52,3	cd	23 ± 9,8	bc
Winterwicke	niedrig	81 ± 39,2	ab	50 ± 44,2	b
	hoch	95 ± 45,5	a	122 ± 24,9	a
Wintererbse	niedrig	-3 ± 44	bcd	AUSFALL	
	hoch	60 ± 9,1	abc	AUSFALL	

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$)

2.3.2.4 Diskussion

Am Standort Gülzow (LFA) konnten legume Winterzwischenfrüchte substanzielle N_2 -Fixierungsleistungen von bis zu näherungsweise 183 kg N ha^{-1} (Winterwicke bei hohem Ansaat- N_{\min} -Niveau; Versuch 1) erzielen. Allerdings ließ sich diese Größenordnung in der Versuchswiederholung nicht reproduzieren. Während im Jahr 2020 bereits zur dritten Beprobung (22.04.) höhere N-Mengen als in der Referenzfrucht Grünroggen festgestellt wurden, wurden 2021 selbst zum letzten Beprobungstermin (12.05.) nur marginale positive Differenzen bei Wickroggen und Winterwicke festgestellt. Diese Unterschiede können größtenteils durch das deutlich kältere Frühjahr 2021 (Temperatursumme 192°Cd geringer gegenüber Umbruch 2020) erklärt werden. Das N-Mineralisationspotenzial und damit die N-Vorfruchtwirkung werden maßgeblich durch das C/N-Verhältnis bestimmt. Bis zu einem C/N-Verhältnis von 15 kann eine Netto-N-Mineralisierung von bis zu $>40\%$ erwartet werden. Insbesondere die Leguminosenreinsaaten blieben fast ausnahmslos und auch zu den späten Terminen unterhalb dieses Werts und haben daher ein größeres Potenzial die N-Versorgung der unmittelbaren Folgekultur zu unterstützen. Dies bestätigte sich durch höhere N-Aufnahmen des Weißkohlnachbaus nach Winterwicke und Wintererbse im Vergleich zur Kontrolle. Das sehr hohe C/N-Verhältnis des eingearbeiteten Grünroggens im Bereich von 28 bis 41, der sich bereits in der Teigreife befand, führte erwartungsgemäß zu geringeren N-Aufnahmen bzw. stark negativen Netto-N-Wiederfindungen. Doch auch die legumen Gemenge führten nur zu gering höheren oder sogar niedrigeren N-Aufnahmen im Vergleich zur Kontrolle. Dies legt nahe, dass bei späten Umbruchterminen die weiten C/N-Verhältnisse der nicht-legumen Gemengepartner den zusätzlichen Nutzen durch die biologische N_2 -Fixierung der Leguminosenanteile weitestgehend auslöschen können.

Durch den zusätzlichen Faktor Ansaat- N_{\min} -Niveau (nur LFA MV) sollte untersucht werden, inwieweit hohe Rest- N_{\min} -Gehalte im Herbst ($>150 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$) die Aufwuchsqualität der Winterzwischenfrucht beeinflussen. Während die Leguminosenreinsaaten nicht auf die unterschiedlichen Ansaat- N_{\min} -Niveaus reagierten war bei den Gemengen in beiden Versuchen ein Anstieg der C/N-Verhältnisse bei hohem Ansaat- N_{\min} -Niveau festzustellen. Die absoluten N-Aufnahmen wurden hingegen nicht statistisch absicherbar vom Ansaat- N_{\min} -Niveau beeinflusst. Mit hoher Wahrscheinlichkeit erklärt sich dieser Effekt aus der Konkurrenzsituation der Gemengepartner. Nichtlegume Gemengepartner profitieren überproportional von der höheren Stickstoffverfügbarkeit und in der Folge sinkt der Leguminosenanteil.

Damit der Winterzwischenfruchtanbau mit dem Ziel der Maximierung des N-Eintrags aus biologischer N_2 -Fixierung gelingt, ist es empfehlenswert den Bestand im Frühjahr zügig auf Auswinterungsschäden zu untersuchen und bei geringen Leguminosenanteilen sobald wie möglich umzubrechen. Die Ergebnisse zeigen, dass Leguminosenreinsaaten das größte N-Versorgungspotenzial aufweisen. Ein substanzieller N-Input durch biologische N_2 -Fixierung wird jedoch nur bei späten bis sehr späten Umbruchterminen erreicht und ist stark abhängig von der Witterung im Frühjahr. Hohe Rest- N_{\min} -Gehalte zum Ansaatzeitpunkt wirken sich weniger problematisch auf die Etablierung und N_2 -Fixierungsleistung von Leguminosenreinsaaten aus

als angenommen. Die Gemenge reagierten hingegen stärker auf hohe N_{\min} -Gehalte zur Ansaat und wiesen substanziiell höhere C/N-Verhältnisse auf, die das kurzfristige Mineralisationspotenzial schmälern.

2.3.3 Integration von Klee gras in gemüsebauliche Fruchtfolgen

2.3.3.1 Einleitung

Als Satellitenversuch zum „Systemversuch Cut&Carry“ (AP 5) wurde an der LFA ein weiterer Versuch angelegt, der die Vorruchtwirkung und N_2 -Fixierungsleistung der dort verwendeten Klee grasmischung unter verschiedenen Anbauszenarien untersucht. Insbesondere die Entfernung des Klee grasschnittguts kann zu einer substanziiellen Erhöhung der N_2 -Fixierungsleistung gegenüber dem Mulchverbleib führen (Hatch et al., 2007; Katroschan und Stützel, 2017; Stinner et al., 2008) und bedurfte daher einer Validierung. Wesentliches Ziel war es daher die Informationslücke der tatsächlichen N_2 -Fixierungsleistung mithilfe nicht-legumer Referenzflächen und die N-Vorruchtwirkung der Klee grasphase in Abhängigkeit des Schnittmanagements zu untersuchen. Da es speziell im Gemüsebau zu vergleichsweise hohen Herbst- N_{\min} -Gehalten aus mineralisierenden Ernteresten oder Düngemitteln kommen kann, sollte zudem die Auswirkung unterschiedlicher Herbst- N_{\min} -Situationen untersucht werden. Auf diese Problematik aufbauend, sollte bewertet werden, inwieweit eine nicht-legume Winterzwischenfrucht (WZF) in Verbindung mit einer Frühjahrssaat die Etablierungsbedingungen für das Klee gras verbessern kann und als Lösungsansatz geeignet ist. Im Projektantrag wurden hierfür die folgenden Hypothesen formuliert:

- (1) Hohe Rest- N_{\min} -Werte zum Zeitpunkt der Klee grasetablierung im Herbst haben einen negativen Einfluss auf den Klee anteil und damit auf die N_2 -Fixierungsleistung im Folgejahr. Damit verbunden sind eine geringere N-Menge in der Klee grasbiomasse sowie ein höheres C/N-Verhältnis zum Umbruchtermin und in der Folge ein geringeres N-Angebot für die nachfolgende Gemüsekultur.
- (2) Bei hohen Rest- N_{\min} -Gehalten im Herbst verbessert eine nicht-legume Winterzwischenfrucht die Bedingungen für eine Klee grasetablierung im Frühjahr deutlich. Dadurch wird insgesamt eine höhere N_2 -Fixierungsleistung und N-Vorruchtwirkung erzielt als bei Herbstsaat bei hohen N_{\min} -Gehalten.
- (3) Die Abfuhr des Klee grasschnittguts steigert im Vergleich zur Mulchnutzung den Klee anteil und die N_2 -Fixierung deutlich. Das N-Angebot für die nachfolgende Gemüsekultur ist daher trotz Verbleib des Schnittguts auf der Fläche bei Mulchnutzung nicht erhöht.
- (4) Positive Wechselwirkung zwischen Rest- N_{\min} -Gehalt und Nutzungsregime: Überproportionale Reduzierung von Klee anteil und N_2 -Fixierung durch Mulchnutzung bei hohen Rest- N_{\min} -Gehalten zum Zeitpunkt der Klee grasetablierung.

2.3.3.2 Material und Methoden

2.3.3.2.1 Standort

siehe 2.3.2.3 Versuche in Norddeutschland Versuchsaufbau

Der hier dargestellte Versuch wurde zweifach an der LFA durchgeführt (V1 2018 – 2020; V2 2019 – 2021). Der Versuch setzt sich aus einer 1 ½ jährigen Gründungsphase und einem anschließenden Weißkohlnachbau zusammen. Während der Gründungsphase wurde die Vorfrucht Klee gras dreifaktoriell differenziert. Der Faktor „Etablierungssystem“ wurde als Großteilstück, das „Herbst-N_{min}-Niveau“ als Unterteilstück und das „Schnittmanagement“ als Kleinteilstück definiert (Erläuterung Faktorausprägungen siehe Tabelle 2.3-12). Die Parzellengröße betrug 4,5 m x 8 m (3 Beete á 8 m). Die Biomassebeprobungen zu den Schnittzeitpunkten wurden gleichmäßig verteilt auf allen Beeten durchgeführt. Je Schnitttermin und Parzelle wurden 4 quadratische Flächen (50 x 50 cm) bei einer Schnitthöhe von 7 cm beprobt. Im Hauptnutzungsjahr erfolgten jeweils 3 Schnitte. Der letzte Schnitt unmittelbar vor Umbruch erfolgte tiefer bei 5 cm und das Schnittgut verblieb in allen Varianten auf der Fläche. Um einen homogenen Vorfruchteffekt auch nach Verschleppung durch die Bodenbearbeitung zu gewährleisten, wurden nur das mittlere Beet und die jeweils angrenzenden Rendreihen der benachbarten Beete mit der Nachbaukultur Weißkohl bepflanzt und beprobt. Die zwei Herbst-N_{min}-Niveaus „niedrig“ und „hoch“ wurden durch Zudüngung von 100 kg N ha⁻¹ in Form von Kalkammonsalpeter in der Variante „hoch“ realisiert.

Tabelle 2.3-12: Faktoren und Faktorausprägungen Satellitenversuch Klee grasnutzung

Etablierungssystem (Großteilstück)
Herbstblanksaat
Frühjahrsblanksaat - nach WZF Grünroggen (abgefahren)
Herbst-N_{min}-Niveau (Unterteilstück)
hoch, aufgedüngt mit 100 kg N ha ⁻¹
niedrig, ohne Düngung
Schnittmanagement (Kleinteilstück)
Schnittgutabfuhr
Schnittgutverbleib (Mulchnutzung)
Deutsches Weidelgras* (Schnittgutabfuhr)

legume Referenz für Berechnung der N₂-Fixierungsleistung

2.3.3.2.2 Analytik

Bodenproben

Nach den beiden Aussaatterminen im September und April, unmittelbar nach dem letzten Schnitt im Hauptnutzungsjahr, vor Umbruch und nach der Weißkohlernte wurden Bodenproben (0-90 cm) entnommen und auf ihren N_{min}-Gehalt untersucht (Summe aus Nitrat- und Am-

moniumstickstoff; VDLUFA N_{min}-Methode). Zur allgemeinen Flächencharakterisierung erfolgten für die Bodenschicht 0-30 cm Analysen auf C_{org} (durch Verbrennung und Gasanalyse), N_t (nach Kjeldahl), pH (elektrometrisch in CaCl₂-Suspension), P (photometrisch; NaHCO₃-Auszug) und K (spektrometrisch; CaCl₂-Auszug)

Pflanzenproben

Alle Varianten wurden zu den 4 Schnittzeitpunkten (Tabelle 2.3-13: Beprobungstermine (T1 – T4) der Gründungsphase) und bei ggf. notwendigen Schröpfschnitten sowie zum Umbruch der Winterzwischenfrucht der Frühljahrsaussaat beprobt. Bei jeder Beprobung wurde die Gesamtaufwuchsfrischmasse sowie der TS-, N_t- und C_t-Gehalt (TS jeweils bei 70°C, C_t und N_t durch Verbrennungsmethode nach Dumas) analysiert. Teilproben der tatsächlich durchgeführten Schnitte wurden zudem händisch in die Fraktionen Klee, Gras und Beikraut sortiert von denen wiederum Frisch- und Trockenmasse erhoben wurde. Der Weißkohl wurde jeweils zum Erntetermin beprobt. Dabei wurden Gesamtaufwuchs- und Ertragsfrischmassen getrennt erfasst sowie TS- und N_t-Gehalt (Verbrennungsmethode nach Dumas) der parzellenweisen Mischproben analysiert.

Tabelle 2.3-13: Beprobungstermine (T1 – T4) der Gründungsphase (V1 2018 – 2020; V2 2019 – 2021)

	Beprobungstermin	V1	V2
T1	Herbstaussaat	14.06.2019	13.05.2020
	Frühljahrsaussaat	24.06.2019	18.06.2020
T2	Herbstaussaat	30.07.2019	01.07.2020
	Frühljahrsaussaat	01.08.2019	19.08.2020
T3	Herbstaussaat	16.09.2019	15.09.2020
	Frühljahrsaussaat	19.09.2019	30.10.2020
T4	Umbruch	16.04.2020	20.05.2021

Kulturführung

Die Herbstaussaat und die Aussaat des Grünroggens (WZF der Frühljahrsaussaat) erfolgten am 08.09.2018 (V1) bzw. 22.08.2019 (V2) nach wendender Bodenbearbeitung (Pflug) parzellenweise mittels Parzellendrillmaschine (Wintersteiger Hege 80). Die Frühljahrsaussaat erfolgte nach Abfuhr der Grünroggenfrischmasse und Bodenbearbeitung mittels Scheibenegge. Um Verschlämmungen aufzubrechen und ggf. Unkräuter zu verschütten wurde die Herbstaussaat im Frühjahr nach Bedarf gestriegelt. Schröpfschnitte erfolgten bei der Herbstaussaat V1 zweimal und bei V2 einmal. Bei den Frühljahrsaussaaten ersetzte ein vergleichsweise früher erster Schnitt vor der Blüte die unkrautregulierende Wirkung der Schröpfschnitte. Die Referenzparzellen (Weidelgras) wurden händisch durch Ausstechen einzelner Kleepflanzen leguminosenfrei gehalten. Zur Vorbereitung des Umbruchs wurde nach der jeweils letzten Beprobung tief gemulcht und mittels Scheibenegge bearbeitet. Im Anschluss erfolgte nach Bedarf eine Grunddüngung mit Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel und Kalk als Patent-Kali, Dolophos 15 und Naturkalk. Im Anschluss erfolgte der eigentliche Umbruch durch die Bear-

beitung mittels Bodenfräse. Die Pflanzung des Weißkohls der Sorte 'Drago F1' (V1) bzw. 'Amazon F1' (V2) erfolgte händisch im Abstand 50 x 50 cm. Die Beikrautregulierung im Kulturverlauf erfolgte mechanisch mittels an einem Geräteträger montierten Hackelementen sowie händisch direkt an der Pflanze. Tierische Schädlinge wurden mit den Wirkstoffen Azadirachtin, Pyrethrine, Rapsöl, *Bacillus thuringiensis* und Kali-Seife reguliert. Die Weißkohljungpflanzen wurden am Tag vor der Pflanzung protektiv gegen Kleine Kohlfliege mit Spinosad im Angießverfahren behandelt.

Die Gesamt-N₂-Fixierungsleistung wurde aus der Differenz der N_t-Menge aller Schnitte der oberirdischen Klee- und Grasreferenzbiomasse zuzüglich der Differenz von Klee- und Referenz-N_{min} zum letzten Schnitt berechnet. Da nicht zu jedem Schnittzeitpunkt N_{min}-Proben genommen wurden, entsprechen die genannten N₂-Fixierungsleistungen zu den Einzelterminen der einfachen Differenz zwischen N_t-Mengen der oberirdischen Klee- und Referenzbiomasse.

Die statistische Auswertung erfolgte in R (Version 4.1.3). Post-hoc Tests wurden bei linearen Modellen mit der Implementierung von Fisher's LSD des R-Pakets ‚agricolae‘ durchgeführt. Gemischte Modelle wurden mit den R-Paketen ‚lme4‘, ‚lmerTest‘ und ‚emmeans‘ erzeugt und ausgewertet.

2.3.3.3 Ergebnisse

Die tatsächlich realisierten Herbst-N_{min}-Niveaus lagen bei V1 (05.10.2018, 28 Tage nach Düngung der Variante „hoch“) mit 112±9,1 kg N_{min} ha⁻¹ „niedrig“ und 141±13,9 kg N_{min} ha⁻¹ „hoch“ auf deutlich höherem Niveau als bei V2 (20.09.2019, 30 Tage nach Düngung der Variante „hoch“) mit 55,8±8,42 kg N_{min} ha⁻¹ „niedrig“ und 88±8,9 kg N_{min} ha⁻¹ „hoch“. Zur Aussaat der Frühljahrsaussaaten lagen die Niveaus bei V1 mit 12±0,8 kg N_{min} ha⁻¹ „niedrig“ und 17±0,8 kg N_{min} ha⁻¹ „hoch“ auf niedrigerem Niveau als bei V2 mit 29±7,6 kg N_{min} ha⁻¹ „niedrig“ 35±4,1 kg N_{min} ha⁻¹ „hoch“. Das Niveau der N₂-Fixierungsleistung lag in V2 über dem von V1 (Abbildung 2.3-14). Signifikante Unterschiede der N₂-Fixierungsleistung waren in beiden Versuchen nur zwischen Varianten der Herbst- und Frühljahrsaussaaten festzustellen. Die eingearbeiteten Biomasse- und -qualitäten zum Umbruchzeitpunkt unterschieden sich ebenfalls hinsichtlich des Etablierungssystems (Tabelle 2.3-14). Bei V2 war zudem eine signifikante Differenzierung des C/N-Verhältnisses hinsichtlich des Schnittmanagements bei der Herbstsaat mit niedrigem Herbst-N_{min}-Niveau zu beobachten. Bei einzelner Betrachtung der Schnitttermine wurden in beiden Jahren Effekte des Herbst-N_{min}-Niveaus auf die N₂-Fixierungsleistung zum zweiten Schnittzeitpunkt sowie Effekte des Schnittmanagements auf die N₂-Fixierungsleistung zum dritten und auf das C/N-Verhältnis zum vierten Schnittzeitpunkt beobachtet (Tabelle 2.3-15).

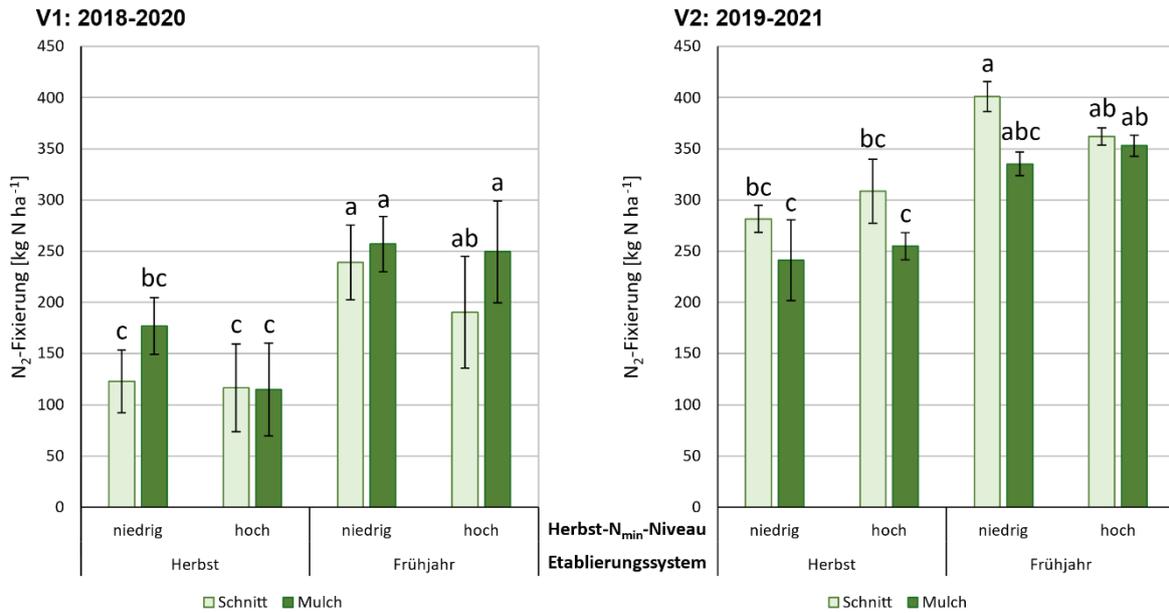


Abbildung 2.3-14: N₂-Fixierungsleistung in Abhängigkeit von Herbst-N_{min}-Niveau „hoch“ = Ausgangsniveau 112 kg N_{min} ha⁻¹ (2018) bzw. 56 kg N_{min} ha⁻¹ (2019) + 100 kg N ha⁻¹ als KAS. Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, α = 0,05).

Tabelle 2.3-14: Mittelwerte (n=3) der N_r-Mengen, C/N-Verhältnisse und N₂-Fixierungsleistungen des jeweils letzten Schnitttermins vor Umbruch.

Etablierungssystem	Herbst-N _{min} -Niveau	Management	V1 16.04.2020			V2 20.05.2021		
			N _r -Menge	C/N-Verhältnis	N ₂ -Fixierung (4. Schnitt)	N _r -Menge	C/N-Verhältnis	N ₂ -Fixierung (4. Schnitt)
			[kg N ha ⁻¹]		[kg N ha ⁻¹]	[kg N ha ⁻¹]		[kg N ha ⁻¹]
Herbst	hoch	Schnitt	30,8 c	22,4 ab	13 b	126,8 cd	17,9 abc	83c
		Mulch	34,4 bc	23,2 a	16ab	117,7 cd	19,3 ab	73c
	niedrig	Schnitt	32,2 bc	23,1 ab	12b	135,4 cd	17,0 bcd	98bc
		Mulch	37,9 abc	22,8 ab	18ab	102,9 d	21,9 a	65c
Frühjahr	hoch	Schnitt	46,4 ab	16,4 c	22ab	232,4 a	12,7 d	198 a
		Mulch	40,5 abc	18,7 bc	16ab	208,1 ab	13,8 cd	174 a
	niedrig	Schnitt	50,7 a	17,8 c	30a	200,4 ab	12,9 d	176 a
		Mulch	41,3 abc	19,2 abc	20ab	169,6 bc	14,4 cd	145 ab

V1: 2018 – 2020; V2: 2019 – 2021; Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, α = 0,05).

Tabelle 2.3-15: p-Werte kleiner 0,1 aus ANOVA der N₂-Fixierungsleistung zu den jeweiligen Schnittzeitpunkten (T1-T4) bzw. des C/N Verhältnisses zum Umbruchtermin T4.

	N ₂ -Fixierung				C/N T4
	T1	T2	T3	T4	
V1					
Herbst-N _{min} -Niveau (HNN)		0,05			
Etablierungssystem (ES)			<0,01**	0,04*	<0,01***
Schnittmanagement (SM)					
HNN*ES					
HNN*SM					
ES*SM				0,08	
HNN*ES*SM					
V2					
Herbst-N _{min} -Niveau (HNN)		0,05			
Etablierungssystem (ES)				<0,01***	<0,01***
Schnittmanagement (SM)			0,07	0,09	0,04*
HNN*ES					
HNN*SM					
ES*SM					
HNN*ES*SM					

., *, **, ***, ns: signifikant bei p≤0.1, 0.05, 0.01, 0.001 bzw. nicht signifikant

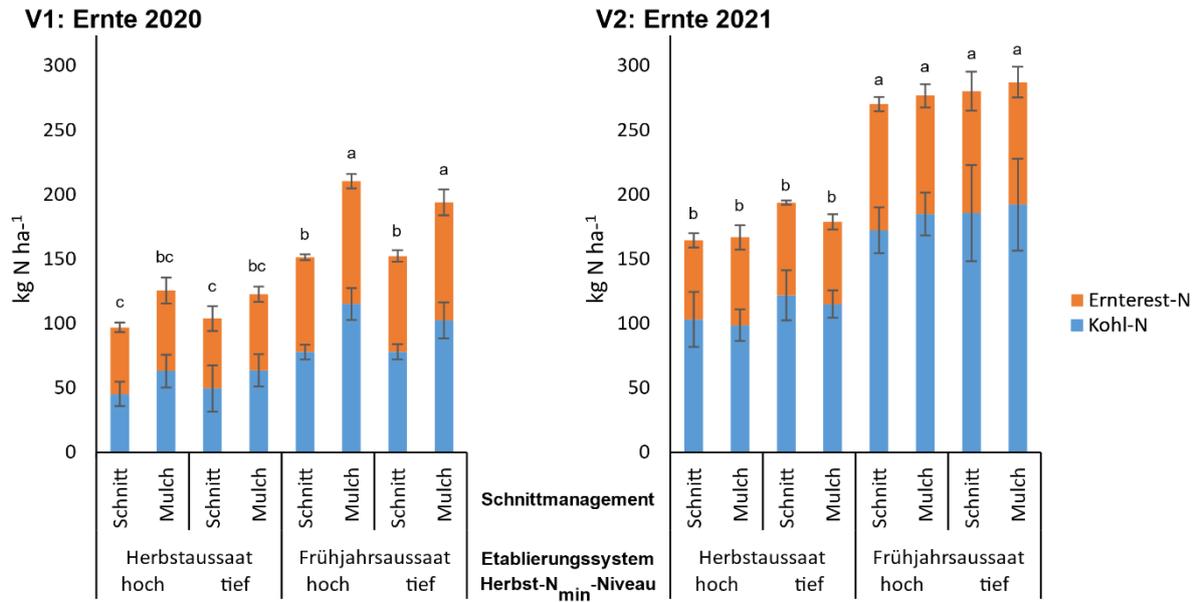
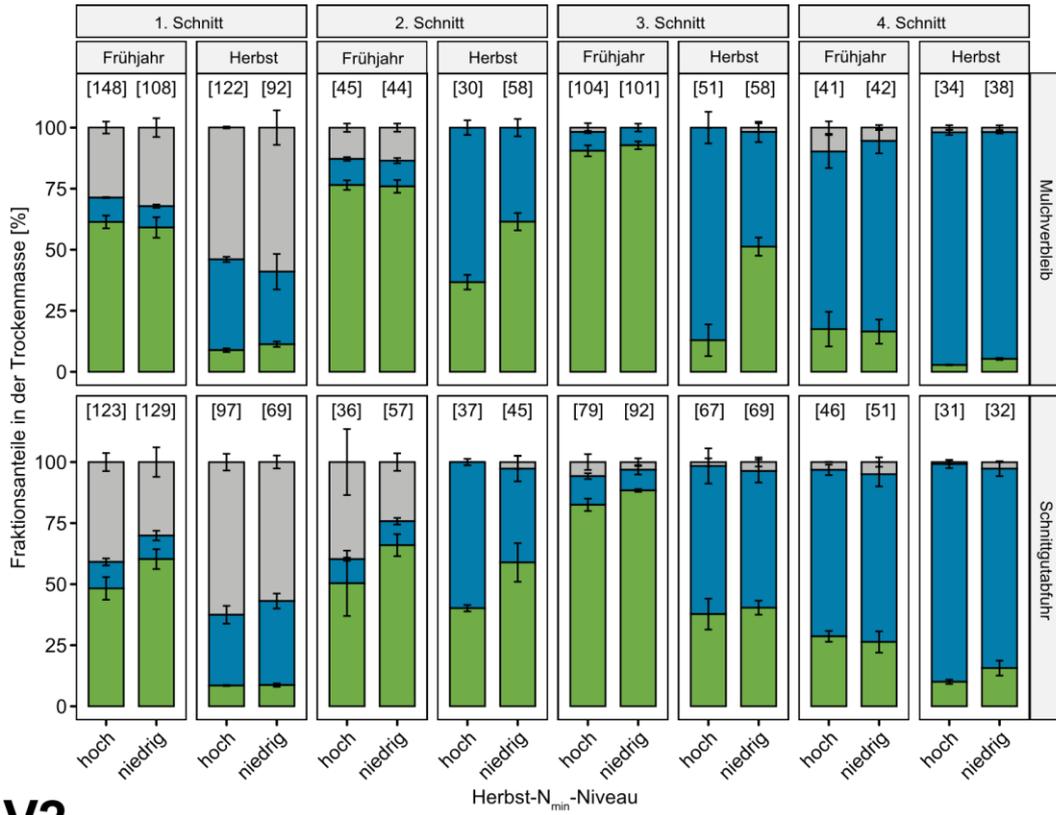


Abbildung 2.3-15: N-Aufnahme des nachgebauten Weißkohls unterschieden in Erntegut („Kohl-N“) und Ernterest. Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).

Das mittlere (Roh-)Ertragsniveau des nachgebauten Weißkohls lag bei V2 ($975 \text{ dt FM ha}^{-1}$) deutlich über dem von V1 ($373 \text{ dt FM ha}^{-1}$). Während bei V1 die N-Aufnahmen sowohl signifikant hinsichtlich des Etablierungssystems als auch hinsichtlich des Schnittmanagements differenzierten, waren bei V2 nur signifikante Unterschiede hinsichtlich des Etablierungssystems zu beobachten (Abbildung 2.3-14). Die Gemengezusammensetzung und insbesondere der Kleeanteil reagierten sensibler auf die Versuchsfaktoren als die Parameter N_2 -Fixierungsleistung und Biomasse- N_t (Abbildung 2.3-15). Die varianzanalytische Auswertung der gepoolten Daten (alle Schnitte, beide Versuche) ergab signifikante Effekte von allen untersuchten fixen Effekten (Schnittmanagement, Etablierungssystem, Herbst- N_{\min} -Niveau) und der Interaktion Etablierungssystem*Schnittmanagement (nicht dargestellt).

V1

[Wert] N im Schnittgut in kg N/ha Fraktion Beikraut Gras Klee



V2

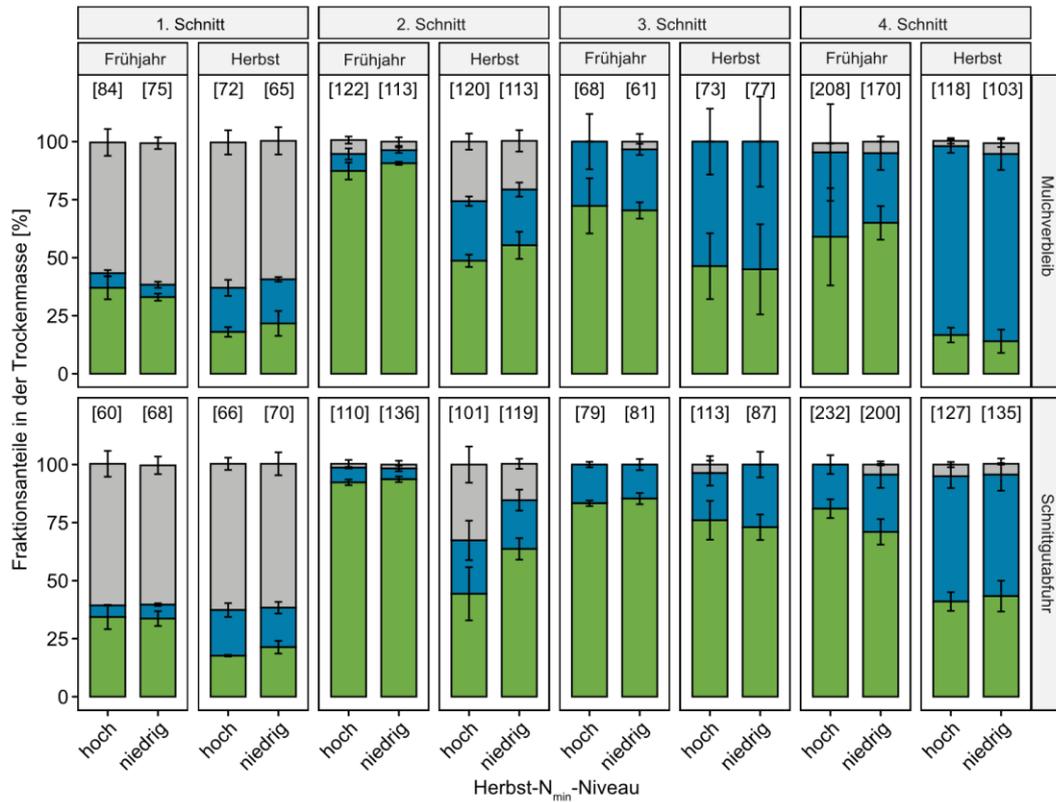


Abbildung 2.3-16: Mittlere Fraktionsanteile (Gras, Beikraut, Klee) und N_t-Mengen in der Schnittguttrockenmasse aller Versuchsvarianten zu allen abfuhrdifferenzierten Schnittterminen.

2.3.3.4 Diskussion

Die realisierten erhöhten Herbst- N_{\min} -Gehalte wirkten sich negativ auf die Kleeanteile der Herbstaussaaten aus. Dieser Effekt beschränkte sich jedoch größtenteils auf den zweiten Schnitttermin und war nicht signifikant ($0.1 > p > 0.5$). Bemerkenswert ist, dass Effekte $p < 0.1$ in beiden Jahren festgestellt werden konnten, obwohl das tatsächlich realisierte niedrige Herbst- N_{\min} -Niveau von Versuch 1 noch $24 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ über dem hohen Herbst- N_{\min} -Niveau von V2 lag. Der erwartete aus den verringerten Kleeanteilen resultierende negative Einfluss auf die N_2 -Fixierungsleistung und das N-Vorfruchtpotenzial war gering und konnte statistisch nicht abgesichert werden.

Das Etablierungssystem aus Frühjahrsblanksaat und der nicht-legumen Winterzwischenfrucht Grünroggen zeigte sich den Herbstaussaaten über alle Varianten und erfassten Parameter hinweg als überlegen. Ein Effekt des Herbst- N_{\min} -Niveaus auf den Kleeanteil der Frühjahrsaussaaten konnten nicht mehr festgestellt werden. Bedingt durch die vorgestellte WZF Grünroggen waren die differenzierten Herbst- N_{\min} -Niveaus zum Aussaatzeitpunkt im Frühjahr wie erwartet und erwünscht bereits auf niedrigem Niveau angeglichen. Obwohl bei den Frühjahrsaussaaten generell keine Schröpfschnitte erfolgten, waren die Kleeanteile bei allen Schnitten gegenüber den Varianten der Herbstaussaat substanzial erhöht. Auch die Parameter N_2 -Fixierungsleistung und N-Aufnahme des nachgebauten Weißkohls reagierten ausnahmslos positiv auf das Etablierungssystem „Frühjahr“. Es kann daher konstatiert werden, dass sich das Etablierungssystem „Frühjahr“ bei hohem Herbst- N_{\min} -Niveau im Vergleich zur Herbstaussaat zwar überproportional positiv auswirkte, dies jedoch aufgrund der generell geringen Effekte der Herbst- N_{\min} -Niveaus vernachlässigbar erscheint. Da das N_{\min} -Niveau zur Aussaat im Frühjahr auch gegenüber den jeweils niedrigen Herbst- N_{\min} -Niveaus nochmals deutlich geringer ausfiel, stellt sich die Frage welcher Anteil des positiven Effekts der Frühjahrsaussaaten durch das, nur bei den Frühjahrsaussaaten, erzielte N_{\min} -Niveau $< 30 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ erklärt wird und welcher Anteil auf andere Effekte wie Wasserverfügbarkeit, Unkrautdruck oder andere Umweltbedingungen zurückgeht. Da eine Variante mit zu beiden Aussaatzeitpunkten vergleichbarem N_{\min} -Niveau fehlt, lässt sich diese Frage mit den vorliegenden Daten nicht abschließend beantworten.

Die Abfuhr des Schnittguts führte zu stark unterschiedlichen Ergebnissen zwischen den Versuchen bzw. Versuchsjahren. In Versuch 2 lagen die akkumulierten N_2 -Fixierungsleistungen der Varianten mit Schnittgutabfuhr gegenüber den gemulchten Varianten zwar auf ausnahmslos um bis zu $59 \text{ kg } N_{\text{fix}} \text{ ha}^{-1}$ höherem Niveau, jedoch ohne sich signifikant zu unterscheiden. In Versuch 1 lag die akkumulierte N_2 -Fixierungsleistung der gemulchten Variante sogar über einigen Varianten mit Schnittgutabfuhr. Bei varianzanalytischer Auswertung der einzelnen Schnittzeitpunkte (Tabelle 2.1-1) lagen die Mittelwertunterschiede von Versuch 1 im Bereich des Zufalls ($p > 0,1$), während bei Versuch 2 bei den Schnitten 3 und 4 der Effekt Schnittmanagement einen p-Wert $< 0,1$ aufwies. Anzumerken ist, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Überschätzung der N_2 -Fixierungsleistung mit zunehmender Schnittanzahl ansteigen kann, da gegebenenfalls bereits Stickstoff des Mulchmaterials mineralisiert, erneut zyklisiert und somit doppelt erfasst wird. Mit Bezug auf Hypothese (3) kann festgestellt werden, dass die Schnitt-

gutabfuhr in den untersuchten Szenarien nicht zu einer deutlichen Erhöhung der N₂-Fixierungsleistung führte. Mutmaßlich abhängig von der Witterung zum Schnittzeitpunkt, der Schnitthäufigkeit und der dadurch bedingten Dicke der Mulchschicht kann dieser Effekt, wie vielfach andere Studien zeigten, jedoch durchaus bedeutsam sein.

Die Ergebnisse erweitern und präzisieren den bestehenden Wissensstand zu Gemüse-optimierten Kleegrassystemen. Die aus den Ergebnissen konstatierte Überlegenheit der Frühljahrsaussaat steht hierbei zum Teil in Kontrast zu gängigen Empfehlungen und Untersuchungen aus dem Futterbaubereich. Da sich die Zielsetzungen hinsichtlich des optimalen Schnittzeitpunkts und der Schnittgutqualität zwischen klassischem Ackerfutterbau und Cut&Carry-Nutzung im Gemüsebau jedoch substantiell unterscheiden, erscheinen die bisher gängigen Empfehlungen nur eingeschränkt auf Cut&Carry-Nutzung im Gemüsebau übertragbar.

2.3.4 Literatur

- Alonso-Ayuso, M., Gabriel, J.L., Quemada, M., 2014. The Kill Date as a Management Tool for Cover Cropping Success. *PLoS ONE* 9, e109587. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109587>
- Askegaard, M., Olesen, J.E., Rasmussen, I.A., Kristensen, K., 2011. Nitrate leaching from organic arable crop rotations is mostly determined by autumn field management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 142, 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.04.014>
- Baddeley, J.A., Pappa, V.A., Pristeri, A., Bergkvist, G., Monti, M., Reckling, M., Schläfke, N., Watson, C.A. 2017. In: *Legume-based Green Manure Crops*. Murphy-Bokern, D., Stoddard, F.L., Watson, C.A., editors. *Legumes in Cropping Systems*. Wallingford: 125–138.
- Bento, T. da S., Carvalho, M.A.C. de, Yamashita, O.M., Dallacort, R., Silva, I.V. da, Felito, R.A., Araújo, D.V. de, 2020. Application of several green manures to produce organic cabbage (*Brassica oleracea* var. *Capitata*) and their influence on soil biological properties. *Aust J Crop Sci* 1372–1378. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.09.p2167>
- Bio Austria, 2021. *Bio Austria Produktionsrichtlinien*. URL (accessed 13.12.2022).
- BLE, 2020. *Ökobarometer 2019 - Umfrage zum Konsum von Biolebensmitteln*. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN).
- Brainard, D.C., Bellinder, R.R., 2004. Weed Suppression in a Broccoli-Winter Rye Intercropping System 11.
- Brainard, D.C., Bellinder, R.R., Miller, A.J., 2004. Cultivation and Interseeding for Weed Control in Transplanted Cabbage. *Weed technol.* 18, 704–710. <https://doi.org/10.1614/WT-03-157R>
- Brandsæter, L.O., Netland, J., Meadow, R., 1998. Yields, Weeds, Pests and Soil Nitrogen in a White Cabbage-Living Mulch System. *Biological Agriculture & Horticulture* 16, 291–309. <https://doi.org/10.1080/01448765.1998.10823201>
- Campiglia, E., Mancinelli, R., Di Felice, V., Radicetti, E., 2014a. Long-term residual effects of the management of cover crop biomass on soil nitrogen and yield of endive (*Cichorium endivia* L.) and savoy cabbage (*Brassica oleracea* var. *sabauda*). *Soil and Tillage Research* 139, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.003>
- Campiglia, E., Radicetti, E., Brunetti, P., Mancinelli, R., 2014b. Do cover crop species and residue management play a leading role in pepper productivity? *Scientia Horticulturae* 166, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.018>
- Canali, S., Campanelli, G., Ciaccia, C., Diacono, M., Leteo, F., Fiore, A., Montemurro, F., 2015. Living mulch strategy for organic cauliflower (*Brassica oleracea* L.) production in central and southern Italy. *Ital J Agronomy* 10, 90. <https://doi.org/10.4081/ija.2015.644>
- Canali, S., Campanelli, G., Ciaccia, C., Leteo, F., Testani, E., Montemurro, F., 2013. Conservation tillage strategy based on the roller crimper technology for weed control in Mediterranean vegetable organic cropping systems. *European Journal of Agronomy* 50, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.001>

- Canali, S., Diacono, M., Montemurro, F., Delate, K., 2017. Enhancing multifunctional benefits of living mulch in organic vegetable cropping systems. *Renew. Agric. Food Syst.* 32, 197–199. <https://doi.org/10.1017/S1742170517000126>
- Cooper, J., Reed, E.Y., Hörtenhuber, S., Lindenthal, T., Løes, A.-K., Mäder, P., Magid, J., Oberson, A., Kolbe, H., Möller, K., 2018. Phosphorus availability on many organically managed farms in Europe. *Nutr Cycl Agroecosyst* 110, 227–239. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9894-2>
- Cordeiro, A.A.S., Rodrigues, M.B., Gonçalves Júnior, M., Espíndola, J.A.A., Araújo, E. da S., Guerra, J.G.M., 2018. Organic cabbage growth using green manure in pre-cultivation and organic top dressing fertilization. *Hortic. Bras.* 36, 515–520. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620180415>
- Demeter e.V., 2021. Demeter Richtlinien 2021 Erzeugung und Verarbeitung Richtlinien für die Zertifizierung »Demeter« und »Biodynamisch«
- European Commission, 2019. Organic farming in the EU- A fast growing sector (No. 13), EU Agricultural Markets Briefs. European Union.
- European Commission, 2007. Council Regulation (EC) No 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation (EEC) No 2092/91.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Bailey, B.A., 2005. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36, 2733–2757. <https://doi.org/10.1080/00103620500303939>
- Feller, C., Fink, M., Laber, H., Maync, A., Paschold, P., Scharpf, H.C., Schlaghecken, J., Strohmeyer, K., Weier, U., Ziegler, J., 2011. Düngung im Freilandgemüsebau, in: Fink, M. (Ed.), Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse-und Zierpflanzenbau (IGZ), Großbeeren
- Fracchiolla, M., Renna, M., D’Imperio, M., Lasorella, C., Santamaria, P., Cazzato, E., 2020. Living Mulch and Organic Fertilization to Improve Weed Management, Yield and Quality of Broccoli Raab in Organic Farming. *Plants* 9, 177. <https://doi.org/10.3390/plants9020177>
- Frasier, I., Noellemeyer, E., Amiotti, N., Quiroga, A., 2017. Vetch-rye biculture is a sustainable alternative for enhanced nitrogen availability and low leaching losses in a no-till cover crop system. *Field Crops Research* 214, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.016>
- Gibson, K.D., Mcmillan, J., Hallett, S.G., Jordan, T., Weller, S.C., 2011. Effect of a Living Mulch on Weed Seed Banks in Tomato. *Weed technol.* 25, 245–251. <https://doi.org/10.1614/WT-D-10-00101.1>
- Haas, G., Brand, H., de la Vega, M.P., 2007. Nitrogen from Hairy Vetch (*Vicia villosa* Roth) as Winter Green Manure for White Cabbage in Organic Horticulture. *Biological Agriculture & Horticulture* 25, 37–53. <https://doi.org/10.1080/01448765.2007.10823207>
- Hartwig, N.L., Ammon, H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Science* 50, 688–699. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0688:AIACCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0688:AIACCA]2.0.CO;2)
- Hefner, M., Canali, S., Willekens, K., Lootens, P., Deltour, P., Beeckman, A., Arlotti, D., Tamm, K., Bender, I., Labouriau, R., Kristensen, H.L., 2020. Termination method and time of agro-ecological service crops influence soil mineral nitrogen, cabbage yield and root growth across five locations in Northern and Western Europe. *European Journal of Agronomy* 120, 126144. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126144>
- Hatch, D.J., Goodlass, G., Joynes, A., and Shepherd, M.A. 2007. The effect of cutting, mulching and applications of farmyard manure on nitrogen fixation in a red clover/grass sward. *Bioresource Technol* 98, 3243–3248.
- Hooks, C., Pandey, R., Johnson, M., 2007. Using Clovers as Living Mulches to Boost Yields, Suppress Pests, and Augment Spiders in a Broccoli Agroecosystem.
- Illicki, R.D., Enache, A.J., 1992. Subterranean clover living mulch: an alternative method of weed control. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 40, 249–264. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90096-T](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90096-T)
- Infante, M.L., Morse, R.D., 1996. Integration of No Tillage and Overseeded Legume Living Mulches for Transplanted Broccoli Production. *HortSci* 31, 376–380. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.31.3.376>
- Kainz, M., Siebrecht, N., Reents, H., 2009. Wirkungen des Ökologischen Landbaus auf Bodenerosion, in: Werte - Wege - Wirkungen: Biolandbau Im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel Beiträge Zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Dr. Köster, Berlin, ETH Zürich.
- Katroschan, K.-U., and Stützel, H. 2017. Narrow-leaved lupine as an N source alternative to grass-clover swards in organic vegetable rotations. *Biol Agric Hort* 33, 1–18.

- Larkin, R.P., 2020. Effects of cover crops, rotation, and biological control products on soil properties and productivity in organic vegetable production in the Northeastern US. *Org. Agr.* 10, 171–186. <https://doi.org/10.1007/s13165-019-00257-3>
- Løes, A.-K., Bünemann, E.K., Cooper, J., Hörtenhuber, S., Magid, J., Oberson, A., Möller, K., 2017. Nutrient supply to organic agriculture as governed by EU regulations and standards in six European countries. *Org. Agr.* 7, 395–418. <https://doi.org/10.1007/s13165-016-0165-3>
- Möller, K., 2018. Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutr Cycl Agroecosyst* 112, 147–164. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9946-2>
- Montemurro, F., Diacono, M., Ciaccia, C., Campanelli, G., Tittarelli, F., Leteo, F., Canali, S., 2017. Effectiveness of living mulch strategies for winter organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) production in Central and Southern Italy. *Renew. Agric. Food Syst.* 32, 263–272. <https://doi.org/10.1017/S1742170516000107>
- Nyfelner, D., Huguenin-Elie, O., Suter, M., Frossard, E., Lüscher, A., 2011. Grass–legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.022>
- Oelofse, M., Jensen, L.S., Magid, J., 2013. The implications of phasing out conventional nutrient supply in organic agriculture: Denmark as a case. *Org. Agr.* 3, 41–55. <https://doi.org/10.1007/s13165-013-0045-z>
- Pinto, R., Brito, L.M., Coutinho, J., 2017. Organic production of horticultural crops with green manure, composted farmyard manure and organic fertiliser. *Biological Agriculture & Horticulture* 33, 269–284. <https://doi.org/10.1080/01448765.2017.1347521>
- Radicetti, E., Massantini, R., Campiglia, E., Mancinelli, R., Ferri, S., Moschetti, R., 2016. Yield and quality of eggplant (*Solanum melongena* L.) as affected by cover crop species and residue management. *Scientia Horticulturae* 204, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.005>
- Reimer M., Hartmann T.E., Oelofse, M., Magid, J., Bünemann, E.K., Möller, K. 2020. Reliance on biological nitrogen fixation depletes soil phosphorus and potassium reserves. *Fertilizer Research*. 118:273–291. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10101-w>
- Rosa, R., Słonecka, D., Hajko, L., Andrejiová, A., 2020. Lagged Effects of Winter Catch Crops Followed by Sweet Corn on Onion. *J. Ecol. Eng.* 21, 137–146. <https://doi.org/10.12911/22998993/123246>
- Stinner, W., Möller, K., and Leithold, G. (2008). Effects of biogas digestion of clover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. *Eur J Agron* 29, 125–134.
- Tempesta, M., Gianquinto, G., Hauser, M., Tagliavini, M., 2019. Optimization of nitrogen nutrition of cauliflower intercropped with clover and in rotation with lettuce. *Scientia Horticulturae* 246, 734–740. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.020>
- Thériault, F., Stewart, K.A., Seguin, P., 2009. Use of perennial legumes living mulches and green manures for the fertilization of organic broccoli. *International Journal of Vegetable Science* 15, 142–157. <https://doi.org/10.1080/19315260802598896>
- Thorup-Kristensen, K., 2006. Root growth and nitrogen uptake of carrot, early cabbage, onion and lettuce following a range of green manures. *Soil Use & Management* 22, 29–38. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2005.00012.x>
- Thorup-Kristensen, K., Dresbøll, D.B., 2010. Incorporation time of nitrogen catch crops influences the N effect for the succeeding crop: N effect of catch crop incorporation time. *Soil Use and Management* 26, 27–35. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00255.x>
- Vargas, T. de O., Diniz, E.R., Pacheco, A.L.V., Santos, R.H.S., Urquiaga, S., 2017. Green manure-15N absorbed by broccoli and zucchini in sequential cropping. *Scientia Horticulturae* 214, 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.028>
- Vikuk, V., Rascher, B. 2022. Winterwicke führt zu höheren Erträgen im nachfolgenden Weißkohl. *Versuche im Deutschen Gartenbau 2021, Ökologischer Gemüsebau*. <https://www.hortigate.de/publikation/90453/Winterzwischenfrüchte-2019-bis-2021> (accessed 19.12.2022).
- Watson, C.A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L.R., Rayns, F.W., 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239–247. <https://doi.org/10.1079/SUM2002131>
- Willer, E.H., Lernoud, J., 2019. *The World of Organic Agriculture Statistics and Emerging Trends 2019* 351.

- Willumsen, J., Thorup-Kristensen, K., 2001. Effects of Green Manure Crops on Soil Mineral Nitrogen Available for Organic Production of Onion and White Cabbage in Two Contrasting Years. *Biological Agriculture & Horticulture* 18, 365–384. <https://doi.org/10.1080/01448765.2001.9754898>
- Xie, Y., Kristensen, H.L., 2016. Overwintering grass-clover as intercrop and moderately reduced nitrogen fertilization maintain yield and reduce the risk of nitrate leaching in an organic cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) agroecosystem. *Scientia Horticulturae* 206, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.034>

2.4 Alternative N-Düngemittel: Nährstoffverfügbarkeit, -input im Boden und Einfluss des Ausbringungsverfahrens

K. Möller (LTZ), S. Zikeli, C. Weiler (UHOH), F. Besand, K.-U. Katroschan (LFA), A. Heckenberger und A. Butz (LTZ), K. Postweiler, S. Weinheimer, N. Lenz (DLR), B. Rascher, A. Schmitt (LWG), K. Bachteler (Taifun)

2.4.1 Einleitung

In ökologischen Anbausystemen spielen Leguminosen eine wichtige Rolle zur Sicherung der Bodenfruchtbarkeit, indem sie mit Hilfe von symbiotischen Bakterien atmosphärischen Stickstoff (N) fixieren. Übliche Düngestrategien in ökologischen Anbau stoßen jedoch bei stark N-bedürftigen Sonderkulturen an ihre Grenzen, z. B. im ökologischen Gartenbau, der in starken Maße von hohen externen Nährstoffzufuhren abhängig ist, um den Nährstoffbedarf der Pflanzen zu decken (Watson et al., 2002; Möller et al., 2018). Beispielsweise benötigt Kohl (*Brassica oleraceae* var. capitata L.) als Kulturpflanze mit hohem Stickstoff (N)-Bedarf etwa 240-320 kg N ha⁻¹ (Sanderson und Ivany, 1999), um unter mitteleuropäischen Bedingungen wirtschaftlich tragfähige Erträge zu erzielen. Diese N-Menge kann nicht allein durch eine Leguminosen-Vorfrucht gedeckt werden und erfordert daher zusätzliche Düngergaben. Derzeit steht den Bio-Gemüsegeärtnern eine breite Palette von Düngemitteln zur Verfügung. Dazu gehören Wirtschaftsdünger mit einer relativ geringen Nährstoffkonzentration, die üblicherweise als Grunddüngung verwendet werden (z. B. Komposte, Festmiste). Da aber Biobetriebe mit intensivem Gartenbau in den meisten Fällen ohne Tierhaltung bewirtschaftet werden, steht kein eigener Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung zur Verfügung, so dass der Grundgedanke des ökologischen Landbaus für den innerbetrieblichen Nährstoffkreislauf außer Acht gelassen und die Düngung erschwert wird. Folglich sind solche Betriebe auf externe Handelsdünger angewiesen (z. B. Federmehl, Huf- und Hornmehl, Vinasse, Fleisch- und Knochenmehl usw.). Diese weisen relativ hohe Nährstoffkonzentrationen auf und ermöglichen es, die Stickstoffversorgung an den Bedarf der Pflanzen anzupassen (Möller, 2018), aber viele von ihnen sind aufgrund ihrer Herkunft aus der konventionellen Landwirtschaft umstritten und werden ggf. als „contentious (umstritten)“ eingestuft (Oelofse et al., 2013).

Das optimale Timing der N-Freisetzung aus dem Dünger und des N-Bedarfs der Pflanzen ist für ein optimales Pflanzenwachstum entscheidend, um eine hohe N-Nutzungseffizienz zu erreichen (Möller et al., 2008). Diese Synchronisierung der Nährstofffreisetzung mit dem Nährstoffbedarf der Pflanzen ist jedoch eine große Herausforderung bei der Verwendung von organischen Düngemitteln aufgrund der langsamen Nährstofffreisetzung und der daraus resultierenden unzureichenden Vorhersagbarkeit der Mineralisierungsprozesse im Boden (Pang und Letey, 2000). Folglich zeigen Düngestrategien auf der Grundlage von N-Ergänzungsdüngern eine viel höhere N-Nutzungseffizienz als Düngestrategien auf der Grundlage von Grunddüngern wie Festmist oder Kompost (Zikeli et al., 2017). Zusätzlich zu diesen Herausforderungen stellen Nährstoffungleichgewichte eine große Herausforderung für die langfristige Nachhaltigkeit von intensiven ökologischen Gartenbausystemen. Die Hauptgründe für diese Ungleichgewichte ist die Stöchiometrie der Grund- und Ergänzungsdünger, die nicht mit den Nährstoffabfuhr über die Ernteprodukte übereinstimmen (Zikeli et al., 2017; Möller, 2018).

Eine weitere Herausforderung im ökologischen Gemüsebau ist das im Vergleich zu Ackerbausystemen höhere Risiko von Nitratverlusten durch Auswaschung aufgrund der höheren N-Düngergaben und der begrenzten Möglichkeiten eines Zwischenfruchtanbaus nach einer Gemüseernte, die häufig spät in der Vegetationsperiode stattfindet (Dahan et al., 2014; Rakotovololona et al., 2019). Organische Düngemittel mit einer geringen direkten N-Düngewirkung im Jahr der Ausbringung führen zu einem höheren Risiko von N-Verlusten aufgrund einer nicht gut synchronisierten, unkontrollierten Freisetzung von N und zeigen daher eine geringere langfristige N-Nutzungseffizienz (Möller, 2020). Daher ist das N-Freisetzungsmuster von organischen Düngemitteln im Jahr der Anwendung ein wichtiges Merkmal für die Beurteilung ihrer jeweiligen Eignung für den ökologischen Gemüseanbau.

Düngemittel können auch unerwünschte Elemente und Verbindungen wie potenziell toxische Elemente (PTEs), persistente organische Schadstoffe, Kunststoffpartikel und viele andere Verbindungen enthalten (Möller et al., 2018). Daher sind die PTE-Konzentration und vor allem die mit ihrer Verwendung verbundenen Ströme zusätzliche Merkmale, die bei einer Bewertung externer Düngemittel berücksichtigt werden sollten.

Die derzeitigen Vorstellungen über Bodenfruchtbarkeitsgrundsätze im ökologischen Landbau, die auf der Ausbringung von Festmistdüngern oder Komposten beruhen, zeigen konzeptionelle Schwächen im Düngekonzept, nämlich die bevorzugte Anwendung von Stickstoffdüngern mit langsamer Freisetzung, die oft reich an Phosphor sind. Um die umstrittenen Inputs auslaufen zu lassen und gleichzeitig eine ausreichende Nährstoffversorgung zu erreichen, sind alternative Düngemittel und Düngestrategien erforderlich. Die zentrale Herausforderung besteht darin, Anbausysteme mit einem höheren Anteil an N-Einträgen über die biologische N₂-Fixierung zu entwickeln und Düngemittel mit einer Nährstoffstöchiometrie einzusetzen, die besser mit der Stöchiometrie der abgefahrenen Nährstoffe übereinstimmt.

Es gibt Wege, um einige der derzeitigen Schwächen des Systems zu überwinden: Klee gras ist ein wesentlicher Bestandteil ökologischer Fruchtfolgen selbst in Betrieben ohne Tiere, weil es den Unkrautdruck verringert und gleichzeitig die Bodenfruchtbarkeit durch biologische N₂-Fixierung (BNF) erhöht und Bodenstruktur verbessert (Stinner et al., 2008). Jeder Ansatz zur Ernte, Lagerung und Wiederverwertung der gewonnenen Biomasse kann einen zusätzlichen "mobilen" Dünger auf Klee grasbasis (Silage, Pellets, Gärreste usw.) liefern. Die Fähigkeit von Klee gras N₂ symbiontisch zu binden hängt der Bewirtschaftung ab, die Ernte der Biomasse anstelle des Mulchens führt zu einer erheblichen Steigerung der durch BNF gebundenen N-Mengen (Stinner et al., 2008; Oudshoorn, et al., 2019). Daher kann dieser Ansatz zur Erhöhung der über BNF fixierten N-Mengen eine praktikable Lösung zur Verringerung externer Nährstoffflüsse sein, da er den Gesamtstickstoffeintrag in das landwirtschaftliche bzw. gärtnerische System erhöht. Darüber hinaus sind solche Dünger auf Klee grasbasis "mobil" und können innerhalb einer Fruchtfolge immer und überall dort ausgebracht werden, wo sie am stärksten benötigt werden, was einen zusätzlichen Vorteil gegenüber dem Mulchen der Klee grasbiomasse an Ort und Stelle darstellt. Die betriebseigene Herstellung von Düngemittel auf Klee grasbasis erhöht die N-Einträge, ohne dass Phosphor zugeführt wird, und tragen so zu einer ausgewogeneren Nährstoffbilanz im Hinblick auf die Gesamtstöchiometrie der N-P-Einträge in das landwirtschaftliche System bei. Derzeit begrenzen die unerwünschten P-Einträge

die insgesamt möglichen N-Einträge über Grunddünger in intensiven ökologischen Gemüseanbausystemen (Möller, 2018).

Eine anaerobe Vergärung von Gülle in einer Biogasanlage anstelle von Festmist verringert mögliche Nährstoffverluste und erhöht den Wert als N-Dünger (Möller und Müller, 2012; Möller, 2018). Die Zusammensetzung der Biogasgärreste wird durch die Art der bei der Biogaserzeugung verwendeten Ausgangsstoffe beeinflusst (Häfner et al., in Vorbereitung). Biogasgärreste haben einen hohen Anteil an mineralischem N und weisen im Verhältnis zur Nährstoffkonzentration niedrige Konzentrationen an potenziell toxischen Elementen auf (Weissengruber et al., 2018), was sie zu einer praktikablen Alternative zu herkömmlichen Düngemitteln macht (Arthurson, 2009). Eine erhöhte regionale Energieproduktion und ein verbesserter Nährstoffkreislauf sind mit der Biogasproduktion aus der anaeroben Vergärung von organischen Haushaltsabfällen aus städtischen Gebieten und anderen Quellen möglich (Möller et al., 2018). Durch die Verwendung von Biogasrückständen als Düngemittel werden die Nährstoffe auf sehr effiziente Weise auf das Feld zurückgeführt.

Andere potenzielle Nährstoffquellen sind Rückstände aus der Lebensmittelindustrie. Tofu-Molke beispielsweise ist ein Rückstand aus der Tofu-Produktion, der einen hohen N- und K-Gehalt sowie einen niedrigen P-Gehalt aufweist und daher sehr gut auf den Bedarf des ökologischen Gemüseanbaus abgestimmt ist.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Düngeeigenschaften von Klee grasbasierten Düngemitteln (z. B. Kleepellets, Klee grassilage oder Gärreste) sowie von externen Düngern (Gärreste aus Haushaltsabfällen, Tofu-Molke) im Feldversuch anzuwenden und zu bewerten, um ihre Eignung für ihre Anwendung im ökologischen Gartenbau zu beurteilen. Die folgenden Hypothesen werden in dieser Studie getestet:

1. Alternative Düngemittel erzielen ähnliche Erträge im Vergleich zu den üblicherweise im ökologischen Landbau verwendeten Düngemitteln wie Hornspäne oder kompostierter Hofdünger.
2. Düngemittel mit niedrigem C/N-Verhältnis führen zu einer höheren N-Freisetzung als Düngemittel mit hohem C/N-Verhältnis, und gleichzeitig zu einer geringeren N-Nachwirkung.
3. Biogasgärreste weisen eine hohe N-Düngewirkung auf, vergleichbar der von Keratinen.
4. Dünger auf Klee grasbasis führen zu einem ausgeglicheneren Nährstoffhaushalt (insbesondere für P) als kompostierter Hofdünger.
5. Der Nitrat-N-Gehalt des Bodens im Herbst ist bei Düngemitteln mit hohem NH_4^+ -N-Gehalt geringer.
6. Die Konzentrationen an potenziell toxischen Elementen (Pb, Hg, Zn, Cd, As) sind in Düngemitteln aus der getrennten Bioabfallsammlung oder tierischen Ursprungs höher als in alternativen Düngemitteln auf Klee grasbasis.

2.4.2 Ergebnisse Versuche alternative N-Düngemittel in Kleinhohenheim (UHOH) und Grötzingen (LTZ)

2.4.2.1 Material und Methoden

2.4.2.1.1 Standorte und Behandlungen

Die Feldversuche wurden in Südwestdeutschland an der Öko-Versuchsstation Kleinhohenheim der Universität Hohenheim (UHOH) in den Jahren 2019-2021 und am Öko-Versuchsfeld Grötzingen (GR) des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg in den Jahren 2019 und 2020 durchgeführt. Die Höhenlagen betragen 435 m über NN (UHOH) und 120 m über NN (GR). Die langjährigen mittleren Jahresniederschläge liegen bei ca. 740 mm (UHOH) und 750 mm (GR), die langjährigen Jahresmitteltemperaturen bei 9,7 °C (UHOH) und 10,1 °C (GR). Die Bodentypen sind Parabraunerden aus Löß.

Die Versuche wurden jeweils als einfaktoriell randomisiertes vollständiges Blockdesign mit vier Wiederholungen angelegt. Als Kulturpflanze wurde eine frühe Weißkohlsorte (*Brassica oleracea* convar. capitata var. alba L.) der Sorte Amazon F1 (Bejo) verwendet. Die Parzellengröße betrug in UHOH 4,5 x 8,5 m mit sechs Reihen pro Parzelle im Jahr 2019 und 3 x 8,5 m mit vier Reihen pro Parzelle im Jahr 2020. In GR waren es Parzellengrößen von 3 Breite und 10 m Länge mit jeweils vier Reihen.

Auf der Grundlage eines geschätzten Kohlertrags von 50 t ha⁻¹ wurde eine Ziel-N-Düngung unter Einbeziehung der Nitratgehalte für beide Standorte in Höhe von 220 kg N ha⁻¹ vorgesehen. Dabei wurde der Stickstoff aus organischen Düngemitteln voll angerechnet. Am Standort Kleinhohenheim betrug die N-Düngung nach Abzug der Nitratgehalte entsprechend 159 kg N ha⁻¹ im Jahr 2019 und 180 kg N ha⁻¹ im Jahr 2020. In Grötzingen betrug die N-Düngung im Jahr 2019 insgesamt 249 kg N ha⁻¹ und im Jahr 2020 194 kg N ha⁻¹. Folgende Varianten wurden auf beiden Standorten etabliert:

- 1) Ungedüngte Kontrolle
- 2) Horndünger als Positivkontrolle
- 3) Kleegrassilage
- 4) Kleepellets
- 5) Klee grasbasierte Gärreste
- 6) Tofu-Molke Sojabohnen

Am Standort Grötzingen wurden die Gärreste und die Kleepellets in zwei Ausbringungsvarianten ausgebracht: breitverteilt oder als Unterfußdüngung. Auch die Klee grassilage wurde entweder eingearbeitet oder als Mulchauflage verwendet. Am Standort Hohenheim wurden zusätzlich zu den Varianten 1 bis 6 noch eine Variante Rinderfestmist kompostiert und Gärreste aus Bioabfällen etabliert. Der kompostierte Festmist wurde im Herbst ausgebracht, alle anderen Düngemittel unmittelbar vor der Pflanzung (Klee grassilage, Kleepellets, Horndünger und Biogasgärreste) oder kurz nach der Pflanzung (Tofu-Molke) der Kohlpflanzen. Da der Gesamt-N-Gehalt der Tofu-Molke im Jahr 2020 mit durchschnittlich 0,92 g N kg⁻¹ FM unter dem Schwellenwert von 1,50 g N kg⁻¹ FM lag, wurde die Düngung auf zwei Gaben aufgeteilt (zweite Gabe

eine Woche nach der ersten Gabe). Bei der Festmistanwendung im Herbst wurde eine feste Menge von 200 kg N ha⁻¹ ausgebracht, leicht abweichend von den Mengen der anderen Düngemittel.

Die Bewässerung erfolgte unmittelbar nach der Pflanzung, gefolgt von einem Bewässerungsmanagement nach dem Geisenheimer Bewässerungsmodell. Die Unkrautbekämpfung erfolgte mit Hacke und Fingerhacke, ggf. ergänzt durch Handmaßnahmen.

2.4.2.1.2 Bonituren und Feldmessungen

Die Entwicklung der Pflanzen und das Schädlingsauftreten wurden während der Vegetationsperiode regelmäßig erhoben. Wöchentliche Feldbeurteilungen wurden zur phänologischen Entwicklung durchgeführt. Zur Überprüfung des Chlorophyllgehaltes in den Blättern als ein Indikator für den N-Versorgungszustand der Bestände wurden zweimal SPAD-Messungen (Soil Plant Analysis Development) (MINOLTA) durchgeführt, und zwar zu Beginn der Kopfbildung (BBCH 41) und kurz vor der Ernte (BBCH 49). Bei der Ernte wurde die Gesamtzahl der Pflanzen der beiden mittleren Reihen pro Parzelle gezählt und der Gesamtertrag der oberirdischen Biomasse, mit Masse und Anzahl der Köpfe (marktfähig (≥ 1 kg) und nicht marktfähig (< 1 kg) sowie die auf dem Feld verbleibenden Rückstände bestimmt. Fünf zufällige Pflanzen pro Parzelle wurden für die Bestimmung der Trockenmasse und für die Nährstoffanalyse ausgewählt. Biomasseproben wurden in kleine Stücke geschnitten, um eine schnelle und gleichmäßige Trocknung zu gewährleisten. Zur Bestimmung der Trockenmasse (TM) wurden die Proben bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Für die Analyse der C- und Makronährstoffgehalte wurden die Proben bei 40 °C (UHOH) bzw. 60 °C (GR) getrocknet. Die getrockneten Proben wurden zur weiteren Analyse in einer Edelmühlmühle (< 1 mm) ("Retsch Mühle SM 200") gemahlen.

Bodenproben für die N_{min}-Bestimmung (NO₃⁻-N und NH₄⁺-N) wurden im Herbst vor der Ausbringung des Festmistes sowie drei bis vier Wochen vor der Frühjahrsdüngung in drei Tiefen (0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm) sowie während der Anbauperiode im Stadium der Kopfbildung und kurz nach der Ernte (in zwei Tiefen 0-30 cm und 30-60 cm) entnommen. Die Proben wurden sofort eingefroren und bis zur Analyse bei -18 °C gelagert, angepasst an die Methode nach VDLUFA (2002). Für die Analysen von extrahierbarem P und K sowie des pH-Wertes zu Versuchsbeginn wurde ein Aliquot der obersten Bodenproben (0-30 cm) luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt.

Gesamt-N und die Gehalte an NH₄⁺-N der Düngemittel wurden kurz vor der Ausbringung nach der Kjeldahl-Methode analysiert. Für die weitere Analyse wurden die Düngemittelproben 32-48 Stunden gefriergetrocknet (ALPHA 1-4 LDC-1M, Martin Christ Gefrier Trocknungsanlagen GmbH, Osterode im Harz, Deutschland), die Trockengewichte bestimmt und die getrockneten Düngemittelproben mit einer Rotor-Schnellmühle (Pulverisette 14, FRITSCH GmbH, Idar-Oberstein, Deutschland) vermahlen (< 1 mm). Zur Bestimmung des C-, N- und S-Gehaltes von Boden-, Pflanzen- und Düngemittelproben wurden diese durch Trockenverbrennung in einem Elementaranalysator (Vario EL cube, Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Deutschland) nach VDLUFA (2019) und ISO 15178:2000 (2000) analysiert. Weitere Makronährstoffe (P, K, Mg, Ca, Na, Zn, (S)) wurden nach Mikrowellenaufschluss mit HNO₃

(ultraCLAVE, MLS GmbH, Leutkirch im Allgäu, Deutschland) mit induktiv gekoppelter Plasma-Optischer Emissionsspektrometrie (ICP-EOS) (Agilent 5110, Agilent, Santa Clara, Vereinigte Staaten) analysiert (VDLUFA Methoden: 2.1.3 (2011) und 8.10 (2007)). Für die Analyse von As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb und Hg wurde ICP-Massenspektrometrie (MS) (NexION 300x ICP-Massenspektrometer, Perkin Elmer, Waltham, MA, Vereinigte Staaten von Amerika) (VDLUFA (2014)) und VDLUFA (Chromatographie 2008)) sowie für die Bestimmung von Cl nach Heißwasserextraktion (Ionenchromatograph) verwendet.

2.4.2.1.3 Statistik

Die Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) wurde aus den Differenzen der Mittelwerte der mittleren N-Aufnahme der gedüngten Variante und der mittleren N-Aufnahme der unbehandelten Kontrolle berechnet und mit der definierten, über die Düngemittel applizierten N-Menge normiert, adaptiert nach Chadwick et al. (2000), Gunnarsson et al. (2010) und Benke et al. (2017):

$$\text{NUE} = 100 \times ((\text{N-Aufnahme gedüngte Variante} - \text{N-Aufnahme der Kontrolle}) / \text{applizierte N-Menge}) \quad (1)$$

Für die Nährstoffbilanzen (NB) wurde die folgende Formel verwendet.

$$\text{NB} = \text{N-Input Düngemittel} - \text{N-Abfuhr Ernteprodukt} \quad (2)$$

N-Input = mittlerer Input von N, P, K, Mg, Ca, S und Cl pro ausgebrachter Düngermenge in den Jahren 2019 und 2020 (kg ha^{-1});

N-Output = mittlere Abfuhr von N, P, K, Mg, Ca, S und Cl durch Kohlköpfe in den Jahren 2019 und 2020 (kg ha^{-1})

Alle Ergebnisse wurden varianzanalytisch mit dem PROC MIXED-Verfahren unter SAS 9.4 verrechnet.

2.4.2.2 Ergebnisse

2.4.2.2.1 Zusammensetzung der Düngemittel

Die eingesetzten Düngemittel unterschieden sich sehr stark in ihrer Zusammensetzung (Abbildung 2.4-1, Abbildung 2.4-2). Die Gärreste aus Klee gras und Schweinegülle wiesen niedrige TM-Gehalte auf, ein hohes NH_4^+/N_T -Verhältnis, mittelhohe N_T -Gehalte auf TM-Basis.

Tabelle 2.4-1: Mittelwerte (MW) der Nährstoffkonzentrationen und des C/N-Verhältnisses der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 (n=4, Tofumolke n=6).

Düngemittel ¹⁾		Trocken- -masse (%)	N _{total} (g kg ⁻¹ FM)	NH ₄ ⁺ -N (g kg ⁻¹ FM)	C (% DM)	N (% DM)	C/N-Ver- hältnis	S (g kg ⁻¹ DM)	P (g kg ⁻¹ DM)	K (g kg ⁻¹ DM)	Ca (g kg ⁻¹ DM)	Mg (g kg ⁻¹ DM)
Gärreste (KG+SG)	MW	8,7	6,37	5,25	37,6	7,36	5,1	5,28	10,5	75,6	24,3	5,61
	Range	(8,6-8,7)	(6,24-6,50)	(5,19-5,31)	(37,5-37,7)	(7,26-7,46)	(5,0-5,2)	(4,93-5,60)	(10,2-10,8)	(72,1-79,6)	(24,1-24,5)	(5,05-6,11)
Kleegras-si- lage	MW	68,2	14,8	1,61	42,9	2,23	19,5	1,49	2,87	28,4	10,3	2,52
	Range	(51,1-85,3)	(12,7-17,0)	(0,91-2,30)	(42,9-43,0)	(1,99-2,45)	(17,3-21,6)	(1,37-1,62)	(2,54-3,2)	(28,0-28,9)	(9,9-10,6)	(2,14-2,91)
Kleepellets	MW	91,8	29,7	3,22	43,2	3,24	13,3	1,67	2,58	28,5	12,5	2,31
	Range	(90,9-92,8)	(28,6-30,9)	(3,08-3,36)	(43,1-43,2)	(3,15-3,33)	(13,0-13,7)	(1,55-1,80)	(2,4-2,79)	(27,3-30,0)	(12,2-12,8)	(2,27-2,33)
Horndünger	MW	91,5	142	15,4	45,5	15,5	2,9	17,6	3,19	2,60	7,50	0,41
	Range	(91,3-91,6)	(138-146)	(13,7-17,2)	(44,4-46,3)	(15,2-15,9)	(2,9-2,9)	(17,3-17,9)	(0,71-5,76)	(2,15-3,03)	(2,06-13,2)	(0,25-0,56)
Tofumolke	MW	2,0	1,13	0,17	36,9	6,85	5,9	11,5	2,74	38,4	4,70	4,86
	Range	(1,6-2,9)	(0,81-1,96)	(0,10-0,27)	(32,4-43,4)	(4,92-8,77)	(4,5-7,2)	(9,58-14,7)	(1,44-3,86)	(14,4-55,4)	(3,98-5,50)	(0,75-8,16)

¹⁾ Abkürzungen: BG (KG+SG) = Gärreste aus Kleegras und Schweinegülle.

Tabelle 2.4-2: Mittelwerte (MW) der Spurenelementkonzentrationen und der Gehalte an potentiell toxischen Elementen der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 (n=4, Tofumolke n=6).

Düngemittel ¹⁾		Na (mg kg ⁻¹ DM)	Cl (mg kg ⁻¹ DM)	Zn (mg kg ⁻¹ DM)	As (mg kg ⁻¹ DM)	Cd (mg kg ⁻¹ DM)	Cr (mg kg ⁻¹ DM)	Cu (mg kg ⁻¹ DM)	Ni (mg kg ⁻¹ DM)	Pb (mg kg ⁻¹ DM)	Hg (mg kg ⁻¹ DM)	Cd/P (mg Cd/kg P)
Gärreste (KG+SG)	MW	8,31	13,6	240	0,61	0,12	6,58	46,2	7,38	0,89	0,07	10,9
	Range	(8,00-8,67)	(3,11-24,2)	(223-255)	(0,56-0,69)	(0,11-0,12)	(4,69-8,04)	(43,2-49,2)	(7,00-7,82)	(0,83-0,96)	(0,06-0,07)	(10,6-11,4)
Kleegras-si- lage	MW	41,8	1,63	25,5	0,07	0,01	0,54	10,1	1,45	0,14	0,02	4,42
	Range	(23,8-62,2)	(1,17-2,09)	(22,8-29,4)	(0,03-0,11)	(0,01-0,01)	(0,38-0,72)	(8,91-11,3)	(1,29-1,58)	(0,10-0,17)	(0,01-0,03)	(3,91-4,93)
Kleepellets	MW	119	3,44	27,0	0,12	0,01	1,16	9,53	1,70	0,27	0,03	4,87
	Range	(70,9-163)	(2,60-4,30)	(26,1-28,3)	(0,11-0,13)	(0,01-0,01)	(1,09-1,25)	(8,18-10,1)	(1,59-1,79)	(0,24-0,30)	(0,03-0,03)	(4,48-5,21)
Horndünger	MW	2,24	3,45	98,1	0,10	0,01	4,63	3,95	2,17	0,21	0,01	9,39
	Range	(2,02-2,48)	(2,68-4,21)	(95,0-100,81)	(0,03-0,20)	(0,01-0,01)	(1,07-8,97)	(3,78-4,29)	(0,36-3,95)	(0,15-0,37)	(0,01-0,01)	(2,17-17,7)
Tofumolke	MW	1,47	6,78	45,5	0,08	0,08	0,18	44,8	10,9	0,15	0,05	27,1
	Range	(0,43-6,04)	(1,47-22,6)	(21,9-102)	(0,06-0,15)	(0,06-0,15)	(0,06-0,38)	(41,5-48,6)	(6,46-13,2)	(0,05-0,44)	(0,05-0,05)	(16,8-46,6)

¹⁾ Abkürzungen: BG (KG+SG) = Gärreste aus Kleegras und Schweinegülle.

2.4.2.2.2 Erträge

In den übergreifenden Auswertungen der Standorte Kleinhohenheim und Grötzingen wurden gemäß den Ergebnissen der Varianzanalyse sowohl bei der Gesamtprossmassebildung, als auch beim Gesamtertrag an Köpfen und der Biomasse der am Feld verbleibenden Ernterückstände signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen gemessen (Tabelle 2.4-3). Dabei traten keine Wechselwirkungen zwischen Ort und Behandlung auf, die festgestellten Unterschiede waren auf beiden Standorten gleichgerichtet. Bei der ersten Nachfrucht Spinat wurden keine Unterschiede in den Biomasseerträgen gemessen. Dagegen unterschieden sich varianzanalytisch die N-Abfuhr bei allen drei Kulturen signifikant voneinander, allerdings sind beim Winterweizen signifikante Wechselwirkungen zwischen den beiden Standorten zu beachten. Bei den Ernteresten unterschieden sich die N-Mengen beim Kohl signifikant voneinander, aber nicht beim Winterweizen.

Tabelle 2.4-3: Varianztabelle der Biomasseerträge, der N-Konzentration und der N-Abfuhr von Kohl, Spinat und Winterweizen, und ggf. von der N-Aufnahme von deren Ernteresten - gemeinsame Auswertung der Standorte Grötzingen und Kleinhohenheim.

Vari- anz-ur- sache	Sprossmasse Kohl	Marktfähiger Kohl- ertrag	Nicht-marktfähiger Kohlertrag	Erntereste Kohl	Sprossertrag Spinat	Kornertrag Winter- weizen	N-Konzentration Kohlkopf	N-Konzentration Ernterückstände	N-Konzentration Spinat	N-Konzentration Korn	N-Konzentration Stroh
Be- hand- lung (B)	0,001	0,001	0,032	0,005	0,103	0,037	0,002	<0,001	0,083	0,415	0,802
Ort (O)	0,001	0,011	0,082	<0,001	0,185	<0,001	<0,001	<0,001	0,944	<0,001	0,086
Jahr (J)	0,894	0,175	0,752	0,003	0,008	0,006	0,603	<0,001	0,773	<0,001	0,023
BxO	0,279	0,353	0,609	0,095	0,311	0,275	0,413	0,700	0,315	0,475	0,733

	N-Abfuhr Kohlkopf	Relative N-Dünge-wir- kung Kohlkopf	N-Aufnahme Erntereste Kohl	N-Aufnahme Kopf + Ern- tereste Kohl	Relative N-Dünge-wir- kung Kohl + Reste	N-Abfuhr Spinat	N-Abfuhr Weizenkorn	N-Aufnahme Weizen- stroh	Σ N-Abfuhr Kohl, Spinat, Korn	Relative N-Düngewir- kung Kohl+Spinat+Korn
Be- hand- lung (B)	<0,001	0,002	<0,001	<0,001	0,002	0,037	<0,001	0,609	0,013	0,074
Ort (O)	<0,001	0,098	<0,001	<0,001	<0,001	0,494	<0,001	<0,001	<0,001	0,026
Jahr (J)	0,152	0,002	0,560	0,921	0,119	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,483
BxO	0,175	0,073	0,335	0,215	0,129	0,274	0,002	0,411	0,161	0,325

Die direkten Mittelwertvergleiche weisen die höchsten Erträge bei der Gesamtbio-
masse, wie auch den höchsten marktfähigen Ertrag und die größten Mengen an Ernterückständen bei den
Behandlungen Horndünger (88,6 t ha⁻¹, 37,2 t ha⁻¹ bzw. 10,1 t ha⁻¹) und flüssige Gärreste (89,5

t ha⁻¹, 38,3 t ha⁻¹ bzw. 9,8 t ha⁻¹) und die niedrigsten Erträge für die ungedüngte Kontrolle (63,1 t ha⁻¹, 8,9 t ha⁻¹ bzw. 20,7 t ha⁻¹) aus (Abbildung 2.4-1).

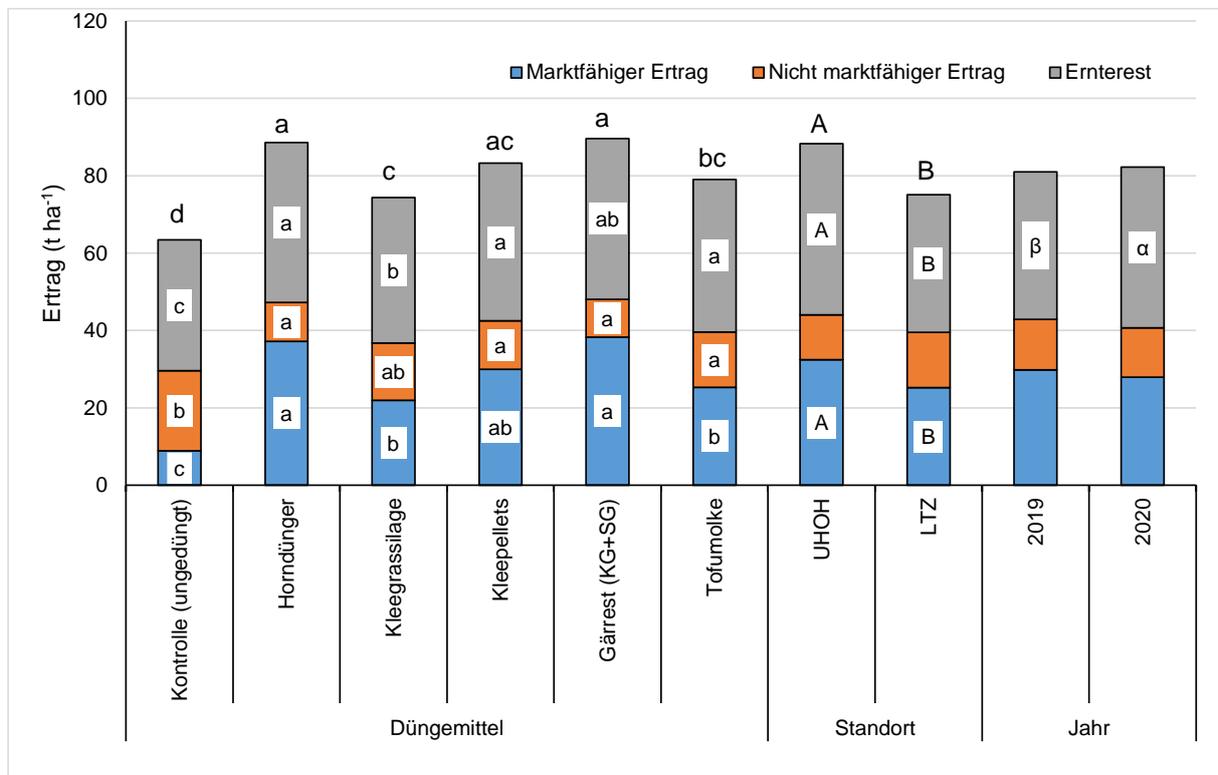


Abbildung 2.4-1: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel auf den Mittelwert der Weißkohlerträge (t ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2019 und 2020. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

Hohe Erträge wurden auch nach Düngung mit Kleepellets ermittelt, die niedrigsten Gesamterträge und Kopferträge wurden mit der Tofumolke und der Kleegrassilage gemessen, wenngleich die entsprechenden Messwerte signifikant höhere Erträge als die ungedüngte Kontrolle anzeigen. Keine Unterschiede wurden zwischen beiden Jahren gemessen, das Ertragsniveau in Kleinhohenheim war etwa 20 % höher als in Grötzingen.

Die Nachwirkung der Düngung zu Weißkohl wies keine signifikanten Effekte der Behandlungen auf die Nach- bzw. Zweitfrucht Spinat auf, die unmittelbar nach der Ernte des Weißkohls ausgesät wurde (Abbildung 2.4-2). Lediglich zwischen beiden Jahren wurden signifikante Unterschiede gemessen, im ersten der beiden Jahre waren die Erträge etwa ein Drittel höher als im zweiten Jahr.

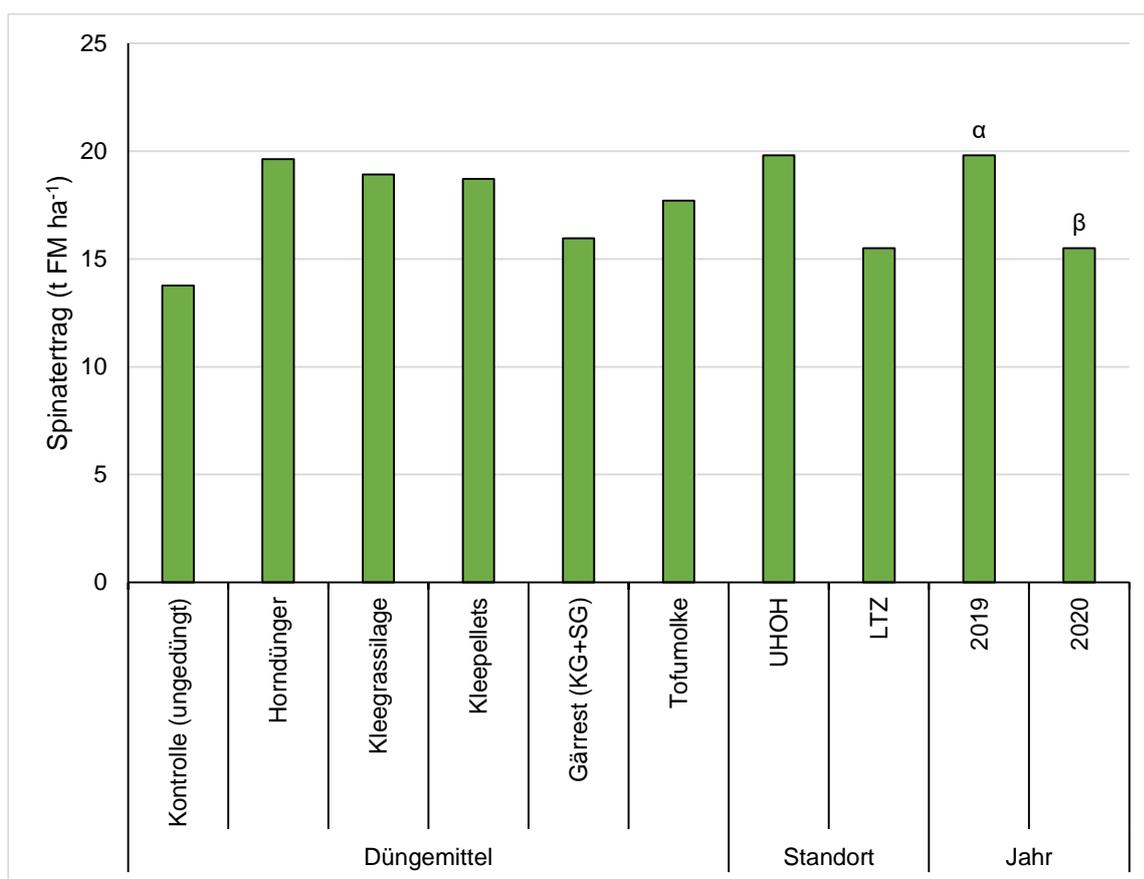


Abbildung 2.4-2: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die Nachwirkung bei Spinat – Mittelwert der Spinaterträge (t ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2019 und 2020. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen.

Die Nachwirkung der Düngung bei der zweiten Nachfrucht Winterweizen wies signifikante Effekte auf die Kornenerträge auf (Abbildung 2.4-3). Die höchsten Erträge wurden ähnlich wie bei den Kopfkohlerträgen mit Horndünger festgestellt. Auch Kleegrassilage und Kleepellets wiesen signifikant höhere Erträge als die Nullkontrolle auf, während sich die Kornenerträge der beiden Behandlungen Gärreste und Tofumolke nicht von der ungedüngten Kontrolle unterschied.

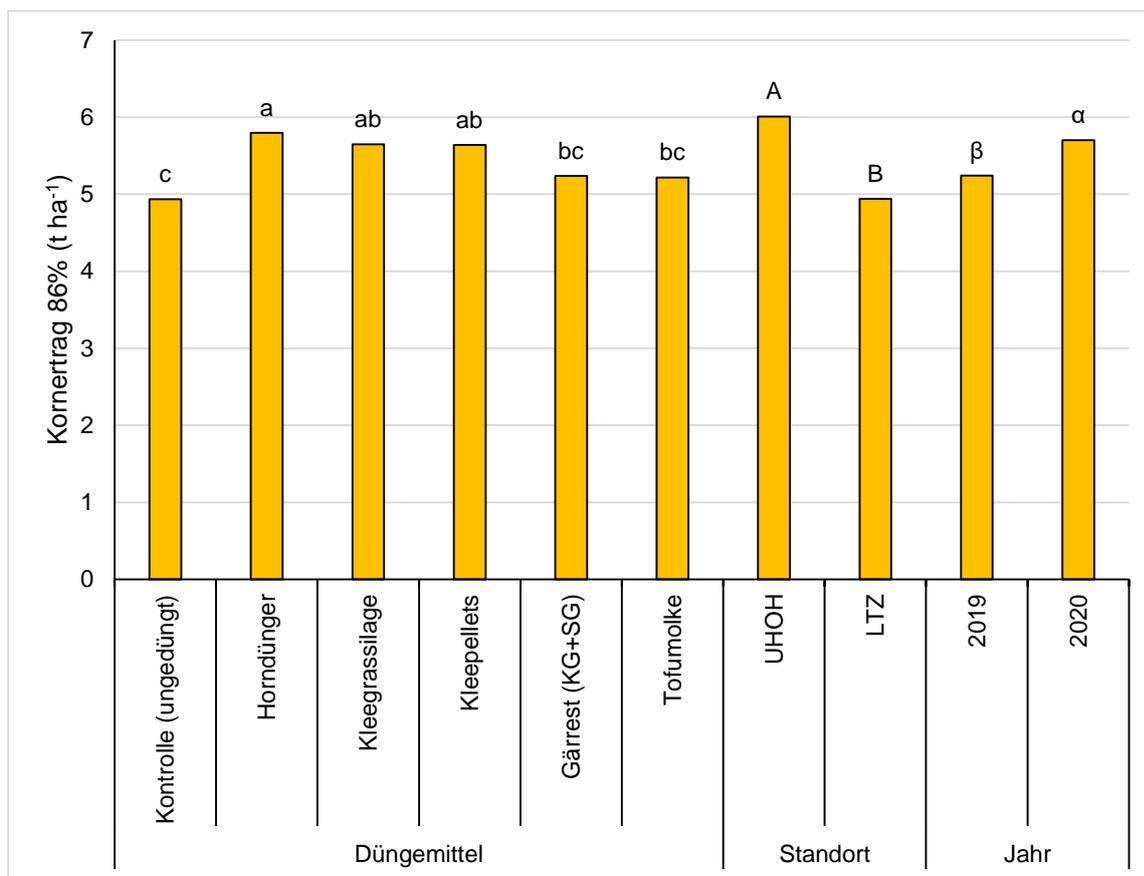


Abbildung 2.4-3: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die Nachwirkung Winterweizen – Mittelwert der Winterweizenerträge (t ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

2.4.2.2.3 Nitratgehalte im Boden

Die Behandlungen wirkten sich nicht oder kaum auf die Nitratgehalte im Boden aus, die Varianztabelle zeigt für die meisten Messungen keine signifikanten Unterschiede an (Tabelle 2.4-4).

Tabelle 2.4-4: Varianztabelle der Nitratgehalte im Boden zu unterschiedlichen Zeitpunkten - gemeinsame Auswertung der Standorte Grötzingen und Kleinhohenheim.

Varianzursache	Nitrat Kohlernte		Nitrat Ende Vegetationsperiode			Nitrat Vegetationsbeginn Folgejahr		
	0-30	30-60	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Behandlung (B)	0,118	0,744	0,543	0,092	0,296	0,639	0,167	0,007
Ort (O)	0,003	<0,001	0,043	0,396	0,122	<0,001	0,463	0,679
Jahr (J)	0,836	0,094	0,215	0,023	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
BxO	0,927	0,096	0,675	0,981	0,076	0,831	0,009	0,180

2.4.2.2.4 Nährstoffabfuhr und Bilanzen

Im Durchschnitt aller Behandlungen betrug die N-Abfuhr durch die Kohlköpfe 56,2 kg N ha⁻¹. Die signifikant höchsten N-Abfuhr durch die Kohlköpfe wurden nach einer Düngung mit Horndünger (68,8 kg N ha⁻¹) gemessen, etwa 28 kg N ha⁻¹ mehr als in der unbehandelten Kontrolle (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Ähnlich hohe N-Abfuhr wurden mit Gärresten festgestellt (64,7 kg N ha⁻¹), die drei übrigen Düngemittel führten zwar zu signifikant höheren N-Abfuhr als die ungedüngte Kontrolle, sie waren jedoch gleichzeitig signifikant niedriger als in der Horndüngervariante. Die N-Abfuhr über die Kohlköpfe unterschieden sich nicht zwischen den beiden Jahren signifikant voneinander, allerdings zwischen beiden Standorten: in Kleinhohenheim waren die N-Abfuhr etwa ein Drittel höher als in Grötzingen.

Mit durchschnittlich 76,1 kg N ha⁻¹ waren die N-Mengen in den Ernterückständen deutlich höher als die N-Abfuhr durch die Kohlköpfe (Abbildung 2.4-4). Die signifikant höchsten N-Gehalte in den Ernterückständen wies ähnlich wie bei den Kohlköpfen die Horndüngervariante mit 91,0 kg N ha⁻¹ auf, der Wert lag etwa 29 kg N höher als in der ungedüngten Kontrolle (62,3 kg N ha⁻¹). Die N-Gehalte in den Ernterückständen war in den übrigen vier Behandlungen signifikant niedriger als bei Horndünger, aber zugleich signifikant höher als in der unbehandelten Kontrolle; untereinander unterschieden sich die N-Gehalte nicht signifikant voneinander und betrugen zwischen 72,5 und 79,2 kg N ha⁻¹. Ähnlich wie bei den Kohlköpfen unterschieden sich die N-Mengen in den Ernterückständen nicht signifikant zwischen den Jahren, aber in Kleinhohenheim verblieben signifikant höhere N-Mengen auf der Fläche als am Standort Grötzingen.

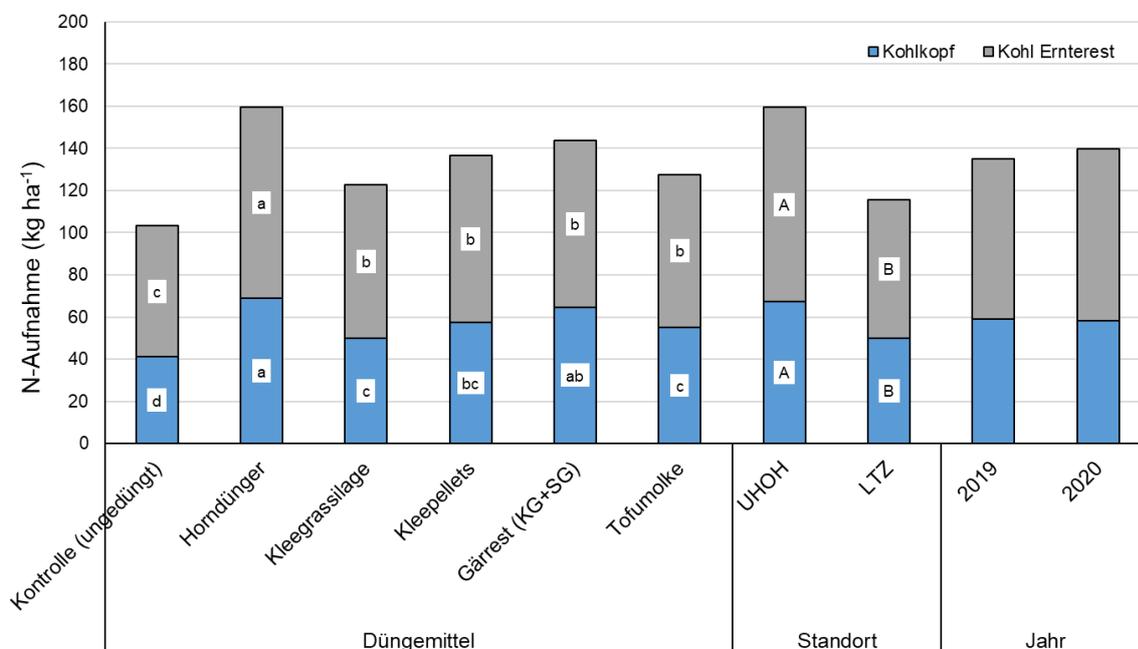


Abbildung 2.4-4: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel auf die N-Aufnahme von Weißkohl – Mittelwert an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

Die relative N-Düngewirkung (zusätzliche N-Aufnahme im Verhältnis zur ungedüngten Kontrolle) der verschiedenen Düngemittel zu Weißkohl (Kopf + Ernterückstände) zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Varianten: Die höchste absolute Erhöhung der N-Aufnahme wurde durch Horndünger ($56,4 \text{ kg N ha}^{-1}$) bewirkt, bei Gärresten lag dieser Wert ($40,2 \text{ kg N ha}^{-1}$) etwa ein Drittel niedriger (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der geringste Anstieg der N-Aufnahme wurde bei Kleegrassilage und Tofumolke gemessen.

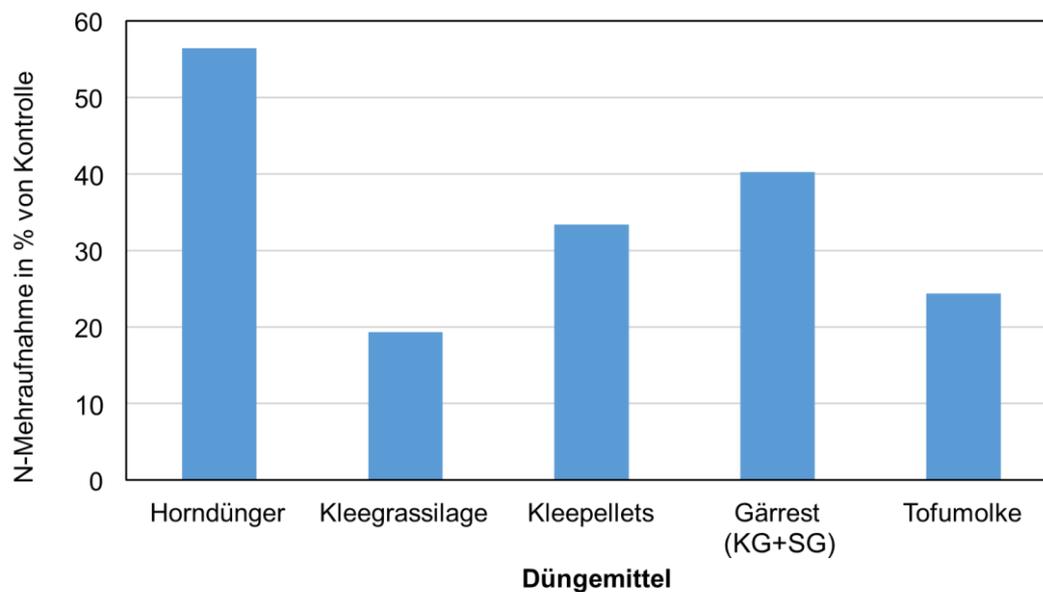


Abbildung 2.4-5: relativen N-Düngewirkung verschiedener organischer Düngemittel zu Weißkohl im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle – Mittelwert an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle.

Die N-Nachwirkung einer N-Düngung zu Weißkohl zur Zweitfrucht Spinat führte ähnlich wie beim Kohl zu den signifikant höchsten N-Abfuhr bei der Horndüngervariante ($80,2 \text{ kg N ha}^{-1}$) (Abbildung 2.4-6). Ähnlich hohe N-Abfuhr wurden Kleegrassilage ($74,0 \text{ kg N ha}^{-1}$) und Kleepellets ($76,3 \text{ kg N ha}^{-1}$) festgestellt. Nach einer Düngung mit Gärresten zum Kohl war die N-Nachwirkung zu Spinat signifikant niedriger ($62,0 \text{ kg N ha}^{-1}$) als bei der Horndüngerkontrolle, die N-Abfuhr unterschied sich ähnlich wie bei der Tofumolke ($65,3 \text{ kg N ha}^{-1}$) nicht signifikant von der ungedüngten Kontrolle ($54,2 \text{ kg N ha}^{-1}$). Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Standorten, aber zwischen beiden Jahren gemessen; im ersten Jahr waren die N-Abfuhr durch Spinat nahezu doppelt so hoch wie im zweiten Versuchsjahr.

Die durchschnittlichen Korn-N-Abfuhr beim Winterweizen waren mit $77,3 \text{ kg N ha}^{-1}$ ähnlich hoch wie beim Spinat und deutlich höher als beim Kohl. Die absoluten Unterschiede zwischen den Varianten waren relativ niedrig, ähnlich wie bei Kohl und Spinat wurden in der Horndüngerbehandlung die signifikant höchsten Korn-N-Abfuhr festgestellt ($82,4 \text{ kg N ha}^{-1}$), die signifikant niedrigsten Abfuhr wurden bei der ungedüngten Kontrolle ($69,7 \text{ kg N ha}^{-1}$) gemessen (Abbildung 2.4-8). Die Werte der übrigen Behandlungen liegen dazwischen.

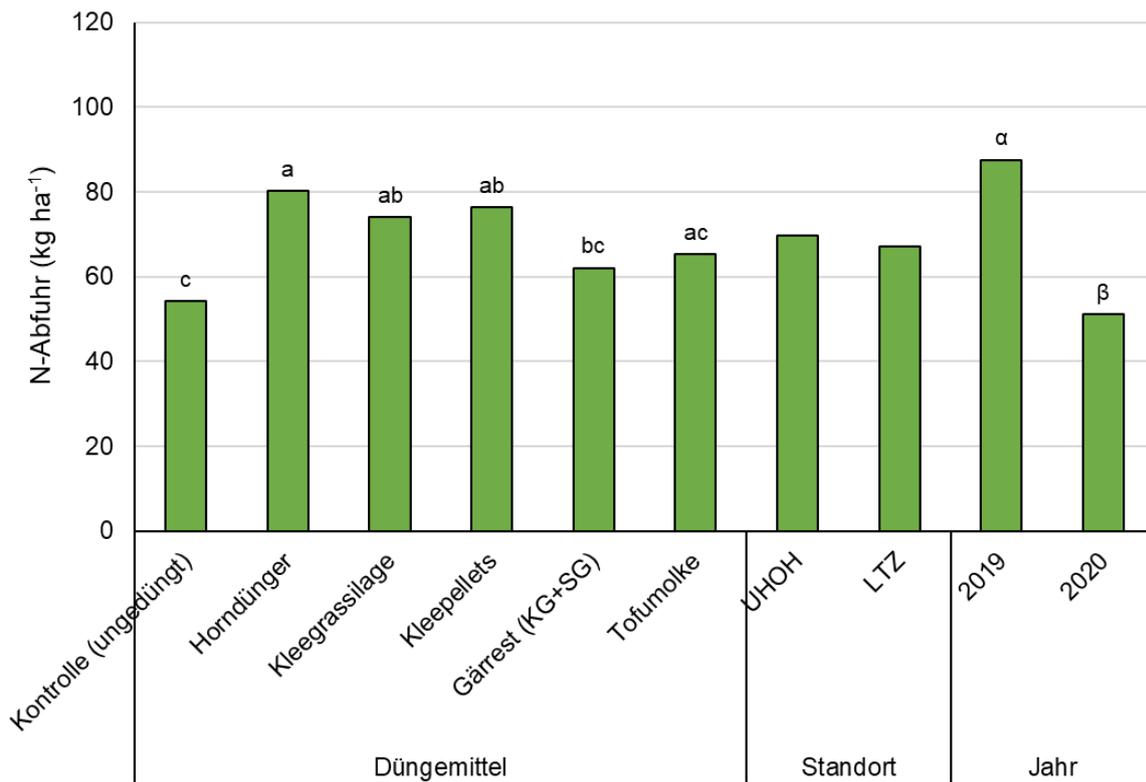


Abbildung 2.4-6: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Nachwirkung zur ungedüngten Zweitfrucht Spinat – Mittelwert der N-Abfuhen (kg N ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

Allerdings wurden bei den Korn-N-Abfuhen bei der varianzanalytischen Verrechnung signifikante Wechselwirkungen zwischen Behandlung und Ort errechnet (Tabelle 2.4-3), sodass eine Darstellung getrennt nach den Standorten erforderlich wurde. Die signifikanten Wechselwirkungen kamen dadurch zustande, dass sich am Standort Kleinhohenheim die N-Abfuhen der Behandlung Tofumolke nicht von der ungedüngten Kontrolle unterschieden, während am Standort Grötzingen die Behandlung Tofumolke die höchsten N-Abfuhen aufwies (Abbildung 2.4-8).

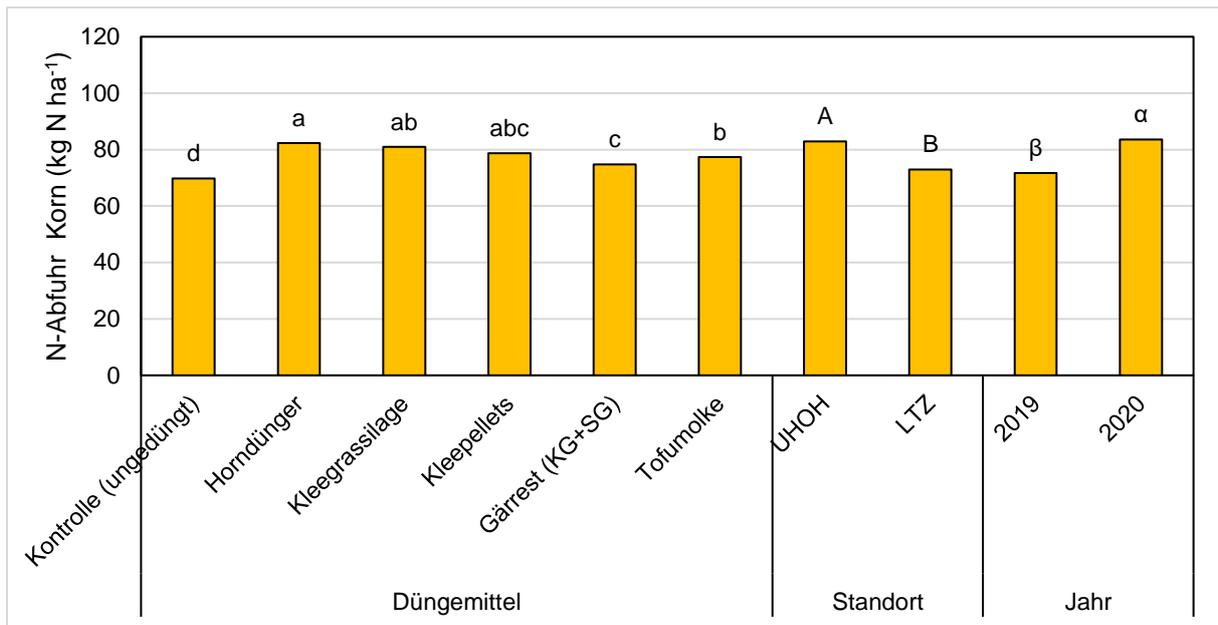


Abbildung 2.4-7: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Abfuhr bei der Messung der N-Nachwirkung zum ungedüngten Winterweizen als zweite Nachfrucht – Mittelwert der Korn-N-Abfuhr (kg N ha⁻¹) aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

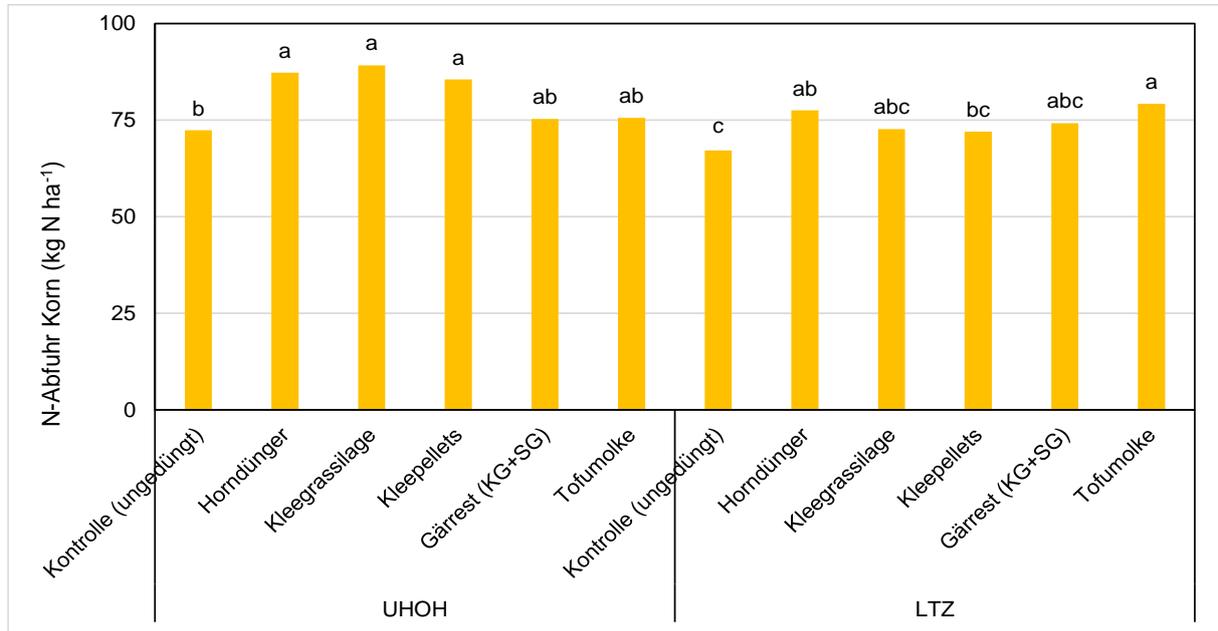


Abbildung 2.4-8: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Abfuhr bei der Messung der N-Nachwirkung zum ungedüngten Winterweizen als zweite Nachfrucht – Mittelwert der Korn-N-Abfuhr (kg N ha⁻¹) getrennt ausgewiesen für die Standorte Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

Bei den Stroh-N-Gehalten wurden keine Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt, sie waren in Grötzingen signifikant höher als in Kleinhohenheim, und im zweiten Jahr höher als im ersten Jahr (Ergebnisse nicht dargestellt).

Nach der Aberntung der ersten Kultur in der hier untersuchten Kulturabfolge waren die durchschnittlichen N-Abfuhr über die Ernteprodukte der gedüngten Behandlungen im Durchschnitt $34,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ höher als in der ungedüngten Kontrolle (Abbildung 2.4-5), nach der Abfolge von Weißkohl – Spinat – Winterweizen wiesen die gedüngten Behandlungen im Durchschnitt N-Aufnahmen auf, die um $44,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ höher waren als in der ungedüngten Kontrolle (Abbildung 2.4-9). Dies bedeutet, dass ein Großteil der Gesamt-N-Düngewirkung auf den Effekt auf die direkt gedüngte Kultur Weißkohl entfiel, und durchschnittlich nur etwa 25 % an Unterschieden in der Nachwirkung lag. Horndünger zeigten sowohl eine hohe N-Direktwirkung zu Kohl, als auch eine starke N-Nachwirkung zu den Nachfrüchten, Gärreste wiesen eine hohe direkte N-Düngewirkung auf, allerdings eine sehr geringe N-Nachwirkung. Kleegrassilage und Kleepellets zeigten eine eher geringe N-Direktwirkung, aber eine relativ starke N-Nachwirkung zur Zweitfrucht Spinat.

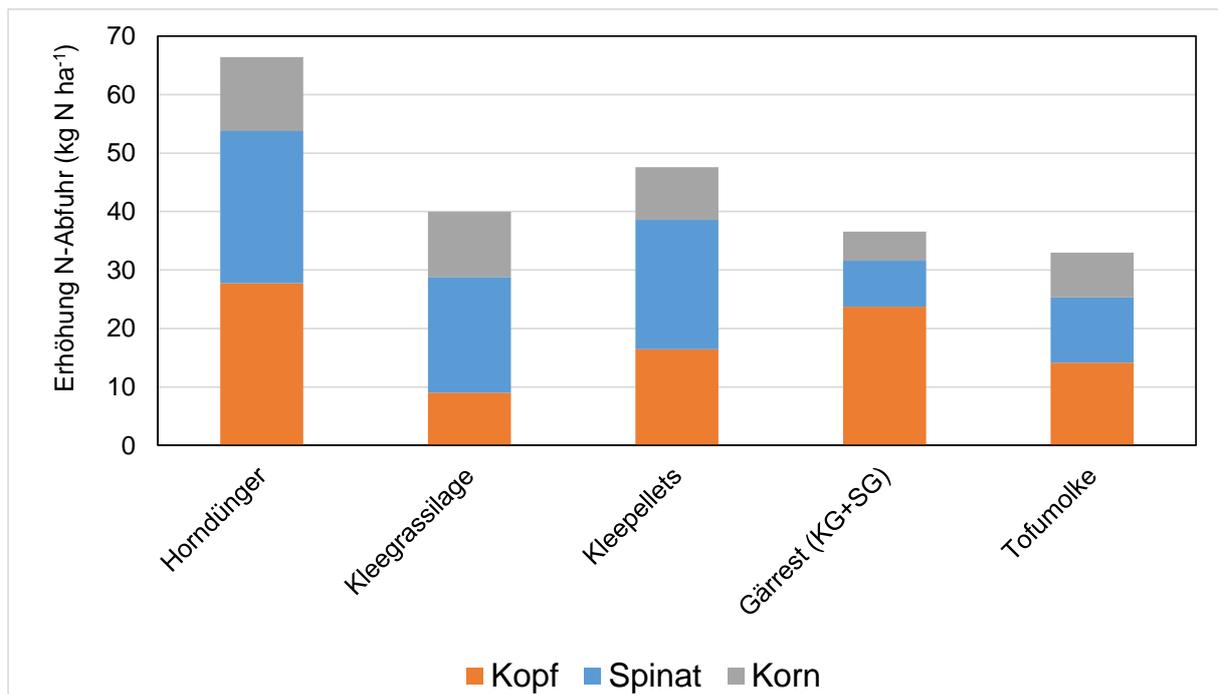


Abbildung 2.4-9: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die zusätzlichen N-Abfuhr von Weißkohl – Spinat und Winterweizen – (kg N ha^{-1}). Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

2.4.2.3 Diskussion

Die Bewertung der Eignung von Düngemitteln und ihren Alternativen in einem Anbausystem umfasst mehrere Aspekte, darunter nicht nur die Quelle des Düngemittels, sondern auch die Auswirkungen auf die Gesamtproduktivität, auf die Qualität, auf die Nachhaltigkeit (z. B. im

Hinblick auf potenzielle Emissionen oder Nährstoffbilanzen) und auf potenzielle schädliche Auswirkungen (z. B. auf die Schadstoffbelastung des Bodens). Aus Sicht der Landwirte ist einer der wichtigsten Aspekte die Auswirkungen von Düngemitteln auf die Nährstoffverfügbarkeit und die Erträge. Die Ertragsergebnisse zeigen, dass die gewählte Düngungshöhe bei den getesteten alternativen Düngemitteln nicht den N-Bedarf des Kohls überstieg, wie die signifikant höheren Kohlerträge und Kohl-N-Aufnahmen in den Horndüngervarianten sowie die nicht vorhandenen Unterschiede in den Restnitratgehalten nach der Ernte des Kohls zeigen. Diese Aussage wird durch die geringen Unterschiede in der N-Konzentration im Kopf (Ergebnisse nicht dargestellt) gestützt, trotz der großen Unterschiede im Kopfertrag zwischen der unbehandelten Kontrolle und der Horndüngerbehandlung. Daher war die Versuchsanordnung für die Beurteilung des N-Düngewertes der alternativen N-Düngerquellen gut geeignet.

Die gemessenen Daten zum Biomasseertrag zeigen, dass Biogasgärreste einen nicht ganz so hohen N-Düngewert aufweisen wie Horndünger: zwar war der Marktfruchtertrag gleich hoch (Abbildung 2.4-1) allerdings wies die Horndüngervariante eine etwas höhere N-Aufnahme auf als die Biogasgärreste (Abbildung 2.4-4). Diese Wirkung resultiert aus dem relativ hohen Anteil von NH_4^+ am Gesamt-N-Gehalt (Tabelle 2.4-1) und den geringen Mengen an leicht abbaubarer organischer Substanz, was nebenbei potenzielle N-Immobilisierungsprozesse im Boden nach der Ausbringung reduziert (Möller und Müller, 2012). Die Ertragsunterschiede bei den klee- bzw. klee-grasbasierten Düngemitteln sind wahrscheinlich auf die Unterschiede im C/N-Verhältnis zurückzuführen, denn beide Düngemittel enthalten ähnliche Anteile an NH_4^+ -N am Gesamt-N-Gehalt, unterscheiden sich aber deutlich im C/N-Verhältnis (Tabelle 2.4-1). Die Kleepellets können mit ihren engeren C/N-Verhältnis und durch eine Kombination aus langsamer N-Freisetzung und leicht verfügbarem NH_4^+ während einer langen Anbauphase offenbar den N-Bedarf decken, während die niedrigeren Erträge bei der Klee-grassilage hauptsächlich auf eine geringere N-Freisetzung zurückzuführen sind, wie die niedrigeren N-Aufnahmen zeigen (Abbildung 2.4-4); die N-Verfügbarkeit kann aufgrund einer N-Immobilisierung im Boden eingeschränkt werden (Gutser et al., 2005). Dies wurde auch in der Studie von Sorensen und Thorup-Kristensen (2011) beobachtet, bei den Düngemitteln mit einem C/N-Verhältnis von 20 statt 10 zu niedrigeren Erträgen – ähnlich wie in dieser Untersuchung – im Umfang von etwa 34 % führten, allerdings bei Grünkohl und Blumenkohl. Aufgrund der vorliegenden Daten ist die geringe N-Düngewirkung von Tofumolke nicht zu erklären, zwar enthält sie so gut wie kein Ammonium, weist aber mit 5,9 ein ausgesprochen enges C/N-Verhältnis auf (Tabelle 2.4-1). Auf der Grundlage der Ergebnisse kann Hypothese 2 bestätigt werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die unmittelbare Düngewirkung direkt zur gedüngten Kultur einen Großteil der N-Düngewirkung ausmacht, und die Nachwirkung bis hinein in das nachfolgende Jahr nur einen Viertel der Gesamt-N-Düngewirkung ausmacht. Dies zeigt, dass die direkte N-Düngewirkung maßgeblich für das Gesamtergebnis zu sein scheint. Der Horndünger wies nicht nur die höchste Direktwirkung auf den Ertrag des unmittelbar gedüngten Weißkohls auf, sondern auch die stärkste Nachwirkung bei Spinat (Abbildung 2.4-2) und insbesondere Winterweizen (Abbildung 2.4-3). Dies entsprach nicht den Erwartungen, und lässt sich am ehesten aufgrund des engeren C/N-Verhältnisses (Daten nicht gezeigt) der Ernterück-

stände im Kohl erklären. Eine vergleichsweise geringe Nachwirkung wies der Gärrest auf, sowohl auf den nachfolgenden Spinat als auch bei Winterweizen. Dies lässt sich mit der hohen N-Direktwirkung und den niedrigen Anteilen an organischem N erklären. Die vergleichbar geringe Nachwirkung der Tofumolke auf Ertrag und N-Aufnahme kann ähnlich wie die geringe N-Direktwirkung nicht anhand der untersuchten chemischen Eigenschaften dieses Düngemittels erklärt werden. Die ähnliche N-Nachwirkung von Kleepellets wie auch von Kleegrassilagen im Vergleich zu Horndünger lässt auf eine eher langsame N-Freisetzung dieser beiden Düngemittel schließen.

Von den durchschnittlich $194,5 \text{ kg N ha}^{-1}$, die durchschnittlich auf beiden Standorten und beiden Jahren zum Weißkohl gedüngt wurden, wiesen nach zwei Jahren im Durchschnitt aller gedüngten Behandlungen diese in der Summe aller Ernteprodukte eine um nur $44,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ höhere N-Aufnahme auf als die ungedüngte Nullkontrolle, umgerechnet etwa 25 %. Dies deutet auf eine insgesamt niedrige N-Effizienz hin. Die Ergebnisse zeigen aber zugleich, dass der hohe Anfall an N-reichen Ernterückständen die N-Effizienz in einem solchen System beeinträchtigt, weil unterschiedliche Mengen an N, die der Rückführung als Ernterest anheimfallen, sich nicht gleichermaßen auf die N-Abfuhr der Nachfrucht auswirken. Es ist davon auszugehen, dass jede Überführung von pflanzenverfügbarem Stickstoff im Boden in organischen Pflanzenstickstoff und deren anschließende Rückführung in den Boden mit einer neuen N-Verlustkaskade einhergeht, die die N-Effizienz des Gesamtsystems belastet. Aus Versuchen mit nicht-legumen Zwischenfrüchten ist bekannt, dass der auf die Weise gebundene Stickstoff langfristig nur zu etwa 40 % durch die nachfolgenden Hauptfrüchte verwertet wird (Paustian et al. 1992), der Rest unterliegt unterschiedlichen Verlustpfaden. Da davon auszugehen ist, dass solche Wirkungen bei Phosphat und Kalium nicht zum Tragen kommen, können diese einseitigen N-Verluste weiter das Ungleichgewicht zwischen Stickstoff und den anderen Nährstoffen im Boden erhöhen.

Neben den Makro- und Mikronährstoffen und deren Wirkung auf den Boden stellt auch der Gehalt an potenziell toxischen Elementen wie Pb, Hg, Zn, As und Cd ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung von Düngemitteln dar, wobei derzeit das größte Interesse auf Cd gerichtet ist, da es am ehesten negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben kann (Mortvedt, 1995). Alle getesteten Düngemittel lagen unter dem von der EU-Verordnung zum ökologischen Landbau gesetzten Grenzwert (Verordnung (EU) 2019/1009 OF, 2019).

2.4.2.4 Literatur

- Arthurson, V. 2009. Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land—potential benefits and drawbacks. *Energies* 2, 226– 242.
- Auweele, W. V., Vandendriessche, H., 2002. A decision support system for field vegetable crops. Focus on fertilisation. *Acta Hort.* 571, 149 – 152.
- Benke, A. P.; Rieps, A.-M.; Wollmann, I.; Petrova, I.; Zikeli, S.; Möller, K. (2017a): Fertilizer value and nitrogen transfer efficiencies with clover-grass ley biomass based fertilizers. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 107, 395– 411. DOI: 10.1007/s10705-017-9844-z
- Dahan, O., Babad, A., Lazarovitch, N., Russak, E. E., & Kurtzman, D. 2014. Nitrate leaching from intensive organic farms to groundwater. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 333-341. doi.org/10.5194/hess-18-333-2014.
- Ehaliotis, C., Massas, I., Pavlou, G. 2010. Efficient urea-N and KNO_3 -N uptake by vegetable plants using fertigation. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 763–768.

- Furukawa, Y., Hasegawa, H., 2006. Response of spinach and komatsuna to biogas effluent made from source-separated kitchen garbage. *J. Environ. Qual.* 35, 1939–1947.
- Hirel B, Lemaire, G. 2005. From agronomy and ecophysiology to molecular genetics for improving nitrogen use efficiency in crops. *J Crop Imp* 15, 213–257.
- Hochmuth, G. J. 2003. Progress in mineral nutrition and nutrient management for vegetable crops in the last 25 years. *Hort Sci.* 38, 999–1003
- IFOAM, 2005. The IFOAM Basic Standards for Organic Production and Processing. IFOAM.
- Ismail A., Z. M. Marjan, C. W. Foong, 2004, Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetable. *Food Chemistry* 87, 581-586.
- Katroschan, K. U., Uptmoor, R., Stützel, H., 2014. Nitrogen use efficiency of organically fertilized White cabbage and residual effect on subsequent beetroot. *Plant and Soil*, Springer International publishing. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-014-2133-6>.
- Lampkin, N.H., 2000. Organic farming. In: S. Padel (ed.). *Soil sickness and soil fertility*. Cab Publisher, Wallingford, USA.
- Liu, W., Yang, Q., Du, L. 2009. Soilless cultivation for high-quality vegetables with biogas manure in China: feasibility and benefit analysis. *Renew. Agr. Food Syst.* 24, 300–307
- Masuda, K., Toyoda, M., Ishida, S., Hachiya, M., Kojima, M., Kobayashi, T., 2002. The use of controlled availability fertiliser in combination with direct seeding of cabbage. *Acta Hort.* 571, 59 – 63.
- Möller, K., 2018. Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 112, 147-164.
- Möller, K., 2020. *Praxishandbuch Organische Düngung*. Agrimedia-Verlag.
- Möller, K., Müller, T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12, 242-257.
- Möller, K., Stinner, W., Leithold, G., 2008. Growth, composition, biological N₂ fixation and nutrient uptake of a leguminous cover crop mixture and the effect of their removal on field nitrogen balances and nitrate leaching risk. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 82, 233–249.
- Möller, K., Oberson, A., Bünemann, E. K., Cooper, J., Friedel, J. K., Glaesner, N., ... & Magid, J., 2018. Improved phosphorus recycling in organic farming: navigating between constraints. *Advances in Agronomy* 147, 159-237.
- Müller, T., von Fragstein und Niemsdorff, P., 2006. Organic fertilizers derived from plant materials Part I: Turnover in soil at low and moderate temperatures. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 255–264.
- Nygaard Sorensen, J., Thorup-Kristensen, K., 2011. Plant-based fertilizers for organic vegetable production. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174, 321-332.
- Oelofse, M., Jensen, L. S., Magid, J., 2013. The implications of phasing out conventional nutrient supply in organic agriculture: Denmark as a case. *Org. Agr.* 3:41–55. DOI 10.1007/s13165-013-0045-z
- Oudshoorn, F., Kristensen, C., Løes, A., Caceres, R., Kir, A., Pecenka, R., Knebl, L., Postawa, P., Stachowiak, T., Szczypior, A., Montemayor, E., Malinska, K., Zikeli, S., Conroy, J., Rayns, F., Schmutz, U. 2019. Pathways to phase-out contentious inputs from organic agriculture in Europe. Report on alternatives to contentious inputs (WP SOIL). Organic-PLUS deliverables, Nr. Deliverable 5.2. pp, 20-21.
- Pang X.P., Letey J., 2000. Organic farming: challenge of timing nitrogen availability to crop nitrogen requirements. *Soil Sci Soc Am J* 64:247–253
- Parmar, H. C., Maliwal, G. L., Kaswala, R. R., Patel, M. L., 1999. Effect of irrigation, nitrogen and spacing on yield of cabbage. *Indian J. Hort.* 56, 256-258.
- Paustian, K., W. J. Parton, J. Persson, 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Science Society America Journal* 56, 476-488.
- Pavla. B., Pokluda, R., 2008. Influence of alternative organic fertilizers on the antioxidant capacity in head cabbage and cucumber. *Not. Bot. Hort. Agrobot. Cluj* 36, 63-67.
- Rakotovololona, L., Beaudoin, N., Ronceux, A., Venet, E., Mary, B. 2019. Driving factors of nitrate leaching in arable organic cropping systems in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 272, 38-51. doi.org/10.1016/j.agee.2018.10.005
- Qian, P., Schoenau, J. J., 2002. Availability of nitrogen in solid manure amendments with different C/N ratios. *Can. J. Soil Sci.* 82, 219–225.

- Sainju, U. M, Whitehead, W.F, Singh B.P., Wang, S. 2006. Tillage cover crops and nitrogen fertilization effects on soil nitrogen and cotton and sorghum yields. *Eur J Agron.* 25, 372–382.
- Seneviratne, G., 2000. Litter quality and nitrogen release in tropical agriculture: a synthesis. *Biol. Fertil. Soils* 31, 60–64.
- Sorensen J. N., Thorup-Kristensen, K. 2011. Plant-based fertilizers for organic vegetable production. *J Plant Nutr Soil Sci.* 174, 321–332.
- Sørensen. N. J., K. Thorup-Kristensen. 2010. Plant-Based Fertilizer for Organic Production. J. Department of Horticulture Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University Aarslev Denmark. *Acta Horticulturae*. DOI: 10.17660/ActaHortic.2010.852.23
- Stinner, W., Möller, K., Leithold, G. 2008. Effects of biogas digestion of clover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. *European Journal of Agronomy* 29, 125-134.
- Voogt, W., 2014. Soil fertility management in organic greenhouse crops; a case study on fruit vegetables. In: II international symposium on organic greenhouse horticulture 1041, pp 21–35.
- Watson, C. A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson L.R., Rayns, F.W. 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239-247. DOI: 10.1079/SUM2002131.
- Watson, C. A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson L.R., Rayns, F.W. 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239-247. DOI: 10.1079/SUM2002131.
- Watson, C., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L., Rayns, F., 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use Manag.* 18, 239–247.
- Youngdahl L. J, Pacheco, R., Street J. J., Vlek P.L.G. 1982. The kinetics of ammonium and nitrate uptake by young rice plants. *Plant Soil* 69, 225–232
- Zebarth, B. J., Freyman, S., Kowalenko, C. G. 1991. Influence of nitrogen fertilization on cabbage yield, head nitrogen content and extractable soil inorganic nitrogen at harvest *Can. J. Plant Sci.* 71, 1275-1280.
- Zupanc, V., Sturm, M., Lojen, S., Marsi'c-Kacjan, N., Adu-Gyamfi, J., Bracic-Zeleznik, B., Urbanc, J., Pintar, M. 2011. Nitrate leaching under vegetable field above a shallow aquifer in Slovenia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144, 167–174.

2.4.3 Ergebnisse Versuche alternative N-Düngemittel am Queckbrunnerhof (DLR)

2.4.3.1 Material und Methoden

Im Rahmen des AP 5 wurde am DLR-Rheinpfalz die Wirkung von unterschiedlichen Düngemitteln im Rahmen einer Früh-Gemüse => Herbst-Gemüse => Winterweizen-Fruchtfolge untersucht. Dabei wurde aufbauend aus Vorversuchen die Fruchtfolge Früher Weißkohl gefolgt von Herbst-Spinat und als letztes Feld der Fruchtfolge Winterweizen etabliert. Eine Düngung dieser Fruchtfolge erfolgte ausschließlich zum Weißkohl. Die Vorgehensweise am DLR-Rheinpfalz unterschied sich in folgenden Punkten von der in Kleinhohenheim und Grötzingen:

- Als Weißkohl wurde der Sortentyp Spitzkohl gewählt
- Die Bodenproben und die Pflanzenproben wurden nicht wiederholungsbezogen sondern als Mischprobe über die Variante analysiert
- Im Jahr 2019 gab es keine ungedüngte Kontrolle
- Als Standard-Düngemittel wurden Haarmehlpellets (HMP) verwendet
- Der N-Bedarfswert wurde aufgrund der Ertragserwartung des Weißkohls konform zur Düngeverordnung auf 260 kg N ha⁻¹ festgelegt

2.4.3.1.1 Kohl als 1. Kultur

Als erstes Fruchtfolgefeld wurde im Frühanbau mit einer Vliesabdeckung Weißkohl mit dem Sortentyp Spitzkohl angebaut. Als Sorte wurde `Caraflex F1` von Bejo ausgewählt. Die Jungpflanzen wurden von einem Jungpflanzenbetrieb zugekauft. Die Pflanzen wurden in 4er Erdpresstöpfen mit einer Pflanzmaschine Typ Hortus im praxisüblichen Pflanzabstand von 30 x 50 cm gepflanzt.

2.4.3.1.2 Herbst-Spinat als 2. Kultur

Als Zweitfrucht wurde im Herbstanbau Spinat gesät. Nach der Zerkleinerung der Erntereste des Weißkohls mit einem Mulcher wurden diese in einem mehrstufigen Verfahren eingearbeitet (2x Kurzscheibenegge => 2x Beetfräse) und das Saatbett für den Spinat hergestellt. Die intensive Bodenbearbeitung war notwendig, um die Strünke des Weißkohls weitestgehend zu zerkleinern und den Spinat danach sähen zu können.

2019 und 2020 wurde die Sorte `Acadia` und 2021 die Sorte `SV3523VC` ausgewählt. Dieser Sortenwechsel war notwendig, da `Acadia` nicht lieferbar war. Es wurden ca. 2,5 Mio. Korn ha⁻¹ ausgesät. Die Angabe der Spinaterträge erfolgt nur als Angabe des Gesamtaufwuchses, da die Angabe der Spinat-Ertrag bei marktfähiger Ware extrem von der Schnitthöhe abhängt. Eine gleichmäßige Schnitthöhe kann bei manueller Ernte von verschiedenen Personen nicht sichergestellt werden.

2.4.3.1.3 Winterweizen als 3. Kultur

Als letztes Fruchtfolgefeld wurde Winterweizen der Sorte `Genius` gesät. 2019 mit 335 keimfähigen Körnern/m², 2020 mit 350 keimfähigen Körnern/m². 2021 wurde für die Ernte 2022 auch Winterweizen ausgesät. Dieser wurde jedoch nicht mehr ausgewertet, da die Auswertung außerhalb der Projektlaufzeit gelegen hätte.

2.4.3.1.4 Bewässerung

Da die Bewässerung in Trockengebieten maßgeblich die Mineralisationsrate mit beeinflusst, und die angenommenen Ertragsziele ohne Bewässerung am Standort Queckbrunnerhof nicht erreicht werden können, ist eine Bewässerung der Gemüsekulturen Weißkohl und Spinat zwingen notwendig. Die Bewässerung erfolgt nach dem „Geisenheimer Modell“ einer an deutsche Bedingungen angepassten Methode nach Vorgaben des FAO 56 – Papers. Die dazu notwendigen Wetterdaten werden direkt am Standort erhoben und von der Agrarmeteorologie des DLR-Rheinhausen-Nahe-Hunsrück verrechnet. Die Bewässerung erfolgte mit Schwinghebelregnern mit einer Beregnungsdichte von 10 mm/h.

Tabelle 2.4-5: Niederschlag und Beregnungsmenge der Jahre 2019-2021 in den Kulturen Weißkohl und Spinat

	2019		2020		2021	
	Nieder-schlag [L/m ²]	Bereg-nung [L/m ²]	Nieder-schlag [L/m ²]	Bereg-nung [L/m ²]	Nieder-schlag [L/m ²]	Bereg-nung [L/m ²]
Weißkohl	95	193	83	258	147	128
Spinat	50	120	71	95	49	93

2.4.3.1.5 Bodenproben

Die notwendigen Bodenproben wurden am Standort in den entsprechenden Tiefen entnommen und zur Analyse zur BOLAP GmbH (BOLAP GmbH, Obere Langgasse 40, 67346 Speyer) gegeben.

2.4.3.1.6 Flächenkennwerte

Die Versuchsserien wurden auf drei unterschiedlichen Flächen durchgeführt. In Tabelle 2.4-6 sind die Bodenanalysen dieser Flächen angegeben. Der Standort ist geprägt von hohen pH-Werten und hohen bzw. sehr hohen P-Gehalten.

Tabelle 2.4-6: Boden-Analyseergebnisse der Versuchsfelder der Jahre 2019-2021

Fläche	P [mg P ₂ O ₅ /100g]	K [mg K ₂ O/100g]	Mg [mg MgO/100g]	pH [CaCl ₂]	Humusgehalt [%]	Bodenart
2019/2020	89	18	8	7,6	1,9	lehmiger Sand
2020/2021	53	12	7	7,7	1,3	lehmiger Sand
2021	44	15	7	7,8	1,1	schluffiger Lehm

2.4.3.1.7 Pflanzenproben

Die Pflanzenproben wurden am Standort bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und zur Analyse an das Institut für Agrar- Umweltanalytik (Institut für Agrar- & Umweltanalytik, Querfurter Str. 9, D-06632 Freyburg (Unstrut)) zur Analyse geschickt.

2.4.3.1.8 Düngemittel

Im Laufe der drei Versuchsjahre standen nicht immer alle Düngemittel zur Verfügung. In der nachfolgenden Tabelle sind die eingesetzten Düngemittel mit ihren Inhaltsstoffgehalten dargestellt. Haarmehlpellets und KleePura wurden 2019 nicht untersucht.

Tabelle 2.4-7: Gesamt-Stickstoffgehalt und Gesamt-Kohlenstoffgehalt der am Queckbrunnerhof verwendeten Düngemittel

Düngemittel	2019		2020		2021	
	Ges. N [% in FM]	Ges. C [% in FM]	Ges. N [% in FM]	Ges. C [% in FM]	Ges. N [% in FM]	Ges. C [% in FM]
Haarmehlpellets	13,5	-	12,56	44,64	12,66	44,72
Luzernesilage	1,24	20,03	2,49	18,83	0,96	18,28
KleePura	3,5	-	3,14	34,88	2,615	35,11
Tofumolke	0,121	-	0,078	0,01	0,094	-
Luzerneheu	1,41	41,24	Nicht eingesetzt		Nicht eingesetzt	
Luzerne Frisch	Nicht eingesetzt		0,82	10,28	Nicht eingesetzt	
Kleegrass frisch	Nicht eingesetzt		Nicht eingesetzt		0,61	8,85

Das Produkt Tofumolke trennte sich während der Lagerung in zwei Fraktionen auf, in eine festere, von der Konsistenz her eine quarkähnliche Phase und eine fast klare wässrige Phase. In einem ersten Schritt wurden die beiden Phasen getrennt voneinander untersucht, die festere Phase konnte jedoch nicht gleichmäßig ausgebracht werden, sodass im Folgenden vor der

Probenahme und vor dem Ausbringen die Flüssigkeit aufgerührt wurden um eine einheitliche Flüssigkeit, die mit einer Pflanzenschutzspritze gleichmäßig ausgebracht werden konnte, vorliegen zu haben. Die HMP und KleePura-Pellets wurden mit einem Kastenstreuer ausgebracht, die restlichen Düngemittel wurden Parzellengetreu abgewogen und per Hand ausgebracht und gleichmäßig verteilt.

2.4.3.1.9 SPAD-Messung

Die SPAD-Messung erfolgte mit einem SPAD-Chlorophyllmeter (Minolta SPAD 502 DL Meter). Um einen durchschnittlichen Messwert zu erhalten müssen mindestens 30 einzelne Messungen an unterschiedlichen Blättern erfolgen.

2.4.3.2 Ergebnisse

2.4.3.2.1 Weißkohl

Zum Pflanztermin wurden in der Bodenschicht 0-60 cm 122 kg N ha⁻¹ gemessen. Der ermittelte Düngebedarf belief sich daher auf 138 kg N ha⁻¹. Die gemessenen N-Mengen sanken in der Summe vom Pflanztermin bis zum Erntetermin. Auch in den tieferen Bodenschichten 30-60 und 60-90 cm sanken die N_{min}-Werte (Tabelle 2.4-15).

Tabelle 2.4-8: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils ± Standardabweichung des Weißkohls 2019.

	Gesamtaufwuchs		marktfähiger Ertrag		Erntereste	
	[dt ha ⁻¹]		[dt ha ⁻¹]		[dt ha ⁻¹]	
HMP	897,5	a ± 46,8	572,9	n.s. ± 40,9	324,6	a ± 7,1
Luzerne-Silage	764,4	b ± 71,9	471,5	n.s. ± 56,0	292,9	b ± 19,4
KleePura	840,3	ab ± 67,4	518,2	n.s. ± 60,6	322,1	ab ± 13,5
Tofumolke	870,6	ab ± 16,7	554,6	n.s. ± 21,7	316,0	ab ± 8,1
Luzerne-Heu	790,7	ab ± 51,5	478,3	n.s. ± 56,4	312,4	ab ± 18,9

Tukeys' HSD-Test. Signifikant verschiedene Werte tragen unterschiedliche Buchstaben. Signifikanzniveau α = 0,05

Alle Varianten konnten im Jahr 2019 den angestrebten Gesamtaufwuchs von 700 dt ha⁻¹ übertreffen (Tabelle 2.4-6). Den höchsten Gesamtaufwuchs erzielte die mit Haarmehlpellets gedüngte Variante mit 897,5 dt ha⁻¹, den Niedrigsten erzielte die mit Luzerne-Silage gedüngte Variante mit 764,4 dt ha⁻¹, diese unterschied sich signifikant von der Haarmehlpellets-Variante. Diese Unterschiede wurden auch in den Ernteresten festgestellt. Die vermarktungsfähigen Erträge unterschieden sich nicht signifikant, wobei auch hier die HMP-Variante die größten Erträge erzielte.

Zur Pflanzung im Jahr 2020 wurden in der Bodenschicht 0-60 cm 91 kg N ha⁻¹ gemessen (Tabelle 2.4-14), somit wurde der Düngebedarf auf 169 kg N ha⁻¹ festgelegt.

Tabelle 2.4-9: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils \pm Standardabweichung des Weißkohls 2020.

	Gesamtaufwuchs [dt ha ⁻¹]			marktfähiger Ertrag [dt ha ⁻¹]			Erntereste [dt ha ⁻¹]		
Kontrolle	538,5	b	$\pm 133,5$	314,6	c	$\pm 59,4$	223,9	n.s.	$\pm 74,8$
HMP	803,3	a	$\pm 73,3$	507,8	a	$\pm 33,7$	295,5	n.s.	$\pm 39,7$
Luzerne-Silage	644,5	ab	$\pm 131,5$	386,6	abc	$\pm 51,7$	257,9	n.s.	$\pm 80,2$
KleePura	802,5	a	$\pm 74,3$	483,2	ab	$\pm 34,1$	319,3	n.s.	$\pm 40,7$
Tofumolke	681,7	ab	$\pm 109,7$	396,5	abc	$\pm 40,0$	285,2	n.s.	$\pm 70,0$
Luzerne-Frisch	570,8	ab	$\pm 154,1$	332,3	bc	$\pm 58,6$	238,5	n.s.	$\pm 96,3$

Tukeys' HSD-Test. Signifikant verschiedene Werte tragen unterschiedliche Buchstaben. Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$

Im Jahr 2020 erreichten nur die HMP- und die Kleepura-Variante die angestrebten 700 dt ha⁻¹ Gesamtaufwuchs. Den höchsten Gesamtaufwuchs und den höchsten marktfähigen Ertrag wies die mit HMP gedüngte Variante, mit 803,3 bzw. 507,8 dt ha⁻¹, auf. Davon unterschied sich die KleePura-Variante mit 802,5 bzw. 483,2 dt ha⁻¹ nicht signifikant. Diese beiden Varianten unterschieden sich jedoch in beiden Merkmalen signifikant von der Kontrolle mit 538,5 bzw. 314,6 dt ha⁻¹. Die Mengen an Ernteresten unterschieden sich nicht zwischen den einzelnen Varianten.

Zum Pflanztermin im Jahr 2021 wurden 45 kg N ha⁻¹ in der Bodenprobe gemessen (Tabelle 2.4-15). Aufgrund einer überwinterten Zwischenfrucht musste bei der Düngebedarfsermittlung nochmals 20 kg N ha⁻¹ in Abzug gebracht werden, sodass der Düngebedarf auf 195 kg N ha⁻¹ festgelegt wurde.

Tabelle 2.4-10: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils \pm Standardabweichung des Weißkohls 2021

	Gesamtaufwuchs [dt ha ⁻¹]			marktfähiger Ertrag [dt ha ⁻¹]			Erntereste [dt ha ⁻¹]		
Kontrolle	621,8	n.s.	$\pm 81,3$	410,3	n.s.	$\pm 54,4$	211,5	n.s.	$\pm 27,0$
HMP	696,0	n.s.	$\pm 101,1$	447,4	n.s.	$\pm 56,2$	248,6	n.s.	$\pm 48,4$
Luzerne-Silage	753,1	n.s.	$\pm 68,9$	463,1	n.s.	$\pm 50,4$	290,0	n.s.	$\pm 28,0$
KleePura	743,8	n.s.	$\pm 112,6$	467,4	n.s.	$\pm 68,9$	276,4	n.s.	$\pm 44,5$
Tofumolke	697,3	n.s.	$\pm 126,8$	406,6	n.s.	$\pm 84,1$	290,7	n.s.	$\pm 43,0$
Kleegras-Frisch	704,5	n.s.	$\pm 42,7$	403,5	n.s.	$\pm 40,0$	301,0	n.s.	$\pm 3,2$

Tukeys' HSD-Test. Signifikant verschiedene Werte tragen unterschiedliche Buchstaben. Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$

Im Jahr 2021 unterschieden sich die Varianten in allen drei Merkmalen nicht voneinander. Wobei, außer der Kontrolle, alle Varianten annähernd die angestrebten Aufwuchsmengen erreichten bzw. leicht übertrafen.

2.4.3.2.2 Spinat

Innerhalb der einzelnen Jahre unterschieden sich die Varianten nicht voneinander. Vor allem das Jahr 2020 fällt mit einem sehr geringen Gesamtaufwuchs auf. Das lag an einem sehr starken *Phytium*-Befall in 2020, der den Bestand sehr stark ausdünnete. 2019 und 2021 wiesen mit 150 – 237 dt ha⁻¹ praxisübliche Aufwuchsmengen auf. Die Kontrolle wies in 2020 und 2021 die geringsten Aufwuchsmengen auf. Die mit Luzerne-Silage gedüngten Parzellen zeigten in allen drei Versuchsjahren die höchsten Aufwuchsmengen.

Tabelle 2.4-11: Gesamtaufwuchs \pm Standardabweichung der Zweitkultur Spinat der Jahre 2019-2021.

Variante	2019			2020			2021		
Kontrolle	-	-	-	95,7	n.s.	$\pm 35,3$	161,3	n.s.	$\pm 52,0$
HMP	160,0	n.s.	$\pm 8,5$	124,9	n.s.	$\pm 39,6$	191,8	n.s.	$\pm 90,4$
Luzerne-Silage	176,7	n.s.	$\pm 10,2$	135,8	n.s.	$\pm 17,2$	237,8	n.s.	$\pm 60,1$
KleePura	164,0	n.s.	$\pm 18,0$	120,2	n.s.	$\pm 22,6$	237,0	n.s.	$\pm 77,4$
Tofumolke	151,8	n.s.	$\pm 17,5$	126,3	n.s.	$\pm 19,4$	207,9	n.s.	$\pm 91,5$
Luzerne-Heu	173,6	n.s.	$\pm 7,5$	-	-	-	-	-	-
Luzerne-Frisch	-	-	-	116,4	n.s.	$\pm 17,7$	-	-	-
Kleegrass-Frisch	-	-	-	-	-	-	209,7	n.s.	$\pm 31,9$

Tukeys' HSD-Test. Signifikant verschiedene Werte tragen unterschiedliche Buchstaben. Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$

2.4.3.2.3 Winterweizen

Die Kornerträge der unterschiedlichen Varianten unterschieden sich innerhalb der Erntejahre 2020 (Fruchtfolge 2019-2020) und 2021 (Fruchtfolge 2020-2021) nicht voneinander (Tabelle 2.4-10). Lediglich die Stroherträge des Erntejahres 2020 unterschieden sich, wobei die Tofumolke signifikant höhere Erträge als die HMP-Variante aufwies.

Tabelle 2.4-12: Kornertrag und Strohertrag \pm Standardabweichung der Erntejahre 2020 und 2021.

Jahr	2019/2020				2020/2021							
	Kornertrag		Strohertrag		Kornertrag		Strohertrag					
Variante	[dt ha ⁻¹]		[dt ha ⁻¹]		[dt ha ⁻¹]		[dt ha ⁻¹]					
Kontrolle					24,8	n.s.	$\pm 5,8$	16,0	n.s.	$\pm 4,1$		
HMP	43,3	n.s.	$\pm 0,1$	17,3	a	$\pm 0,7$	30,4	n.s.	$\pm 2,9$	20,6	n.s.	$\pm 4,7$
Luzerne-Silage	42,8	n.s.	$\pm 3,2$	18,7	ab	$\pm 1,8$	26,1	n.s.	$\pm 6,6$	15,8	n.s.	$\pm 4,4$
KleePura	42,0	n.s.	$\pm 2,0$	18,2	ab	$\pm 0,9$	34,6	n.s.	$\pm 1,5$	20,0	n.s.	$\pm 1,4$
Tofumolke	41,5	n.s.	$\pm 6,1$	22,5	b	$\pm 3,8$	24,6	n.s.	$\pm 5,1$	13,8	n.s.	$\pm 1,9$
Luzerne-Heu	45,3	n.s.	$\pm 1,6$	18,4	ab	$\pm 2,5$						
Luzerne-Frisch					24,5	n.s.	$\pm 5,9$	15,3	n.s.	$\pm 2,8$		

Tukeys' HSD-Test. Signifikant verschiedene Werte tragen unterschiedliche Buchstaben. Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$

2.4.3.2.4 SPAD-Messungen

Im Weißkohl wurden jeweils zum Zeitpunkt der beginnenden Kopfbildung SPAD-Messungen durchgeführt. Im Jahr 2019 und 2021 gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten im Jahr 2020 wies die HMP-Variante signifikant höhere Messwerte auf als die Kontrolle und die Luzerne-Frisch-Variante.

Tabelle 2.4-13: SPAD-Messwerte des Weißkohls zu Beginn der Kopfbildung \pm Standardabweichung des Weißkohls der Jahre 2019-2021.

Variante	2019			2020			2021		
Kontrolle	-	-	-	659,0	a	$\pm 19,4$	775,0	n.s.	$\pm 34,2$
HMP	818,8	n.s.	$\pm 63,5$	740,8	b	$\pm 38,4$	824,0	n.s.	$\pm 60,2$
Luzerne-Silage	869,0	n.s.	$\pm 51,1$	682,3	ab	$\pm 30,2$	805,8	n.s.	$\pm 17,7$
KleePura	800,5	n.s.	$\pm 30,2$	720,5	ab	$\pm 52,4$	799,5	n.s.	$\pm 26,4$
Tofumolke	803,0	n.s.	$\pm 62,3$	717,3	ab	$\pm 25,3$	785,5	n.s.	$\pm 17,0$
Luzerne-Heu	784,5	n.s.	$\pm 20,3$	-			-		
Luzerne-Frisch	-	-	-	657,3	a	$\pm 35,2$	-		
Kleegrass-Frisch	-	-	-	-	-	-	826,7	n.s.	$\pm 29,6$

Tukeys' HSD-Test. Signifikant verschiedene Werte tragen unterschiedliche Buchstaben. Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$

2.4.3.3 Diskussion

Das Ertragsziel von Weißkohl von 700 dt ha⁻¹ Gesamtaufwuchs wurde weitestgehend erreicht. Ob höhere Erträge möglich gewesen wären ist fraglich, da die N_{min}-Werte bereits zur Kopfbildung und vor allem zur Ernte auf einem sehr niedrigen Niveau lagen. Der angestrebte Mindestvorrat von 40 kg N ha⁻¹ in der durchwurzelteten Bodenschicht wurde unterschritten. Durch die Bodenbearbeitung und Mineralisierung der Ernterückstände des Weißkohls stand dem Spinat als Zweitkultur zumindest zur Saat ausreichend Stickstoff zur Ertragsbildung zur Verfügung. Nach der Spinaternte waren nur noch sehr geringe Mengen an Ernterückständen vorhanden, die den Winterweizen hätten versorgen können. So wurden auch nur sehr geringe Erträge erzielt. Im Jahr 2020 wurden auf den restlichen Bioflächen des Versuchsbetriebes Winterweizenenerträge von 60,0 dt ha⁻¹ und 2021 von 53,6 dt ha⁻¹ erzielt. Daher ist keine Variante, auch die mit langsam wirkenden Düngemitteln geeignet eine überjährige Fruchtfolge zu ernähren. Auf der anderen Seite sollte nach einer hoch gedüngten Gemüsekultur mit hohen Mengen an Ernterückständen eine Kultur angebaut werden, welche die freiwerdenden N-Mengen verwerten und vor Auswaschung schützen kann.

Die SPAD-Messungen sind nur eingeschränkt nutzbar, um den Ernährungszustand zu beurteilen. Zum einen benötigt man eine höher gedüngte Kontrollparzelle als Referenz und zum anderen sollte nachgedüngt werden, wenn der Messwert unter 95% des Messwertes in der Kontrollparzelle fällt (Wiesler et al. 2008, Katroschan et al. 2018). Dies war nur im Jahr 2020 der Fall, in dem die Kontrolle und die Luzerne-Frisch-Variante hätten nachgedüngt werden können. Diese beiden Varianten zeigten auch signifikant niedrigere Erträge als die HMP-Variante. Insoweit wäre die SPAD-Messung im Kohlanbau geeignet um den Ernährungszustand zu beurteilen, auf der anderen Seite fehlen im Bioanbau die schnell wirksamen N-Düngemittel die man für eine solche Düngestrategie benötigt. Lediglich Vinasse wäre hierzu geeignet.

Den Angaben der N-Gehalte bei Handelsdüngern auf der Verpackung sollte man nur eingeschränkt Vertrauen schenken. Vor allem bei einer überjährigen Lagerung der Produkte wie dies mit KleePura gemacht wurde. Durch die Lagerung kommt es zu N-Verlusten (Tabelle 2.4-15). Aber auch bei Haarmehlpellets variieren die N-Gehalte. In den drei Versuchsjahren wurden drei unterschiedliche Chargen an HMP verwendet. Bei eigenen Materialien wie z.B. bei Luzerne-Silage sind die N- und C-Gehalte auch sehr stark schwankend. Diese Produkte müssen vor dem Einsatz analysiert werden, um eine Düngebedarfsermittlung durchführen zu können. Aber auch bei den Handelsprodukten sollte der N-Gehalt regelmäßig überprüft werden.

Das Produkt Tofumolke ist in der derzeitigen Version zur Düngung nicht nutzbar. Der N-Gehalt des Gesamtproduktes ist zu gering. Im Jahr 2019 wurden die beiden Fraktionen, der Bodensatz und die wässrige Phase getrennt voneinander untersucht. Sollte es möglich sein, die beiden Fraktionen voneinander einfach zu trennen, wäre die festere Phase jedoch durchaus ein einsatzfähiger Dünger.

Tabelle 2.4-14: Analyseergebnisse der einzelnen Fraktionen der Tofumolke 2019.

Fraktion	TS [%]	Frischsubstanz		Trockensubstanz	
		Gesamt-N [%]	Gesamt-C [%]	Gesamt-N [%]	Gesamt-C [%]
Tofumolke flüssig	1,12	0,038	NA	3,36	NA
Tofumolke fester	3,43	0,301	NA	8,79	NA

2.4.3.4 Schlussfolgerungen

Werden bei einer frühen Gemüsekultur hohe Mengen an Stickstoff gedüngt, um den Bedarf der Kultur zu erfüllen und verbleiben nach der Ernte dieser Kultur hohe Mengen an Ernterückständen auf der Fläche zurück, müssen diese entweder über eine Folgekultur wie Spinat oder aber auch Salat-Arten oder über eine Zwischenfrucht genutzt bzw. in Pflanzenbiomasse gespeichert werden. Durch die intensive Nutzung der Gemüseflächen, v.a. durch die Bewässerung und durch die mechanische Unkrautbekämpfung wird der in den organischen Düngemitteln gebundene Stickstoff schnell mineralisiert und steht innerhalb eines Kulturjahres zur Verfügung. Nachfolgekulturen wie Winterweizen profitieren dann nicht mehr von einer langsam fließenden N-Quelle.

2.4.3.5 Literaturverzeichnis

- WIESLER, F., LAUN, N., ARMBRUSTER, M., 2008: Integriertes Stickstoffmanagement – eine Strategie zur wirksamen Verringerung der Gewässerbelastung im Gemüsebau. Agrarspectrum 41, 95-108.
- KATROSCHAN, K.-U., WELLHAUSEN, F., MAUSOLF, B. 2018: N-Düngung und Umsetzung der DüV im Gemüsebau Aktuelle Versuchsergebnisse aus Norddeutschland. 27. Thüringer Gemüsebautag | 12.12.2018 | LVG Erfurt

Anhang

Tabelle 2.4-15: N_{min}-Werte der Kulturfolge 2019-2020

Kultur	Datum	Entwicklungs- zustand	Variante	N _{min} [kg N ha ⁻¹]		
				0-30	30-60	60-90
Weißkohl	01.04.19	Beginn Vegetation	Mischprobe	35	80	53
	29.04.19	Pflanzung	Mischprobe	50	72	78
	19.06.19	Kopfbildung	HMP	27	35	
			Luzerne-Silage	16	35	
			KleePura	15	34	
			Tofumolke	18	30	
			Luzerne-Heu	15	27	
			HMP	22	9	27
	16.07.19	Ernte	Luzerne-Silage	22	16	30
			KleePura	19	9	22
Tofumolke			20	9	20	
Luzerne-Heu			18	7	31	
Spinat	06.08.19	Aussaart	HMP	66	51	
			Luzerne-Silage	77	55	
			KleePura	63	46	
			Tofumolke	59	46	
			Luzerne-Heu	77	50	
	05.09.19	Zwischenprobe	HMP	54	39	34
			Luzerne-Silage	62	42	24
			KleePura	104	41	24
			Tofumolke	96	42	24
	10.10.19	Ernte	Luzerne-Heu	70	43	36
			HMP	0	0	15
			Luzerne-Silage	0	0	18
			KleePura	0	0	16
			Tofumolke	0	0	14
WW	05.12.19	Ende Vegetation	Luzerne-Heu	0	0	20
			HMP	12	16	11
			Luzerne-Silage	18	16	0
			KleePura	23	12	9
			Tofumolke	26	15	0
	19.03.20	Begin Vegetation	Luzerne-Heu	27	14	0
			HMP	0	0	0
			Luzerne-Silage	0	0	0
			KleePura	0	0	0
	17.07.20	Ernte	Tofumolke	0	0	0
			Luzerne-Heu	0	0	0
			HMP	17,55	0	0
			Luzerne-Silage	20,25	0	0
			KleePura	27	0	0
17.07.20	Ernte	Tofumolke	13,5	0	0	
		Luzerne-Heu	25,65	0	0	
		Luzerne-Silage	25,65	0	0	

Tabelle 2.4-16: N_{min}-Werte der Kulturfolge 2020-2021

Kultur	Datum	Entwicklungs- stand	Variante	N _{min} [kg N ha ⁻¹]		
				0-30	30-60	60-90
Weißkohl	24.03.20	Beginn Vegetation	Mischprobe	19	25	27
			Mischprobe	42	49	27
	24.06.20	Kopfbildung	Kontrolle	5	23	30
			HMP	7	38	32
			Luzerne-Silage	6	20	28
			KleePura	7	41	38
			Tofumolke	16	35	29
			Luzerne-Frisch	4	22	27
			Luzerne-Frisch	4	4	17
	20.07.20	Ernte	Kontrolle	4	4	17
			HMP	5	7	19
			Luzerne-Silage	5	4	13
			KleePura	5	3	18
			Tofumolke	2	4	18
Luzerne-Frisch			3	3	11	
Luzerne-Frisch			3	3	11	
Spinat	24.08.20	Aussaart	Kontrolle	30	12	15
			HMP	48	17	17
			Luzerne-Silage	31	11	11
			KleePura	52	17	18
			Tofumolke	36	12	14
			Luzerne-Frisch	39	11	12
			Luzerne-Frisch	39	11	12
	05.10.20	Ernte	Kontrolle	6	6	10
			HMP	8	9	10
			Luzerne-Silage	4	5	6
			KleePura	6	9	10
			Tofumolke	5	8	11
			Luzerne-Frisch	3	4	7
			Luzerne-Frisch	3	4	7
WW	16.11.20	Ende Vegetation	Kontrolle	17	13	9
			HMP	21	19	12
			Luzerne-Silage	18	11	7
			KleePura	32	17	8
			Tofumolke	22	12	10
			Luzerne-Frisch	20	12	9
			Luzerne-Frisch	20	12	9
	23.03.21	Beginn Vegetation	Kontrolle	5	5	5
			HMP	5	5	8
			Luzerne-Silage	5	5	4
			KleePura	5	5	11
			Tofumolke	5	5	5
			Luzerne-Frisch	5	5	5
			Luzerne-Frisch	5	5	4
	19.07.21	Ernte	Kontrolle	6	5	3
			HMP	7	6	2
			Luzerne-Silage	14	3	2
			KleePura	13	4	5
			Tofumolke	7	6	2
			Luzerne-Frisch	14	2	3
			Luzerne-Frisch	14	2	3

Tabelle 2.4-17: N_{min}-Werte des Jahres 2021

Kultur	Datum	Entwicklungszustand	Variante	N _{min} [kg N ha ⁻¹]		
				0-30	30-60	60-90
Weißkohl	23.03.21	Beginn Vegetation	Mischprobe	11	14	34
	19.04.21	Pflanzung	Mischprobe	27	18	35
	14.06.21	Kopfbildung	Kontrolle	5	21	26
			HMP	23	33	
			Luzerne-Si- lage	24	33	
			KleePura	9	20	
			Tofumolke	12	36	
			Kleegras- Frisch	35	24	
	13.07.21	Ernte	Kontrolle	4	7	22
			HMP	4	4	13
			Luzerne-Si- lage	6	7	7
			KleePura	4	4	8
			Tofumolke	5	4	6
			Kleegras- Frisch	5	4	8
Spinat	25.08.21	Aussaat	Kontrolle	37	19	6
			HMP	77	21	12
			Luzerne-Si- lage	66	25	10
			KleePura	66	14	6
			Tofumolke	55	23	7
			Kleegras- Frisch	72	11	6
	29.09.21	Ernte	Kontrolle	11	12	7
			HMP	11	16	8
			Luzerne-Si- lage	12	14	7
			KleePura	9	14	6
			Tofumolke	13	12	6
			Kleegras- Frisch	9	16	6

2.4.4 Ergebnisse des Systemversuchs Cut & Carry in Gülzow (LFAMV)

2.4.4.1 Einleitung

Ein Ansatz zur Erhöhung des N-Inputs und der N-Nutzungseffizienz von Stickstoff aus biologischer N₂-Fixierung ist das sogenannte Cut & Carry Verfahren. Cut & Carry (C&C) steht zunächst für den Transfer von pflanzlicher Biomasse von einer i.d.R. futterbaulich genutzten Geberfläche auf eine Nehmerfläche. Hauptziele können u.a. der Nährstofftransfer auf die Nehmerfläche oder positive phytosanitäre sowie bodenphysikalische Wirkungen durch die Ausbringung als Mulchauflage sein. Die größtmögliche N-Düngewirkung der Transferbiomasse ist hingegen mit der Einarbeitung von jungem Pflanzenmaterial mit niedrigem C/N-Verhältnis zu erzielen. Da es in den meisten Betriebsszenarien nicht möglich ist schnittreife Biomasse mit

einer einarbeitungsfähigen Kultur zu synchronisieren, kommt es häufig zu einer Mischnutzung des anfallenden Schnittguts. Die Auswirkungen von C&C beschränken sich aber keineswegs nur auf die Nehmerfläche: Die Entfernung der Biomasse stellt auf der einen Seite eine erhebliche Nährstoffabfuhr dar, die jedoch idealerweise zu großen Teilen durch biologische Fixierung gedeckt wird. Die Biomasseabfuhr kann ferner in Abhängigkeit vom Gemeinetypp, der Witterung und der Schnitthäufigkeit zu einer substantziellen Erhöhung der N₂-Fixierungsleistung (Hatch et al., 2007; Katroschan und Stützel, 2017; Stinner et al., 2008) sowie Verringerung der Lachgasemissionen (Larsson et al., 1998) führen. Die nach Umbruch des Gemenges auftretende Vorfruchtwirkung betrifft ebenfalls die Geberfläche und kann in begrenztem Umfang über den Umbruchzeitpunkt in ihrer Höhe gesteuert werden. Um den betrieblichen N-Input aus N₂-Fixierung zu steigern und auch die positiven Zwischenfruchteffekte der Geberfläche zu nutzen, kann es sinnvoll sein diese in die gemüsebauliche Fruchtfolge zu integrieren. Um dieses komplexe Zusammenspiel von Geber- und Nehmerflächen und deren pflanzenbauliche und produktionsökologische Wirkungen längerfristig und über eine gesamte Fruchtfolge zu untersuchen, wurde auf den Flächen der LFA im Rahmen des Projekts ein Dauerversuch angelegt. Der Versuch stellt einen Systemvergleich zwischen einer stark handelsdüngerreduzierten C&C-Variante, einem einfach gemulchtem Klee gras bei mäßiger Reduzierung des Handelsdüngereinsatzes und einem „herkömmlichen“ leguminosenfreien und vollständig handelsdüngerbasierten Referenzsystem dar. Ziel war die Überprüfung der folgenden Hypothesen:

- (1) Substantziell höhere N₂-Fixierungsleistung bei C&C im Vergleich zu gemulchtem Klee gras durch Abfuhr des Schnittguts
- (2) Höhere Nutzungseffizienz des fixierten Stickstoffs bei C&C im Vergleich zu gemulchtem Klee gras durch gezielten Schnittguttransfer zu N-bedürftigen Fruchtfolgefeldern und der Option der Schnittgutearbeitung (Indikatoren: Herbst-N_{min}, N-Bilanzensaldo etc.)
- (3) N-Nutzungseffizienz und betriebswirtschaftliche Parameter bei C&C längerfristig vergleichbar mit auf organischen Handelsdüngern basierenden Anbausystemen
- (4) Positive Wirkung des Klee grasses auf für die Bodenfruchtbarkeit relevante Bodenfunktionen (C_{org} etc.) mit besonderer Relevanz bei intensiven gemüsebaulichen Fruchtfolgen

2.4.4.2 Material und Methoden

2.4.4.2.1 Standort

Siehe 2.3.2.3 Versuche in Norddeutschland

2.4.4.2.2 Versuchsaufbau

Der Versuch hat eine Größe von 43 m x 48 m und wurde im Split-Plot Design mit 2 Flächenwiederholungen angelegt. Die vier Start-Fruchtfolgefelder wurden als Main-Plot und die Anbausysteme als Sub-Plot definiert. Aufgrund der örtlichen Schlagstruktur, den nötigen Fahr gassen und Arbeitswegen, ergibt sich hieraus eine Parzellengröße von 36 m². Das anfallende Schnittgut der Klee grasparzellen von C&C wurde innerhalb des Systems zu den potenziellen

Nehmer-Fruchtfolgefeldern „Porree“ und „Salat+Brokkoli“ transferiert. Aufgrund dieses Stoffaustauschs sind die jeweiligen Fruchtfolgefelder von C&C im Gegensatz zu herkömmlichen Fruchtfolgeversuchen als abhängig zu betrachten.

Tabelle 2.4-18: Übersicht der Varianten und der Fruchtfolge.

Faktor	Faktorstufe
Anbausystem	1. Klee gras Cut & Carry (C&C)
	2. Klee gras Mulchnutzung (Mulch)
	3. Leguminosenfrei, 100% organischer Handelsdünger (OHD) als Haarmehlpellets
Start-Fruchtfolgeglied	1. Klee gras/Winterweizen + Rauhafer
	2. Porree
	3. Salat + Brokkoli
	4. Rote Bete

Rote Pfeile kennzeichnen Verteilung des Transfermulchs im C&C-System auf parallel stehende Fruchtfolgefelder.

2.4.4.2.3 Probenahme und Analytik

Bodenproben

Zum jeweiligen Kulturbeginn (0–90 cm), nach Kulturrende bzw. zum Umbruch (0–90 cm) und als zusätzlichen Herbstkontrolltermin beim Klee gras (0–90 cm):

- Nmin (Summe aus Nitrat- und Ammoniumstickstoff; VDLUFA Nmin-Methode)

Nur Kulturrende bzw. Herbstkontrolltermin Klee gras:

- Corg (durch Verbrennung und Gasanalyse), Nt (nach Kjeldahl), pH (elektrometrisch in CaCl₂-Suspension), P (photometrisch; NaHCO₃-Auszug) und K (spektrometrisch; CaCl₂-Auszug)
- Mo (photometrisch; Heißwasserextrakt), Smin (Emissionsspektrometrie mit ICP-OES)

Pflanzenproben

- Gesamtaufwuchs- und Ertragsfrischmasse (Gemüsekulturen, Getreide, Klee gras zu jedem Schnitt)
- Marktfähiger Ertrag, bzw. Qualitätsparameter/Sortierung (Gemüsekulturen)
- TS- und Nt-Gehalt in Ertrags- und Ernterestbiomasse, bzw. Klee grasschnittgut zu jedem Schnitt (TS bei 70°C, Nt durch Verbrennungsmethode nach Dumas)
- Separate TS-Gehalte des letzten Klee grasschnitts für die Fraktionen Klee, Gras und Beikraut

2.4.4.2.4 Kulturführung

Zur Bemessung der organischen N-Düngung wurde ein pauschales Schema entwickelt (Tabelle 2.4-19). Ziel des Schemas war die Gewährleistung einer möglichst vergleichbaren N-Versorgung der Kulturen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen N-Mineralisierungen der N-Quellen. Verfälschungen der N-Aufnahme bzw. N-Nutzungseffizienz durch mangelbedingte Stressreaktionen als auch mangelnde Differenzierung durch insgesamt N-gesättigte

Bestände galt es zu vermeiden. Bis zur Differenzierung zwischen den Anbausystemen durch die erste Klee-grasvorkultur (Umbruch Frühjahr 2020) bzw. Zufuhr von Transfermulch erfolgte die Düngung entsprechend des *OHD*-Systems. Das erste Fruchtfolgefeld (Klee-gras bzw. Winterweizen/Rauhafer) erhielt keine zusätzliche N-Düngung. Phosphor, Kalium, Magnesium, Schwefel und Kalk wurden jeweils im Frühjahr nach Bedarf ganzflächig mit Patent-Kali, Dolophos 15 und Naturkalk gedüngt.

Tabelle 2.4-19: N-Zufuhr mit Haarmehlpellets (HMP)

Kultur	Düngung	System		
		C&C	Mulch [kg HMP-N ha ⁻¹]	OHD
Porree	1. Gabe			50
	2. Gabe	50	100	150
Kopfsalat		100	100	100
Brokkoli	1. Gabe		100	100
	2. Gabe	100	100	100
Rote Bete	1. Gabe	50	50	50
	2. Gabe	90	90	90
Summe		390	540	640
% von OHD		-39%	-16%	100%

C&C Cut & Carry, OHD organische Handelsdünger = Haarmehlpellets

Die Grundbodenbearbeitung erfolgte, sofern die Fläche befahrbar war, gekoppelt an die Fruchtfolgestellung mittels Pflug:

Pflug (Sommer) → Klee-gras/WW+WZF → Umbruch (Frühjahr): 2x Scheiben oder Unterschneiden + Pflug oder Fräse → Porree → Brache (Winter) → Pflug (Frühjahr) → Salat → Scheiben + ggf. Kreiselegge oder Fräse → Brokkoli → Pflügen (Herbstfurche) → Kreiseln → Direktsaat Rote Bete

Das Klee-gras (Camena 'Rotklee-gras 83'; 70:30, 25kg ha⁻¹) wurde jeweils zwischen Ende August und Mitte September sowie der Winterweizen (div. E-Weizen, 300 Korn m⁻²) flächig ge-drillt. Der Anbau der gemüsebaulichen Fruchtfolgefelder erfolgte im Anschluss beetweise. Das Fruchtfolgefeld „Porree“ wurde als Herbstporree (Bejo 'Curling F1' oder 'Blaugrüner Winter') jeweils ein bis zwei Wochen nach erfolgtem Klee-grasumbruch zwischen Ende April und Anfang Juni gepflanzt (50 x 15 cm) und vor der ersten Mulchauflage (C&C System) angehäufelt. Der Kopfsalat (Enza Zaden 'Analotta') wurde zwischen Anfang und Mitte April gepflanzt (37,5 x 35 cm). Nach erfolgter Ernte wurde der Brokkoli (Bejo 'Batavia') gepflanzt (50 x 50 cm). Die Rote Bete des letzten Fruchtfolgefelds in der Rotation (Bejo 'Boro F1') wurde jeweils Anfang April mit einer Einzelreihensämaschine direkt gesät (37,5 x 6,25 cm).

Die Beikrautregulierung erfolgte mechanisch mittels auf einem Geräteträger montierten Hackelementen, händisch oder thermisch mittels flächig arbeitendem Abflammgerät vor Auflaufen der Roten Bete. Im Freiland wurden andere Schaderreger intensiv mit den Wirkstoffen Azadirachtin, Pyrethrine, Rapsöl, *Bacillus thuringiensis*, Kupfer und Kali-Seife reguliert. Die Brokkoli Jungpflanzen wurden unmittelbar vor der Pflanzung mit Spinosad im Angießverfahren behandelt. Die Bewässerung erfolgte kulturweise nach Bedarf. Das Fruchtfolgefeld KG/WW +

WZF wurden nur während der Etablierung und in Phasen akuter Trockenheit zusätzlich berechnet.

Für die Auswertung wurden die Ergebnisse aller vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder miteinbezogen. Daraus ergibt sich ein unbalancierter Datensatz mit $n = 8$ für Klee gras/Winterweizen, $n = 6$ für Porree, $n = 4$ für Salat+Brokkoli und $n = 2$ für Rote Bete. Die Berechnung der N-Nutzungseffizienz der Gesamtfruchtfolge (NUE_{FF} ; engl. *N use efficiency*) $NUE_{FF} = \frac{N_t yield}{(N_{dfa} + N_t fert)}$ erfolgte daher mit gewichteten, globalen Mittelwerten von $N_t yield$, N_{dfa} und $N_t fert$. Die Berechnung der N-Versorgungseffizienz (NSE; engl.: *N supply efficiency*) $NSE = \frac{(N_t yield + N_t residual + N_{min} residual)}{(N_{dfa} + N_t fert + N_{min} start)}$ erfolgte getrennt für alle gemüsebaulichen Fruchtfolgefelder. Die prozentualen Anteile der N_2 -Fixierungsleistung (N_{dfa} ; engl.: *N derived from atmosphere*) am Gesamt- N_t im Schnittgut (Tabelle 2.4-18) wurde mittels linearer Regression aus den Annahmen in Tabelle 2.4-20 geschätzt. Die statistische Auswertung erfolgte in R (Version 4.1.3).

Tabelle 2.4-20: Annahmen zur Schätzung der N_2 -Fixierungsleistung (N_{dfa}).

Schnitt	Leguminosen [%] ²	Leguminosen [%]	N_{dfa} in Gras [%] ¹	N_{dfa} in Leguminosen [%] ¹	
				Abfuhr	Verbleib
Schröpf	20	99	25	80	60
1.	50
2.	60	20	0	95	80
3.	65				
4.	händisch fraktioniert				

¹Bachinger et al., 2013

²gerundete Annahmen aus Klee grasfraktionierungen des gleichen Gemenges aus „Satellitenversuch Klee grasnutzung“ (AP 4)

Tabelle 2.4-21: Mittels linearer Regression aus Annahmen in Tabelle 2.4-18 berechnete N_{dfa} -Anteile am pflanzlichen Gesamtstickstoff (N_t) über Schnitthöhe bzw. oberirdisch.

	Mulchabfuhr (C&C)	Mulchverbleib (Mulch)	
N_{dfa} Hauptnutzungs jahr			
Schröpfschnitt		14	
1. Schnitt	43	43	[%] von Biomasse- N_t über Schnitthöhe
2. Schnitt	53	45	
3. Schnitt	58	49	
N_{dfa} Umbruch			
4. Schnitt	58	49	[%] von oberirdischem Biomasse- N_t
		+	
Wurzel/Stoppel		29	[%] von Wurzel-/Stoppel-Biomasse- N_t
davon N_{dfa}	17	14	

2.4.4.3 Ergebnisse

Die Roherträge (Abbildung 2.4-10) der untersuchten Anbausysteme bewegten sich auf vergleichbarem Niveau. Ein ungepaarter t-test ergab keine signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen C&C- bzw. *Mulch*-System und *OHD*-System als Referenz. Auch die mittleren N-Abfuhr (

Tabelle 2.4-21) bewegten sich bei den untersuchten Anbausystemen auf einem ähnlichen Niveau. Die Brutto-N-Zufuhren von C&C lagen deutlich über denen von *OHD*. Die höchste N-Zufuhr trat mit 477 kg N ha⁻¹ bei C&C beim Fruchtfolgefeld Porree durch Klee-grasvorfrucht-N und 2 x Transfermulch-N auf. Die N-Salden der Systeme unterschieden sich in der Rangfolge *OHD*>*C&C*>*Mulch*. Erwähnenswert ist, dass das mittlere Start-N_{min}-Niveau der klee-grasbasierten Systeme *Mulch* und C&C 10 bzw. 14 kg N_{min} ha⁻¹ über *OHD* liegt. Das Ernte-N_{min}-Niveau fiel hingegen nur bei C&C um 14 kg N_{min} ha⁻¹ höher als bei *OHD* aus.

Das ausschließlich mit Haarmehlpellets gedüngte Variante *OHD* erreichte die höchste N-Effizienz von 0,60. Die stark HMP-reduzierte Variante C&C erzielte mit im Mittel 0,52 eine höhere NUE als die mäßig HMP-reduzierte *Mulch*-Variante mit einer NUE von 0,49 (Abbildung 2.4-10).

Die N-Versorgungseffizienz (NSE) der einzeln betrachteten Fruchtfolgefelder bewegten sich zwischen 0,7 und 1,6. Während die NSE von C&C bei allen Fruchtfolgefeldern geringfügig über *Mulch* liegt und ansonsten parallel verläuft, unterscheidet sich die NSE von *OHD* insbesondere bei Porree (Abbildung 2.4-12). Porree war das Fruchtfolgefeld mit der am stärksten differenzierten N-Zufuhr (C&C Porree: -75 % HMP + Klee-grasvorfrucht und Transfermulch als Auflage).

Die Qualitätsparameter der Klee-grasbiomasse „N-Konzentration“ und „C/N-Verhältnis“ unterschieden sich erst zum letzten Schnitt, unmittelbar vor Umbruch, signifikant zwischen C&C und *Mulch* (Tabelle 2.4-23).

Die gewichteten Mittelwerte aller gemessenen C_{org}-Konzentrationen [% TM] der Fruchtfolge und deren Standardabweichungen betragen 0,81 ± 0,13 (*OHD*); 0,88±0,3 (*Mulch*) und 0,86 ± 0,31 (C&C). Eine ANOVA ergab keine signifikanten Mittelwertunterschiede. Analog betragen die P₂O₅-Konzentrationen [mg/100g TM] 19,45 ± 3,08 (*OHD*); 19,38 ± 6,45 (*Mulch*) und 17,75 ± 5,97 (C&C). Eine ANOVA ergab auch hier keine signifikanten Mittelwertunterschiede.

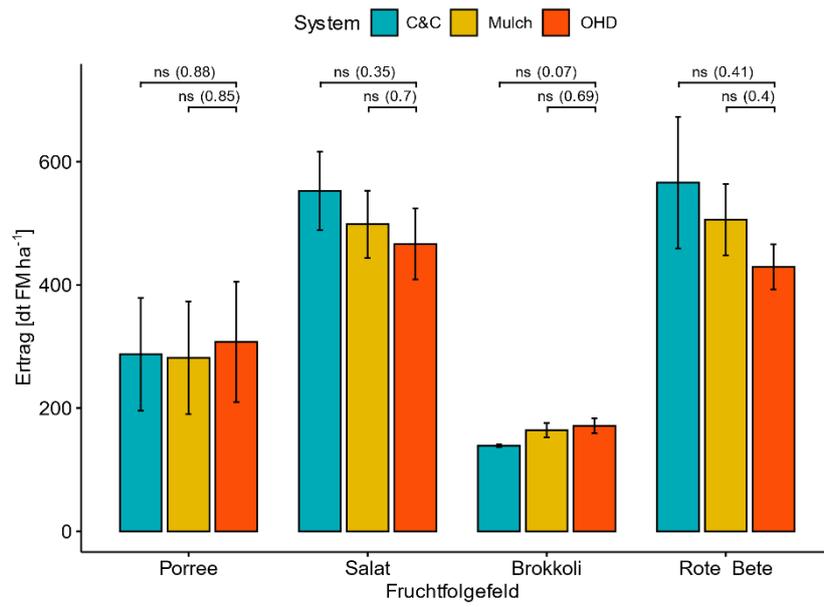


Abbildung 2.4-10: Erträge der vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder und Wiederholungen. Fruchtfolgefeld (in Klammern: n der Datensätze): Porree (6), Salat (4), Brokkoli (4), Rote Bete (2).

Tabelle 2.4-22: N_{min}, N-Zufuhr, N-Abfuhr und N-Saldo aller vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder und Wiederholungen. Fruchtfolgefeld (n der Datensätze): Porree (6), Salat (4), Brokkoli (4), Rote Bete (2).

	N _{min} (0-90 cm)		N-Zufuhr		Brutto-Ge- samt-N [kg N ha ⁻¹]	N-Abfuhr [kg N _t ha ⁻¹]	N-Saldo [kg N ha ⁻¹]
	Start [kg N _{min} ha ⁻¹]	Ernte	Transfer- mulch-N [kg N _t ha ⁻¹]	N ₂ fix [kg N ha ⁻¹]			
OHD							
WW	39	29	0	0	0	76	-65
Porree	15	46	0	0	200	105	29
Salat	54	38	0	0	100	90	26
Brokkoli	47	39	0	0	200	73	135
Rote Bete	36	27	0	0	140	80	69
MW	38	38	0	0	128	87 ¹	33
Mulch							
Kleegras	37	13 ²	0	137	137	0	161
Porree	14 ²	47	125	61	225	98	94
Salat	69	50	0	0	100	102	18
Brokkoli	60	46	0	0	200	72	143
Rote Bete	65	33	0	0	140	92	80
MW	49	36	25	40	160	90 ¹	93
C&C							
Kleegras	42	14 ²	0	148	148	336	-159
Porree	15 ²	75	427	120	477	96	321
Salat	76	74	0	0	100	114	-12
Brokkoli	74	54	109	0	209	60	169
Rote Bete	57	36	0	0	140	101	61
MW	53	51	107	54	215	93 ¹	77

¹nur Gemüsekulturen ²N_{min} unmittelbar vor Kleegrasumbruch

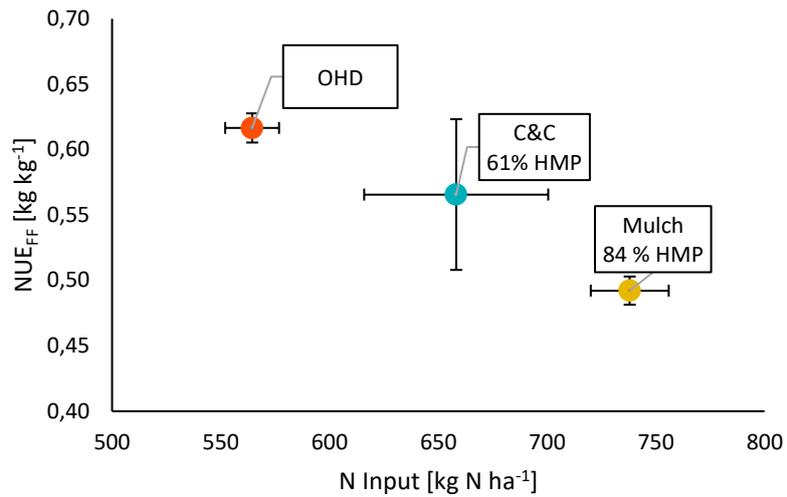


Abbildung 2.4-11: Mittlere N-Nutzungseffizienz der jeweiligen Gesamtr Fruchtfolge (NUE_{FF}) mit Standardabweichung. Berücksichtigt wurden alle vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder.

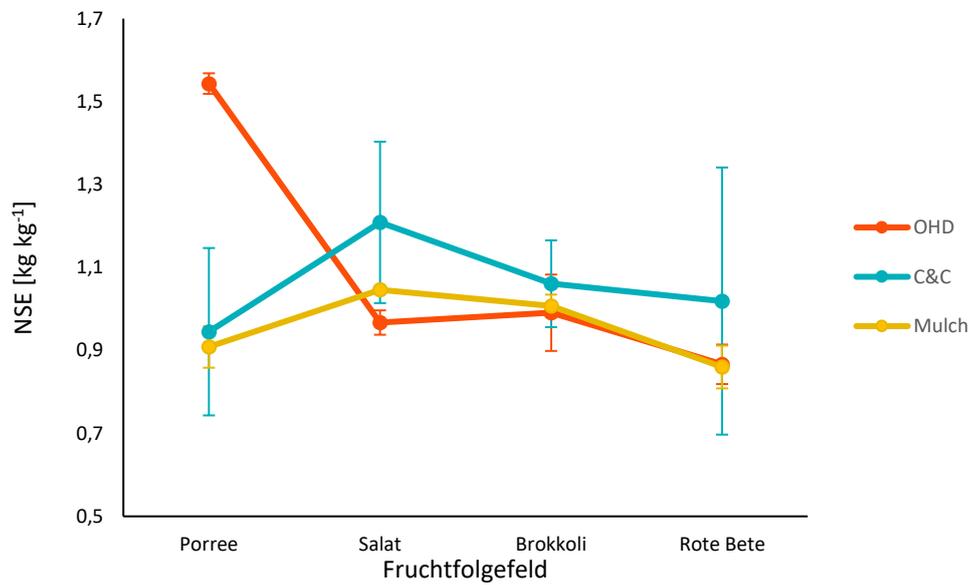


Abbildung 2.4-12: Mittlere N-Versorgungseffizienz (NSE) der Fruchtfolgefelder der Systeme mit Standardabweichungen..

Tabelle 2.4-23: N-Konzentration und C/N-Verhältnis der oberirdischen Klee grasbiomasse sowie geschätzte N₂-Fixierungsleistung für einzelne Schnitttermine bei Schnittgutabfuhr (C&C) und Mulchnutzung (Mulch).

System/ Schnitt	N-Konzentration [% TM]		C/N-Verhältnis		N ₂ -Fixierungsleistung	
	C&C	Mulch	C&C	Mulch	C&C	Mulch
1	2,0 ^a	2,0 ^a	23,1 ^a	23,2 ^a	51,9 ^a	47,1 ^a
2	2,8 ^a	2,9 ^a	16,1 ^a	15,7 ^a	60,3 ^a	51,6 ^a
3	3,2 ^a	3,1 ^a	14,1 ^a	14,5 ^a	32,5 ^a	33,9 ^a
4	2,0 ^a	1,4 ^b	21,8 ^a	31,6 ^b	69,7 ^a	35,5 ^b

Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Systemen (α -Niveau = 0,05; Tukey-HSD-Test).

2.4.4.4 Diskussion

Über den Versuchszeitraum 2018-2022 wurden im Hauptnutzungsjahr keine substantiell höheren, N₂-Fixierungsleistungen des C&C Klee grasses im Vergleich zur gemulchten Variante *Mulch* festgestellt. Im Jahr des Umbruchs war die geschätzte N₂-Fixierungsleistung von C&C jedoch signifikant höher als bei *Mulch*. Dies steht im Einklang zu Ergebnissen vorangegangener Studien (Moyo et al., 2015) und des zeitlich parallel durchgeführten Satellitenversuchs Klee grassnutzung (AP 4), die eine nennenswerte Differenzierung der Fixierungsleistung zwischen Schnittgutverbleib und Schnittgutabfuhr erst nach dem ersten Nutzungsjahr feststellten. Da die N₂-Fixierungsleistung geschätzt und nicht direkt gemessen wurde, sei an dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Aussage maßgeblich von den Annahmen in Tabelle 2.4-18 abhängig ist. Dass sich die N-Konzentrationen und C/N-Verhältnisse zum letzten Schnitt ebenfalls signifikant zwischen den Managementvarianten unterschieden, lässt die stärkere Differenzierung jedoch zusätzlich plausibel erscheinen.

Die herausgelöste Betrachtung einzelner Fruchtfolgefelder von C&C, die unmittelbar Transfermulch erhalten haben (Porree und Salat + Brokkoli), legt zunächst nahe, dass die N-Nutzungseffizienz noch unter der von *Mulch* liegt. Die aus diesem Versuch gewonnene N-Nutzungseffizienz der Gesamtfruchtfolge NUE_{FF} zeigt jedoch, dass durch den gezielten Transfer von Schnittgut zu N-bedürftige Kulturen in C&C und deren Nachlieferungen die NUE_{FF} im Vergleich zu *Mulch*, bei gleichzeitig reduziertem OHD-Einsatz, gesteigert wurde. Die substantiell erhöhten Ernte-N_{min}-Niveaus nach den transfermulchgedüngten Fruchtfolgefeldern Porree und Salat sollten bei der Fruchtfolgeplanung entsprechend Berücksichtigung finden. Der letzte Klee grassschnitt im Hauptnutzungsjahr stellte eine planerische Herausforderung im hier angedachten, geschlossenen (kein Transfermulch aus- und -eintrag) Versuchsdesign dar. Das niedrige C/N-Verhältnis und der hohe N-Gehalt versprechen eine hohe N-Verfügbarkeit, zum entsprechenden Zeitpunkt kommt als Nehmerfläche nur noch Porree in Frage, dessen N-Aufnahme jedoch weitestgehend abgeschlossen ist. Diese Problematik führt zusammen mit der mutmaßlich geringeren Effizienz der Auflagemulchung des zweiten Schnitts zu der im Vergleich zu den anderen Systemen niedrigen NSE. Die daraus resultierende, erhöhte N-Nachlieferung von C&C wird anhand der sprunghaft ansteigenden NSE des darauffolgenden Salats deutlich. Da diese

N-Nachlieferung zum Teil in die Sickerwasserperiode fällt, besteht an dieser Stelle ein erhöhtes Auswaschungsrisiko. In der Praxis sollte daher sehr genau abgewogen werden, ob für diesen letzten Schnitt andere Verwertungsoptionen (z. B. Biogas, Silage oder Kompost) zur Verfügung stehen, noch eine Winterzwischenfrucht als „catch-crop“ etabliert werden kann oder dieser Schnitt in situ auf der Geberfläche verbleiben sollte.

Das Cut & Carry Verfahren bedeutet zweifelsfrei einen erheblichen planerischen Mehraufwand. Bei Berücksichtigung der hier gewonnenen Erkenntnisse kann der Einsatz von N-Zukaufdüngemitteln jedoch erheblich reduziert werden. Eine betriebswirtschaftliche Bewertung kann nur betriebsindividuell erfolgen, da hierfür die jeweilige Flächenausstattung, die übrige Fruchtfolgegestaltung sowie bereits vorhandene futterbauliche Technik ausschlaggebend sein dürften.

2.4.4.5 Literatur

- Bachinger, J., Reckling, M., Stein-Bachinger, K., 2013: N-Saldo Rechner (ZALF e.V.).
- Hatch, D.J., Goodlass, G., Joynes, A., and Shepherd, M.A., 2007: The effect of cutting, Mulching and applications of farmyard manure on nitrogen fixation in a red clover/grass sward. *Bioresource Technol* 98, 3243–3248.
- Katroschan, K.-U., Stützel, H., 2017: Narrow-leaved lupine as an N source alternative to grass-clover swards in organic vegetable rotations. *Biol Agric Hortic* 33, 1–18.
- Larsson, L., Ferm, M., Kasimir-Klemetsson, A., Klemetsson, L., 1998: Ammonia and nitrous oxide emissions from grass and alfalfa Mulches. *Nutr Cycl Agroecosys* 51, 41–46.
- Moyo, H., Davies, W.P., Cannon, N.D., und Conway, J.S., 2015: Influences of two-year red clover-grass ley management on nitrogen economy and following wheat performance. *Biol Agric Hortic* 32, 98–109.
- Stinner, W., Möller, K., Leithold, G., 2008: Effects of biogas digestion of clover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. *Eur J Agron* 29, 125–134.

2.4.5 Ergebnisse Gewächshausversuche in Bamberg (LWG)

2.4.5.1 Versuchsfrage und Versuchshintergrund

Auf die Ertragsbildung bei Paprika hat neben der Düngung vor allem auch das Licht- und Wärmeangebot einen entscheidenden Einfluss. Wie wirken sich unterschiedliche organische Düngemittel auf den Paprikaertrag aus? Wie schlägt sich eine ungleichmäßige Wärme- und Lichtverteilung in einem Gewächshaus im Ertrag der Einzelpflanzen nieder?

2.4.5.2 Kultur- und Versuchshinweise

Aussaat: 15.01.2020 in 7er Erdpresstöpfe, Bio-Presserde der Firma Klasmann-Deilmann.

Pflanzung: 10.3.2020, T/N 20/18 °C, L 25 °C; ab 08.04.2020 Vornacht 15°C, L 17°C für 3 h 1 h nach SU, T/N 22/18, L 25 °C; zweitriebig aufgeleitet.

Tabelle 2.4-24: N-Gehalt in FM der Grunddüngung mit 70 kg N ha⁻¹ als Kleepura, Kleegrassilage und Horngries nach Versuchsplan

Var.	Düngemittel	N-Gehalt
1	Kleepura	3,9%
2	Kleegrassilage	1,07 %
3	Standard Horngries	14,6%

Versuchsanlage: Blockanlage mit drei Wiederholungen, Parzellengröße 18,2 m²; Nullvariante aus Platzgründen unwiederholt im vorderen Rand.

Tabelle 2.4-25: Einfluss der Dünger auf die Nmin-Gehalte, kulturbegleitend:

	Null	Kleepura	Silage	Horngries
KW 13	156	178	189	240
KW 15	237	266	338	272
KW 17	229	240	278	194
KW 19	252	308	300	293
KW 21	164	189	185	185
KW 23	142	167	185	197
KW 25	106	128	164	181
KW 27	90	256	256	306
KW 29	145	230	260	258
KW 31	79	173	112	154
KW 33	60	113	66	184
KW 35	47	143	133	108
KW 37	96	146	137	125
KW 38	47	100	121	95

Bewässerung: alle 2000 J/cm² 2l/m², 450 l/m² im Kulturverlauf

Pflanzenschutz: Nützlingseinsatz mit offener Zucht vorbeugend, *Crysoperla* gegen Blattläuse bei Befall

Erntezeitraum: 25.05.2020 bis 30.09.2020, ein Erntegang pro Woche



Abbildung 2.4-13: Schattenwurf im Bestand durch die Konstruktion des GWH.

2.4.5.3 Ergebnisse

In einem einheitlichen Spitzpaprikabestand wurden 2020 zwei Stickstoffquellen pflanzlichen Ursprungs, Kleepura und betriebseigene Kleegrassilage hinsichtlich Ihrer Düngewirkung mit Horn als Standard und einer aus Platzgründen unwiederholten Nullvariante verglichen. In den drei Düngevarianten wurden marktfähige Erträge von 3,24 kg/m² bis 3,68 kg/m² erzielt, die Nullvariante erreichte 2,40 kg/m² marktfähigen Ertrag (Abbildung 2.4-14).

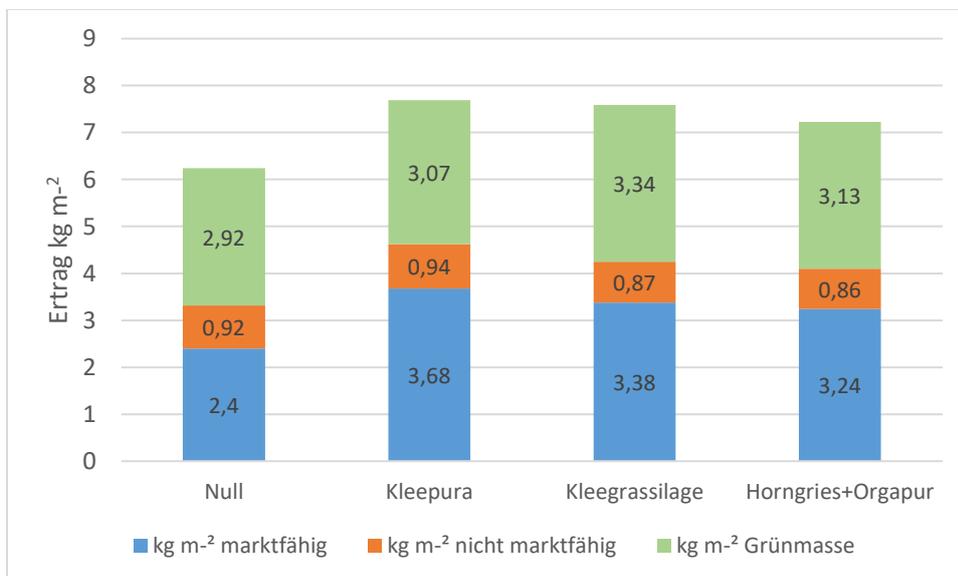


Abbildung 2.4-14: Einfluss der Düngung auf Ertrag Tomate und gebildete Grünmasse.

Bereits vor Erntebeginn fiel auf, dass der Fruchtansatz an den Pflanzen innerhalb jeder einzelnen Kulturreihe im Haus, unabhängig davon, um welche Düngungsvariante es sich handelte, sehr unterschiedlich stark war. Es wurde daraufhin eine einzelpflanzenbezogene Erfassung der Erntemengen durchgeführt.

Es zeigten sich in den Einzelreihen in Ost-West-Richtung, den Düngeparzellen folgend, relative Ertragsunterschiede zwischen den einzelnen Reihen von 27 %. Summiert man die Erträge in Längsreihen, in Nord-Süd-Richtung auf, so ergeben sich Ertragsunterschiede zwischen den Einzelreihen von 61 %. Es wurden Erträge pro Pflanze von 3 bis 35 Stück/Pflanze erreicht. Die graphische Darstellung der Einzelpflanzenenerträge zeigt den Einfluss des Lichtes auf den Ertrag deutlich. Entlang der Stehwände im Osten, Süden und Westen wurden die besten Erträge erreicht. Im Bestand waren in Längsrichtung einzelne Reihen deutlich schlechter, diese werden durch die begehbaren Rinnen in der Dachkonstruktion beschattet (Abbildung 2.4-13 und Abbildung 2.4-14). Umfangreiche Einbauten im Gewächshaus führen besonders in der Hausmitte zu einer ständigen starken Schattierung (Abbildung 2.4-13).



Abbildung 2.4-15: Gewächshaus mit umfangreichen Einbauten im Dachbereich am 9.3.2020 bei der Ausbringung der organischen Düngemittel nach Versuchsplan.

		Stk/Reihe	%	Variante	
	17 19 14 21 21 25 28 19 16 27 11 16 17 20 19 19 16 31 35 25 33 21 14 17 13 15 24	553	Rand	R	↓ N
	16 28 20 21 16 21 19 17 29 16 14 18 24 20 28 21 23 19 28 21 14 23 26 31 17 25 23	578	100%	13 Kleepura	
	18 14 12 11 29 11 14 19 19 17 15 22 14 7 22 24 10 15 17 22 11 13 22 24 18 25 21	466	81%	13 Kleepura	
	21 10 16 20 17 12 16 17 22 8 17 16 16 6 22 20 15 3 20 23 14 8 22 26 10 16 25	438	76%	23 Silage	0 bis 5
	33 23 23 18 14 19 10 14 16 7 28 22 17 13 21 15 15 10 26 20 18 19 20 21 15 26 34	517	90%	23 Silage	6 bis 12
	29 18 9 20 19 17 20 13 22 17 9 22 13 3 23 18 16 8 21 16 10 17 16 26 12 17 27	458	80%	33 Horngries	12 bis 20
	18 13 19 19 21 15 19 21 16 8 17 19 21 11 18 28 11 10 16 15 20 16 23 11 12 30 32	480	83%	33 Horngries	20 und mehr
	19 15 35 22 27 14 15 19 17 7 18 16 12 11 14 13 10 4 24 19 8 19 23 20 20 19 19	459	80%	32 Horngries	
	35 10 20 30 17 13 29 22 19 11 19 13 11 9 15 14 13 10 18 16 14 19 21 17 8 20 42	485	84%	32 Horngries	
	40 18 28 19 22 23 25 24 19 13 17 24 14 12 14 13 17 11 23 12 9 23 18 29 20 24 31	542	94%	12 Kleepura	
	28 28 21 19 24 26 14 20 16 18 17 10 21 4 25 17 16 11 10 18 5 13 19 17 20 27 29	493	86%	12 Kleepura	
	27 28 18 18 25 19 14 22 13 14 22 19 19 9 18 14 12 8 19 9 13 14 18 11 8 33 18	462	80%	22 Silage	
	25 27 20 20 24 22 20 24 17 19 17 14 13 9 22 19 6 12 19 20 5 20 24 16 18 21 21	494	86%	22 Silage	
	48 16 25 16 23 18 18 19 27 12 16 20 11 11 20 17 13 13 12 16 7 14 17 11 9 22 29	480	83%	31 Horngries	
	25 37 23 13 24 15 16 17 19 8 9 14 18 4 17 17 5 18 13 7 6 15 12 17 8 26 15	418	73%	31 Horngries	
	30 21 24 26 17 15 13 22 16 13 14 11 11 7 10 17 10 3 12 16 9 13 24 19 9 18 24	424	74%	21 Silage	
	26 10 20 24 17 12 13 19 20 12 18 19 10 6 20 10 15 10 14 13 5 18 23 31 13 23 33	454	79%	21 Silage	
	24 32 18 25 21 11 16 15 12 6 16 15 15 5 23 14 13 11 16 18 7 19 23 18 14 27 17	451	78%	11 Kleepura	
	29 12 19 28 19 22 12 12 20 10 27 13 12 10 19 18 8 16 18 13 2 12 19 9 13 20 31	443	77%	11 Kleepura	
	33 23 15 17 24 17 16 18 21 4 17 23 13 9 13 20 3 10 18 17 19 9 19 19 9 20 32	458	80%	R Null	
	33 28 19 17 28 6 13 12 16 6 13 12 6 3 17 10 6 4 12 9 4 8 17 19 9 25 37	389	Rand	R Null	
Stk/Längsreihe	574 430 418 424 449 353 360 385 392 253 351 358 308 189 400 359 253 237 391 345 233 333 420 409 275 479 564				
relativ	R 90% 87% 89% 94% 74% 75% 80% 82% 53% 73% 75% 64% 39% 84% 75% 53% 49% 82% 72% 49% 70% 88% 85% 57% 100% R				

Abbildung 2.4-16: Erträge in Stück/Einzelpflanze, absolute und relative Reihenerträge.

2.5 Düngewirkung als Interaktion von Dünger und Bodeneigenschaften

R. Kahle, H.J. Reents (TUM), A. Sradnick (IGZ) und D. Horn (BGD-BAD)

2.5.1 Einleitung

Sowohl aus wissenschaftlichen Untersuchungen als auch aus Beobachtungen und Erfahrungen der gärtnerischen Praxis ist bekannt, dass Böden eine sehr unterschiedliche Fähigkeit haben, Nährstoffe freizusetzen, insbesondere Stickstoff. Organische Dünger können somit sehr unterschiedliche N-Freisetzungsraten auf verschiedenen Standorten vorweisen (Stadler et al. 2006, Stadler und Heuwinkel 2008). Sollen die Düngergaben und damit das Düngermanagement besser an das Pflanzenwachstum angepasst werden, ist es notwendig, die Bedingungen für die unterschiedliche Stickstofffreisetzung zu verstehen. Die übliche Bodenuntersuchungsmethode zum Abschätzen des verfügbaren Stickstoffs ist die Bestimmung des Nitrat- (und Ammonium-) Gehalts in verschiedenen Bodenschichten (N_{\min} Methode). Dies stellt jedoch immer eine Momentaufnahme und das Resultat der vorangegangenen Umsetzungsprozesse dar. Zum Verständnis der Mineralisierung sollten daher weitere Bodenuntersuchungsmethoden bzw. Bodenparameter in Betracht gezogen werden, um die N-Freisetzung realistischer abschätzen und voraussagen zu können. Der Gehalt an organischem Stickstoff, der Gehalt an organischen Kohlenstoff und das C/N-Verhältnis des Bodens sowie die Aktivität der mikrobiellen Gemeinschaft sind von großer Bedeutung für die Voraussage der N-Mineralisation aus der organischen Bodensubstanz (Manzoni und Porporato 2009, Schomberg et al. 2009). Modelle, die zur Optimierung der Düngung im ökologischen Gemüseanbau eingesetzt werden können (N-Expert, NDICEA), nutzen einen Teil dieser Bodenparameter. Bei der Berechnung der N-Freisetzung nach einer organischen Düngung kann es allerdings zu erheblichen Abweichungen zwischen Modellergebnissen und der Nitratbildung im Boden kommen. D.h. die Modelle bilden die Bedingungen unzureichend ab und zusätzliche bzw. andere Informationen über die Standortbedingungen und Bewirtschaftung werden für ein besseres Ergebnis notwendig sein.

Als wichtige Eigenschaft wird die Bodenart, speziell der Tongehalt, angesehen, da der Ton maßgeblich die Wasserverhältnisse im Boden beeinflusst und gleichzeitig Oberflächen für Nährstoffaustausch und mikrobielles Wachstum liefert.

Aber auch die Düngevorgeschichte (langfristige Mistdüngung, vermehrte Gründüngung, Handelsdünger) könnte eine Ursache sein (da durch sie u.a. das Bodenmikrobiom aufgebaut wird, welches aktiv für die N-Mineralisationsprozesse verantwortlich ist). Auf der anderen Seite wird sich eine Wechselwirkung mit den Eigenschaften der organischen Dünger wie deren C/N-Verhältnis oder Herkunft des Materials ergeben (da diese die Umsetzbarkeit beeinflussen). Die beobachtbare Immobilisierung von Stickstoff aus Düngern ist ebenso Teil dieser Wechselwirkung.

Die Ziele des Arbeitspakets waren damit, Ursachen für Unterschiede im N-Freisetzungsverhalten von verschiedenen Böden und Düngemitteln zu identifizieren und Methoden zu finden, um die N-Mineralisierung besser und sicher prognostizieren können. Dabei sollen folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Mit steigendem Tongehalt sinkt die relative N-Mineralisation des Bodenstickstoffs.
2. Mit steigendem Tongehalt sinkt zunächst die Mineralisationsgeschwindigkeit des organischen Düngers.
3. Die Netto-N-Mineralisation des organischen Düngemittels ist unabhängig vom Tongehalt.
4. Das bisherige Düngemanagement hat Einfluss auf die Netto-N-Mineralisation.

2.5.2 Material und Methoden

Zentraler methodischer Ansatz waren Inkubationsversuche, in denen verschiedene Böden mit verschiedenen organischen Düngemitteln kombiniert wurden, die über einen Zeitraum von 35-88 Tage (je nach Kombination) bei einer Inkubationstemperatur von 18°C durchgeführt wurden. Die Inkubationen wurden in Brutschränken durchgeführt in denen die Probengefäße belüftet werden konnten bei gleichzeitiger Begrenzung der Wasserverdunstung. Als Maß für die Stickstofffreisetzung diente der Nitratgehalt im Boden im Laufe der Inkubation und die daraus berechnete Netto-Mineralisationsrate.

Zur Charakterisierung des Verlaufs, wurde während der Inkubationszeit mehrfach beprobt, mit einer engen Staffelung am Anfang und weiteren Abständen am Schluss.

Der Effekt der Bodenart wurde durch Bodenserien mit unterschiedlichem Tongehalt geprüft, die jeweils von einem Standort mit gleicher Bewirtschaftungsvorgeschichte (Schlag) gewonnen wurden.

Die Auswahl der Düngemittel für die Versuche orientierte sich einerseits an der Differenzierung nach C/N-Verhältnissen, um in Bezug auf die Validierung und Weiterentwicklung in N-Expert auch Immobilisierung und Re-Mineralisierung von Stickstoff abbilden zu können, andererseits an den in der Praxis üblichen sowie den in den Partnernversuchen (siehe 0 und 2.4) verwendeten Düngern. Als Kontrollen wurden eine Null-Düngung und (vermahlene) Horn- oder Haardünger eingesetzt.

Mit Hilfe von weiteren Bodenuntersuchungen wurden die verwendeten Böden hinsichtlich ihres Verhaltens zur N-Freisetzung und Umsetzung organischer Dünger charakterisiert. Mit der C_{org} - und N_t -Bestimmung wurde der Level der Humusversorgung beschrieben und das C/N-Verhältnis abgeleitet. Die Heißwasserextraktion von C und N, die EUF-N Bestimmung in zwei Fraktionen und die Bestimmung der mikrobiellen Aktivität über die Bodenatmung wurden zur weiteren Beschreibung der potentiellen N-Verfügbarkeit in den Böden herangezogen. Ergänzend wurden verfügbares (CAL) P und K sowie der pH-Wert bestimmt.

Begleitend zu diesen Versuchen wurden im Gewächshaus (Keim-) Pflanzenversuche durchgeführt, bei denen die Biomassebildung der Pflanzen und deren N-Aufnahme als Kriterium für die N-Freisetzung der Systeme Boden x Dünger diente. Sie konnten somit den Inkubationsversuchen gegenübergestellt werden und erlaubten eine Prüfung der Modellergebnisse.

Die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen wurden zu den Versuchsergebnissen durch Korrelationsanalysen hinsichtlich ihrer Prognose für die N-Freisetzung in Verbindung gesetzt.

2.5.2.1 Böden

Die verwendeten Böden stammten von langjährig ökologisch bewirtschafteten Flächen. Da das Kriterium Unterschiede im Tongehalt innerhalb eines ansonsten einheitlich bewirtschafteten Schlates waren, wurde die (aktuelle/bisherige) gartenbauliche Nutzung der Flächen bei der Identifizierung und Auswahl der Böden nicht als primäres oder ausschließendes Kriterium betrachtet.

Tabelle 2.5-1: Herkunft der Böden

Kürzel	Lage	Betrieb	Nutzung
VH	Viehhausen	Versuchsbetrieb	Acker
HK	LK Freising	Landwirtschaftlicher Betrieb	Acker
ED	LK Dingolfing Landau	Gärtnerischer Betrieb	Gemüsebau
ZF	LK Dingolfing Landau	Gärtnerischer Betrieb	Gemüsebau

Tabelle 2.5-2: Korngrößenverteilung und Bodenart

Boden ID (0-30 cm)	Bodenart*	Masse-%									Bezeichnung* DIN ISO 11277
		T	fU	mU	gU	U	fS	mS	gS	S	
VH Sand	Ls3	18,8	4,8	9,5	16,5	30,8	19,6	29,9	0,9	50,4	mittel sandiger Lehm
VH Lehm	Lu	23,2	6,8	16,5	28,8	52,1	11,4	9,1	4,2	24,7	schluffiger Lehm
VH Ton	Lt2	34,4	7,3	15,9	21,9	45,1	9,2	8,3	3,0	20,5	schwach toniger Lehm
HK Sand	Sl3	10,2	3,0	4,5	9,1	16,6	39,1	32,7	1,4	73,2	mittel lehmiger Sand
HK Lehm	Ls3	22,2	7,1	13,7	18,9	39,7	17,9	17,3	3,0	38,2	mittel sandiger Lehm
HK Ton	Lt2	32,2	9,5	17,6	17,2	44,3	14,6	6,7	2,3	23,5	schwach toniger Lehm
ED Lehm	Ut4	19,6	7,6	20,8	36,7	65,0	7,1	6,1	2,2	15,4	stark toniger Schluff
ED Ton	Lu	27,7	7,1	20,1	32,3	59,5	7,0	4,3	1,5	12,8	schluffiger Lehm
ZF Lehm	Lu	23,5	5,7	16,6	39,1	61,4	8,6	4,8	1,7	15,1	schluffiger Lehm
ZF Ton	Tu3	31,5	6,3	15,5	29,5	51,3	9,9	4,5	2,8	17,2	mittel schluffiger Ton

Bodenart und Bezeichnung nach KA5; *: Bestimmung mittels Siebung und Sedimentation (SEDIMAT 4-12), siehe Tabelle 2.5-7.

Tabelle 2.5-3: Bodeneigenschaften

Boden	N _t	C _{org}	C/N	C _{mik}	R _h	C _{mik} / C _{org} *	pH	P _{CAL}	K _{CAL}	P	K	N _{HWL}	C _{HWL}	C/N _{HWL}
	(% TM)	(% TM)	Verhältnis	mg C/kg TM	mg CO ₂ /h*kg	Verhältnis	(CaCl ₂)	mg/100g	mg/100g	Gehalts- klasse*		mg/kg	mg/kg	Verhältnis
VH Sand	0,09	0,88	9,7	413	15,6	47,0	6,4	3,9	10,0	B	C	44,2	323	7,3
VH Lehm	0,14	1,28	9,4	521	19,7	40,7	6,1	1,9	11,5	A	C	53,3	513	9,6
VH Ton	0,14	1,34	9,9	679	25,1	50,7	7,1	4,4	18,9	C	D	67,2	596	8,9
HK Sand	0,11	1,15	11,0	504	18,8	43,8	6,4	9,8	21,2	D	E	53,5	538	10,0
HK Lehm	0,19	1,85	9,7	750	26,1	40,7	6,7	9,1	34,5	D	E	76,1	809	10,6
HK Ton	0,15	1,61	11,1	773	27,6	47,9	7,3	11,3	37,3	D	E	74,1	777	10,5
ED Lehm	0,15	1,41	9,5	297	11,3	21,1	7,0	10,4	18,8	D	D	59,3	464	7,8
ED Ton	0,12	1,15	9,3	285	10,6	24,8	7,5	7,3	11,7	C	B	44,0	368	8,4
ZF Lehm	0,11	1,22	11,5	205	2,7	169	7,6	6,5	20,9	C	C	58,3	474	8,1
ZF Ton	0,11	1,21	11,5	231	3,0	190	7,3	4,5	20,9	C	D	43,2	389	9,0

Erklärung der Bodenbezeichnung mit Herkunft und Nutzung, siehe Tabelle 2.5-1; Untersuchungsmethoden, siehe 1.1.2.4; P- und K-Gehaltsklassen nach Vorgaben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Gelbes Heft).

2.5.2.2 Düngemittel

Das Ziel bei der Auswahl war übliche organische Handelsdünger (Keratindünger) mit alternativen Düngemitteln zu vergleichen, die unter anderem betriebsintern hergestellt werden können. Als Keratindünger wurden handelsübliche Hornspäne und Haarpellets genutzt. Im Vergleich dazu wurden vor allem Produkte aus Klee (Kleepellets) oder Klee gras genutzt. Von den Projektpartnern wurden Tofumolke, Gärreste und Klee grassilage geprüft. Material von verschiedenen Klee grasschnitten, Ackerbohnen (Schrot) und Gelbsenf (Zwischenfrucht-aufwuchs) stammten von TUM-Versuchsbetrieb. Wichtig bei der Auswahl war eine weite Spanne des C/N-Verhältnisses, das eine große Bedeutung für die Umsetzungsfähigkeit des Düngers hat.

Tabelle 2.5-4: Düngemittel

Düngemittel	Abkürzung	N _t (% TM)	C _t (% TM)	C/N Verhältnis
Hornspäne	Horn	16,9	51,3	3,0
Haarpellets (v. Schaf)	Haar	13,8	49,1	3,6
Kleepellets („Kleepura“)	KP	3,4	44,6	13,1
Klee gras Silage	KGS	3,2	42,1	13,2
Klee gras 10	KG10	3,9	44,4	11,5
Klee gras 15	KG15	3,0	44,1	14,9
Klee gras 20	KG20	2,2	44,4	20,5
Sonnenblumensamen (Presskuchen)	SoBlu	3,4	50,9	15,1
Ackerbohne	AB	4,1	44,0	10,8
Gelb Senf 28	GS28	1,5	43,3	28,0
Glutaminsäure	Glu	9,5	40,8	4,3

2.5.2.3 Versuchsansätze

Alle in den Versuchen verwendeten Böden wurden zur Stabilisierung und Homogenisierung luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt. Es wurde die maximale Wasserhaltekapazität bestimmt

sowie der Restfeuchtegehalt vor Versuchsbeginn. In Abhängigkeit des Restfeuchtegehalts wurden je Probengefäß und Versuchsansatz eine definierte Menge Trockenboden eingewogen und ggf. mit entsprechender Düngermenge (100 kg N ha^{-1}) gut vermischt. Die Düngemittel wurden zur Applikation fein vermahlen. Dieser Ansatz wurde angewandt, um eine homogene Verteilung des Düngemittels im Boden zu gewährleisten. Die Probengefäße wurden bei den Inkubationen komplett randomisiert angeordnet. Bei den Pflanzenversuchen, bei denen die Lage im Gewächshaus durch Licht- oder Temperaturgradienten beeinflusst sein könnte, wurden die Probengefäße daher in einem komplett randomisierten Blockdesign angeordnet, um Einflüsse dieser Art im statistischen Modell berücksichtigen zu können.



a b c d

Abbildung 2.5-1: Inkubationsversuche und Pflanzenversuche. a = Respirometer-Brutschrank, b = Probengefäße im Respirometer, c = Wuchshöhe Roggen, d = großblättrige Kresse.

2.5.2.3.1 Inkubationsversuche

Inkubationsversuche wurden durchgeführt um die Nitratbildung über die Zeit zu erfassen. Die Nitratbildung setzt sich aus der Stickstoff-Nachlieferung aus der Mineralisation der organischen Bodensubstanz (OBS) sowie der Mineralisation der applizierten organischen Düngemittel zusammen. Die Versuche wurden konzipiert um Unterschiede der N-Nachlieferung aus der OBS in Abhängigkeit des Tongehalts des Bodens sowie die Wechselwirkung mit verschiedenen Düngemitteln mit unterschiedlicher Abbaubarkeit (C/N-Verhältnis) zu erfassen.

Tabelle 2.5-5: Inkubationsversuche

Versuch	Boden	Bodenarten	Dünge-be-handlungen	Düngestufen [kg N ha ⁻¹]	Dauer [d]	Temperatur [°C]	WK _{max} [%]	N _{min} [*]	Beprobungen	Wiederholung	Parameter
1	VH	3	Horn, NK	0, 100	67	18	50	12	4	NO ₃ ⁻ , Netto-N _{min}	
2	VH	3	Horn, KG10, KG15, KG20, Glu, NK	0, 100	66	18	50	12	4	NO ₃ ⁻ , Netto-N _{min}	
3	VH	3	Horn, Haar, KG15, NK	0, 100	92	18	50	15	3	NO ₃ ⁻ , Netto-N _{min} , R _h	
4	VH, ED, HK, ZF	2 bzw. 3	NK	0	35	18	50	11	5	NO ₃ ⁻ , R _h	
5	VH	3	Haar, KG10, KG15, KG20, GS28, NK	0, 100	99	15	55	12	4	NO ₃ ⁻ , Netto-N _{min}	

Kurzbezeichnung der Böden und Dünger sowie Bodenart und Tongehalt, siehe Tabelle 2.5-1, Tabelle 2.5-2, Tabelle 2.5-4.

Inkubationsversuch 1

Fragestellung: Entwicklung des Versuchsdesigns und der Versuchsbedingungen zur Untersuchung des Einflusses der Bodenart mit und ohne Düngergabe auf die Nitratbildung. Untersuchung des Einflusses der mehrfachen N_{\min} -Beprobung aus denselben Probengefäßen auf den Wassergehalt.

Inkubationsversuch 2

Fragestellung: Optimierung des Versuchsdesigns und der Versuchsbedingungen zum Test weiterer Düngemittel mit unterschiedlichen C/N-Verhältnissen und zur methodischen Optimierung des Wassergehalts (Konstanz), Untersuchung des Einflusses der Bodenart in Wechselwirkung mit Düngemitteln unterschiedlicher C/N-Verhältnisse.

Inkubationsversuch 3

Fragestellung: Optimierung der Versuchsbedingungen durch Anschluss der Inkubationsgefäße an das Respirationssystem der Inkubationsschränke (optimale Sauerstoffversorgung der Bodenmikroorganismen, Verhinderung des Wasserverlusts durch Verdunstung, gleichzeitige Messung der Basalatmung zur Bestimmung der Mikrobiellen Aktivität und Biomasse), Untersuchung des Einflusses der Bodenarten und des Dünger C/N auf die mikrobielle Aktivität und N-Mineralisation.

Inkubationsversuch 4

Fragestellung: Optimierung der Versuchsbedingungen (Einfluss der Mehrfachbeprobung der Respirations-Probengefäße auf Wassergehalt), Untersuchung des Einflusses der Bodenherkunft durch weitere Böden von Acker- und Gemüsebaubetrieben, Einfluss der Bodenart und mikrobiellen Aktivität auf die Nitratbildung.

Inkubationsversuch 5

Fragestellung: Alternative Versuchsbedingungen durch Einzelbeprobung größerer Bodengefäße in Inkubationskammer, Untersuchung des Einflusses der Bodenart und Düngemittel C/N-Verhältnisse auf Netto-N-Mineralisationsverläufe über einen längeren Zeitraum, um Zeitpunkte der N-Immobilisierung und Re-Mineralisierung zu erfassen.

2.5.2.3.2 Pflanzenversuche

Pflanzenversuche wurden in Anlehnung an die Neubauerversuche entwickelt (Neubauer 1937; Neubauer und Neubauer 1940). Diese basieren auf der Aufnahme des gesamten pflanzenverfügbaren N durch eine große Menge Pflanzen im Verhältnis zu einer geringen Bodenmenge und wurden als Keimpflanzenversuche in der pflanzlichen Frühentwicklung angewendet, um Nährstoffgehalte in Böden und Düngebedarf zu prüfen. Die Nitratbildung wurde über das Wachstum, die relative N-Versorgung, die Biomassebildung und die final aufgenommene N-Menge erfasst. Entsprechend wurde bei den Pflanzenversuchen die N-Mineralisation aus der OBS und aus der Umsetzung der organischen Düngemittel in Abhängigkeit des Tongehalts und des Düngemittels indirekt im Vergleich zu den N_{\min} -Messungen bei den Inkubationsversuchen über die pflanzliche N-Verfügbarkeit in der N-Aufnahme mittels SPAD-Chlorophyllmeter (Minolta SPAD 502 DL Meter; Jiang et al. 2017), der Wuchshöhenerfassung, der Biomassebildung und der Gesamt-N_t-Gehalte der Pflanzen ermittelt.

Tabelle 2.5-6: Pflanzenversuche

Versuch	Boden	Bodenarten	Dünge-be-handlungen	Düngestufen [kg/ha]	Wiederholung	Dauer [Tage n. Auflaufen]	Temperatur [°C]	WK _{max} [%]	Pflanzenzahl	Kultur
1	VH	3	Horn, NK	0, 100	3	27	21	67	35 Pfl. / 400g TB	Roggen
2	VH, HK	3	Horn, Haar, KG15, KGS, KP, NK	0, 100	3	27	22	67	35 Pfl. / 400g TB	Roggen
3	VH, HK, ED, SM, ZF	2 bzw. 3	Haar, AB, Soblu, KP, NK	0, 100	3	39	19	67	25 Pfl. / 400g TB	Roggen

Kurzbezeichnung der Böden und Dünger sowie Bodenart und Tongehalt, siehe Tabelle 2.5-1, Tabelle 2.5-2, Tabelle 2.5-4.

Pflanzenversuch 1

Fragestellung: Entwicklung der Versuchsbedingungen zur Untersuchung des Einflusses der Bodenart auf das Pflanzenwachstum, die Biomassebildung und die N-Aufnahme. Vorversuch zum Test der Methode: % WK_{max}, Bodenmenge, Aussaatstärke, Pflanzzahlanpassung, Licht, Feuchtigkeit und Temperaturbedingungen im Gewächshaus, Logistik der Parametererfassung und Versuchsbetreuung.

Pflanzenversuch 2

Fragestellung: Optimierung der Versuchsbedingungen im Gewächshaus (siehe Pflanzenversuch 1), Untersuchung der N Freisetzung/Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Düngemittel, Bodenart und Bodenherkunft.

Pflanzenversuch 3

Fragestellung: N Freisetzung/Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Düngemittel, Bodenart und Bodenherkunft. Verlängerung der Versuchsdauer, Test alternativer Düngemittel sowie weiterer Böden.

2.5.2.4 Untersuchungsmethoden

Tabelle 2.5-7: verwendete Methoden nach VDLUFA Methodenbuch I

Kurz-bezeichnung	Methodenname	Methodennummer	Bemerkungen
pH-Wert (CaCl ₂)	Bestimmung des pH-Wertes	A 5.1.1 (2016)	pH-Messung in 0,01 m CaCl ₂
Gesamt-C und -N	Bestimmung von Gesamt-Kohlenstoff und Gesamt-Stickstoff durch Verbrennung und Gasanalyse	A 4.1.3.1 (2016) und A 4.1.2. (2004)	Elementaranalyse, Verbrennung im Sauerstoffstrom bei 900 °C. Bei Pflanzenproben Bestimmung von Gesamt-N mittels DUMAS-Verbrennungsmethode bei 900°C
C _{org}	Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung und Gasanalyse	A 4.1.3.2 (2016)	Elementaranalyse Verbrennung im Sauerstoffstrom bei 550 °C
P und K (CAL)	Bestimmung von Phosphor und Kalium im Calcium-Acetat-Lactat-Auszug	A 6.2.1.1 (2016)	P und K in CAL jeweils in Elementform angegeben (nicht in Oxidform; ist bei der Bewertung mittels Gehaltssklassen zu berücksichtigen)
N _{min}	Mineralisierter Stickstoff (N _{min} -Methode)	A 6.1.4.1 (2002)	Standardmäßig: feldfrische Proben, homogenisiert; Extraktion mit 0,0125 Mol/l CaCl ₂ ; bei spezieller Fragestellung (z.B. organische Düngung) in 0,1 m KCl-Lösung
C _{hwl} und N _{hwl}	Heißwasserlöslicher Kohlenstoff und Stickstoff	A 4.3.2 (2004)	Sieden in H ₂ O _{dest.} und Extraktion mit MgSO ₄

EUF	Bestimmung von lösl., organ. gebundenem Stickstoff, Nitrat- und Ammonium-Stickstoff mittels Elektro-Ultra-Filtration	A 6.1.7.3 (1997)	Durchgeführt durch den Bodengesundheitsdienst. Bestimmung löslicher Pflanzennährstoffe (N, P, K, Ca, Mg, S, B) in zwei Fraktionen, leicht und schwer löslich (nachlieferbare Nährstoffe)
Tongehalt / Bodenart	Texturanalyse / Partikelgrößen-Verteilung	C 2.2.1 (2012)	Durchgeführt durch die LfL, nach DIN ISO 11277 (2002-08); Bestimmung des Ton-, Schluff- und Sandgehalts durch Siebung und Sedimentation (SEDIMAT 4-12); Ermittlung der Bodenarten und Bezeichnung nach KA5
TS und WG	Bestimmung des Wassergehalts mittels Gravimetrie (Trockenschrankmethode)	C 1.1.1 (2002)	Masseverlust durch Trocknen des frischen Bodens bei 105°C
WK _{max}	Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität	A 13.2.3 (2002)	Ausgangsmaterial homogenisierter (2mm gesiebt), getrockneter Boden. Daher Methode zur Bestimmung der WK von Substraten
C _{mik}	Bestimmung der mikrobiellen Biomasse		Biomassebestimmung mittels Substrat-induzierten Respiration (SIR) bei 18 °C, basiert auf Studien von Anderson & Domsch (1978), Scheu (1992) und Beck et al. (1997)
R _h	Bestimmung der Basalatmung (heterotrophe Bodenrespiration)		Maß für die Aktivität von Boden-mikroorganismen; Respirationmessung über mehrere Tage, bei 18 °C; basiert auf Studien von Anderson & Domsch (1978), Scheu (1992) und Beck et al. (1997)
EUF	Bodenanalyse mittels Elektro-Ultra-Filtration	A 6.4.2 (2002)	Extraktion einer leicht und schwerer löslichen Elementfraktion durch Variation von Temperatur und angelegter Spannung

2.5.2.5 Datenverarbeitung und statistische Auswertung

Daten wurden mit Excel und R Version 4.2.0 bearbeitet und ausgewertet (RCoreTeam, 2022). Bei auffälligen Datensätzen wurden Ausreißertests (nach Dean-Dixon mit Signifikanzniveau $\alpha = 0,1$; Halpern und McBane, 2006) durchgeführt. Residual Plots (Quantil-Quantil-Plots und Histogramme; 'ggplot2' Paket; Wickham, 2016) und statistische Tests (Shapiro-Wilk-Test, Levene-Test, Fligner-Test; 'dplyr', 'car' und 'agricolae' Paket; Wickham et al., 2022, Fox und Weisberg, 2019 und de Mendiburu, 2021) wurden angewandt, um die Modellannahmen der Normalverteilung, Varianzheterogenität und Nicht-Additivität zu prüfen (Kozak and Piepho 2018; Onofri et al. 2010). Falls notwendig, wurden die Daten transformiert. Es wurden gemischte lineare Modelle erstellt, um auf Signifikanz zu untersuchen (Bates et al., 2015; 'lmer' Funktion vom 'lmerTest' Paket und 'emmeans' Paket (Kuznetsova, 2017, Lenth 2022)). Korrelationen wurden nach Pearson & Spearman mit dem 'Hmisc' Paket berechnet (Harrell, 2022).

2.5.3 Ergebnisse

2.5.3.1 Einfluss der Bodenart auf die N-Mineralisation

Über alle Standorte gemittelt hatte die Bodenart keinen Einfluss auf die N-Mineralisation (Abbildung 2.5-2 wohl aber auf die Bodenatmung ($F = 89$; $p < 0,001$). In den Sandböden lag die Atmungsintensität an Tag 7 mit $31 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ signifikant über der der Lehm Böden mit $28 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Die „Ton“-Böden lagen jeweils dazwischen und unterschieden sich nicht. Generell zeigte sich in den Inkubationsversuchen innerhalb der ersten zwei Wochen die höchste mikrobielle Aktivität und es wurde mehr und schneller N mineralisiert, als in den darauffolgenden Wochen. Entsprechend nahm die Mineralisation mit der mikrobiellen Aktivität über die Zeit ab. Je nach Inkubationsversuch und –Ansatz nahm die Intensität der N-Nachlieferung (Nitratbildung) im Allgemeinen nach drei bis vier Wochen ab bzw. näherte sich einem Maximalwert an, wobei die Boden-Mikroorganismen immer nur in den ersten beiden Wochen nach Wiederbefeuchtung des Bodens (bzw. Düngemittelapplikation) besonders aktiv waren. Siehe, exemplarisch, Abbildung 2.5-2.

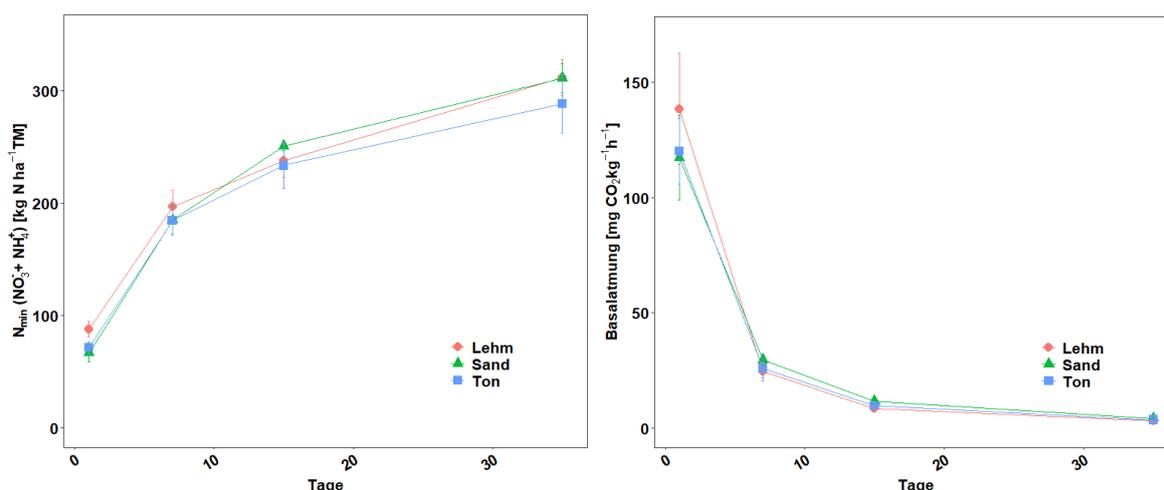


Abbildung 2.5-2: Verlauf der Nmin-Vorräte und der mikrobiellen Aktivität in Abhängigkeit von der Bodenart; Mittelwerte aller Böden der 4 Standorte (VH, HK, ED, ZF); Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Das Pflanzenwachstum über alle Standorte gemittelt schien sich erst nach etwa drei Wochen in Abhängigkeit der Bodenart entsprechend der N-Verfügbarkeit zu differenzieren ($F = 17$; $p < 0,001$), wobei auf dem Lehm Boden statistisch betrachtet die größten Wuchshöhen erreicht wurden. Die Pflanzen auf den Tonböden entwickelten geringere Wuchshöhen (Abbildung 2.5-3). Die größte Wachstumszunahme fand innerhalb der ersten 3 Wochen statt. Der Pflanzen N-Status gemessen im SPAD-Wert nahm ebenfalls von Woche eins bis drei ab und verblieb analog zur Wuchshöhe ab der dritten Woche auf einem gleichbleibenden Niveau (Abbil-

dung 2.5-3). (Der Einbruch der Wachstums- und SPAD-Kurve am Tag 35 ist methodisch bedingt (Wechsel des Bearbeiters)). Auch bei den SPAD-Werten hatten die Lehmböden relativ höhere Werte ($F = 14$; $p < 0,001$) und die Tonböden die geringsten.

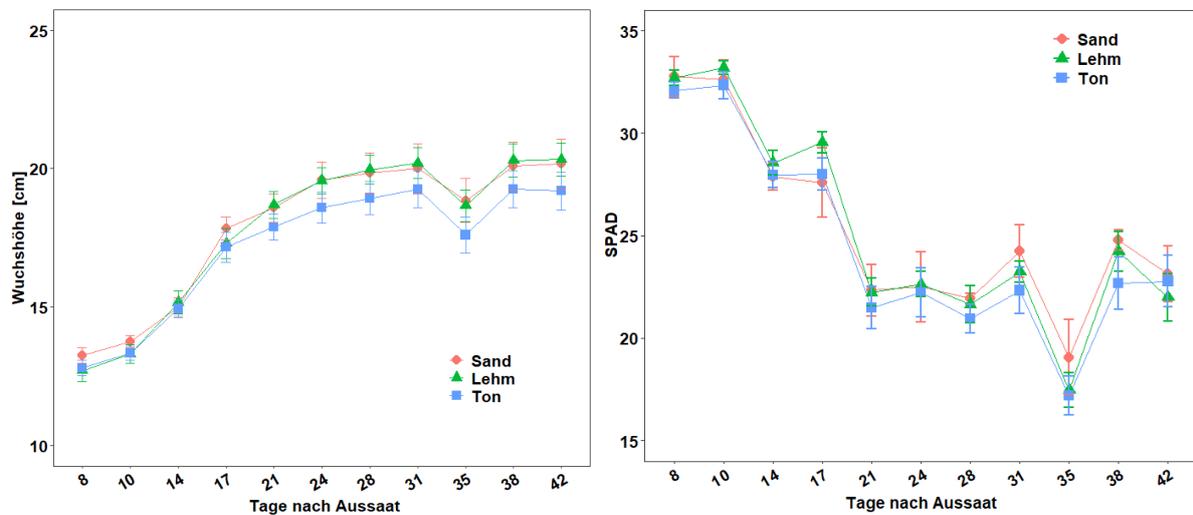


Abbildung 2.5-3: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart. Wuchshöhe sowie Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen; Mittelwerte der Böden der 4 Standorte (VH, HK, ED, ZF); Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

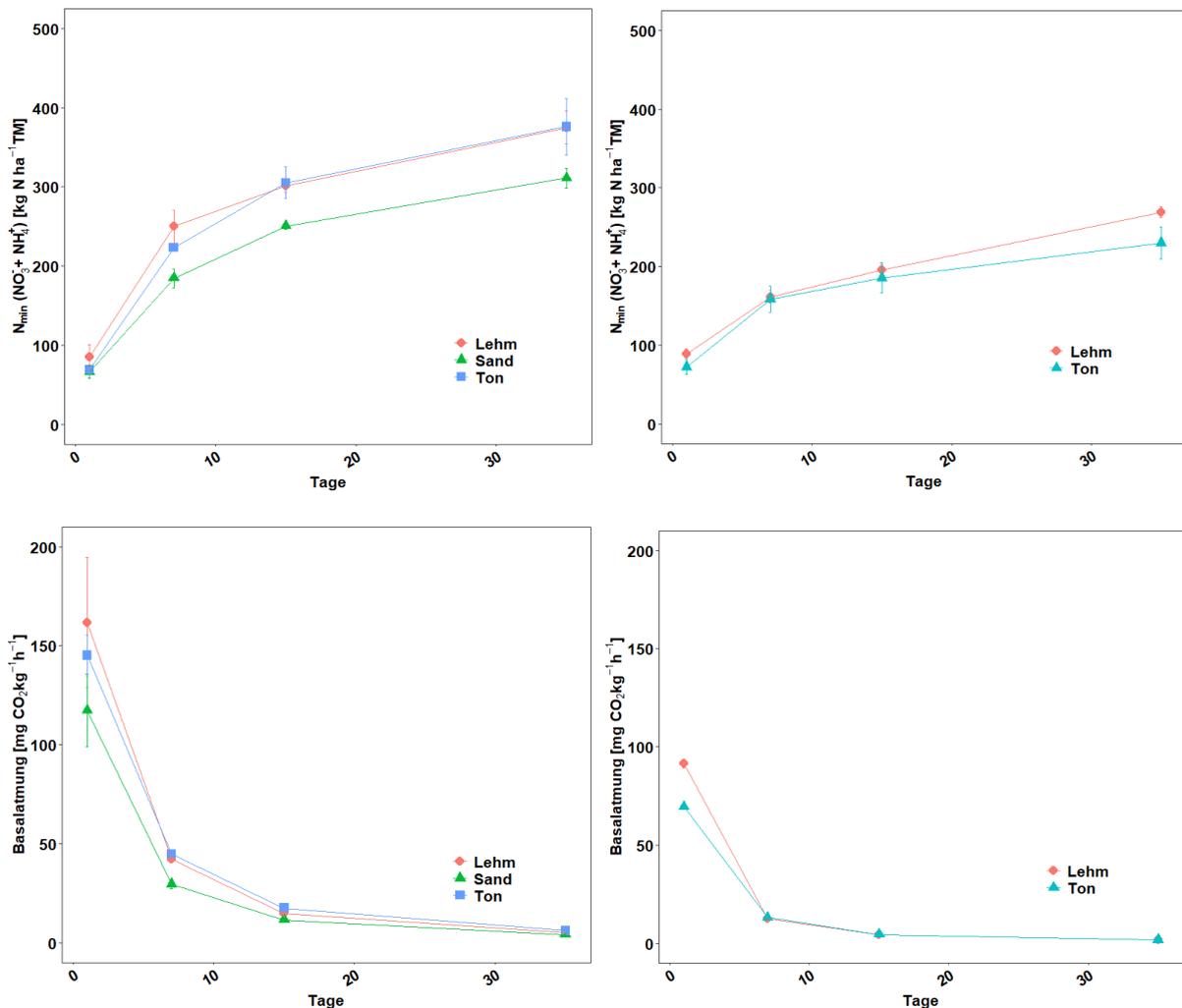


Abbildung 2.5-4: Verlauf der N_{min} -Entwicklung und der mikrobiellen Aktivität ackerbaulich und gartenbaulich genutzter Böden in Abhängigkeit von der Bodenart; Mittelwerte der Böden der ackerbaulich genutzten Standorte (VH, HK), links oben N_{min} und links unten R_h (Basalatemung) sowie der gartenbaulich genutzten Standorte (ED, ZF), rechts oben N_{min} und rechts unten R_h ; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Teilt man die Böden nach ihrer bisherigen Bewirtschaftungsweise auf, ließen sich die zwei gemüsebaulich genutzten Flächen (ED und ZF) deutlich von den ackerbaulich genutzten (VH und HK) unterscheiden (Abbildung 2.5-4). Die ackerbaulich genutzten Böden hatten im Vergleich zu den gartenbaulich genutzten Böden eine insgesamt höhere mikrobielle Aktivität ($F = 302$, $p < 0.001$) und N-Mineralisation ($F = 41$, $p < 0.001$). Bei den ackerbaulichen Böden wurde auf dem Sandboden tendenziell weniger N mineralisiert. Der Tonboden setzte in 35 Tagen im Mittel $306,7\ kg\ N\ ha^{-1}$ frei, der Lehmboden $289,6\ kg\ N\ ha^{-1}$. Beim gartenbaulichen Tonboden wurden nur $157,6\ kg\ N\ ha^{-1}$ und beim Lehmboden $180,0\ kg\ N\ ha^{-1}$ frei. Der Sandboden der ackerbaulichen Böden mit einem mittleren Tongehalt von 14,5 % setzte durchschnittlich $244,7\ kg\ N\ ha^{-1}$ um und hatte somit trotz geringerem Tongehalt eine deutlich höhere Mineralisationsleistung als die gartenbaulichen Böden. Bei den gartenbaulichen Böden hatte der Lehmboden

mehr N mineralisiert als der Tonboden. Die mikrobielle Atmung verlief entsprechend mit gegensätzlichem Trend zur Mineralisationsentwicklung, wobei die Höhe der Aktivität und die Unterschiede der Bodenart nur zu Anfang erkennbar waren. Bei den Ackerböden innerhalb der ersten zwei Wochen und bei den Gemüseböden innerhalb der ersten Woche.

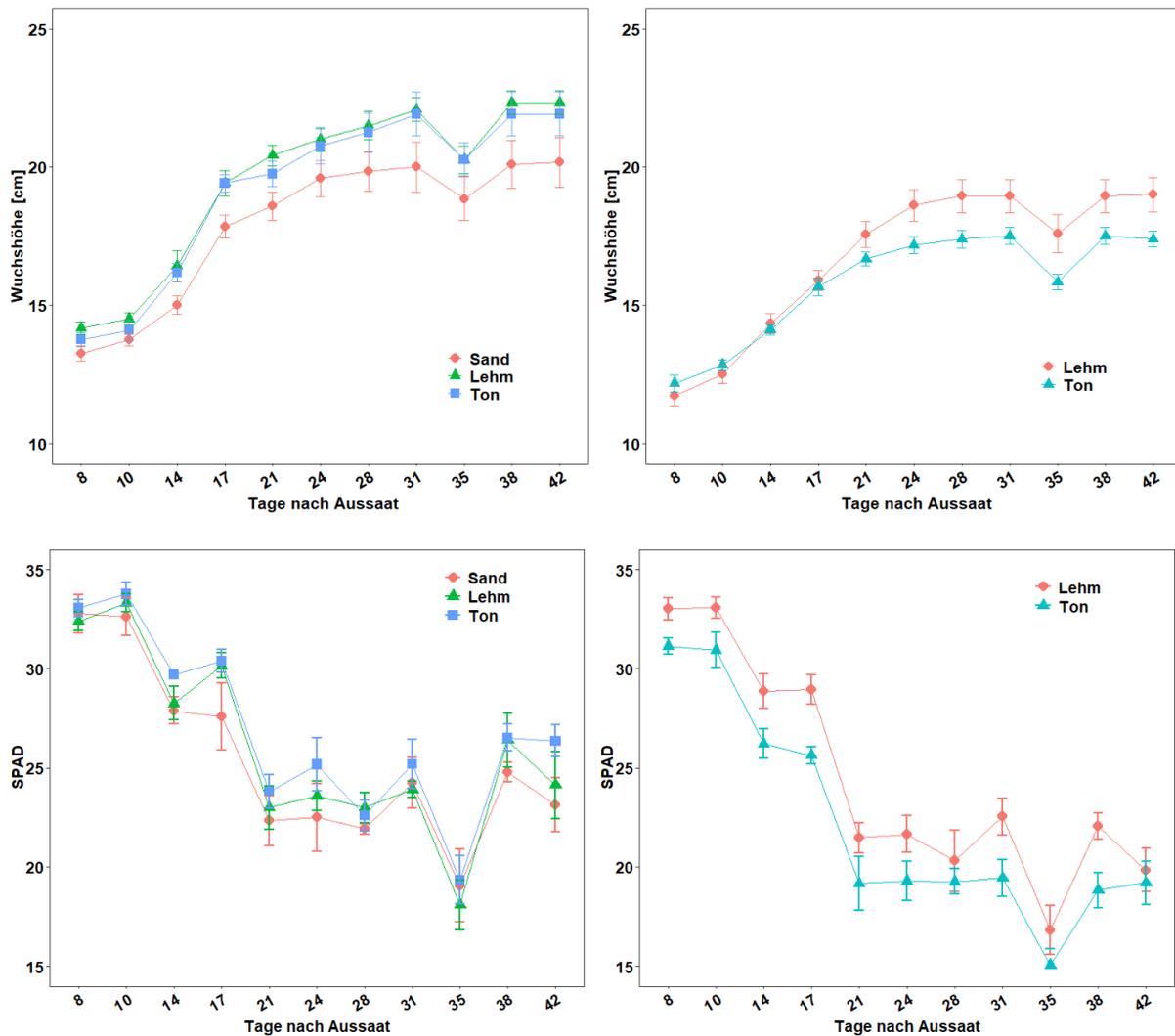


Abbildung 2.5-5: Verlauf der Pflanzenentwicklung ackerbaulich und gartenbaulich genutzter Böden in Abhängigkeit von der Bodenart; Wuchshöhe sowie Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte (Mittelwert für VH und HK), Wuchshöhe links oben und SPAD links unten sowie der gartenbaulich genutzten Standorte (Mittelwert für ED und ZF), Wuchshöhe rechts oben und SPAD unten rechts; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Die Auftrennung in die Bewirtschaftungsweise der Bodenherkunft zeigte für die Pflanzenentwicklung ebenfalls signifikant Unterschiede ($F = 23$; $p < 0,001$) sowie der Effekt der Bodenart ($F = 7$; $p < 0,01$), siehe Abbildung 2.5-5. Auf den Ackerbauböden wurden im Vergleich zu den Gartenbauböden insgesamt und je Bodenart höhere SPAD-Werte und größere Wuchshöhen

erreicht. Der Lehm Boden und der Tonboden führte zu den höchsten SPAD-Werten und größten Wuchshöhen, der Sandboden zu den geringsten ($F = 9, p < 0,01$). Bei den gärtnerischen Böden entwickelten die Pflanzen auf dem Lehm Boden eine größere Wuchshöhe und hatten höhere SPAD-Werte ($F = 28; p < 0,001$). Da eine Interaktion von Standort und Bodenart (bspw. für die Wuchshöhe: $F = 6; p < 0,05$) innerhalb der Bewirtschaftungsgruppierung nachgewiesen werden konnte, wurden die Böden ebenfalls Standortindividuell betrachtet.

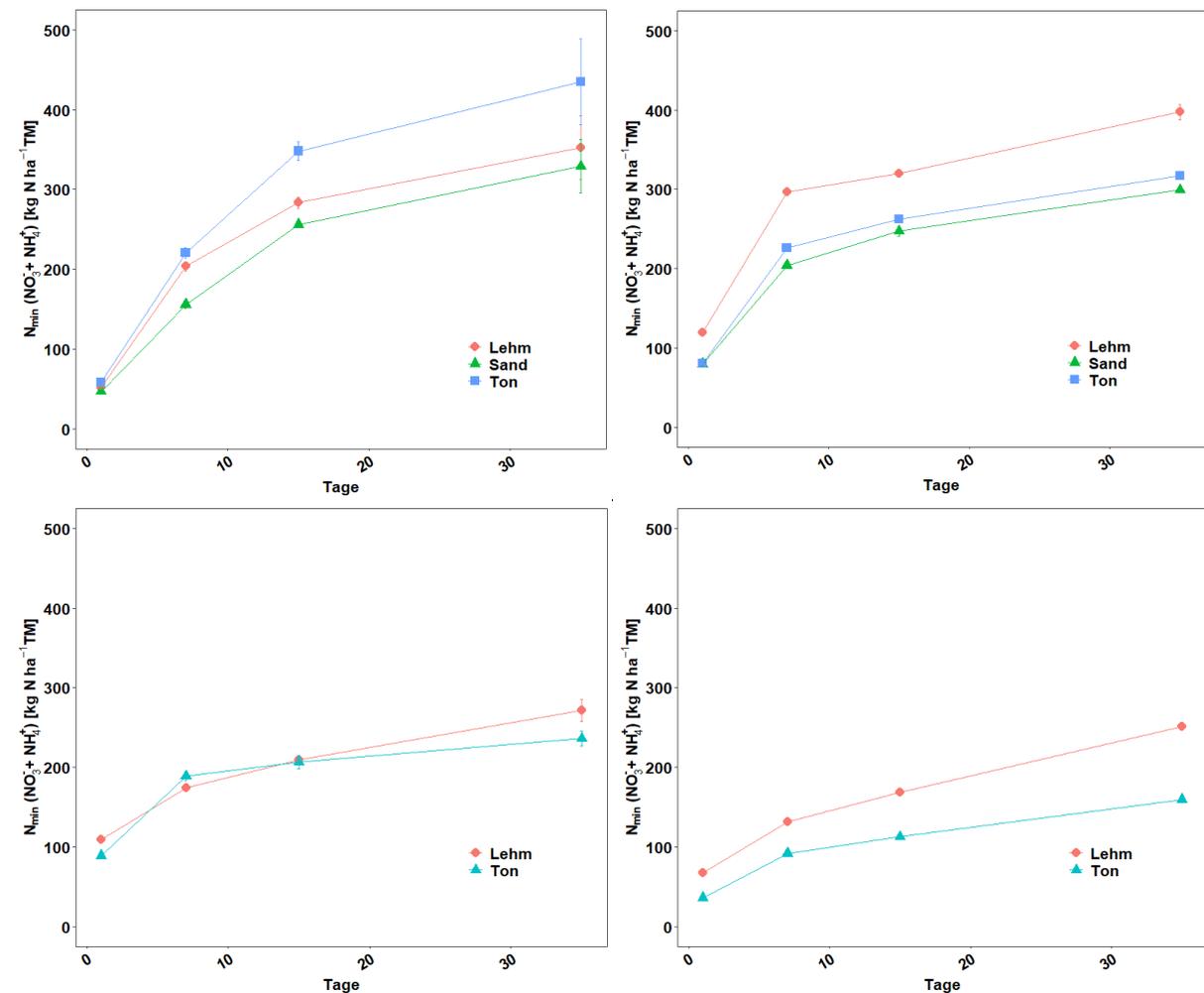


Abbildung 2.5-6: Verlauf der N_{min} -Entwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; ackerbaulich genutzte Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Die Standorte unterschieden sich in ihrer Mineralisierungsleistung ($F = 29; p < 0.001$), wobei die Böden aus VH deutlich mehr N mineralisierten, als die Böden aus HK (Abbildung 2.5-6). Bei den gartenbaulichen Böden war die Mineralisierungsleistung der Böden aus ZF stärker. Zusätzlich war eine Wechselwirkung von Standort und Bodenart erkennbar ($F = 2,5; p < 0.1$). Betrachtet man die Standorte im Einzelnen, so hatte die Bodenart z. T. einen signifikanten Effekt. In HK erzielte der Lehm Boden innerhalb der Versuchslaufzeit von 35 Tagen eine Mineralisierungsleistung von 278 kg N ha⁻¹ und unterschied sich signifikant vom Tonboden mit 237

kg N ha⁻¹ und Sandboden mit 220 kg N ha⁻¹ (F = 24; p < 0,01). Von den Böden aus VH setzte der Tonboden 376 kg N ha⁻¹, der Lehmboden 301 kg N ha⁻¹ und der Sandboden 282 kg N ha⁻¹ um. Obwohl diese Unterschiede aufgrund der großen Varianz der N_{min}-Werte am Tag 35 nicht statistisch signifikant waren, so war die mikrobielle Aktivität des Sandbodens signifikant geringer (F = 23; p < 0,01; Abbildung 2.5-7); An Tag 7 lag diese bei 25 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ im Vergleich zu 40 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ beim Lehmboden und 43 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ beim Tonboden.

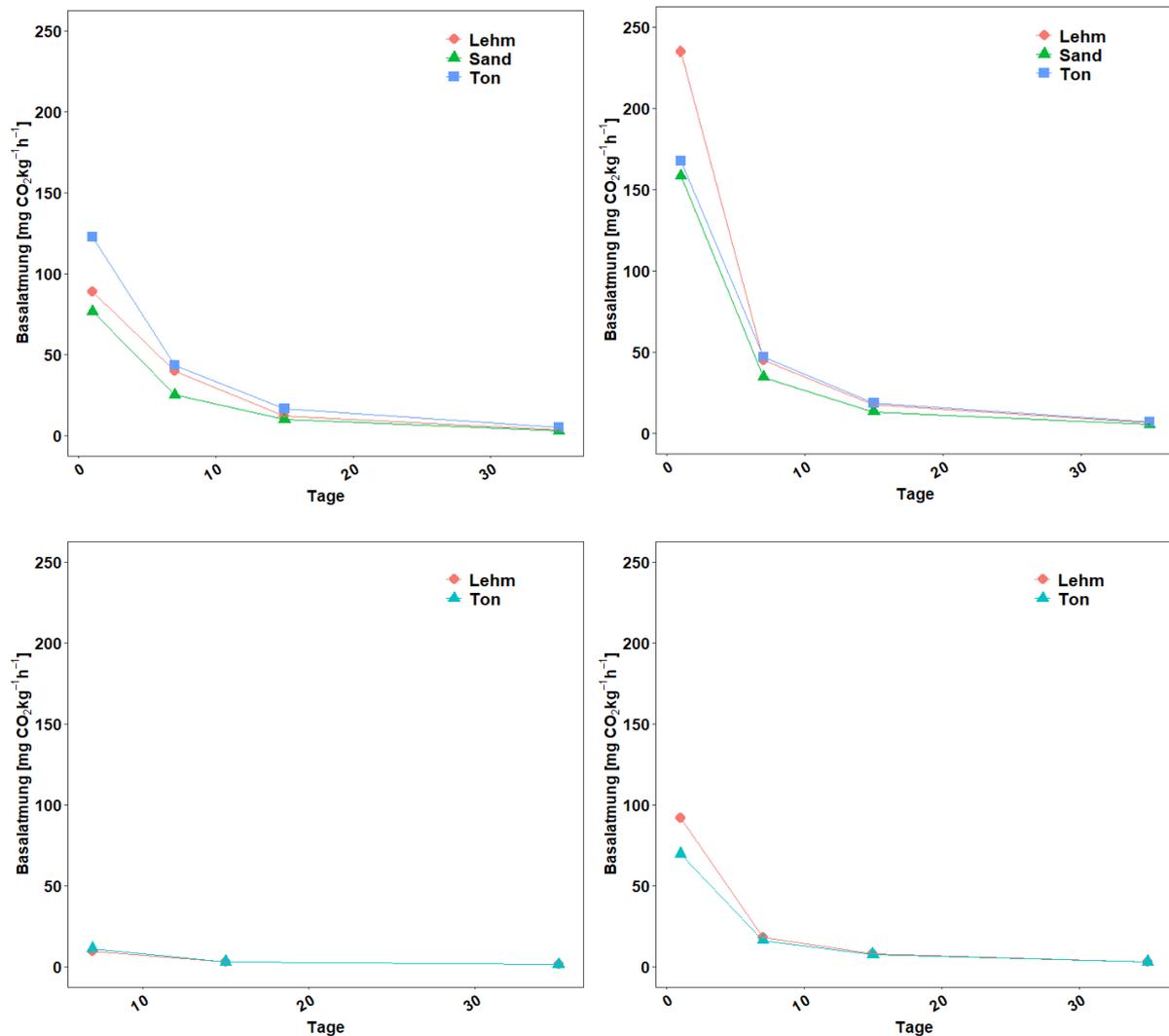


Abbildung 2.5-7: Verlauf der mikrobiellen Aktivität in Abhängigkeit von Bodenart je Standort; ackerbaulich genutzte Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

An allen Standorten hatte die Bodenart einen signifikanten Effekt auf die Bodenatmung. Bei den Böden aus ED wurde in dem Lehmboden deutlich mehr N umgesetzte als in dem Tonboden, 184 kg N ha⁻¹ und 123 kg N ha⁻¹, respektive (F = 187; p < 0,001). Die Böden aus ZF unterschieden sich nicht, auch wenn der Lehmboden am Tag 35 mit 163 kg N ha⁻¹ etwas mehr N mineralisiert hatte als der Ton mit 147 kg N ha⁻¹.

Der Verlauf der Pflanzenentwicklung je Standort, siehe Abbildung 2.5-8, zeigte Unterschiede in Abhängigkeit des Tongehalts, vor allen bei den Böden des Standorts HK (F = 11; p < 005) und ED (F = 74; p < 0,01). Bei den Böden beider Standorte erzielte der Lehmboden die größte Wuchshöhe. Nur für den Standort VH waren die Pflanzen auf dem Ton am größten. Die Bodenart machte keinen Unterschied für ZF.

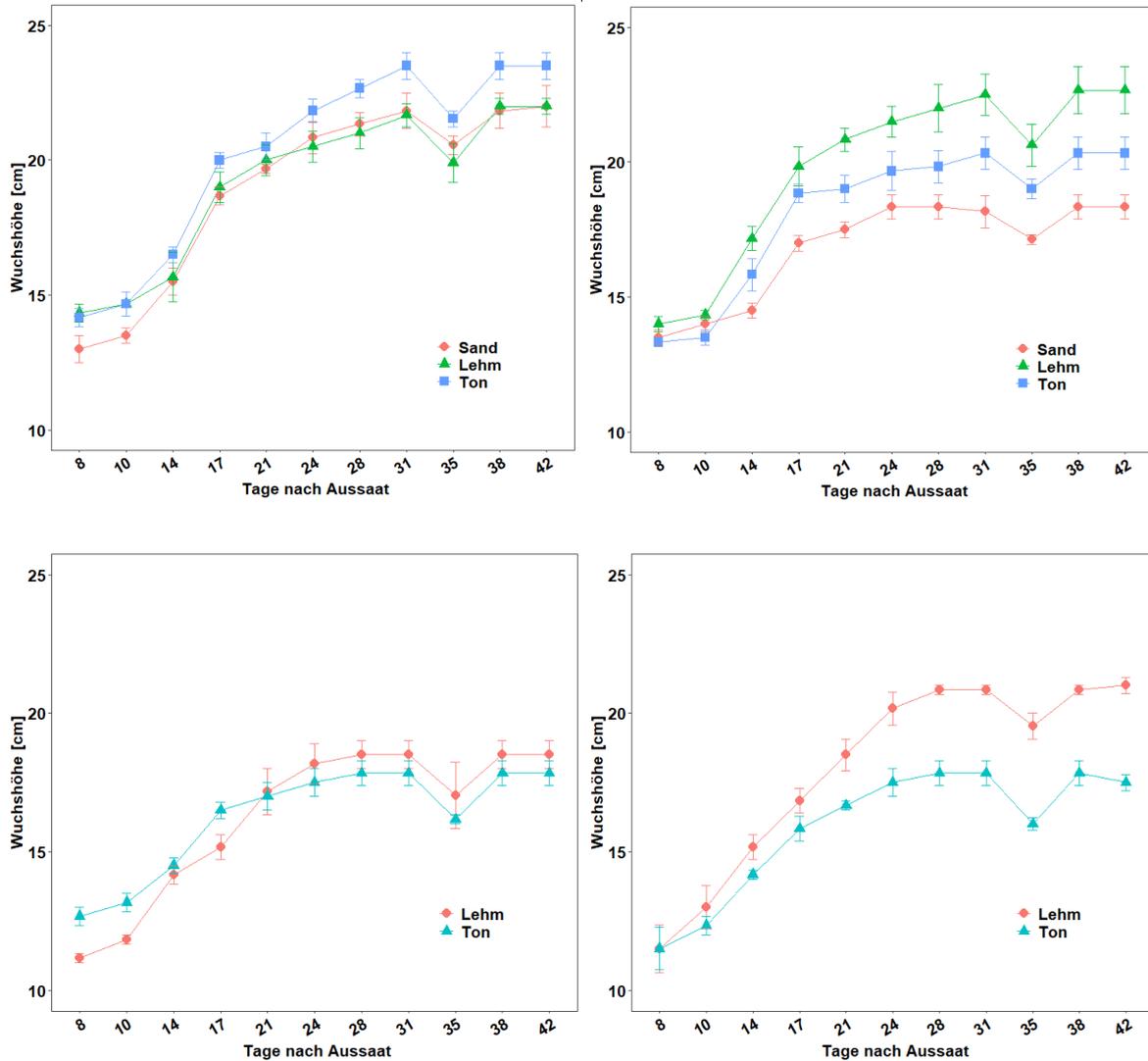


Abbildung 2.5-8: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; Wuchshöhe von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und der gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Bei der Betrachtung der Standortspezifischen SPAD Messungen (Abbildung 2.5-9) konnten signifikante Unterschiede für alle Standorte außer VH festgestellt werden.

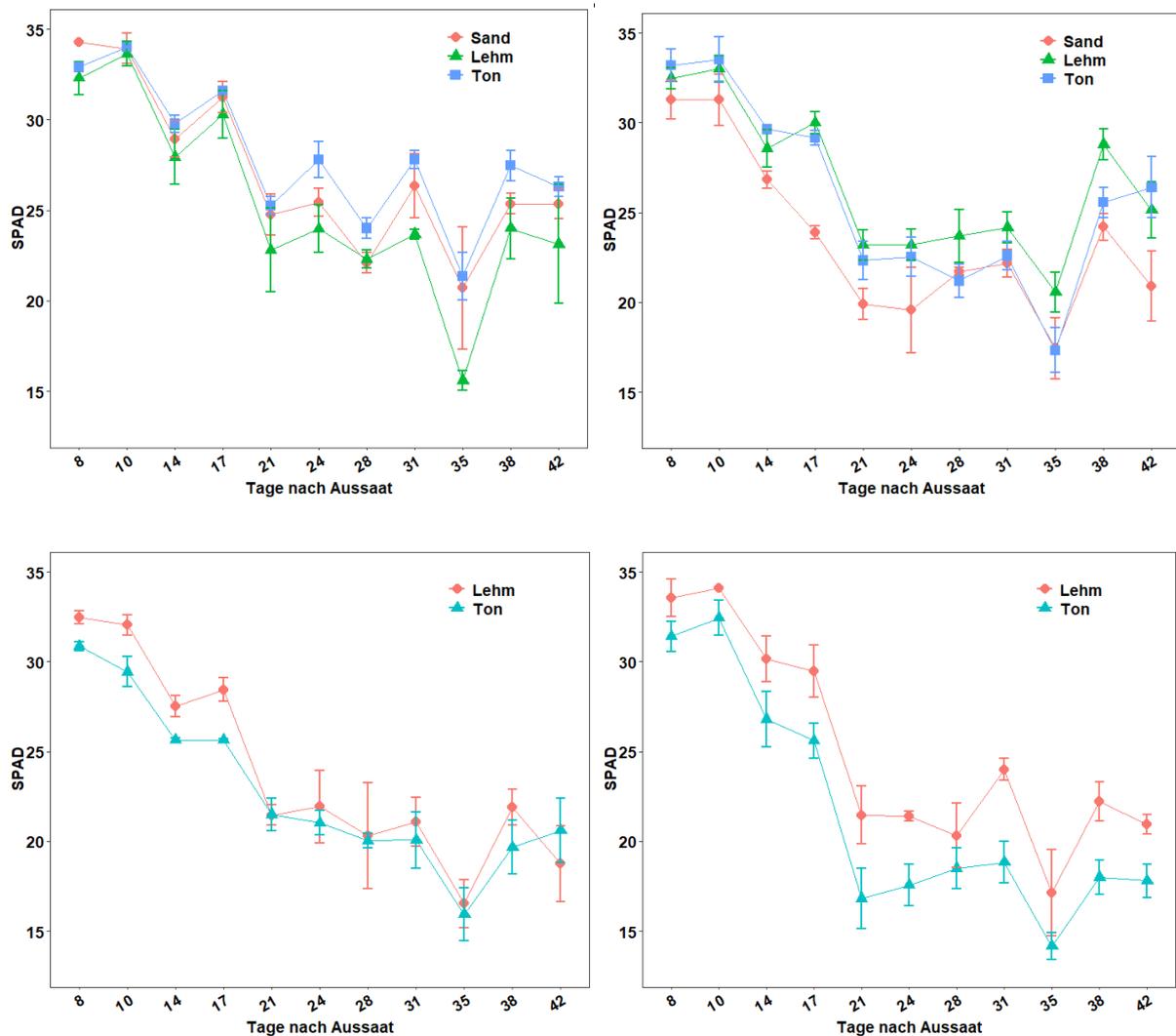


Abbildung 2.5-9: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und der gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Die durch die Pflanzen aufgenommenen N-Mengen, Abbildung 2.5-10, zeigen, dass die Pflanzen der Ackerbaustandorte insgesamt ($F = 69$; $p < 0,001$) und in Abhängigkeit der Bodenart ($F = 7$; $p < 0,01$) mehr Stickstoff im Vergleich zu den Gemüsebaustandorten entzogen. Für die Ackerbauböden hatte sowohl der Standort ($F = 14$; $p < 0,01$), als auch die Bodenart ($F = 15$; $p < 0,001$) und deren Interaktion ($F = 12$; $p < 0,01$) einen signifikanten Effekt. Auf dem Standort VH entzogen die Pflanzen mehr Stickstoff als die Pflanzen von HK. Für die Gartenbauböden hatte der Standort keinen Effekt, die Bodenart ($F = 7$; $p < 0,05$) und deren Interaktion mit dem Standort ($F = 9$; $p < 0,05$) waren jedoch ausschlaggebend für die Aufgenommene Menge N.

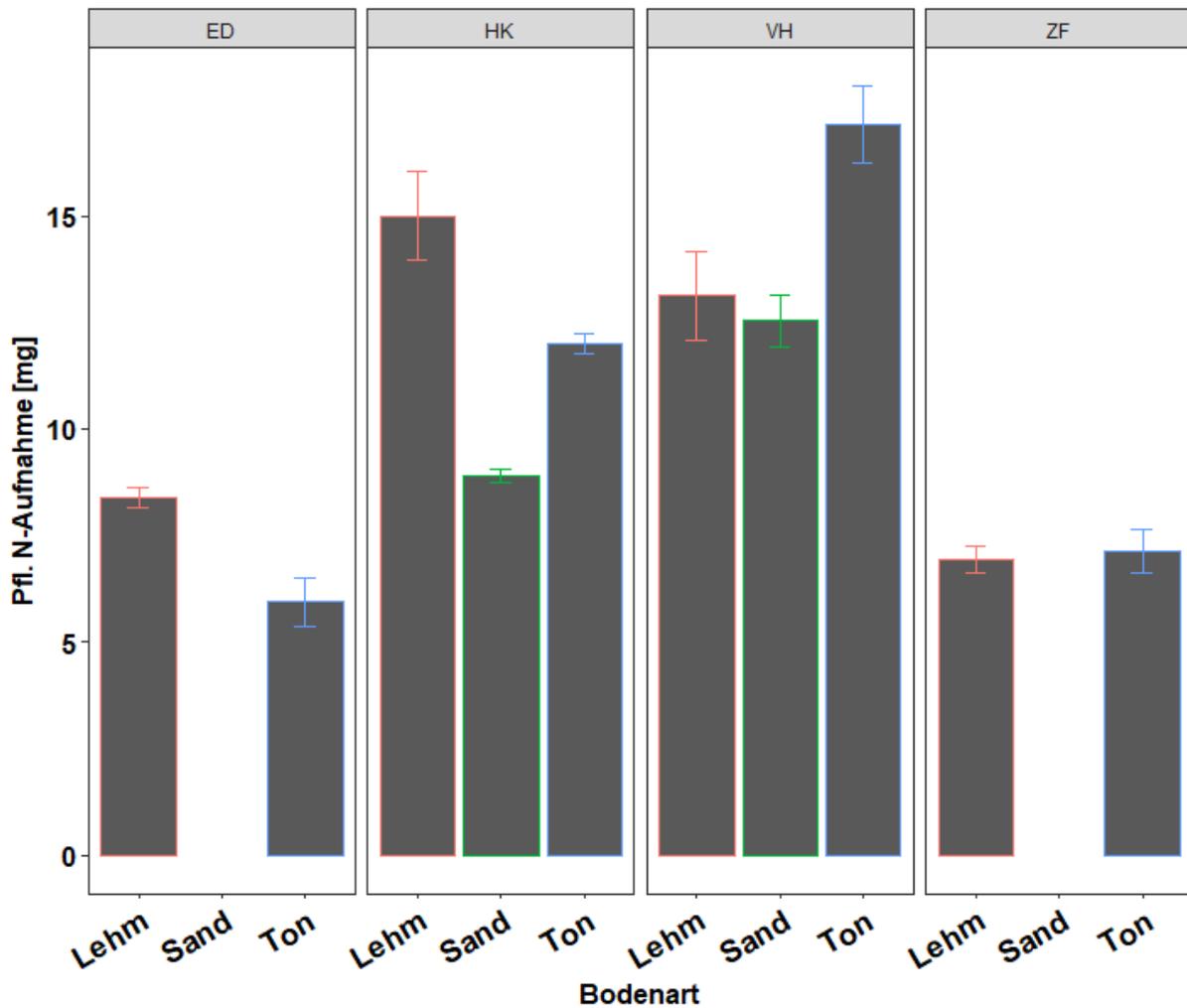


Abbildung 2.5-10: Pflanzliche N-Aufnahme von Roggen nach 42 Tagen in Abhängigkeit von der Bodenart; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Standortindividuell hatten die Bodenart einen signifikanten Effekt auf die aufgenommene Menge Stickstoff, außer für ZF. Die Pflanzen der VH-Böden hatten nur auf dem Tonboden mehr Stickstoff aufgenommen ($F = 8$; $p < 0,05$). Für die HK-Böden waren alle verschieden ($F = 24$; $p < 0,05$) mit der größten Aufnahme auf dem Lehm Boden gefolgt vom Tonboden und Sandboden. Für ED konnte dem Lehm Boden mehr Stickstoff entzogen werden ($F = 16$; $p < 0,05$).

2.5.3.2 Einfluss von Bodenart und Düngemittel-C/N-Verhältnis auf die Netto-N-Mineralisation

Die Gegenüberstellung der maximalen am Ende des Versuchs erreichten Netto-N-Mineralisation und dem C/N-Verhältnis der Düngemittel auf den Böden der Herkunft VH verdeutlicht die Interaktion von Bodenart und unterschiedlich abbaubaren Düngemitteln (Abbildung 2.5-11). Im Inkubationsversuch 2 waren sowohl die Bodenart ($F = 6$; $p < 0,01$), als auch die Art des Düngemittels bzw. dessen C/N-Verhältnis ($F = 36$; $p < 0,001$) ausschlaggebend für die Netto-Mi-

neralisation. Statistisch konnte eine Interaktion der beiden Einflussfaktoren jedoch nicht nachgewiesen werden. Die Düngemittel wurden innerhalb von 66 Tagen im Mittel auf dem Lehm-
boden zu 29 %, auf dem Tonboden zu 18 % und auf dem Sandboden zu 2 % umgesetzt. Über
die Bodenarten gemittelt wurde das Hornmehl und die Glutaminsäure zu 63 % und 62 % um-
gesetzt. Die Klee gras-Schnitte mit C/N 11, 15 und 20 wurden zu 18 %, -11 % und -43 % um-
gesetzt. Mit steigendem C/N-Verhältnis nahm die Umsetzbarkeit ab, wobei die Dünger mit C/N
> 10 zu N-Immobilisierung führten, wobei nach 66 Tagen der Stickstoff nicht wieder re-mine-
ralisiert wurde. Je Bodenart war das Dünger-C/N-Verhältnis entscheidend für die N-Minerali-
sation. Im Sandboden ($F = 42$; $p < 0,001$) wurden Hornmehl und Glu zu 63 % und 68 % um-
gesetzt, KG10 zu 4 %, KG15 zu -43 % und KG20 zu -53 %. Im Lehm Boden ($F = 37$; $p < 0,001$)
wurden Hornmehl und Glu zu 63 % und 60 % umgesetzt, KG10 zu 27 %, KG15 zu -14 % und
KG20 zu -24 %. Im Tonboden ($F = 251$; $p < 0,001$) wurden Hornmehl und Glu zu 63 % und 60
% umgesetzt, KG10 zu 23 %, KG15 zu 3 % und KG20 zu -55 %.

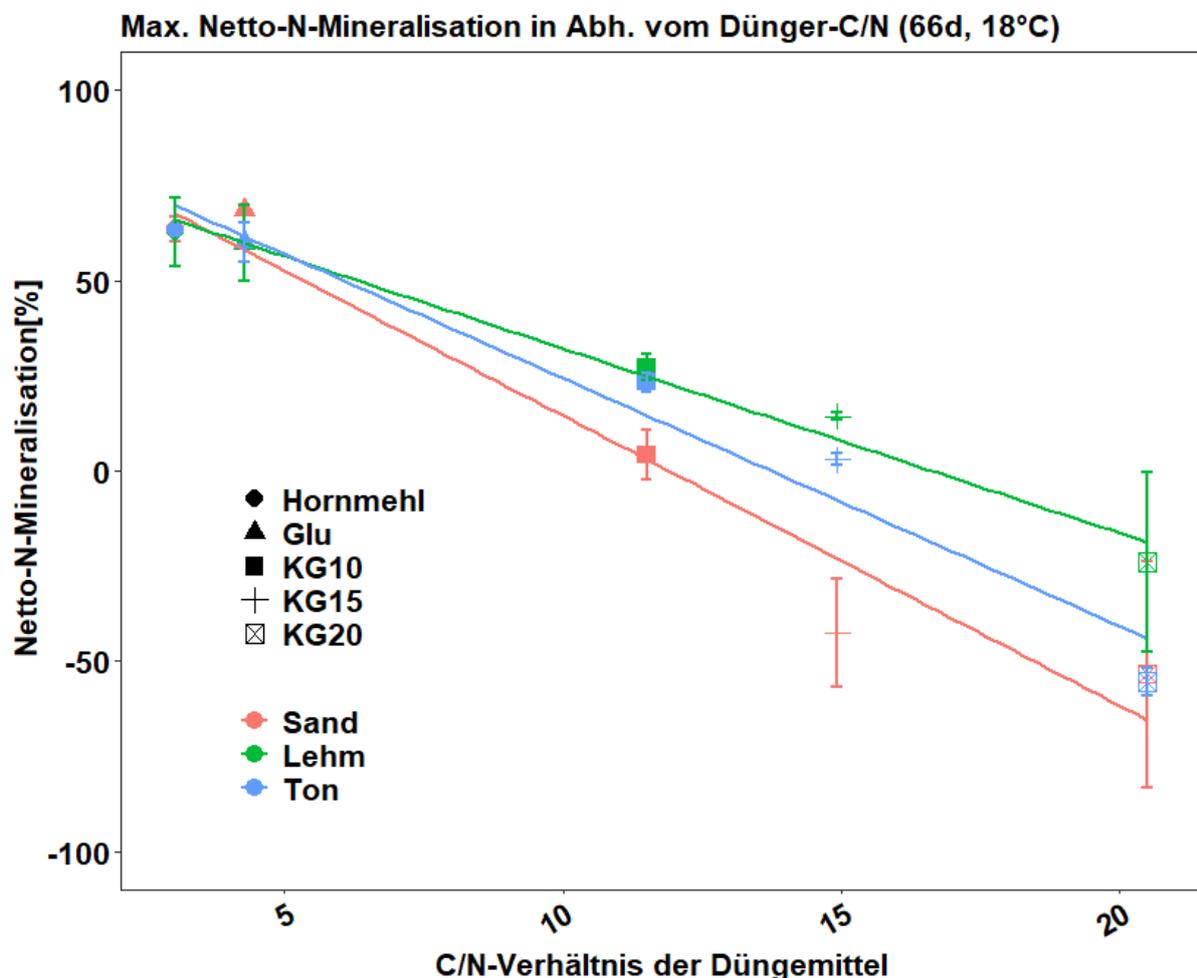


Abbildung 2.5-11: Maximale Netto-N-Mineralisation in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart; Daten aus dem Inkubationsversuch 2, links und dem Inkubationsversuch 5, rechts; mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm; Hornmehl, Glu = Glutaminsäure, KG10 = Klee grassschnitt mit C/N 11, KG15 = Klee grassschnitt mit C/N 15, KG20 = Klee grassschnitt mit C/N 20.

Im Inkubationsversuch 5 wurden die Düngemittel-Bodenart-Kombinationen für 88 Tage inkubiert und regelmäßig auf N_{\min} -Gehalte beprobt, um den Verlauf der Netto-Mineralisation zu verfolgen und zu analysieren, ob und wann die Düngemittelumsetzung zur N-Immobilisierung und Re-Mineralisation führte (Abbildung 2.5-12).

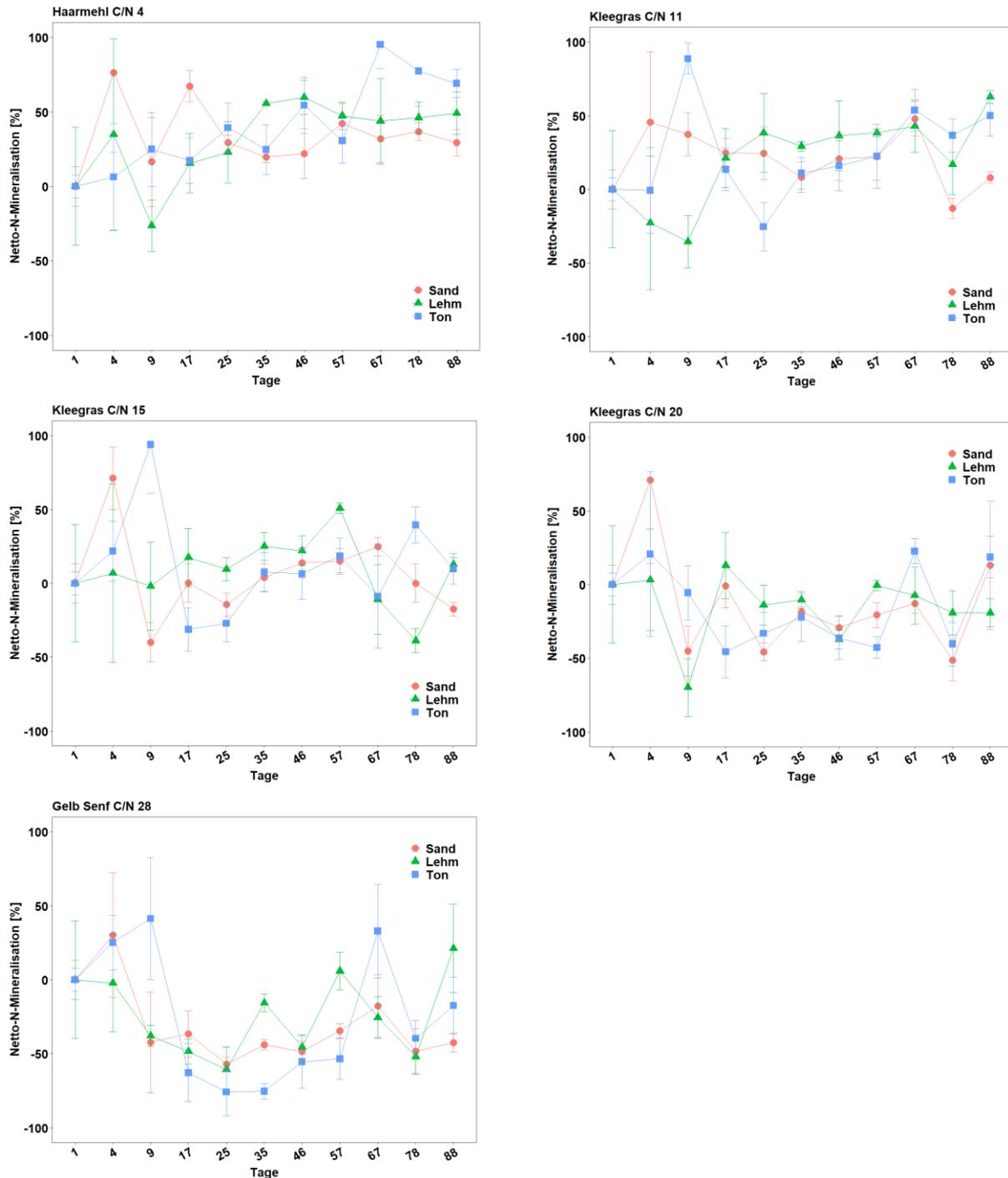


Abbildung 2.5-12: Verlauf der Netto-N-Mineralisation in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart; Daten aus dem Inkubationsversuch 5; mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Im Inkubationsversuch 5, insgesamt über alle Bodenarten und Düngemittel betrachtet, hatte sowohl die Bodenart ($F = 4$; $p < 0,05$) als auch das Düngemittel ($F = 6$; $p < 0,001$) einen Effekt auf die Netto-Mineralisation. Eine Interaktion konnte jedoch nicht bestätigt werden. Bei den einzelnen Düngemitteln hatte die Bodenart jedoch keinen signifikanten Effekt, obwohl sich tendenzielle Unterschiede erkennen ließen. Auf die Netto-Mineralisation von Haarmehl hatte die Bodenart keinen signifikanten Effekt, auch wenn im Mittel nach 88 Tagen im Sandboden 29 % (bzw. 29 kg N ha⁻¹ bei Düngergabe von 100 kg ha⁻¹), im Lehm Boden 49 % und im Tonboden 69 % des Düngemittels umgesetzt wurden. Innerhalb der ersten zwei Wochen kam es kurzfristig zu Immobilisierungsprozessen ($\text{Netto-N}_{\text{min}} < 0$), siehe Lehm Boden an Tag 9. Das Klee gras mit C/N 11 konnte auf dem Sandboden nur zu 8 % umgesetzt werden und lag im Vergleich ($F = 11$; $p < 0,01$) deutlich unter der Umsetzung im Lehm Boden (63 %) und Tonboden (50 %), die sich nicht unterschieden. Im Verlauf der Mineralisation kam es innerhalb der ersten zwei Wochen zur Immobilisierung im Lehm Boden, im Tonboden fand eine Immobilisierung in Woche drei und vier statt und im Sandboden wurde eine Immobilisierung in Woche elf festgestellt. Das Klee gras mit C/N 15 unterschied sich ebenfalls in der Umsetzung in Abhängigkeit der Bodenart ($F = 6$; $p < 0,05$). Im Sandboden kam es in der zweiten Woche zur Immobilisierung, Re-Mineralisation ab Woche fünf und erneuter Immobilisierung ab der zehnten Woche (-17 % Netto-Mineralisation). Die positive Netto-Mineralisation im Lehm Boden begann langsam ab Woche drei und trotz einer Immobilisierungsphase in Woche neun bis zwölf, wurden bis Versuchende insgesamt 13 % mineralisiert. Im Tonboden kam es in der dritten bis fünften und in der zehnten Woche zur Immobilisierung. Am Ende wurden 10 % des Düngers umgesetzt. Beim Klee gras mit C/N 20 hatte der Tongehalt keinen Einfluss. In allen drei Bodenarten kam es innerhalb der ersten zwei Wochen zur Immobilisierung, wobei es bis Versuchende zu keiner eindeutigen Re-Mineralisation kam. Beim Gelb-Senf mit C/N 28 verhielt sich die Mineralisation vergleichbar, jedoch war das Maß der Immobilisierung stärker.

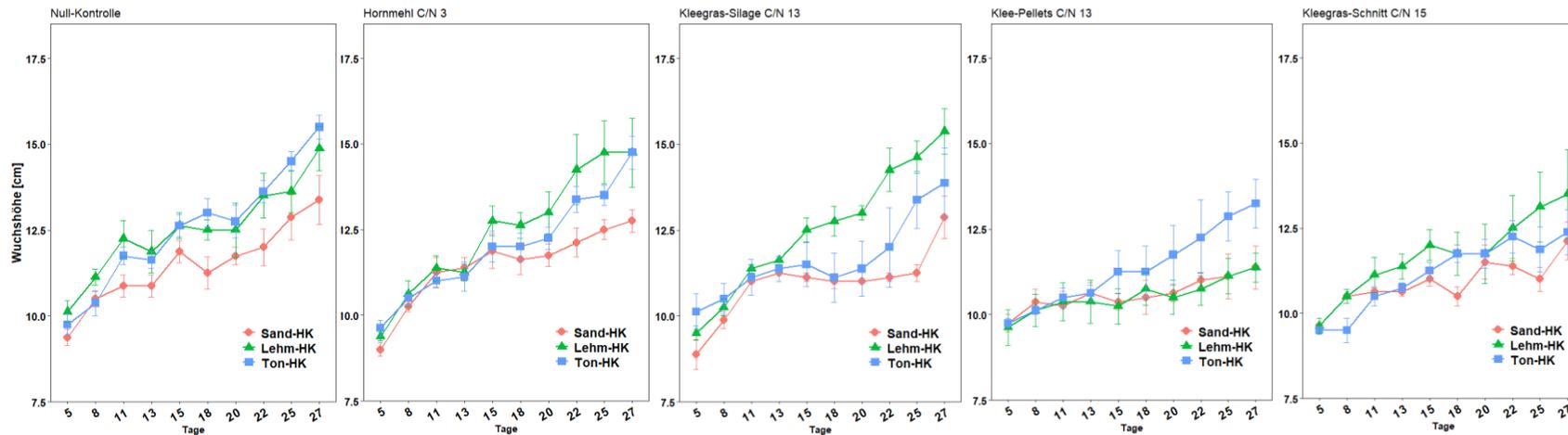


Abbildung 2.5-13: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von Düngemittel und Bodenart des Standorts VH; Wuchshöhe von Roggen; Daten aus dem Pflanzenversuch 2, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm.

Im Pflanzenversuch 2 unterschieden sich die Wachstumsraten innerhalb der ersten zwei Wochen nicht (Abbildung 2.5-13). Es konnte eine Wachstumsdepression nach elf Tagen beobachtet, wobei sich die Wachstumsraten zwei bis vier Tage danach in Abhängigkeit des Tongehalts etwas differenzierten. Es konnte für alle Behandlungen ein geringeres Wachstum auf Sandboden festgestellt werden. Durch die KG-Silage konnte auf dem Tonboden und dem Sandboden ein verzögertes Wachstum im Vergleich zum Lehm Boden beobachtet werden. Im Allgemeinen führte die Düngerapplikation zu keinem geförderten Wachstum, sondern resultierte sogar in Wuchsverzögerung und geringerer finale Wuchshöhe nach 27 Tagen. Im Vergleich der Düngemittel resultierte Klee-gras- und Klee-pellet-Düngung in ein geringeres Wachstum.

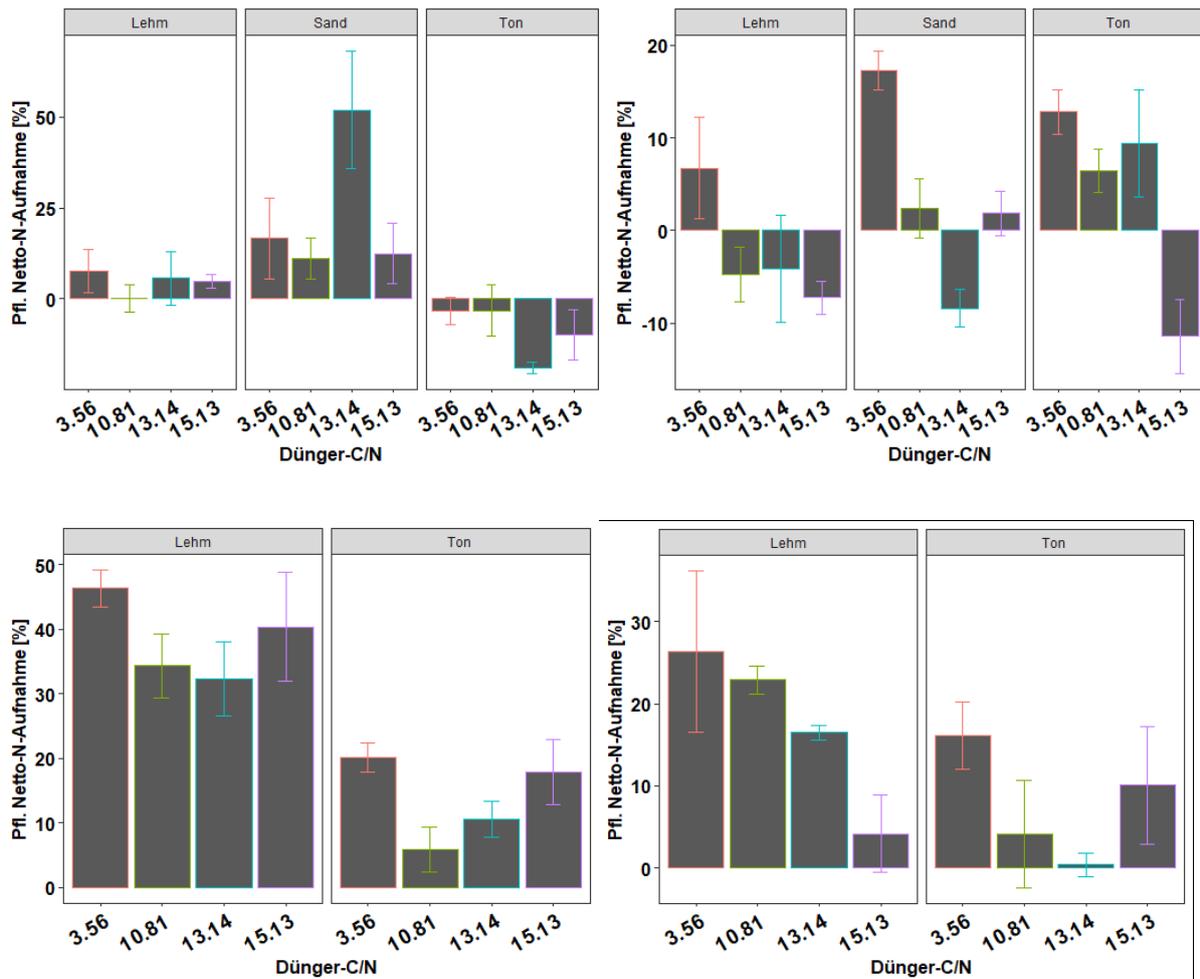


Abbildung 2.5-14: Düngeeffekt in Abhängigkeit von der Bodenart und Dünger-C/N auf Pflanzen-Netto-N-Aufnahme von Roggen im Verhältnis zur ungedüngten Kontrolle nach 42 Tagen; Ackerbaustandorte VH oben links und HK oben rechts, Feldgemüsestandorte ZF unten links und ED unten rechts. Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Düngemittel geordnet nach aufsteigendem C/N-Verhältnis mit C/N 3,5 = Haarmehlpellets, C/N 10,8 = Ackerbohnen-schrot, C/N 13,1 = Kleepellets und C/N 15,1 = Sonnenblumensamenpresskuchen.

In der Netto-N-Aufnahme der Pflanzen hatten sowohl der Standort ($F = 32$; $p < 0,001$), als auch die Bodenart ($F = 29$; $p < 0,001$) und das Düngemittel ($F = 6$; $p < 0,001$) einen signifikanten Effekt (Abbildung 2.5-14). Ebenfalls signifikant war die Interaktion von Standort und Bodenart ($F = 13$; $p < 0,001$), die Interaktion von Standort, Bodenart und Düngemittel ($F = 4$; $p < 0,001$) sowie die Interaktion von Standort und Düngemittel ($F = 2$; $p < 0,05$). Zwischen Bodenart und Düngemittel konnte standortübergreifend keine Interaktion festgestellt werden. Auf den gartenbaulichen Böden konnten die Pflanzen durch Düngung mehr N aufnehmen, als auf den ackerbaulichen Böden, auf denen sogar negative Düngewirkungen auftraten. Der in der Düngewirkung produktivste Standort war ZF, vor ED, vor VH, vor HK. Über alle Böden aller Standorte gemittelt, hatte die Düngung auf dem Lehm- und Sandboden einen größeren Düngeeffekt als auf dem Tonboden. Den größten allgemeinen Düngeeffekt hatte das Haarmehl. Die anderen Dünger unterschieden sich nicht. Standortindividuell, war für VH die Bodenart (F

= 17; $p < 0,001$) und deren Interaktion mit dem Düngemittel signifikant ($F = 3$; $p < 0,05$). Die Düngemittel unterschieden sich nicht, jedoch führten alle Düngemittel auf dem Tonboden zu einer negativen Düngewirkung. Für HK unterschieden sich die Düngemittel hingegen deutlich ($F = 13$; $p < 0,001$) und es lag auch eine Interaktion mit der Bodenart vor ($F = 4$; $p < 0,05$), die ebenfalls die Netto-N-Aufnahme beeinflusste ($F = 4$; $p < 0,05$), sodass die Düngewirkung mit der Kombination von Bodenart und Düngemittel variierte. Für ED hatte die Bodenart einen Effekt ($F = 6$; $p < 0,05$), aber auch die Düngemittel unterschieden sich leicht ($F = 3$; $p < 0,1$). Für ZF war die Netto-N-Aufnahme vergleichbar zu ED, wobei sich die Effekte stärker ausgeprägt waren (Bodenart: $F = 52$; $p < 0,001$; und Düngemittel: $F = 3$; $p < 0,05$).

2.5.3.3 Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungspotentials

Das N-Freisetzungspotential spiegelt sich in der von den Pflanzen aufgenommenen Menge Stickstoff wieder, die innerhalb der Versuchslaufzeit aus der Mineralisation (aus der OBS und dem Dünger) den Pflanzen zur Verfügung gestellt werden konnte. Abbildung 2.5-15 zeigt die Korrelation verschiedener Bodenuntersuchungsparameter und mit der N-Menge aus dem Pflanzenversuch 3. Von den Bodenuntersuchungen waren der Start-Nitrat-Wert (NO_3_DE) der EUF-Analyse und der C- und N-Gehalt der HWL-Extraktion (CHWL und NHWL) positiv, mit relativer Aussagekraft (Korrelationskoeffizient $> 0,5$), signifikant ($p < 0,001$) mit der pflanzlichen N-Aufnahme korreliert. Der Start Nitrat-Wert war nicht korreliert und hatte keine Signifikanz. Der pH-Wert war negativ mit der N-Aufnahme korreliert ($p < 0,001$) sowie schwach negativ korreliert der Schluffgehalt ($p < 0,001$), das C_{org}/N_t -Verhältnis ($p < 0,001$) und der P-Gehalt ($p < 0,01$).

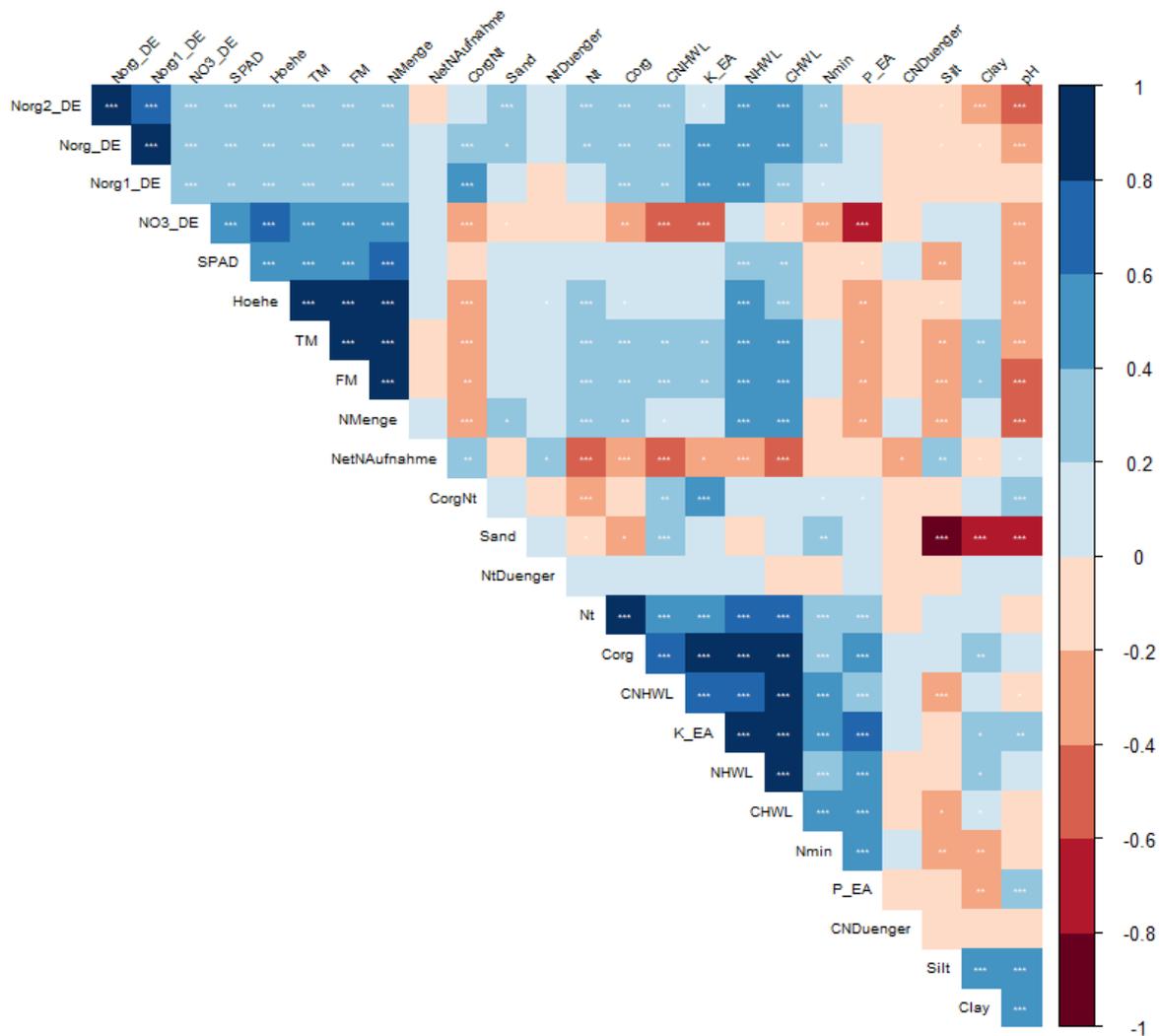


Abbildung 2.5-15: Korrelation unterschiedlicher Boden- und Pflanzenparameter.

Daten aus Pflanzenversuch 3, über alle Böden und Standorte (VH, HK, ED, ZF). Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität – Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizienten), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. Hoehe = finale Pflanzenwuchshöhe, SPAD = finaler Pflanzen N-Status, TM = finale Pflanzen-Biomasse, FM = finale Pflanzen-Frischmasse, NMenge = finale aufgenommene Pfl.-N-Menge, NetNAufnahme = finale Pfl. Netto-N-Aufnahme, Nmin = Start-Nmin, CorgNt = Corg/Nt-Verhältnis, Clay = Tongehalt, Silt = Schluffgehalt, Sand = Sandgehalt, Nt = Boden-Nt-Gehalt, Corg = Boden-Corg-Gehalt, CHWL = CHWL, NHWL = NHWL, CNHWL = CHWL/NHWL-Verhältnis, CNDuenger = Dünger-C/N-Verhältnis, NtDuenger = Dünger-Nt-Gehalt, P_EA = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K_EA = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse), pH = Boden-pH-Wert, NO3_DE = Start-Nitrat-Gehalt (EUF-Analyse), Norg_DE = Boden-Norg-Gehalt (EUF-Analyse, 1.+2. Extraktion), Norg1_DE = Boden-Norg-Gehalt (EUF-Analyse, 1. Extraktion), Norg2_DE = Boden-Norg-Gehalt (EUF-Analyse, 2. Extraktion).

2.5.4 Diskussion

2.5.4.1 Einfluss des Tongehalts auf die N-Mineralisation

Die Standortübergreifende Betrachtung der N-Mineralisation der OBS über alle vier Bodenherkünfte (VH, HK, ED, ZF) zeigte keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit des Tongehalts. Allerdings war die mikrobielle Aktivität vom Tongehalt beeinflusst. Da die Mikroorganismen hauptverantwortlich für die N-Mineralisation, die Immobilisierung (durch Bindung in deren Biomassebildung) und die Re-Mineralisation sind, sollten die verschiedenen Böden genauer betrachtet werden. Ebenfalls könnten andere standortspezifische Bodeneigenschaften die Mineralisation mit beeinflussen (Zhu, 1997). Eine natürliche Heterogenität in Böden und deren Mineralisierungsleistung ist zu erwarten (Beuschel et al., 2019; Habib-ur-Rahman et al., 2022; Sawicka et al., 2020), die u.a. ihre Eignung als potentielle Pflanzenbaustandorte mit Nieder- und Hohertragszonen vorgibt, da Bodenphysikalische und -biologische Eigenschaften starken Einfluss auf die Produktivität und Fruchtbarkeit eines Standorts und letztlich auf die Menge und Qualität der landwirtschaftlichen Produktion haben (Dercon et al., 2006; Techen et al., 2020; Wallor et al., 2018; Xue et al., 2016; Yao et al., 2014). Aber auch die (landwirtschaftliche) Nutzungsweise wirkt sich sowohl kurzfristig als auch langfristig auf die Bodeneigenschaften aus (Gajda et al., 2020; Naeem et al., 2022; Zhanguo et al., 2018).

Trennt man die Standorte/Böden in ihrer Nutzungsart bzw. –Vorgeschichte in ackerbaulich genutzte und gemüsebaulich genutzte Bewirtschaftungsweise auf, wurde auf den Böden der Ackerstandorte insgesamt und je Bodenart mehr N mineralisiert (Abbildung 2.5-4), was sich auch in der Pflanzenentwicklung zeigte (Abbildung 2.5-5). Gleichzeitig zeigten die ackerbaulichen Böden bei geringerem Tongehalt eine geringere mikrobielle Aktivität und N-Mineralisation (Abbildung 2.5-4; sowie auch beim SPAD-Wert des Sandbodens, Abbildung 2.5-5), was der Hypothese 1 entgegensteht, dass mit steigendem Tongehalt die relative Mineralisation Boden-Stickstoff sinkt. Die gemüsebaulichen Standorte zeigten im Mittel erst nach 35 Tagen eine Differenzierung der umgesetzten N_{\min} -Menge, wobei diese bei niedrigerem Tongehalt höher ausfiel. Bei den Feldgemüseböden lagen allerdings je Herkunftsstandort nur zwei Tongehaltsstufen vor. Diese Lehm- und Tonböden der gleichen Tongehaltsstufen (durchschnittlich bei 21,8 % und 31,5 %, respektive) unterschieden sich bei den ackerbaulichen Standorten nicht, lagen jedoch auf höherem Niveau. Der Sandboden, mit einem mittleren Tongehalt von 14,5 % setzte durchschnittlich $244,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ um und lag somit ebenfalls deutlich oberhalb der gartenbaulichen Böden, trotz geringerem Tongehalt. Die Pflanzenversuche konnten dies bestätigen. Diverse Studien haben gezeigt, dass die Funktionen von Bodenmikroorganismen einerseits mit der Bodenart variieren, aber andererseits durch das (landwirtschaftliche) Bodenmanagement beeinflusst werden (Reeve et al., 2010).

Diese Ergebnisse machen deutlich, dass eine Aussage über den Einfluss des Tongehalts auf die N-Mineralisation nicht generalisiert getroffen werden kann und eine Standortsspezifische Betrachtung vorgenommen werden sollte, die die bewirtschaftungsweise berücksichtigt. Denn neben der Bodenart scheint die Bewirtschaftungsvorgeschichte bzw. andere Standorteigenschaften einen Einfluss zu haben, der die Wirkung des Tongehalts auf die Mineralisation zu regulieren scheinen. Aufgrund der untersuchten Bodenparameter, siehe Tabelle 2.5-3, können die beobachteten N-Mineralisationen nicht eindeutig erklärt werden, siehe 2.5.3.3.

Reeve et al. (2010) erwähnen, dass die physikalisch-chemischen Bodeneigenschaften primär durch die Bodenart beeinflusst sind, hingegen biologische Eigenschaften und die mikrobielle Aktivität stärker durch agronomische Management beeinflusst werden.

Bei weiterer Differenzierung je Standort zeigte sich einerseits an jedem Standort eine unterschiedlich hohe Mineralisationsleistung und, dass sich die N-Mineralisation abhängig vom Tongehalt unterschied. Der Tongehalt hat einen Einfluss auf die mikrobielle Aktivität und Mineralisation, allerdings, ohne, dass eine generelle Aussage getroffen werden kann, dass mit höherem Tongehalt die Mineralisation größer oder geringer wäre bzw. schneller oder langsamer abläuft. Somit kann die Hypothese 1 nicht betätigt werden, dass mit zunehmendem Tongehalt die relative Mineralisation des Boden-N sinkt. Sie trifft zwar für die Böden von ED zu und auch für den Sandboden von HK, nicht aber für die Böden von VH oder ZF. Um möglicherweise eine generalisierte Aussage treffen zu können, müsste eine repräsentative Menge gemüsebaulicher und ackerbaulicher Böden untersucht werden. Dies war in diesem Projekt jedoch nicht realisierbar aufgrund der Schwierigkeit Böden/Schläge auszumachen, die bei gleicher Nutzungsvorgeschichte und Bewirtschaftungsweise unterschiedliche Tongehalte aufweisen (die nicht auf Erosionsvorgänge durch Hanglagen zurückzuführen sind, wodurch Unterschiede anderer Bodenparameter zu erwarten sind, die die Mineralisation und Produktivität zusätzlich beeinflussen).

2.5.4.2 Einfluss des Tongehalts auf die Netto-N-Mineralisation und Wechselwirkung mit dem Düngemittel

Sowohl die Bodenart, als auch die Art des Düngemittels bzw. dessen C/N-Verhältnis waren ausschlaggebend für die Netto-Mineralisation (Abbildung 2.5-11, Abbildung 2.5-12 und Abbildung 2.5-14). Eine Interaktion konnte jedoch statistisch nur im Pflanzenversuch bestätigt werden. In Abhängigkeit von der Bodenart konnten die Dünger unterschiedlich weit umgesetzt werden. Die höchste Umsetzung beim Inkubationsversuch 2 (Tabelle 2.5-5) wurde im Lehm- und Tonboden und Sandboden beobachtet. Beim Inkubationsversuch 5 hatte nur der Sandboden eine geringere Auswirkung auf die Netto-Mineralisation. Im Pflanzenversuch 3 hingegen konnte für dieselben Böden (VH) die größten Netto-N-Aufnahmen beim Sandboden festgestellt werden. Hierbei ist der Einfluss der Pflanzenwurzeln zu berücksichtigen („Rhizosphären-Priming-Effekt“), bzw. die Konkurrenz von Pflanzen und Mikroorganismen um Stickstoff (Vargas et al. 2020), was diese Diskrepanz (zumindest teilweise) erklären könnte. Denn in einer Bodenmatrix mit größerem Porenraum bei gleichzeitig geringerer Bindungsfläche (Ionenaustauscher/Ton-Humus-Komplexe) herrscht eine höhere Beweglichkeit von NO_3^- und NH_4^+ mit der Bodenlösung, wodurch diese schneller von den Pflanzen aufgenommen werden können. Auch konkurrieren die Wurzeln mit weniger Mikroorganismen im Vgl. zum Lehm- und Tonboden. Zu beachten ist hierbei auch der spezifische Versuchsansatz, der das Pflanzenwachstum mit der N-Verfügbarkeit reguliert, wodurch von den Pflanzen aufgenommen wird, was verfügbar ist und so die Mikroorganismen und der physische Ionenaustauscher des Bodens den Stickstoff weniger zurückhalten / immobilisieren können. Durch diese Ergebnisse kann dennoch die Hypothese 3 wiederlegt werden, dass die Netto-N-Mineralisation des organischen Düngemittels unabhängig vom Tongehalt ist. Selbst, wenn keine eindeutige Aus-

sage über die Wechselwirkung von Tongehalt und Düngemittel C/N-Verhältnis getroffen werden kann. Bei Betrachtung der Düngemittel führten diejenigen zu N-Immobilisierung mit $C/N > 10$ (Abbildung 2.5-12 und Abbildung 2.5-13). Hierbei unterschieden sich jedoch die Bodenarten. So führte bspw. das KG15 im Sandboden zu N-Immobilisierung mit -43 % Netto-Mineralisation, im Lehm Boden nur noch mit -14 % und im Tonboden fand keine N-Festlegung im Boden statt, aber das Düngemittel konnte nur zu 3 % mineralisiert werden. Beim Pflanzenversuch 3 hingegen führte das Düngemittel mit C/N 15 auf den VH-Böden nur beim Tonboden zu einer negativen Netto-N-Aufnahme (Abbildung 2.5-14). Beim Hornmehl mit C/N 3 spielte die Bodenart bei der Inkubation keine Rolle und bei allen drei Tongehaltsstufen wurde das Düngemittel zu 63 % umgesetzt. Dies deutet darauf hin, dass je größer das C/N-Verhältnis der Düngemittel und je niedriger der Tongehalt des Bodens, desto schwerer ist die Umsetzbarkeit, desto stärker ist N-Immobilisierung (Bindung im Boden) und desto länger sollte dessen (Re-) Mineralisation dauern. Obwohl dies ein genereller Trend zu sein schien, gab es Ausnahmen. Zum Beispiel resultierte das KG10 auf dem Sandboden in nur 4 % Umsetzung im Vergleich zum Lehm- und Tonboden, die sich nicht signifikant unterschieden, jedoch im Lehm Boden mit 27 % eine 5 % höhere Umsetzung erreicht wurde. Das KG20 bspw. führte zwar in allen Böden zu Immobilisierung, jedoch im Lehm Boden nur halb so stark wie im Sand- und Tonboden, die sich nicht unterschieden (Abbildung 2.5-11). Dies lässt sich ggf. dadurch erklären, dass es je (individuelle) Düngemittelabbaubarkeit eine kritische Tongehaltsmenge gibt, ab der die Abbaubarkeit beeinträchtigt wird. Andere Faktoren der Düngemittel- oder Boden-Eigenschaften könnten allerdings auch einen Einfluss haben (Zhu, 1997). Beim Pflanzenversuch 2 (Tabelle 2.5-6) unterschied sich bspw. die Wuchshöhenentwicklung nach Kleegrass-Silage- und Kleepellet-Düngung, obwohl die Düngemittel das gleiche C/N-Verhältnis besitzen, gleich fein vermahlen wurden und in derselben Menge appliziert wurden (Abbildung 2.5-13). Im Pflanzenversuch 3 (Tabelle 2.5-6), konnte selbst unter der Annahme anderer möglicher Einflussfaktoren bzw. mit einzelnen Ausnahmen, der generelle Trend nicht bestätigt werden, dass bei größerem Düngemittel-C/N-Verhältnis und niedrigerem Tongehalt, weniger mineralisiert wird bzw. Pflanzenverfügbar ist (Abbildung 2.5-14). Für dieselben Böden von VH war die Netto-N-Aufnahme größer bei niedrigerem Tongehalt und führte nur im Tonboden zu negativen Netto-N-Aufnahmen der Pflanzen und dies bei allen Düngemitteln. Abgesehen vom Düngemittel mit C/N 13, das im Tonboden zur negativsten Netto-N-Aufnahme und im Sandboden zur positivsten führte, unterschieden sich die Düngemittel je Bodenart nicht voneinander. Gegeben der beobachteten Herkunfts-/Standortsunterschiede, konnte kein genereller Trend für die Interaktion von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart festgestellt werden. Aus dem Pflanzenversuch (3; Tabelle 2.5-6) ging jedoch hervor, dass unabhängig vom Dünger-C/N, über alle Böden aller Standorte gemittelt, die Düngung im Allgemeinen im Lehm Boden und Sandboden einen größeren Düngereffekt hatte als im Tonboden. Auch im Inkubationsversuch 5 (Tabelle 2.5-5) hatte im Mittel die Bodenart und das Düngemittel einen Effekt auf die Netto-Mineralisation (Abbildung 2.5-12). Im individuellen Fall der einzelnen Düngemittel unterschied sich jedoch auch hier der Effekt der Bodenart. Während der Inkubationszeiten kam es in Abhängigkeit der Bodenart und Düngemittel zu verschiedenen Zeiten zur Immobilisierungsprozessen und teilweise auch wieder zur Re-Mineralisation (Abbildung 2.5-12). Zwar konnte tendenziell für einige Dün-

gemittelt beobachtet werden, dass es bei der Netto-Mineralisation beim Tonboden und Lehmboden anfänglich und auch zeitlich vor dem Sandboden zu Immobilisierungsprozessen kam, jedoch war dies nicht eindeutig und ist auch dadurch zu erklären, dass die N-Mineralisation im Sandboden der Kontrolle zum Tag 4 (auch im Vergleich zum Ton- und Lehmboden) hoch ausfiel, während die N-Mineralisation der Kontrolle im Ton- und Lehmboden an Tag 1 hoch ausfiel, im Verhältnis zur N-Mineralisation der Düngemittel (und auch im Vergleich zum Sandboden) wodurch sich die Netto-Mineralisation berechnet. Diese Daten sind hier nicht dargestellt. Die Hypothese 2 kann somit nicht bestätigt werden, dass mit steigendem Tongehalt zunächst die Mineralisationsgeschwindigkeit des organischen Düngemittels sinkt. Auch konnten in den Inkubationsversuchen eher beim Sandboden mit geringerem Tongehalt geringere maximale Netto-Mineralisationen erkannt werden, wobei sich der Lehmboden und Tonboden in den meisten Fällen statistisch nicht signifikant unterschieden. Auch die Wachstumsentwicklung im Pflanzenversuch 2 (Tabelle 2.5-6) zeigte keine Unterschiede der Bodenart auf die anfänglich mineralisierte Dünger-N-Menge bzw. Pflanzen-verfügbaren N-Menge, die so in unterschiedliche Wachstumsraten resultieren sollte (Abbildung 2.5-13). Bei der N-Mineralisation (nicht Netto), wie beim Einfluss des Tongehalts auf die Kontrolle bereits oben gezeigt, verlief die Mineralisation in der Regel anfänglich schneller bei hohen Tongehalten und erreicht auch höhere maximale N_{\min} Gehalte bzw. konnte im Vergleich zum Sandboden mehr mineralisiert werden.

Die Ergebnisse der Pflanzenversuche hinsichtlich Düngewirkung in Abhängigkeit des Tongehalts ergaben einen klareren Effekt der Bodenart und Wechselwirkung mit den Düngemitteln verglichen mit den Ergebnissen der Inkubationsversuche. Die Wuchshöhenentwicklung zeigte, dass die Düngerapplikation zu keinem geförderten Wachstum führte, sondern (im Vergleich zur Kontrolle) sogar zu Wuchsverzögerung und geringerer finaler Wuchshöhe nach 27 Tagen (Abbildung 2.5-13). Die SPAD-Messungen bestätigten die Beobachtungen der Wuchshöhenentwicklung, wie auch oben beim Pflanzenversuch 3 dargestellt (SPAD-Werte des Pflanzenversuch 2 sind daher nicht zusätzlich aufgeführt). Hier könnte eine spätere N-Verfügbarkeit durch Düngemittel induzierte N-Immobilisierung verantwortlich sein. Dies lässt sich jedoch nur vermuten, da die Ergebnisse des Inkubationsversuch 5 nicht eindeutig genug hinsichtlich der Immobilisierungsprozesse waren. Hier im speziellen im Vergleich des Wachstums mit Klee-gras-Silage und Kleepellets mit C/N 13 und Klee-gras mit C/N 15, da diese v.a. beim Sandboden negativ beeinflusst waren. Im Inkubationsversuch 5 lag bei Klee-gras-15 sowohl beim Sandboden, als auch beim Tonboden bis Tag 35 eine N-Immobilisierung vor, die sogar beim Tonboden ausgeprägter war als beim Sandboden. Es lässt sich jedoch in den Pflanzenversuchen erkennen, dass die verschiedenen Düngemittel unterschiedlich gut bzw. schnell umgesetzt wurden. Im Pflanzenversuch 2 (Tabelle 2.5-6) zeigte sich dies durch mehr und weniger starke Wachstumsbeeinträchtigung. Dieser spiegelt auch der Pflanzenversuch 3 wieder (Abbildung 2.5-14). Der Pflanzenversuch 3 (Tabelle 2.5-6) verdeutlicht in diesem Sinne durch die Betrachtung aller Standorte die unterschiedlichen Zusammenhänge von Bodenart und Düngerumsetzung. Die bei der ungedüngten Kontrolle in der N-Versorgung schlechter abschließenden gartenbaulichen Standorte und Böden (Abbildung 2.5-10), sowie auch der Sandboden, konnten die Düngemittel wesentlich besser umsetzen/nutzen als die ackerbaulichen Standorte, was in

signifikant höhere prozentuale Netto-N-Aufnahmen resultierte. Dies ist jedoch eine relative Betrachtung der Düngemittel im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle, die auf den gartenbaulichen Böden und dem Sandboden signifikant geringere N-Aufnahmen erreichte. Die Netto-Mineralisation der Düngemittel im Sandboden (VH) im Inkunationsversuch 5 (Tabelle 2.5-6) war ebenfalls geringer im Vergleich zum Lehm- und Tonboden. Dennoch stellt sich die Frage nach der spezifischen Bedeutung der Bewirtschaftungsvorgeschichte. Auch wenn wir aus unseren aktuellen Versuchen dies nicht im speziellen ableiten können, so bestätigt sich der signifikante Einfluss des Standorts (wie unter 2.5.3.1 mehrfach festgestellt werden konnte) bzw. der Bodenherkunft und auch die Unterteilung der Standorte in deren bisherigen ackerbauliche oder gartenbauliche Nutzung. Diese unterschiedliche Nutzung setzt ein unterschiedliches Düngemanagement voraus, wodurch die Hypothese 4 bestätigt werden kann, dass das bisherige Düngemanagement Einfluss auf die Netto-N-Mineralisation hat. Im Pflanzenversuch 3 (Abbildung 2.5-14) konnte dies durch die Interaktion von Standort und Düngemittel sowie von Standort, Bodenart und Düngemittel in der Düngewirkung bestärkt werden.

2.5.4.3 Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungspotentials

Die Korrelationsanalyse der Bodenuntersuchungsparameter deutet auf das Potential der HWL und der EUF Analysen hin, anstatt des üblichen N_{\min} -Werts als Ausgangsbasiswert für Düngerechnungsmodelle den EUF-Nitrat-Wert oder den N_{HWL} -Gehalt zu verwenden, da diese stärker und positiver mit der von den Pflanzen aufgenommenen Menge N korreliert waren (Abbildung 2.5-15). Eine genauere Erfassung des N-Versorgungsstaus des Bodens zur Berechnung des Düngedarfs könnte zu einer Bedarfsgerechteren Düngung verhelfen, Überdüngung vorbeugen, um so langfristig die N-Versorgung zu stabilisieren.

2.5.5 Zusammenfassung

Die betriebliche und kulturspezifische Düngerberechnung braucht eine optimierte Modellierung der N-Nachlieferung. Die Untersuchungen wurden durchgeführt um Ursachen und Einflussfaktoren für Unterschiede im N-Freisetzungverhalten von verschiedenen Böden und Düngemitteln zu identifizieren, diese zu parametrisieren, um sie Programmen zur Berechnung der N-Düngung (N-Expert, NDICEA) zur Verfügung zu stellen (siehe 0). Fokus der Untersuchungen lag auf dem Einfluss der Bodenart, im speziellen des Tongehalts und des C/N-Verhältnisses der Düngemittel.

Beim Einfluss des Tongehalts auf die N-Mineralisation aus der organischen Bodensubstanz, verlief diese bei den hier untersuchten Böden in der Regel anfänglich schneller bei hohem Tongehalt und erreichte auch höhere maximale N_{\min} -Gehalte bzw. konnte im Vergleich zum Sandboden mehr mineralisiert werden. Die Ergebnisse machen aber auch deutlich, dass eine Aussage über den Einfluss des Tongehalts auf die N-Mineralisation bspw., dass mit höherem Tongehalt die Mineralisation generell größer oder geringer wäre bzw. schneller oder langsamer abläufe nicht generalisiert getroffen werden kann, da sich die Böden in Abhängigkeit des Standorts/Herkunft im Einfluss des Tongehalts unterschieden und eine standortsspezifische Betrachtung vorgenommen werden sollte. Obwohl im Allgemeinen der Tongehalt einen Einfluss auf die der Mineralisation zugrundeliegenden mikrobiellen Aktivität hatte, konnten nur

standortspezifisch unterschiedlich hohe Mineralisationsleistungen in Abhängigkeit der Bodenart festgestellt werden. Gleichzeitig deuten die Ergebnisse auf einen übergeordneten Einfluss der Bewirtschaftungsvorgeschichte hin, der die Wirkung des Tongehalts auf die Mineralisation zu regulieren/beeinflussen scheint. Dies konnte jedoch im Rahmen des Projekts, mit den zu Verfügung stehenden Böden und Versuchsbedingungen, nicht weitreichend genug untersucht werden, um Bewirtschaftungshistorisch-bedingte Einflussfaktoren identifizieren zu können.

Bei der Applikation von organischen Düngern waren sowohl die Bodenart, als auch die Art des Düngemittels bzw. dessen C/N-Verhältnis ausschlaggebend für die Netto-N-Mineralisation. In Abhängigkeit von der Bodenart konnten die Dünger unterschiedlich weit umgesetzt werden. Dies unterschied sich jedoch mit der Bodenherkunft (Standort und Bewirtschaftungsvorgeschichte) und der individuellen Auswahl des Düngemittels. Auch unterschieden sich z.T. die Ergebnisse der N_{\min} -Untersuchungen mit den Ergebnissen der Pflanzenaufnahme. Die Düngemittel mit $C/N > 10$ tendierten eher zu Immobilisierungsprozessen. Hierbei wurden die Düngemittel mit $C/N > 15$ stärker zurückgehalten und im Untersuchungszeitraum nicht oder unwesentlich ($< 20\%$) mineralisiert. Die Wuchshöhenentwicklung im Pflanzenversuch zeigte auch, dass die Düngerapplikation zu Wuchsverzögerung und geringerer Wuchshöhe führte, was durch diese mikrobiell bedingte Immobilisierung zu erklären ist, die die Mineralisationsrate zusätzlich reduziert, sodass weniger N Pflanzenverfügbar ist. Der Einfluss der Bodenart ist für diese Düngemittel in der Praxis daher relativ und weniger relevant wie das Dünger-C/N zu bewerten, da sie für den Einsatz im Gemüsebau aufgrund der kurzen kulturabhängigen Vegetationszeiten somit nicht geeignet erscheinen. Bei den Düngern mit $C/N < 5$ hatte die Bodenart kaum Einfluss und auch die Netto-Mineralisation und der Düngeeffekt waren am größten. Eine Interaktion der Bodenart mit dem Dünger-C/N konnte nur standortspezifisch festgestellt werden. Aus der pflanzlichen Netto-N-Aufnahme lässt sich zumindest ableiten, dass über alle Düngemittel und Böden aller Standorte gemittelt, die Düngung auf dem Lehm- und Sandboden einen größeren relativen Düngeeffekt hatte als im Tonboden. Die standortunterschiedliche Umsetzungsdynamik könnte zusätzlich durch andere Faktoren der Düngemittel- oder Boden-Eigenschaften beeinflusst worden sein, sodass diese nicht ausschließlich durch das Dünger-C/N-Verhältnis oder den Boden-Tongehalt zu erklären war. Hierbei ist die spezifische Bedeutung der Bewirtschaftungsvorgeschichte weiter zu untersuchen. Denn die bei der ungedüngten Kontrolle in der N-Versorgung schlechter abschließenden gartenbaulichen Standorte und Böden konnten relativ betrachtet die Düngemittel wesentlich besser umsetzen/nutzen als die ackerbaulichen Standorte.

Daher besteht erweiterter Untersuchungsbedarf des Einflusses der (langfristigen) Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Charakterisierung des bewirtschaftungsspezifischen N-Nachlieferungspotentials, wofür die Untersuchungen in einer Projektverlängerung fortgesetzt werden sollen. Diese zielt darauf ab, den systemischen Einfluss der Bewirtschaftungsvorgeschichte auf N-Nachlieferung und Düngemittelumsatz zu identifizieren, um Standortunterschiede auch Betriebssystem-spezifisch (wie z.B.: Leguminosenanteil, N-Bilanz, Humusbilanz, Düngerart – mehr Wirtschaftsdünger, Biogasgärreste, N-Handelsdünger) parametrisieren zu können, so-

dass ein realistisches bewirtschaftungsspezifisches N-Nachlieferungspotential/-leistung bestimmt werden kann. Dies wird bisher in Nährstoffmanagementsystemen und deren Modellierung unzureichend oder überhaupt nicht berücksichtigt.

2.5.6 Fazit

Die N-Freisetzung organischer Dünger in gärtnerischen Kulturen unterscheidet sich je Standort, Boden und Vorgeschichte des Düngemanagements. Hierbei hatte der Tongehalt Einfluss auf Höhe und Verlauf der N-Freisetzung, aber diese war uneinheitlich über verschiedene Standorte und Betriebe. Je weiter das C/N-Verhältnis des Düngemittels, desto geringer war die N-Freisetzung, wobei Unterschiede in Höhe und Zeitverlauf sowie nach Standort und Betrieb vorlagen. Die untersuchten (pflanzlichen) organischen Düngemittel mit C/N-Verhältnissen > 10 sind für eine schnelle Düngewirkung für den organischen Gemüsebau nur bedingt geeignet. Die Ergebnisse heben die Bedeutung der speziellen Untersuchung der Bewirtschaftungsvorgeschichte für das weitere Verständnis und die Verbesserung der Düngeneffizienz hervor.

2.5.7 Literatur

- Anderson, J.P.E., Domsch, K.H., 1978: A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol Biochem* 10:215–221
- 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>
- 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>
- Beck, T., Joergensen, R.G., Kandeler, E., Makeschin, F., Nuss, E., Oberholzer, H.R., Scheu, S., 1997: An inter-laboratory comparison of ten different ways of measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol Biochem* 29:1023–1032
- Beuschel, R., Piepho, H. P., Joergensen, R. G., Wachendorf, C., 2019: Similar spatial patterns of soil quality indicators in three poplar-based silvo-arable alley cropping systems in Germany. *Biology and Fertility of Soils*, 55(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1324-3>
- Dercon, G., Deckers, J., Poesen, J., Govers, G., Sánchez, H., Ramírez, M., et al., 2006: Spatial variability in crop response under contour hedgerow systems in the Andes region of Ecuador. *Soil and Tillage Research*, 86(1), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.017>
- Fox, J. und Weisberg, S., 2019: An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL: <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Gajda, A.M., Czyż, E.A., Ukalska-Jaruga, A., 2020: Comparison of the Effects of Different Crop Production Systems on Soil Physico-Chemical Properties and Microbial Activity under Winter Wheat. *Agronomy* 2020, 10, 1130. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081130>
- Habib-ur-Rahman, M., Raza, A., Ahrends, H.E. et al., 2022: Impact of in-field soil heterogeneity on biomass and yield of winter triticales in an intensively cropped hummocky landscape under temperate climate conditions. *Precision Agriculture* 23, 912–938, 2022). <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09868-x>
- Halpern, A. McBane, G., 2006: Experimental physical chemistry: a laboratory textbook. W. H. Freeman, 2006, 608. 0716717352, 9780716717355
- Hothorn, T., Bretz, F., Westfall, F., 2008: Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal* 50(3), pp. 346-363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>
- Jiang, C., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Maruo, T., 2017: A correlation analysis on chlorophyll content and SPAD value in tomato leaves. *Horticulture Research*, No. 71, 37–42. doi: 10.20776/S18808824-71-P37
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B., Christensen, R.H.B., 2017: “lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models.” *Journal of Statistical Software*, *82*(13), 1-26. doi:10.18637/jss.v082.i13
- Lenth, R.V., 2021: emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.7.1-1. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

- Naeem, M., Mehboob, N., Farooq, M., Farooq, S., Hussain, S.M., Ali, H., Hussain, M., 2021: Impact of Different Barley-Based Cropping Systems on Soil Physicochemical Properties and Barley Growth under Conventional and Conservation Tillage Systems. *Agronomy* 2021, 11, 8. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010008>
- Neubauer, H. und Neubauer, E., 1940: Quadratmeter-Feldversuche zur Prüfung der Brauchbarkeit der Keimpflanzenmethode. *Bodenkunde und Pflanzenernährung*. <https://doi.org/10.1002/jpln.19400210127>
- Neubauer, H., 1937: Wie lässt sich die Brauchbarkeit von Laboratoriumsmethoden zur Bestimmung des Nährstoffgehalts der Böden am besten prüfen? *Bodenkunde und Pflanzenernährung*, Volume 4, Issue 1-2, 30-50; <https://doi.org/10.1002/jpln.19370040108>
- Reeve, J., Schadt, C., Carpenter-Boggs, L. et al., 2010: Effects of soil type and farm management on soil ecological functional genes and microbial activities. *ISME J* 4, 1099–1107, 2010: <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.42>
- Techen, A. K., Helming, K., Brüggemann, N., Veldkamp, E., Reinhold-Hurek, B., Lorenz, M., et al., 2020: Soil research challenges in response to emerging agricultural soil management practices. *Advances in Agronomy*. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.01.002>
- Sawicka, B., Krochmal-Marczak, B., Pszczołkowski, P., Bielińska, E.J., Wójcikowska-Kapusta, A., Barbaś, P., Skiba, D., 2020: Effect of Differentiated Nitrogen Fertilization on the Enzymatic Activity of the Soil for Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L. [Lam.]) Cultivation. *Agronomy* 2020, 10, 1970. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121970>
- Scheu, S., 1992: Automated measurement of the respiratory response of soil microcompartments: active microbial biomass in earthworm faeces. *Soil Biology and Biochemistry* 24:1113–1118
- Sradnick, A., Feller, C., Fink, M., 2017: Nährstoffgehalte und N-Mineralisierung organischer Düngemittel. URL: http://www.igzev.de/publikationen/IGZ_Organische_Duenger.pdf
- Sradnick, A., Feller, C., 2020: A Typological Concept to Predict the Nitrogen Release from Organic Fertilizers in Farming Systems. *Agronomy* 10(9), 1448. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091448>
- Vargas, T.d., Concilio, A., Woyann, L.G. et al., 2020: Rhizosphere priming effect on N mineralization in vegetable and grain crop systems. *Plant Soil* 452, 281–293 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04566-5>
- Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- Und Forschungsanstalten (VDLUFA) (Hrsg.), 2016. *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch)*, Bd. I Die Untersuchung von Böden, 4. Aufl., VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Wallor, E., Kersebaum, K. C., Ventrella, D., Bindi, M., Cammarano, D., Coucheney, E., et al., 2018: The response of process-based agro-ecosystem models to within-feld variability in site conditions. *Field Crops Research*, 228, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.021>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L.D., François, R., Grolemond, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T.L., Miller, E., Bache, S.M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D.P., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., 2019: Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wickham, H., 2016: *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., 2022: *_dplyr: A Grammar of Data Manipulation_*. R package version 1.0.9, <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
- Xue, W., Huang, L., Yu, F. H., 2016: Spatial heterogeneity in soil particle size: Does it affect the yield of plant communities with different species richness? *Journal of Plant Ecology*, 9(5), 608–615. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtv082>
- Yao, R. J., Yang, J. S., Zhang, T. J., Gao, P., Wang, X. P., Hong, L. Z., Wang, M. W., 2014: Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. *Geoderma*, 232–234, 381–393. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.006>
- Zhanguo, B., Caspari, T., Ruiperez Gonzalez, M., Batjes, N.H., Mäder, P., Bünemann, E.K., de Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Sofia Santos Ferreira, C., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M. Tóth, Z., 2018: Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 265, 2018, Pages 1-7, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>

Zhu, Z.L., 1997: Mineralization of soil nitrogen. In: Zhu, Z.L., Wen, Qx., Freney, J.R. (eds) Nitrogen in Soils of China. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 74. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5636-3_3

3 Ökologischer Gemüsebau - Herausforderungen und Lösungsansätze

Herausforderungen

Im Rahmen der Diskussionen über die Nährstoffnutzung und das Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau wurde im vorliegenden Projekt der Fokus auf die Situation im ökologischen Freiland-Gemüsebau gelegt. Unter den allgemeinen Prinzipien des ökologischen Anbaus Nachhaltigkeit, Selbstregulation, Nutzung ökologischer Zusammenhänge und Stoffkreisläufe stellen Besonderheiten in Anbausystemen mit Sonderkulturen (z. B. sehr hoher Nährstoffbedarf, hohe Qualitätsanforderungen, Viehlosigkeit) eine besondere Herausforderung dar.

Verschiedene Publikationen aus vergangenen Jahren weisen darauf hin (von Fragstein et al. 2004, Cuijpers et al. 2008, Voogt 2014, Titarelli et al. 2017, Zikeli et al. 2017, Möller 2018), dass es zu erheblichen Nährstoffungleichgewichten kommen kann, häufig aufgezeigt an Bilanzen mit z. T. hohen N-Salden und negativen K-Salden (Watson et al. 2002, Hülsbergen et al. 2015, Kolbe 2015). Die P-Salden differierten nach Umfang des Einsatzes organischer Dünger tierischer Herkunft.

Die besonderen Herausforderungen des ökologischen Gemüsebaus ergeben sich aus den Anforderungen der Kulturen. Gemüse wächst relativ schnell und nimmt dabei viele Nährstoffe auf. Mit dem Verkauf der Pflanzen werden ein Großteil der aufgenommenen Nährstoffe verkauft. Im Anbau wird insbesondere auf die Verfügbarkeit des Stickstoffs geachtet und mit organischen Düngern erreicht, die hohe Anteile umsetzbaren Stickstoff bereitstellen wie z. B. Keratine. Die Nährstoffe müssen in großem Umfang in die Betriebe importiert werden, da nur wenige eine eigene Tierhaltung haben, ein betriebsinterner Stoffkreislauf also nur bedingt realisiert werden kann. Die tierischen Handelsdünger kommen z. T. aus Herkünften, die nicht die Prinzipien der ökologischen Tierhaltung erfüllen. Ausgehend von dieser Situation wurde das Projekt auf folgende Problemstellungen und Ziele ausgerichtet.

- Wie sind die Nährstoffflüsse ökologisch wirtschaftender Gemüsebaubetriebe, welche Düngemittel werden angewendet und welche Nährstoffsalden werden beobachtet?
- Könnten bei unausgeglichene Bilanzen andere Düngestrategien eine gezieltere, auf den genaueren Bedarf abgestimmte Düngung erreichen, um die Effizienz der Düngung zu erhöhen. Modelle und Berechnungsprogramme sollten dafür geprüft und für die Bedingungen des ökologischen Anbaus angepasst werden, um eine höhere Akzeptanz von modellgestützten, digitalen Hilfsmittel für die Praxis zu erreichen.
- Um einerseits die Stickstoffzufuhr über externe Handelsdünger zu reduzieren und andererseits einen gewissen N-Ausgleich für den Zukauf N-betonter Düngemittel zu erreichen, sollten die Möglichkeiten zur Erhöhung der N₂-Fixierung auf den eigenen Flächen geprüft werden.

Hoftorbilanzen als Indikator für das Nährstoffmanagement

Die Situationsanalyse zum Öko-Gemüse basiert auf einer Befragung von Betrieben in NRW, RLP, BW und BY, für die letztlich 12 Betriebe gewonnen werden konnten. Neben den Covid-

19-bedingten beschränkten Kontaktmöglichkeit war die Bereitschaft der Betriebe eher gering, an einer solchen Untersuchung teilzunehmen. Die Zurückhaltung schien einerseits an den in den zurückliegenden Jahren häufigeren Forschungsprojekten mit Befragung zu liegen und andererseits an dem Thema Nährstoffbilanzen, das mit Forderungen und Regulationen der Düngerverordnung eher negativ besetzt ist, aber damals die Verpflichtung zur Stoffstrombilanzierung noch nicht bestand.

In der Durchführung wurde deutlich, dass sich aus den betrieblich vorhandenen Daten für alle Betriebe Hoftorbilanzen erstellen lassen, Bilanzen für Schläge bzw. Teilschläge oder Kulturfolgen sind nur in einzelnen Betrieben möglich, die sehr detaillierte Dokumentationen führen. Die Herausforderung der Datenverfügbarkeit liegt schon im Gemüsebau selber begründet: die Vielzahl der Kulturen, der Anbau mehrerer Sätze über das Jahr verteilt, Kulturen mit mehrfachen Ernten und die verkaufte Ware ist nicht immer als Masse, sondern häufig auch in Mengenangaben (Stück, Kisten, Bund) dokumentiert. Bei der Direktvermarktung kommen die z. T. sehr kleinen, teils nicht dokumentierten Verkaufseinheiten hinzu. Im Rahmen des Projekts wurde das Tool von Reimer et al., das bei vergleichbaren Untersuchungen im geschützten Anbau entwickelt wurde (<https://orgprints.org/38025/>) für ökologischen Gemüseanbau angepasst und erweitert (<https://orgprints.org/id/eprint/44772/>).

Die Auswertung der Hoftorbilanzen über alle Betriebe hinweg zeigt hohe N-Salden, leicht positive P-Salden und annähernd ausgeglichen K-Salden, wobei bei allen drei Nährstoffen weite Spannen von teils stark negativen zu stark positiven Salden beobachtet werden konnten. In vergleichbaren Untersuchungen (Hülsbergen, Kolbe, Watson...), die mehr auf den ökologischen Landbau ausgerichtet waren, gibt es insofern Ähnlichkeiten in den Ergebnissen, als dass ebenfalls positive N-Salden gefunden wurden, aber bei negativen P- und K-Salden. Die positiven N-Salden in den Betrieben beruhen neben der N₂-Fixierung zu einem großen Teil auf dem hohen Stickstoff-Input durch die Düngung bei der die Kreatine und andere organische Handelsdünger im Vordergrund stehen. Die Obergrenze 170 kg N je ha durch Wirtschaftsdünger wird aber nicht überschritten. Die hohen N-Bilanzsalden weisen darauf hin, dass von den Betrieben dem Wachstum der Pflanzen durch eine ausreichende N-Düngung eine hohe Priorität zugemessen wird. Mit einer genaueren Berechnung der notwendigen Düngergaben auf der Basis von Kalkulationsmodellen wie NDICEA, N-Expert, Kap. 2.2, könnte eine Optimierung erreicht werden.

Der hohe N-Saldo ist aber auch ein Resultat geringerer N-Abfuhr mit den Produkten im Vergleich zu Berechnungsansätzen der Düngedarfsrechnung nach DüV. Die N-Abfuhr ergibt sich nicht allein aus der Ertragsleistung, sondern auch durch den Anteil der zum jeweiligen Zeitpunkt vermarkteten Ware. In die Bewertung der Bilanzergebnisse sollte dies berücksichtigt werden. Wenn die Düngung an einem Ertrag orientiert ist, der aber nicht als vermarktete Produkte realisiert werden kann, ergibt sich ein positiver N-Saldo. Dieser „Markteffekt“ lässt sich in Kalkulationen zur Düngung nicht abbilden. Der verbliebene Stickstoff im Betrieb, der mit geeigneten Maßnahmen erhalten wird, kann dann aber bei der nächsten Düngungsplanung mitberücksichtigt werden.

Die Phosphorversorgung ist im Mittel der Betriebe weitgehend über organische Dünger aus der Tierhaltung oder Komposte erreicht worden, im Einzelfall ist die Bilanz und die Versorgung

genauer zu prüfen. Die Erhebungen zeigen, dass im intensiven Öko-Gemüsebau der Anteil von Wirtschaftsdüngern und Komposten eher geringer ist als dies frühere Erhebungen gezeigt haben.

Die große Spanne der K-Salden von deutlich negativ bis deutlich positiv in Einzelfällen weist darauf hin, dass die Kaliumaufnahme von Gemüse, die mengenmäßig höher ist als die N-Aufnahme, viel weniger stark im Fokus der Betriebe steht als die N-Versorgung. Bei der Bewertung der Bilanzergebnisse sind allerdings verschiedenen Bedingungen zu berücksichtigen. Da Kalium nicht regelmäßig jedes Jahr gedüngt wird, sollten mehrjährige Bilanzen vorliegen, damit die errechneten Bilanzsalden die tatsächliche Situation im Betrieb widerspiegeln. Bei der Bilanzbewertung ist die Höhe des verfügbaren Kaliums im Boden mit zu berücksichtigen, da K-Salden und K-Verfügbarkeit im Boden vielfach in enger Beziehung stehen.

Eine gemeinsame Betrachtung der drei Nährstoffsalden zeigt nur in zwei Fällen, dass sie nahe bei Null liegen, in anderen Fällen z.T. sehr weit auseinander (Abbildung 2.1-2). Auch wenn es nicht direkt aus den Befragungen hervorgeht, so scheint dies doch ein Indiz, dass in den Betrieben den drei Hauptnährstoffen nicht immer die gleiche Bedeutung beigemessen wird. Der Boden kann Defizite in P- und K-Dünger in gewissem Umfang puffern, langfristige Defizite werden sich letztlich doch im Wachstum bemerkbar machen. Bilanzen geben in diesem Zusammenhang einen Hinweis, Bodenuntersuchungswerte genauer zu beachten und auf Veränderungen zu reagieren.

EDV-gestützte Düngemanagementsysteme

Wie die Bilanzen gezeigt haben, setzen die Betriebe hohe Mengen an Düngemittel ein, speziell bei Stickstoff, mit der Begründung eine für das Kulturwachstum ausreichend hohe und schnelle Stickstoffverfügbarkeit zu erreichen. Um den Düngungseffekt organischer Dünger zu kalkulieren und damit „bedarfsgerechter“ zu düngen, sind Modellsysteme entwickelt worden, mit denen die N-Mobilisierung aus dem Boden bzw. aus der Bewirtschaftung der Vorjahre und die N-Freisetzung aus der aktuellen Düngung abgeschätzt werden kann. Mit den beiden untersuchten Modellen NDICEA und N-EXPERT soll ein effektiverer Einsatz von N-Düngemitteln erreicht und potentielle Emissionen vermindert werden. Eine Gegenüberstellung beider modellgestützter Systemen ist in Tabelle 2.2-4 dargestellt. NDICEA ist in den Niederlanden entwickelt worden, wo der hohe Anteil des Gemüsebaus mit seinen hohen N-Düngermengen eine hohe Relevanz der Nitrat-Emissionen ins Grundwasser nach sich zieht. Deshalb stand die potentielle Nitratentwicklung im Boden und potentielle Auswaschung im Fokus, lokale Boden- und Wetterbedingungen sind dabei von Bedeutung. Ausgehend von dieser Modellrechnung kann die Düngung anpasst und die Emissionen gemindert werden. N-Expert ist zunächst als Kalkulationssystem für die Düngung im konventionellen Anbau entwickelt worden, um die betriebliche Düngung zu optimieren und Umweltbelastungen zu reduzieren. Im Laufe der weiteren Entwicklung und speziell in dem bearbeiteten Projekt ist das Modell an die Bedingungen des ökologischen Anbaus angepasst worden. Das betrifft insbesondere die Umsetzung der organischen Düngemittel nach ihrer Ausbringung, Reste der Vorkultur(en) und Gründüngung zu pflanzenverfügbaren N-Verbindungen, speziell Nitrat. Organische Dünger können sich Standort- (Boden) und Betriebs- (Dünger, Kulturfolgen) bezogen unterschiedlich umsetzen. Die Untersuchungen aus AP 6 (Kap. 2.5) haben einen Teil zur Anpassung der Algorithmen

beigetragen, decken aber noch nicht alle Bedingungen ab. Im betrieblichen Einsatz können die Düngermengen zum Erreichen der Nährstoffversorgung für eine bestimmte Ertragserwartung berechnet werden. Nährstoffbilanzen für N, P, K und Mg können teilflächenspezifisch berechnet werden – nach betrieblichen Ansatz oder nach DüV. Während der Projektlaufzeit ist eine Internet-basierte S-Bilanzierung hinzugekommen.

In Projekt sind die Modelle mit anderen Verfahren zu Düngbedarfsermittlung in Feldversuchen mit Weißkohl und Salat verglichen worden. Der Düngbedarf nach N-Expert bzw. NDICEA lag in drei Weißkohlversuche um 50-100 % unter dem Bedarf nach DüV (100 % heißt keine Düngung auf einem Boden mit hohem Gehalt an organischer Substanz). Für Salat war in neun Versuchen die Düngempfehlung durchschnittlich 25 % niedriger (7-56 %). Die Abweichungen der Düngempfehlungen von denen der DüV sind standortbezogen unterschiedlich und kommen besonders auf Böden mit höherem Anteil an organischer Substanz zum Tragen. Auch in AP 6 (Kap. 2.5) konnte die Bedeutung standortbedingter Umsetzungsunterschiede der Düngemittel festgestellt werden, die bei der Düngplanung mit berücksichtigt werden sollten. Mit den Versuchen konnte aufgezeigt werden, wie einerseits ein Potential zur Düngereinsparung besteht und andererseits Risiken gemindert und z. T. Erträge erhöht werden können.

Die Untersuchungen haben Vorteile für eine Schlag- und Kulturbezogene Düngeberechnung aufgezeigt. Die Frage ist, in welchem Umfang würde ein solches Modell genutzt werden. Bei den Betriebserhebungen wurde auch nach dem Einsatz von IT-Tools zum Betriebsmanagement und zum Düngemanagement gefragt. Folgende Programme sind hierbei mindestens einmal genannt worden: PCGärtner, Myfarm24, WAS (Schlagkartei), Ackerschlagkartei, Rechnungsprogramm BluFakt, Excel (eigener Feldplaner), FIONA, Lexware-Buchhaltungsprogramm. Es zeigte sich, dass es entweder um Programme zur Ackerschlagkartei oder zur Buchhaltung handelte. Programme für die Berechnungen der einzelnen Düngung wurden nicht genannt. Düngbedarfsermittlungen erfolgten häufige mit den Berechnungsprogrammen der Länder oder als externen Auftrag (z.B. BBV).

N₂-Bindung zur betriebseigenen Stickstoffversorgung

Die Erhebungen in den Gemüsebaubetrieben hat gezeigt, dass ca. 25 % des Bilanz-N-Inputs mit Stickstoff aus tierischen Düngemitteln gedeckt wird, deren Herkunft weitgehend nicht aus dem ökologischen Landbau stammt. Zusätzliche 10 % des Stickstoffs sind organische Handelsdüngemittel pflanzlicher Herkunft. Im Durchschnitt der untersuchten Betriebe werden schon 30 % des Stickstoffs durch biologische N₂-Fixierung generiert, dies reicht für eine weitgehende Selbstversorgung noch nicht aus. Deshalb wurden innerhalb des Projekts Strategien und Methoden geprüft, die die N₂-Bindung erhöhen können.

Mögliche Strategien sind:

- Flächen erweitern
 - o Betriebsflächen erweitern – mehr Feldfutterbau
 - o Feldfutterbauanteil in Relation zu Gemüse erhöhen
 - o Leguminosenanbau innerhalb der Gemüseflächen - Lebendmulch

- Zeiten erweitern
 - o Herbst – Winter – Frühjahr mehr nutzen - Winterzwischenfrüchte
- N₂-Fixierungseffizienz durch Managementanpassung – Leguminosen ernten statt Mulchen
 - o Leguminosen ernten und transferieren – Cut & Carry
 - o Leguminosen ernten und silieren
 - o Leguminosen ernten, verarbeiten zu streufähigem Dünger

Lebendmulch ist ein Verfahren, bei dem auf den Flächen zwischen den Gemüsepflanzen Leguminosen etabliert werden, die Zwischenräume zum Wachstum und N-Bindung nutzen. Die Herausforderung besteht in der Konkurrenzwirkung beider Pflanzen um Licht, Wasser und Nährstoffe, daher besteht die Notwendigkeit diese Konkurrenz zu managen. Die Leguminosen können vor dem Gemüse etabliert werden, dann muss zum Pflanzen des Gemüses eine partielle Bodenbearbeitung erfolgen, z. B. ein Strip-Till-Verfahren, und die verbliebenen Pflanzen geschnitten bzw. gemulcht werden. In diesem Verfahren haben Pflanzen des Lebendmulchs einen Wachstumsvorteil. Wie diese Konkurrenz zusätzlich durch die Wahl der Arten oder Sorten beeinflusst werden kann, war ein Teil des Untersuchungskonzepts.

Der Anbau von Kohl im Strip-Till-Verfahren im Lebendmulch konnte ertraglich weitgehend mit dem Umbruchverfahren der Klee-Aufwüchse mithalten. Eine gewisse Konkurrenz durch den Lebendmulch konnte beobachtet werden. Zusätzliches Mulchen der Kleeinsaaten hat die Wachstumsbedingungen für den Kohl nicht verbessert. Die Verwendung von Mikroklee, einem niedrig wüchsigen Weißklee, gegenüber normalem Weißklee hatte keinen Einfluss auf das Kohlwachstum. In den durchgeführten Versuchen hat der Kohl selber viel zur Regulierung der Konkurrenz beigetragen, d.h. der wachsende Kohl führt zur Schattenbildung durch die Blätter und kann dadurch das Wachstum der Lebendmulchpflanzen soweit begrenzen, dass dieses Wachstumspotential des Lebendmulchs nicht mehr zum Tragen kommt. Wichtig ist allerdings, dass der Kohl während seiner Jugendentwicklung günstige Wachstumsbedingungen aufweist (z. B. durch eine gezielte Unterfußdüngung mit einem N-Düngemittel), damit er überhaupt in die Lage versetzt wird, eine hohe Konkurrenzkraft zu entfalten. In anderen Pflanzenkombinationen können die Konkurrenzbedingungen davon abweichen und die Wahl der Lebendmulchpflanzen sowie deren Management muss angepasst werden.

Der Lebendmulch hatte kaum eine direkte Wirkung auf den Kohlertrag, der Gesamt-N-Ertrag von Kohlköpfen, Kohlernteresten und Klee war hier hoch. Damit stand mehr Stickstoff für die Nachfrucht zur Verfügung und zeigte sich im höheren Weizenertrag. Lebendmulchverfahren sollten nicht nur durch den Erfolg der ersten Kultur bewertet werden, sondern über eine Kulturfolge von zwei bis drei Kulturen.

Zeitraum für die N₂-Fixierung erweitern - Winterzwischenfrüchte

In den im Projekt durchgeführten Versuche hatten die Winterzwischenfrüchte eine Wachstumszeit von September bis zum Mai des Folgejahres zur Verfügung, danach wurde der Kohl gepflanzt. Die reinen Leguminosenbestände Winterwicken, Erbsen und Ackerbohne hatten

höhere Kohlerträge zur Folge, als Mischungen von Wicke und Roggen. Der Düngeneffekt ergibt sich einerseits aus der N-Menge in der Gründüngung-Biomasse und andererseits aus deren niedrigerem C/N-Verhältnis. Aufgrund des hohen N-Aufnahmepotentials des Kohls ist der verfügbare Stickstoff im Boden weitgehend aufgenommen worden und hat keinem höheren N_{\min} -Rest nach der Ernte geführt.

Eine weitere Versuchsserie lieferte differenzierte Ergebnisse. Zunächst zeigten erhöhte N_{\min} -Gehalte im Herbst eine negative Wirkung auf die Kleeanteile der Herbstsaatsaaten von Klee-gras. Es wurden allerdings weder Auswirkungen auf die N_2 -Fixierungsleistung noch auf den Vorfruchtwert nachgewiesen werden. Dagegen hatte die Kombination von Grünroggen im Winter mit Frühjahrsblanksaat Vorteile bei N_2 -Fixierung, Kleeanteil und Vorfruchtwert für den nachfolgenden Kohlanbau. Die Ergebnisse zu den Managementvarianten Mulchen und Ernte des Klee-grases waren über die Versuchsjahre hinweg widersprüchlich, in einem Jahr konnte mit dem Schnitssystem ein deutlich höher N_2 -Fixierungsleistung erreicht werden, im zweiten Jahr war das Mulchsystem etwa gleichwertig. Die Ursachen für die Unterschiede waren nicht direkt ableitbar. Die Ergebnisse erweitern und präzisieren den bestehenden Wissensstand zu Gemüse-optimierten Klee-grassystemen. Die aus den Ergebnissen konstatierte Überlegenheit der Frühjahrsaussaat steht hierbei zum Teil in Kontrast zu gängigen Empfehlungen und Untersuchungen aus dem Futterbaubereich. Da sich die Zielsetzungen hinsichtlich des optimalen Schnittzeitpunkts und der Schnittgutqualität zwischen klassischem Ackerfutterbau und Cut&Carry-Nutzung im Gemüsebau jedoch substantiell unterscheiden (Cut&Carry benötigt junges Material mit niedrigem C/N-Verhältnis mit einer schnelleren Umsetzung und Düngewirkung), erscheinen die bisher gängigen Empfehlungen aus dem landwirtschaftlichen Ackerbau nur eingeschränkt auf eine Cut&Carry-Nutzung im Gemüsebau übertragbar.

Einsatz alternativer Düngemittel

Ausgehend von der Forderung, externe Handelsdünger zu ersetzen, stellte sich die Frage, wie Düngemittel aus Klee-gras, die sich lagern und gezielt zu Kulturen einsetzen lassen, wirken. Als Düngemittel standen dabei Kleepellets, Klee-grassilage und Gärrest aus Klee-gras zur Verfügung. Zusätzlich wurden Dünger auf der Basis von Haushaltsabfällen (Gärreste) und aus der Lebensmittelverarbeitung (Tofu-Molke) untersucht.

In den Untersuchungen blieb die Düngeleistung der genannten Düngemittel hinter den Ergebnissen der Kreatine (Horndünger) zurück, die N-Gehalte im Kohl und N_{\min} nach der Ernte waren gleichwertig. Mit Biogasgärresten konnten ähnlich hohe Erträge erreicht werden wie mit Horndüngern. Die Tofu-Molke konnte die ertragliche Erwartung nicht erfüllen und war mit Anwendungsschwierigkeiten verbunden durch den hohen Wasseranteil beim Einsatz im Feld. Die geringere Ertragsleistung der klee- bzw. klee-grasbasierten Düngemittel wird mit dem weiteren C/N-Verhältnis begründet, das es die Umsetzung im Boden nicht in dem Maße zulässt wie bei Keratinen.

Die hier eingesetzten Düngemittel haben eine hohe unmittelbare Düngewirkung, wobei die Wirkung auf die Nachfrucht macht nur etwa ein Viertel der Gesamtwirkung aus. Die Wirkung der Horndünger auf die Nachfrüchte war vergleichsweise hoch, die Klee-gras-basierten Dünger

waren annähernd gleichwertig, die langsamere Umsetzung kommt erst über längere Zeit in der Vegetation und in der Kulturfolge zur Wirkung.

Düngerumsetzung in Böden

Neben den Düngeeffekten in verschiedenen Kombinationen haben die Versuche auch aufgezeigt, dass sowohl die Voraussage als auch die Interpretation der Wirkung einzelner Düngemittel von vielen Unsicherheiten bestimmt sind. Die Kalkulationsmodelle haben in dieser Hinsicht auch noch Verbesserungsbedarf. Deshalb beschäftigte sich das AP6 mit der Frage welche Bodeneigenschaften in Kombination mit unterschiedlichen Düngemitteln die N-Freisetzung aus Boden und Düngern beeinflussen. Vorliegende Ergebnisse zeigen, dass der Tongehalt die N-Nachlieferung aus Boden und Düngern positiv beeinflusst unter vergleichbaren Bedingungen physiologischer Bodenfeuchte und Temperatur. Dieser Effekt tritt in Wechselwirkung mit dem C/N-Verhältnis der Düngemittel, je weiter das C/N-Verhältnis, desto geringer die Netto-N-Mineralisation. Dies war ein erstes Ergebnis, das bei den Algorithmen der Modelle berücksichtigt werden konnte.

Um die standortangepasste Umsetzung der organischen Dünger noch besser kalkulieren zu können, sind Untersuchungen notwendig, die weitere Bodeneigenschaften und Vorbewirtschaftung berücksichtigen.

3.1 Literatur

- Cuijpers, W.J.M., van der Burgt, G.J.H.M., Voogt, W., 2008: Nitrogen balances in Dutch organic greenhouse production. In: Proc. 16th IFOAM World Congress, Modena, Italy, and June 16–20, 2008.
- Hülsbergen, K.-J., Rahmann, G. (Eds.), 2015: Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben: Forschungsergebnisse 2013-2014, Thünen-Report. Johann Heinrich von Thünen-Institut. https://doi.org/10.3220/REP_29_2015
- Kolbe, H., 2015: Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt: Nährstoffversorgung und Humusstatus? Bodenfruchtbarkeit - Grundlage erfolgreicher Landwirtschaft. BAD Tagungsband 2015.
- Kolbe, H., 2010: Phosphor und Kalium im ökologischen Landbau – aktuelle Probleme, Herausforderungen, Düngungsstrategien.
- Möller, K., 2018: Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 112, 147–164.
- Tittarelli, F., Bath, B., Ceglie, F.G., Garcia, M.C., Möller, K., Reents, H.J., Vedio, H., Voogt W., 2017: Soil fertility management in organic greenhouse: an analysis of the European context. *Acta Hort.* 1164, 113-126.
- Van der Burgt, G.J., Rietberg, P., 2012: Toepassing van maaimeststoffen. Publikationsnummer 2012-027. Louis Bolk Instituut, Driebergen, Niederlande.
- von Fragstein und Niemsdorff, P.; Geyer, B.; Reents, H.J., 2004: Status quo Ökologischer Gemüsebau – Betriebsbefragungen. Unveröffentlichter Endbericht BLE-Projekt 02OE222.
- Voogt, W., 2014: Soil fertility management in organic greenhouse crops; a case study on fruit vegetables. In: II International Symposium on Organic Greenhouse Horticulture 1041, 21-35.
- Watson, C. A.; Bengtsson, H.; Ebbesvik, M.; Løes, A-K.; Myrbeck, A.; Salomon, E. et al., 2002: A review of farm-scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. In: *Soil Use and Management* 18, S. 264–273. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2002.tb00268.x.
- Zikeli, S., Deil, L., Möller, K., 2017: The challenge of imbalanced nutrient flows in organic farming systems: A study of Organic greenhouses in Southern Germany. *Agric., Ecosyst Environ* 244, 1-

4 Übersicht der Veröffentlichungen zum Projekt

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- Stein, S., J. Hartung, K. Möller, G. Kayser, S. Zikeli 2022. The Effects of Leguminous Living Mulch Intercropping and Its Growth Management on Organic Cabbage Yield and Biological Nitrogen Fixation, *Agronomy*, Volume 12, Issue 5, <https://doi.org/10.3390/agronomy12051009>
- Stein, S., Zikeli, S. and Möller, K. 2022. Effect of leguminous green manure crops on white cabbage in organic vegetable production in southwestern Germany. *Acta Hort.* 1354, 9-16. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1354.2>
- Kürschner, K., 2020: Einfluss von organischen Düngemitteln und Bodenart auf die pflanzliche Stickstoffverfügbarkeit - Ein Keimpflanzenversuch. B.Sc. Arbeit, TU München Weihenstephan
- Seifert, D., 2020: Eigenbetriebliche Stickstoffversorgung in einem Demeter-Gemüsebaubetrieb, B.Sc. Arbeit, TU München Weihenstephan

Beiträge auf wissenschaftlichen Konferenzen und Fachtagungen

- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2020. Nutri@Ökogemüse - Projektvorstellung und erste Ergebnisse, Arbeitskreis Ökologischer Gemüsebau, Hamburg, 11.02.2020
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2020. Erhöhung des N-Inputs durch biologische Stickstofffixierung, Versuchsbeirat Freilandgemüsebau, Gülzow, 03.03.2020
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2020. N-Versorgung im Biogemüsebetrieb durch Leguminosenanbau, WiTra-Webinar, Präsentation (online), 26.11.2020
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2021. Erhöhung des N-Inputs durch biologische N₂-Fixierung im ökologischen Gemüsebau, 10. Arbeitskreis Ökologischer Gemüsebau, Präsentation (online), 09.02.2021
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2021. Stickstoffversorgung im Biogemüsebetrieb durch Leguminosenanbau, Praktikertag, Biolandbetrieb Michael Sattler, Rohrlack, 17.08.2021
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2021. Winterzwischenfrüchte im Gemüsebau - Vorfruchtwirkung in Abhängigkeit von Artenwahl und Umbruchtermin, Profi-Tag Gemüsebau, Präsentation (online), 16.11.2021
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2021. Stickstoffversorgung durch Leguminosenanbau in gemüsebaulichen Fruchtfolgen, Gäa-Fachtag ökologischer Gemüsebau, Präsentation (online), 02.12.2021
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2022. Evaluating different multispectral vegetation indices for assessing the nitrogen status of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) under organic farming conditions, International Horticultural Congress (IHC), Angers, Frankreich
- Besand, F., Katroschan, K.-U. 2022. Integration und Bewertung von Leguminosen in gemüsebaulichen Fruchtfolgen, BÖL-Abschlussveranstaltung Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau, Fulda, 25.11.2022
- Besand, F.; Stein, S.; Zikeli, S.; Möller, K.; Katroschan, K.-U. 2022: N-Vorfruchtwirkung legumer Winterzwischenfrüchten im ökologischen Gemüsebau. Poster DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zukunft, 14. – 16. JUNI 2022, Mannheim
- Besand, F.; Stein, S.; Zikeli, S.; Möller, K.; Katroschan, K.-U. 2022: N-Vorfruchtwirkung legumer Winterzwischenfrüchten im ökologischen Gemüsebau. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Vilmar-Aumenau
- Egenolf, K., Fischer, R.; Tietjen, S.; Sradnik, A. 2021: Optimierung der N-Düngung mittels EDV-gestützter Tools. Entwicklungen im Rahmen des Projekts „Nutri@Ökogemüse“. Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau, Technische Universität München-Weihenstephan 26. und 27. August 2021.
- Egenolf, K., Fischer, R.; Tietjen, S.; Sradnik, A. 2021. Vorstellung von NDICEA und N_Expert, virtueller Stand online, landscape conference
- Fischer, R., Sradnick, A., 2019: Implementierung und Weiterentwicklung EDV-gestützter Systeme im gärtnerischen Düngungsmanagement. Fachberatertagung "Ökologischer Gartenbau" 07.11.2019.
- Fischer, R.; Sradnick, A., 2020: EDV-gestützte Systeme. Vorstellung NDICEA. Präsentation, Gemüsebau-Feldtag, 02.09.2020, LFA-MV

- Fischer, R.; Sradnick, A., 2020: EDV-gestützte Systeme. Vorstellung NDICEA. Präsentation, Winter- tagung Bioland NRW
- Kahle, R.; Reents, H. J. 2019: Nährstoffmanagement im Ökologischen Gemüsebau mit neuen Dünge- strategien und EDV-gestützten Tools- Nutri@ÖkoGemüse - Fachberatertagung "Ökologischer Gartenbau" 07.11.2019.
- Kahle, R.; Reents, H.J. 2021: Einfluss der Bodenart auf die N-Mineralisationsdynamik von organischen Düngemitteln. Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau, Technische Universität Mün- chen-Weihenstephan 26. und 27. August 2021.
- Kahle, R., 2022: Nährstoffe für Bio-Gemüse: Neue Strategien, die sich lohnen; Erkenntnisse aus dem Nutri@ÖkoGemüse-Projekt. Präsentation, DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zukunft, 14. – 16. Juni 2022, Mannheim
- Kahle, R., 2022: Nährstoffmanagement im Ökologischen Gemüsebau mit neuen Düngestrategien und EDV-gestützten Tools- Nutri@ÖkoGemüse. Poster DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zu- kunft, 14. – 16. Juni 2022, Mannheim
- Kahle, R., 2022: Einfluss der Bodenart auf N-Mineralisationsdynamik organischer Düngemittel. Poster DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zukunft, 14. – 16. Juni 2022, Mannheim
- Kahle, R., 2022: Das Nutri@ÖkoGemüse-Projekt, Nährstoffmanagementstrategien zur Vermeidung von Nährstoffverlusten und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit, Der Boden als Wirtschafts- grundlage. Präsentation, Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenau
- Kahle, R., 2022: Einfluss der Bodenart auf N-Mineralisationsdynamik organischer Düngemittel. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenau
- Kahle, R., 2022: Nährstoffmanagement im Ökologischen Gemüsebau mit neuen Düngestrategien und EDV-gestützten Tools- Nutri@ÖkoGemüse. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar- Aumenau
- Kahle, R.; Schad, P. D.; Reents, H.J. Egenhof, K., 2022: Nutzen und Anwendung Modell-gestützter Düngung im intensiven ökologischen Gemüsebau. Präsentation, Fachberatertagung „Ökologi- scher Gartenbau“ 08.-10. November 2022, Herzberg, CH
- Katroschan, K.-U.; Besand, F. 2021. Nutri@ÖkoGemüse – Ausgewählte Zwischenergebnisse aus Ar- beitspaket 4, Beiratstreffen Projekt KuN_Gemüse, Präsentation (online), 23.03.2021
- Katroschan, K.-U.; Besand, F. 2021. Ansätze zur Erhöhung der N-Inputs über biologische N₂-Fixierung in gärtnerischen Systemen, Fachtag ökologischer Gemüsebau und Treffen des AK Öko-Gemü- sebau, Gäa/Bioland, Präsentation (online), 07.12.2022
- Katroschan, K.-U.; Besand, F.; Stein, S.; Zikeli, S.; Heckenberger, A.; Möller, K.; Rascher, B.; Perkons, U. 2021. Legume Winterzwischenfrüchte in gemüsebaulichen Fruchtfolgen - Zwischenergeb- nisse aus dem Verbundprojekt Nutri@ÖkoGemüse, 30. Fachberatertagung der Bundesfach- gruppe Gemüsebau, Präsentation (online), 11.03.2021
- Reents, H.J., 2021: Nutri@ÖkoGemüse – Problemstellung und Forschungskonzept. Nährstoffmanage- ment im ökologischen Landbau, Technische Universität München-Weihenstephan 26. und 27. August 2021.
- Reents H J, Stein, S., 2023: Notwendigkeit der Anpassung von Datensätzen für Nährstoffbilanzen im ökologischen Gemüsebau. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau (wird publiziert)
- Schad, P. D., Timmermans, B. G. H., Burgt, G. J. H. M van der, Fischer, R. 2023. Das NDICEA-Modell zur Abbildung der Stickstoffdynamik im ökologischen Gemüsebau. Beitrag zur 16. Wissen- schaftstagung Ökologischer Landbau, demnächst einsehbar auf <http://orgprints.org>
- Stein, S.; Reents, H.J., 2022: Nährstoffbilanzen im ökologischen Gemüsebau. Poster DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zukunft, 14. – 16. JUNI 2022, Mannheim
- Stein, S., Weiler, C.; Zikeli, S.; Möller, K., 2022: Legumer Lebendmulch im Weißkohlanbau. Poster Öko- Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenau
- Stein, S.; Reents, H.J., 2022: Nährstoffbilanzen im ökologischen Gemüsebau. Poster DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zukunft, 14. – 16. JUNI 2022, Mannheim
- Stein, S., Weiler, C.; Zikeli, S.; Möller, K., 2022: Legumer Lebendmulch im Weißkohlanbau. Poster Öko- Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenau
- Stein S., Frech E., Zikeli S. 2022: Notwendigkeit der exakten TM-Bestimmung als Bezugsgröße der N_{min}-Analyse: Einfluss von Winterzwischenfrüchten auf Wassergehalt im Boden. 133. VDLUFA Kongress 2022, 13. - 16. September 2022, Halle (Saale), Konferenzbeitrag im Druck

- Stein S., Mehring M., Möller K., Hartung J., Zikeli, S. 2022: Meta-analysis on the effects of living mulches in organic and conventional vegetable production: Influence on crop yield and weed density. IHC 2022, 31st Horticultural Congress 14.-20. August 2022, Angers, France, Konferenzbeitrag im Druck
- Stein S., Zikeli S., Möller K. 2022: Effect of leguminous green manure crops on white cabbage in organic vegetable production in southwestern Germany, Acta Hort. 1354. ISHS 2022. DOI 10.17660/ActaHortic.2022.1354.2, Proceedings of the III Int. Organic Fruit Symp. and I Int. Organic Vegetable Symp. , Eds.: F. Branca et al., Catania (Italy), December 14 - 16, 2021
- Stein, S., S. Zikeli, K. Möller 2021: Eignung verschiedener Umbruchtermine von Legumen Winterzwischenfrüchten vor Pflanzung von Weißkohl im ökologischen Landbau. In: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, 132. VDLUFA-Kongress, Kongressband 2021 Speyer, Darmstadt: VDLUFA-Verlag. Bd. 77, S. 74-82
- Stein S., Gruber S., Zikeli S., Möller, K. 2021: Effect of leguminous living mulches by control of their growth on N₂ fixation and cabbage growth in organic vegetable production. Scientific Forum "From its roots, organic inspires science, and vice versa", Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Thünen Report, Nr. 88, S. 1-236. Proceedings zu: Organic World Congress 2021, Rennes, France, September 8-10, Eds. Rahmann et al.
- Stein S., Zikeli S., Reents H. J., Möller K. 2023: Nährstoffbilanzen ökologischer Gemüsebaubetriebe in Süd-West-Deutschland, Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau (wird publiziert)
- Stein S., Weiler C., 2022: Alternative Düngestrategien für den ökologischen Gemüsebau - Erste Ergebnisse aus Feldversuchen - Organic+ & Nutri@Ökogemüse. Online-Vortrag für Anbauer am 10.03.2022, Beratung Gemüsebau Demeter e.V. Tietjen, S., Egenolf, K., Fischer, R., Schad, P., and Sradnick, A. 2022: Improving nitrogen fertilization management in organic vegetable farming with decision support systems, International Horticultural Congress 2022, Angers, 17.08.2022, oral presentation
- Stein, S.; Reents, H. J. 2022: Hoftorbilanz-Tool für die Hauptnährstoffe N, P und K im ökologischen Gemüsebau. Hrsg. Zentrum Ökologischer Landbau, Universität Hohenheim und Lehrstuhl Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme, TU München
- Tietjen, S.; Schad, P; Schulte-Eickhoff, E., 2022: EDV-gestützte Systeme. Poster DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zukunft, 14. – 16. JUNI 2022, Mannheim
- Tietjen, S.; Schad, P; Schulte-Eickhoff, E., 2022: EDV-gestützte Systeme. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenau
- Weiler, C.; Zikeli, S.; Möller, K., 2022: Nährstoffwirkung alternativer Düngemittel und N-Transferwirkung von Klee gras (KG). Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenau
- Weiler, C.; Zikeli, S.; Möller, K., 2022: Nährstoffwirkung alternativer Düngemittel und N-Transferwirkung von Klee gras (KG). Poster DLG Feldtage, Mein Pflanzenbau Meine Zukunft, 14. – 16. JUNI 2022, Mannheim

Beträge in Praxiszeitschriften

- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Evaluating different multispectral vegetation indices for assessing the nitrogen status of white cabbage (*Brassica oleracea var. capitata*) under organic farming conditions, Acta Horticulturae (submitted)
- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Eignung von Fernerkundungsmethoden zur Erfassung des N-Status von Weißkohl 2020 (kurz & vorab). <http://www.lfamv.de/Fachinformationen/Gemuesebau/?id=1252>
- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Fruchtfolgeversuch Systemvergleich Klee gras 2020, 2. Versuchsjahr (kurz & vorab). <http://www.lfamv.de/Fachinformationen/Gemuesebau/?id=1253>
- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Klee gras im Gemüsebau: Wann lohnt es sich? Verbandsnachrichten Bauernverband MV, (2019)10, 13
- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Klee gras in gemüsebaulichen Fruchtfolgen – Projektvorstellung. Info-Blatt für den Gartenbau in Mecklenburg-Vorpommern, 29(2020)5 215-222
- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Klee gras in gemüsebaulichen Fruchtfolgen 2019 - 2020 (kurz & vorab). <http://www.lfamv.de/Fachinformationen/Gemuesebau/?id=1106>
- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Klee gras in gemüsebaulichen Fruchtfolgen 2019-2021 (kurz & vorab). <http://www.lfamv.de/Fachinformationen/Gemuesebau/?id=1254>
- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Vorfruchtwirkung Winterzwischenfrüchte 2019 - 2020 (kurz & vorab). <http://www.lfamv.de/Fachinformationen/Gemuesebau/?id=1107>

- Besand, F.; Katroschan, K.-U.: Vorfruchtwirkung Winterzwischenfrüchte 2020-2021 (kurz & vorab). <http://www.lfamv.de/Fachinformationen/Gemuesebau/?id=1255>
- Kahle, R., Möller, K., Reents, H.J. 2019. Praxisforschung für ein effizientes Nährstoffmanagement im Öko-Gemüsebau. Ökumenischer Gärtnerbrief Heft 4/19, 43-44
- Lenz, N., Postweiler, K. 2020. Überprüfung der EDV-Programme NDICEA und N-Expert in Salat. Versuche im deutschen gartenbau 2020, Ökologischer Gemüsebau, hortigate.de
- Stein S., Möller K., Zikeli S. 2022. Anbau von Leguminosenuntersaaten als alternative Düngestrategie im ökologischen Gemüsebau. Ökumenischer Gärtnerbrief Heft 4/22, S. 36-39
- Tietjen, S., Heistermann, K., und Sradnick, A., 2021: Entscheidungsfindung mit N-Expert. Gemüse 57 (3), S. 35-37
- Tietjen, S., Heistermann, K., und Sradnick, A., 2021: Entscheidungsfindung mit N-Expert. Gemüse 57 (3), S. 35-37
- Tietjen, S. 2022. N-Expert 4.5.4 und Anwendungsunterstützung veröffentlicht. Gemüse 3/2022, S. 7.
- Weiler, C. S., Zikeli, S., Möller K., 2022: Mit alternativen Düngemitteln im ökologischen Gemüsebau mehr Unabhängigkeit und Ausgewogenheit in der Düngung erreichen. Ökumenischer Gärtnerbrief Heft 3/22, 42-44

Andere Veröffentlichungen online

- N-Expert, 2022. N-Expert – Düngungsberatung und Nährstoffbilanzierung im Freilandgemüsebau. URL <https://n-expert.igzev.de/> (accessed 3.5.23).
- Tietjen, S. 2021. Klickanleitung zu N-Expert: Aufbau des Programms [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=Zy0agSSNLgM>
- Tietjen, S. 2021. Klickanleitung zu N-Expert: Anlegen eines Betriebs [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=7zawAsgREW8>
- Tietjen, S. 2021. Klickanleitung zu N-Expert: Anlegen einer Kulturfolge [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=NMUg6hs-pbc>
- Tietjen, S. 2021. Klickanleitung zu N-Expert: Düngung und Bodenanalysen [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=ETWk3VpSZ9k>
- Tietjen, S. 2021. Klickanleitung zu N-Expert: N-Düngeempfehlung nach N-Expert [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=f8xlzauNRg4>
- Tietjen, S., Heistermann, K., Feller, C., und Sradnick, A. 2022: Schwefel- und Nährstoffgehalte sowie S-Mineralisierung organischer Düngemittel, <http://nexpert.igzev.de/wp-content/uploads/2022/01/Nährstoffgehalte-und-S-Mineralisierung-organischer-Düngemittel.pdf>, Version vom 26.01.2022.
- Tietjen, S., Heistermann, K., Feller, C., und Sradnick, A. 2022: Schwefelgehalte in den Ernteprodukten von Gemüse. <http://n-expert.igzev.de/wp-content/uploads/2022/01/S-GehalteFeldabfuhr.pdf>, Version vom 26.01.2022.
- Tietjen, S., Heistermann, K., Feller, C., und Sradnick, A. 2022: Schwefel- und Nährstoffgehalte sowie S-Mineralisierung organischer Düngemittel, <http://nexpert.igzev.de/wp-content/uploads/2022/01/Nährstoffgehalte-und-S-Mineralisierung-organischer-Düngemittel.pdf>, Version vom 26.01.2022.
- Tietjen, S., Heistermann, K., Feller, C., und Sradnick, A. 2022: Schwefelgehalte in den Ernteprodukten von Gemüse. <http://n-expert.igzev.de/wp-content/uploads/2022/01/S-GehalteFeldabfuhr.pdf>, Version vom 26.01.2022.

5 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war es, zur Verbesserung des Nährstoffmanagements im Sinne hoher Nährstoffeffizienz bei ausgewogenen Bilanzen der Hauptnährstoffe im ökologischen Gemüseanbau beizutragen.

Mit einer Befragung von Ökologischen Betrieben mit Schwerpunkt Freilandgemüsebau sollte die derzeitige Situation der Nährstoffnutzung erfasst und bewertet werden. Um die Abhängigkeit von häufig verwendeten Handelsdüngemitteln zu verringern, sollten alternative Düngemittel in Versuchen hinsichtlich ihrer Ertragswirkung sowie Nutzungseffizienz untersucht und bewertet werden. In einem weiteren Ansatz sollten Strategien zur Erhöhung und verbesserten Nutzung der betrieblichen N_2 -Bindung durch Leguminosen untersucht werden. Ergänzend sollten die Eigenschaften der Dünger in der N-Mineralisation unter verschiedenen Bedingungen geprüft und Berechnungsgrundlagen für die Kalkulationsmodelle zu Düngung liefern. Für genauere Düngekalkulation sollten Modellgestützte Systeme NDICEA aus den Niederlanden und N-Expert vom IGZ geprüft und weiterentwickelt werden.

An der Durchführung des Projekts nahmen 12 Partner teil. Die Arbeit war in sechs Arbeitspakete strukturiert, die nach den genannten Themen organisiert waren und an denen jeweils mehrere Partner arbeiteten.

Betriebsbefragungen wurden in NRW, RPL, BW und BY durchgeführt. Kriterien waren im Schwerpunkt Freiland-Gemüsebau bzw. Feldgemüsebau und weniger als 0,2 GV ha⁻¹. Insgesamt konnten 12 Betriebe ausgewertet werden mit Betriebsgrößen von 2 bis 363 ha, 5 bis 49 Kulturen pro Jahr, aus weitgehend allen Verbänden aber nicht in repräsentativer Zahl. Die Erhebung bezogen sich auf den Zeitraum 2017 bis 2020, mit unterschiedlichen Anzahl an erfassten Jahren, von ein bis drei Jahren pro Betrieb. Berechnet wurden Nährstoffsalden aus Hoftorbilanzen, Basis waren die Angaben aus den Betrieben über verkaufte Gemüse-Produkte (ggf. Futter) pro Jahr, die jeweiligen Anbauflächen, die Zukäufe an Düngemittel (organische und mineralische Handelsdünger, Wirtschaftsdünger, Komposte), Veränderungen der Tierbestände (wenn vorhanden) und die N_2 -Fixierung der Leguminosen. Die mittleren N-Salden lagen bei 67,5 kg ha⁻¹, für Phosphor bei 2,1 kg ha⁻¹ und für Kalium bei 0,3 kg ha⁻¹. Spannen vom niedrigsten Wert zum höchsten Wert waren insgesamt erheblich; für N von -13 bis +177 kg ha⁻¹, für P von -11 bis +14 kg ha⁻¹, für K von -87 bis +61 kg ha⁻¹.

Beim Input lag der Stickstoffanteil der N_2 -Fixierung bei 30 %, der Anteil aus Handelsdünger tierischen Ursprungs bei 25 %. Phosphor konnte zum größten Anteil aus Wirtschaftsdüngern gedeckt werden, K aus Mineraldüngern und Wirtschaftsdüngern. Die N-Effizienz bezogen auf den gesamten Input war <0,5, bezogen auf die Düngung bei 0,8. In zwei Betrieben lagen der Salden der Nährstoffe N, P, K fast bei Null und sehr nahe beieinander, in anderen differierten sie sehr stark.

Für eine systemgerechtere Stickstoffversorgung wurden Düngemittel aus Leguminosen (Kleepellets, Silagen), Komposte, Gärreste aus Haushaltsabfällen und Reststoff (Prozesswasser) aus der Tofuproduktion untersucht und mit häufig genutzten Düngemittel auf Kreatinbasis verglichen. In den Untersuchungen blieb die Düngeleistung der genannten Düngemittel hinter den Ergebnissen der Keratine (Horndünger) zurück, die N-Gehalte im Kohl und Nmin nach der

Ernte waren vergleichbar. Mit Biogasgärresten wurden ähnlich hohe Erträge erreicht wie mit Horndüngern. Die Tofu-Molke weist im Verhältnis zu den Nährstoffexporten eine sehr ausgewogene Stöchiometrie der Nährstoffe auf, wies aber eine geringere N-Freisetzungsrates als Gärreste oder Keratine auf. Die geringere Ertragsleistung der klee- bzw. klee-grasbasierten Düngemittel wird mit dem weiteren C/N-Verhältnis begründet, das die Umsetzung im Boden nicht in dem Maße zulässt wie bei Keratinen. Dies wurde auch in den Labor- und Gewächshausversuchen zur Untersuchung der Mineralisation in Wechselwirkung von Boden und Düngemittel bestätigt.

Der weitere Untersuchungsschwerpunkt waren die Verfahren zur Nutzung der betrieblichen N₂-Fixierung. Drei Verfahren wurden in unterschiedlichen Feldversuchen geprüft. Gemüsepflanzen im Lebendmulchbestand mit Leguminosen, legume Winterzwischenfrüchte mit Variation der Etablierung und „Cut & Carry“ Verfahren im Vergleich zum Mulchen und klee-grasbasierten Gärresten.

Der Anbau von Kohl im Strip-Till-Verfahren im Lebendmulch hat ertraglich ähnliche Ergebnisse erbracht wie ein herkömmliches Umbruchverfahren der Klee-Aufwüchse. Eine gewisse Konkurrenz durch den Lebendmulch konnte beobachtet werden. Zusätzliches Mulchen der Kleeinsaaten hat die Wachstumsbedingungen für den Kohl nicht verbessert. Die Verwendung von Mikroklee hatte keinen Einfluss auf das Kohlwachstum im Vergleich zu einer herkömmlichen Kleesorte. Der Kohl benötigte während seiner Jugendentwicklung günstige Wachstumsbedingungen, damit er in die Lage versetzt war, eine hohe Konkurrenzkraft gegenüber der Untersaat im Zwischenstreifen zu entfalten. Der Lebendmulch hatte kaum eine direkte Wirkung auf den Kohlertrag. Der Gesamt-N-Ertrag von Kohlköpfen, Kohlernteresten und Klee war hoch und führte zu einer guten Vorfruchtwirkung für den nachfolgenden Winterweizen. Mit den Biogasgärresten konnte ein vergleichbarer Ertrag wie mit Horndünger in der ersten Kultur erreicht werden aber mit geringerer Nachwirkung in den Nachfrüchten Spinat und Winterweizen.

Die Winterzwischenfrüchte hatten in den Versuchen eine Wachstumszeit von September bis zum Mai des Folgejahres, danach wurde der Kohl gepflanzt. Die reinen Leguminosenbestände Winterwicken, Erbsen und Ackerbohne führten zu höheren Kohlerträgen als Mischungen von Wicke und Roggen oder einer Roggenreinsaat. Der Düngeeffekt ergab sich einerseits aus der N-Menge in der Gründüngung-Biomasse und andererseits aus dem niedrigeren C/N-Verhältnis. Der Kohl hatte den verfügbaren Stickstoff im Boden weitgehend aufgenommen, denn es wurden keine höheren N_{min}-Reste nach der Ernte gemessen. In den Saatzeitversuchen hatten die Gründüngungen aus der Frühjahrsansaat meist eine stärkere Wirkung auf den nachfolgenden Kohl als die Herbstsaatsaaten. Die Versuche zu Schnitt- versus Mulch-System in der Bewirtschaftung lieferte hinsichtlich der N₂-Fixierung widersprüchliche Ergebnisse.

Die Laborversuche zu verschiedenen organischen Düngemitteln in Interaktion mit Bodeneigenschaften zeigte eine unterschiedliche, standortspezifische N-Freisetzung in Abhängigkeit von Bodenherkunft (Vorgeschichte des Düngemanagements) und Bodenart. Der Tongehalt hatte Einfluss auf Höhe und Verlauf der N-Freisetzung, aber die Ergebnisse waren uneinheitlich über verschiedene Standorte und Betriebe betrachtet. Je weiter das C/N-Verhältnis des Düngemittels, desto geringer war die N-Freisetzung mit Unterschieden in Höhe und Zeitverlauf

sowie Standort und Betrieb. Der direkte Effekt bzw. die Bedeutung des Düngemittel C/N-Verhältnisses und des Tongehalts konnte somit noch nicht als allgemeine Wirkungsweise und Effektgröße definiert werden. Weitere standortspezifische Eigenschaften wie die bisherige Bewirtschaftungsweise oder zusätzliche Düngemiteleigenschaften müssen untersucht werden. Innerhalb des Projekts konnten die Untersuchungen aus AP 6 ein Teil zur Anpassung der Algorithmen zur Berechnung der Mineralisierungsprozesse in den Modellsystemen (AP3) beigetragen, decken aber noch nicht alle Bedingungen ab.

Innerhalb des Projekt wurden Modellsysteme zu genaueren flächen- und kulturartspezifischen Düngung weiterentwickelt, verglichen und in Versuchen validiert. Die Herausforderung im ökologischen Anbau ist es, die N-Mobilisierung aus dem Boden bzw. aus der Bewirtschaftung der Vorjahre und die N-Freisetzung aus der aktuellen Düngung abzuschätzen. NDICEA ist in den Niederlanden entwickelt worden, N-Expert vom IGEZ in Großbeeren. Im Laufe des Projekts wurden die Modelle an die Bedingungen des ökologischen Anbaus angepasst. Das betraf insbesondere Algorithmen zur Umsetzung der organischen Düngemittel nach ihrer Ausbringung, Reste der Vorkultur(en) und Gründüngung zu pflanzenverfügbaren N-Verbindungen (speziell Nitrat). Organische Dünger können sich Standort- (Boden) und Betrieb- (Dünger, Kulturfolgen) bezogen unterschiedlich umsetzen, Bezüge zu standortbezogenen Wetterdaten waren notwendig. Im betrieblichen Einsatz können die Düngermengen zum Erreichen der Nährstoffversorgung berechnet werden. Nährstoffbilanzen für N, P, K und Mg können teilflächenspezifisch berechnet werden – nach betrieblichen Ansatz oder nach DüV. Während der Projektlaufzeit ist eine Internet-basierte S-Bilanzierung hinzugekommen.

In Projekt sind die Modelle mit anderen Verfahren zu Düngebedarfsermittlung in Feldversuchen mit Weißkohl und Salat verglichen worden. Der errechnete Düngebedarf nach N-Expert bzw. NDICEA lag in drei Weißkohlversuchen z. T. deutlich unter dem Bedarf nach DüV. Für Salat war in neun Versuchen die Düngeempfehlung durchschnittlich 25 % niedriger (7-56 %) als bei einer Düngebedarfsberechnung nach DüV. Mit den Versuchen konnte aufgezeigt werden, wie einerseits ein Potential zur Düngereinsparung besteht und andererseits Risiken gemindert und z. T. Erträge erhöht werden können.

Die Modelle stehen auf unterschiedlichen Plattformen bereit zur freien Verfügung. N-Expert <https://n-expert.igzev.de/downloads/> und NDICEA <https://api.ndicea.nl/>

6 Anhang

6.1 Anhang 2.2.-1: Fragebogen Hoftorbilanzierung

Betriebsbefragung AP2 – Hoftorbilanzierung

Datum:

Bezugsjahr:

Name des Betriebs:

Düngefläche* (ha):

Umstellung:

Verband:

Betriebstyp: Gärtnerisch Feldgemüse

Fläche Freiland: Fläche Gewächshaus/Folientunnel:

Vermarktungsstrategie (bzw. gibt es separaten Wirtschaftsbetrieb?):

Wird zusätzlich Gemüse zugekauft?

EDV in der Bewirtschaftung (Kalkulationssoftware, Schlagkartei etc.):

*Aus der Erzeugung genommene Flächen (Keine Düngung/ keine Abfuhr von Produkten) dürfen nicht berücksichtigt werden. In der Regel entspricht die anzugebende Fläche der im Betrieb vorhandenen landwirtschaftlichen Hauptkulturfläche, welche gedüngt oder bei der zumindest auch eine Abfuhr von Produkten stattfindet. Zweit- und Zwischenfrüchte zählen nicht zur Hauptkulturfläche; eine Fläche darf nur 1x angegeben werden, unabhängig von der Anzahl der Nutzungen.

Berechnungsgrundlagen für Hoftorbilanz

1) Einfuhr: (Futter-Mist-Kooperation berücksichtigen, mit FMK markieren)

a) Organische Handelsdünger (Anteil für Gewächshaus/Folientunnel %) Menge (kg, dt, t)

.....

b) Wirtschaftsdünger/ Kompost (Anteil für Gewächshaus/Folientunnel %) Menge (kg, dt, t, m³)

.....

Wurde Stallmist oder Kompost in größerer Menge zur einmaligen Ausbringung zugekauft? (Menge und Jahr, Aufteilung über die Jahre, nach wie vielen Jahren steht die nächste vergleichbare Maßnahme an):

c) Futtermittel-/ Strohzukauf Menge (kg, dt, t FM)

.....

d) Saatgutzukauf (v.a. grobkörn. Leguminosen, inkl. Pflanzkartoffeln)
(Anteil für Gewächshaus/Folientunnel %) Menge (kg, dt, t)

.....

e) Pflanzgutzukauf Substratmischung Stück +Topfgröße
(Anteil für Gewächshaus/Folientunnel %)

.....

Eigene Anzucht? Substratzukauf (Menge, Nährstoffinhalt):

.....

f) Leguminosenkulturen (N₂ Bindung) Ertrag (t FM ha⁻¹, ggf. TM-Gehalt)
Art / Zusammensetzung: Klee gras, legume ZF, Körnerleguminose Fläche (ha) oder Bestandeshöhe (cm) (bei Klee gras oder Zwischenfrucht)
Nutzung: / gemulcht / gemulcht eingearbeitet/ geerntet / oder Dauer des Bestandes

.....

Wurden die Zukäufe im selben Jahr verbraucht? Ja / Nein

Wenn „Nein“, wie viel Rest? Oder Ausgleich mit Vorjahr?

2) Ausfuhr: (Futter-Mist-Kooperation berücksichtigen, mit FMK markieren)

a) Verkauf pflanzlicher (u. tierischer) Produkte

Angaben als

(inkl. Futtermittel u. Stroh)

(Gewächshaus/Folientunnel markieren)

Gewicht
(kg, dt, t)

Anzahl Kisten o-
der Bund

Größe/ Einheit Kiste
oder Bund

1

.....

50

b) Abgabe von Wirtschaftsdüngern/ Klee gras

Menge (kg, dt, t, m³)

.....

3) Kulturliste:

Nr. Kultur

Bezugsjahr:
Fläche (ha)

Nicht beerntet*
(Fläche bzw. An-
teile)

(Gewächshaus/Folientunnel markieren)

1

2

3

.....

50

* wie viel der Fläche wurde nicht beerntet, weil es z.B. nicht vermarktet werden konnte?

Bodenanalysen

Scannen der Bodenanalyseergebnisse (kein EUF) aller Flächen und möglichst weit zurückreichend. Bitte Jahr der Umstellung, wenn möglich, dokumentieren bzw. Jahr des Startes von Gemüsebau.

Weitere (Analyse-)Ergebnisse (z.B. Nährstoffbilanzen, Düngebedarfsermittlung, Nmin-Analysen, Nähr- bzw. Schadstoffanalysen von Wirtschaftsdüngemitteln) – wenn zur Hand.