



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



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/Projektnehmerin:

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg

Technische Universität München

Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen

Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum – Rheinpfalz

Universität Hohenheim

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau

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 (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische Landwirtschaft 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 die Praxis umgesetzt. Das Programm gliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder - das Forschungs- und das Informationsmanagement.

Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter:

www.bundesprogramm.de
www.oekolandbau.de/forschung

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

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Bundesprogramm Ökologischer Landbau
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Tel.: 0228-6845-3280
E-Mail: boel-forschung@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 31.03.2025

Monat der Erstellung:

03/2025

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



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-Weihenstephan

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	7
2	Forschungsberichte der Arbeitsgruppen.....	9
2.1	Situationsanalyse des ökologischen Freiland-Gemüsebaus	9
2.1.1	Methodische Voraussetzungen zur Berechnung von Nährstoffbilanzen im ökologischen Gemüsebau	9
2.1.2	Zielsetzung der Untersuchung	13
2.1.3	Material und Methoden	14
2.1.3.1	Betriebsauswahl für Hoftorbilanzen	14
2.1.3.2	Datenerhebung, Dokumentation und Datenauswertung.....	15
2.1.4	Ergebnisse und Diskussion.....	18
2.1.4.1	Bilanzen der Betriebe	18
2.1.4.2	Diskussion	28
2.1.4.3	Schlussfolgerungen	30
2.1.5	Literaturverzeichnis.....	31
2.2	Implementierung und Weiterentwicklung EDV-gestützter Systeme im gärtnerischen Düngungsmanagement	34
2.2.1	Einleitung.....	34
2.2.2	Material und Methoden	35
2.2.2.1	Vergleich der Datenbanken und Modelle (NDICEA, N-Expert).....	35
2.2.2.1.1	Vergleich der Datenbanken.....	35
2.2.2.1.2	Vergleich mit in der Praxis erhobenen Daten	35
2.2.3	Weiterentwicklung und Validierung der Modelle (NDICEA, N-Expert)	36
2.2.3.1	Validierung	36
2.2.3.1.1	N-Expert.....	36
2.2.3.1.2	NDICEA	36
2.2.3.2	Erweiterung und Anpassung der Datenbanken.....	36
2.2.3.3	Praxisvergleich verschiedener Düngungskonzepte.....	36
2.2.3.4	Berechnungen	40
2.2.3.5	Datenverarbeitung und statistische Auswertung	41
2.2.4	Ergebnisse und Diskussion.....	41
2.2.4.1	Vergleich der Modelle und Datenbanken	41
2.2.5	Vergleich mit in der Praxis erhobenen Daten	46

2.2.5.1	Frischmasse	46
2.2.5.2	Stickstoffgehalte	47
2.2.6	Weiterentwicklung und Validierung der Programme.....	48
2.2.6.1	N-Expert	48
2.2.6.1.1	Offline Version	48
2.2.6.1.2	Datenbankaktualisierungen.....	49
2.2.6.1.3	Algorithmen.....	49
2.2.6.1.4	Berücksichtigung der N-Mineralisierung aus organischen Düngern und Ernteresten des Vorjahres	51
2.2.6.1.5	Validierung und Implementierung des Algorithmus zur Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz.....	51
2.2.6.1.6	Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit/Implementierungshürden	51
2.2.6.1.7	Webbasierte Version von N-Expert	52
2.2.6.1.8	Schwefelschätzrahmen nach N-Expert.....	52
2.2.6.2	NDICEA.....	53
2.2.6.2.1	Neuprogrammierung und Weiterentwicklung.....	53
2.2.6.2.2	Einblick in den neuen Rechenkern	55
2.2.6.2.3	Kalibrierungsalgorithmus.....	57
2.2.6.2.4	Initialisierungsalgorithmus.....	61
2.2.6.2.5	Neuerungen in der aktuellen Webversion von NDICEA 7.....	61
2.2.6.2.6	Validierung.....	64
2.2.6.3	Vergleich der verschiedenen Düngekonzepte in Praxisversuchen	66
2.2.7	Schlussfolgerungen	68
2.2.7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	69
2.2.7.2	Potentiale der EDV-gestützten Programme	69
2.2.8	Literatur	69
2.3	Evaluierung der Akzeptanz von EDV-gestützter Systeme innerhalb von Praxis und Beratung oder Evaluierung der Akzeptanz von EDV-gestützter Systeme innerhalb von Praxis und Beratung	71
2.3.1	Einleitung.....	71
2.3.2	Überblick über die im Gemüsebau zur Düngung und Anbauplanung/ Kulturführung verfügbarer Software.....	72
2.3.2.1	Tools für die Düngeplanung.....	80
2.3.2.1.1	DüngungBW	80
2.3.2.1.2	N-Expert.....	81
2.3.2.1.3	NDICEA	83
2.3.2.1.4	Vergleich der Tools zur Düngeplanung	84

2.3.2.2	Diskussion und Zusammenfassung	86
2.3.3	Status Quo Analyse zur Nutzung von EDV-Tools zum Nährstoffmanagement im ökologischen Gemüsebau	87
2.3.3.1	Quantitative Umfrage zur Nutzung von EDV-Tools im ökologischen Gemüsebau	87
2.3.3.1.1	Demographische Daten	88
2.3.3.1.2	Allgemeine Fragen zum Betrieb	88
2.3.3.1.3	Düngernutzung und Kriterien der Düngungsentscheidung	89
2.3.3.1.4	Nutzung von EDV-Tools.....	90
2.3.3.1.5	Weitere Verbesserungspotentiale	95
2.3.3.1.6	Gründe für Nicht-Nutzung und Anforderungen an EDV-Tools	96
2.3.3.1.7	Fazit.....	97
2.3.3.2	Qualitative Expert*Inneninterviews zum Einsatz von EDV-Tools im ökologischen Gemüseanbau	98
2.3.3.2.1	Material & Methoden.....	98
2.3.3.2.2	Transkription und Datenauswertung.....	99
2.3.3.2.3	Ergebnisse.....	100
2.3.3.3	Fazit	106
2.3.4	Status-Quo-Analyse des Nährstoffmanagements auf Gartenbaubetrieben mit Solidarischer Landwirtschaft in Baden-Württemberg.....	109
2.3.4.1	Expert*Inneninterviews zur Bedeutung der Nährstoffversorgung in der Solidarischen Landwirtschaft und Status Quo Bestimmung der aktuellen Statusversorgung auf verschiedenen Betrieben.....	110
2.3.4.1.1	Einleitung	110
2.3.4.1.2	Material und Methoden	111
2.3.4.1.3	Transkription und Datenauswertung.....	112
2.3.4.1.4	Ergebnisse.....	112
2.3.4.2	Einsatz von Hoftorbilanzen und Nährstoffmanagement-Tools auf SoLaWi-Betrieben.....	123
2.3.4.2.1	Hoftorbilanz eines Betriebes mit Solidarischer Landwirtschaft.....	123
2.3.4.2.2	Vergleich: Einsatz von N-Expert und NDICEA in SoLaWis.....	126
2.3.4.3	Fazit	129
2.3.5	Literaturverzeichnis.....	129
2.4	Ansätze zur Erhöhung der N-Inputs über biologische N ₂ -Fixierung in gärtnerischen Systemen	132
2.4.1	Legume Lebendmulche	133
2.4.1.1	Einleitung.....	133
2.4.1.2	Material und Methoden.....	134

2.4.1.3	Ergebnisse	135
2.4.1.4	Weizennachbau	139
2.4.1.5	Diskussion	140
2.4.2	Legume Winterzwischenfrüchte	141
2.4.2.1	Einleitung	141
2.4.2.2	Versuche in Süd- und Westdeutschland	143
2.4.2.2.1	Material und Methoden	143
2.4.2.2.2	Ergebnisse	144
2.4.2.2.3	Diskussion	149
2.4.2.3	Versuche in Norddeutschland	151
2.4.2.3.1	Material und Methoden	151
2.4.2.3.2	Versuchsaufbau	152
2.4.2.3.3	Analytik	153
2.4.2.3.4	Ergebnisse	154
2.4.2.4	Diskussion	158
2.4.3	Integration von Klee gras in gemüsebauliche Fruchtfolgen	159
2.4.3.1	Einleitung	159
2.4.3.2	Material und Methoden	160
2.4.3.2.1	Standort	160
2.4.3.2.2	Analytik	160
2.4.3.3	Ergebnisse	162
2.4.3.4	Diskussion	167
2.4.4	Literatur	168
2.5	Alternative N-Düngemittel: Nährstoffverfügbarkeit, -input im Boden und Einfluss des Ausbringungsverfahrens	172
2.5.1	Einleitung	172
2.5.2	Ergebnisse Versuche alternative N-Düngemittel in Kleinhohenheim (UHOH) und Grötzingen (LTZ)	175
2.5.2.1	Material und Methoden	175
2.5.2.1.1	Standorte und Behandlungen	175
2.5.2.1.2	Bonituren und Feldmessungen	176
2.5.2.1.3	Statistik	177
2.5.2.2	Ergebnisse	177
2.5.2.2.1	Zusammensetzung der Düngemittel	177
2.5.2.2.2	Erträge	179
2.5.2.2.3	Nitratgehalte im Boden	182
2.5.2.2.4	Nährstoffabfuhr und Bilanzen	183

2.5.2.3	Diskussion	187
2.5.2.4	Literatur	189
2.5.3	Ergebnisse Versuche alternative N-Düngemittel am Queckbrunnerhof (DLR) 192	
2.5.3.1	Material und Methoden	192
2.5.3.1.1	Kohl als 1. Kultur	192
2.5.3.1.2	Herbst-Spinat als 2. Kultur	192
2.5.3.1.3	Winterweizen als 3. Kultur	193
2.5.3.1.4	Bewässerung	193
2.5.3.1.5	Bodenproben	193
2.5.3.1.6	Flächenkennwerte	193
2.5.3.1.7	Pflanzenproben	194
2.5.3.1.8	Düngemittel	194
2.5.3.1.9	SPAD-Messung	194
2.5.3.2	Ergebnisse	194
2.5.3.2.1	Weißkohl	194
2.5.3.2.2	Spinat	196
2.5.3.2.3	Winterweizen	196
2.5.3.2.4	SPAD-Messungen	197
2.5.3.3	Diskussion	197
2.5.3.4	Schlussfolgerungen	198
2.5.3.5	Literaturverzeichnis	199
2.5.4	Ergebnisse des Systemversuchs Cut & Carry in Gülzow (LFAMV)	203
2.5.4.1	Einleitung	203
2.5.4.2	Material und Methoden	204
2.5.4.2.1	Standort	204
2.5.4.2.2	Versuchsaufbau	204
2.5.4.2.3	Probenahme und Analytik	204
2.5.4.2.4	Kulturführung	205
2.5.4.3	Ergebnisse	207
2.5.4.4	Diskussion	211
2.5.4.5	Literatur	212
2.5.5	Ergebnisse Gewächshausversuche in Bamberg (LWG)	213
2.5.5.1	Versuchsfrage und Versuchshintergrund	213
2.5.5.2	Kultur- und Versuchshinweise	213
2.5.5.3	Ergebnisse	214
2.6	Düngewirkung als Interaktion von Dünger und Bodeneigenschaften	218

2.6.1	Einleitung.....	218
2.6.2	Material und Methoden	220
2.6.2.1	Böden.....	221
2.6.2.2	Düngemittel	225
2.6.2.3	Versuchsansätze	226
2.6.2.3.1	Inkubationsversuche	227
2.6.2.3.2	Pflanzenversuche	230
2.6.2.4	Untersuchungsmethoden.....	232
2.6.2.5	Datenverarbeitung und statistische Auswertung	233
2.6.3	Ergebnisse	234
2.6.3.1	Einfluss der Bodenart auf die N-Mineralisation	234
2.6.3.2	Einfluss von Bodenart und Düngemittel-C/N-Verhältnis auf die Netto-N-Mineralisation	242
2.6.3.3	Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte auf die N-Mineralisation und pflanzliche N-Verfügbarkeit	248
2.6.3.3.1	Einfluss des Düngesystems	248
2.6.3.3.2	Einfluss des Betriebssystems (Fruchtfolge und Leguminosenanteil).....	249
2.6.3.4	Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte und Düngemittel-C/N-Verhältnis auf die Netto-N-Mineralisation.....	251
2.6.3.4.1	Einfluss des Düngesystems	251
2.6.3.4.2	Einfluss des Betriebssystems (Fruchtfolge und Leguminosenanteil).....	255
2.6.3.5	Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungspotentials.....	259
2.6.4	Diskussion	268
2.6.4.1	Einfluss des Tongehalts auf die N-Mineralisation.....	268
2.6.4.2	Einfluss des Tongehalts auf die Netto-N-Mineralisation und Wechselwirkung mit dem Düngemittel	270
2.6.4.3	Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte auf die Boden N-Mineralisation.....	273
2.6.4.4	Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte und Düngemittel-C/N-Verhältnis auf die Netto-N-Mineralisation.....	275
2.6.4.5	Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungspotentials.....	278
2.6.5	Zusammenfassung	281
2.6.6	Fazit	283
2.6.7	Literatur	284

2.6.8	Anhang zusätzliche Betriebsergebnisse	287
3	Ökologischer Gemüsebau - Herausforderungen und Lösungsansätze	290
3.1	Herausforderungen.....	290
3.2	Hoftorbilanzen als Indikator für das Nährstoffmanagement.....	291
3.3	EDV-gestützte Düngemanagementsysteme	292
3.4	N ₂ -Bindung zur betriebseigenen Stickstoffversorgung	294
3.4.1	Zeitraum für die N ₂ -Fixierung erweitern - Winterzwischenfrüchte	296
3.5	Einsatz alternativer Düngemittel	296
3.6	Düngerumsetzung in Böden	297
3.7	Literatur	297
4	Übersicht der Veröffentlichungen zum Projekt.....	299
5	Zusammenfassung.....	305
6	Anhang.....	309
6.1	Anhang 2.2.-1: Fragebogen Hoftorbilanzierung	309
6.2	Anhang 2.3.3.1: Fragebogen der quantitativen Umfrage.....	311
6.3	Anhang 2.3.3.2: Fragebogen für qualitative Expert*Inneninterviews	322
6.4	Anhang 2.3.4.1: Interviewleitfaden für Expert*Inneinterviews – Nährstoff- management in SoLaWi/Market Garden Betrieben.....	324
6.5	Anhang 2.3.4.1.4.1: Analyseergebnisse der Düngemittelproben.....	326

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1–1: Ertragsrelationen von ökologischem zu konventionellem Freilandgemüsebau in verschiedenen Statistiken und Datensammlungen	10
Tabelle 2.1–2: Herausforderungen und Festlegungen für Nährstoffbilanzierung ökologischer Gemüsebaubetriebe	13
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.	15
Tabelle 2.1–4 Anteil der biologischen N ₂ -Fixierung (BNF) und Kategorisierung der verwendeten Düngemittel der Einzelbetriebe. LPM = Landschaftspflegematerial, HTK = Hühnertrockenkot.....	16
Tabelle 2.1–5 Aufteilung der erfassten Betriebsjahre (und Betriebe) in verschiedenen Bewirtschaftungskategorien	17
Tabelle 2.1–6: Nährstoff Input, Output, Saldo nach verschiedenen Bewirtschaftungskategorien	28
Tabelle 2.1–7: Nährstoffsalden pro Jahr in Ackerbaubetrieben in Sachsen (Kolbe, 2015).....	29
Tabelle 2.2–1: Übersicht zu den im AP 3 durchgeführten Versuchen	38
Tabelle 2.2–2: Probenumfang der im AP3 durchgeführten Praxisversuche. Für die Beprobung des Bodens wurde je Variante eine Mischprobe aus 16 Einstichen gezogen.....	40
Tabelle 2.2–3: Liste für Methoden der Bodenuntersuchungen.....	40
Tabelle 2.2–4: Eigenschaften und Unterschiede von N-Expert und NDICEA.....	41
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.....	47
Tabelle 2.2–6: Vergleich der in N-Expert und NDICEA hinterlegten N-Gehalte in Feldabfuhr und Ernteresten [ppm] mit den Versuchsdaten des AP3.....	48
Tabelle 2.2–7: Überblick über im Projektkontext veröffentlichte Offline-Versionen von N-Expert.....	49
Tabelle 2.2–8: Ausgewählte NDICEA Parameter zur Kalibrierung.....	57
Tabelle 2.2–9: Mit Modellen berechnete Mittelwerte und Standardfehler für Düngergaben und Frischmasseerträge der Versuche	66
Tabelle 2.3–1: Tools für die Düngplanung und Dokumentation inklusive Funktion und Kosten.....	74
Tabelle 2.3–1: Tools für die Düngplanung und Dokumentation inklusive Funktion und Kosten, Fortsetzung.	75
Tabelle 2.3–2: Überblick über die auf der Webseite www.branchensoftware.gartenbausoftware.de gelisteten Programme in der Kategorie Düngung im Gemüsebau (Stand 10.03.25)	76

Tabelle 2.3–3: Überblick über die auf der Webseite www.branchensoftware.gartenbausoftware.de gelisteten Programme in der Kategorie Kulturführung und Anbauplanung im Gemüsebau (Stand 10.03.25).....	77
Tabelle 2.3–4: Vergleich von DüngungBW, N-Expert und NDICEA.	85
Tabelle 2.3–5: Kommentare der nur teilweise zufriedenen Nutzer*Innen hinsichtlich der Probleme und des Verbesserungspotentials der EDV-Tools.	96
Tabelle 2.3–6: Hemmnisse für den Einsatz von EDV-Tools in Betrieben – Gründe für die Nicht-Nutzung.....	96
Tabelle 2.3–7: Anforderungen der Nicht-Nutzer*Innen unter den Teilnehmer*Innen an EDV-Tools.....	97
Tabelle 2.3–8: Interviewpartner*Innen für die Expert*Inneninterviews zum Thema „Softwarenutzung für das Nährstoffmanagement im ökologischen Gemüsebau“.	99
Tabelle 2.3–9: Regeln für die Transkription von qualitativen Interviews nach Kuckartz & Rädiker (2022).	100
Tabelle 2.3–10: Fördernden und hemmende Faktoren für die Nutzung von EDV-Tools - Ergebnisse der Expert*Inneninterviews.....	104
Tabelle 2.3–11: Betriebe, die an der qualitativen Umfrage zur Erhebung der Düngestrategien in Solidarischen Landwirtschaften und Marktgärtnereien teilgenommen haben.....	111
Tabelle 2.3–12: Gehalt von P ₂ O ₅ , K ₂ O, Mg, Ca sowie der pH-Wert und Humusgehalte im Boden für alle Betriebe. (n=27); Großbuchstaben geben die Gehaltsklassen für P ₂ O ₅ , K ₂ O und Mg nach LTZ (2025b) an.....	114
Tabelle 2.3–13: Kategorisierung der genannten verwendeten Düngemittel (n=47) *Düngemittel aus dem eigenen Betrieb.	115
Tabelle 2.3–14: Zusammengefasste Aussagen der Betriebe zur Gründüngung, Fruchtfolge und zum Mulchen auf ihren Betrieben.	117
Tabelle 2.3–15: EDV-Tool-Nutzung zum Nährstoff-Management bzw. Interesse an der Nutzung eines solchen Tools, Erstellung einer Hoftorbilanz und Bekanntheit der Programme NDICEA und N-Expert auf Betrieben mit solidarischer Landwirtschaft (n=9).....	122
Tabelle 2.3–16: Vorteile und Herausforderungen bei dem Einsatz von N-Expert und NDICEA in einem SoLaWi Betrieb.....	128
Tabelle 2.4–1: 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 ($\alpha = 0,05$).....	136
Tabelle 2.4–2: Einfluss der LM-Behandlungen auf den Boden-Nmin-Gehalt in kg ha ⁻¹ während des Vegetationsverlaufs. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen der LM-Arten ($\alpha = 0,05$).	139

Tabelle 2.4–3: 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 ($\alpha = 0,05$).	145
Tabelle 2.4–4: 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 ($\alpha = 0,05$).	145
Tabelle 2.4–5: 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 ($\alpha = 0,05$).	147
Tabelle 2.4–6: Untersuchte Winterzwischenfruchtarten am Standort Gülzow (LFA).	152
Tabelle 2.4–7: Beprobungstermine der Winterzwischenfrüchte	153
Tabelle 2.4–8: ANOVA Ergebnisse der WZF-Biomassebeprobungen.	156
Tabelle 2.4–9: $N_{\min}$ -Gehalte 14 (2019) bzw. 13 (2020) Tage nach KAS-Düngung zur Realisierung des hohen Ansaat- $N_{\min}$ -Niveaus.	156
Tabelle 2.4–10: Näherungsweise N_2 -Fixierungsleistung und C/N-Verhältnis (in Klammern) der Varianten bei niedrigem Ansaat- $N_{\min}$ -Niveau.	156
Tabelle 2.4–11: Netto-N-Wiederfindung des oberirdischen Winterzwischenfrucht-N (zum Umbruchtermin (im nachgebauten Weißkohl (zur Ernte))).	157
Tabelle 2.4–12: Faktoren und Faktorausprägungen Satellitenversuch Kleeegrasnutzung	160
Tabelle 2.4–13: Beprobungstermine (T1 – T4) der Gründungsphase (V1 2018 – 2020; V2 2019 – 2021).	161
Tabelle 2.4–14: Mittelwerte ($n=3$) der N_t -Mengen, C/N-Verhältnisse und N_2 -Fixierungsleistungen des jeweils letzten Schnitttermins vor Umbruch.	163
Tabelle 2.4–15: 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.	164
Tabelle 2.5–1: Mittelwerte (MW) der Nährstoffkonzentrationen und des C/N-Verhältnisses der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 ($n=4$, Tofumolke $n=6$).	178
Tabelle 2.5–2: Mittelwerte (MW) der Spurenelementkonzentrationen und der Gehalte an potentiell toxischen Elementen der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 ($n=4$, Tofumolke $n=6$).	178
Tabelle 2.5–3: 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.	179

Tabelle 2.5–4: Varianztabelle der Nitratgehalte im Boden zu unterschiedlichen Zeitpunkten - gemeinsame Auswertung der Standorte Grötzingen und Kleinhohenheim.	182
Tabelle 2.5–5: Niederschlag und Berechnungsmenge der Jahre 2019-2021 in den Kulturen Weißkohl und Spinat	193
Tabelle 2.5–6: Boden-Analyseergebnisse der Versuchsflächen der Jahre 2019-2021.....	193
Tabelle 2.5–7: Gesamt-Stickstoffgehalt und Gesamt-Kohlenstoffgehalt der am Queckbrunnerhof verwendeten Düngemittel	194
Tabelle 2.5–8: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils $\pm$ Standardabweichung des Weißkohls 2019.....	195
Tabelle 2.5–9: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils $\pm$ Standardabweichung des Weißkohls 2020.....	195
Tabelle 2.5–10: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils $\pm$ Standardabweichung des Weißkohls 2021.....	196
Tabelle 2.5–11: Gesamtaufwuchs $\pm$ Standardabweichung der Zweitkultur Spinat der Jahre 2019-2021.	196
Tabelle 2.5–12: Kornertrag und Strohertrag $\pm$ Standardabweichung der Erntejahre 2020 und 2021.	197
Tabelle 2.5–13: SPAD-Messwerte des Weißkohls zu Beginn der Kopfbildung $\pm$ Standardabweichung des Weißkohls der Jahre 2019-2021.....	197
Tabelle 2.5–14: Analyseergebnisse der einzelnen Fraktionen der Tofumolke 2019.....	198
Tabelle 2.5–15: $N_{\min}$ -Werte der Kulturfolge 2019-2020	200
Tabelle 2.5–16: $N_{\min}$ -Werte der Kulturfolge 2020-2021	201
Tabelle 2.5–17: $N_{\min}$ -Werte des Jahres 2021	202
Tabelle 2.5–18: Übersicht der Varianten und der Fruchtfolge.	204
Tabelle 2.5–19: N-Zufuhr mit Haarmehlpellets (HMP)	205
Tabelle 2.5–20: Annahmen zur Schätzung der N_2 -Fixierungsleistung (N_{dfa}).....	206
Tabelle 2.5–21: Mittels linearer Regression aus Annahmen in Tabelle 2.4-18 berechnete N_{dfa} -Anteile am pflanzlichen Gesamtstickstoff (N_t) über Schnitthöhe bzw. oberirdisch.....	207
Tabelle 2.5–22: $N_{\min}$, 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).....	209
Tabelle 2.5–23: N-Konzentration und C/N-Verhältnis der oberirdischen Klee grasbiomasse sowie geschätzte N_2 -Fixierungsleistung für einzelne Schnitttermine bei Schnittgutabfuhr (C&C) und Mulchnutzung (Mulch).....	211
Tabelle 2.5–24: N-Gehalt in FM der Grunddüngung mit 70 kg N ha ⁻¹ als Kleepura, Klee grassilage und Horngries nach Versuchsplan	213
Tabelle 2.5–25: Einfluss der Dünger auf die $N_{\min}$ -Gehalte, kulturbegleitend:	213
Tabelle 2.6–1: Herkunft der Böden	221
Tabelle 2.6–2: TUM-Systemversuch – Öko-Anbausysteme und deren spezifische Bewirtschaftung, Düngung und Fruchtfolgen.....	222

Tabelle 2.6–3: TUM- Biomasseversuchs – Öko-Betriebssysteme und deren spezifische Bewirtschaftung, Düngung und Fruchtfolgen	223
Tabelle 2.6–4: Korngrößenverteilung und Bodenart	224
Tabelle 2.6–5: Bodeneigenschaften	225
Tabelle 2.6–6: In den Versuchen verwendeten Düngemittel	226
Tabelle 2.6–7: Inkubationsversuche	227
Tabelle 2.6–8: Pflanzenversuche	230
Tabelle 2.6–9: verwendete Methoden (nach VDLUFA-Methodenbuch I) und Analysegeräte	232

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1-1: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha^{-1}	19
Abbildung 2.1-2: Einzelbetriebliche Hoftorbilanzen für Stickstoff, Phosphor und Kalium in kg ha^{-1}	19
Abbildung 2.1-3: Anteil (%) der Herkunft des Inputs für die jeweiligen Nährstoffe	20
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.	21
Abbildung 2.1-5: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha^{-1}) und N-Saldo (kg ha^{-1}).	22
Abbildung 2.1-6: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha^{-1}) und N-Output (kg ha^{-1}).....	22
Abbildung 2.1-7: Zusammenhang zwischen N-Input durch Keratindünger (kg ha^{-1}) und N-Saldo (kg ha^{-1}).	23
Abbildung 2.1-8: Anteile (%) des N-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.	24
Abbildung 2.1-9: Zusammenhang zwischen P-Input durch Grunddünger (kg ha^{-1}) und P-Saldo (kg ha^{-1}).	24
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.	25
Abbildung 2.1-11: Zusammenhang zwischen K-Input (kg ha^{-1}) und K-Saldo (kg ha^{-1}).....	25
Abbildung 2.1-12: Anteile des K-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.	26
Abbildung 2.1-13: Nährstoffeffizienz der Nährstoffe in den verschiedenen Betrieben.	27
Abbildung 2.1-14: Beziehung zwischen N-Input und N-Saldo in ökologischen und konventionellen Pilotbetrieben (Hülsbergen et al., 2022; Hülsbergen und Rahmann, 2015)	30
Abbildung 2.2-1: Schema des Aufbaus der kulturspezifischen Daten von N-Expert und NDICEA	43
Abbildung 2.2-2: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA ($n = 47$)	44
Abbildung 2.2-3: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA mit den durchschnittlichen Angaben zur ökologischen Feldabfuhr in NDICEA ($n = 47$)	45
Abbildung 2.2-4: Korrelation der Nährstoffkonzentrationen (N, P, K) identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA ($n = 47$).....	46
Abbildung 2.2-5: N-Aufnahme von Wintergemüse in N-Expert 4.5.4.....	50
Abbildung 2.2-6: N-Aufnahme von Winterkulturen in N-Expert 4.5.4.....	50
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.....	54
Abbildung 2.2-8: Softwarearchitektur der NDICEA 7 Webanwendung	55
Abbildung 2.2-9: Übersicht über die modulare Struktur des Rechenkerns	56
Abbildung 2.2-10: Python Code für die Methode zur Berechnung der Stickstofffixierung aus dem Stickstoffteilmodell	56

Abbildung 2.2-11: Kalibrierungsbutton NDICEA 7	58
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)	60
Abbildung 2.2-13: Erste Ansicht des Boden-Menüs	61
Abbildung 2.2-14: Ausführliches Boden-Menü	62
Abbildung 2.2-15: Auswahl des Standortes, für den Wetterdaten abgerufen werden	62
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.	63
Abbildung 2.2-17: Verlauf der Kohlenstoffmenge im Oberboden und jährliche Bilanzen als Balkendiagramme des Abbaus und Eintrags von organischer Substanz	64
Abbildung 2.2-18: Verteilung der mittleren absoluten Abweichung (RMSE) gemessenem zu mineralischem mineralischen Stickstoff. A vor schlagweise Kalibrierung, B nach Kalibrierung	65
Abbildung 2.2-19: N-Effizienz der Praxisversuche	67
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)	67
Abbildung 2.3-1: Altersverteilung der Teilnehmer*Innen an der Umfrage zum Thema „Nutzung von EDV-Tools im ökologischen Gemüsebau“ auf den Ökofeldtagen in 2023.	88
Abbildung 2.3-2: Verwendung von verschiedenen Düngemitteln der Teilnehmer*Innen auf den ökologischen und konventionell bewirtschafteten Betrieben (Mehrfachnennungen möglich.)	89
Abbildung 2.3-3: Antworten der Teilnehmer*Innen zur Nutzung der Tools auf den Betrieben. Mehrfachnennungen möglich.	90
Abbildung 2.3-4: Verteilung der (Nicht-)Nutzer*Innen von EDV-Tools im Gemüsebau über die Kategorien Alter, Betriebsgröße, Anzahl an angebauten Kulturen und Gemüseanbaufläche hinweg; n=66).	91
Abbildung 2.3-5: Kriterien für die Düngeentscheidungen von (Nicht-)Nutzer*Innen von EDV-Tools. Mehrfachnennungen möglich.	92
Abbildung 2.3-6: Von den Teilnehmer*Innen genutzte EDV-Tools zur Anbauplanung.	93
Abbildung 2.3-7: Von den Teilnehmer*Innen genutzte EDV-Tools zur Düngeplanung.	94
Abbildung 2.3-8: Von den Teilnehmer*Innen genutzte EDV-Tools zur Buchhaltung.	94
Abbildung 2.3-9: Darstellung der Wege, auf denen die Teilnehmer*Innen auf die verwendeten Tools zur (A) Anbauplanung, (B) Düngeplanung und (C) Buchhaltung aufmerksam wurden.	95
Abbildung 2.3-10: Nmin-Gehalte in 0-30 und 30-60 cm Tiefe pro Fläche (n=27) der neun Betrieben mit Solidarischer Landwirtschaft.	113
Abbildung 2.3-11: Zusammenfassung der Schlagwörter der Betriebe zur Entscheidungsfindung der Nährstoffversorgung. Nennung in abnehmender Reihenfolge.	118

Abbildung 2.3-12: Bewertung der Wichtigkeit der Nährstoffversorgung von 1-10 (1=niedrig, 10=hoch) durch die Expert*Innen in den Interviews. Die Linie markiert die 5 als mittleren Wert.	120
Abbildung 2.3-13: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha ⁻¹ für kleine Produkte.	124
Abbildung 2.3-14: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha ⁻¹ für große Produkte.	125
Abbildung 2.4-1: 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.	136
Abbildung 2.4-2 : 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.	137
Abbildung 2.4-3: 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.	138
Abbildung 2.4-4: 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).....	140
Abbildung 2.4-5: 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 ($\alpha = 0,05$).....	146
Abbildung 2.4-6: 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 ($\alpha = 0,05$).	148

Abbildung 2.4-7: 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	149
Abbildung 2.4-8: 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.....	149
Abbildung 2.4-9: 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.	149
Abbildung 2.4-10: Lufttemperaturen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gülzow im Vergleich zum langjährigen Mittel (grün) der Wetterstation in Gülzow.	151
Abbildung 2.4-11: Niederschlagssummen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gülzow im Vergleich zum langjährigen Mittel der Wetterstation in Gülzow (graue Fläche).....	152
Abbildung 2.4-12: N-Menge im oberirdischen Aufwuchs unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte (WZF) sowie dessen C/N-Verhältnis zu jeweils 5 Beprobungsterminen in den Jahren 2020 und 2021.	155
Abbildung 2.4-13: 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-Nmin-Niveau („hoch“ und „niedrig“). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).....	157
Abbildung 2.4-14: N_2 -Fixierungsleistung in Abhängigkeit von Herbst- $\text{N}_{\min}$ -Niveau „hoch“ = Ausgangsniveau $112 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ (2018) bzw. $56 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ (2019) + 100 kg N ha^{-1} als KAS. Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).....	163
Abbildung 2.4-15: N-Aufnahme des nachgebauten Weißkohls unterschieden in Erntegut („Kohl-N“) und Ernterest. Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).....	164
Abbildung 2.4-16: Mittlere Fraktionsanteile (Gras, Beikraut, Klee) und N_t -Mengen in der Schnittdrohtrockenmasse aller Versuchsvarianten zu allen abfuhrdifferenzierten Schnittterminen.	166
Abbildung 2.5-1: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel auf den Mittelwert der Weißkolerträge (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.....180

Abbildung 2.5-2: 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.....181

Abbildung 2.5-3: 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 TabelleAbbildung 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. 182

Abbildung 2.5-4: 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. 183

Abbildung 2.5-5: 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. 184

Abbildung 2.5-6: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Nachwirkung zur ungedüngten Zweitfrucht Spinat – Mittelwert der N-Abfuhr (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. 185

Abbildung 2.5-7: 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 = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an. 186

Abbildung 2.5-8: 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 = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	186
Abbildung 2.5-9: 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 = Klee gras; SG = Schweinegülle. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.	187
Abbildung 2.5-10: Erträge der vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder und Wiederholungen. Fruchtfolgefeld (in Klammern: n der Datensätze): Porree (6), Salat (4), Brokkoli (4), Rote Bete (2).	208
Abbildung 2.5-11: Mittlere N-Nutzungseffizienz der jeweiligen Gesamtfruchtfolge (NUE_{FF}) mit Standardabweichung. Berücksichtigt wurden alle vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder.	210
Abbildung 2.5-12: Mittlere N-Versorgungseffizienz (NSE) der Fruchtfolgefelder der Systeme mit Standardabweichungen.	210
Abbildung 2.5-13: Schattenwurf im Bestand durch die Konstruktion des GWH.	214
Abbildung 2.5-14: Einfluss der Düngung auf Ertrag Tomate und gebildete Grünmasse.	215
Abbildung 2.5-15: Gewächshaus mit umfangreichen Einbauten im Dachbereich am 9.3.2020 bei der Ausbringung der organischen Düngemittel nach Versuchsplan.	216
Abbildung 2.5-16: Erträge in Stück/Einzelpflanze, absolute und relative Reihenerträge.	217
Abbildung 2.6-1: Inkubationsversuche und Pflanzenversuche. a = Respirometer-Brutschrank, b = Probengefäße im Respirometer, c = Wuchshöhe Roggen, d = großblättrige Kresse.	226
Abbildung 2.6-2: 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. Standardfehlerbalken aus 5 Wiederholungen.	234
Abbildung 2.6-3: 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) aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	235
Abbildung 2.6-4: 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. Standardfehlerbalken aus 5 Wiederholungen.	236
Abbildung 2.6-5: Verlauf der Pflanzenentwicklung ackerbaulich (links; Mittelwert VH und HK) und gartenbaulich (rechts; Mittelwert ED und ZF) genutzter Böden in Abhängigkeit von der Bodenart; Wuchshöhe (oben) sowie Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert (unten) von Roggen. Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	237
Abbildung 2.6-6: 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. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 5 Wiederholungen.	238
Abbildung 2.6-7: 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. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 5 Wiederholungen.	239
Abbildung 2.6-8: 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 Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.	240
Abbildung 2.6-9: 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 Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.	241
Abbildung 2.6-10: Pflanzliche N-Aufnahme von Roggen nach 42 Tagen in je Standort und Bodenart; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.	242

Abbildung 2.6-11: Maximale Netto-N-Mineralisation (66d 18°C) in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart (negative Werte = N-Immobilisation, Nitratwerte sind niedriger im Vergleich zu ungedüngt); Daten aus dem Inkubationsversuch 2 und dem Inkubationsversuch 5, 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. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.....	243
Abbildung 2.6-12: 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. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.....	244
Abbildung 2.6-13: 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. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.	246
Abbildung 2.6-14: 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 im Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Düngemittel: Haar C/N 4 = Haarmehlpellets, AB C/N 11 = Ackerbohnsenschrot, KP C/N 13 = Kleepellets und SoBlu C/N 15 = Sonnenblumensamen-Presskuchen. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.....	247
Abbildung 2.6-15: Verlauf der N_{min} -Entwicklung aus der OBS im Inkubationsversuch innerhalb 57 Tage in Abhängigkeit vom Düngesystem (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2): Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS). Daten aus Inkubationsversuch 6, Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.	248
Abbildung 2.6-16: Pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen nach 37 Tagen (Pflanzenversuch 4) in Abhängigkeit vom Düngesystem (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2): Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.	249
Abbildung 2.6-17: Entwicklung der N_{min} -Vorräte in ungedüngten Kontroll-Böden des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3), STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25% Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Klee gras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Klee gras-Fruchtfolge mit 75 % LA, „- BG“ – ohne Biogasgärrest), „+ BG“ – Nährstoffrückführung durch Biogasgärrest. Daten aus Inkubationsversuch 7, Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.....	250
Abbildung 2.6-18: Pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen der verschiedenen Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle	

2.5-3): STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25% Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne- Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LGK2 75 – Luzerne-Kleegras- Fruchtfolge mit 75 % LA, mit (+ BG) Biogasgärrest und ohne Biogasgärrest (- BG); Daten aus Pflanzenversuch 5, Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.	251
Abbildung 2.6-19: Verlauf der Netto-N-Mineralisation in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und langfristigem Düngesystem (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh- Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Daten aus Inkubationsversuch 6; Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	252
Abbildung 2.6-20: Mittlere Netto-N-Mineralisation [%] der verschiedenen Düngemittel über alle Messtermine der 57 Tage im Inkubationsversuch 6 der Düngesystemböden (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist – MSS in Abhängigkeit des Dünger-C/N. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	253
Abbildung 2.6-21: Finale pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen und aller Düngebehandlungen im Mittel nach 37 Tagen im Pflanzenversuch 4 der Düngesystem-böden (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.	254
Abbildung 2.6-22: Finale pflanzliche N-Aufnahme in Abhängigkeit von Dünger (C/N) und langfristigem Düngemanagement (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2) im Pflanzenversuch 4 (Tag 37); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.	254
Abbildung 2.6-23: Maximale Netto-N-Mineralisation (Tag 65) der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) ohne Biogasgärrest (- BG) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LGK2 75 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Inkubationsversuch 7, Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	256
Abbildung 2.6-24: Maximale Netto-N-Mineralisation (Tag 65) der verschiedenen Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) mit langfristiger Nährstoffrückführung durch Biogasgärrest (+ BG) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LGK2 75 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Inkubationsversuch 7, Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	256

Abbildung 2.6-25: Finale nach 36 Tagen im Pflanzenversuch 5 mit den Böden der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3): STD 25 – Standard-pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen und aller Düngebehandlungen im Mittel Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 75 % LA, mit (+ BG) Biogasgärrest und ohne Biogasgärrest (- BG;) zur Nährstoffrückführung; Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.	257
Abbildung 2.6-26: Pflanzliche Netto-N-Aufnahme der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) ohne Biogasgärrest (- BG,) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Pflanzenversuch 5, Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.	258
Abbildung 2.6-27: Pflanzliche Netto-N-Aufnahme der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) mit langfristiger Nährstoffrückführung durch Biogasgärrest (+ BG) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Pflanzenversuch 5, Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.	259
Abbildung 2.6-28: 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 = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, NHWL = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, C/NHWL = CHWL/NHWL-Verhältnis, C/NDuenger = 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). ...	260

Abbildung 2.6-29: Korrelationen der Bodenparametern der ungedüngten Kontroll-Böden über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs (Inkubationsversuch 6) am Ende der Inkubationszeit nach 57 Tagen. Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität - Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizient), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. Nitrat-N =, Ammonium-N, $N_{min} = NO_3^- - N + NH_4^+ - N$, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, BodenNt = Boden- N_t -Gehalt, $C/N = C_{org}/N_t$ -Verhältnis, N_{hwl} = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, $Chwl$ = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, $CN_{hwl} = C_{hwl}/N_{hwl}$ -Verhältnis, C_{mik}/C_{org} = Verhältnis, C_{mik} = Boden-mikrobieller C-Gehalt, Rh = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse). 262

Abbildung 2.6-30: Korrelationen zwischen den Boden- und Pflanzenparametern der ungedüngten Kontroll-Böden über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs am Ende des Pflanzenversuchs 4 (Tag 37). Blau: positive Korr., rot: negative Korr., Farbintensität Ausdruck für den Korrelationskoeffizienten, *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, Signifikanzniveau nach Pearson und Spearman ($\alpha = 5$). TM = pflanzliche Trockenmasse, BM Prodrate = pflanzliche Biomasse-Produktionsrate, NO_3Start = Nitrat-Startwert, NH_4Start = Ammonium-Startwert, $N_{min}Start$ = N_{min} (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, NO_3End = Nitrat-Endwert, NH_4End = Ammonium-Endwert, $N_{min}End$ = N_{min} (Nitrat-N + Ammonium-N) Endwert, N_{Menge} = finale pflanzliche N-Aufnahme, $NAufnRate$ = pflanzliche N-Aufnahmerate, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, $soilN_t$ = Boden- N_t -Gehalt, $CorgN_t = C_{org}/N_t$ -Verhältnis, N_{hwl} = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, $Chwl$ = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, $CN_{hwl} = C_{hwl}/N_{hwl}$ -Verhältnis, C_{mik}/C_{org} = Verhältnis C_{mik} = mikrobieller C, Rh = heterotrophe Respiration (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse). 263

Abbildung 2.6-31: Korrelation zwischen Bodenparametern über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs (Inkubationsversuch 6) und Dünger am Ende der Inkubationszeit nach 57 Tagen. Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität - Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizient), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. Nitrat-N, Ammonium-N, $N_{min} = NO_3^- - N + NH_4^+ - N$, $N_{min\_control} = N_{min}$ ($NO_3^- - N + NH_4^+ - N$) der Kontrollböden, N_{min_net} = Dünger-Netto- N_{min} , $DuengerCN$ = Dünger-C/N-Verhältnis, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, BodenNt = Boden- N_t -Gehalt, $C/N = C_{org}/N_t$ -Verhältnis, N_{hwl} = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, $Chwl$ =

heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, $C_{N_{HWL}} = C_{HWL}/N_{HWL}$ -Verhältnis, C_{mik}/C_{org} = Verhältnis, C_{mik} = Boden-mikrobieller C-Gehalt, R_h = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse). 264

Abbildung 2.6-32: Korrelation zwischen Boden- und Pflanzenparametern über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs (Pflanzenversuchs 4) und Dünger am Ende der Inkubationszeit nach 37 Tagen. Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität - Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizient), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. TM = pflanzliche Trockenmasse, BM Prodrate = pflanzliche Biomasse-Produktionsrate, NettoBM = Pflanzliche Netto-Biomasse durch Düngung, NO_3Start = Nitrat-Startwert, NH_4Start = Ammonium-Startwert, $N_{min}Start = N_{min}$ (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, NO_3End = Nitrat-Endwert, NH_4End = Ammonium-Endwert, $N_{min}End = N_{min}$ (Nitrat-N + Ammonium-N) Endwert, N_{Menge} = finale pflanzliche N-Aufnahme, $NAufnRate$ = pflanzliche N-Aufnahmerate, NettoN = Pflanzliche Netto-N-Aufnahme durch Dünger, $CND_{Dünger}$ = Dünger-C/N-Verhältnis, C_{org} = Boden-organischer-C-Gehalt, $soilN_t$ = Boden- N_t -Gehalt, $C_{org}N_t = C_{org}/N_t$ -Verhältnis, N_{HWL} = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, C_{HWL} = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, $C_{N_{HWL}} = C_{HWL}/N_{HWL}$ -Verhältnis, $C_{mik}C_{org} = C_{mik}/C_{org}$ -Verhältnis, C_{mik} = mikrobieller C, R_h = heterotrophe Respiration (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse). 265

Abbildung 2.6-33: Korrelation zwischen Bodenparametern über alle Betriebssysteme (Fruchtfolgen) und Dünger am Ende des Inkubationsversuchs 7 mit den TUM-Biomasseversuchsböden nach 65 Tagen. Blau: positive Korr., rot: negative Korr., Farbintensität Ausdruck für den Korrelationskoeffizienten, *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, Signifikanzniveau nach Pearson und Spearman ($\alpha = 5$). $N_{min} = NO_3--N + NH_4+-N$, Nitrat-N, Ammonium-N, $N_{min\_control} = N_{min}$ ($NO_3--N + NH_4+-N$) der Kontrollböden, $N_{min\_net} =$ Dünger-Netto- N_{min} , $N_{min}Start = N_{min}$ (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, R_{hNK} = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität) der Kontrolle (Tag 8-15), $fertilizerCN$ = Dünger-C/N-Verhältnis, Leg = Leguminosenanteil, C_{org} = Boden-organischer-C-Gehalt, $soilN_t$ = Boden- N_t -Gehalt, $C_{org}N_t =$ Boden C_{org}/N_t -Verhältnis, $HWL-C$ = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, $HWL-N$ = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, $HWL-CN = C_{HWL}/N_{HWL}$ -Verhältnis, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse), pH = Boden-pH-Wert.....266

Abbildung 2.6-34: Korrelationen zwischen den Boden- und Pflanzenparametern über alle Betriebssysteme (Fruchtfolgen) und Dünger am Ende des

Pflanzenversuchs 6 mit den TUM-Biomasseversuchsböden (Tag 37). Blau: positive Korr., rot: negative Korr., Farbintensität Ausdruck für den Korrelationskoeffizienten, *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, Signifikanzniveau nach Pearson und Spearman ($\alpha = 5$). plantNup = finale pflanzliche N-Aufnahme, NAufnRate = pflanzliche N-Aufnahmerate, plantNetNup = Pflanzliche Netto-N-Aufnahme durch Dünger, plantBM = pflanzliche Trockenmasse, Growthrate = pflanzliche Biomasse-Produktionsrate, NO3Start = Nitrat-Startwert, NH4Start = Ammonium-Startwert, NminStart = Nmin (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, RhNK = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität) der Kontrolle (Tag 8-15), NO3End = Nitrat-Endwert, NH4End = Ammonium-Endwert, NminEnd = Nmin (Nitrat-N + Ammonium-N) Endwert, CNfert = Dünger-C/N-Verhältnis, Leg = Leguminosenanteil, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, soilNt = Boden-Nt-Gehalt, CorgNt = Corg/Nt-Verhältnis, Chwl = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, Nhwl = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, CNhwl = Chwl/Nhwl-Verhältnis, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse), pH = Boden-pH-Wert.	267
Abbildung 2.6-35: Finale N-Mineralisation auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) mit und ohne Düngung nach 35 Tagen im Inkubationsversuch 8. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	287
Abbildung 2.6-36: Finale Netto-N-Mineralisation verschiedener organischer Dünger auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) nach 35 Tagen im Inkubationsversuch 8. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	288
Abbildung 2.6-37: Finale pflanzliche N-Aufnahme auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) mit und ohne Düngung nach 38 Tagen im Pflanzenversuch 6. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	288
Abbildung 2.6-38: Finale pflanzliche Netto-N-Aufnahme auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) mit und ohne Düngung nach 38 Tagen im Pflanzenversuch 6. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.	289

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 -abfuhr) 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

Die wissenschaftliche Zielsetzung des Vorhabens knüpft an die Bekanntmachung Nr. 18/17/31 über die Durchführung von Praxis-Forschungsnetzwerken sowie von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben) zur „Optimierung des Nährstoffmanagements im Ökologischen Landbau“ im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN) an.

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, die kritisch angesehen aber vielfach verwendet werden, zu verringern, 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 N₂-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 legumen Zwischenfrüchte 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 Systeme 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 Düngeempfehlungen 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) sollten Versuche an verschiedenen Standorten in Deutschland durch die Projektpartner durchgeführt werden.

Es war die Zielsetzung, des Projektes, die Modelle anhand der Ergebnisse zu prüfen, zu verbessern und der Praxis zur Verfügung zu stellen. Die Akzeptanz und Anwendung der beiden EDV-Tools in der Praxis und Beratung wurden durch qualitative und quantitative Interviews mit Praktiker*Innen und Berater*innen analysiert. Außerdem wurden Online-Workshops durchgeführt, um die Bekanntheit der beiden Tools in Praxis und Beratung zu erhöhen. Um die Vor- und Nachteile der Nutzung der Tools für sehr divers strukturierte Betriebe besser zu verstehen, wurden diese auf einem Betrieb eingesetzt und evaluiert.

Ergänzend ist in Labor- und Gewächshausversuchen die N-Dynamik und damit die Düngewirkung von Klee grasprodukten und anderer organischer Dünger untersucht worden. Der Fokus liegt dabei auf Bodeneigenschaften – speziell dem Tongehalt und die Bodenart. Die Vorbewirtschaftung der Böden ist als weitere Einflussgröße untersucht worden. Beide Eigenschaften werden in Wechselwirkung mit dem CN-Verhältnis der Düngemittel geprüft. Die Ergebnisse stehen einer verbesserten Modellbildung in den EDV-Tools zur Verfügung.

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 N_2 -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, Bodenart, Bewirtschaftung, 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
 - Akzeptanz der Kalkulationsverfahren und Tools in der gemüsebaulichen Praxis und Beratung

1.3 Organisationsstruktur des Projekts

Für die Bearbeitung des Forschungspakets wurde die Arbeit in verschiedene Themenschwerpunkte aufgegliedert 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

Ursprünglich AP2 zugeordnete Verlängerung: Evaluierung der Akzeptanz von EDV-gestützten Systemen in Praxis und Beratung (aus inhaltlichen Gründen nun eingegliedert in AP3)

Praxistransfer der überarbeiteten EDV Systeme zum Düngemanagement, Evaluierung von Notwendigkeit und Akzeptanz entsprechender Systeme, Präsentation, Anwender-Workshops zu den EDV-Systemen, Testlauf auf einem Betrieb mit hoher Kulturartenvielfalt

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
+ Verlängerung: langjährige Bewirtschaftung und Düngevorgeschichte**

Ursachen für unterschiedliche N-Freisetzung verschiedener Böden und Düngemittel identifizieren; Bodenart, Tongehalt, Betriebssystem, Fruchtfolge, Dünger und Düngesystem, 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 Horti* 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/lehrmaterialien/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 Hortic.* 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)

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.

2.1.1 Methodische Voraussetzungen zur Berechnung von Nährstoffbilanzen im ökologischen Gemüsebau

Die Analyse von Nährstoffbilanzen und Nährstoffeffizienzen verlangt möglichst genaue betriebspezifische 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 Kultuarten 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 Kaliegehalten 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 Hoftor-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 Forderung 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 Wurzeltrtrag 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.

2.1.2 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 Düngerezufuhr, 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.

2.1.3 Material und Methoden

2.1.3.1 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.

#	Kennung	Verband	Betriebs- größe (ha)	Anzahl Kulturen Ø	Anteil Gemüse an Fläche (%)	Anteil Gemüse an FF (%)	FMK	Anzahl 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

2.1.3.2 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					
			N-Dünger		Mehrnährstoffdünger			Mineral- dünger
			Handelsdünger		Grunddünger			
#	Kennung	% BNF Input an Gesamt- N-Input	Keratin	Handels- dünger pflanzlich	Kompost (pflanzlich)	Mist	Champost/ Gärrest	Mineral- dünger
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		Frisch- kompost			Patentkali
6	LWK2	48			Kompost	Festmist (divers), HTK	Champost	Kalisop
7	LWK3	49		Acker- bohnen		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	Kartoffel- sirup		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.

2.1.4 Ergebnisse und Diskussion

2.1.4.1 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 $+61\ ha^{-1}$.

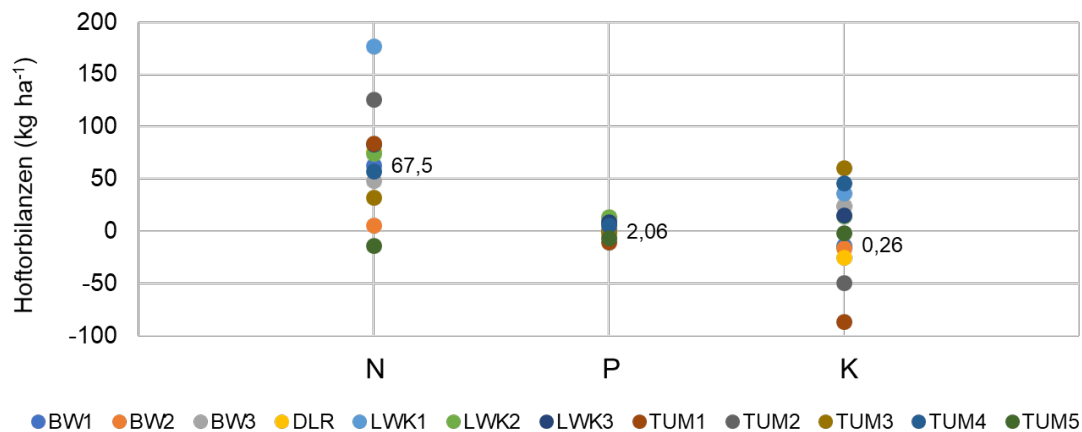


Abbildung 2.1-1: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha^{-1} .

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.

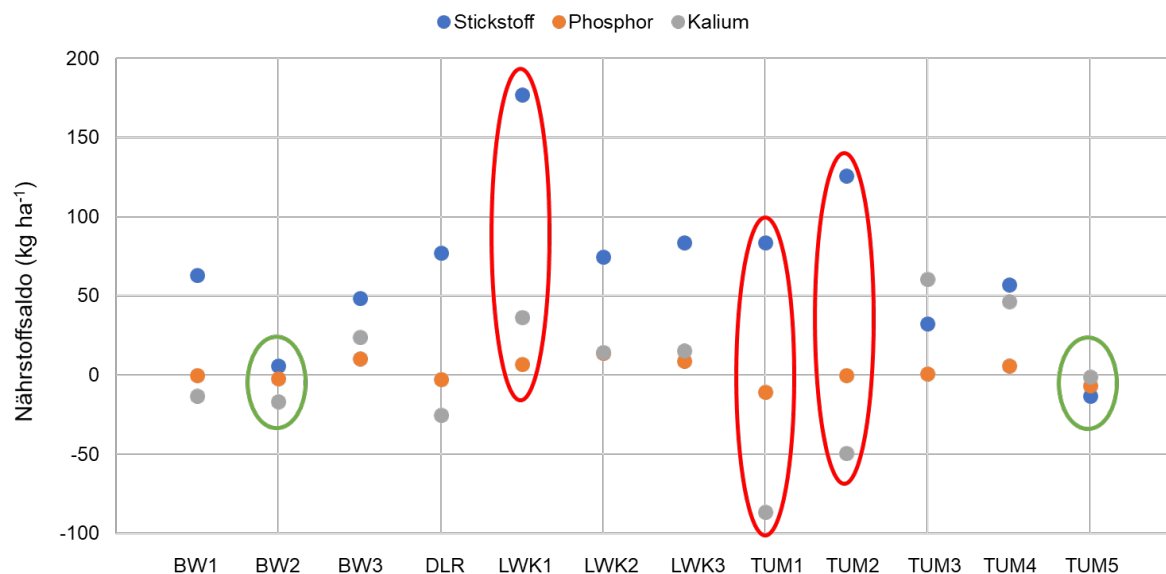


Abbildung 2.1-2: Einzelbetriebliche Hoftorbalancen für Stickstoff, Phosphor und Kalium in kg ha^{-1} .

Die Aufschlüsselung der Herkunft 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, Biogasanlagensubstrat, Tiere und Futtermittel über alle Betriebe betrachtet. Im Einzelfall konnten Substrate allerdings bedeutend sein.

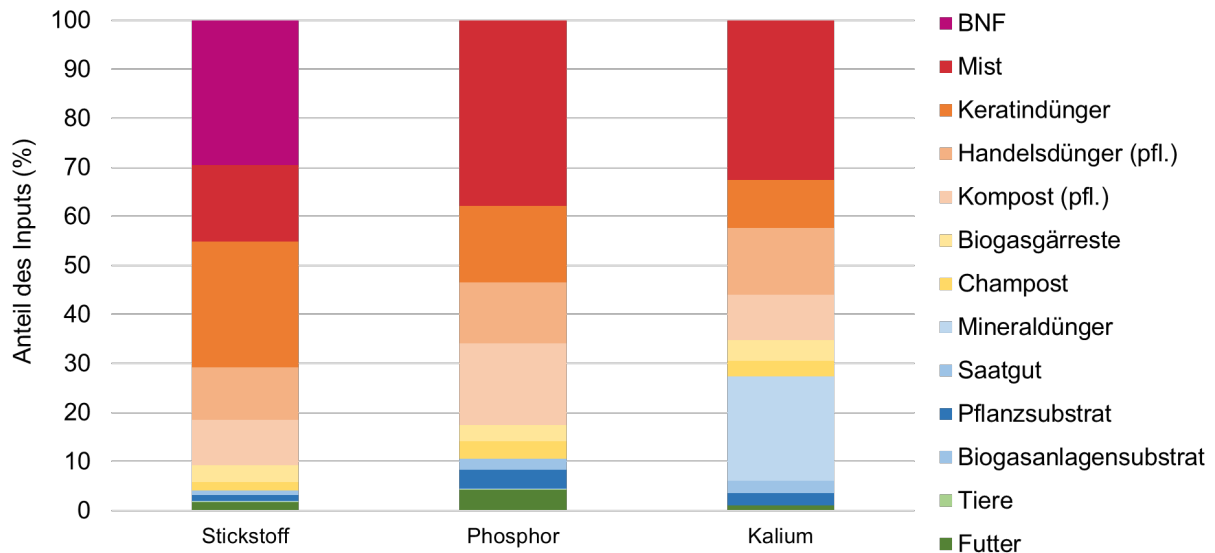


Abbildung 2.1-3: Anteil (%) der Herkunft des Inputs für die jeweiligen Nährstoffe.

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-betonten N-Düngung auftreten, positive K-Salden bei der Verwendung von Mineraldüngern, letztlich wird aber auch hier die Düngemittelwahl entscheidend sein.

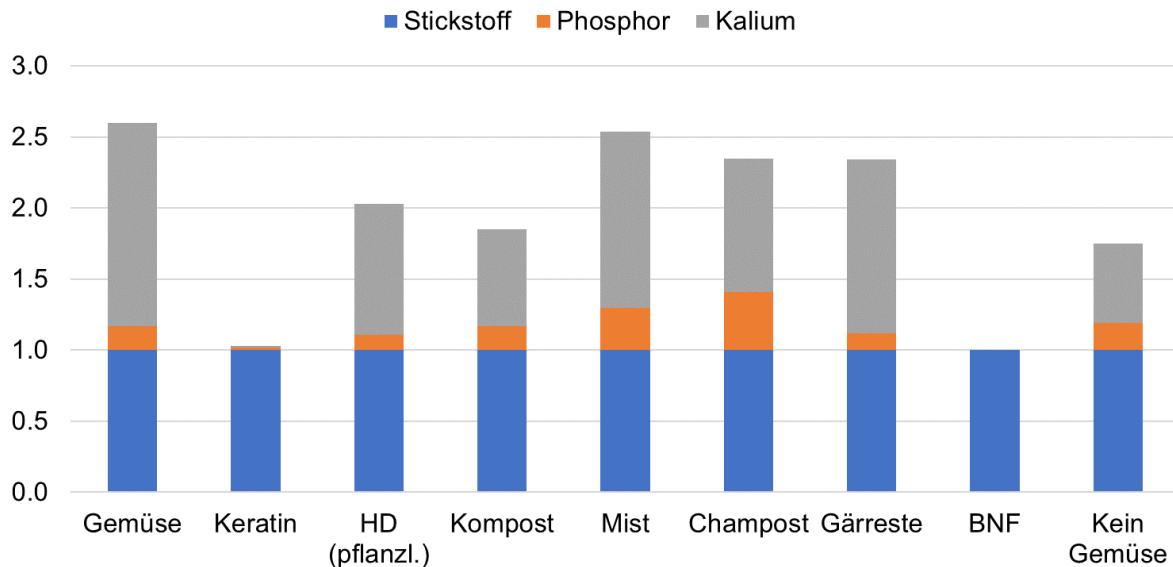


Abbildung 2.1-4: P- und K-Frachten je Einheit Stickstoff der auf den Betrieben eingesetzten Düngemittel im Vergleich zum mittleren Bedarf von Gemüse- und Nicht-Gemüse-Kulturen.

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 (2, 3). 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 2.1-7). 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.

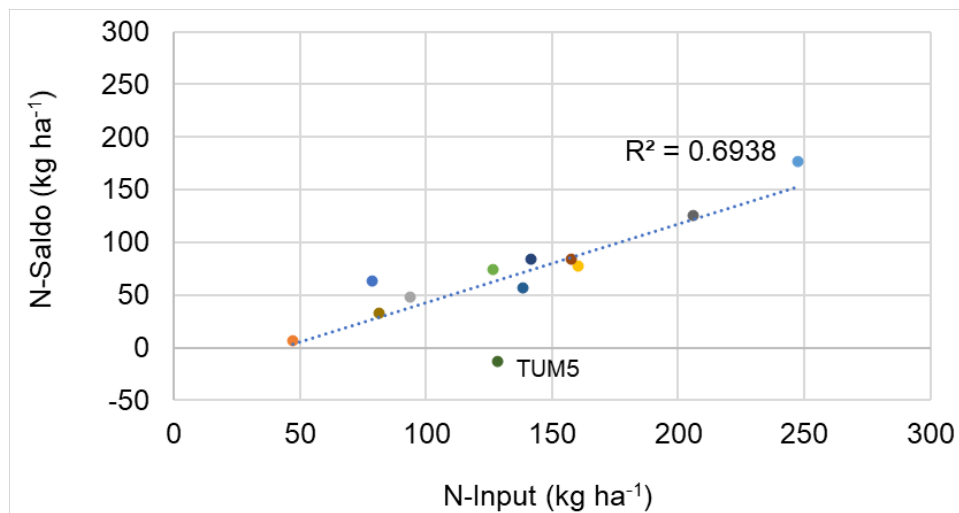


Abbildung 2.1-5: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha⁻¹) und N-Saldo (kg ha⁻¹).

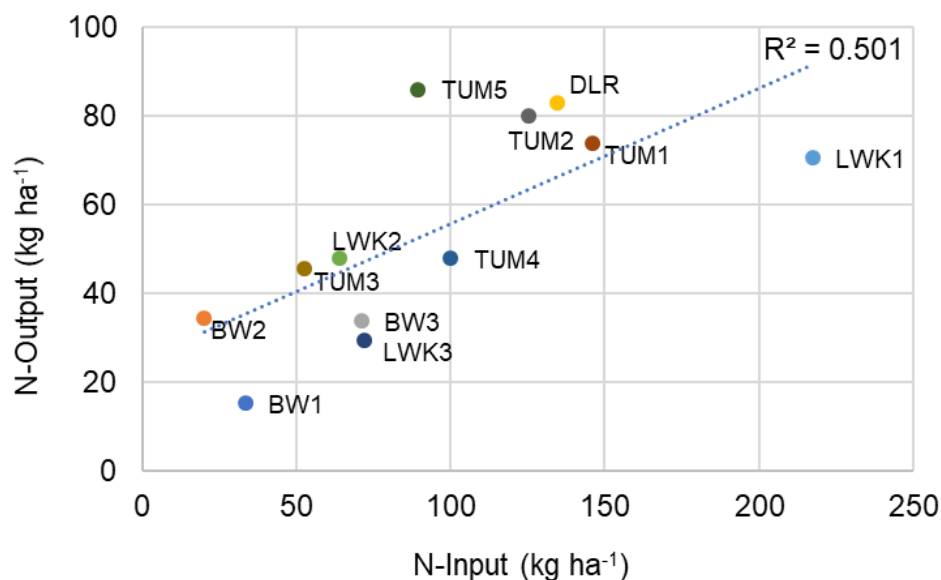


Abbildung 2.1-6: Zusammenhang zwischen N-Input (kg ha⁻¹) und N-Output (kg ha⁻¹).

Die Betriebe mit dem höchsten Einsatz von Keratindünger (TUM1, LWK1 und TUM2) zeigten alle hohe N-Salden (2). 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).

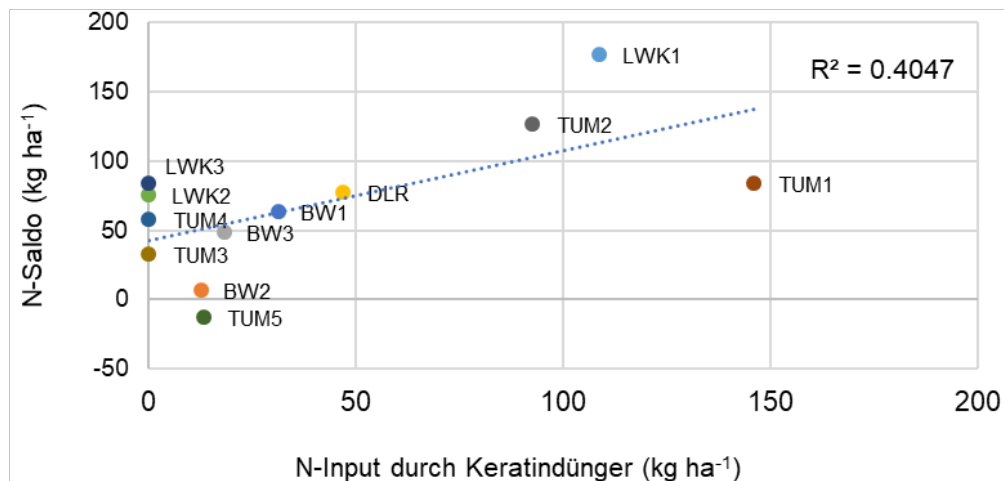


Abbildung 2.1-7: Zusammenhang zwischen N-Input durch Keratindünger (kg ha⁻¹) und N-Saldo (kg ha⁻¹).

Die Anteile des N-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe zeigten sehr deutlich, wie unterschiedlich die Düngestrategien auf den Betrieben ausfallen (Abbildung 2.1-8). 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 Futterleguminoase 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 3 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.

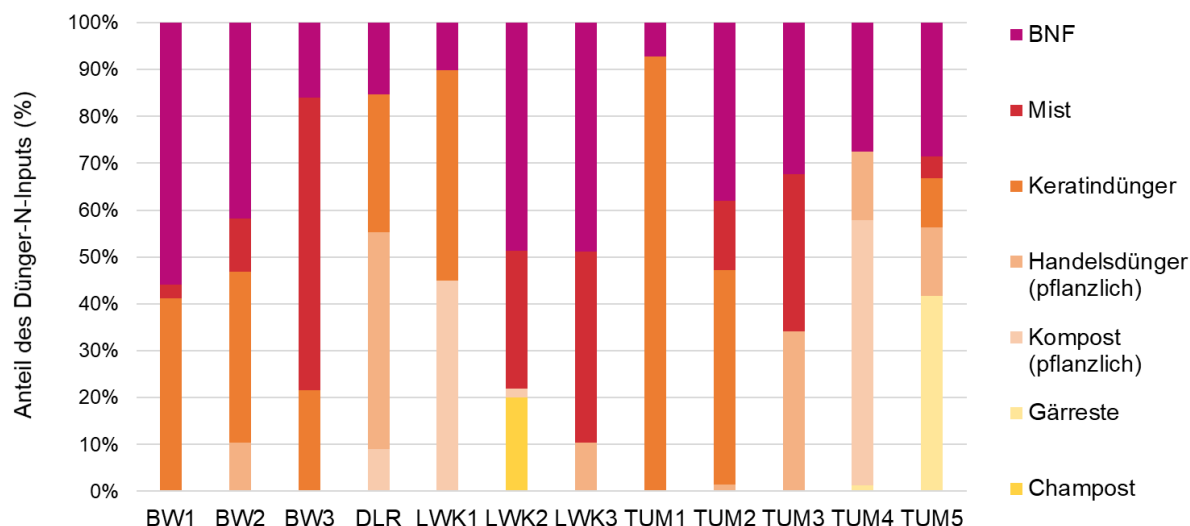


Abbildung 2.1-8: Anteile (%) des N-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.

Es bestand ein Zusammenhang zwischen dem P-Input durch Grunddünger und dem P-Saldo (Abbildung 2.1-4). 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.

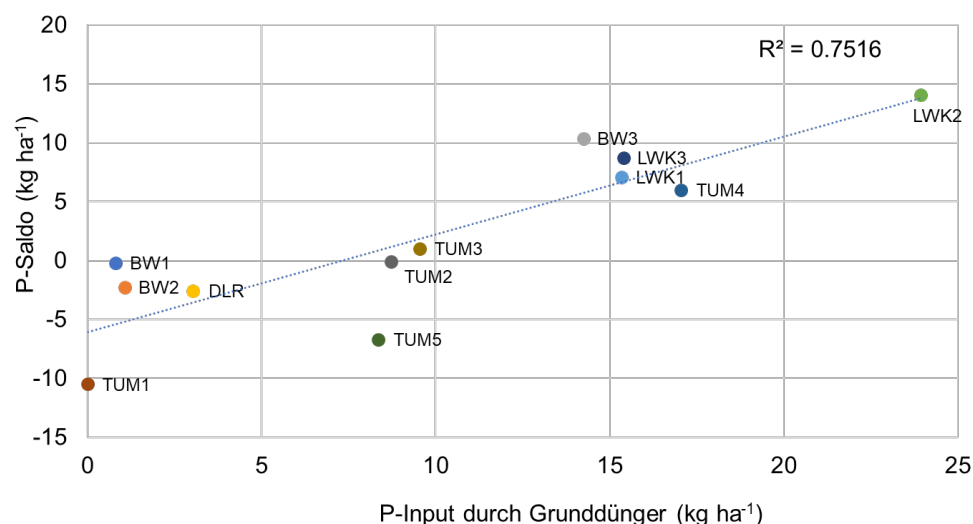


Abbildung 2.1-9: Zusammenhang zwischen P-Input durch Grunddünger (kg ha^{-1}) und P-Saldo (kg ha^{-1}).

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 2.1-5). In solchen Fällen dann die Ergebnisse der Bodenuntersuchung beachtet.

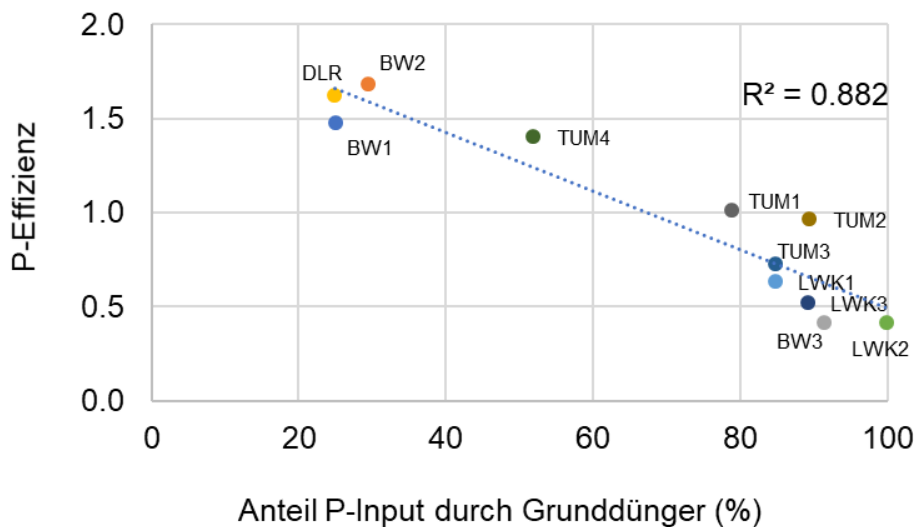


Abbildung 2.1-10: Zusammenhang zwischen P-Input durch Grunddünger (kg ha^{-1}) und P-Effizienz. Betrieb TUM1 nicht berücksichtigt, weil keine P-Düngung erfolgte.

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 2.1-6).

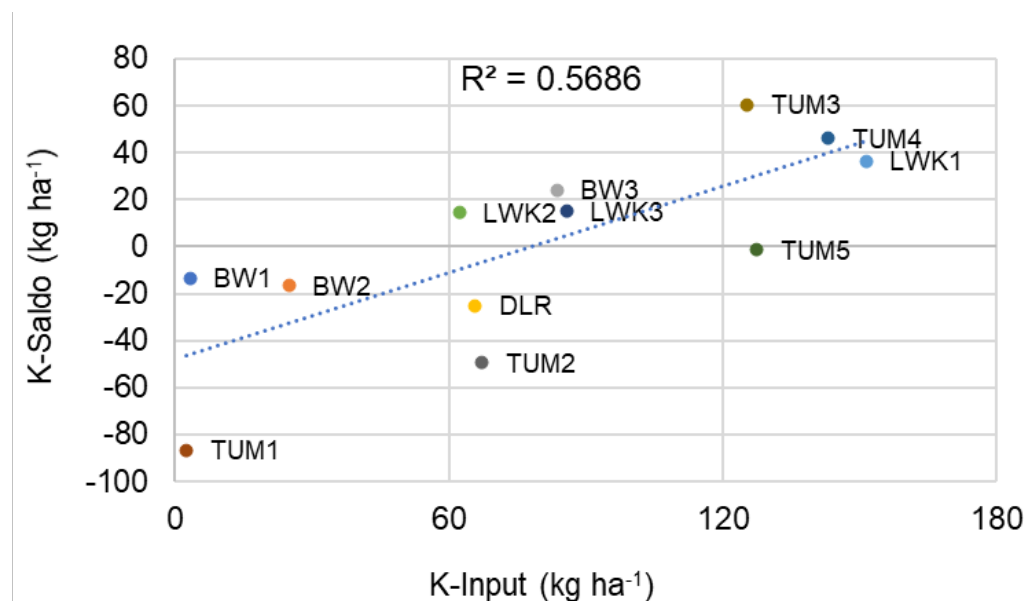


Abbildung 2.1-11: Zusammenhang zwischen K-Input (kg ha^{-1}) und K-Saldo (kg ha^{-1}).

Betriebe, die hier besonders herausstachen (Abbildung 2.1-6), zeichneten sich durch ein teilweise einseitiges K-Düngemanagement aus (Abbildung 2.1-7). 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 ($-1,6 \text{ kg ha}^{-1}$).

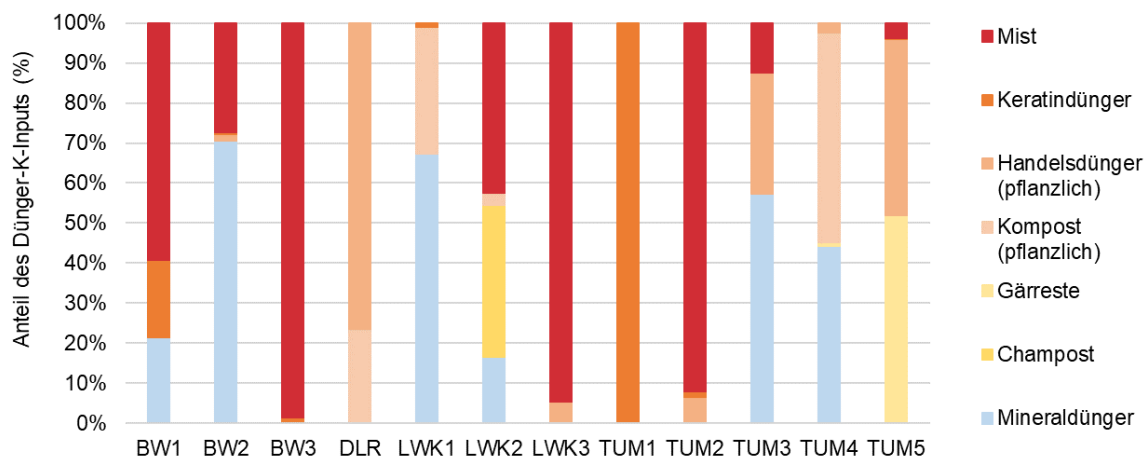


Abbildung 2.1-12: Anteile des K-Inputs verschiedener Düngemittel der Einzelbetriebe.

Die Nährstoffeffizienzen für N, P und K waren weitere Merkmale, das Düngemanagement der Betriebe zu beurteilen (Abbildung 2.1-8). 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 2.1-8) 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.

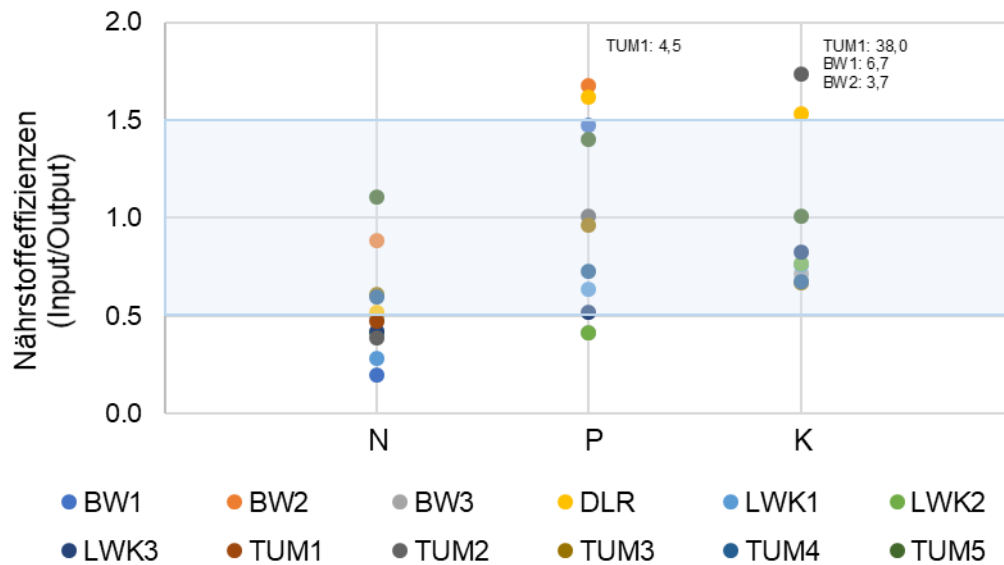


Abbildung 2.1-13: Nährstoffeffizienz der Nährstoffe in den verschiedenen Betrieben.

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

2.1.4.2 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 kg N ha⁻¹ bei einer Spanne von -23 kg N ha⁻¹ bis +137 kg N ha⁻¹. Die mittleren P-Bilanzen betrugen -5 kg P ha⁻¹, die Spanne reichte von -16 kg bis +26 kg P ha⁻¹. Die K-Bilanzen hatten einen Mittelwert von -14 kg K ha⁻¹ mit einer Spanne von -84 kg bis +134 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 Handelsdüngerabbildung 2.1-3). Eine ähnliche Beziehung berichten (Hülsbergen et al., 2022; Hülsbergen and Rahmann, 2015) von den Pilotbetriebe auf der Basis von mehrjährigen

Beobachtungen (Abbildung 2.1-9). 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.

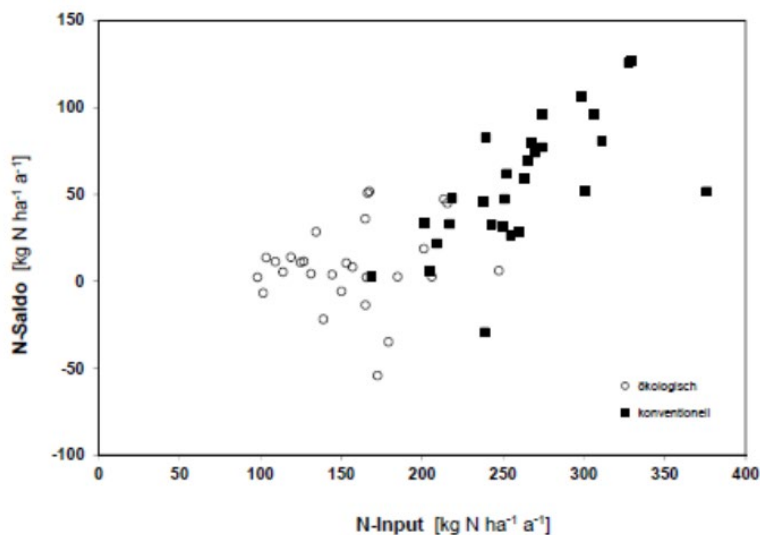


Abbildung 2.1-14: Beziehung zwischen N-Input und N-Saldo in ökologischen und konventionellen Pilotbetrieben (Hülsbergen et al., 2022; Hülsbergen und Rahmann, 2015)

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.

2.1.4.3 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 Festmist 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.

2.1.5 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., Dodhia, 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 (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/oekologisches-gemuese.html>)
- 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.
- 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,
- 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-Heinrich-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).
- Hortigate, 2022. Versuchsberichte <https://www.hortigate.de/versuchsberichte/gemuesebau/> (www.hortigate.de)
- 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 (<https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1212-gemuesejungpflanzen.pdf>),
- 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).
- Oekolandbau, 2022. Das Informationsportal. Hrsg: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (<https://www.oekolandbau.de/>)
- 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. (https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/rueckst_gew_obst_gem%C3%BCde_pdf.html)
- 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, (https://www.landwirtschaft.sachsen.de/umsetzungshinweise-dungeverordnung-20300.html?_cp=%7B%7D)
- 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>

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-basierten EDV-Programms die N-Überschüsse in Gewächshausssystemen 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 Mineralisierung 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 Düngemitelesinsatzes 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 Düngebedarfsermittlung 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) Stickstoffdüngbedarf 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 Betriebe 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	Bundes-land	Versuchs-ansteller	Jahr	Versuch-s 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)	
			2021	XXX	Kohl (Rosenkohl)	
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)	Nulldüngung in Treatments Betrieb und N-Expert
			2021	17	Kohl (Brokkoli)	
			2019	18	Salat (Blattsalate, rot)	
			2020	19	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2021	20	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2019	XXX	Möhren (Waschmöhre)	

Betriebs ID	Bundes-land	Versuchs-ansteller	Jahr	Versuchs ID *	Kultur	Kommentar
Betrieb_7	BW	UHOH	2019	XXX	Kohl (Blumenkohl)	Fehler in Berechnung der Düngeempfehlung
			2019	21	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2020	22	Salat (Blattsalate, grün)	
Betrieb_9	BW	LVG	2021	23	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2019	28	Salat (Blattsalate, grün)	
			2021	29	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			2020	XXX	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
Betrieb_10	BW	LVG	2021	XXX	Salat (Salate, verschiedene Arten)	
			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)	☐ pH (0-30 cm) ☐ Humus/C _{org} (0-30 cm) ☐ P (0-30 cm) ☐ K (0-30 cm) ☐ Mg (0-30 cm) ☐ N _{min} (0-30, 30-60, 60-90 cm) ☐ S _{min} (0-30, 30-60 cm)
T1.2 zwei, max. drei Wochen vor Düngung zur Pflanzung	☐ Salat N _{min} (0-30 cm) ☐ Kohl:N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T2 Ein bis zwei Wochen nach Pflanzung	☐ N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T3 Nur Kohl! 4-6 Wochen nach Pflanzung	☐ N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T4 Ernte	☐ N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T5 Vier Wochen nach Ernte	☐ N _{min} (0-30, 30-60 cm)
T6 Ende der Aktivität des Bodenlebens (Ende November)	☐ N _{min} (0-30, 30-60, 60-90 cm) ☐ 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:

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

* 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.

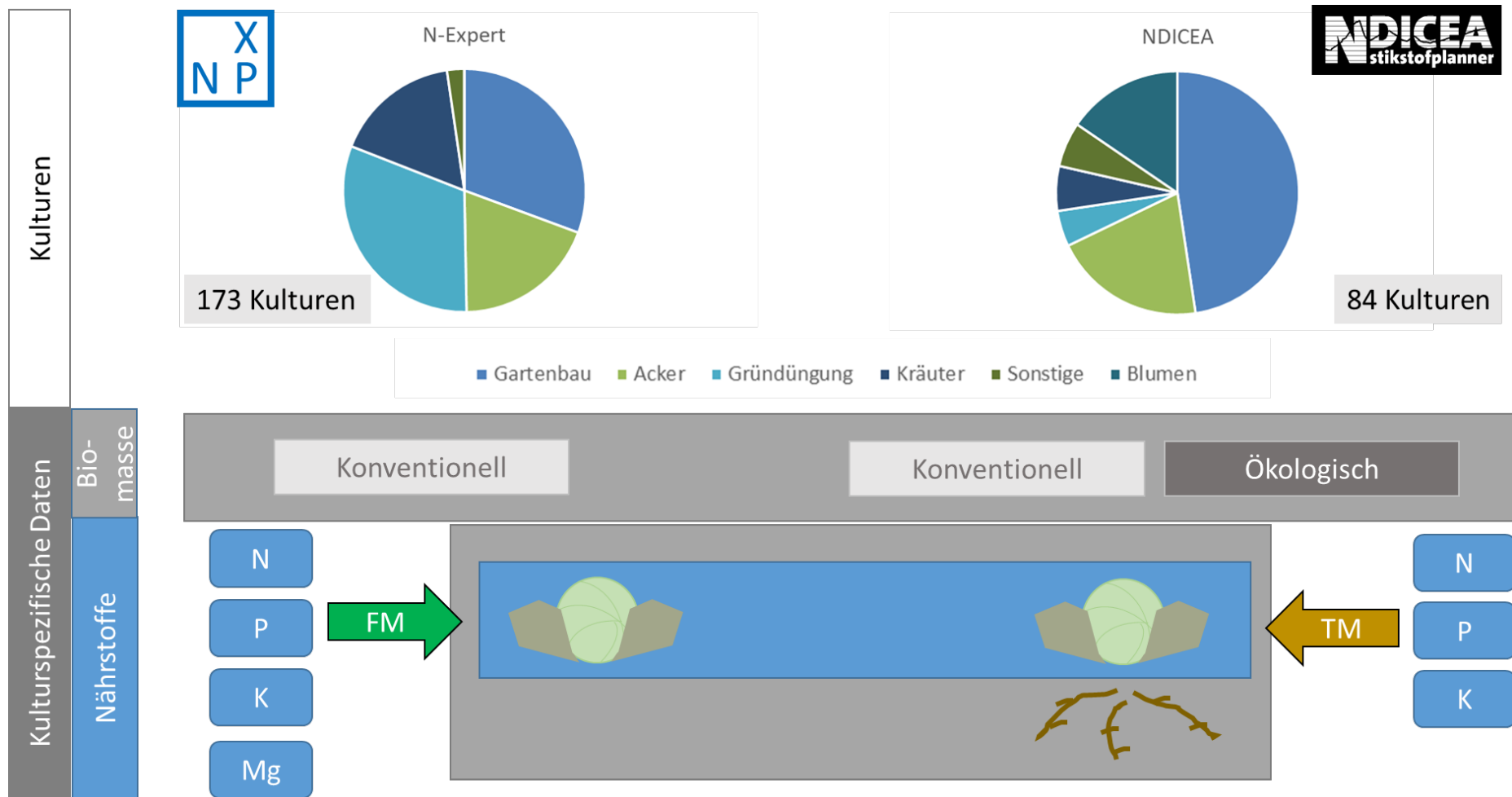


Abbildung 2.2-1: Schema des Aufbaus der kulturspezifischen Daten von N-Expert und NDICEA

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

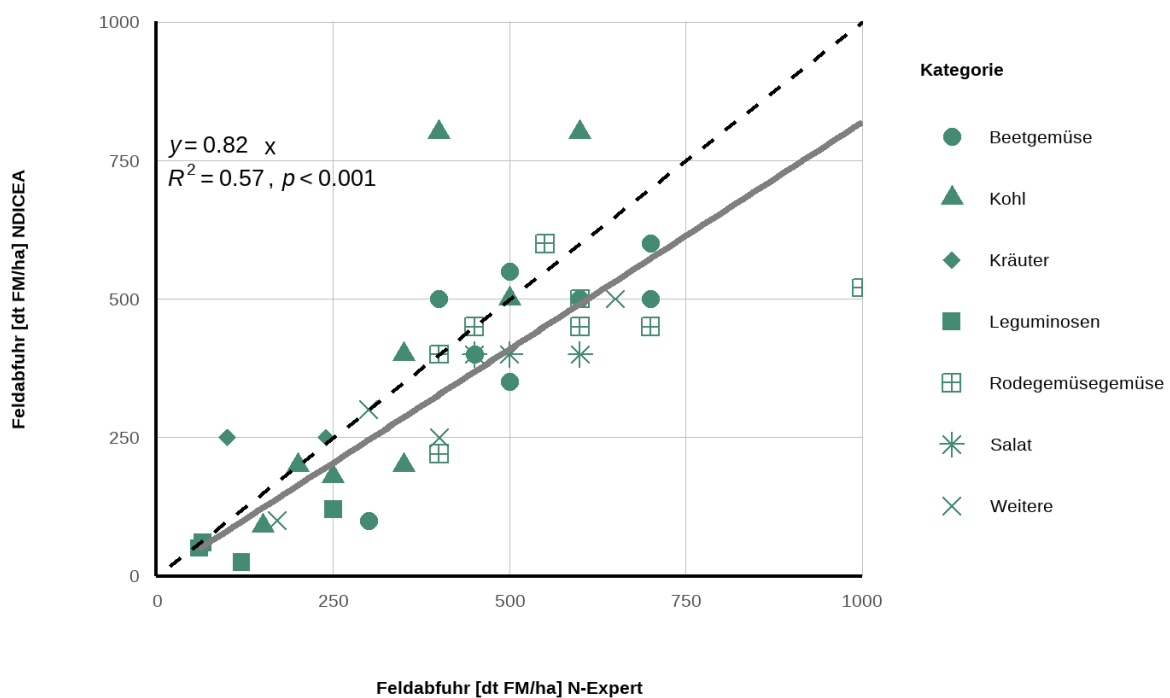


Abbildung 2.2-2: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA (n = 47)

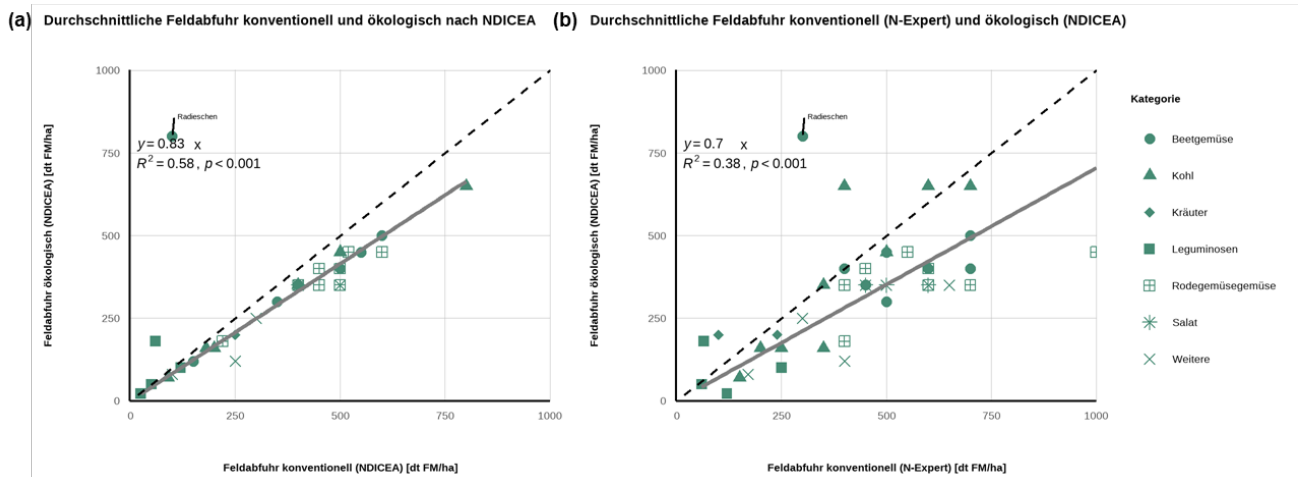
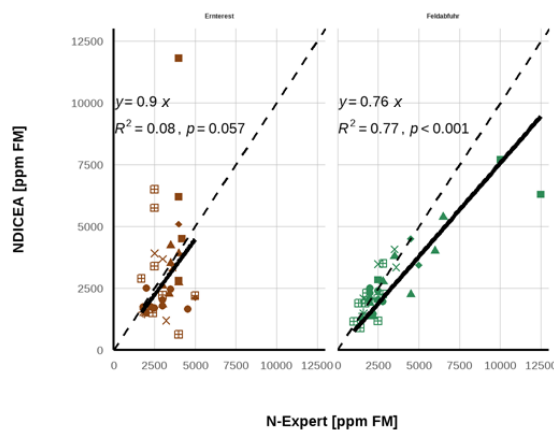


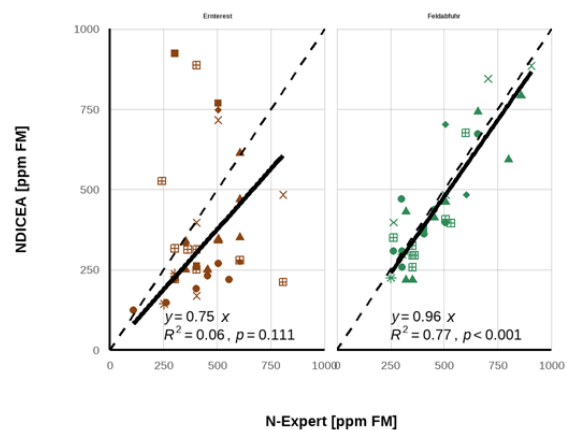
Abbildung 2.2-3: Korrelation der durchschnittlichen Feldabfuhr identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA mit den durchschnittlichen Angaben zur ökologischen Feldabfuhr in NDICEA (n = 47)

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 betrugen 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

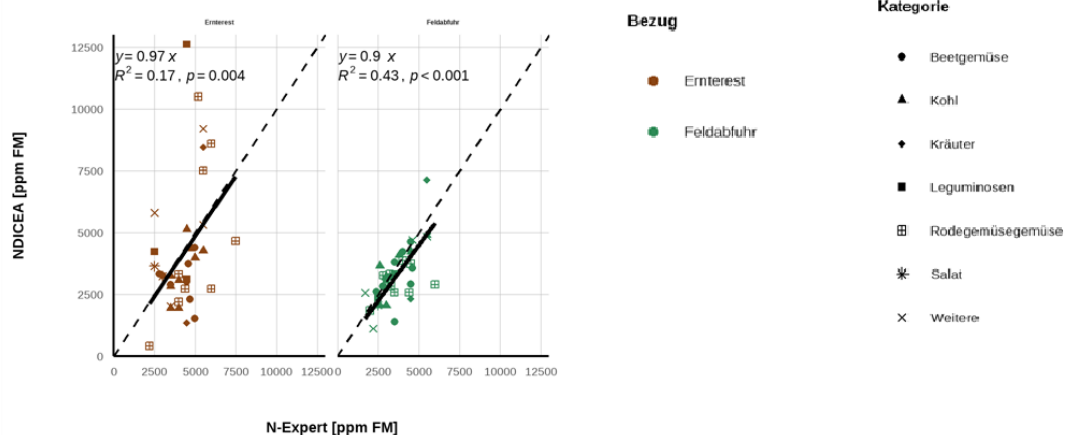


Abbildung 2.2-4: Korrelation der Nährstoffkonzentrationen (N, P, K) identischer Kulturen in N-Expert und NDICEA (n = 47)

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). Für beide Kohllarten 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					
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) 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 2.2-5 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	• Implementierung neuer Gemüsekulturen • Datenbankaktualisierung (Beispielbetrieb) • Fehlerbehebungen
20.04.2021	4.5.3	• Aktualisierung der Wetterdaten • Implementierung von Überwinterungskulturen • Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit • Fehlerbehebungen
07.01.2022	4.5.4	• 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 Standarterträge von Zwischenfrüchten • Fehlerbehebungen
20.09.2022	4.6.0	• Überarbeitung des Algorithmus zur P-, K-, Mg-Düngeempfehlung • Nährstoffeinsatz nach DüV 2020, entfall des Nährstoffvergleichs
12.2022	4.7.0	• 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.

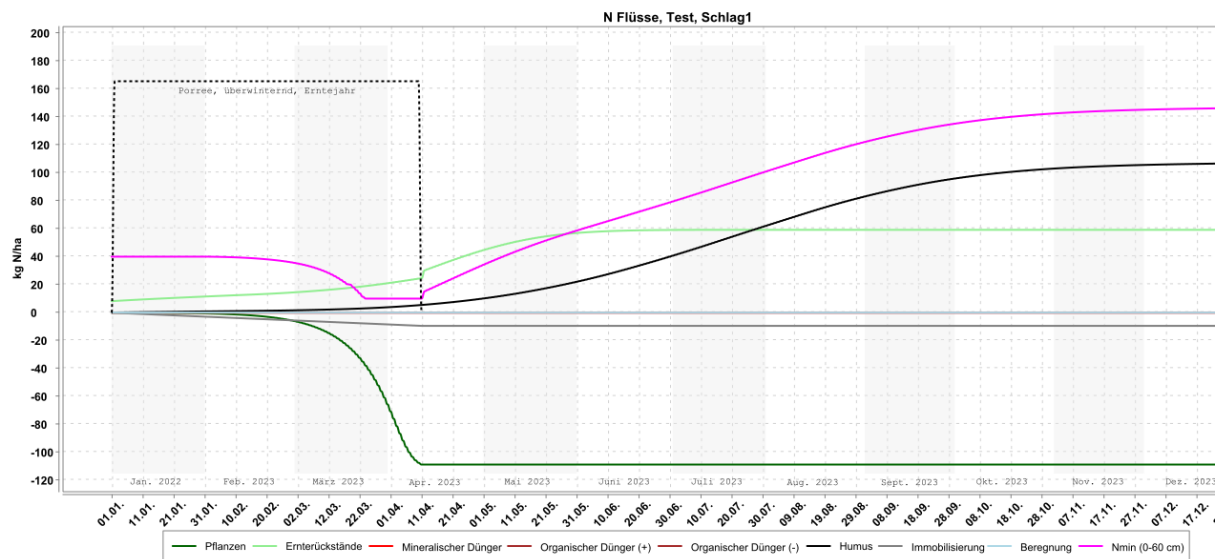


Abbildung 2.2-5: N-Aufnahme von Wintergemüse in N-Expert 4.5.4

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.

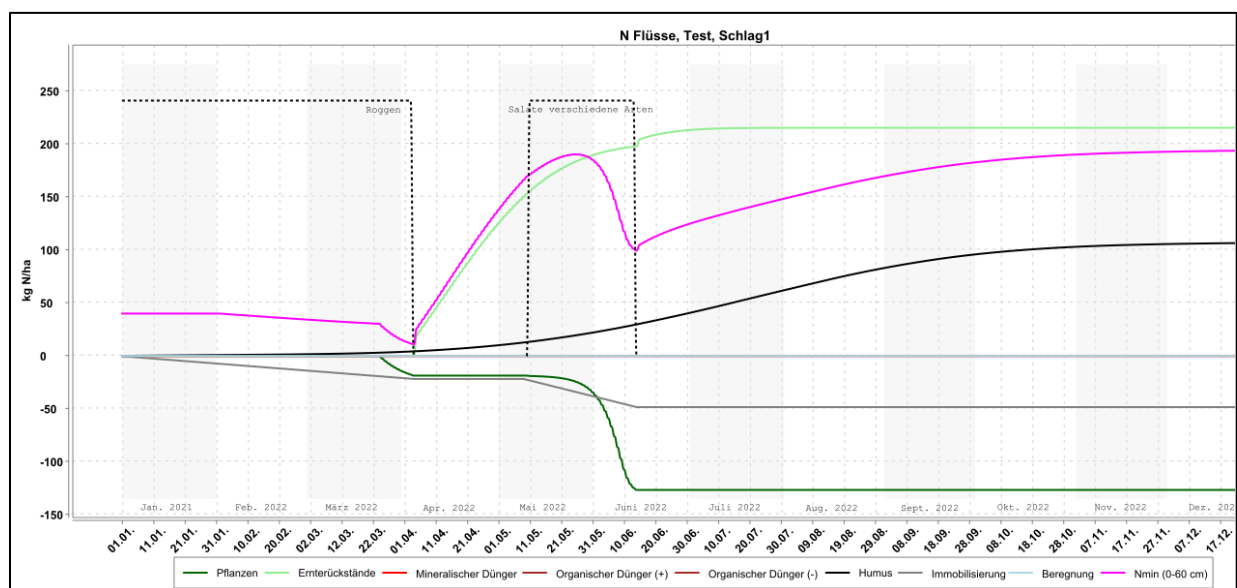


Abbildung 2.2-6: N-Aufnahme von Winterkulturen in N-Expert 4.5.4

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.

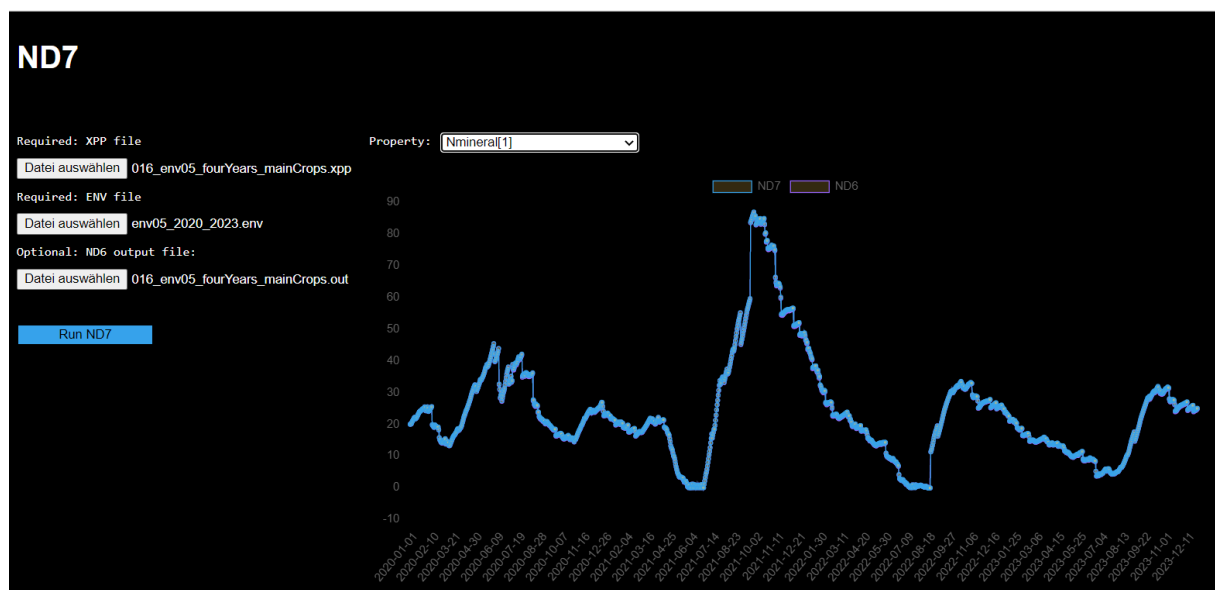


Abbildung 2.2-7: Nutzeroberfläche und Test Schnittstelle zur Überprüfung des neuen Rechenkerns. Die beiden Zeitlichen N_{min} Verläufe für NDICEA 6 (pink) und NDICEA 7 (blau) liegen genau übereinander.

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).

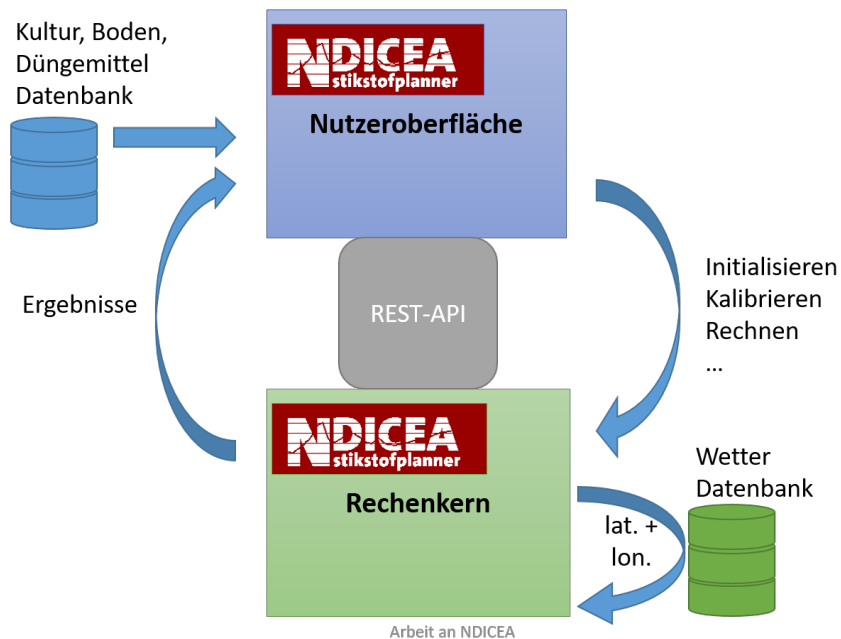


Abbildung 2.2-8: Softwarearchitektur der NDICEA 7 Webanwendung

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.

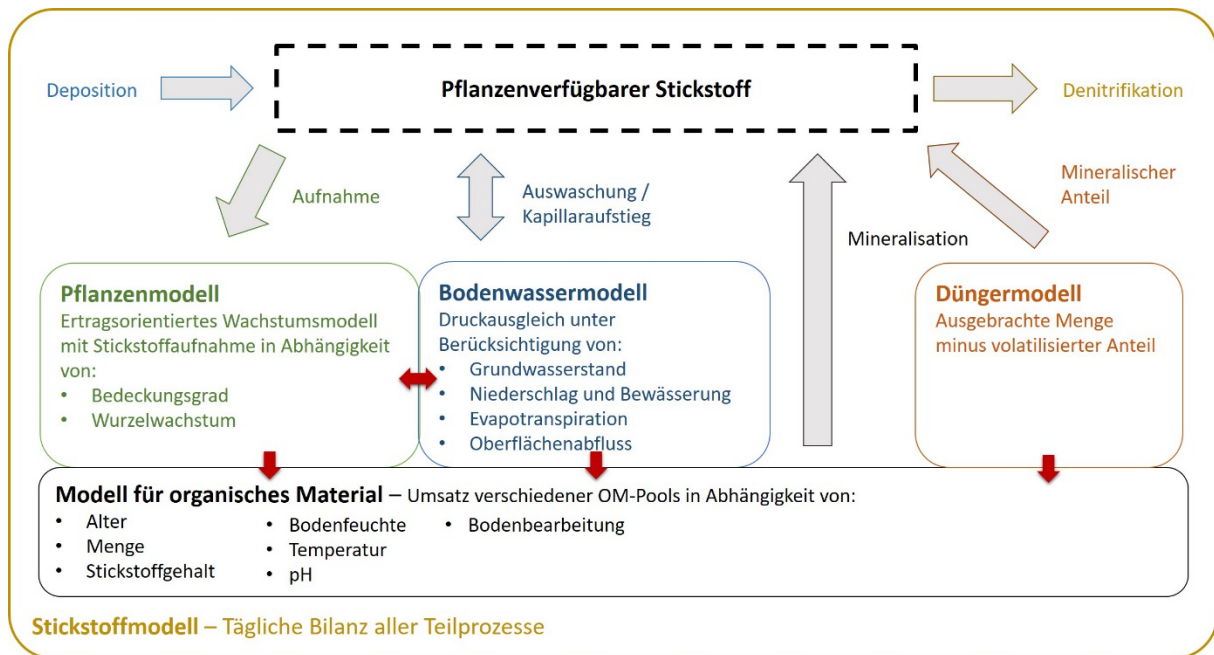


Abbildung 2.2-9: Übersicht über die modulare Struktur des Rechenkerns

```

528     def N_fix(self, day, crop_idx):
529         """
530         Corresponds to NFixi
531
532         Depends: N_fix_potential N_mineral
533         """
534         # 1. 1595 {mineral N in TopSoil above NFix0 reduces intended fixation}
535         # 1. 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
543         else:
544             return NFixi

```

Methoden Name und Argumente

Methoden Dokumentation

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

Zwischenergebnisse anderer Methoden

Berechnung und Methoden Ausgabe

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.

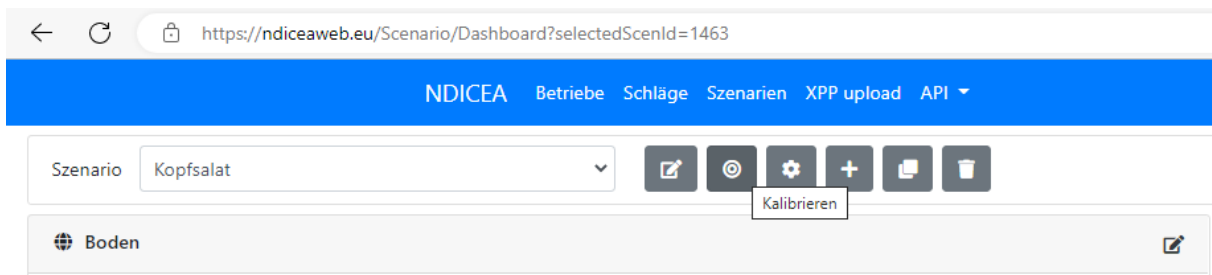
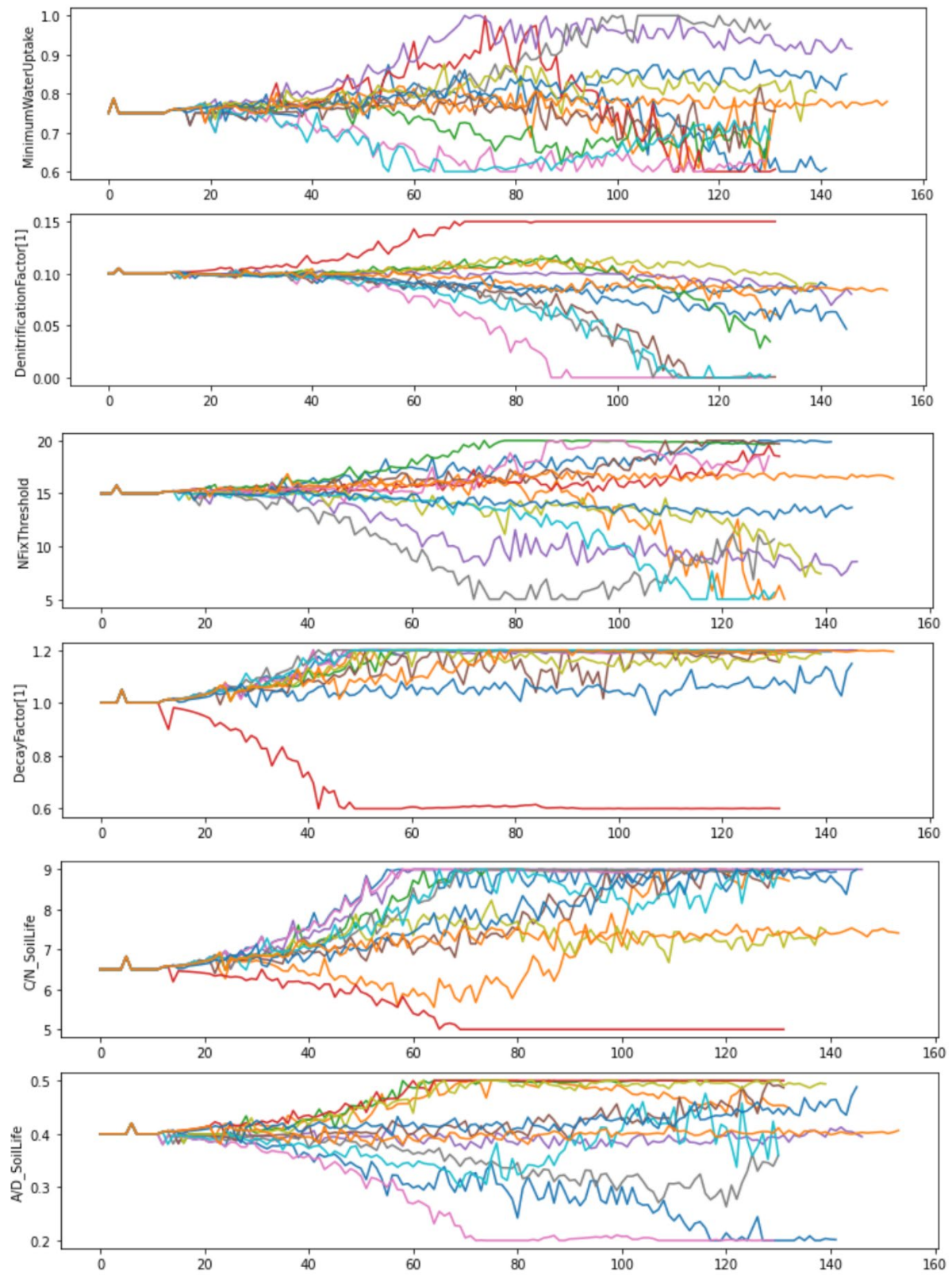


Abbildung 2.2-11: Kalibrierungsbutton NDICEA 7

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.



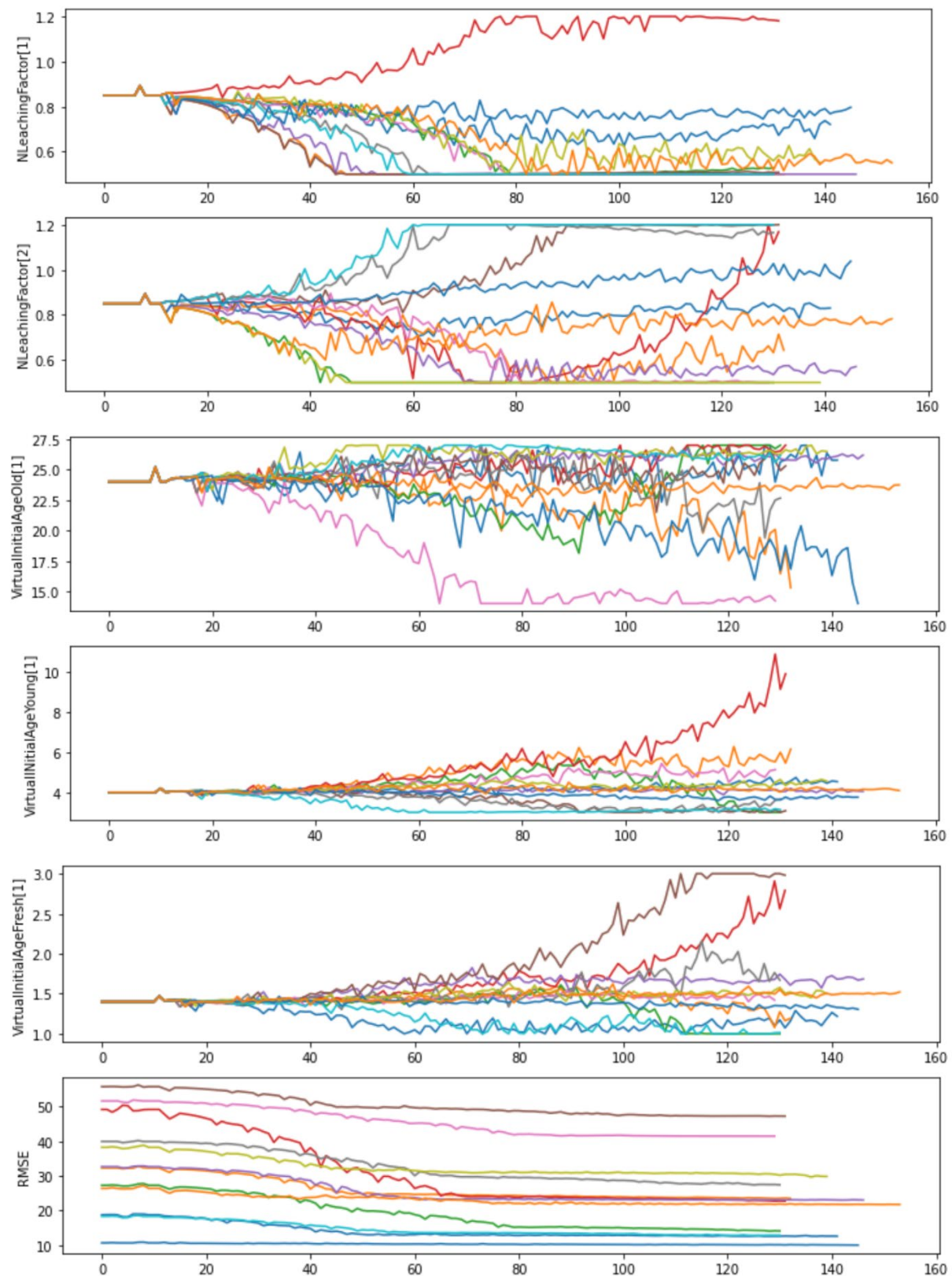


Abbildung 2.2-12: Verlauf der Parameterwerte (Y-Achse) für jede Iteration (X-Achse) eines Kalibrierungslaufes für zwölf unterschiedliche Szenarien mit ihrer dazugehörigen Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE)

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).

The screenshot shows the 'Boden' (Soil) configuration window. It includes a green header 'Boden bearbeiten' and a list of soil parameters with input fields and units. A dropdown menu for 'Bodenbearbeitung' is set to 'Herkömmliche Bodenbearbeitung'. Below the parameters are buttons for 'Speichern' (Save) and 'Ausführlich' (Detailed). The 'Ausführlich' button is highlighted. Below this are two sections for soil properties: 'Eigenschaften Ackerkrume' and 'Eigenschaften Unterboden', each with a dropdown menu set to 'Lehmiger Schluff' and an 'Ausführlich' button. At the bottom right is a 'Schließen' (Close) button.

Abbildung 2.2-13: Erste Ansicht des Boden-Menüs

Boden

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 Düngeplanung 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.

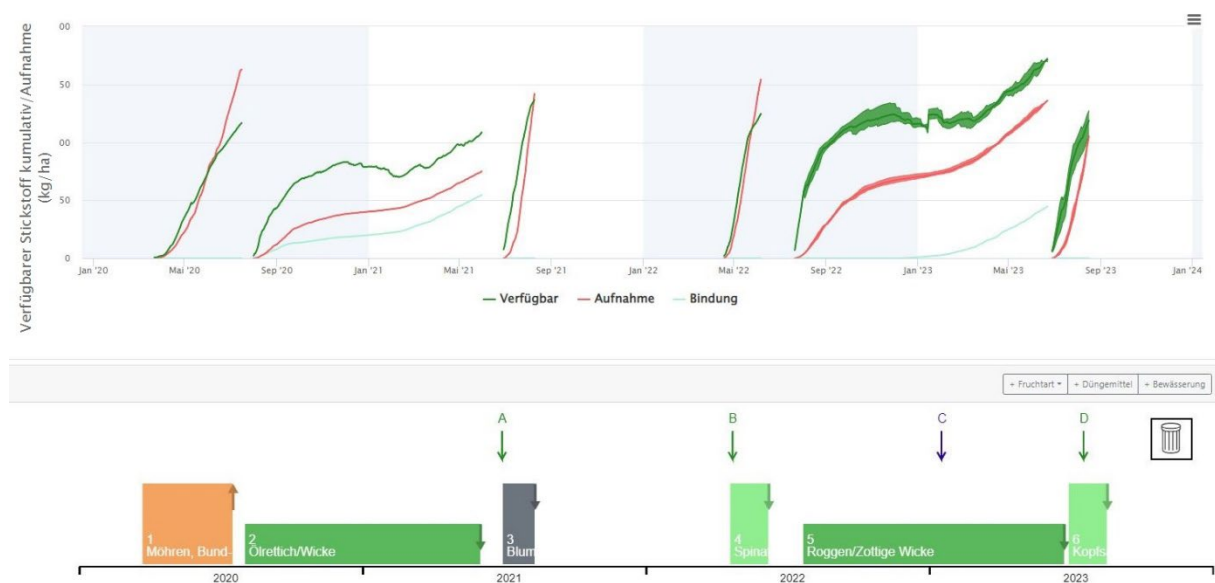


Abbildung 2.2-16: Kumulative Stickstoffverfügbarkeit & Pflanzenaufnahme in einer Fruchtfolge. Berechnungen in der Zukunft erfolgen über Nutzung von Wetterdaten aus vier Vorjahren, für die jeweils ein Szenario gerechnet wird. Dargestellt werden Minimum, Maximum und der Mittelwert.

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).

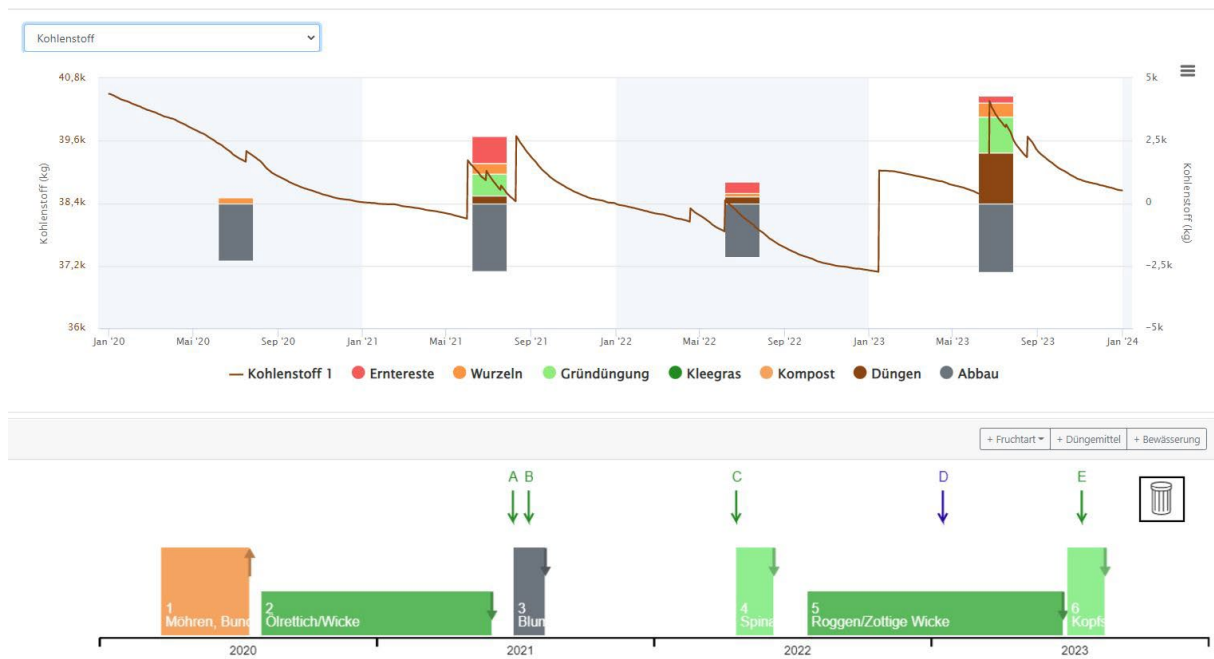


Abbildung 2.2-17: Verlauf der Kohlenstoffmenge im Oberboden und jährliche Bilanzen als Balkendiagramme des Abbaus und Eintrags von organischer Substanz

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 $\text{RMSE} < 20 \text{ kg ha}^{-1}$ ($\sim$ 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.

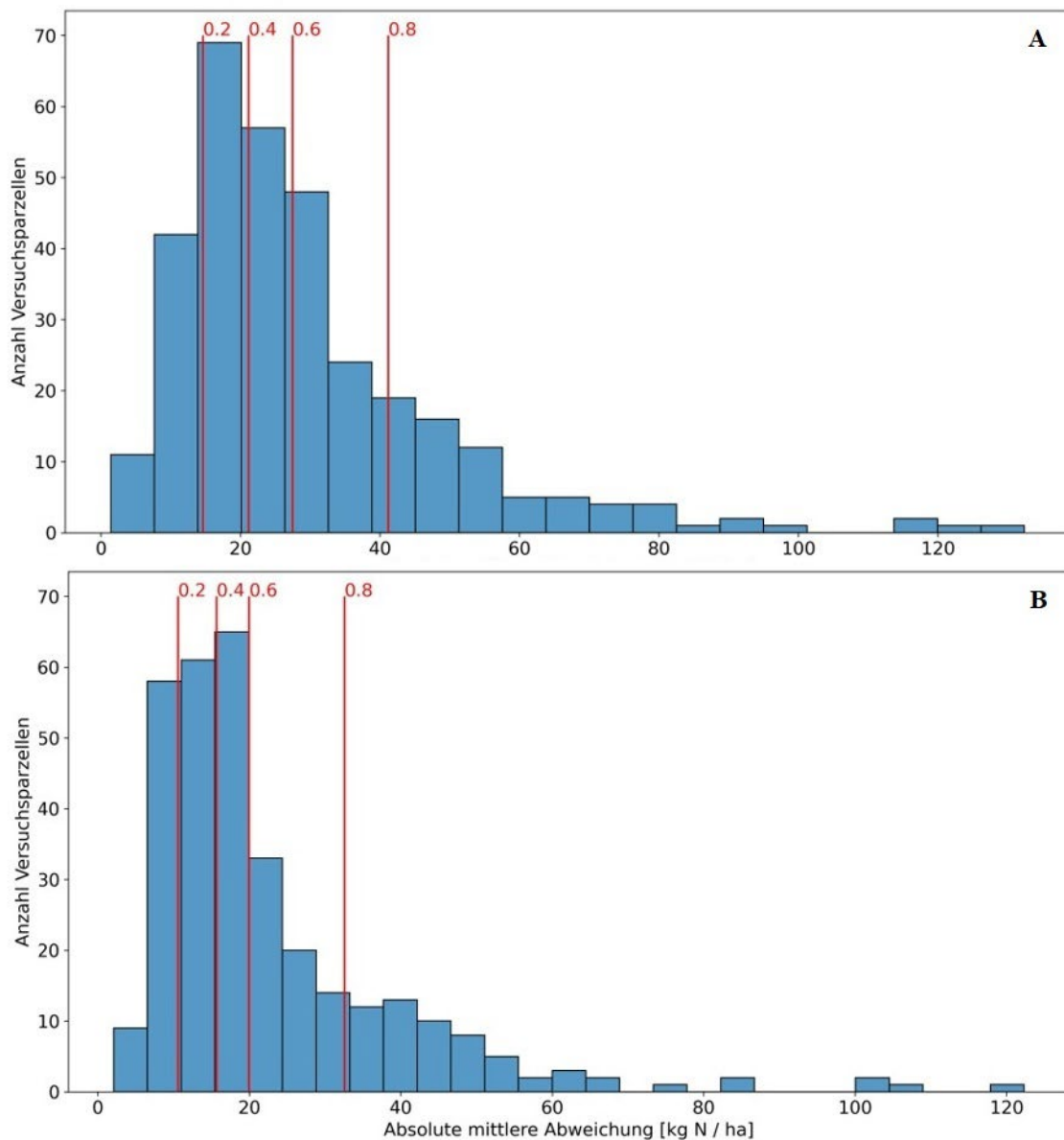


Abbildung 2.2-18: Verteilung der mittleren absoluten Abweichung (RMSE) gemessenem zu mineralischem mineralischen Stickstoff. A vor schlagweise Kalibrierung, B nach Kalibrierung

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 beiden Ansätzen 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 2.2-7).

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.

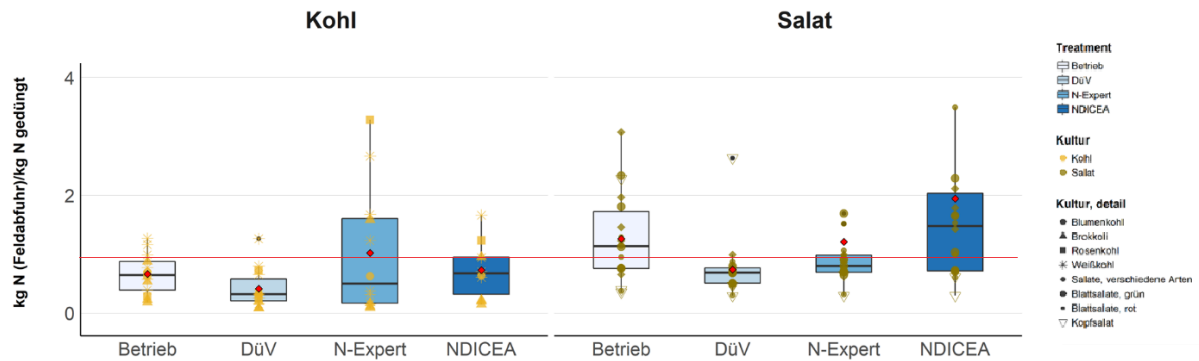


Abbildung 2.2-19: N-Effizienz der Praxisversuche

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.

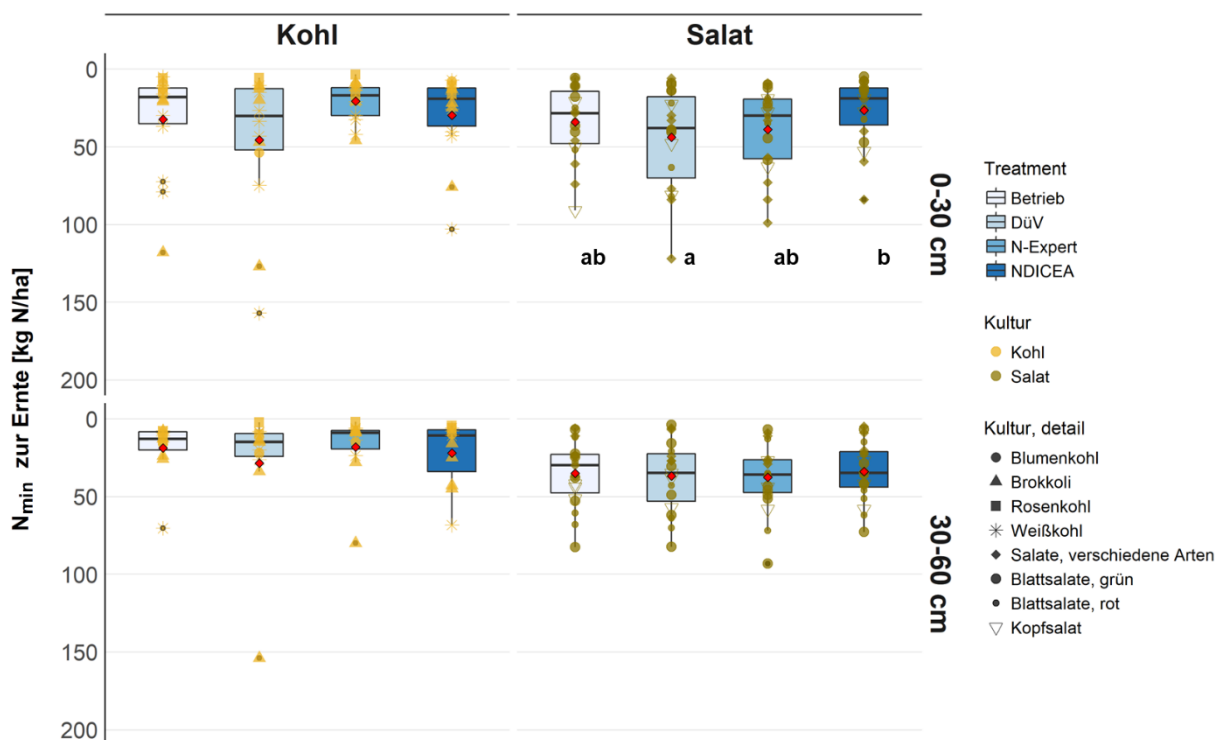


Abbildung 2.2-20: Ergebnisse der Praxisversuche ($N_{\min}$ -N [kg ha^{-1}] im Boden zur Ernte in 0-30 und 30-60 cm Tiefe)

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 2.2-7). In zwei (N-Expert) bzw. drei (DüV) Brokkoli-Versuchen führte die angenommene geringere Verfügbarkeit von gedüngtem N_i 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 Düngemitelesatzes 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 Schlages 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 Düngemanagements 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., Olfs, H.W., 2019: Diagnose des Ernährungszustands von Kulturpflanzen. Agrimedia.

2.3 Evaluierung der Akzeptanz von EDV-gestützten Systemen in Praxis und Beratung

C.S. Weiler, S. Zikeli, (UHOH), H.J. Reents (TUM)

2.3.1 Einleitung

Der kommerzielle Gemüseanbau erfordert ein hohes Maß an Planung auf unterschiedlichen Betriebsebenen, um ökonomisch erfolgreich zu sein. Im Gegensatz zum Feldgemüsebau ist der gärtnerische Anbau durch die oft kurzen Standzeiten der Kulturen, die viele verschiedene Anbausätze im Jahresverlauf bedingen und kleinere Flächeneinheiten (Beete statt Ackerflächen) gekennzeichnet. Basierend auf den benötigten Erntemengen müssen daher Anbauabfolgen festgelegt, Pflanztermine bestimmt und Kulturen auf die Beete verteilt werden. Dabei sollten die Beete während der gesamten Vegetationsperiode möglichst effizient genutzt werden, ohne dabei die Prinzipien der Fruchtfolgegestaltung zu vernachlässigen. Besonders die Düngung stellt in intensiven Anbausystemen wie dem Gemüsebau eine komplexe Herausforderung dar (Thompson et al., 2018). Viele Gemüsearten zeichnen sich durch eine kurze Kulturzeit sowie einen hohen Stickstoff (N)- und Kaliumbedarf (K) aus. Eine unzureichende Düngung kann zu Qualitätsminderungen oder zu nicht vermarktungsfähigen Produkten führen und stellt somit ein ökonomisches Risiko dar. Daher ist es in der Praxis üblich, hohe Sicherheitszuschläge in der Düngung einzuplanen – eine Strategie, die jedoch zur Auswaschung von überschüssigem Stickstoff und damit zu negativen Umweltauswirkungen führen kann (Kahle et al., 2019).

Noch herausfordernder gestaltet sich die Düngung im ökologischen Gemüsebau. Dort kommen vor allem organische Multinährstoffdünger zum Einsatz, deren Nährstofffreisetzung schwer vorhersehbar ist und deren Zusammensetzung nicht immer den spezifischen Anforderungen der Kulturen entspricht (Möller und Schultheiß, 2014; Morvan und Nicolardot, 2009). Die hohe Komplexität des Gemüseanbaus – insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen der Anbauverbände sowie auf die potenziellen negativen Umweltfolgen – verdeutlicht das große Potenzial von Betriebsmanagement- und Düngungsplanungssoftware. Solche Programme können dazu beitragen, die ökonomische Effizienz zu steigern, Anbaufehler zu minimieren und Nährstoffüberschüsse oder -defizite zu vermeiden (Lindemann-Zutz et al., 2021; Viziteu et al., 2022).

Farm-Management-Tools sind in Ackerbau- und Tierhaltungsbetrieben bereits weit verbreitet, zudem zeigt sich eine deutlich höhere Digitalisierungsrate bei großen Betrieben im Vergleich zu kleineren. So belegt eine Studie von Gscheidle et al. (2022), dass satellitengestützte Lenksysteme auf 81 % der Betriebe mit mehr als 1.000 ha Fläche genutzt werden, während ihr Einsatz auf Höfen unter 50 ha nur bei 11 % liegt. Gründe hierfür sind unter anderem das geringere Investitionsrisiko auf großen Betrieben sowie technologische Skaleneffekte (Gabriel und Gandorfer, 2023; Pfaff et al., 2022). Hinsichtlich des Digitalisierungsstands im Gemüsebau – insbesondere von ökologisch wirtschaftenden Betrieben – gibt es bislang nur wenige Informationen (Gabriel und Gandorfer, 2023). In einer Studie von Kernecker et al. (2020) bewerteten Gemüseanbauer das Potenzial digitaler Tools zur Reduktion von

Umweltauswirkungen und zur Einkommenssteigerung geringer als Vertreter anderer Betriebsformen. Als nützlichstes digitales Hilfsmittel nannten sie autonome Maschinen, während Farmmanagement- und Informationssysteme als am wenigsten relevant eingestuft wurden.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, a) einen Überblick über aktuell verfügbare EDV-Tools zur Dünge- und Nährstoffplanung im ökologischen Gemüsebau zu geben und deren Funktionen, Kosten sowie vorhandene Schnittstellen für Datenimport und -export miteinander zu vergleichen, b) deren Einsatz in der Praxis sowie die Gründe für die Nicht-Nutzung von EDV-Tools zum Düngemanagement zu analysieren um c) Handlungsempfehlungen für eine breitere Akzeptanz solcher Tools zu entwickeln. Dazu wurden ausgewählte Programme beispielhaft analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für den ökologischen Gemüsebau bewertet. In einem nächsten Schritt wurde im Rahmen einer quantitativen Umfrage unter ökologisch wirtschaftenden Gärtner*Innen und Landwirt*Innen die Nutzung verschiedener Software-Tools sowie die Hinderungsgründe für deren Einsatz analysiert. Ergänzend wurde durch qualitative Interviews mit Gärtner*Innen, Landwirt*Innen und Expert*Innen ermittelt, welche Gründe zur Nutzung oder Nicht-Nutzung digitaler Lösungen im Bereich der Düngplanung führen. Darüber hinaus wurden weitere qualitative Interviews mit Betriebsleiter*Innen und Gärtner*Innen von ökologisch wirtschaftenden Gartenbaubetrieben mit solidarischer Landwirtschaft (SoLaWi) durchgeführt um deren Düngestrategien sowie den Einsatz von EDV-Tools zu ermitteln. Gärtnerische SoLaWis sind durch den Anbau einer großen Anzahl unterschiedlicher Kulturen charakterisiert. Auf einem dieser Betriebe wurden daher die EDV-Tools NDICEA und N-Expert in der Praxis für die Düngplanung getestet um deren Eignung sehr diverse ökologisch wirtschaftende Betriebe zu prüfen.

2.3.2 Überblick über die im Gemüsebau zur Düngung und Anbauplanung/ Kulturführung verfügbarer Software

Um einen ersten Überblick über verfügbare Programme zur Anbau- und Düngplanung zu erhalten, wurden verschiedene Google-Suchen mit Schlagworten wie z.B. „Anbauplaner Gemüsebau“, „Software Düngplanung“, „Software Düngung“ durchgeführt. Einen Überblick über die für die Landwirt*Innen und Gärtner*Innen zur Verfügung stehenden Tools ist in Tabelle 2.3-1 zu finden. Die Tabelle stellt jedoch keinen vollständigen Überblick dar. Eine Düngbedarfsermittlung (DBE) und Dokumentation der Düngung der Düngung wird auch über die Düngportale der Bundesländer angeboten. Diese Angebote sind in der Regel (nach der Registrierung) kostenlos, allerdings gibt es Ausnahmen: Eine vollständige Nutzung aller Module des Düngplanungsprogramms aus Schleswig-Holstein ist beispielsweise kostenpflichtig. Zwischen den Bundesländern gibt es Unterschiede in den Anwendungen. Tools wie z.B. „ENNI“ (Niedersachsen), „BESyd“ (Sachsen), „Düngportal NRW“ (Nordrhein-Westfalen), „DüngungBW“ (Baden-Württemberg) und „ENDO-SH“ (Schleswig-Holstein) sind webbasierte Onlineanwendungen, während die Tools Hilfsmittel „Düngung LLH“ (Hessen) oder „DBE Gemüse Rheinland-Pfalz“-Excel basierte Anwendungen darstellen. Von Firmen entwickelte Tools sind in den meisten Fällen Ackerschlagkarteien in denen Düngplanung und – dokumentation integriert wurden. Diese Tools sind kostenpflichtig und Abonnements

beginnen je nach Softwarelösung ab ca. 25 Euro pro Monat. Weiterhin bieten viele Tools Schnittstellen für den Datenimport und –export an, wodurch Doppeleingaben vermieden werden können. Speziell für den ökologischen Landbau angebotene Tools sind MyFarm24 (Bio), NDICEA und N-Expert.

Zusätzlich wurde die Webseite der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (www.branchensoftware.gartenbausoftware.de) gesichtet. Dort können Gartenbaubetriebe nach speziellen Softwarelösungen suchen. Von den auf dieser Webseite aufgeführten Programmen befassen sich nur zwei mit der Düngung im Gemüsebau, wohingegen dort 23 Programme in die Kategorie Kulturführung und Anbauplanung im Gemüsebau fallen. Von diesen Programmen ermöglichen der Gemüse-Anbauplaner von Rukola Soft, der PC-Gärtner der PC-Gärtner GmbH und MyFarm24 von HELM-Software eine Anbauplanung für den Gemüsebau. Das im Projekt weiterentwickelte Tool N-Expert wurde auf der Webseite gelistet, im Gegensatz zu NDICEA, welches dort nicht aufgelistet wurde.

Eine Übersicht der Programme mit einer kurzen Funktionsbeschreibungen ist in Tabelle 2.3-1, Tabelle 2.3-2 und Tabelle 2.3-3 zu finden.

Tabelle 2.3–1: Tools für die Düngeplanung und Dokumentation inklusive Funktion und Kosten.

Software	Anbieter	Funktion	Datenimport/-export möglich?	Preis	Für ökologischen Landbau validiert?	Für Gemüsebau validiert?
Berechnung N-Düngung, N-Dynamik, Nährstoffmanagement						
N-Expert	IGZ	Düngeberatung und Nährstoffbilanzen für den Freilandgemüseanbau (inklusive DBE für Gemüse und Nährstoffbilanzen nach DüV)	Nein	Kostenlos	Ja	Ja
NDICEA	Louis Bolk Institut	Stickstoff- & Kohlenstoffplaner (Nährstoffmanagement, Stickstoffdynamik, Fruchtfolge-Management)	Nein	Kostenlos	Ja	Ja
Ackerschlagkartei um Nährstoffmanagement erweitert						
DELOS	OVIS IT GmbH	Ackerschlagkartei, DBE, Stoffstrombilanz, Berichte nach DüV 2020, Nährstoffmanagement & Weitere Schnittstellen und Automatisierung, Verfügbar für Nutzer der Schlagkartei 365FarmNet	Ja (ENNI- & BESyD-Exportfunktion inkl. Check)	Auf Anfrage	Unbekannt	Unbekannt
näon	Landberatung Niedersachsen GmbH	Ackerschlagkartei, Düngeplanung, Stoffstrombilanz, Hoftorbilanz, usw.	Ja (Import von Enni, ANDI-Datei oder andere csv.-Dateien)	Ab 115€	Unbekannt	Unbekannt
Plantivo Ackerschlagkartei	Plantivo GmbH	Ackerschlagkartei, DBE, Dünge-dokumentation, Stoffstrombilanz, usw.	Ja (Import aus dem Agrarantrag, vom Bodenprobenlabor, einer anderen Schlagkartei etc.)	Auf Anfrage	Unbekannt	Unbekannt
ProFlura	ASSW GmbH & Co. KG	Ackerschlagkartei, Dünge-dokumentation, Smartphone-App	Nein	Ab 388 € (Anschaffung) + ab 99 € pro Jahr	Unbekannt	Ja
Next farming	AGCO GmbH	Anbauplanung, DBE, Stoffstrombilanz, mobile App, Ackerschlagkartei	Ja (Export zu gesetzlich definierten Schnittstellen der Bundesländer wie ENNI, ENDO, BESyD und Meldedatei Sachsen-Anhalt)	Auf Anfrage	Unbekannt	Unbekannt
MyFarm24Bio	Helm 24	Ackerschlagkartei, Düngeplanung, Dünge-dokumentation	Nein	Ab 170 €	Ja	Unbekannt
topfarmplan	LV digital GmbH	u.a. Ackerschlagkartei mit Düngung Pflanzenschutz und Erntedokumentation (auch per App), DBE	Ja (Datenimport von Flächendaten)	ab 24,95€ pro Monat	Unbekannt	Unbekannt

Tabelle 2.3–2: Tools für die Düngeplanung und Dokumentation inklusive Funktion und Kosten, Fortsetzung.

Software	Anbieter	Funktion	Datenimport/-export möglich?	Preis	Für ökologischen Landbau validiert?	Für Gemüsebau validiert?
Berechnung DBE, Düngeplanung						
Düngung BW	MLR BW	DBE, Teilnahme am Nitratinformationsdienst (NID), Stoffstrombilanzen	Ja (Webservice-Schnittstelle (auf Anfrage))	Kostenlos	Unbekannt	ja
DBE Gemüse Rheinlandpflanz	DLR Rheinland-Pfalz	DBE, Düngedokumentation, usw.	Nein	Kostenlos	Unbekannt	Ja
BESyD	LfULG Sachsen	Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung, Webversion WebBESyD	Ja (Datenimport/-export aus/in Drittprogrammen)	Kostenlos	Ja	Unbekannt
Düngeportal NRW	LWK NRW	DBE, Düngeoptimierung, Düngedokumentation, usw.	Ja (Import aus InVeKoS-Datenbank)	Kostenlos	Unbekannt	Unbekannt
ENNI		DBE, Düngedokumentation, Nährstoffvergleich, usw.	Ja (Datenimport/-export aus/in Drittprogrammen)	Kostenlos	Unbekannt	Ja für Gartenbau
Hilfsmittel Düngung LLH	LLH	DBE, Stoffstrombilanz, Düngedokumentation	Nein	Kostenlos	Unbekannt	Unbekannt
Düngeplanungsprogramm SH	LWK SH	DBE, Düngeplanung, Düngedokumentation	Nein	Vollständige Nutzung aller Programmmodule kostenpflichtig	Unbekannt	Ja
ENDO-SH	MLLEV SH	DBE, Düngedokumentation	Ja (Dateinbereitstellung bzw. Datenimport auf Meldeprogram Wirtschaftsdünger und InVeKoS; Datenimport aus Drittprogrammen (Gesamt oder Teilimport))	Kostenlos	Unbekannt	Unbekannt
Wetterauer Agrar Service	MR Wetterau	DBE.Düngedokumentation, Stoffstrombilanzen	Keine Angabe	Für Mitglieder des Maschinen- und Betriebshilfsring Wetterau und Umgebung e.V.	Unbekannt	Unbekannt

Tabelle 2.3–3: Überblick über die auf der Webseite www.branchensoftware.gartenbausoftware.de gelisteten Programme in der Kategorie Düngung im Gemüsebau (Stand 10.03.25)

Software	Anbieter	Funktion	Preis
„MeinBetrieb“ – Pflanzenschutz - Dokumentationssystem	Gartenbau- Informationssystem hortigate	Modul zur professionellen Dokumentation von Pflanzenschutzmaßnahmen, der Düngung und von anderen Managementmaßnahmen, wie z.B. Nützlingseinsatz, in Sonderkulturen.	100 € pro Jahr (zzgl. MwSt.)
N-Expert 4	IGZ	N-Expert unterstützt Düngungsberater und Landwirte bei der Ermittlung des Düngungsbedarfs von Gemüsekulturen und bei der Erstellung von Nährstoffbilanzen gemäß Düngeverordnung (DüV)	Kostenlos

Tabelle 2.3–4: Überblick über die auf der Webseite www.branchensoftware.gartenbausoftware.de gelisteten Programme in der Kategorie Kulturführung und Anbauplanung im Gemüsebau (Stand 10.03.25)

Software	Anbieter	Funktion	Preis
LOG & SOLVE	Klasmann- Deilmann Ser-vice GmbH	Datenerfassung	Auf Anfrage; Monatliches Abonnement; Preis abhängig von den zugebuchten Funktionen
PSInfo -MeinBetrieb	Gartenbau-Informationssystem hortigate	Modul zur professionellen Dokumentation von Pflanzenschutzmaßnahmen, der Düngung und von anderen Managementmaßnahmen, wie z.B. Nützlingseinsatz, in Sonderkulturen.	100 € pro Jahr (zzgl. MwSt.)
Gemüse-Anbauplaner	Rukola-Soft	Plattformunabhängige, moderne Software zur Planung und Organisation des produktionsgärtnerischen Anbaus, von Praktikern für Praktiker. Alles von der Kultur-, Satz- und Flächenplanung über die Aufgabenverwaltung bis zu Ernte und Kommissionierung. Anbauplanung – Dokumentation – Verwaltung	Ab 25 € pro Monate zzgl. Ust.
BeTa 6 & BeTa 7	Hochschule Weihenstephan Triesdorf	Tätigkeits- und Arbeitszeiterfassung; Das Betriebstagebuch BeTa dient der Erfassung und Auswertung aller Arbeitsvorgänge in einem Gartenbaubetrieb.	90 €
Invitrosoft	Invitrosoft Software Solutions oHG	Barcodeetikettierung, Rückverfolgbarkeit, Auftragsplanung, Bestandsverwaltung, ERP	Auf Anfrage
eLMID	Cobera-Land GmbH	Schlagkartei für Ackerbau, Gemüsebau und Sonderkulturen oder für die Buchhaltung	Auf Anfrage
g-pda	JayVee Green Consult	Akkorderfassung und -abrechnung, Flächenbelegung, Bestandsverwaltung, Kulturführung	Auf Anfrage

Software	Anbieter	Funktion	Preis
BVS - Warenwirtschaftssystem	Schnakenberg Computersysteme Vertriebs GmbH	Modular aufgebautes Warenwirtschaftssystem mit optionalen Kassensystem, multiuserfähig, gleichzeitige Nutzung von Linux- und Windowsrechnern.	Auf Anfrage
Gemüse in geschütztem Anbau	KTBL	Excel-Anwendung für die betriebsspezifische Kalkulation für die Gemüseerzeugung im geschützten Anbau	Kostenlos
Grünplan	Fachgrün	Software zur Planung, Kostenkalkulation und Dokumentation der Produktion	Ab 600 € je Standort + Servicevertrag ab 100€ je Standort
HeiKos	Hochschule Weihenstephan Triesdorf	Excel-basierte Kalkulationshilfe für Heizkosten in gärtnerischen Betrieben	Kostenlos (Registrierung notwendig)
MyFarm24 (Helm- Software)	Helm- 24	Kulturführung, Flächenverwaltung, Cross Compliance, Nährstoffvergleich, DüV, Greening, Stoffstrombilanz, Planung, Lagerbuch, Flurstücksverwaltung, Bilanzen und Kostenrechnung.	Ab 170€
Hortigate	hortigate	Fachinformationen zum Thema Gartenbau	Hortigate BASIS: ab 175€ pro Jahr Hortigate EXTRA: Preis von hortigate BASIS + 119€ pro Jahr
KuKa- Kulturkalkulation	Hochschule Weihenstephan Triesdorf	Ergänzende Software zum Betriebstagebuch (BeTa), die der Kostenkalkulation einzelner Kulturen dient	Kostenlos (Registrierung notwendig)
Leistungs Kostenrechnung Pflanzenbau	KTBL	Die Anwendung ermöglicht die Planung von ökologischen und konventionellen Produktionsverfahren.	Kostenlos
Mprise Agriware	Mprise Agriware	Agriware unterstützt alle Aspekte der gärtnerischen Produktion, wie das Management von Arbeitszeiten, Anbauflächen und Material.	Auf Anfrage

Software	Anbieter	Funktion	Preis
MPS-ABC	MPS-Gruppe	Mit MPS-ABC können Produktionsbetrieben anhand deren Verbräuchen von Pflanzenschutzmitteln, Dünger, Energie und Wasser transparent, messbar und nachweisbar aufzeigen, wie nachhaltig sie produzieren.	Ab 347€ (im ersten Jahr)
Mulchfolienrechner	Hochschule Weihenstephan Triesdorf	Berechnung der Rentabilität des Einsatzes biologisch abbaubarer Folien	Kostenlos
N-Expert	IGZ e.V.	Düngeempfehlungen und Nährstoffbilanzen für den Freiland-gemüsebau	Kostenlos
PC-Gärtner	PC-Gärtner GmbH	Modulares Softwaresystem zur Anbauplanung und Vermarktung	Anschaffung: 700€ & 40-72€ pro Jahr
PS Info	DLR Rheinlandpfalz	Datenbank für integrierten und ökologischen Pflanzenschutz	100€ pro Jahr (zzgl. MwSt.)
Verfahrensrechner Pflanze	KTBL	Unterstütz bei Ermittlung der Arbeitserledigungskosten	Kostenlos

2.3.2.1 Tools für die Düngeplanung

Seitdem die Anforderungen an die der Düngung vorausgehende Berechnungen und anschließende Aufzeichnungen im Zuge der Düngeverordnung (DüV) gestiegen sind, gibt es eine steigende Anzahl an Softwaretools, die den Anwender bei diesen Dokumentationspflichten unterstützen sollen. Dazu gehören auf der einen Seite Online-Portale der Bundesländer, wie z.B. DüngungBW (Baden-Württemberg), Düngeportal (Nordrhein-Westfalen), Enni (Niedersachsen) oder BESyD (Sachsen). Auf der anderen Seite gibt es Anwendungen, die unabhängig von rechtlichen Vorgaben entwickelt wurden um Landwirt*Innen und Gärtner*Innen eine besser angepasste Düngung zu ermöglichen. Dazu gehören die beiden in Nutri@Ökogemüse für den ökologischen Gemüsebau weiterentwickelten Tools N-Expert und NDICEA. Bausteine zur Düngebedarfsermittlung sind mittlerweile auch in viele Ackerschlagkarteien integriert, welche in den meisten Fällen auch den rechtlichen Vorgaben entsprechen. Beispiele hierfür sind MyFarm24 (www.myfarm24.de), ProFlura (www.proflura.de) oder NextFarming (www.nextfarming.de).

Im Rahmen des Projektes Nutri@Ökogemüse wurden die beiden im Projekt weiterentwickelten Tools NDICEA und N-Expert mit einem offiziellen Tool zur Düngebedarfsermittlung der Bundesländer, DüngungBW aus Baden-Württemberg, verglichen. Im Folgenden werden zunächst die drei ausgewählten Tools zur Düngeplanung vorgestellt. Diese können teilweise auch dazu genutzt werden um die rechtlichen Vorgaben z.B. wie die Düngebedarfsermittlung (DBE) der DüV zu erfüllen. N-Expert darf z.B. für die DBE im Gemüsebau in Bayern zum aktuellen Zeitpunkt genutzt werden (LWG, 2025).

2.3.2.1.1 DüngungBW

Die Online-Anwendung DüngungBW ist speziell auf die Vorgaben der DüV und deren Umsetzung in Baden-Württemberg zugeschnitten und soll Landwirt*Innen bei der Erfüllung der Vorgaben unterstützen. Die mit dieser Anwendung erstellten Dokumente entsprechen somit den rechtlichen Anforderungen. Das Tool bietet jedoch auch einige zusätzliche Funktionen.

2.3.2.1.1.1 Funktionen

Eine der wichtigsten Funktionen des Programms ist die Berechnung des Düngebedarfs für N und P nach DüV. Zusätzlich können zum Beispiel Empfehlungen für Grund- und Kopfdüngung oder die Berechnung entsprechend dem kulturbegleitende N_{min} -Sollwert System (KNS) durchgeführt werden. Düngebedarfsberechnungen für K, Mg und Kalk sind ebenfalls möglich. Weitere Funktionen des Online-Tools sind Unterstützung bei der Düngeplanung, das Aufzeichnen von Düngemaßnahmen, Nährstoffvergleiche und Stoffstrombilanzierung sowie die Summierung zum jährlichen Nährstoffeinsatz ebenfalls nach der DüV. Außerdem kann über DüngungBW am Nitratinformationsdienst teilgenommen werden. Auf der Webseite von DüngungBW ist für Landwirt*Innen und Gärtner*Innen zusätzliches Informationsmaterial zu finden. Dazu gehören Dokumente mit Bezug zu rechtlichen Themen, wie ein Entscheidungsbaum zur Notwendigkeit einer Stoffstrombilanz oder Merkblätter zur Düngung in Wasserschutzgebieten (<https://www.duengung-bw.de/landwirtschaft/views/informationen.xhtml>).

2.3.2.1.1.2 Berechnungsmethode

In der DüV werden Methoden zur Berechnung des N- und P-Düngebedarfs vorgeschrieben. Diese werden in DüngungBW als Berechnungsgrundlage verwendet. Da der Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff im Boden von vielen Faktoren abhängig und eine Abschätzung schwer ist, gestaltet sich die Ermittlung des Stickstoffdüngebedarfs kompliziert (Laber, 2022). Der Bedarf einer Kultur in Abhängigkeit vom Ertrag kann aus Tabellen entnommen werden. Von diesem Wert ausgehend werden Zu- und Abschläge gemacht, zum Beispiel für abweichende mittlere Betriebserträge und für die Stickstoffnachlieferung aus dem Bodenvorrat oder aus organischer Düngung. Die notwendigen Daten können vorrangig durch Bodenproben ermittelt und/ oder Tabellen entnommen werden. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist der Stickstoffbedarf einer Kultur über die Vegetationsperiode hinweg in kg N/ ha (DüV, 2017a). Phosphor ist im Boden wenig mobil und wird nur von wenigen Faktoren beeinflusst. Der Nährstoffbedarf orientiert sich daher lediglich am Bodengehalt und der Abfuhr über das Erntegut bei entsprechender Ertragserwartung (DüV, 2017b).

2.3.2.1.1.3 Anwendung und Benutzerfreundlichkeit

Zu Beginn werden in DüngungBW in geringem Maße allgemeine Daten und Betriebsdaten abgefragt. Erste Berechnungen sind daher schon nach kurzer Einarbeitungszeit möglich. Das Programm erfordert die Eingabe von Daten erst, wenn sie wirklich gebraucht werden. Abhängig von bestimmten Eingaben werden weitere Werte abgefragt oder die Fragen dazu ausgeblendet. Des Weiteren werden, wo nicht notwendig oder durch die DüV nicht verlangt, keine genauen Zahlen abgefragt, z.B. zum Humusgehalt. Da in der DüV nur in Kategorien kleiner oder größer 4 % gerechnet wird, wird auch in der Software kein genauere Wert abgefragt. So können mit geringem Aufwand Düngebedarfsermittlungen erstellt werden, allerdings sind die Ergebnisse weniger genau. Zu einer Erhöhung des Arbeitsaufwandes trägt bei, dass zwar einzelne DBEs gespeichert werden können, das Programm jedoch keine Fruchtfolgen oder Ähnliches speichert. Das bedeutet, wenn im nächsten Jahr eine DBE für dieselbe Fläche erstellt werden soll, müssen Daten zur Fruchtfolge und Düngung wiederholt eingegeben werden.

Zur Einarbeitung in das Tool werden auf der Webseite verschiedene, bebilderte Kurzanleitungen zur Verfügung gestellt. Die allgemeine „Anleitung“ besteht aus 156 Power-Point Folien, was die Übersichtlichkeit mindert. Am Anfang der Präsentation gibt es jedoch Verweise zu den einzelnen Themen, sodass bei speziellen Fragen direkt zum richtigen Bereich der Anleitung gesprungen werden kann. In der Anwendung können DBEs auch ohne Anmeldung berechnet werden. Allerdings werden Ergebnisse dann nicht gespeichert. Ein Speichern ist nur möglich, wenn sich Landwirte mit ihrer Betriebsnummer anmelden.

2.3.2.1.2 N-Expert

Die erste Version des vom Leibniz Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V. entwickelten Tools N-Expert erschien 1992. Seitdem wurde die Software kontinuierlich weiterentwickelt und ergänzt (Feller und Rehbein, 2017; Sradnick et al., 2019). Die Software soll Landwirte, Gärtner und Berater bei der Düngeplanung unterstützen, sodass durch eine genauere Abschätzung des tatsächlichen Düngebedarfs umweltschädliche

Stickstoffüberschüsse vermieden werden können, ohne dass es zu Ertragseinbußen kommt (Fink und Scharpf, 1993).

2.3.2.1.2.1 Funktionen

Der durch N-Expert ermittelte Düngbedarf kann mit den Vorgaben der DüV verglichen werden. Außerdem kann die Software den Düngbedarf auch direkt nach den Anforderungen der DüV berechnen. Weitere Funktionen des Programms sind eine Düngeempfehlung für P, K und Mg, sowie die Ermittlung des P-Düngbedarfs nach DüV. Zusätzlich können verschiedene Berichte erstellt werden, unter anderem Nährstoff- und Stoffstrombilanzen, der Nährstoffeinsatz gemäß DüV oder eine grafische Darstellung der N-Flüsse. All diese Berichte können in wenigen Schritten erzeugt werden, wenn Daten über durchgeführte Maßnahmen kontinuierlich im Tagebuch eingetragen wurden. Welche Daten für welche Berechnung benötigt werden, ist jedoch nicht immer klar ersichtlich.

2.3.2.1.2.2 Berechnungsmethode

Die Düngbedarfsermittlung für Stickstoff in N-Expert beruht auf verschiedenen Modellen, die unter anderem die tägliche Stickstoffaufnahme der Pflanze und die Freisetzung von Stickstoff aus organischer Bodensubstanz, Düngern und Ernteresten im Boden simulieren (Feller et al., 2011).

Vereinfacht lässt sich die Berechnung des Düngbedarfs in N-Expert folgendermaßen beschreiben:

$$\text{Düngbedarf} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right) = \text{N Aufwuchs} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right) + \text{N Mindestvorrat Boden} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right) - \text{Netto N Mineralisierung} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right) - \text{N Vorrat Boden} \left(\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right)$$

für

N im Aufwuchs = N-Aufnahme durch die Pflanze bzw. bis zum Kulturende;

N Mindestvorrat im Boden = Mindest-N-Menge bis zur Ernte zur ausreichenden N-Versorgung;

Netto-N-Mineralisierung = aus organischem Material freigesetzte N-Menge;

N-Vorrat im Boden = Bestimmung durch Bodenproben

(Feller et al., 2011)

Da N-Expert unter anderem auf Daten des KNS-System aufbaut und Daten auf Tagesbasis simuliert werden, können Düngbedarfsermittlungen auch während der Kulturzeit, zum Beispiel für Kopfdüngungen ausgeführt werden. Während in den Modellen von N-Expert langjährige mittlere Bodentemperaturen miteinbezogen werden, werden aktuelle Temperaturen, Niederschläge und Beregnung nicht berücksichtigt (Feller, 2022; Sradnick et al., Kapitel 2.2). Der große Vorteil dieser Methode ist, dass die Freisetzung von N aus organischer Substanz im Boden berücksichtigt wird. Dies ist insbesondere im ökologischen Landbau sehr wichtig, da Dünger hier oft einen hohen Anteil N_{org} aufweisen, der über einen längeren Zeitraum pflanzenverfügbar wird.

2.3.2.1.2.3 Anwendung und Benutzerfreundlichkeit

Zu Beginn werden eine Vielzahl von Daten, wie zum Beispiel Viehbesatz, Stickstoffdeposition über den Luftweg oder Bodenart und Durchwurzelungstiefe der einzelnen Schläge abgefragt. Zur Vereinfachung gibt die Software jedoch Hinweise, wo Daten abgerufen werden können und schätzt manche fehlenden Daten mit hinterlegten Werten selbst ab. Außerdem sind für eine Vielzahl von Kulturen und Düngern Standardwerte wie zum Beispiel für Nährstoffgehalt oder Ertrag hinterlegt. Erst wenn ausreichend Daten in den Reitern „Betriebsdaten“ und „Tagebuch“ eingetragen wurden, ist es möglich im nächsten Reiter DBEs zu erstellen. Die Stärken des Programms zeigen sich erst mit der Zeit, der Dateneingabeaufwand ist vergleichsweise hoch.

Das Einpflegen der Grunddaten und das Eingeben der ersten erforderlichen Daten gestalteten sich als zeitaufwändig. Wenn jedoch Daten zu Kulturen und Düngemaßnahmen regelmäßig dokumentiert werden, sind Düngebedarfsermittlungen mit wenig Aufwand möglich.

Eine Klickanleitung, abrufbar auf YouTube (unter https://www.youtube.com/playlist?list=PLN3y-L9dk5q07QiAU0paplrO_zKsF9Uge) gibt in sechs kurzen Videos eine Einführung in das Programm. Anhand eines Beispiels wird gezeigt, welche Schritte bis zur ersten Düngeberechnung nötig sind. Die Kürze der Videos erlaubt einen schnellen Einstieg in das Programm, allerdings bleiben einige Dinge unklar wie z.B. die Eingabe des Aufwuchses. Dafür ist zwar ein Standardwert hinterlegt, aber es wird nicht erklärt, wie der Aufwuchs selbst ermittelt werden kann.

2.3.2.1.3 NDICEA

NDICEA steht für “Nitrogen Dynamics in Crop Rotations in Ecological Agriculture”. Das Online-Tool wurde 2000 in den Niederlanden von der Universität Wageningen und dem Louis-Bolk-Institut entwickelt. NDICEA soll bei der Entwicklung von Fruchtfolgen unterstützen, die den verfügbaren Stickstoff besser ausnutzen und in denen es zu geringeren Stickstoffverlusten kommt (Van Der Burgt et al., 2006). Statt genaue Daten und exakte DBEs zu liefern, soll die Software dabei unterstützen Zusammenhänge zu verstehen. Durch das Identifizieren von Zeiten hoher Überschüsse oder Defizite können Fruchtfolgevarianten entwickelt werden, die diesen Problemen entgegenwirken. Dafür simuliert das Programm die Dynamiken von Wasser, organischer Substanz und mineralischem Stickstoff im Boden, was in verschiedenen Diagrammen übersichtlich dargestellt wird (Louis Bolk Institut, 2022).

2.3.2.1.3.1 Berechnungsmethode

Bei NDICEA handelt es sich um ein prozessbasiertes Simulationsmodell, welches aus drei Komponenten besteht: Dynamik von Bodenwasser, Umsetzung von organischer Bodensubstanz und Mineralisierung von Stickstoff aus diesen Vorgängen sowie die Dynamik von anorganischem Stickstoff im Boden. Eine Vielzahl von Faktoren, wie die Kohlenstoff-Dynamik, Bodenwassergehalt, - pH und -temperatur sowie die Zusammensetzung des Nahrungsnetzes im Boden werden in die Berechnung von wöchentlichen Kompostierungsraten und der Freisetzung von Stickstoff miteinbezogen. (Van Der Burgt et al., 2006)

2.3.2.1.3.2 Funktionen

Das Programm kann eingesetzt werden, um die Stickstoffflüsse eines Schläges zu analysieren oder die Leistung einer Fruchtfolge zu bewerten (Louis Bolk Institut, 2022). Um den Effekt von Veränderungen innerhalb der Fruchtfolge einzuschätzen, können Szenarien kopiert, geändert und mit der Ursprungsversion verglichen werden. Im Programm sind viele Standardwerte hinterlegt. Zu Beginn müssen daher nur wenige, leicht verfügbare Daten eingegeben werden. Mit zunehmender Verwendungsdauer und Menge der eingegebenen Daten und Messwerte steigt die Genauigkeit der Vorhersagen und Modelle.

2.3.2.1.3.3 Anwendung und Benutzerfreundlichkeit

Für das Programm ist eine 14-seitige Anleitung verfügbar. Diese ist für Erstanwendende empfehlenswert. Auch wenn bei der Gebietswahl nur Regionen in Nord-Rhein-Westfalen (NRW) ausgewählt werden können, ist es in der aktuellen NDICEA Version 7 möglich, Wetterdaten basierend auf ausgewählten Koordinaten in die Modellierungen miteinzubeziehen.

2.3.2.1.4 Vergleich der Tools zur Düngeplanung

Die Zielsetzung der Programme ist sehr unterschiedlich. Düngung BW unterstützt Landwirte bei der Erstellung erforderlicher Dokumente. N-Expert soll Landwirte lange Zeit im Anbau begleiten und die Düngeplanung möglichst genau an die Gegebenheiten im Betrieb anpassen. Das Ziel von NDICEA ist weniger eine detaillierte Düngeempfehlung für einzelne Kulturen, sondern die Unterstützung von Landwirten bei der Anpassung und Weiterentwicklung ihrer Fruchtfolgen im Hinblick auf Stickstoff- und Kohlenstoff-Dynamiken und sollte für mindestens zwei Jahre berechnet werden. Ein weiterführender Vergleich der Programme findet sich in Tabelle 2.3–4.

Die unterschiedlichen Ansätze den Düngebedarf zu ermitteln können zu sehr verschiedenen Ergebnissen führen. Anhand eines Beispielszenarios (Kopfsalat früh und Blumenkohl; Düngung zum Blumenkohl) wurden die Tools miteinander verglichen. Sowohl DüngungBW als auch N-Expert liefern das gleiche Ergebnis für den Düngebedarf nach DüV. Für einen Blumenkohl, der Mitte Mai gepflanzt wird, werden 170 kg N ha⁻¹ veranschlagt. Die Düngeempfehlung basierend auf der Kalkulationsmethode von N-Expert ist um ungefähr 10 % geringer (154 kg N ha⁻¹). NDICEA modellierte für den Zeitraum des Blumenkohlwachstums einen Bedarf von 138,3 kg N ha⁻¹ und eine N-Freisetzung aus dem Boden von 69,5 kg N ha⁻¹. Um den Bedarf des Blumenkohls zu decken ist somit eine zusätzliche Düngung von 68,8 kg N ha⁻¹ nötig. Dieser Wert ist über 50% geringer im Vergleich zu den Ergebnissen von N-Expert und DüngungBW. Bei einer Düngergabe mit Federmehl nach der berechneten Empfehlung von NDICEA zeigte sich, dass für die Kultur Blumenkohl genug N verfügbar war und der Bedarf gedeckt werden konnte. Ohne diese Düngung würde ein negativer Saldo für Stickstoff, Phosphor und Kalium vorliegen. Auch in dem Versuch von Lenz und Postweiler (2020) wurden die Programme NDICEA und N-Expert mit der Berechnung nach DüV am Beispiel von Salat verglichen und deutliche Unterschiede für den Düngebedarf zwischen 25 kg N ha⁻¹ (NDICEA) und 75 kg N ha⁻¹ (DüV) ermittelt.

Tabelle 2.3–5: Vergleich von DüngungBW, N-Expert und NDICEA.

	N-Expert	Düngung BW	NDICEA
Berechnungsgrundlage	N-Expert-System, DüV-Vorgaben möglich	DüV-Vorgaben, Kulturbegleitende N _{min} -Sollwerte (KNS) möglich	Verschiedene Simulationsmodelle
Zielgruppe	Gemüsebau	Ackerbau	Vorrangig Ackerbau
Sprachen	Deutsch, Englisch, Niederländisch	Deutsch	Dänisch, Deutsch, Englisch, Niederländisch, Serbisch, Spanisch
Betriebssystem	Windows	Online	Online
Verwendbar für DÜV	Ja	Ja	Nein
Schläge in Beete unterteilbar	Ja	Nein, aber Bewirtschaftungseinheiten können erstellt werden	Nein
Preis/ Kosten (pro Jahr)	kostenlos	kostenlos	kostenlos
Anzahl Kulturen	173	Gemüse: 85; Kräuter: 135	143
Funktionen	Berechnung Kopfdüngung, Berechnung mit Beregnung, Schätzung der N-Freisetzung aus organischen Düngern und Ernterückständen, Berücksichtigung unvollständiger Ernte, Ermittlung Nachdüngbedarf, Nährstoffbilanz, Stoffstrombilanz, N-Flüsse (graphisch), Vergleich mit DüV	Dokumentation nach Anlage 5 DüV, DBE nach DüV in nitratbelasteten Gebieten, Berechnung Kopfdüngung, Aufzeichnung von Düngemaßnahmen, Ermittlung Nachdüngbedarf, Nährstoffvergleich, Stoffstrombilanz	Niederschlag, Mineralstoffbilanz, Simulation von: N-Aufnahme von Kulturen im Verhältnis zu verfügbarem N, Dynamik von N im Boden, N- Auswaschung, Denitrifikation, pF Ackerkrume, N-Mineralisation, organischer Substanz in Ackerkrume
Weitere Düngeempfehlungen	P, K, Mg	P, K, Mg, Ca	Mineralstoffbilanz: P, K
Notizen	Ja	Ja	Nein
Vorteile	- geschätzter täglicher N_{min}-Wert - im Vergleich zu DüV genauere Bedarfsermittlung, da mehr Faktoren mit einbezogen werden - Aufbau über Jahre hinweg/ Maßnahmen werden Schlag zugeordnet und gespeichert → Zeitaufwand reduziert sich nach Einarbeiten	- einfacher, intuitiver Einstieg - benötigt wenig Daten und Eingaben - lediglich Basisfunktionen zur DBE	- leichter, schneller Einstieg - ermöglicht umfassenden Blick auf Fruchtfolge und erhöht Verständnis der Vorgänge im Boden
Nachteile	- hoher Einarbeitungsaufwand - muss Einträge aktuell halten	- muss Daten für jede DBE erneut eingeben - braucht Betriebsnummer, um Anwendung richtig verwenden zu können	- keine konkreten Empfehlungen für Düngung oder andere Maßnahmen - Auswählbare Regionen nur in NRW

2.3.2.2 Diskussion und Zusammenfassung

Im Fokus dieser Arbeit stand die Betrachtung digitaler Tools im Kontext des ökologischen Gemüsebaus. Es gibt eine Vielzahl an Tools, die von Unternehmen, Forschungseinrichtungen oder Behörden der Bundesländer bereitgestellt werden. Während viele Tools kostenfrei nutzbar sind, fallen bei kommerziellen Anbietern in der Regel Abo-Kosten an. Teilweise sind auch Zusatzfunktionen oder –module von einzelnen Tools kostenpflichtig. Im exemplarischen Vergleich dreier EDV-Tools zur Dünge- und Nährstoffplanung wurde deutlich, dass NDICEA und N-Expert organische Dünger sowie deren verzögerte Stickstofffreisetzung in ihre Modellierungen einbeziehen – ein Aspekt, der sie besonders relevant für den ökologischen Gemüsebau macht. Auch DüngungBW berücksichtigt organische Düngemittel, nutzt jedoch eine vereinfachte Berechnungsmethode, was die Aussagekraft im ökologischen Kontext vermutlich begrenzt und ggfs. den N-Bedarf überschätzt.

Für eine möglichst effiziente Nutzung spielen Schnittstellen zwischen verschiedenen Systemen eine zentrale Rolle, da sie Doppeleingaben vermeiden und den Einstieg erleichtern. Der Datenimport bzw. –Export ist aktuell schon bei vielen Tools möglich und sollte in der Zukunft zu einem Standard für Tools auf landwirtschaftlichen und gärtnerischen Betrieben werden. Zudem müssen rechtliche Vorgaben, wie die Vorgaben der Düngeverordnung (DÜV), berücksichtigt und kontinuierlich in die Programme eingepflegt werden. Die Bekanntheit der Tools sowie ihre tatsächliche Ausrichtung auf den Gemüsebau und insbesondere den ökologischen Gemüsebau variieren. Es lässt sich festhalten, dass inzwischen verschiedene digitale Tools existieren, die den Anforderungen des ökologischen Gemüsebaus grundsätzlich gerecht werden – allerdings bedarf es weiterer Untersuchungen, um zu verstehen, warum diese Angebote bislang nur begrenzt genutzt werden und welche Anforderungen oder Hemmnisse einer breiteren Anwendung im Weg stehen. Um diese Aspekte besser zu verstehen, wurde im nächsten Schritt Landwirt*Innen, Gärtner*Innen sowie Berater*Innen befragt, um diese Faktoren gezielt zu identifizieren.

2.3.3 Status Quo Analyse zur Nutzung von EDV-Tools zum Nährstoffmanagement im ökologischen Gemüsebau

Die Analyse folgt dem Mixed-Methods-Ansatz bei dem sowohl quantitative als auch qualitative Forschungsmethoden verwendet werden. Quantitative Daten wurden mit Hilfe einer Umfrage erhoben, die auf den Ökofeldtagen 2023 durchgeführt wurde. Die qualitativen Daten wurden durch semistrukturierte Interviews mit Gemüsebauberater*Innen der ökologischen Anbauverbände und der Officialberatung erhoben. Beide Datenerhebungen konzentrierten sich auf die Identifizierung des Status Quo der Nutzung von EDV-Tools im ökologischen Gemüsebau im Allgemeinen, legten dann jedoch einen Fokus auf das Dünge-/Nährstoffmanagement auf den Betrieben. Die Forschungsfragen umfassten die Dokumentation der allgemeinen Nutzung von EDV-Tools in den Bereichen Anbauplanung, Nährstoffmanagement sowie der Buchhaltung. Durch die Befragung von (Nicht-)Nutzer*Innen sowie Berater*Innen sollten Herausforderungen, Probleme und potentielle Lösungen evaluiert werden, damit EDV-Tools z.B. zum Nährstoffmanagement verbessert werden können sodass diese in Zukunft stärker von den Betriebsleiter*Innen ökologisch wirtschaftender gärtnerischer und landwirtschaftlicher Betriebe angenommen werden, um das Düngemanagement aus ökonomischer und ökologischer Perspektive zu optimieren.

2.3.3.1 Quantitative Umfrage zur Nutzung von EDV-Tools im ökologischen Gemüsebau

Auf den Ökofeldtagen 2023 auf dem Biohof Grieshaber und Schmid wurde vom 14.-15.6.2023 eine quantitative Befragung von Gärtner*Innen und Landwirt*Innen durchgeführt. Die Befragung erfolgte im dem Bereich des Ausstellungsgeländes, auf dem das Schwerpunktthema Feldgemüse präsentiert wurde. Dadurch sollten möglichst viele Gemüsebaubetriebe erreicht werden. Die Befragung wurde online vor Ort mit der Umfrage-Software Tivian (Tivian XI GmbH, Köln) durchgeführt und im Anschluss ausgewertet. Insgesamt wurden an beiden Tagen circa 550 Personen angesprochen. 70 Personen befassten sich beruflich mit dem Gemüsebau und 63 Personen nahmen vor Ort an der Umfrage teil. Durch die auf den Ökofeldtagen verteilten Flyer mit QR-Code zur Umfrage nahmen in den darauffolgenden Tagen bis zum 19.06.2023 drei weitere Personen teil, so dass letztendlich 66 Fragebögen ausgewertet werden konnten. Die Befragung richtete sich sowohl an ökologisch wirtschaftende als auch konventionell wirtschaftende Landwirt*Innen und Gärtner*Innen. Für Nutzer und Nicht-Nutzer von EDV-Tools wurden unterschiedliche Fragebögen angeboten (siehe Anhang 6.2. Der Fragebogen für Nutzer umfasste 21 Fragen bei konventionellen Anbau und 28 Fragen bei ökologischen Anbau. Nicht-Nutzer mussten 21 (öko) bzw. 19. (konv) Fragen beantworten. Im Durchschnitt benötigten die Teilnehmer*Innen 5 Minuten 31 Sekunden zur Beantwortung des Fragebogens.

2.3.3.1.1 Demographische Daten

70% (n=46) der Teilnehmer*Innen gaben an, männlich zu sein, 15% weiblich (n=10), 3% divers (n=2) und 12% (n=8) machten keine Angabe. 61% der Teilnehmer*Innen (n=40) waren jünger als 40 Jahren (siehe Abbildung 2.3-1) und der Großteil der Teilnehmenden stammt aus Baden-Württemberg (39%), Bayern (15 %), Hessen (11%) und Rheinland-Pfalz (9%). Dies war durch den Ort der Veranstaltung in Baden-Württemberg bedingt, wodurch die angrenzenden Bundesländer stärker repräsentiert

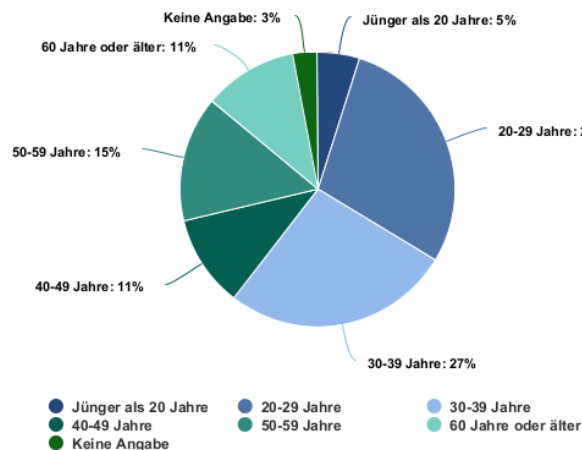


Abbildung 2.3-1: Altersverteilung der Teilnehmer*Innen an der Umfrage zum Thema „Nutzung von EDV-Tools im ökologischen Gemüsebau“ auf den Ökofeldtagen in 2023.

waren. Die höchsten abgeschlossenen Bildungsabschlüsse der Teilnehmer*Innen lauteten wie folgt: 33% hatten ein landwirtschaftliches Studium (Bachelor & Master) abgeschlossen, 21% hatten eine landwirtschaftliche / gartenbauliche Lehre abgeschlossen, während 12 % keinerlei landwirtschaftliche/gartenbauliche Ausbildung hatten. 5% der Befragten machten keine Angabe. Fast die Hälfte der Teilnehmer*Innen gaben zu ihrer Funktion auf dem Betrieb an, Eigentümer*In bzw. Betriebsleiter*In zu sein, 5% waren Geschäftsführer*In und 22% waren in einer leitenden Tätigkeit.

2.3.3.1.2 Allgemeine Fragen zum Betrieb

52% der Teilnehmer*Innen sind auf Betrieben größer als 40 ha tätig, bei 34% ist die Betriebsgröße >100 ha. Demgegenüber bewirtschafteten nur 17% der Teilnehmer*Innen eine Gesamtfläche von weniger als 4 ha; 9% der Betriebe bearbeiten <2 ha Fläche. Die Gemüseanbaufläche auf den Betrieben beläuft sich bei 38% auf 1 ha oder weniger. Nur 23% der Befragten bauen auf mehr als 50 ha Gemüse an. 74% kultivieren zwischen 5-30 Gemüsekulturen auf ihrem Betrieb, 23% mehr als 30 und drei Teilnehmer*Innen bauten weniger als fünf Gemüsekulturen auf dem Betrieb an. Der Großteil der Teilnehmer*Innen bewirtschafteten ihren Betrieb im Vollerwerb (74%) und nur etwa 25% im Nebenerwerb. Fast 75% der Teilnehmer*Innen bewirtschaften ihre Betriebe ökologisch (n=49), 67% davon sogar nach den Richtlinien eines Anbauverbandes. 17 Personen bewirtschafteten ihren Gemüsebaubetrieb konventionell. Etwa Hälfte der Betriebe wurde schon seit mehr als 20 Jahren ökologisch bewirtschaftet und 6% befanden sich zur Zeit der Umfrage noch in der Umstellung. Global Gap zertifiziert waren nur 20% der Betriebe. 23% machten zu dieser Frage keine Angabe. Zum größten Teil wird das angebaute Gemüse direkt vermarktet (n=31). 12 Teilnehmer*Innen gaben an, das Gemüse vor allem über den Großhandel zu vertreiben und 10 Teilnehmer*Innen vermarkten ihr Gemüse zu gleichen Anteilen über Direktvermarktung und Großhandel.

2.3.3.1.3 Düngernutzung und Kriterien der Düngungsentscheidung

Die Teilnehmer*Innen wurden bei der Befragung auch nach den von ihnen auf ihren Betrieben verwendeten Düngemitteln gefragt (siehe Abbildung 2.3-2– Mehrfachnennungen möglich). Bei den ökologisch wirtschaftenden Betrieben werden am häufigsten eigene Wirtschaftsdünger (n=33) zur Düngung eingesetzt, gefolgt von zugekauften organischen Handelsdüngern (n=32), zugekauften mineralischen Handelsdüngern (n=16) und zugekauften Wirtschaftsdüngern (n=14). Aber auch Komposte und Futter-Mist-Kooperationen wurden genannt. In den konventionellen Betrieben werden vor allem Mineraldünger (n=13) verwendet. Der Wirtschaftsdüngereinsatz dieser Betriebe erfolgte stärker über zugekaufte Dünger (n=10) im Vergleich zu eigenen Wirtschaftsdüngern (n= 7).

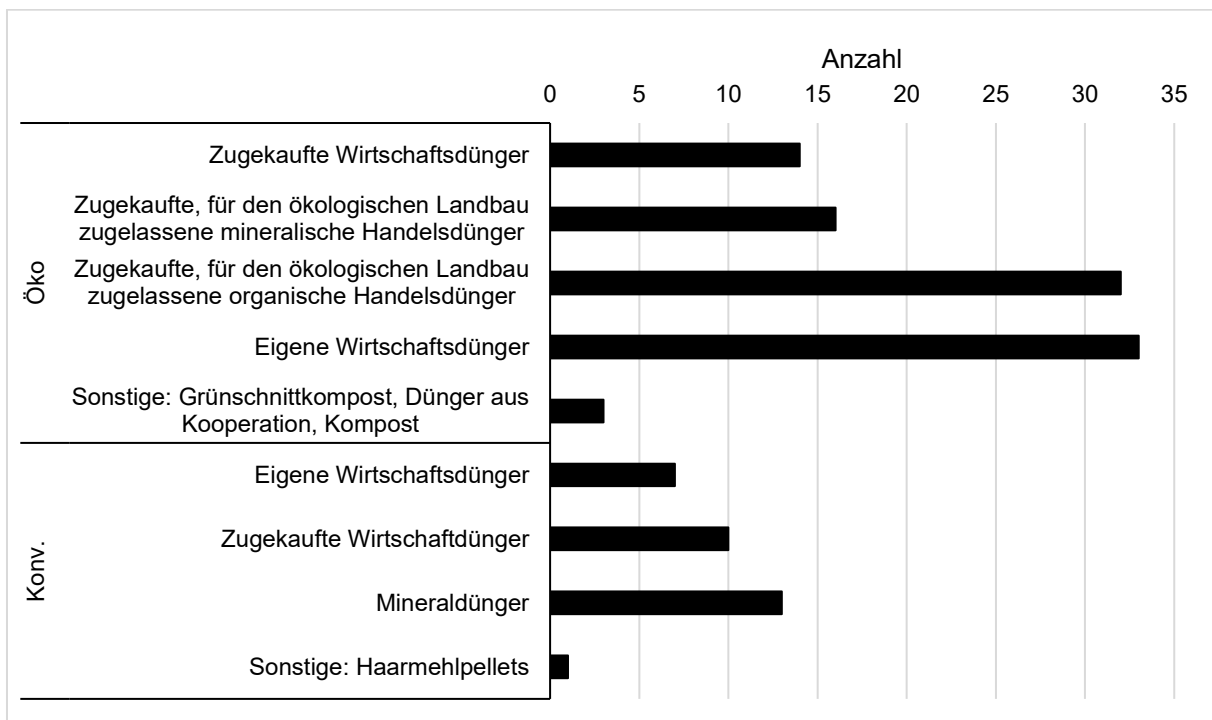


Abbildung 2.3-2: Verwendung von verschiedenen Düngemitteln der Teilnehmer*Innen auf den ökologischen und konventionell bewirtschafteten Betrieben (Mehrfachnennungen möglich.)

Bei der Frage nach der Basis ihrer Düngerentscheidungen, nannten die Teilnehmer*Innen am häufigsten die eigene Erfahrung (n=50) und die Vorfrucht (n=43) (Mehrfachnennungen möglich). Nährstoffbilanzen (n=29), Vorgaben der DüV (n=28) und Ertragserwartungen (n=27) wurden gleich häufig ausgewählt. Sonstige Gründe, die die Düngeentscheidung der Teilnehmer*Innen beeinflussen waren: Ergebnisse von Bodenproben, verfügbare Mengen an Wirtschaftsdüngern, Anregungen durch Verbände und Berater sowie die eigene Einschätzung von Boden, Durchwurzelung und Wachstum. Nur fünf Teilnehmer*Innen gaben an, ihre Entscheidung auf Basis von EDV-Tools zu treffen.

Auf die Frage, welches die wichtigsten Kriterien für die Düngung sind, wurde der Ertrag als wichtigstes Kriterium von 70% der Teilnehmer*Innen (n=46) genannt (Mehrfachnennungen möglich) und am zweitwichtigsten waren die Kosten (n=42). Auswirkungen auf die Umwelt, Arbeitswirtschaftlichkeit und Verwertung der auf dem Betrieb anfallender Wirtschaftsdünger

waren jeweils nur für weniger als die Hälfte der Teilnehmer*Innen ein wichtiges Kriterium. Ein Teilnehmender nannte als zusätzliches wichtiges Kriterium die Verfügbarkeit der Dünger.

2.3.3.1.4 Nutzung von EDV-Tools

Die Analyse der Umfragedaten hinsichtlich der Nutzung von EDV-Tools ergab, dass 61 % der Teilnehmer*Innen EDV-Tools bereits auf ihren Betrieben nutzen (n=40). Wie in Abbildung 2.3-3 zu sehen, verwenden die meisten Nutzer*Innen Software, um Daten für die Verwaltung, Betriebskontrollen und Zertifizierung bereitzustellen (n=24) sowie zur Flächen- (n=28) und Düngeplanung (n=27).

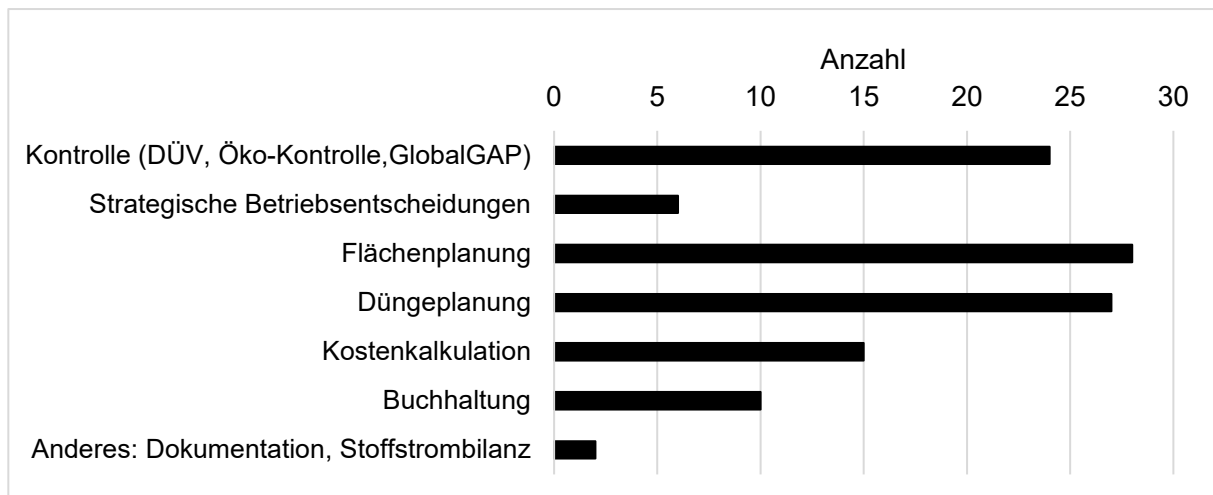


Abbildung 2.3-3: Antworten der Teilnehmer*Innen zur Nutzung der Tools auf den Betrieben.
Mehrfachnennungen möglich.

In der Umfrage zeigte sich, dass es keine Unterschiede bei der (Nicht-)Nutzung von EDV-Tools zwischen ökologisch und konventionell wirtschaftenden Betrieben gab. Wie in Abbildung 2.3-4 zu sehen ist, wurden in den Kategorien Alter, Betriebsgröße, Anzahl angebauter Kulturen und Gemüseanbaufläche Unterschiede in der (Nicht-)Nutzung sichtbar. Die Mehrheit der Nutzer*Innen von EDV-Tools ist jünger als 40 (ca. 66% der Nutzer*Innen), wobei die Altersgruppe 20-29 Jahre am stärksten vertreten ist (40%). Jüngere Betriebsleiter oder Mitarbeitende zeigten sich besonders offen für den Einsatz digitaler Tools, auch aufgrund einer generell höheren Affinität zu digitalen Lösungen. Aber auch die Altersgruppe 30-39 Jahre hat trotz einiger Jahre Berufserfahrung weiterhin noch eine hohe Bereitschaft, neue, digitale Technologien auf den Betrieben einzusetzen. Mit zunehmendem Alter scheint es einen Rückgang in der Nutzung zu geben und mehr Teilnehmer*Innen gaben an, keine EDV-Tools zu nutzen. Dies könnte unter anderem daran liegen, dass auf Erfahrung vertraut wird bzw. Betriebe noch papierbasiert arbeiten, weniger dokumentieren und deshalb weniger dazu neigen, digitale Lösungen einzuführen. Ein weiterer Grund für die Zurückhaltung bei der Nutzung von EDV-Tools ist die fehlende Notwendigkeit aufgrund bevorstehender Betriebsübergaben oder -aufgaben, wodurch Investitionen in neue Systeme als nicht lohnenswert betrachtet wurden. Es deutet sich an, dass die jüngeren Generationen die Digitalisierung im Gemüsebau vorantreiben. Die älteren Generationen hingegen scheinen mehr Vorbehalte gegenüber dem Einsatz digitaler Technologien zu haben. Hinsichtlich der Betriebsgröße zeigte die Umfrage, dass 66 % der Nutzer*Innen von EDV-Tools mehr als 40

ha bewirtschaften (n=28), wovon wiederum 43 % Betriebe mehr als 100 ha hatten (n=17). Von den Nicht-Nutzern*Innen gaben 68 % (n=17) an, Gesamtbetriebsflächen von weniger als 40 ha zu bewirtschaften. Große Betriebe scheinen überdurchschnittlich oft auf EDV-Tools zurückzugreifen. Nicht-Nutzer führten besonders häufig Betriebe mittlerer Betriebsgröße. Bei der Anzahl angebaute Kulturen zeigte sich, dass Nutzer*Innen meist 10-30 Kulturen anbauen. In der Kategorie mit weniger als 5 Kulturen wurden keine EDV-Tools genutzt. 57 % der Nutzer*Innen bauen Gemüse hingegen auf mehr als 5 ha an, meist in den Kategorien von 10 bis 19 ha und von 20 bis 49 ha. Die Nicht-Nutzer konzentrieren sich vor allem auf die kleineren Anbauflächen. 65% haben Gemüseflächen von 1 ha und weniger. Die kleinen Betriebs- und Gemüseanbauflächen sowie ein höheres Lebensalter scheinen ein Hauptgrund für den Nichtgebrauch der EDV-Tools zu sein. Ähnliche Ergebnisse für den Zusammenhang „Nutzung von EDV-Tools“ und „Betriebsgröße“ zeigten sich auch in der Studie von Gescheidle et al.

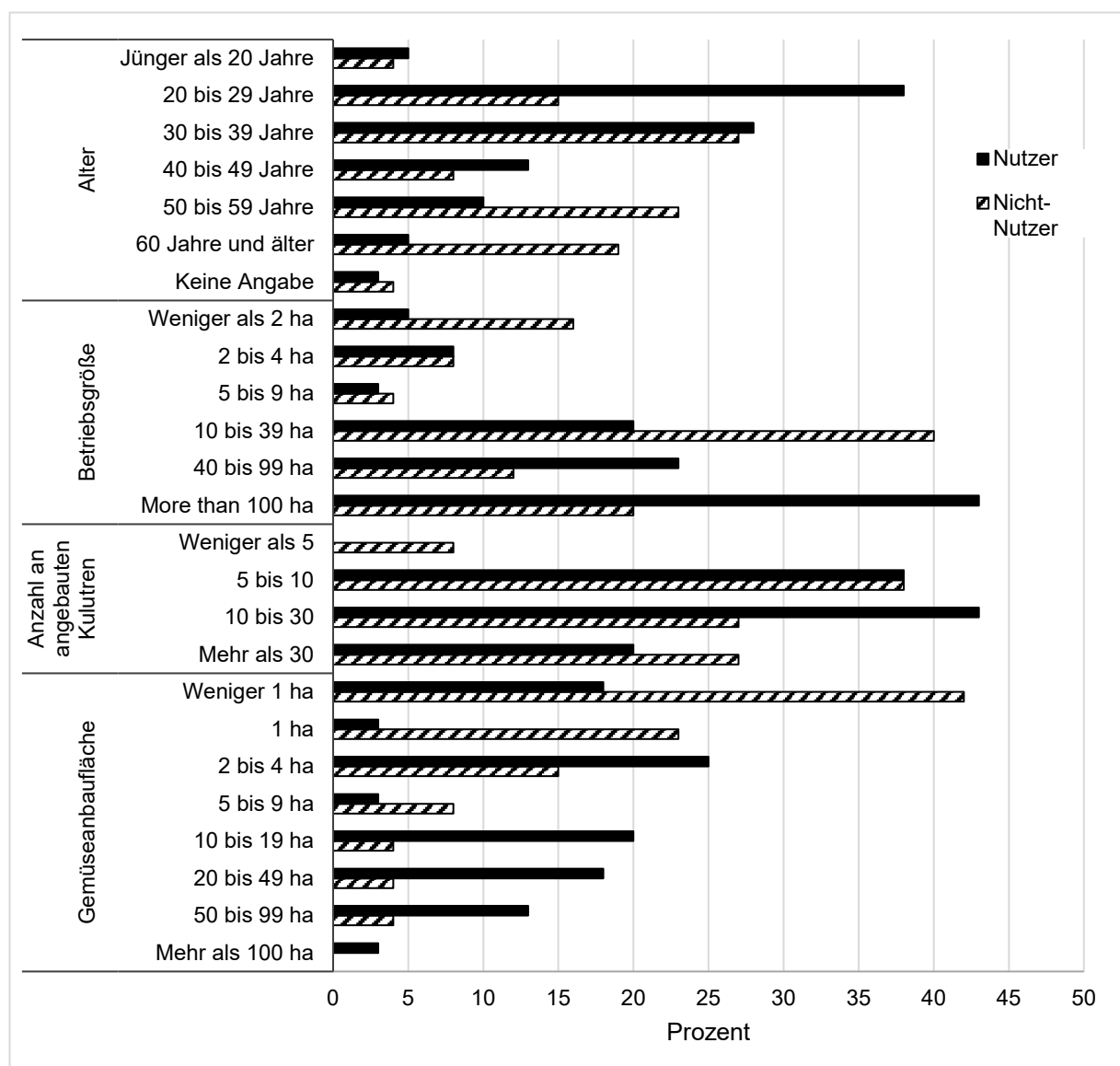


Abbildung 2.3-4: Verteilung der (Nicht-)Nutzer*Innen von EDV-Tools im Gemüsebau über die Kategorien Alter, Betriebsgröße, Anzahl an angebauten Kulturen und Gemüseanbaufläche hinweg; n=66).

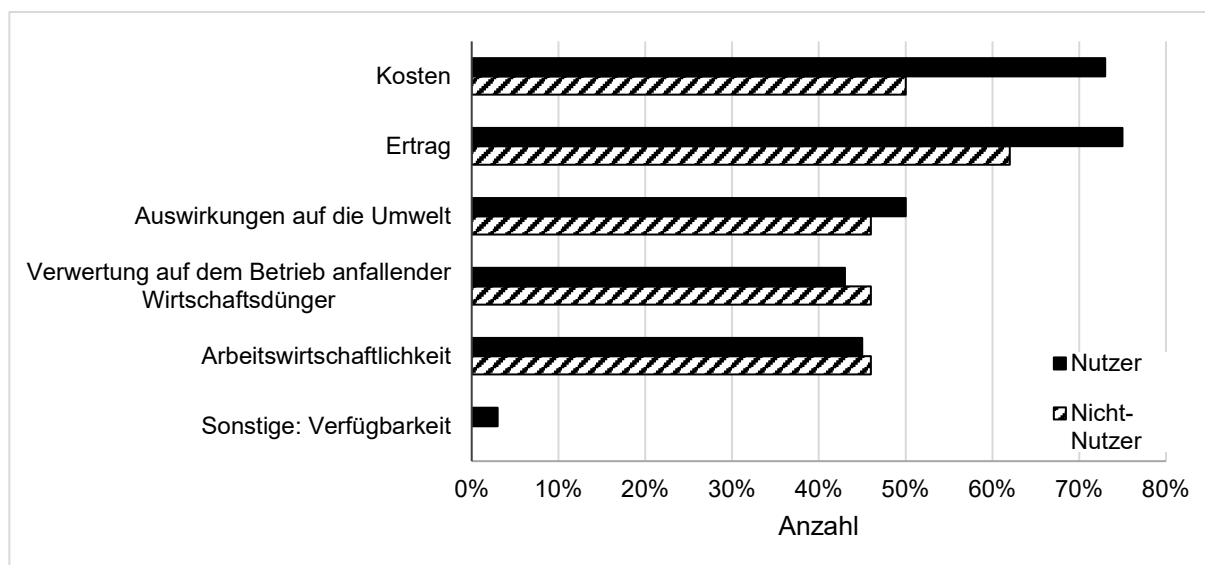


Abbildung 2.3-5: Kriterien für die Düngeentscheidungen von (Nicht-)Nutzer*Innen von EDV-Tools. Mehrfachnennungen möglich.

(2022). Auch in dieser Arbeit wurde deutlich, dass die Bedeutung der Digitalisierung (u.a. Nutzung von EDV-Tools) mit der Größe des Betriebes zunimmt.

Bei einer genaueren Betrachtung des Düngemanagements in Abhängigkeit von der (Nicht-)Nutzung der EDV-Tools zeigt sich, dass für die Nutzer*Innen von EDV-Tools Kosten und Ertrag einen großen Einfluss auf die Entscheidung haben (Abbildung 2.3-5). Aber auch die Auswirkung auf die Umwelt sind ihnen tendenziell etwas wichtiger im Vergleich zu den Nicht-Nutzer*Innen. Es scheint, dass die Nutzer*Innen mehr auf eine kosteneffiziente Produktion achten und deshalb vermutlich auch eher eine Software zur Kalkulation der Düngermengen einsetzen. Außerdem scheinen sich die Nutzer*Innen auch noch mehr auf eine Ertragsoptimierung zu fokussieren im Vergleich zu den Nicht-Nutzer*Innen. EDV-Tools könnten jedoch auch den Nicht-Nutzer*Innen helfen, Düngestrategien zu optimieren und den Ertrag zu steigern. Ob den Nicht-Nutzer*Innen jedoch eine Ertragssteigerung oder aber niedrigere, aber stabile Erträge wichtiger sind kann anhand der Umfrage nicht geklärt werden.

In einem weiteren Schritt wurden die Nutzer*Innen zu den von ihnen genutzten Tools in den Bereichen Anbauplanung, Düngeplanung und Buchhaltung befragt. Mehrfachnennungen waren möglich. Für die Anbauplanung nutzen mehr als die Hälfte (n=23) ein Tabellen-Kalkulationsprogramm wie z.B. Excel (Abbildung 2.3-6). Fast ein Viertel der Nutzer*Innen (n=9) gab an, die Anbauplanung für den Betrieb handschriftlich durchzuführen. Von den auf dem Markt erhältlichen EDV-Tools wurde MyFarm24 von Helm24 am häufigsten genannt (n=7), gefolgt vom Gemüse Anbauplaner (Rukola Soft) (n=3) sowie PC-Gärtner, Ackerschlagkartei, ProFlura und Next Farm AG Office (je n=2).

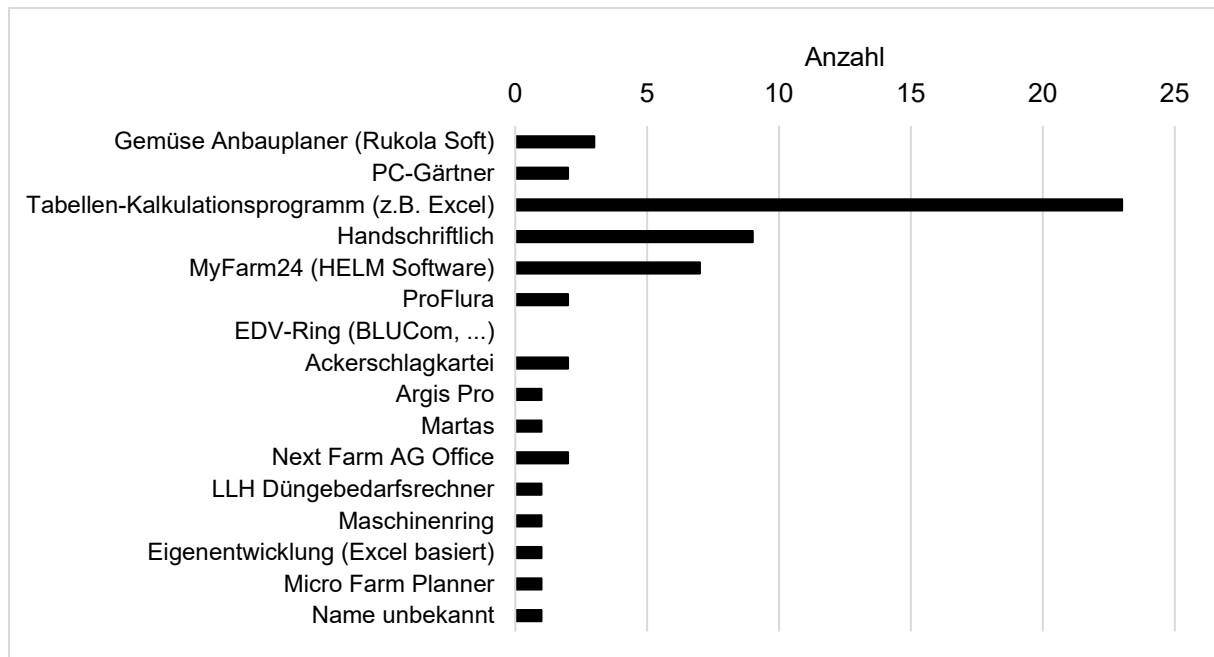


Abbildung 2.3-6: Von den Teilnehmer*Innen genutzte EDV-Tools zur Anbauplanung.

Bei der Planung der Düngung werden wie auch schon bei der Anbauplanung hauptsächlich Tabellen-Kalkulationsprogramm wie z.B. Excel auf den Betrieben verwendet (n=16) oder die Düngeplanung wird handschriftlich erledigt (n=9) (Abbildung 2.3-7). Auch die (Online-) Tools der verschiedenen Bundesländer werden von den Teilnehmer*Innen verwendet (DüngungBW (n=11), Düngeportal NRW (n=1), BESyD (n=4), LLH Düngebedarfsermittlung (n=1), LEL BY (n=1)), DBE DLR Rheinland-Pfalz (n=1). Weitere genannte Tools, die von den Teilnehmer*Innen genutzt wurden, waren ProFlura (n=3), MyFarm24 (n=4), ArcGis Pro (n=1), Next Farming (n=2). Von den zwei in dem Projekt Nutri@Ökogemüse weiterentwickelten EDV-Tools wurde NDICEA von einem Teilnehmenden verwendet, wohingegen N-Expert von niemanden genutzt wird. Zwei Teilnehmer*Innen gaben, an kein EDV-Tools zur Düngeplanung zu verwenden.

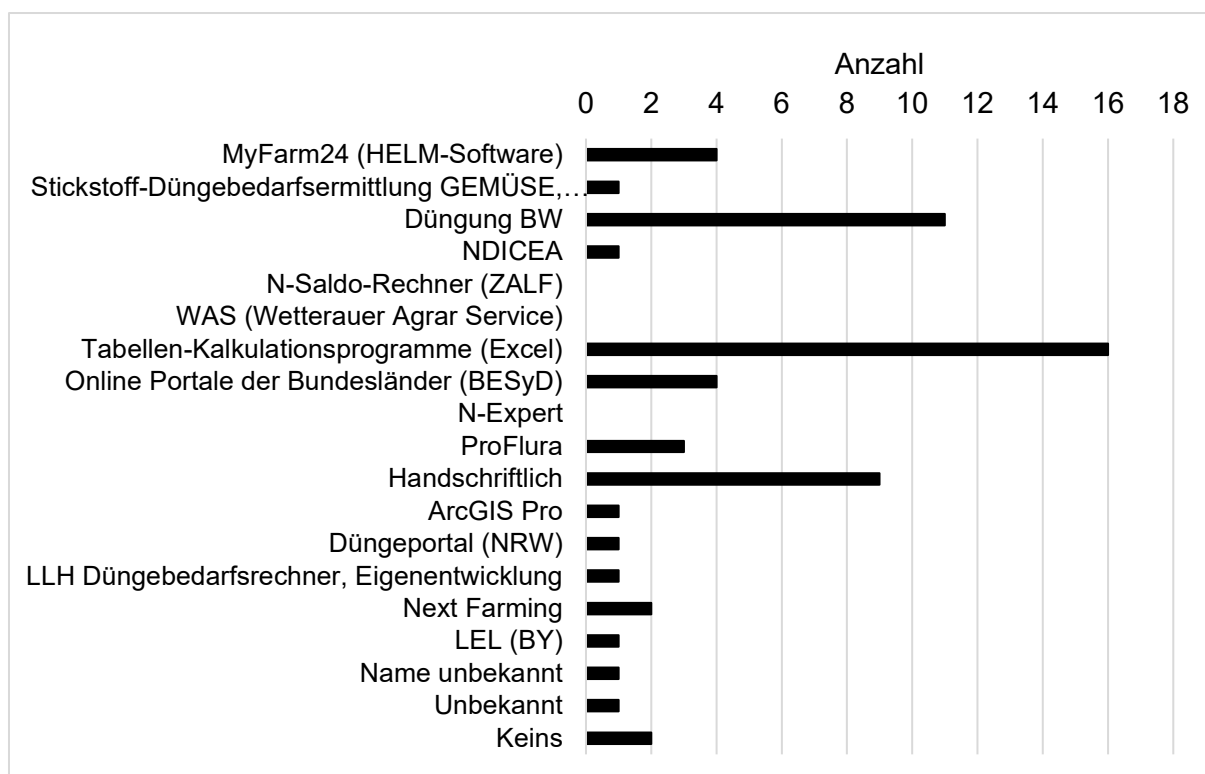


Abbildung 2.3-7: Von den Teilnehmer*Innen genutzte EDV-Tools zur Düngplanung.

Für die Buchhaltung wurden von den Nutzer*Innen die EDV-Tools von Lexware (Buchhaltungsprogramm) (n=7), Gemüseanbauplaner (n=6) und ANOVA (n=5) verwendet (Abbildung 2.3-8). Weitere genannte Tools waren VR Smart Guide, Agro Office (Schweiz), Speedy und Excel (je n=1). Drei Nutzer*Innen gaben an, dass die Buchhaltung durch den Steuerberater gemacht wird bzw. an den Buchhalter weitergegeben wird. Der größte Teil gab jedoch an, nicht zu wissen welches Programm verwendet wurde bzw. machte keine genaue Angabe (n=11) oder verwendet kein Tool zur Buchhaltung (n=5).

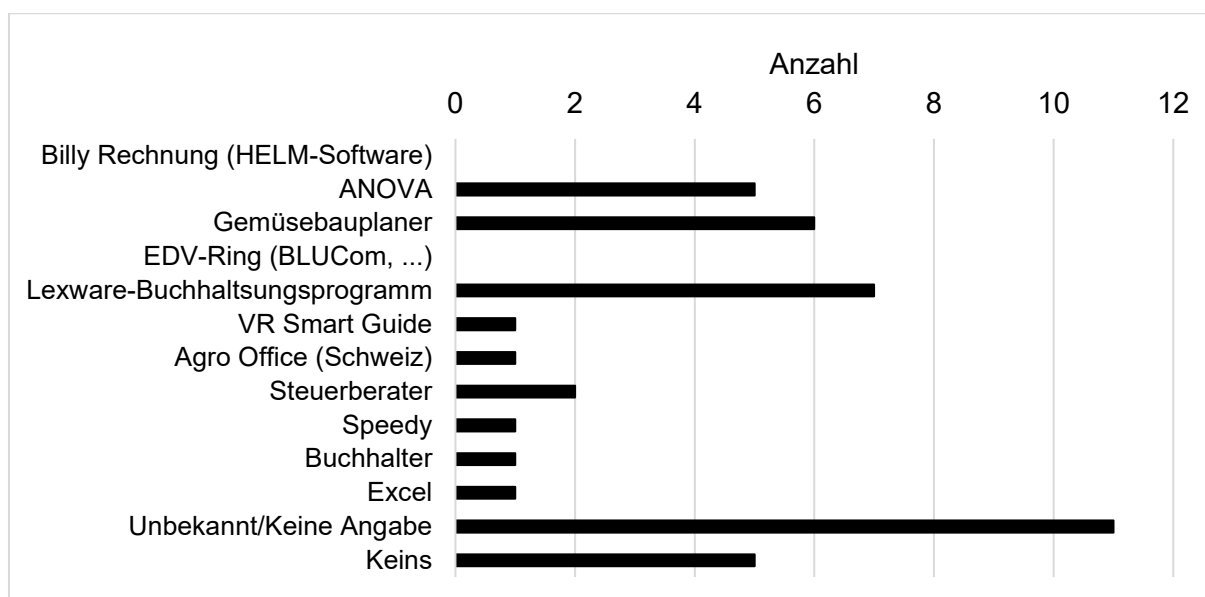


Abbildung 2.3-8: Von den Teilnehmer*Innen genutzte EDV-Tools zur Buchhaltung.

Um einen Überblick darüber zu bekommen, über welche Wege die Nutzer*Innen auf die jeweiligen Tools aufmerksam (gemacht) wurden, wurde dies zusätzlich abgefragt (Abbildung 2.3-9). Dabei zeigte sich, dass bei der Nutzung von den Tools für die Düngeplanung die gesetzlichen Vorgaben eine weit größere Bedeutung haben im Vergleich zu den Tools zu Anbauplanung und Buchhaltung. Aber auch durch Berufskolleg*Innen, die Beratung und das Eigeninteresse wurden die Nutzer*Innen auf die Düngungsplanungstools aufmerksam. Firmen und Handel spielen keine oder nur eine untergeordnete Rolle.

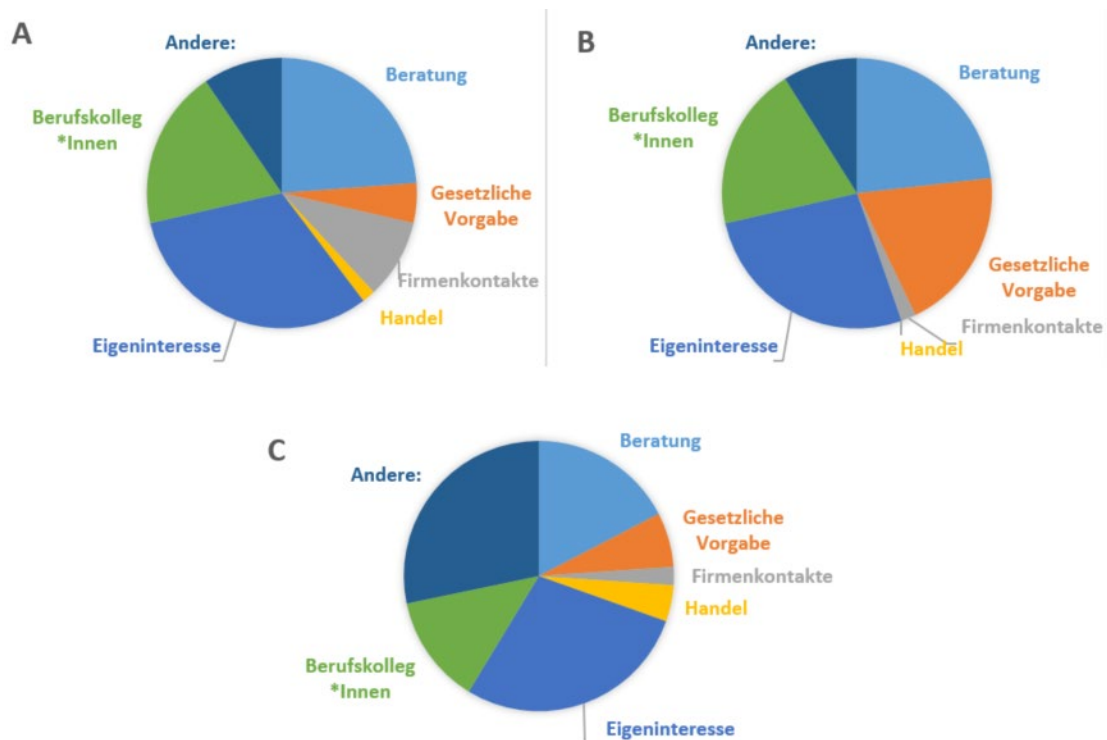


Abbildung 2.3-9: Darstellung der Wege, auf denen die Teilnehmer*Innen auf die verwendeten Tools zur (A) Anbauplanung, (B) Düngeplanung und (C) Buchhaltung aufmerksam wurden.

2.3.3.1.5 Weitere Verbesserungspotentiale

Insgesamt 55 % der Nutzer*Innen der Tools waren mit den bisher verwendeten Programmen zufrieden. Die restlichen Nutzer*Innen wünschen sich vor allem eine höhere Anwenderfreundlichkeit und eine größere Auswahl von Gemüsekulturen (Tabelle 2.3–5). Aber auch die Rechtssicherheit nach DüV in allen Bundesländern und eine gemeinsame Schnittstelle zu anderen Tools wurden als wichtige Verbesserungen genannt.

Tabelle 2.3–6: Kommentare der nur teilweise zufriedenen Nutzer*Innen hinsichtlich der Probleme und des Verbesserungspotentials der EDV-Tools.

Was fehlt Ihrer Meinung nach in den von Ihnen verwendeten Tools?	Wo gibt es Ihrer Meinung nach Verbesserungspotential?
Einfachere Erklärung und Bedienung	Bessere Bedienung
P Berechnung in Fruchtfolge	Struktur
Anwenderfreundlichkeit	Dokumentation nur für Vorgaben von Antrag
Verständlichkeit	Verständlichkeit
Kommentarfunktion für eigene Doku	Mehr Kulturen aufführen
fehlende Kulturen	Anwenderfreundlicher
fehlende Düngemittel	Keine
Beratung	Fruchtfolgeplanung
Verbesserungen der mobilen Version	Flächenplanung
Arbeitsaufwändig	Rechtssicherheit/Anerkennung durch Kontrollstellen
Zeitintensiv	
Excel passt	
Satzweise Planung (inkl. Mengenplanung)	
Rechtssicherheit zur DüV in allen Bundesländern (Bereitstellung von APIs (zur Erklärung API: Application Programming Interface (Anwendungsprogrammierschnittstelle)) der Länder)	
Optimierung für vielfältige Fruchtfolgen (z.B. einfachere Kulturanlage	

2.3.3.1.6 Gründe für Nicht-Nutzung und Anforderungen an EDV-Tools

Als größte Hürde für die Nutzung von EDV-Tools wurden von 14 der 25 Teilnehmer*Innen, die keine Tools nutzten, die geringen Betriebsgrößen genannt, da sich aus diesem Grund der Einsatz eines EDV-Tools nicht lohne. Alle Begründungen, warum die Teilnehmer*Innen keine EDV-Tools nutzten, sind in Tabelle 2.3–6 aufgeführt. Vier Personen gaben jedoch an, in der Zukunft ein Tool zur Düngplanung einsetzen zu wollen, 13 wollen kein EDV-Tool verwenden und neun Personen waren unschlüssig.

Tabelle 2.3–7: Hemmnisse für den Einsatz von EDV-Tools in Betrieben – Gründe für die Nicht-Nutzung.

Warum haben Sie bis jetzt keine Tools genutzt?
Zu kleiner Betrieb/ zu kleine Flächen (n=10)
Zu kompliziert/ zu aufwendig (n=2)
Kein Tool notwendig (n=1)
Zu hohe Kosten (n=1)
Zeitmangel (n=1)
Kein passendes Tool gefunden (n=1)
(Anmerkung: Tools sind) zu konventionell eingestellt (n=1)
Keine Papierform (n=1)
Ältere Betriebsleitung → wenig computeraffin (n=1)
Unwissenheit (n=1)

Nach den Anforderungen an EDV-Tools gefragt, gaben die aktuellen Nicht-Nutzer*Innen an, dass sie sich für das Nährstoffmanagement unter anderem eine einfache, unkomplizierte Bedienung wünschen, eine übersichtliche Düngebedarfsermittlung mit zusätzlichen Informationen zur Ausbringung der verschiedenen Düngemittel (Zeit, Menge, Kultur) sowie die Beachtung der Richtlinien (ob Richtlinien der Verbände und/oder rechtliche Regelung gemeint waren, wurde aus der Antwort nicht klar ersichtlich) (Tabelle 2.3–7). Weiterhin wird auch eine kleinteiligere Aufteilung mit wahlweise getrennter oder gemeinsamer Planung benötigt und die Miteinbeziehung von Wetter- und Bodenanalysedaten gefordert.

Tabelle 2.3–8: Anforderungen der Nicht-Nutzer*Innen unter den Teilnehmer*Innen an EDV-Tools.

Was sollte ein von Ihnen verwendetes Tool können bzw. welche Informationen sollte es liefern?
Düngebedarfsberechnung
Übersichtlicher darstellen wann und wo und wie viel Dünger benötigt wird
Richtlinien, Menge Kompost pro z.B. Beetmeter (anhand Nährstoffanalyse)
Pflanzen von Unkraut unterscheiden
Wetter, Nährstoffinformationen vom Boden
Was meine Papierform kann
Kleinteilige Aufteilung der Fläche
kein großes Interesse an Software/Tools
Einfache Handhabung mit der Möglichkeit, Flächen einzeln und zusammen zu planen. Vorgegebene Auswahlfelder mit z.B. Düngerarten, aber auch die Möglichkeit eigene Düngemittel mit den entsprechenden Nährstoffen einzugeben.
Einfach zu bedienen, unkompliziert

2.3.3.1.7 Fazit

Die quantitative Befragung von Landwirt*Innen und Gärtner*Innen auf den Ökofeldtagen konnte einen kleinen Einblick in die Nutzung von EDV-Tools auf verschiedenen Betrieben vor allem im süddeutschen Raum geben. Es zeigte sich, dass EDV-Tools in verschiedenen Bereichen wie Anbauplanung, Düngeplanung und der Buchhaltung auf den Betrieben bereits eingesetzt werden. Spezielle für den jeweiligen Bereich entwickelte EDV-Tools werden vor allem für die Buchhaltung von den Betrieben verwendet. Für die Anbau- und Düngeplanung setzten die Betriebe hauptsächlich auf Tabellenkalkulationsprogramme (wie z.B. Excel) oder führen diese noch handschriftlich durch. Bestehen jedoch gesetzlichen Vorgaben, wie z.B. für die Düngebedarfsermittlung, die ein Betrieb erfüllen muss werden auch spezielle EDV-Tools (wie z.B. Düngeportale der Bundesländer) verwendet. Grundsätzlich waren den Teilnehmer*Innen an der Umfrage zwar an der Nutzung von Tools für das Düngemanagement interessiert, jedoch scheinen Fragen zur Düngung an sich keine hohe Priorität zu haben. Wie zu erwarten war, war die Nutzung der EDV-Tools unter jüngeren Teilnehmer*innen und solche mit größeren Betrieben weiterverbreitet. Die Haupthindernisse für die Nutzung der Tools für die das Düngemanagement liegen vor allem bei kleinen Betrieben, die die Eingaben als zu aufwändig ansehen und am im Fehlen von Schnittstellen zu anderen Programmen, was aufwändige Doppeleingaben erfordert.

2.3.3.2 Qualitative Expert*Inneninterviews zum Einsatz von EDV-Tools im ökologischen Gemüseanbau

Die Digitalisierung gewinnt im ökologischen Gemüsebau zunehmend an Bedeutung, insbesondere im Bereich des Nährstoffmanagements. Neben den Nutzer*Innen selbst können auch die (Gemüsebau-)Berater*Innen der Anbauverbände und der Officialberatung wertvolle Einblicke in die Herausforderungen und Potenziale dieser digitalen Lösungen liefern. Durch ihre Beratungstätigkeit stehen sie in direktem Austausch mit Betrieben, erhalten unmittelbares Feedback zu den eingesetzten Softwarelösungen und sind außerdem häufig eng mit Wissenschaft und Forschung vernetzt. Häufig setzen die Berater*Innen selbst digitale Anwendungen in den Beratungsprozessen ein oder schulen die Landwirt*Innen und Gärtner*Innen in der Nutzung der Software. Dadurch tragen sie aktiv zur Weiterentwicklung und Verbreitung praxisnaher EDV-Anwendungen bei.

Im Rahmen der Expert*Inneninterviews mit Berater*innen aus verschiedenen Bundesländern und Verbänden wurde im Projekt Nutri@Ökogemüse untersucht, welche Chancen und Herausforderungen sich aus der Nutzung verschiedener EDV-Tools – insbesondere zum Nährstoffmanagement – im ökologischen Gemüsebau ergeben und welche Weiterentwicklungen erforderlich sind, um ihre praktische Anwendung in Betrieben und der Beratung zu verbessern und die Nutzung der Tools in der Praxis zu erhöhen.

2.3.3.2.1 Material & Methoden

Die qualitativen Daten wurden durch semistrukturierte Expert*Inneninterviews erhoben. Der Fragenkatalog wurde in drei Themenbereiche gegliedert und umfasste die Bereiche „Allgemeine Nutzung von Nährstoffmanagement-Tools“, „Nährstoffmanagement auf den Betrieben“ und „Beratung/Weiterbildungsangebote zur Nährstoffmanagement-Tools“. Für die Interviews wurden Berater*Innen der Verbände und der Officialberatung aus dem Bereich ökologischer Gemüsebau angefragt. Es wurden insgesamt acht Interviews in der Zeit von Juni 2023 bis Februar 2024 durchgeführt (siehe Tabelle 2.3–8).

Die Berater*Innen arbeiten in Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg, Schleswig-Holstein, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Bayern, Niedersachsen und in angrenzenden Gebieten und betreuen selber oder in ihrem Team zwischen 50 bis 350 Betriebe, wobei nicht alle Betriebe auf Gemüseanbau spezialisiert sind. Die betreuten Betriebe der interviewten Berater*Innen sind vielfältig, von spezialisierten Industriegemüsebetrieben bis hin zu extensiven, vielfältigen (Klein-)Betrieben und Betriebsgrößen von < 1 ha bis 1000 ha. Neben den Interviews mit Beratern aus den drei größten ökologischen Anbauverbänden in Deutschland wurden auch Mitarbeitende aus der Officialberatung der Landwirtschaftskammer in Nordrhein-Westfalen zu der Thematik befragt.

Tabelle 2.3–9: Interviewpartner*Innen für die Expert*Inneninterviews zum Thema „Softwarenutzung für das Nährstoffmanagement im ökologischen Gemüsebau“.

Sample-ID	Tätigkeit	Bundesland	Region/en	Betriebsarten	Betreute Betriebe	Interviewdauer
ID1	Verband	BY	Bayrisch Schwaben bis Unterfranken	Ackerbau Sonderkulturen	200	00:20:58
ID2	Verband	BW	Bodensee, Allgäu und Freiburger Raum	Gemüse: Freiland, geschützter Anbau	100-120	00:37:08
ID3	Verband	SH, HH und MV	SH, HH und MV	Freiland und Ackerbau	330-350	01:13:17
ID4	Verband	BW	Offenburg, nördlicher Teil von BW	Freiland und geschützter Anbau	mind. 50	00:32:30
ID5	Landwirtschaftskammer	NRW	NRW	-	100	00:33:10
ID6	Landwirtschaftskammer, Ökogemüsebauberatung & Verband	NRW	NRW	Feldgemüse & geschützter Anbau	ca. 200	00:54:07
ID7	Verband	BY	BY	Feldgemüse	ca. 50	00:21:55
ID8	Verband	NS	NS & angrenzende Gebiete	Feldgemüse	70-80	00:27:32

BW: Baden-Württemberg, BY: Bayern, HH: Hamburg, MV: Mecklenburg-Vorpommern, NRW: Nordrhein-Westfalen, NS: Niedersachsen, SH: Schleswig-Holstein; ID=Identifizierung

Der Fragenkatalog umfasste insgesamt 12 Fragen (siehe Anhang 6.3) und wurde den teilnehmenden Expert*Innen vor dem Interview per Mail zugeschickt. Interviews wurden online in Zoom (Zoom Communications, Inc, San Jose, USA, 2011) durchgeführt und dauerten zwischen 21 min und 1 h 13 min. Vor dem Interview wurde die Zustimmung der Expert*innen zur Aufnahme und Transkription eingeholt. Namensangaben wurden anonymisiert.

2.3.3.2.2 Transkription und Datenauswertung

Transkribiert wurden die Experteninterviews mit dem Audio-zu-Text-Konverter-Tool Sonix (Sonix, Inc.; San Francisco, USA, 2017). Dabei werden die aufgenommenen Audio-Dateien hochgeladen und automatisch transkribiert. Danach wurden die transkribierten Texte noch einmal auf Richtigkeit überprüft und nach den Regeln von Kuckartz & Rädiker (2022) aufbereitet (siehe Tabelle 2.3–9).

Für die Auswertung wurde die Software MAXQDA Analytics Pro (Version 24.7.0, VERBI GmbH; Berlin, Deutschland, 1995) genutzt. Es wurde zuerst ein Kodierleitfaden erstellt und die gesammelten Daten in Kategorien unterteilt. Durch die qualitative Inhaltsanalyse können aus umfangreichem Material gezielt wichtige Informationen entnommen werden. Es wurde die Methode der inhaltsanalytischen Zusammenfassung gewählt, bei welcher das Material so reduziert wird, dass das Wesentliche erhalten bleibt, jedoch noch immer einen Überblick über das Gesamte darstellt (Mayring, 2015). Die Ergebnisse, welche durch den Kodierleitfaden und die Kategorien zusammengefasst wurden, wurden mithilfe der Summary- Tabellen aus MAXQDA exportiert. Die Darstellung gewählter Ergebnisse erfolgte mithilfe von Microsoft Excel (Version 16.77.1, Microsoft Corporation; Washington, USA, 1982).

Tabelle 2.3–10: Regeln für die Transkription von qualitativen Interviews nach Kuckartz & Rädiker (2022).

1.	Wörtliche Transkription. Nicht phonetisch oder zusammenfassend.
2.	Keine Transkription von bestehenden Dialekten.
3.	Interpunktion und Sprache werden geglättet. Satzbaufehler werden korrigiert.
4.	Ellipsen (...) kennzeichnen längere Sprechpausen.
5.	Zwischenrufe des Gegenübers werden in Klammern gesetzt.
6.	Im Falle von akustischer Unverständlichkeit steht (un.) für „unverständlich“. Gibt es dafür einen erkennbaren Grund, so wird dieser in Klammern nachgetragen.
7.	Wenn ein Wort erraten wird, wird es in Klammern mit einem Fragezeichen gekennzeichnet.
8.	Um die Lesbarkeit zu verbessern, wird jeder Redebeitrag als eigener Absatz transkribiert

2.3.3.2.3 Ergebnisse

2.3.3.2.3.1 Nutzung von EDV-Tools auf den Betrieben

Die Expert*Innen berichteten, dass Tools auf den Betrieben hauptsächlich für die gesetzlich vorgeschriebene Dokumentation verwendet werden bzw. um behördlich vorgeschriebenen Maßnahmen zu dokumentieren (ID 1, ID 4, ID 6, ID 7, ID 8). Die Experten beschrieben diesen auf einem gewissen Zwang beruhenden Umstand folgendermaßen:

ID1: „Ich habe schon den Eindruck, dass es eigentlich immer dieser „Muss“-Faktor durch die DüV ist.“

ID2: „das was sie machen müssen, das machen sie oder sie versuchen es zu machen. Und das, was sie nicht machen müssen, das machen sie nicht.“

Aber auch die Arbeitserleichterung u.a. von Arbeitsabläufen, der Ablage sowie das Management bei vielen Schlägen wurde als Grund für die Nutzung von Tools angegeben (ID 4, ID 7, ID 2).

Dabei werden auf den Betrieben verschiedene Tools für unterschiedliche Aufgaben verwendet. Die Expert*Innen gaben an, dass die Betriebe für die Düngbedarfsermittlung (DBE) und Düngplanung die Düngportale der jeweiligen Bundesländer (wie z.B. Düngung BW, Enni (für Niedersachsen), Düngerportal NRW) verwenden (ID1, ID2, ID4, ID5, ID6, ID8). Aber auch die Excel basierte Düngbedarfsermittlung für Gemüse aus Rheinland-Pfalz wird häufig auf den Betrieben eingesetzt (ID1, ID2, ID4) und dies auch in anderen Bundesländern. ID5 berichtete, dass „NDICEA und das N-Expert von den Betrieben mehr oder weniger gar nicht benutzt wird oder ausschließlich gar nicht.“

Weiterhin werden auf den Betrieben Ackerschlagkarteien und Anbauplaner verwendet. Hier wurden von einzelnen Expert*Innen Produkte der Firma Helm24 genannt (ID3, ID6, ID7), sowie Rukola Soft und PC Gärtner (ID2). Viele Expert*Innen konnten aber keine Namen oder

Hersteller von den Programmen für diese Zwecke nennen. Hinsichtlich der Nutzung von Tools zur Buchhaltung erklärte ID4: „Also ich habe bisher keine betriebswirtschaftliche Beratung gemacht. Deswegen kann ich dir dazu nichts sagen. Aber ich nehme an, sie werden schon irgendwie eine Software nehmen.“ Die anderen Expert*Innen gingen nicht weiter auf diesen Bereich ein, da dies nicht Teil ihrer Beratungstätigkeit ist.

2.3.3.2.3.2 Nährstoffmanagement auf den Betrieben

Nach dem Nährstoffmanagement der Betriebe gefragt, gaben die Expert*Innen an, dass viele Betriebe ihre Erfahrung für das Management nutzen und weniger Tools zur Berechnung (ID1, ID2, ID3, ID6). Die gesetzlich geforderte Düngbedarfsermittlung bzw. Düngplanung wird zwar von den Betrieben durchgeführt, die Ergebnisse werden teilweise aber nicht als Vorgabe für die tatsächliche ausgebrachte Düngung herangezogen:

ID2: „Aber die wenigsten rechnen das in Programmen durch, sondern die meisten gehen wirklich nach ihrer Erfahrung, gucken was ist bzw. rechnen sich das vielleicht selber mit ihren entsprechenden Wegen durch, wie sie zu einer gewissen Düngform kommen. Und dann wird sozusagen das rechtlich Geforderte, also die Düngbedarfsermittlung und jetzt dann zukünftig die Stoffstrombilanz - Das wird dann noch on top gemacht. Aber das sind einfach Daten, die den Betrieb ja so nicht wirklich viel helfen. Also berechnete Düngbedarfsermittlung hilft keinem Gärtner. Das ist halt bürokratischer Prozess, den man machen muss.“

Auch der Zeitbedarf hat einen Einfluss auf die Planung des Nährstoffmanagements. ID5 berichtet, dass eine detaillierte Vorplanung der Düngung für einen Gemüsebetrieb zeitaufwändig ist und man für einen Betrieb mit 50 ha „locker 20 bis 48 Stunden im Frühjahr“ braucht.

Bodenproben werden laut den Expert*Innen viel zu wenig oder zu unregelmäßig auf den Betrieben gezogen (ID 6). Es gibt aber auch Vorzeigebetriebe, die sich intensiv damit beschäftigen, was im Boden passiert und deshalb regelmäßig mit N-Gehalt bestimmen:

ID6: „Also leider wird es noch zu wenig gemacht um daraus zu lernen. So sage ich mal es. Es gibt Betriebe, die machen es. Aber das sind wenige. Das sind so Vorbildbetriebe, die haben drei, vier Nitra Check Sets in den Autos rumfliegen und und können ständig mal eben irgendwo reingucken. Und überwachen das und gucken funktioniert das auch hier. Jetzt nach diesem Regen oder bei dieser Kälte oder wie auch immer, funktioniert es trotzdem und so? Oder müssen wir nachhelfen? Oder was machen wir denn? Aber es sind auch leider noch zu wenig Betriebe, die regelmäßig in Nmin Proben nehmen. Das muss man sagen.“

In Gebieten mit intensivem Gemüsebau kommt es laut ID5 aber auch zu „dem Problem, dass ungefähr 1/3 der Flächen werden getauscht, teilweise auch mehr. Und dann wissen die, wenn es gut läuft noch was der Vorbewirtschafter da gemacht hat. Gerade mal Historie: organische Düngung, Kulturen. Da werden wir auch besser im Austausch. Es ist ja auf der anderen Seite auch eine total sinnige Sache. Also sowohl für das Nährstoffmanagement als auch für den Pflanzenschutz, da diesen Fruchtwechsel zu betreiben. Allein flach- und tiefwurzelnd zu wechseln. Also wenn spezialisierte Gemüsebaubetriebe das machen, also da wollen wir den

auch überhaupt nicht ausreden, im Gegenteil. Aber ist ja ein super Bestandteil von so einem integrierten Nährstoffmanagement eigentlich, dass ich da den Wechsel der flachen, kurzen Gemüsekulturen mit vielleicht tiefwurzelnden Getreidekulturen und Zwischenfrüchten mache. Aber für die Düngeplanung ist es ein echtes Problem, weil wir die Historie der Fläche dadurch regelmäßig verlieren.“

Zur Bedeutung des Nährstoffmanagements für die auf den von ihnen betreuten Betrieben befragt gaben die Expert*Innen an, dass die Einstellung des Betriebsleiters hinsichtlich des Nährstoffmanagements einen großen Einfluss hat (ID7, ID8). Aber auch die „Philosophie“ der Bewirtschaftung des Gesamtbetriebes (Ernährung des Bodens statt der Pflanze) und der Kreislaufgedanke haben eine große Bedeutung:

ID2: „Ich glaube, das [Anmerkung: Betriebsgröße, Anzahl Kulturen, Region oder auch Alter des Betriebsleiters] hat ein Einfluss. Und ich glaube aber, dass es auch ein bisschen noch ein Unterschied gibt, weil wir haben wirklich auch sehr viele Betriebe, die nicht ganz so intensiv wirtschaften. Mit den Demeterrichtlinien kommen wir ja in Bereiche, wo die Betriebe einfach sagen ja, wir haben ja oft so Gesamtbetriebskonzepte. Also wir haben einfach eine Tierhaltung mit dabei und dann irgendwo noch einen Gemüsebauzweig. Und dann wird es sehr, sehr gesamt angeguckt. Und dann sind wir nicht bei den höchsten Erträgen und wir sind auch nicht bei den höchsten Stickstoff- und Phosphorzufuhren. Das heißt, da ist noch Luft nach oben, ertragsmäßig. Aber das ist nicht erwünscht.“

ID4: „Ich glaube, vielen geht es sehr stark um Bodenaufbau, Humusaufbau. Eigentlich auch bei der Düngung. Deswegen halt auch so viel Mist, Kompost. Ich glaube, das steht bei vielen so ein bisschen mehr im Vordergrund als die konkrete Nährstoffversorgung. Also ich glaube tatsächlich, manchmal müsste man die Leute eigentlich ein bisschen auffordern, mehr zu düngen. Also nicht alle Betriebe, aber wir haben solche Betriebe, wo ich manchmal denke: Hm, ja, man könnte vielleicht ein bisschen mehr düngen.“

ID4: „Auch von der Philosophie her, die man beim Düngen hat und den Werten, die da halt dahinterstehen. So ein bisschen also auch der Kreislauf Gedanke, dass man nicht so viel betriebsfremde Sachen einführen möchte.“

ID6 steht dieser Philosophie jedoch kritisch gegenüber und berichtete „Es gibt immer noch einzelne Betriebe, die sagen, wir ernähren den Boden und nicht die Pflanze. Diese alte Bio Philosophie, dass wir durch irgendwelche Fruchtbarkeitsmaßnahmen einen schönen Gemüseacker haben und da wächst alles herrlich. Das ist eigentlich von vorgestern.“

Einige Expert*Innen berichten, dass es im ökologischen Gemüsebau bzw. auf ihren Betrieben kein Problem der Überdüngung gibt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Betriebe eher an der Grenze zur Unterversorgung befinden (ID2, ID3). ID7 hingegen meinte, dass „das [Anmerkung: keine Düngung] funktioniert im Gemüsebau einfach nicht und deswegen sind die meisten da bis zu einem gewissen Punkt schon sensibilisiert“. Die Düngung und das Nährstoffmanagement haben aber nicht nur einen Einfluss auf den Ertrag, sondern auch die Qualität des Ernteproduktes. Laut ID6 sind „die Qualitätsansprüche sind heute ja auch so hoch. Und je weiter wir noch mit dem konventionellen Handel zusammenarbeiten wird es auch gar

nicht besser“ und „Es muss anders werden, weil für die Qualitäten brauchen wir in eine Düngeplanung.“ Dabei sollte vermehrt eine kulturspezifische Düngeplanung besonders für Starkzehrer in Betracht gezogen werden wohingegen Schwachzehrer auch ohne (optimale) Düngung zufriedenstellende Erträge und Qualitäten liefern.

Welche EDV-Tools genutzt und von den Berater*Innen empfohlen werden, hing von der eigenen Expertise ab. So empfiehlt ID 3 das Tool von Helm24, da es „das Einzige ist, was womit ich mich persönlich auskenne“ und mit denen recht viel zusammenarbeitet wird. Ein weiteres EDV-Tool, das von ID2 empfohlen wird, ist eine selbstentwickelte Exceltabelle, welche auf dem LTZ Merkblatt zur Düngebedarfsermittlung basiert. Die meisten Expert*Innen empfahlen jedoch kein spezifisches Tool zum Nährstoffmanagement (ID1, ID2, ID7, ID8) bzw. waren der Ansicht Tools wie z.B. NDICEA eher in der Beratung selber genutzt werden sollten (ID 6). Die folgenden Gründe wurden von den Expert*Innen genannt:

ID1: „Aber, dass man dann so tief in die Beratung einsteigt und dass man da jetzt sagt, da gibt's ein Programm, das könnte dir da helfen, das war bisher wenig oder gar kein Thema. Nein.“

ID4: „Ich glaube tatsächlich aus diesem Grund, Doppelbelastung oder Doppelarbeit, würde ich es nicht empfehlen. Außer sie haben wirklich so ein großes Interesse daran. Aber das hatte ich bisher noch nicht. Also sie sehen ja eigentlich am Pflanzenwachstum, ob es passt oder nicht. Und manche haben halt so ihr langjähriges Dünagesystem mit Mist und so weiter. Und dann wird es ja auch immer ein bisschen kompliziert mit langsam wirkenden Düngern. Also auch bei Kompost und so. Also wenn jemand sehr viel Interesse daran hätte und das wirklich noch mal so für sich betrachten würde, dann würde ich mich damit auch nochmal intensiver beschäftigen.“

ID7: „Man muss Anwender sein von der Software, um die wirklich beurteilen zu können. Und das sind wir in der Beratung nicht.“

ID7: „Also nach Software werde ich da tatsächlich weniger gefragt.“

Die Expert*Innen wurden im nächsten Schritt gebeten, Faktoren zu nennen, die eine fördernde Wirkung auf die Nutzung von EDV-Tools im Bereich Nährstoffmanagement haben bzw. welche Faktoren die Betriebe (und auch Berater) daran hindern, die Tools in ihrer praktischen/täglichen Arbeit einzusetzen. Ein Überblick über die Aussagen zu den fördernden und hindernden Faktoren ist in Tabelle 2.3–10 zu finden. Als größten Vorteil nannten die Expertinnen in den Interviews die Vernetzung solcher Tools mit bereits auf den Betrieben genutzten Programmen und Plattformen, wie beispielsweise Ackerschlagkarteien oder Düngeportalen. Damit verbunden ist, dass Daten nicht mehrfach von Betrieben oder Beraterinnen eingegeben werden müssen. Zudem wäre es förderlich, wenn die Tools die gesamte gesetzlich geforderte Dokumentation abdecken könnten.

Als größte Einschränkung sehen die Expertinnen den zusätzlichen Zeitaufwand und die Doppelbelastung durch die aufwändige Dateneingabe, insbesondere bei der erstmaligen Nutzung dieser Tools. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass sowohl Betriebe als auch viele Berater*Innen bereits stark ausgelastet sind. Zu ihren Aufgaben gehören unter anderem die

Tabelle 2.3–11: Fördernden und hemmende Faktoren für die Nutzung von EDV-Tools - Ergebnisse der Expert*Inneninterviews

Fördernde Faktoren		Hindernde/Hemmende Faktoren	
	ID		ID
Mobile Anwendung (App, Information zur N-Nachlieferung)	1,5	Bereits hohe Belastung der Betriebe durch Bürokratieraufwand/ Dokumentationspflichten	1,5,6,7
Vernetzung (mit Ackerschlagkartei, Düngeportalen, Fiona und anderen Programmen)	1,2,5,6,7	Kein (sofortiger) Mehrwert erkennbar	1,5,6,7,8
Einfache und intuitive Handhabung (z.B. Nutzung direkt auf dem Feld)	1	Zu kompliziert	1
Beinhaltet (gesamte) gesetzlich geforderte Dokumentation	2,4,7,8	Zusätzlicher Zeitaufwand/ Doppelbelastung	1,2,4,5,6,7,8
Vollständige Ablage und Dokumentation (z.B. von Ergebnisse d. Bodenprobenanalyse) → alle Informationen für den Schlag sind übersichtlich dargestellt	2	Einarbeitung notwendig	1,7
Praxistauglichkeit	8	Nur Teilerfüllung des gesetzlich Geforderten	2
Keine Doppeleingabe notwendig	4,5,7,2	Freiwilligkeit der Nutzung	2
Deutliche Vereinfachung der Eingabe	5, 7	Dokumentationsdatum nachträglich nicht anpassbar	
Mitberücksichtigung der Schlaghistorie	5	Probleme bei der Nutzung des Tools (Serverprobleme, Tool hängt sich auf, Fehlermeldungen)	2,3,7
Modellierung der N-Verfügbarkeit/ Freisetzung und Humusbilanzierung	6,7	Ohne Verknüpfung kein Weiterkommen auf Betriebsebene und in der Beratung	6,7
Preis-Leistungs-Verhältnis (kostenlos vorteilhaft)	8	Berechnete Düngebedarfs-ermittlung hilft keinem Gärtner weiter/ keine Aussage was gedüngt werden muss	2
Geringer zeitlicher Aufwand notwendig	8	Kosten der Betriebsmittel zu niedrig	3,5
Mehrwert verdeutlichen	8	Betriebe wollen die Tools nicht nutzen	3
Mehr Werbung (z.B. mit Hinweisen auf für den ökologischen Gemüsebau validierten Daten)	6,8	Kein PC vorhanden	3
Nutzung muss verpflichtend sein	2	Länderspezifische rechtliche Regelungen	5
		Berater sind selbst skeptisch gegenüber den EDV-Tools zum Düngemanagement	6
		Überlastung der Berater	6
		Fehlende Bekanntheit der Tools	6
		Ungewissheit - wie schnell werden gesetzliche Änderungen eingearbeitet	6,7
		Weit weg von Praxis	8

gesetzlich vorgeschriebene Dokumentation und der damit verbundene bürokratische Aufwand. Dies führt dazu, dass neue Tools – oder digitale Anwendungen generell – auf Widerstände stoßen, insbesondere, wenn für die Betriebe kein unmittelbarer Mehrwert erkennbar ist.

Die Notwendigkeit der Unterstützung der Betriebe durch die Berater*Innen selbst oder aber eine externe Beratung durch Firmen im Hinblick auf das Nährstoffmanagement und der Düngeplanung ist laut ID3 nicht immer gegeben. ID3 würde selbst keine DBE für die Betriebe machen, sondern „ich berate sie gerne“ und „ich setze mich auch mit denen gerne zusammen“. ID3 findet, dass eine eigene Düngeplanung durch die Betriebe selber „einen gewissen Lerneffekt für die Betriebe [hat]. Ich glaube viele Betriebe wissen überhaupt nicht, was da passiert. Die fahren Schema F. Auch ID8 und ID5 geben an, dass die Betriebe die Planung selber machen: „Das machen die Landwirte alles alleine. Da helfe ich in dem Sinne in diesem Fall nicht mit.“ (ID8); „Die machen die selber bzw. werden dabei unterstützt.“ (ID5)

Für ID6 steht die Düngeplanung der Betriebe „total im Zentrum der Beratung“. In der Beratungsarbeit von ID6 kommt auch der NitraCheck als Beratungswerkzeug zur aktuellen N-Versorgung der Fläche zum Einsatz. Dieser würde auch schon bei vielen Betrieben eingesetzt werden, „Aber es wird noch zu wenig gemacht. Aber die Einsicht, dass es mehr sein müsste, ist bestimmt da. Aber von der Einsicht bis zum Tun ist noch ein bisschen weg.“ (ID6)

Auch ID1 gibt an, dass Betriebe einige Betriebe offen für eine zusätzliche Düngeberatung wären, da dies „Ihnen da auch ein Stück weit Arbeit abnimmt“. Auch hier wurde auf den Einsatz des NitraChecks als mögliches Beratungstool auf dem Feld verwiesen. „Wenn ich das natürlich im Gepäck hätte, [...] wäre es natürlich auch sinnvoll um auch so Ist Zustände besser zu haben. Das man sagt, manche machen ja auch schon Versuche, da die Vorfrucht so, da die Vorfrucht so. Wenn man da dann nochmal genauer nachschauen könnte, was ist denn heute an Nmin da. Braucht die Kultur noch was, oder braucht sie nichts, weil sie schon mit allem versorgt ist. Also ich glaube da ist schon wenig Wissen da. Oder dann die Zeit fehlt da auch um da genauer Hinzuschauen. Und wenn da jemand von Extern kommt, ne Bodenproben zieht, Nmin Untersuchungen macht, irgendwas in die Richtung, dann wäre das sicher hilfreich für einige Betriebe. Also gerade in der Saison hat man dafür zu wenig Zeit.“

2.3.3.2.3.3 Beratung und Weiterbildung zu Tools zum Nährstoffmanagement

Die Expert*Innen gaben an, dass zur Einführung der neuen Düngeverordnung (ID7) oder der Einführung des landeseigenen Tools vermehrt Weiterbildungsangebote von den Behörden und nachgeordneten Einrichtungen gab. Für Gemüsebaubetriebe und –berater*Innen gab es z.B. in Baden-Württemberg die Vorstellung von Düngung BW durch die Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG) Heidelberg (ID2, ID4). In NRW finden nach Aussage der Expert*Innen 5 und 6 regelmäßig Veranstaltungen für Berater (intern) und auch für die Betriebe selbst statt. Es werden Veranstaltungen mit Berater*Innen aus anderen Bundesländern und überverbandliche Treffen durchgeführt. Diese haben immer unterschiedliche Themengebiete und beschäftigen sich unter anderem auch mit dem Thema Düngung. In Niedersachsen werden laut der Aussage von ID8 die Weiterbildungen durch die Officialberatung der Landwirtschaftskammer Niedersachsen oder durch den Experten selbst durchgeführt. ID1 und

ID3 gaben an, dass sie nicht wissen, ob die Officialberatung in ihrem Bundesland Weiterbildungen anbieten.

Der direkte Kontakt und Austausch mit Herstellerfirmen scheinen sehr limitiert zu sein. Grund dafür kann laut den Expert*Innen die falsche Zielgruppe (kleine Betriebe) (ID4), zu wenige Betriebe die Biogemüse produzieren (ID6, ID7) sowie eine fehlende Spezialisierung der Software bzw. eine nicht den Vorstellungen/Ansprüchen entsprechende Software sein (ID7, ID8). ID3 gab jedoch an, dass Firmen bei ihm als Berater anfragen, was die Betriebe brauchen und wie man dies implementieren könnte. Andere Expert*Innen wurden durch Veranstaltungen auf diese Tools (nicht primär im Zusammenhang mit Düngung/Nährstoffmanagement) aufmerksam (ID2) und gingen aktiv auf die Firmen zu (z.B. von Ackerschlagkartei) und luden diese auf Veranstaltungen ein (ID5).

Auch Schulungen bzw. Weiterbildungen im Bereich Düngung und Nährstoffmanagement halten die Expert*Innen sinnvoll. Für EDV-Tools wie NDICEA und N-Expert sollten diese vor allem für die Beratung angeboten werden:

ID7: „Sinn macht es, glaube ich, auf alle Fälle, vor allem für die Beratung. Und ich glaube, wenn der Berater überzeugt ist, dass das dem Betrieb was bringt und dass es eine Arbeitserleichterung ist oder dass es ihm Stickstoff spart. Und den Betrieb so vermittelt wird, dann hat der Betrieb da Interesse dran. Aber der ist erst mal sehr skeptisch. Also von sich aus den Impuls ...Ich habe jetzt Bock auf eine neue Software... Ja, das ist eher unwahrscheinlich.“

ID 6: „Ich würde erstmal an die Berater rangehen.“

Auch ID8 gibt an, dass „man vielleicht erst den ersten Schritt auf die Berater gehen zu gehen. Sonst entsteht häufig der Eindruck - Ja, die sind ja noch im quasi Versuchsmodus da und jetzt verschwende ich oder investiere hier meine Zeit und es dauert noch, bis die Praxisreife da erreicht ist. Das finde ich, kann man vielleicht den ersten Schritt über die Beratung gehen und da schauen.“ ID8 merkt aber auch an, dass die Tools dafür voll entwickelt sein sollten und sich nicht noch in einer Testphase befinden sollten „Wenn ein bestimmtes Niveau erreicht ist, dann gucke ich mir das gerne an und bin gerne auch dabei. Solange es noch im Versuchsstadium oder im Trial-and-Error Stadium ist würde ich erstmal davon absehen und den anderen Kollegen, die sich wirklich intensiver mit den Dingen befassen, den Vorrang lassen.“

Inhaltlich sollte in den Schulungen den Teilnehmer*Innen unter anderem gezeigt werden „wie falsch vorgegangen wird, welches Potenzial durch das Programm eigentlich entsteht, nicht nur Dünger einzusparen. Da ist sicher auch ein Riesenpotenzial. Sondern auch also eben Verluste minimieren und wirklich bedarfsgerecht zu düngen.“ (ID 6). Aber auch eine Zielwertsuche wäre laut ID3 sinnvoll „im Sinne von, welches Düngemittel setze ich ein um da Bestmöglich alle Parameter bedienen kann, im Sinne von Phosphat und meinetwegen dann auch Schwefel.“

2.3.3.3 Fazit

Der ökologische Gemüsebau zeichnet sich durch seine Vielfalt aus, hat jedoch im Vergleich zum konventionellen Gemüseanbau einen relativ kleinen Marktanteil. Es gibt sowohl viele kleine Betriebe mit einer großen Anzahl an Kulturen als auch hochspezialisierte Betriebe mit wenigen Kulturen, die für die Industriegemüseproduktion bestimmt sind.

Die Anforderungen an EDV-Tools variieren daher stark je nach Betrieb. Zudem gibt es Unterschiede in der generellen Nutzung von EDV-Tools: Größere Betriebe und solche mit jüngeren Betriebsleitern setzen digitale Lösungen häufiger ein als kleinere Betriebe oder solche mit älteren Betriebsleitern. Während größere Betriebe aufgrund regulatorischer Vorgaben zur umfangreichen Dokumentation verpflichtet sind, fallen viele kleinere Betriebe unter bestimmte Schwellenwerte und müssen daher weniger oder keine Dokumentation nachweisen.

Generell wünschen sich Betriebe EDV-Tools, die einfach, übersichtlich und intuitiv zu bedienen sind – idealerweise mit mobilen Anwendungen (z. B. Apps, webbasierte Lösungen), die direkt auf dem Feld genutzt werden können. Der bürokratische Aufwand für landwirtschaftliche Betriebe ist bereits hoch, bedingt durch rechtliche Vorgaben wie die Düngeverordnung (DüV), die EU-Öko-Verordnung, Anforderungen von Verbänden und weiteren zunehmende Dokumentationspflichten. Viele Daten müssen heute schon mehrfach in verschiedenen Systemen (z. B. Düngeportale, Ackerschlagkarteien) erfasst werden.

Zusätzliche EDV-Tools wie die im Projekt weiterentwickelten und für den ökologischen Gemüsebau validierten Tools N-Expert und NDICEA bedeuten für Anwender*innen einen zusätzlichen Aufwand, da dort erneut Daten eingegeben werden müssen, die bereits für Förderanträge, Verbände oder rechtliche Dokumentationen erfasst wurden. Dabei können beispielsweise Düngebedarfsermittlungen in anderen Systemen bereits berechnet und dokumentiert werden. Eine Schnittstelle zu den Düngeportalen der Bundesländer, zur Ackerschlagkartei oder eine Integration der entwickelten EDV-Tools in bestehende Systeme wäre eine sinnvolle Lösung, um doppelte Dateneingaben zu vermeiden und die ohnehin begrenzte Arbeitszeit der Betriebe nicht weiter zu belasten. Bleibt das aufwändige Eintragen der Daten bestehen, ist nicht mit einer starken Nutzung von N-Expert und NDICEA im ökologischen Gemüsebau zu rechnen.

Die föderale Struktur Deutschlands und die damit verbundenen Unterschiede zwischen den Bundesländern – beispielsweise in der Umsetzung der Düngeverordnung und anderen Anforderungen an die Betriebe – stellen eine große Herausforderung dar. Eine Vereinheitlichung der Datenerfassung könnte hier Abhilfe schaffen. Auch für die landwirtschaftliche Beratung hätte dies Vorteile: Berater*innen könnten Tools wie NDICEA gezielter in ihre Arbeit integrieren. Allerdings ist auch für sie der Arbeitsaufwand hoch, sodass sie sich meist nur in Einzelfällen (z. B. in der Officialberatung) intensiv mit den EDV-Tools beschäftigen und die Auswertung für Betriebe übernehmen können.

Aktuell sind N-Expert und NDICEA vor allem in der landwirtschaftlichen Beratung bekannt, da Berater*innen bereits durch Workshops informiert wurden. Innerhalb der Betriebe sind die Tools hingegen kaum verbreitet und werden nur vereinzelt eingesetzt. Eine gezielte Werbekampagne ist notwendig, um die Bekanntheit zu steigern und den betrieblichen Nutzen der Tools klar zu kommunizieren. Dabei sollte besonders hervorgehoben werden, dass diese speziell für den ökologischen Gemüsebau in Deutschland validiert und optimiert wurden.

Zusätzlich ist ein erweiterter Support für die Tools erforderlich, um beispielsweise rechtliche Änderungen zeitnah einzuarbeiten und den Anwender*innen Rechtssicherheit bei der Nutzung und Dokumentation zu bieten.

2.3.4 Status-Quo-Analyse des Nährstoffmanagements auf Gartenbaubetrieben mit Solidarischer Landwirtschaft in Baden-Württemberg

In der ökologischen Landwirtschaft gewinnt die solidarische Landwirtschaft (SoLaWi) zunehmend an Bedeutung. Sie verfolgt einen ökologischen, regionalen und sozial gerechten Ansatz, indem sie Landwirt*Innen und Verbraucher*Innen in einer direkten Kooperation verbindet. Alternative Landwirtschaftssysteme, wie die SoLaWi und die Marktgärtnerei (= biointensiver Gemüsebau auf kleiner Fläche für die Direktvermarktung), stellen konventionelle Produktionsmethoden infrage, die in der Vergangenheit häufig auf Profitmaximierung ausgerichtet waren, ohne ökologische oder soziale Auswirkungen ausreichend zu berücksichtigen. Diese alternativen Konzepte setzen stattdessen auf nachhaltige, ressourcenschonende und gemeinschaftsorientierte Bewirtschaftungsweisen. Die Bewirtschaftungsprinzipien der SoLaWi sind jedoch nicht einheitlich festgelegt. Während einige Betriebe nach EU-Öko-Standards oder sogar nach Verbandsrichtlinien arbeiten, sind viele Betriebe nicht zertifiziert und unterliegen keinen strikten Regelungen und Vorgaben. Auch die Betriebsgrößen sind vielfältig und sind z.B. kleine Gemüsebaubetriebe, bis hin zu großen Betrieben mit bis zu 450 ha (Oekolandbau.de, 2024).

Ein Großteil der SoLaWis ist auf den Gemüseanbau spezialisiert, da regional und nach ökologischen Prinzipien produziertes Gemüse stark von den Verbraucher*Innen nachgefragt wird. Viele SoLaWis wurden erst in den letzten Jahren gegründet und sind daher noch sehr jung. Die SoLaWis werden oft von Quereinsteiger*Innen geleitet, welche keine oder wenige Vorkenntnisse in der Landwirtschaft haben. Der Gemüseanbau stellt jedoch besondere Anforderungen an die Betriebe, gerade hinsichtlich der Nährstoffversorgung. Gemüsekulturen haben aufgrund ihres schnellen Wachstums, der kurzen Vegetationsperioden und mehrerer Ernten pro Saison einen hohen Nährstoffbedarf. Gleichzeitig werden durch die Ernte große Mengen an Nährstoffen entzogen und aus dem Betrieb exportiert. Damit stellen SoLaWis eine neue Form des intensiven Gemüsebaus dar, der durch seinen hohen Spezialisierungsgrad vermehrt viehlos oder vieharm betrieben wird. Eine Kreislaufwirtschaft, wie diese auf viehhaltenden ökologischen Betrieben praktiziert wird, finden auf solchen Gemüsebaubetrieben nicht statt und Düngemittel müssen größtenteils zugekauft werden.

Aufgrund ihrer geringen Anbauflächen fallen viele SoLaWis nicht unter die DüV und müssen keine Düngeplanung mit Hilfe der Düngebedarfsermittlung (DBE) durchführen. Dies betrifft beispielsweise in Baden-Württemberg Betriebe mit Gemüseanbauflächen von weniger als 2 ha oder Betriebe, die keine wesentlichen Nährstoffmengen an N und/oder P ausbringen ($>50 \text{ kg N}$ oder $>30 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha Jahr}^{-1}$) (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), 2025a). Weiterhin unterliegen landwirtschaftliche und gärtnerische Betriebe einer Aufzeichnungspflicht und müssen sämtliche Düngemaßnahmen dokumentieren. SoLaWis sind jedoch von dieser Pflicht ausgenommen, wenn sie weniger als 3 ha Gemüse anbauen, keinen Stickstoffeintrag aus eigener Viehhaltung haben und weder Wirtschaftsdünger noch Gärrückstände ausbringen. Werden Komposte zugekauft, unterliegen die SoLaWi-Betriebe jedoch der Bioabfallverordnung (BioAbfV). Gemäß dieser ist die maximale Ausbringungsmenge von Kompost begrenzt. Sie beträgt höchstens 20 t Trockenmasse (TM) ha^{-1} innerhalb von drei Jahren. Wird jedoch nachgewiesen, dass die

Schwermetall-Grenzwerte niedrig sind, kann die Ausbringungsmenge auf bis zu 30 t TM ha⁻¹ erhöht werden (Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, 2024).

Sowohl SoLaWis als auch Marktgärtnereien sind noch vergleichsweise junge Konzepte, die zunehmend im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen stehen. Obwohl SoLaWis bestimmten Prinzipien folgen, unterliegen sie, falls sie nicht zertifiziert sind, keiner gesetzlichen Regelung wie der EU-Öko-Verordnung. Die Umsetzung spezifischer Maßnahmen erfolgt auf freiwilliger Basis und hängt stark von der individuellen Motivation der Betriebsleiter*Innen ab. Daher gibt es große Unterschiede zwischen den einzelnen SoLaWis – auch hinsichtlich des Nährstoffmanagements. Regionale Wertschöpfungsketten, geschlossene Stoffkreisläufe und der Verzicht auf synthetisch hergestellte Düngemittel gehören zu den grundlegenden Prinzipien. Jeder Betrieb entscheidet meist selbstständig welches Düngemittel genutzt wird, welche Kultur wann gedüngt und wieviel Dünger ausgebracht werden muss. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welchen Stellenwert das Nährstoffmanagement auf den Betrieben hat, wie die Düngung geplant wird und welche Kriterien dabei ausschlaggebend sind. Da die Betriebsleiter*innen häufig Quereinsteiger*innen sind und keine landwirtschaftliche oder gärtnerische Ausbildung haben, können sich Wissenslücken im Düngemanagement in der Praxis niederschlagen. Solche Wissenslücken können einerseits zu umweltgefährdenden Nährstoffausträgen führen oder andererseits zu Ertrags- und Qualitätsverlusten aufgrund ungenügender Düngung. Darüber hinaus haben SoLaWis durch den engen Kontakt zu ihren Mitgliedern und eine intensive Kommunikation mit den Verbrauchern eine große Auswirkung auf die Wahrnehmung der Düngung ganz allgemein in der Gesellschaft. Durch Expert*Inneninterviews mit verschiedenen Betriebsleiter*Innen wurden in Nutri@Ökogemüse qualitative Daten zum Thema Nährstoffmanagement auf SoLaWi-Betrieben in Baden-Württemberg gesammelt. Weiterhin wurde für Betrieb 4 eine Hoftorbilanz berechnet und dabei die Anwendung der beiden EDV-Tools N-Expert und NDICEA für die Nutzung in SoLaWis getestet.

2.3.4.1 Expert*Inneninterviews zur Bedeutung der Nährstoffversorgung in der Solidarischen Landwirtschaft und Status Quo Bestimmung der aktuellen Statusversorgung auf verschiedenen Betrieben

2.3.4.1.1 Einleitung

Die Düngung auf SoLaWi- Betrieben und Marktgärtnereien scheint so vielfältig zu sein wie die Betriebe selbst. Gerade der Gemüseanbau stellt durch seine Besonderheiten (schnelles Wachstum der Kulturen, kurze Vegetationszeit, mehrere Ernten pro Jahr) hohe Anforderungen an die Düngung und das Nährstoffmanagement. Im Rahmen der Expert*Inneninterviews wurde untersucht, welchen Stellenwert die Düngung und das Nährstoffmanagement auf den Betrieben hat, welche Düngemittel eingesetzt werden und nach welchen Kriterien gedüngt wird. Weiterhin sollten die Expert*Innen die Herausforderung bzgl. der Nutzung und Akzeptanz von Nährstoffmanagementtools wie N-Expert und NDICEA einschätzen. Durch die Interviews sollen praxisnahe Erkenntnisse zum Nährstoffmanagement in SoLaWis und Marktgärtnereien gewonnen werden um dieses gezielt weiterzuentwickeln.

2.3.4.1.2 Material und Methoden

Die qualitativen Daten wurden durch semistrukturierte Experteninterviews erhoben. Der Fragenkatalog wurde in drei Themenbereiche gegliedert und umfasste die Bereiche: (1) Allgemeine Betriebsdaten, (2) Gemüseanbau und (3) Nährstoffversorgung. Durchgeführt wurden die Experteninterviews im Zeitraum vom Juni-Juli 2024 mit Mitarbeitenden, beziehungsweise Expert*Innen der neun ausgewählten Betriebe. Als Expert*In wird eine Person definiert, welche über ein Wissen verfügt, dass sie nicht unbedingt allein haben muss, welches jedoch trotzdem nicht für jeden zugänglich ist (Meuser und Nagel, 2009). Die Expert*Innen sollten ihr Wissen in der Praxis anwenden können und die Fähigkeit haben, andere damit leiten zu können. In der vorliegenden Studie bedeutet dies, dass die Person aktiv im Betrieb mitarbeitet, sowie Verantwortung trägt und bei der Planung des Gemüseanbaus mitwirkt. Dabei sind die Befragten als Repräsentanten einer spezifischen Gruppe zu betrachten und nicht als Einzelperson (Flick, 2014).

Expert*Innen aus 9 verschiedenen Betrieben wurden interviewt (Tabelle 2.3–11). Die Betriebe sind zwischen 0,25 ha und 70 ha, und bauen auf 5-100% der Betriebsfläche Gemüse an. Gegründet wurden die SoLaWis bzw. die Gemüsegärtnerei vor bis zu 9 Jahren. Vier Betriebe sind aktuell nach EU-ÖKO zertifiziert oder Mitglied von Bioland oder Demeter.

Tabelle 2.3–12: Betriebe, die an der qualitativen Umfrage zur Erhebung der Düngestrategien in Solidarischen Landwirtschaften und Marktgrößereien teilgenommen haben.

Betrieb	Alter (Jahre)	Größe (ha)	Anteil Gemüse an der Anbaufläche (%)	Betriebszweige	Gewächshaus	Zertifizierung ökologischer Landbau	Betriebsstruktur
1	1	0,37	100	Gemüse	Nein	Nein	SoLaWi
2	5	0,8	100	Gemüse	Nein	Nein	SoLaWi
3	9	70	5	Gemüse, Grünland	Ja	Bioland	SoLaWi + bäuerlicher Familienbetrieb
4	3	8	20	Gemüse	Ja	EU-Öko	SoLaWi
5	5	0,25	100	Gemüse	Ja	Nein	SoLaWi
6	9	1	30	Gemüse	Ja	Demeter	SoLaWi
7	4	0,4	100	Gemüse	Ja	Nein	Gemüsegärtnerei mit solidarischem Ansatz
8	4	6	30	Gemüse, auch Obst, Getreide, Kartoffeln, Viehhaltung	Nein	EU-Öko	SoLaWi
9	9	0,3	100	Gemüse	Ja	Nein	SoLaWi

Der Fragebogen bestand aus insgesamt 22 Fragen (siehe Anhang 6.4), die Interviews wurden persönlich, per Telefon oder über Zoom (Zoom Communications, Inc, San Jose, USA, 2011) geführt und jeweils aufgezeichnet. Alle interviewten Personen stimmten einer Aufnahme und Transkription des Gespräches zu. Die Interviews dauerten zwischen 17 und 49 Minuten. Angaben zu den Personen werden anonymisiert. Zusätzlich wurden auf allen Betrieben

Bodenproben (0-60cm) von drei verschiedenen Flächen im April/Mai 2024 gezogen und der $N_{\min}$ -Gehalt bestimmt sowie eine Grundbodenanalyse durchgeführt. Außerdem wurde Proben der zu dem Zeitpunkt auf dem Betrieb lagernden Düngemittel genommen und analysiert (C, N, P, K, Mg, S, Cl).

2.3.4.1.3 Transkription und Datenauswertung

Transkribiert wurden die Experteninterviews mit dem Audio-zu-Text-Konverter-Tool „Sonix“ (Sonix, Inc.; San Francisco, USA, 2017). Dabei werden die aufgenommenen Audio-Dateien hochgeladen und automatisch transkribiert. Danach wurden die transkribierten Texte noch einmal auf Richtigkeit überprüft und nach den Regeln von Kuckartz und Rädiker (2022) aufbereitet (siehe Tabelle 2.3–9, Kapitel 2.3.3.2.2).

Für die Auswertung wurde die Software MAXQDA Analytics Pro (Version 24.7.0, VERBI GmbH; Berlin, Deutschland, 1995) verwendet. Ein Kodierleitfaden wurde erstellt und die gesammelten Daten in Kategorien unterteilt. Durch die qualitative Inhaltsanalyse können aus umfangreichem Material gezielt wichtige Informationen entnommen werden. Es wurde die Methode der inhaltsanalytischen Zusammenfassung gewählt, bei welcher das Material so reduziert wird, dass das Wesentliche erhalten bleibt, jedoch noch immer einen Überblick über das Gesamte darstellt (Mayring, 2022). Die Ergebnisse, welche durch den Kodierleitfaden und die Kategorien zusammengefasst wurden, wurden mithilfe der Summary- Tabellen aus MAXQDA exportiert. Die Darstellung gewählter Ergebnisse erfolgte mithilfe von Microsoft Excel (Version 16.77.1, Microsoft Corporation; Washington, USA, 1982).

2.3.4.1.4 Ergebnisse

2.3.4.1.4.1 Status Quo – Düngung und Nährstoffversorgung auf SoLaWi-Betrieben

Die Ergebnisse der Bodenproben zeigen deutliche Unterschiede in den $N_{\min}$ -Gehalten zwischen den Betrieben (Abbildung 2.3-10). Für die Betriebe 3 und 6 konnten sehr ausgeglichene und vergleichsweise niedrige $N_{\min}$ -Gehalte in 0-60cm festgestellt werden. Diese lagen im Mittel bei $61,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ und $63,4 \text{ kg N ha}^{-1}$. Im Gegensatz dazu wurden im Betrieb 7 deutlich höhere $N_{\min}$ -Gehalte im Mittel von 265 kg N ha^{-1} festgestellt. Aber auch innerhalb der Betriebe konnten Unterschiede im $N_{\min}$ -Gehalt festgestellt werden. So unterschieden sich die Flächen von den Betrieben 7 und 8 voneinander, die $N_{\min}$ -Gehalte auf bestimmten Flächen waren mehr als dreimal so hoch als auf anderen (Betrieb 7: Fläche 3 (450 kg N ha^{-1}) vs. Fläche 1 (127 kg N ha^{-1}) und Betrieb 8: Fläche 1 ($25,5 \text{ kg N ha}^{-1}$) vs. Fläche 3 (150 kg N ha^{-1})).

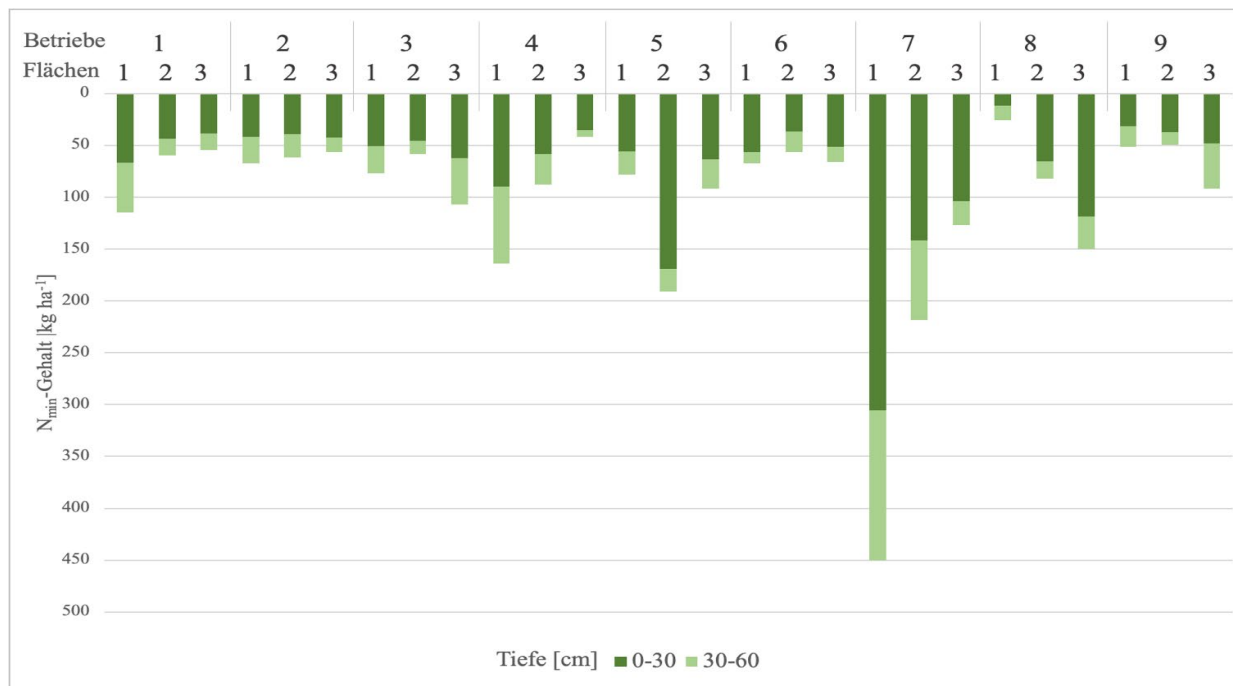


Abbildung 2.3-10: Nmin-Gehalte in 0-30 und 30-60 cm Tiefe pro Fläche (n=27) der neun Betrieben mit Solidarischer Landwirtschaft.

Die pH-Werte lagen zwischen 4,96 (Betrieb 3) und 7,30 (Betrieb 1) und es wurden Humusgehalte zwischen 1,7% und 8,4% auf den Betrieben gefunden (Tabelle 2.3–12). Auf Betrieb 5 wurden auf allen beprobten Flächen die höchsten Humusgehalte mit <5% festgestellt. Auch für die Nährstoffe wurden große Unterschiede zwischen den Betrieben gefunden. P2O5 lagen zwischen 3,99 (Betrieb 3, Fläche 3) – 122 mg 100g⁻¹ TM (Betrieb 1, Fläche 1) und K2O zwischen 6,26 (Betrieb 3, Fläche 2) und 63,3 mg 100g⁻¹ TM (Betrieb 7, Fläche 2).

Tabelle 2.3–13: Gehalt von P₂O₅, K₂O, Mg, Ca sowie der pH-Wert und Humusgehalte im Boden für alle Betriebe. (n=27); Großbuchstaben geben die Gehaltsklassen für P₂O₅, K₂O und Mg nach LTZ (2025b) an.

Betrieb	Fläche	P ₂ O ₅		K ₂ O		Mg		Ca	Humus- gehalt	pH
		[mg 100 g ⁻¹ TM]							[%]	
1	1	122	E	43,1	E	23,1	E	5212	4,02	7,16
1	2	58,6	E	34,0	D	24,1	E	3983	2,98	7,30
1	3	60,5	E	31,3	D	28,6	E	4451	3,40	7,21
2	1	11,3	C	22,9	C	22,7	E	537	-	6,64
2	2	10,9	C	31,4	D	23,1	E	407	2,61	6,36
2	3	11,6	C	30,2	D	26,0	E	417	2,27	6,42
3	1	5,94	A	9,06	B	9,08	C	353	1,97	6,20
3	2	6,50	B	6,26	A	8,56	C	308	2,05	5,99
3	3	3,99	A	7,52	B	11,7	C	239	2,47	4,96
4	1	13,0	C	15,7	C	27,3	E	2026	2,39	7,08
4	2	11,2	C	22,4	C	11,4	C	341	1,72	6,31
4	3	10,7	C	17,1	C	5,27	B	308	4,83	5,61
5	1	48,4	E	31,3	D	13,4	C	597	8,37	6,57
5	2	42,0	E	17,8	C	22,6	E	899	5,67	6,47
5	3	67,8	E	34,8	D	9,43	C	3309	5,11	6,94
6	1	43,8	E	19,0	C	28,1	E	1244	2,27	6,99
6	2	15,0	C	19,5	C	16,1	D	545	2,23	6,69
6	3	31,2	D	26,2	D	16,2	D	656	4,69	6,74
7	1	47,5	E	58,9	E	21,5	E	818	4,73	6,69
7	2	34,9	D	63,3	E	20,9	E	716	1,90	6,82
7	3	17,5	C	29,3	D	9,88	C	313	2,13	6,34
8	1	13,1	C	25,7	C	12,1	C	194	2,04	5,50
8	2	12,5	C	12,4	B	6,05	B	176	4,45	5,14
8	3	39,2	E	24,2	C	7,66	B	415	2,42	6,29
9	1	6,72	B	11,8	B	16,1	D	324	2,76	5,29
9	2	8,04	B	10,8	B	10,6	C	1367	2,81	7,15
9	3	22,1	D	28,8	D	14,5	D	489	2,01	6,55

Um den Status quo der Nährstoffversorgung in den Betrieben zu ermitteln, wurden die verwendeten Düngemittel erfasst und kategorisiert (Tabelle 2.3–13). Insgesamt wurden 25 verschiedene Düngemittel genannt, darunter 16 organische Handelsdünger, drei Mineraldünger, Komposte sowie fünf verschiedene Wirtschaftsdünger. Die Analyseergebnisse der Düngemittel sind im Anhang 6.5 zu finden.

Organische Düngemittel pflanzlicher Herkunft sowie die Grunddünger und das Produkt Vegetal mit Horn gehören zu den NPK-Mehrnährstoffdüngern. Keratindünger, wie Haar- und Horn sind als N-Düngemittel zu betrachten. Patentkali ist ein Mehrnährstoffdünger und dient zugleich als Kalium-, Magnesium- und Schwefeldünger. Algenkalk zählt zu den Kalkdüngern und besteht hauptsächlich aus Calciumcarbonat, während Gesteinsmehl – abhängig von der Gesteinsart – unterschiedliche Mineralstoffe wie Kalium, Calcium und Magnesium enthalten kann (Knittel et al., 2020).

Tabelle 2.3–14: Kategorisierung der genannten verwendeten Düngemittel (n=47) *Düngemittel aus dem eigenen Betrieb.

Betrieb	Organische (Handels-) Dünger	Grunddünger	Mineraldünger
1	Siforga ^z , Haarmehlpellets	-	-
2	BioAgenasol ^z , Hornpellets	-	-
3	Haarmehlpellets	Grüngutkompost	Patentkali, Algenkalk
4	Vinasse, Hornmehl, PhytogranGOLD ^z , Schafwollpellets, Haarmehlpellets, Vegetal mit Horn	-	-
5	Brennnesseljauche*, Hornmehl, Hornspäne	Kompost*, Pflanzenkompost	-
6	Vinasse, Schafwollpellets, Brennnesseljauche, PalaterraBIO ^z	Kompost*, Grüngutkompost, Festmist, Mist (Stroh), Mist (Dinkelspelz)	-
7	Vinasse, Luzernepellets, Hornspäne, Horngrieß, Schafwollpellets, Schafwolle*	Kompost*, Grüngutkompost, Festmist (Huhn)	Algenkalk, Gesteinsmehl
8	Schafwolle*	Festmist (Schaf, Huhn)* Festmist (Pferd)	-
9	Vinasse, Brennnesseljauche*, BioRegioErde ^z , Schafwolle	Kompost, Kompost*	-

^zSiforga: organischer NPK Dünger aus pflanzlichen Rohstoffen; BioAgenasol: NPK-Dünger aus pflanzlichen Reststoffen (aus Alkoholgewinnung) & Melasse; PhytogranGOLD: organischer NPK Dünger aus Reststoffen der Verarbeitung von Mais, Getreide, Kartoffel und Zuckerrüben; PalaterraBIO: organischer NPK-Dünger mit Pflanzenkohlen, Ton- und Gesteinsmehlen, Mikroorganismen und Bodenpilzen; BioRegioErde: Kultursubstrat mit NPK-Düngern (vegan)

Betrieb 8 hat eine eigene Viehhaltung (100 Legehennen, 20 Mutterschafe), deren Mist und Schafwolle zur Nährstoffversorgung genutzt wird. Zudem besteht das Ziel, die Tierhaltung stärker in die Fruchtfolge zu integrieren: „Also bisher habe ich eigentlich einfach nur Pferdemist von jemandem bekommen und dann Mist von den eigenen Viechern. Ich habe wenig Mist, weil die Schafe, die draußen sind, sind immer nur kurz auf dem Acker um Begrünung abzuweiden.“

Und Hühner, das sind 100 Legehennen, die sind natürlich auch tagsüber draußen. Ich würde gerne versuchen, dass ich auf Dauer die Tiere mehr auf den Acker kriege.“

Betrieb 9 hält eigene Hühner (<20), die jedoch nicht in den Nährstoffkreislauf integriert sind. Eine Futter-Mist-Kooperation (FMK) bestand in Betrieb 3 in der Vergangenheit, wird jedoch aktuell nicht mehr praktiziert.

Sieben Betriebe stellen ihren eigenen Kompost her. In den Betrieben 1 und 4 erfolgt keine aktive Kompostierung, sodass kein eigener Kompost als Dünger eingesetzt wird. Vier Betriebe (Betriebe 5, 6, 7 und 9) berichteten, dass die eigene Kompostmenge nicht ausreicht und daher der Großteil zugekauft wird:

Betrieb 7: „Den kaufen wir zu, weil wir so viel Kompost gar nicht produzieren könnten. Unseren eigenen Kompost, den nutzen wir eigentlich eher, wenn wir merken, dass ein Beet nicht mehr so richtig gut funktioniert“

Betrieb 5: „Der Kompost hat natürlich hinten und vorne nicht gereicht und deswegen hat die SoLaWi, meines Wissens, insgesamt mindestens zweimal oder sogar öfters Kompost gekauft von einem externen Anbieter. [...] Also für mehr reicht es halt einfach nicht. Wir haben weder die Fläche, um noch mehr Komposthaufen anzusetzen und wir haben vor allen Dingen auch nicht die Geräte und nicht die Manpower, um noch mehr Kompost zu machen.“

Betrieb 9: „Wir beschäftigen uns schon noch mit eigener Kompostierung und versuchen auch Nährstoffe auf der Fläche wieder zu verwenden. Aber das hat jetzt gerade im Moment noch keine Priorität.“

Betrieb 3 produziert keinen eigenen Kompost und bezieht diesen vollständig extern. Hinderungsgründe für die Herstellung von eigenem Kompost sind ist neben dem Mangel an Biomasse auch ein Mangel an Zeit:

Betrieb 1: „Also aktuell betreibe ich da jetzt nicht aktiv die Kompostwirtschaft, das lagert da jetzt erstmal. Und dann, wenn man Zeit hat, kann man daraus den Kompost machen“

Zu dem Zeitpunkt der Interviews gaben nur drei Betriebe an Bodenanalysen auf ihren Betrieben durchgeführt zu haben. Bei den Düngemitteln berichtete lediglich ein Betrieb, dass einmalig eine Kompostanalyse durchgeführt wurde. Ansonsten verlassen sich die meisten Betriebe auf die Angaben auf den Verpackungen sowie die RAL-Analysen.

Betrieb 3 hat eine sehr weite Fruchtfolge und sät auf einer Fläche regelmäßig eine Gründüngung aus, während die anderen Betriebe eine Fruchtfolge „im Kleinen“ betreiben. Das heißt, dass die Kulturen auf den einzelnen Beeten wechseln, jedoch kleinflächig.

Gemulcht wurde bei sieben von neun interviewten Betrieben. Verwendet werden Rasenschnitt, Stroh, Grünschnitt-Kompost, Erntereste, Folie, Rotklee- Luzerne-Silage, frisches Klee gras und Roggenstroh als Mulch-Materialien (Tabelle 2.3–14). Die Betriebe, die nicht mulchen, nannten zum einen den Arbeitsaufwand und zum anderen Probleme mit Mäusen und Schnecken als Gründe.

Tabelle 2.3–15: Zusammengefasste Aussagen der Betriebe zur Gründüngung, Fruchtfolge und zum Mulchen auf ihren Betrieben.

Betrieb	Gründüngung/Fruchtfolge	Mulchen
1	"Aktuell noch keine Gründüngung, da der Unkrautdruck noch zu hoch ist"	"Rasenschnitt von Nachbarfläche"
	„Leguminosen haben wir hauptsächlich durch Ackerbohnen, grüne Bohnen und Erbsen. Wir haben eine Fruchtfolge mit Blattgemüse, Wurzelgemüse, Leguminosen und Fruchtgemüse."	"Stroh kaufe ich hinzu"
		"Kürbisse mit Plane gemulcht"
2	„Unsere Philosophie ist, dass der Boden immer bedeckt und/oder bewurzelt ist [...] Entweder mit einer kurzfristigen Gründüngung (Phacelia, Gelbsenf, etc.) oder mit einer bodenverbessernden Mischung."	"Kleine Mengen eigener Rasenschnitt"
		"Erntereste werden auf dem Acker gelassen"
3	"Wir haben eine extrem weite Fruchtfolge, maximal zwei Sätze einer Kultur und dann wieder Zwischenfrucht."	"Im Gewächshaus mit Rotklee-Luzerne-Silage"
	"Ich mache immer Starkzehrer, Mittelzehrer und dann kommen die Salate."	"Im Freiland zu viel Aufwand"
4	"Versucht wird, dass, wenn der Abstand auf einem Beet zwischen zwei Kulturen lang genug ist, immer eine Gründüngung gesät wird".	"Gewächshaus mit Silage von der eigenen Wiese"
	"Um Beete herum ist teilweise Klee gras gesät."	"Kohl im Freiland mit frischem Klee gras von der eigenen Wiese"
5	„Es wird darauf geachtet, dass nach Starkzehrer nicht wieder ein Starkzehrer kommt."	"Roggenstroh von Landwirt aus der Nähe"
		"Im Gewächshaus mit Folie"
	"Gründüngung werden am Ende der Saison gesät, aber nicht nur Leguminosen".	"Rasenschnitt"
6	"Nach Möglichkeit haben wir im Sommer eine Gründüngung mit Klee, Buchweizen, Rauhafer und im Winter mit Wickroggen, den wir auf möglichst viel Flächen ausstreuen"	"Silage in Tunneln von Milchviehbetrieb aus dem Nachbardorf "
	"Hängt davon ab, ob ein Beet frei ist und ob es vom Arbeitsaufwand machbar ist."	"Freiland hatten mit Stroh gemulcht, jetzt nicht mehr, wegen Mäuse"
7	"Gründüngung, wenn ein Beet mindestens 4 Wochen freisteht, meistens Buchweizen. Aber haben auch beim letzten Mal eine Leguminosenmischung ausgesät."	"Grundsätzlich alles mit Grünschnitt-Kompost."
	"Im Winter haben wir noch keine Zwischenfrucht, die Fläche wird mit Folie abgedeckt."	"Im Folientunnel mit Stroh von Demeter-Betrieb oder eigenem Rasenschnitt")
8	"Prinzipiell Luzerne-Klee gras für Heu und Gras [...] habe halt eigentlich kein Platz mehr für mehrjähriges Klee gras."	"Zu arbeitsaufwendig, daher eher Untersaat"
	"Es kommt selten vor, dass ein Beet mal freisteht, aber wenn werden auch mal Zwischenfrüchte gesät."	
9	"Es wurde jetzt zum ersten Mal Gründüngung in der Fruchtfolge integriert [...] Im Herbst als Klee gras Mischung und im Winter Wickroggen."	"Letztes Jahr noch gemulcht, dieses Jahr nicht mehr, wegen Schnecken und Mäusen und Hacken ist wichtiger."

2.3.4.1.4.2 Kriterien zur Entscheidungsfindung hinsichtlich der Nährstoffversorgung

Die Betriebe wurden befragt, nach welchen Kriterien sie ihre Düngeentscheidungen treffen. Am häufigsten gaben sie an, kulturspezifisch zu düngen und dabei hauptsächlich zwischen Stark-, Mittel- und Schwachzehrern zu unterscheiden. Weniger häufig wurden zudem

subjektive Einschätzungen (z. B. Bauchgefühl, Intuition), Vorwissen, Erfahrung, Kennzahlen, Onlinekurse sowie Zeit- und Kostenfaktoren genannt (Abbildung 2.3-11).

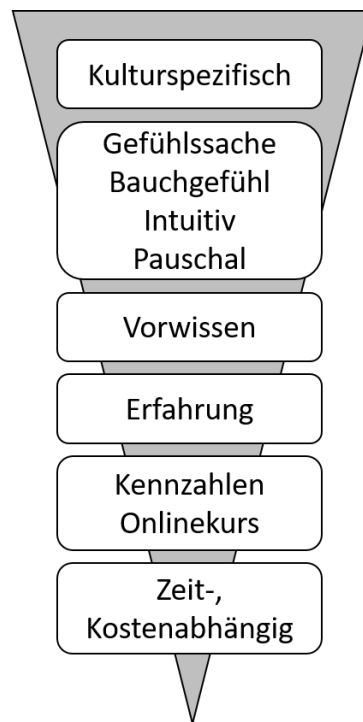


Abbildung 2.3-11: Zusammenfassung der Schlagwörter der Betriebe zur Entscheidungsfindung der Nährstoffversorgung. Nennung in abnehmender Reihenfolge.

Die Betriebe 1, 2, 3, 6 und 8 unterschieden bei der Düngung zwischen Stark-, Mittel- und Schwachzehrern. Die Betriebe 1, 2 und 3 berücksichtigten dabei neben Vorwissen und Erfahrungswerten auch ihre Intuition als Entscheidungskriterium für das Düngemanagement.

Betrieb 1: „Also schlussendlich weiß man ja schon als Grundlage, was hat einen höheren Nährstoffbedarf und was nicht. Und dann einfach die Erfahrungswerte. Ich gebe dann pro Pflanze entweder eine halbe Handvoll von dem Dünger oder eine Handvoll, je nach Kultur. [...] Und ja, das ist dann schon eher so Gefühlssache.“

Betrieb 1: „Ja, also Vorwissen und intuitiv.“

Betrieb 2: „Vorwissen. Also unsere Mitglieder fragen mich, ob die Kultur etwas braucht und was für Mengen und dann schätze ich das ab. Also wir wiegen jetzt nicht extra oder sowas.“

Betrieb 2: „Es ist sofern nur ein Thema, da wir nur über Starkzehrer eine Frühlingsdüngung geben. Auch nur im Bereich Stickstoff wird gedüngt.“

Betrieb 3: „Intuitiv und Wissen, Erfahrungswerte, eigentlich die langjährigen Erfahrungswerte.“

Betrieb 3: „Ich mache immer Starkzehrer, Mittelzehrer und dann kommen die Salate. Das ist so ein bisschen die Abfolge, bevor es dann wieder mit Leguminosen weitergeht.“

Betrieb 6: „Also eigentlich unterscheide ich nur nach Schwach-, Mittel und Starkzehrer und dünge nach Fruchtfolge- Stellung. [...] aber ich rechne das nicht aus, sondern ich mache das relativ pauschal.“

Betrieb 8: „Es ist eher pauschal. Dass ich überlege, jetzt direkt nach dem Klee gras dann schon eher die Starkzehrer und danach dann die anderen, die Schwachzehrer.“

Die Betriebe 5 und 9 unterscheiden ebenfalls zwischen Kulturen und nennen Zeit als einen entscheidenden Faktor für ihre Düngeentscheidungen:

Betrieb 5: „Ich habe es aus dem letzten Jahr gelernt, von den Gärtnerinnen. Und ich versuche das so den anderen weiterzugeben. Aber es klappt nicht immer. Wir haben also ein paar Regeln, aber entscheidend ist immer der Faktor Zeit.“

Betrieb 5: „Weil Zeit immer der entscheidende Faktor ist, priorisieren wir natürlich die Starkzehrer, dass die gedüngt werden.“

Betrieb 9: „Es wäre teuer und aufwendig, dass wir da eigentlich kein Monitoring betreiben, wo sind wie viel Nährstoffe drin. Das heißt, wir machen eher stark pauschal, mit Starkzehrer bekommen das und Schwachzehrer das und bei Salat wird der Boden einfach gar nicht gedüngt.“

Betrieb 9: „Wir haben eine gewisse Menge Kompost und versuchen, die gleichmäßig zu verteilen. Aber im Endeffekt läuft es relativ pauschal.“

Die Betriebe 4 und 7 gaben hingegen an, dass sie ihre Düngeentscheidung auf Basis von Vorlagen, wie Kennzahlen aus einem Buch, und einen Onlinekurs treffen:

Betrieb 4: „Das ist von Kultur zu Kultur unterschiedlich. Wir haben Kennzahlen für verschiedene Kulturen und wir gehen davon aus, dass wir immer 80 Kilo N im Boden haben. Das wird dann abgezogen und die Differenz dann noch draufgelegt“

Betrieb 7: „Von einem Onlinekurs hatten wir Empfehlungen und haben denen ihre N-Werte ein bisschen umgerechnet und waren mit ihnen im Kontakt, wie die das so einschätzen. Und unser Auge, mit dem schauen wir das Gemüse an. [...] Die Menge machen wir aber nach Erfahrung und Bauchgefühl.“

2.3.4.1.4.3 Bewertung der Wichtigkeit der Nährstoffversorgung

Die Expert*Innen wurden in einem weiteren Schritt gebeten, die Bedeutung der Nährstoffversorgung auf ihrem Betrieb zu bewerten. Dabei konnten sie eine Einschätzung auf einer Skala von 1 (nicht wichtig) bis 10 (sehr wichtig) abgeben. Im Durchschnitt aller Bewertungen liegt die Wichtigkeit bei 5,2. Betrieb 8 misst der Nährstoffversorgung nur eine geringe Bedeutung bei. Im Gegensatz dazu bewerten die Expert*Innen der Betriebe 3 und 7 dieses Thema als sehr wichtig und vergaben jeweils eine 9 (Abbildung 2.3-12).

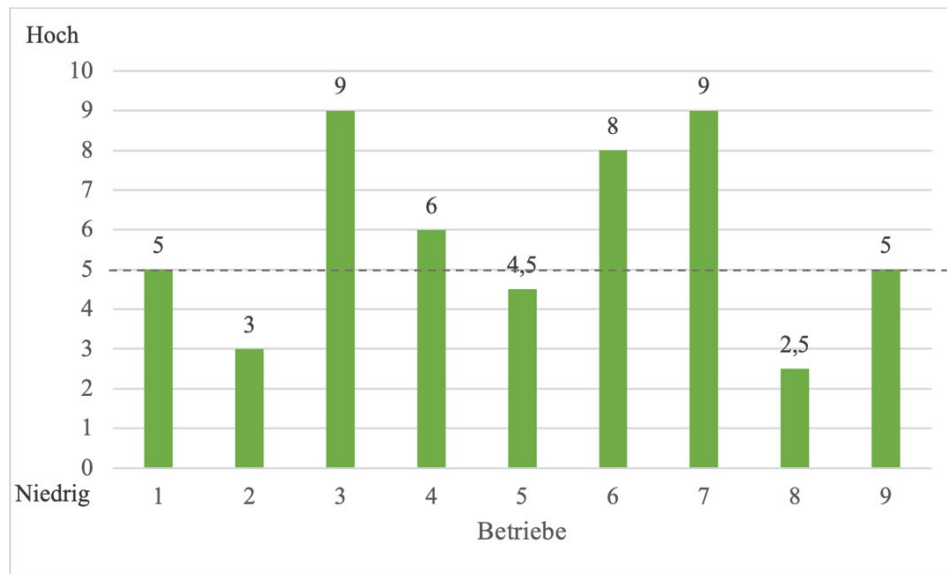


Abbildung 2.3-12: Bewertung der Wichtigkeit der Nährstoffversorgung von 1-10 (1=niedrig, 10=hoch) durch die Expert*Innen in den Interviews. Die Linie markiert die 5 als mittleren Wert.

Betrieb 1 und 5 differenzieren zwischen der Bedeutung Theorie und der praktischen Umsetzung. Betrieb 1 maß dem Düngungsmanagement in der Theorie mit 8 eine relativ große Bedeutung bei. Auch für Betrieb 5 lag die Bedeutung in der Theorie bei 7-8. Allerdings wurde dies in der Praxis nicht umgesetzt. Die Begründung war hier die Zeitknappheit.

Betrieb 5: „Also in der Theorie schon hoch, so sieben oder acht. In der Praxis hatten wir einige andere Baustellen.“

Betrieb 5: „...aber entscheidend ist immer der Faktor Zeit.“

Betrieb 3 und 6 sind der Meinung, dass es um die allgemeine Förderung der Bodenfruchtbarkeit geht und dadurch die Düngung als Ganzes, inklusive Fruchtfolge, Gründüngung, usw. gesehen werden muss:

Betrieb 3: „Es geht ja nicht ohne. Also Düngung in dem Sinne auch mit Fruchtfolge und so. Also ich sehe es im Gesamten.“

Betrieb 6: „Ich würde mal sagen, sieben oder acht sowas um den Dreh. Also wenn man es daran misst, wie oft ich Bodenanalysen ziehe, dann spiegelt das sich nicht so wider. Weil aber auch mein Ansatz ist, dass es eher um eine Bodengesundheit geht als um Nährstoffeinträge. Mir ist sehr wichtig, die Bodengesundheit zu fördern. Es geht mir nicht so sehr darum, welche Nährstoffe wie stark vorhanden sind. Und ich denke, viel passiert einfach übers Bodenleben und über allgemeine Maßnahmen. Da kann ich die Bodengesundheit fördern, ohne dass ich jetzt gezielt bestimmte Nährstoffe düngen muss. Das ist so ein bisschen mein Ansatz.“

Betrieb 4, 8 und 9 sehen die Düngung und das Nährstoffmanagement als wichtig an, jedoch hat es bei ihnen (noch) keine Priorität und gaben als Hauptgrund dafür Zeitmangel an:

Betrieb 4: „Also es ist ja schon wichtig, aber steht nicht im Vordergrund. Im Aufgabenbereich und in meinem Kopf ist es an Wichtigkeit in der Mitte und wird auch mal vergessen. Aber eigentlich ist das ja schon grundlegend wichtig.“

Betrieb 8: „Na ja, jetzt gerade eher so zwei, drei. Da ist noch sehr viel Luft nach oben. In den letzten Jahren waren wir immer damit beschäftigt, dass neue Flächen dazugekommen sind und die SoLaWi gewachsen ist. [...] Ich habe den Eindruck, dass man da auf jeden Fall mehr machen muss.“

Betrieb 9: „Jetzt noch keinen so hohen, weil das ganze System gerade in der Umstellung ist und aufgrund der mangelnden Datenerhebung. Also wir haben einfach auch nicht die Möglichkeit, großartig Bodenproben zu nehmen von diesen einzelnen kleinen Schlägen oder dann vereinzelt sogar noch von den einzelnen Beeten. Das wäre teuer und aufwendig. [...] Ich persönlich finde es eigentlich schon wichtig. Aber wir sind noch nicht so richtig dazu gekommen, dass wir uns intensiver damit beschäftigen.“

Betrieb 7 begründet die Bewertung von 9 damit, dass Düngung wichtig und nötig ist, während Betrieb 2 sagt, dass Düngung für sie kein großes Thema ist und einfach zu den Starkzehrern eine Frühlingsdüngung gegeben wird.

Betrieb 7: „Schon einen hohen Stellenwert [...] Wir haben ja eine hohe Ernterate, auch ein hohes Abtransportieren von Erntegut. [...] Die Düngung ist bei uns wichtig und auch nötig, wenn man mich fragt. Wir haben ja über 100 Beete und da jetzt für jedes ganz genau irgendwie den Plan zu haben, wie viel wir da düngen ist schwierig.“

Betrieb 2: „Nicht so groß. Zwei oder drei. Ja, vielleicht auch drei.“

Betrieb 2: „Es ist sofern nur ein Thema, da wir über Starkzehrern eine Frühlingsdüngung geben. Und dann war es das auch. Auch nur im Bereich Stickstoff wird gedüngt.“

2.3.4.1.4.4 Nutzung und Interesse an Nährstoffmanagement-Tools

Die Interviews zeigen, dass keiner der neun befragten Betriebe ein Tool für das Nährstoffmanagement nutzt (Tabelle 2.3–15). Als Hauptgründe wurden der hohe Zeitaufwand, die kleinteiligen Betriebsstrukturen, die Priorisierung anderer Maßnahmen sowie fehlende finanzielle und personelle Ressourcen genannt. Dies verdeutlicht, dass die Tools als aufwendig und kompliziert wahrgenommen werden und sich nur schwer in den Betriebsalltag integrieren lassen.

Zudem erfordern sie eine Vielzahl detaillierter Daten, die zwar für präzise Berechnungen und realistische Szenarien essenziell sind, jedoch gleichzeitig für die befragten Betriebe eine Hürde darstellen. Auch die Programme NDICEA und N-Expert sind den Befragten nicht bekannt. Dennoch zeigen acht von neun Betrieben Interesse an deren Nutzung.

Tabelle 2.3–16: EDV-Tool-Nutzung zum Nährstoff-Management bzw. Interesse an der Nutzung eines solchen Tools, Erstellung einer Hoftorbilanz und Bekanntheit der Programme NDICEA und N-Expert auf Betrieben mit solidarischer Landwirtschaft (n=9)

Betrieb	Nutzung eines Tools	Kommentar	Interesse?	Hoftorbilanz durchgeführt?	NDICEA/N-Expert bekannt?
1	Nein	„Es muss praktikabel sein, ohne, dass man stundenlang damit beschäftigt ist und es ausrechnen oder abwiegen muss.“	Ja	Nein	Nein
2	Nein	„Ob mir ein Tool oder ein Experte einen Tipp oder Analyse gibt, ist mit egal, ich würde mich immer danach richten, wenn es plausibel ist [...] Durch Kleinteiligkeit ist ein Flächenmanagement aber eher schwierig.“	Ja	Nein	Nein
3	Nein	„...nicht aufgrund von Optimierung oder weil ich Probleme habe, dass Nährstoffe nicht verfügbar sind oder ausgewaschen werden. Das sehe ich bei uns nicht und deswegen brauche ich auch nichts zu optimieren.“	Nein	Ja	Nein
4	Nein	„Ich könnte mir schon vorstellen, dass man das mal ausprobiert.“ „Die Ergebnisse würde ich auf jeden Fall mal anschauen und dann aber auch schauen, ob das Sinn macht.“	Ja	Nein	Nein
5	Nein	„Ich wäre daran interessiert, welche Empfehlungen das Tool anzeigen würde“	Ja	Nein	Nein
6	Nein	„Geht nicht darum einzelne Nährstoffe zu düngen, sondern um die Stärkung des Bodenlebens. Daher wäre das Ergebnis interessant, aber nicht alleingültig zu betrachten.“	Ja	Nein	Nein
7	Nein	„...ich würde mich mehr nach Bodenproben richten [...] ich glaube wir sind noch nicht in der Lage das alles genau im Boden berechnen zu können...“	Ja	Nein	Nein
8	Nein	„Ich würde mich gerne damit mehr befassen, aber es waren immer viele andere Sachen [...] Ich bin mir sicher, dass man schon teilweise deutlich bessere Erträge hätte, wenn man sowas machen würde.“	Ja	Nein	Nein
9	Nein	„Dafür müssten wir Bodenproben ziehen [...] Aber durch knapp bemessenes Geld wird priorisiert, was wirklich wichtig ist. Man kriegt es, wenn man pauschal düngt, auch so hin.“	Ja	Nein	Nein

Betrieb 4 und 6 stehen den Ergebnissen solcher Anwendungen grundsätzlich offen gegenüber, bezweifeln jedoch deren praktische Umsetzbarkeit. Betrieb 7 ist ebenfalls skeptisch, da hier Bodenanalysen als vorrangige Grundlage für das Düngemanagement gelten. Zudem wird hinterfragt, ob ein Tool die komplexen Bodenprozesse zuverlässig abbilden kann.

Grundsätzlich besteht Potenzial für den Einsatz von EDV-Tools auf SoLaWi-Betrieben, sowohl zur Optimierung des Nährstoffmanagements als auch zur anschaulichen Vermittlung von

Nährstoffkreisläufen und bodenbezogenen Prozessen – etwa wie sie in NDICEA abgebildet werden. Besonders für Quereinsteiger*innen können solche visualisierten Modelle hilfreich sein, um komplexe Zusammenhänge besser zu verstehen. Eine Möglichkeit wäre, verschiedene Fruchtfolgen mit Kulturen unterschiedlicher Nährstoffbedürfnisse gegenüberzustellen, um die Auswirkungen auf das System nachvollziehbar zu machen. Allerdings stellt der durchgängige Einsatz solcher Tools zur Düngeplanung für kleinere Betriebe aufgrund des hohen Arbeitsaufwands und der allgemeinen Arbeitsbelastung häufig keine praktikable Lösung dar. Auf größeren SoLaWi-Betrieben mit größeren Flächen hingegen bieten die Tools ein deutlich höheres Potenzial, gezielt für die Düngeplanung und das Nährstoffmanagement eingesetzt zu werden.

Keiner der Befragten nutzt derzeit ein Nährstoffmanagement-Tool, und NDICEA sowie N-Expert waren nicht bekannt. Acht Betriebe bekundeten jedoch Interesse. In einem der Betriebe (Betrieb 4) wurden anschließend beide Tools exemplarisch auf ihre Anwendbarkeit für SoLaWi-Betriebe getestet und eine Hoftorbilanzierung durchgeführt.

2.3.4.2 Einsatz von Hoftorbilanzen und Nährstoffmanagement-Tools auf SoLaWi-Betrieben

2.3.4.2.1 Hoftorbilanz eines Betriebes mit Solidarischer Landwirtschaft

Betrieb 4 setzt nur geringe Mengen keratinhaltiger Düngemittel wie Horndünger sowie Vinsasse ein und bezieht zusätzlich Grüngutkompost. Zum Mulchen der Beete wird hofeigene Silage verwendet. Neben der Gemüseabgabe an die Mitglieder der SoLaWi wurden im Jahr 2023 zudem Luzerne-Klee-gras-Silageballen an einen anderen Betrieb verkauft. Für die Hoftorbilanzerhebung wurde das im Projekt überarbeitete Excel-Tool (siehe Kapitel 2.1) verwendet. Die jährlichen Nährstoffbudgets basieren auf den Berechnungen von Stein et al. (2024) und stellen die Salden des offenen Systems des ökologischen Gemüsebaus dar. Aufgrund des Alters des Betriebs Gründung in 2021 sowie der vorhandenen Datengrundlage des Betriebes wurden die Bilanzen nur mit zweijährigen Daten berechnet. Erträge in Mengenangaben wurden in Gewichtsangaben umgerechnet und es mussten neue Kulturarten (wie Spitzkohl, Zuckerhut, Mangold, Zuckerschote, Buschbohne, Pak Choi, usw.), Düngemittel (Provita Vegetal) und Futtermittel (Luzernekleegrassilage) in das Exceltool hinzugefügt werden. Dabei wurden dieselben Quellen wie in Stein et al. (2024) verwendet. Die Erdpresstöpfe, welche durch den Jungpflanzenzukauf in den Betrieb importiert wurden, wurden nicht in der Berechnung des Nährstoffinputs mit einberechnet, da diese laut Stein et al. (2024) nur in sehr großer Stückzahl einen Nährstoffinput darstellen. Dieses war für diesen Betrieb nicht gegeben. Für den Betrieb wurden zwei separate Bilanzen für „kleine“ und „große“ geerntete Produkte berechnet. Der Grund für diese Aufteilung liegt in den großen Unterschieden der Erntegrößen im Vergleich zu spezialisierten Gemüsebetrieben mit Verkauf an den Großhandel oder Direktverkauf, bei denen die Größen meist einheitlicher sind. Über eine SoLaWi werden in der Regel auch Produkte abgesetzt, die nicht den üblichen Kriterien der Marktfähigkeit entsprechen und die in einem spezialisierten Gemüsebetrieb auf dem Feld verbleiben würden, so dass eine solche Berechnung notwendig ist. Durch die getrennten

Bilanzen erhält man einen besseren Überblick darüber, in welchen Saldenbereich sich der Betrieb befinden wird.

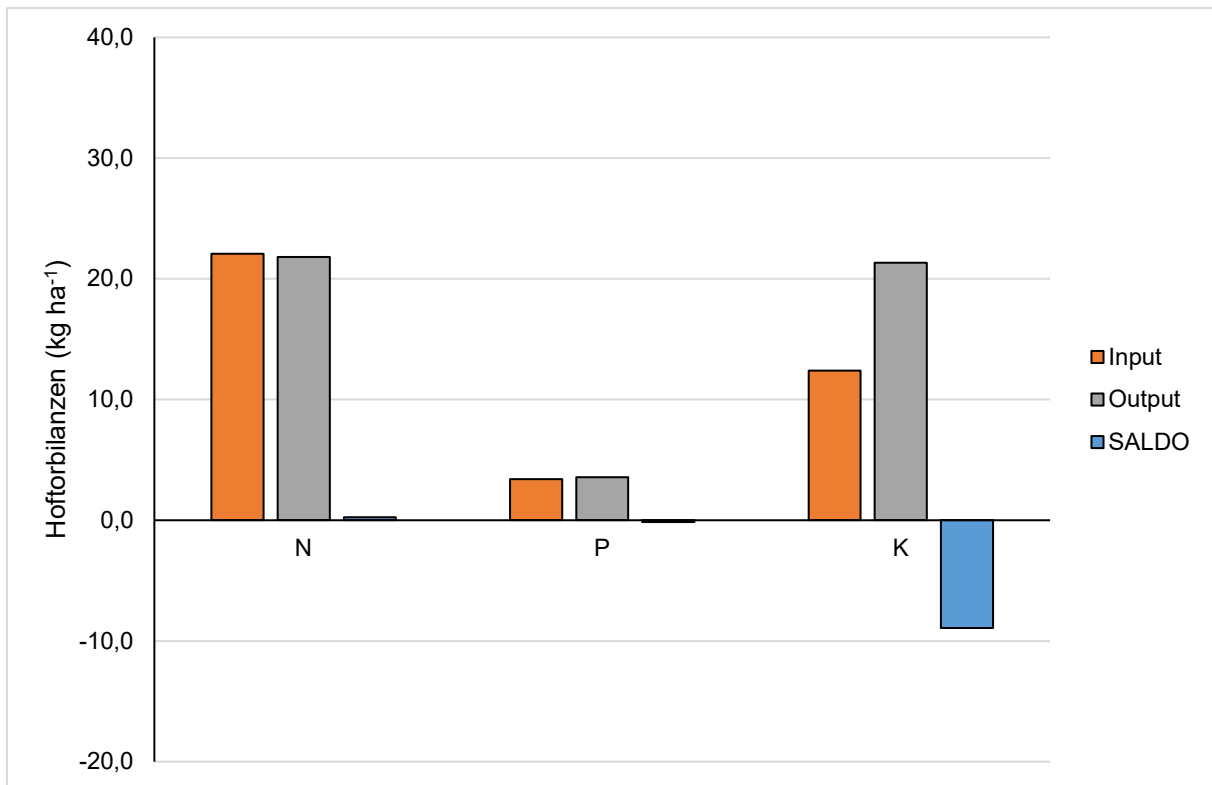


Abbildung 2.3-13: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha⁻¹ für kleine Produkte.

Die Auswertung der Bilanzsalden auf Basis niedriger Gewichte der Produkte zeigte für die Hauptnährstoffe N, P und K ein ausgeglichenes Niveau. Die Werte lagen bei +0,3 kg ha⁻¹ für N, -0,2 kg ha⁻¹ für P und -8,9 kg ha⁻¹ für K. Falls schwerere verkaufte Produkte als Output angenommen wurden, blieben die Bilanzen von N, P und K weiterhin ausgeglichen, verschoben sich für N jedoch ins Negative (-4,0 kg ha⁻¹). Auch K veränderte sich durch den größeren Gemüse-Output auf -17,1 kg ha⁻¹, während P bei -1,1 kg ha⁻¹ lag.

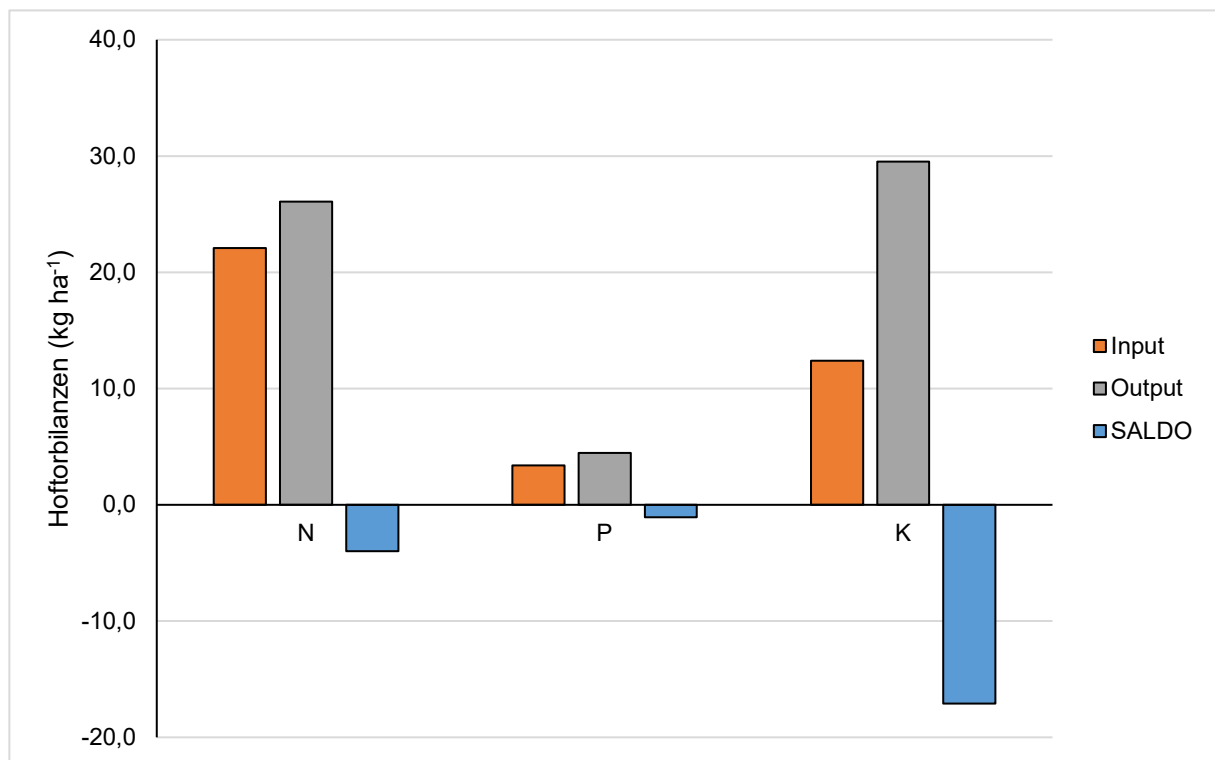


Abbildung 2.3-14: Bilanzsalden für Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha⁻¹ für große Produkte.

Für die weitere Einordnung der Ergebnisse der Nährstoffsalden von Betrieb 4 werden die Salden der kleineren Ernteprodukte angenommen, da diese wahrscheinlicher den tatsächlichen Mengen in der SoLaWi erzeugten Mengen entsprechen. In der von Reimer et al. (2020a) durchgeführten Meta-Analyse wurden für Gemüsebaubetriebe eine durchschnittliche N-Bilanz von 117 kg ha⁻¹, eine P-Bilanz von 12 kg ha⁻¹ und eine K-Bilanz von -44 kg ha⁻¹. Mit nur 0,3 kg ha⁻¹ liegt die N-Bilanz des Betriebes 4 deutlich unter den Werten der Studien von Reimer et al. (2020a), Reents et al. (2022) und Stein et al. (2024). Die Hoftorbilanzen ökologisch wirtschaftender Gemüse- und Feldgemüsebaubetriebe analysierten. Die aktuell ausgeglichenen P Salden sind vergleichbar mit den Ergebnissen von Hülshbergen et al. (2022) und Reents et al. (2022). In ökologischen Gemüsebaubetrieben ist häufig eine Anreicherung von P zu beobachten, die bei dem noch jungen Betrieb 4 in den Bodenproben nicht gemessen wurde. Auf dem Betrieb wird zum aktuellen Zeitpunkt aber auch kein Stallmist oder andere Düngemittel mit hohem P-Gehalten zur Düngung eingesetzt. Deshalb ist mit einer P-Anreicherung im Boden in den nächsten Jahren nicht zu rechnen, er unterscheidet sich damit deutlich von den anderen Betrieben, auf denen die qualitative Befragung stattfand. Die negative K₂O-Bilanz von -11 kg ha⁻¹ deckt sich mit den Ergebnissen anderer Studien (Reimer et al., 2020a, Stein et al. 2024) und bestätigt die allgemeine Tendenz zu negativen K-Salden auf ökologisch wirtschaftenden Gemüsebaubetrieben.

Der größte Teil des Nährstoff-Outputs entsteht in diesem Betrieb derzeit nicht durch das exportierte Gemüse, sondern durch den Verkauf von Silageballen, wodurch vor allem N und K aus dem Betrieb abgeführt werden. Falls der Betrieb auch in Zukunft Silageballen vom Grünland an andere Betriebe verkaufen möchte, wäre eine zusätzliche K-Düngung für die Gemüsekulturen empfehlenswert. Dabei sollte aber die Nährstoffversorgung durch

Bodenprobenanalysen beobachtet und sowie regelmäßige Mangelbonituren der Kulturpflanzen durchgeführt werden um auch zukünftig eine gute und ausreichende Nährstoffversorgung für die angebauten Kulturen zu gewährleisten. Alternativ könnte die Verwendung eines Mehrnährstoffdüngers mit höherem K-Gehalt, wie z. B. Klee- oder Luzernepellets, von dem Betrieb in Betracht gezogen werden. Andernfalls könnte der Betrieb auch einen Teil des Grünschnittes bzw. der Silage selbst als Transfermulch einsetzen. Dies würde zu positiv ausgeglichenen Salden von N, P und K führen.

2.3.4.2.2 Vergleich: Einsatz von N-Expert und NDICEA in SoLaWi

Eine Hoftorbilanz ist eine einfache Input-Output-Berechnung und bildet das Nährstoffmanagement eines Betriebs nicht vollständig ab. Daher wurden zusätzlich die beiden Nährstoffmanagement-Tools NDICEA und N-Expert auf ihre Anwendbarkeit in einer SoLaWi getestet. Die Nutzung dieser Tools zur landwirtschaftlichen Planung und Dokumentation bietet sowohl Vorteile als auch Herausforderungen. Besonders kleinstrukturierte Gemüsebetriebe stehen vor spezifischen Schwierigkeiten wie der zeitintensiven Anwendung, dem hohen Dokumentationsaufwand und den heterogenen Betriebsstrukturen. Versuchsweise wurde im Projekt getestet, ob und inwieweit die beiden Programme unter solchen Bedingungen nutzbar sind.

Die Daten wurde dabei aufgrund des Zeitmangels nicht von dem/der Betriebsleiter*In der SoLaWi selbst eingetragen. Für die Dateneingabe wurden die bereitgestellten Anbau- und Fruchtfolgeplanungen sowie Daten zur Düngung, Erntezeitpunkten und Mengen von der Projektmitarbeiterin verwendet. Die Daten waren sehr detailliert und übersichtlich durch den Betriebsleiter dokumentiert und leicht zugänglich. Bewässerungszeitpunkte sowie die Wassermenge wurden von dem Betrieb nicht erfasst.

Die Programme N-Expert und NDICEA unterstützen landwirtschaftliche und gärtnerische Betriebe bei der Nährstoff- und Düngeplanung. Beide erforderten eine umfangreiche Ersteinrichtung von etwa 30 Stunden für die untersuchte SoLaWi, bieten jedoch unterschiedliche Funktionen und Schwerpunkte. Für nachfolgende Anwendungen werden nur noch weniger Arbeitsstunden benötigt (u.a. für die Eingabe von Analyseergebnisse und die Eingabe der nächsten Planungen). Ein Überblick ist in Tabelle 10 dargestellt.

N-Expert zeichnet sich durch eine detaillierte Flächeneinteilung aus und ermöglicht die Berücksichtigung von Vorkultur, $N_{\min}$ -Werten und Ernterückständen. Nutzer können eigene Düngemittel hinzufügen und werden durch Warnmeldungen über fehlende Daten informiert. Allerdings sind die Minimal- und Maximalwerte für Vegetationsdauer und Erntemengen fest vorgegeben, wodurch individuelle Anpassungen erschwert werden, falls diese von den Vorgaben abweichen. Ein weiteres Manko ist, dass nachträgliche Änderungen an bereits eingegebenen Kulturen zum Verlust aller für die Kultur eingegebenen Daten führt und Doppeleingaben notwendig sind. Ein wichtiger Nachteil ist die PC-gebundene Anwendung, die keinen mobilen Zugriff von verschiedenen Endgeräten ermöglicht.

NDICEA hingegen erleichtert die langfristige Dünge- und Bewässerungsplanung durch die Möglichkeit, verschiedene Szenarien zu vergleichen. Vorkulturen, $N_{\min}$ -Werte und Bodenbearbeitung (herkömmlich, reduziert oder keine) werden berücksichtigt. Die Ergebnisse

werden übersichtlich und visuell dargestellt, was die Entscheidungsfindung erleichtert und eine gezielte Vermeidung von Über- oder Unterversorgung mit Nährstoffen ermöglicht. Allerdings ist die Auswahl an Kulturen und Düngemitteln eingeschränkt, und es können nur Saattermine, jedoch keine Pflanztermine für Jungpflanzen erfasst werden. Zudem müssen Wetterdaten manuell zusammengestellt und hochgeladen werden. Ein großer Vorteil ist jedoch der webbasierte Zugriff, der eine Nutzung unabhängig vom Standort ermöglicht.

Für den ökologischen Gemüsebau hängt die Wahl des passenden Programms von den individuellen Betriebsstrukturen ab. Betriebe mit einer Vielzahl an Kulturen und individuellen Düngekonzepten profitieren eher von N-Expert, da es eine flexiblere Anpassung, unter anderem durch differenzierte Flächeneingabe, Eingabe und Nutzung betriebseigener Düngemittel sowie Unterscheidung von Pflanz- und Aussattermin, der Düngeplanung erlaubt. Der hohe Erfassungsaufwand und die fehlende Flexibilität bei der Eingabe der Erntemengen und Vegetationstage könnten jedoch als Nachteil empfunden werden. NDICEA eignet sich besonders für Betriebe, die ihre Düngeplanung strategisch optimieren und verschiedene Szenarien und die verschiedenen Ergebnisse (z.B. $N_{\min}$ -Dynamik, Stickstoffauswaschung, o.ä.) visuell vergleichen möchten und, insbesondere da es webbasiert und somit flexibler nutzbar ist.

Für den Einsatz in einer SoLaWi und die spezifischen Bedürfnisse dieser Betriebe scheint NDICEA aufgrund der Visualisierung der Ergebnisse und der Möglichkeit, verschiedene Szenarien direkt zu vergleichen, besonders attraktiv zu sein. Insbesondere für Quereinsteiger kann das Tool hilfreich sein, um die Prozesse im Boden und deren Zusammenhänge besser zu verstehen und so fundierter Betriebsentscheidungen zu treffen. N-Expert hingegen bietet sich für Betriebe an, die ihre Düngung gezielt planen, dokumentieren und mit den Vorgaben der Düngeverordnung (DüV) abgleichen möchten. Dabei sollten Betriebe jedoch die rechtlichen Vorgaben der Bundesländer bei der Nutzung der Tools als offizielles Dokumentationsinstrument für die Düngepflicht zu beachten: N-Expert ist z.B. in Bayern für die DBE im Gemüse zugelassen, während NDICEA nicht offiziell dafür verwendet werden kann.

Tabelle 2.3–17: Vorteile und Herausforderungen bei dem Einsatz von N-Expert und NDICEA in einem SoLaWi Betrieb.

Kategorie	N-Expert	NDICEA
Zeitbedarf	Hoher Aufwand bei der Ersteinrichtung (ca. 30 Std)	Hoher Aufwand bei der Ersteinrichtung (ca. 30 Std)
Vorteile	Flächen können in Teilschläge unterteilt werden	Visualisierung der Ergebnisse
	Berücksichtigung von Vorkultur, $N_{\min}$ und Ernterückständen	Direkte Vergleich von verschiedenen Szenarien (z.B. zum Vergleich unterschiedlicher Düngungstermine, -gaben oder Bewässerungen)
	Eingabe gleicher Kulturen auf unterschiedlichen Teilschlägen möglich (setzt gute Planung voraus)	Vermeidung von Über- und Unterversorgung durch optimierten Düngemiteleinsatz
	Hinweise auf die Düngeverordnung (DüV)	Klare und verständliche Darstellung von Prozessen und Ergebnissen
	Nutzung eigener Analyseergebnisse	Berücksichtigung der Fruchtfolgen (je genauer desto besser)
	Warnmeldungen bei fehlenden Daten für Berechnungen	Kostenlos
	Auswahl zwischen Pflanzung und Aussaat	Anleitung - Online verfügbar
	Möglichkeit, eigene oder neue Dünger hinzuzufügen	
	YouTube-Klickanleitung verfügbar	
	Kostenlos	
Probleme	Ungenauere Ergebnisse aufgrund nicht aktueller $N_{\min}$ -Daten	Keine Möglichkeit, Mulchmaterial zu integrieren
	Fehlende Kulturen (z. B. Salatgurke, Mangold, Zuckerschote, Kresse, Basilikum)	Eingeschränkte Auswahl an Gemüsekulturen und Kräutern (z. B. Mangold, Tomaten, Gurken, Basilikum, Zuckerschoten)
	Anpassung der Fruchtfolge schwierig, da Betriebe oft kürzere oder längere Vegetationsphasen haben als im Tool vorgegeben	Begrenzte Auswahl an Düngemitteln (z. B. Hornmehl, Haarmehl, Horngras, Schafwollpellets)
	Feste Minimal- und Maximalwerte im Tool, was Anpassungen erforderlich macht	Nur Saattermine auswählbar, keine Pflanztermine für Jungpflanzen
	Änderungen bereits eingegebener Kulturen führen zum Verlust aller Daten und erfordern eine erneute Eingabe	Wetterdaten müssen für jedes Szenario manuell zusammengestellt und hochgeladen werden
	Ersteingabe aufwendig, insbesondere bei kompletten Fruchtfolgen	Manuelle Berechnung der Basal-Evapotranspiration erforderlich
	Programm läuft nicht stabil (Daten bleiben aber erhalten)	
	Erntemengen oft nur in Stückzahlen dokumentiert, was eine Umrechnung in Gewichte erforderlich macht	Erntemengen oft nur in Stückzahlen dokumentiert, was eine Umrechnung in Gewichte notwendig macht
Hinweise	Nur als PC-Anwendung verfügbar (kein mobiler Zugriff)	Webbasiert, daher Zugriff von überall möglich

2.3.4.3 Fazit

Auf den befragten Betrieben mit Solidarischer Landwirtschaft war das Düngemanagement ein wichtiges Thema, wobei wenig Daten-basiert gedüngt wird, stattdessen werden Fruchtfolgeprinzipien berücksichtigt ebenso wie eigene Erfahrungswerte, nur für einige wenige Betriebe war das Düngemanagement nicht prioritär. In diesen Fällen wurde Zeitknappheit als ein Grund für andere Prioritäten genannt. Außerdem gab es unter manchen Betriebsleiter*Innen die Auffassung, dass aufgrund ihrer Wirtschaftsweise keine Auswaschungsverluste und Umweltbelastungen auftreten können. Die Betriebe fokussierten sich in der Auswahl der Düngemittel einerseits stark auf Grunddünger wie Komposte und Wirtschaftsdünger, setzten aber auch in großem Maße Handelsdünger ein.

Die Bodenuntersuchungen zeigten, dass viele der Betriebe sowohl bei N_{min} als auch bei der P-Versorgung der Böden sehr hohe Werte aufweisen, gleichzeitig aber das Problembewusstsein bei den Betriebsleiter*Innen völlig fehlt, im Gegenteil, die Aussagen in den Interviews zeigen, dass die Betriebsleiter davon ausgehen, dass ihre Düngestrategien zu keinen Auswaschungen oder Anreicherungen führen. Die Nutzung von EDV-Tools zum Düngemanagement könnte hier ein größeres Bewusstsein für Düngungsfragen schaffen, um die N-Überschüsse zu verhindern und zielführender zu düngen. Offensichtlich nutzt der Großteil der Betriebe Mulchmaterial aus externen Quellen, ohne diese Nährstofffrachten überhaupt in die Düngestrategie einzubeziehen. Bemerkenswert sind auch die sehr hohen Gehalte an pflanzenverfügbarem P auf fast allen Flächen. Ob diese nun bereits durch die Düngergaben während der verhältnismäßig kurzen Laufzeit der SoLaWis zustande kamen oder durch die Vornutzung „geerbt“ wurden, ließ sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht klären. In jedem Fall werden sich die P-Gehalte langfristig eher erhöhen, da die meisten Betriebe in größerem Umfang Grunddünger einsetzen, die weiter zu einem P-Überschuss beitragen. Auch hier könnte die Nutzung von EDV-Tools zum Düngemanagement Bewusstsein schaffen. Allerdings stellte sich der Aufwand für die Einrichtung der Tools als sehr groß heraus, so dass davon auszugehen ist, dass diese besonders von kleinen Betrieben mit einer hohen Kulturartenvielfalt eher nicht genutzt werden.

2.3.5 Literaturverzeichnis

DüV, 2017a. DüV §4 Absatz 1.

DüV, 2017b. DüV §4 Absatz 3.

Feller, C., 2022. Stickstoffdüngung im Freilandgemüsebau - Düngebedarf und Bedarfsermittlung, N-Expert_, in: BZL_Web_Seminar „Stickstoffdüngung Im Freilandgemüsebau“.

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. Schriftenr. des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau 3, 1–265.

Feller, C., Rehbein, K., 2017. N-Expert weiterentwickelt. B&B Agrar 6, 32–33.

Fink, M., Scharpf, H.C., 1993. N-Expert - a Decision Support System for Vegetable Fertilization in the Field. Acta Hortic. 67–74. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1993.339.6>

- Flick, U., 2014. Qualitative Sozialforschung : eine Einführung, 6th ed. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg.
- Gabriel, A., Gandorfer, M., 2023. Adoption of digital technologies in agriculture—an inventory in a european small-scale farming region. *Precis. Agric.* 24, 68–91. <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09931-1>
- Gscheidle, M., Munz, J., Doluschitz, R., 2022. Strukturwirkung der Digitalisierung in der Landwirtschaft. *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrar. und Landwirtschaft* 100, 1–31. <https://doi.org/10.12767/buel.v100i1.374>
- Kahle, R., Möller, K., Reents, H.J., 2019. Praxisforschung für ein effizientes Nährstoffmanagement im Öko-Gemüsebau. *ÖKomenischer Gärtnerundbr.* Nr.04.
- Kernecker, M., Knierim, A., Wurbs, A., Kraus, T., Borges, F., 2020. Experience versus expectation: farmers' perceptions of smart farming technologies for cropping systems across Europe. *Precis. Agric.* 21, 34–50. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09651-z>
- Knittel, H., Albert, E., Ebertseder, T., 2020. *Praxishandbuch Dünger und Düngung* 3. Auflage. Agrimedia, Clenze.
- Kuckartz, U., Rädiker, S., 2022. *Qualitative Inhaltsanalyse : Methoden, Praxis, Computerunterstützung : Grundlagentexte Methoden*, 5. Auflage. ed. Beltz Juventa, Weinheim.
- Laber, H., 2022. Kalkulation der N-Düngung im ökologischen Gemüsebau. *Schriftenr. der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft* 6.
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), 2025. *Düngeverordnung, Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung*.
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) 2025b. Stammdatensammlung Düngung BW. https://ltz.landwirtschaft-bw.de/site/pbs-bw-mlr-root/get/documents_E-1445441334/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Pflanzenbau/D%C3%BCngung/Stammdaten/Stammdatensammlung_DuengungBW.pdf, letzter Zugriff: 29.03.2025
- Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, 2024. Was ist Kompost und wo kommt er her? [WWW Document]. URL <https://www.lksh.de/landwirtschaft/duengung/kompost/page>
- Lenz, N., Postweiler, K., 2020. Überprüfung der EDV-Programme NDICEA und N-Expert in Salat, Versuche im deutschen Gartenbau 2020.
- Lindemann-Zutz, K., Block, R., Banna-Köthemann, C., Meyer, S.F., Graaf, E., Lessmann, C., Kohl, M., 2021. Maßnahmen zur Steigerung der N-Effizienz im Freilandgemüsebau - Leitfaden für Beratung und Praxis.
- Louis Bolk Institut, 2022. *Anleitung NDICEA 6.3: Webversion*.
- LWG, 2025. *Neue Düngeverordnung (DüV) – Was ist wichtig und was ändert sich zum 01.01.2021 im Gemüsebau?*
- Mayring, P., 2022. *Qualitative Inhaltsanalyse - Grundlagen und Techniken*, 12th ed. Beltz, Weinheim.
- Meuser, M., Nagel, U., 2009. Experteninterview und der Wandel der Wissensproduktion., in: Bognor, A., Littig, B., Menz, W. (Eds.), *Experteninterviews – Theorien, Methoden, Anwendungsfelder*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, p. 312.
- Möller, K., Schultheiß, U., 2014. *Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- Morvan, T., Nicolardot, B., 2009. Role of organic fractions on C decomposition and N mineralization of animal wastes in soil. *Biol. Fertil. Soils* 45, 477–486. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0355-1>
- Oekolandbau.de, 2024. [https://www.oekolandbau.de/Solidarische Landwirtschaft: Wie kann ich mitmachen?](https://www.oekolandbau.de/Solidarische_Landwirtschaft:_Wie_kann_ich_mitmachen?) [WWW Document]. URL <https://www.oekolandbau.de/umwelt-und-gesellschaft/ernaehrung-und-landwirtschaft/ernaehrungsdemokratie/solidarische-landwirtschaft-boomt/>
- Pfaff, S.A., Paulus, M., Schüle, H., Thomas, A., Knierim, A., 2022. Besonderheiten der Implementierung digitaler Technologien in der kleinstrukturierten Landwirtschaft, *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*. <https://doi.org/https://doi.org/10.12767/buel.v100i2.404>
- Reimer, M., Möller, K., Hartmann, T.E., 2020. Meta-analysis of nutrient budgets in organic farms across Europe. *Org. Agric.* 10, 65–77. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00300-8>
- Sradnick, A., Heisterman, K., Fink, M., Feller, C., 2019. Weiterentwicklung des Entscheidungshilfesystems N-Expert zur Düngebedarfsermittlung im Gemüsebau Inhalt.

- Stein, S., Hartung, J., Zikeli, S., Möller, K., Reents, H.J., 2024. Status quo of fertilization strategies and nutrient farm gate budgets on stockless organic vegetable farms in Germany. *Org. Agric.* 14, 199–212. <https://doi.org/10.1007/s13165-024-00458-5>
- Thompson, R.B., Voogt, W., Incrocci, L., Fink, M., de Neve, S., 2018. Strategies for optimal fertiliser management of vegetable crops in Europe. *Acta Hortic.* 1192, 129–140. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1192.15>
- Van Der Burgt, G.J.H.M., 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. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 74, 275–294. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9004-3>
- Viziteu, S., Brezuleanu, S., Leonte, E., Vintu, C.R., Micu, M.M., 2022. Digitalization in Farm Management. *Sci. Pap. Manag. Econ. Eng. Agric. Rural Dev.* 22, 687–693.

2.4 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-Freisetzungsrate 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 Mehrrährstoffdünger, 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 Kulturebene 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.

2.4.1 Legume Lebendmulche

2.4.1.1 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 Aussaattermin 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.

2.4.1.2 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. 'Riviera') 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.

2.4.1.3 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 2.4–1: 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.

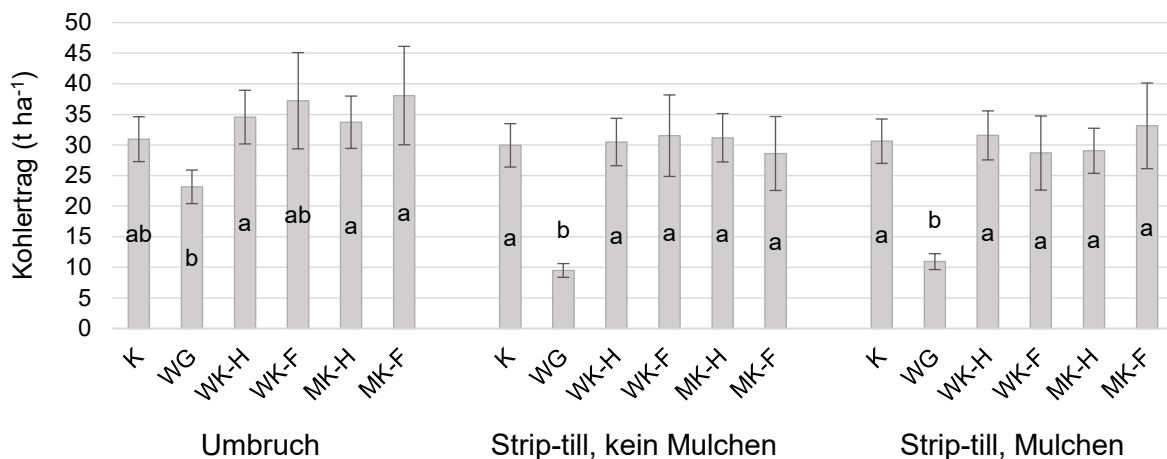


Abbildung 2.4-1: Einfluss der LM-Behandlungen und der Wachstumsmanagement-Behandlungen auf den Gesamt-Frischmasseertrag des Kohls in t ha⁻¹. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den LM-Behandlungen ($\alpha = 0,05$). K=Kontrolle, WG=Dt. Weidelgras, 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.

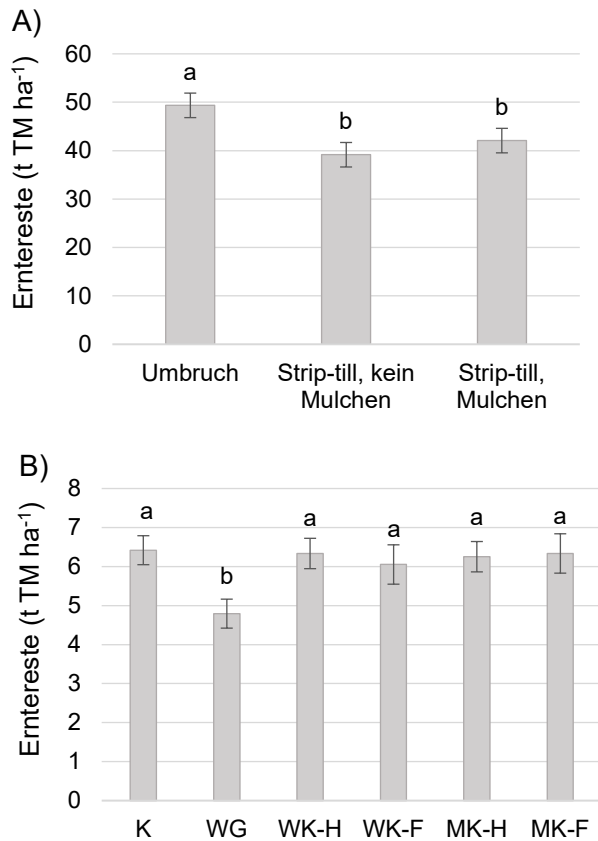


Abbildung 2.4-2 : Einfluss der Wachstumsmanagement-Behandlungen (A) und der LM-Behandlungen (B) auf das Gewicht der Erntereste des Kohls in t TM ha⁻¹. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen ($\alpha = 0,05$). K=Kontrolle, WG=Dt. 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.

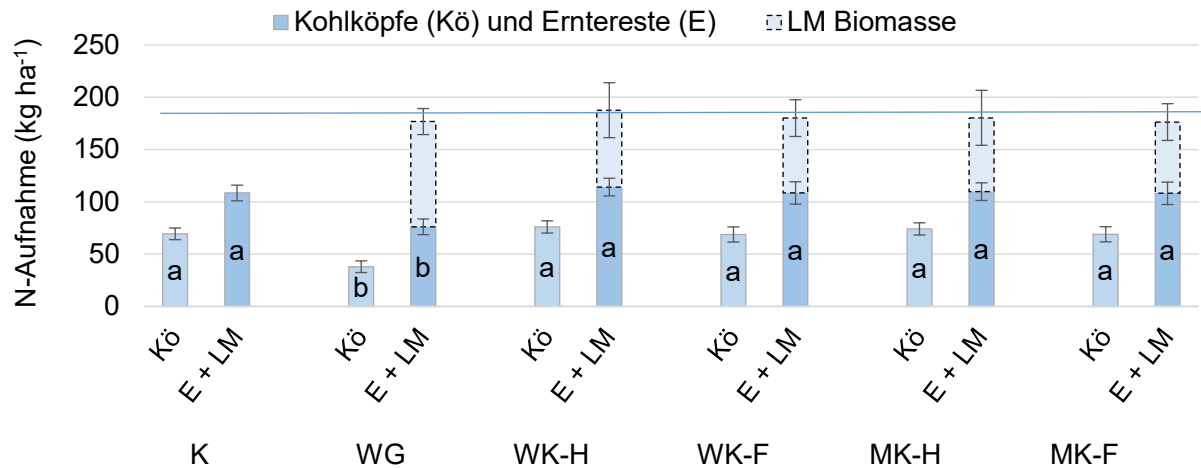


Abbildung 2.4-3: Einfluss der LM-Behandlungen auf die N-Aufnahme durch die Kohlköpfe, die Erntereste und die Lebendmulche in kg ha^{-1} zum Ende der Kohlvegetation. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den LM-Behandlungen ($\alpha = 0,05$). 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 2.4–2: 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 Vegetation
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.

2.4.1.4 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.

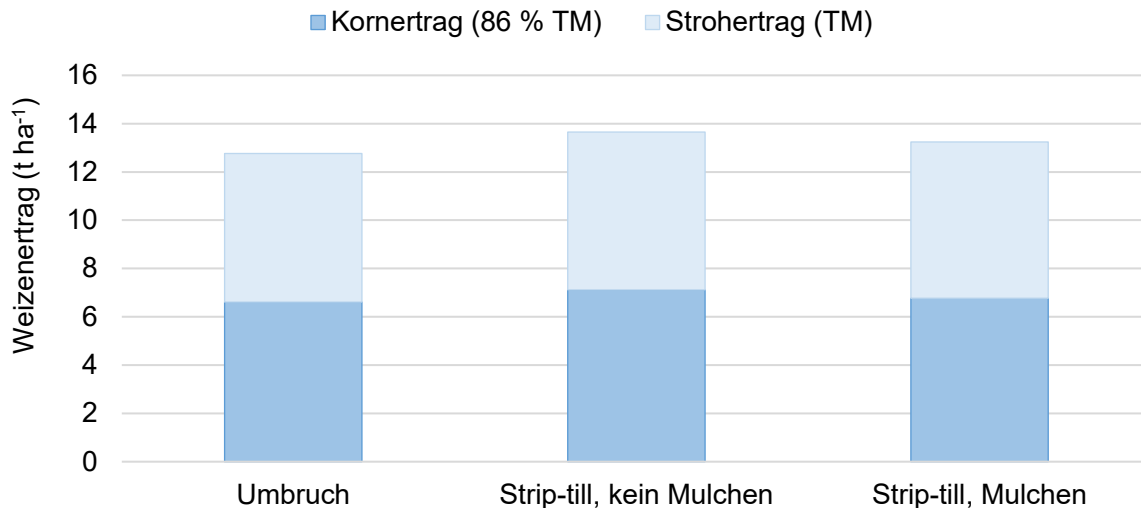


Abbildung 2.4-4: Einfluss der Wachstumsmanagement-Behandlungen auf den Weizenertrag in t ha⁻¹ für die Erntejahre 2020 und 2021. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den Wachstumsmanagement-Behandlungen ($\alpha = 0,05$).

2.4.1.5 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.

2.4.2 Legume Winterzwischenfrüchte

2.4.2.1 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 bestehen 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.

2.4.2.2 Versuche in Süd- und Westdeutschland

2.4.2.2.1 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 unbegrünten 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 Horngras gedüngt.

2.4.2.2.2 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 Reinsaat wiesen jeweils höhere Konzentrationen und dadurch auch niedrigere C/N-Verhältnisse als Roggen oder Wickroggen auf.

Tabelle 2.4–3: 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 legumen WZF (Wicke, Erbse und Ackerbohne) erkennen. Auch bei den Ernteresten, die im Anschluss an die Kohlernte eingearbeitet wurden, weisen die legumen WZF-Varianten höhere Gewichte auf.

Tabelle 2.4–4: 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 legumen WZF unterschied. Die legumen WZF wiesen im Vergleich zur Kontrolle jedoch tendenziell höhere N-Menge in den Ernterückständen auf.

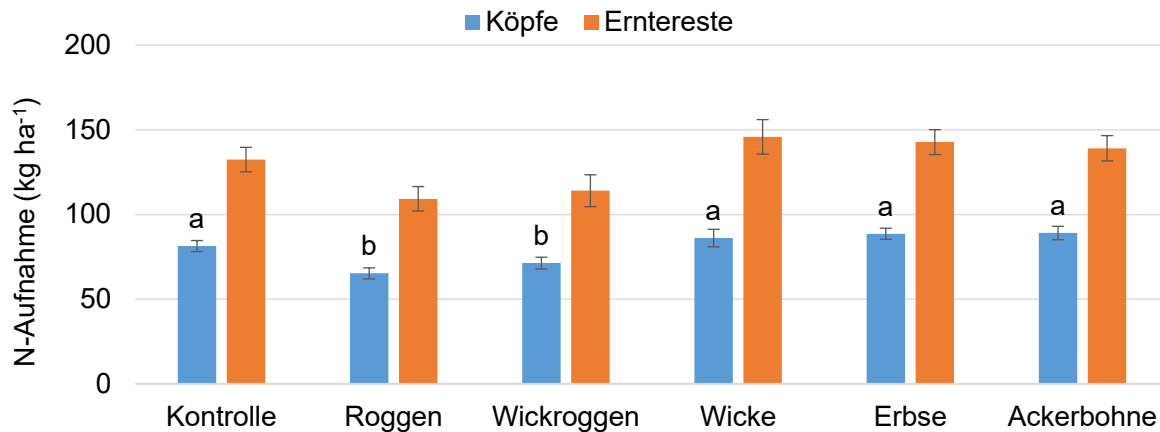


Abbildung 2.4-5: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf die N-Aufnahme des Weißkohls zu Kulturende. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).

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 2.4–5: 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- pflanzung	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.

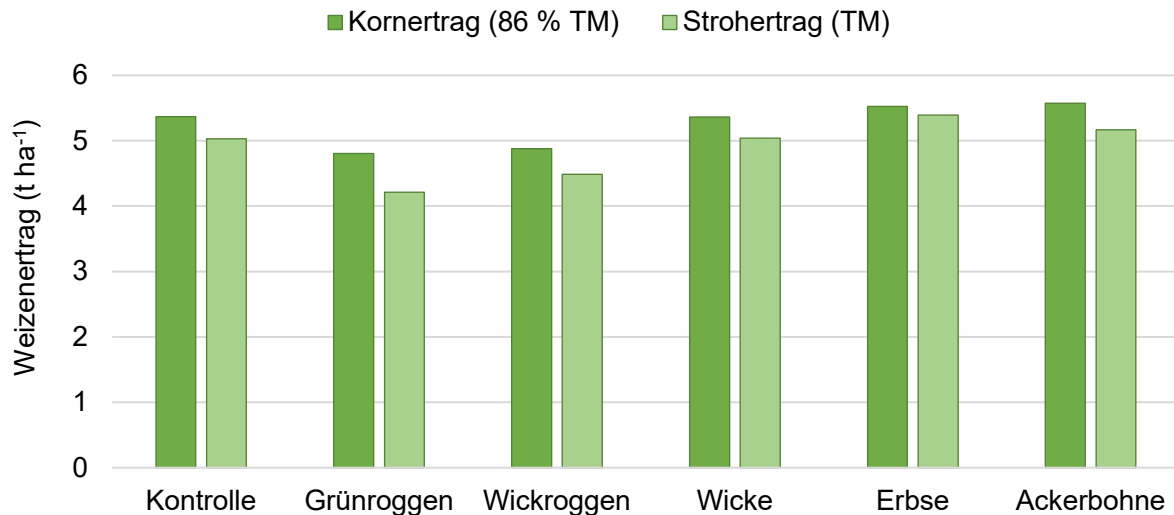


Abbildung 2.4-6: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) vor Weißkohl auf den Ertrag eines nachfolgenden Winterweizens in t ha⁻¹ für die Erntejahre 2020 und 2021. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten ($\alpha = 0,05$).

Standort Bamberg

Am Standort Bamberg erwies sich der Aufwuchs des Wickroggens bei allen vier Biomassesschnitten 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.

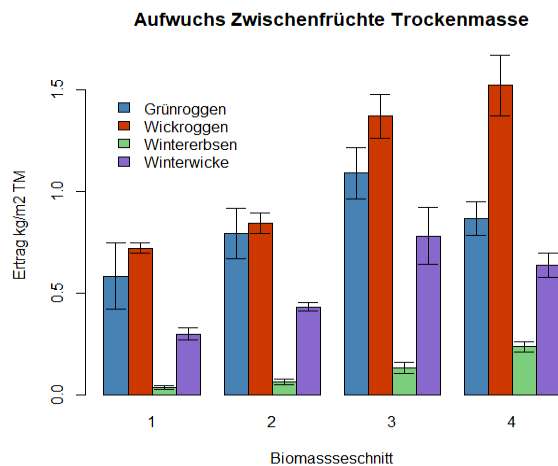


Abbildung 2.4-7: Aufwuchs-Trockenmasse verschiedener Winterzwischenfrüchte zu unterschiedlichen Terminen (1: 07.04.2020, 2: 23.04.2020, 3: 07.05.2020, 4: 20.05.2020), Mittelwert aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung

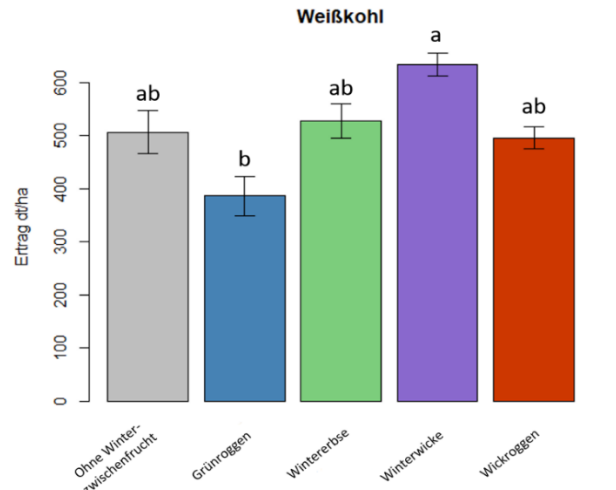


Abbildung 2.4-8: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) auf den Ertrag eines nachfolgenden Weißkohls, Mittelwert aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung. Balken mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten.

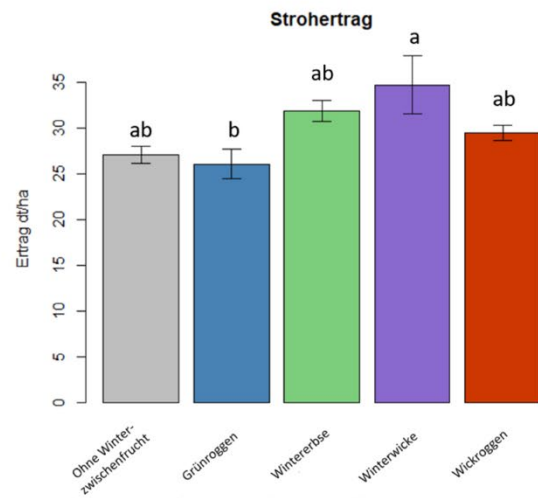
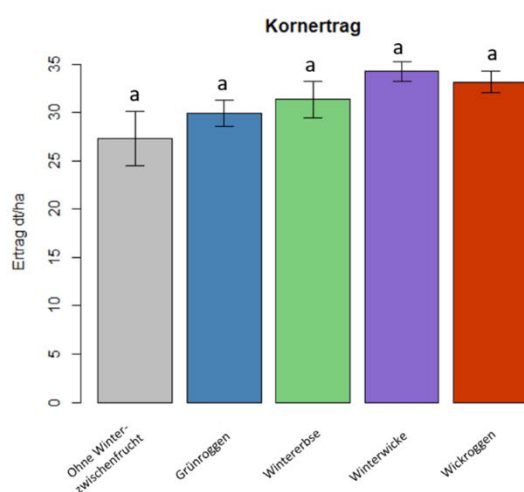


Abbildung 2.4-9: Einfluss verschiedener Winterzwischenfrüchte (WZF) vor Weißkohl auf den Korn- (links) und Strohtrockenmasseertrag (rechts) eines nachfolgenden Winterweizens in dt ha⁻¹. Werte mit mindestens einem identischen Buchstaben zeigen nicht-signifikante Unterschiede zwischen den WZF-Varianten.

2.4.2.2.3 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 Kopfertrag erklären. Es ist augenscheinlich, dass einerseits vor allem Roggen und Wickroggen zu einem geringeren marktfähigen Ertrag führten, während alle drei legumen Winterzwischenfruchtvarianten im Vergleich zur Kontrolle tendenziell einen höheren marktfähigen Ertrag aufwiesen. Das Ertragsniveau des Kohls ist dabei vergleichbar mit ähnlichen Studien, welche den Einfluss legumer 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 legumen 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 legumen 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.

2.4.2.3 Versuche in Norddeutschland

2.4.2.3.1 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).

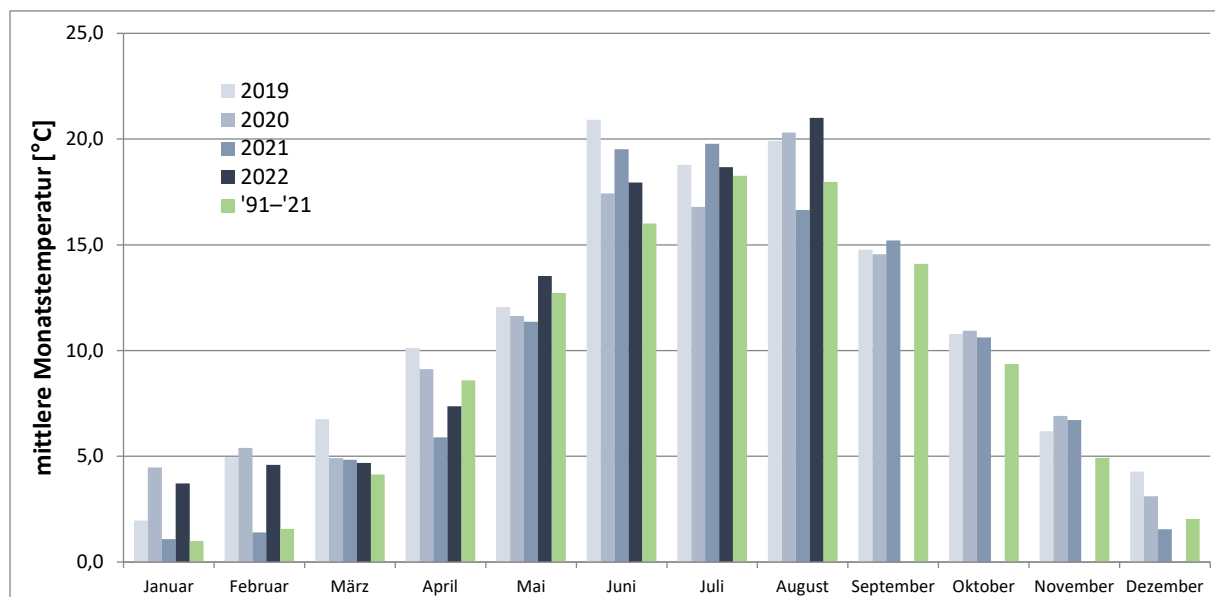


Abbildung 2.4-10: Lufttemperaturen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gültow im Vergleich zum langjährigen Mittel (grün) der Wetterstation in Gültow.

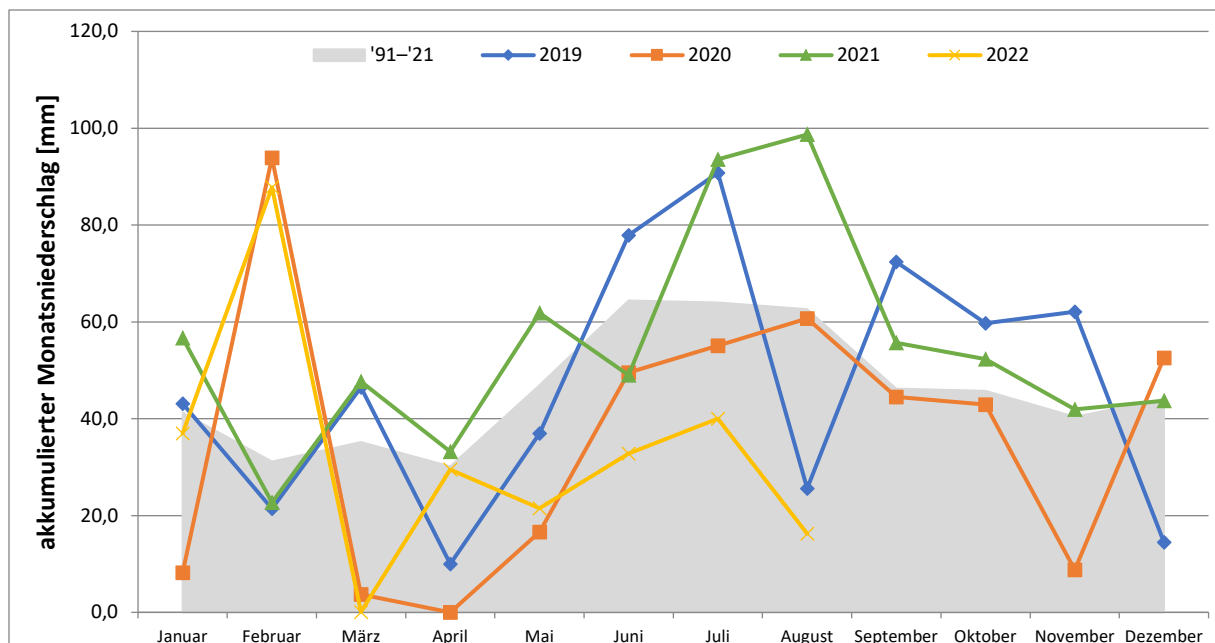


Abbildung 2.4-11: Niederschlagssummen der Versuchsjahre 2019-2022 am Standort Gültzow im Vergleich zum langjährigen Mittel der Wetterstation in Gültzow (graue Fläche).

2.4.2.3.2 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 $4,5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ (3 Beete á 8 m). Die Biomassebehebungen der WZF wurden ausschließlich auf den äußeren beiden Beeten durchgeführt. Je Schnitttermin und Parzelle wurden 4 Flächen ($50 \times 50 \text{ cm}$) 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 2.4–6: Untersuchte Winterzwischenfruchtarten am Standort Gültzow (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

2.4.2.3.3 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 2.4–7: 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.

2.4.2.3.4 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.

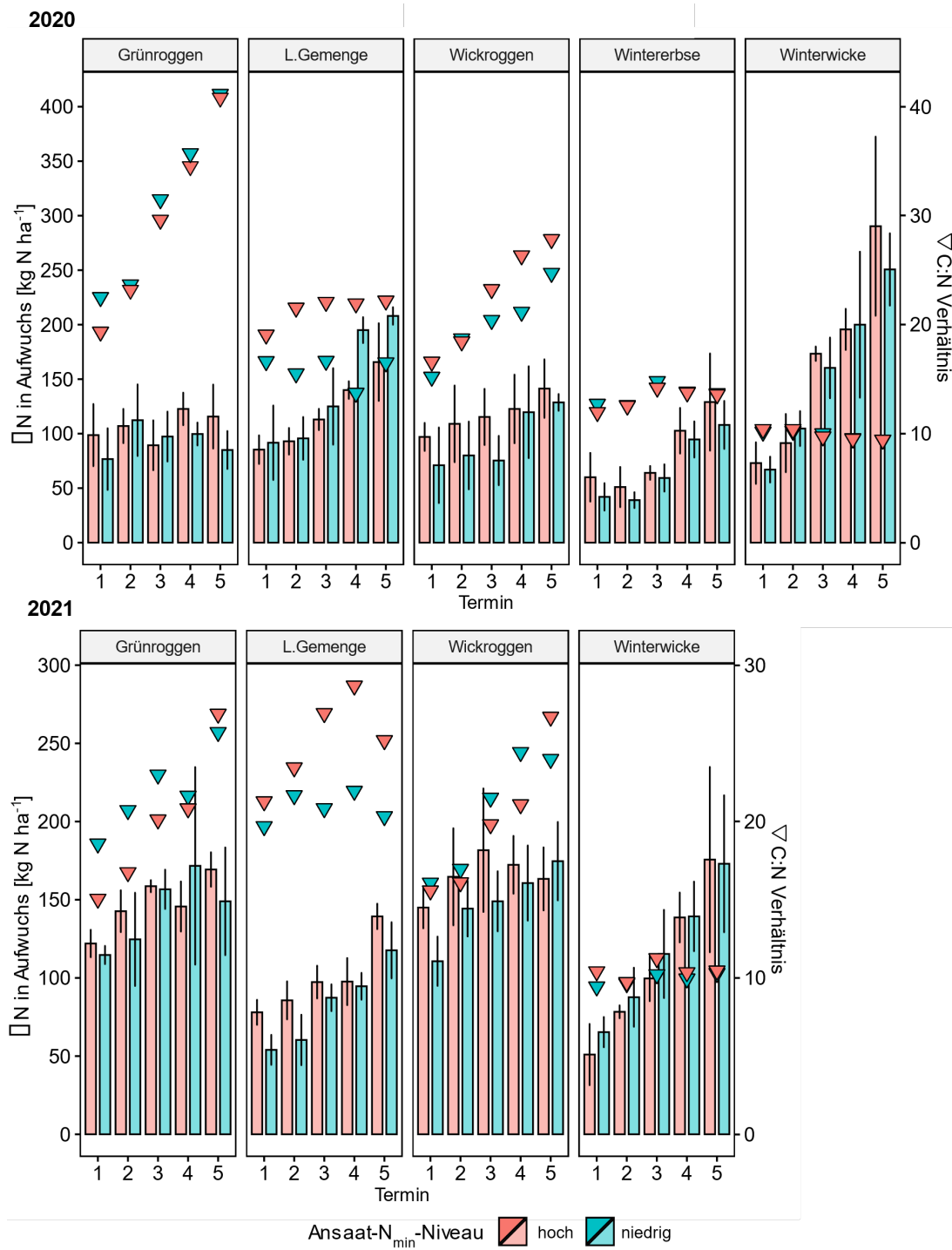


Abbildung 2.4-12: N-Menge im oberirdischen Aufwuchs unterschiedlicher Winterzwischenfrüchte (WZF) sowie dessen C/N-Verhältnis zu jeweils 5 Beprobungsterminen in den Jahren 2020 und 2021.

Tabelle 2.4–8: 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 2.4–9: 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 2.4–10: Näherungsweise N₂-Fixierungsleistung und C/N-Verhältnis (in Klammern) der Varianten bei niedrigem Ansaat-N_{min}-Niveau.

Wickroggen		Landsberger Gemenge		Winterwicke		Wintererbse	
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)

AUSFALL

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).

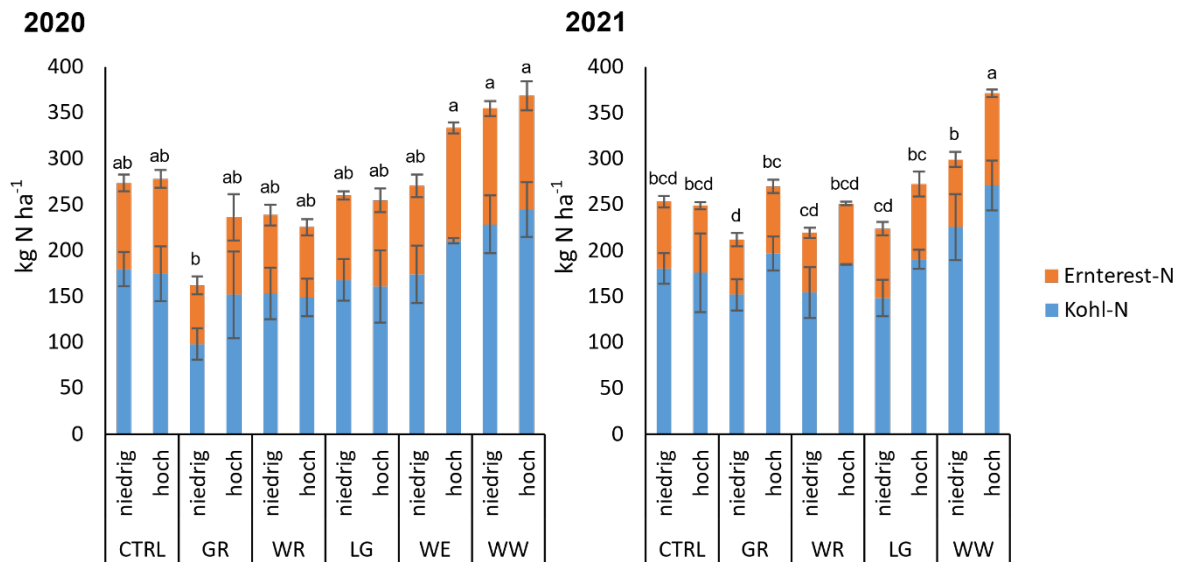


Abbildung 2.4-13: Mittlere N-Aufnahmen des nach unterschiedlichen Winterzwischenfrüchten (WZF) angebauten Weißkohls in Abhängigkeit der WZF-Variante („CTRL“ Brache, „GR“ Grünroggen, „WR“ Wickroggen, „LG“ Landsberger Gemenge, „WE“ Wintererbse, „WW“ Winterwicke) und des Faktors Ansaat-N_{min}-Niveau („hoch“ und „niedrig“). Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).

Tabelle 2.4–11: 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			

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

2.4.2.4 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 großteils 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 Weißkohnnachbaus 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 substantiell höhere C/N-Verhältnisse auf, die das kurzfristige Mineralisationspotenzial schmälern.

2.4.3 Integration von Klee gras in gemüsebauliche Fruchtfolgen

2.4.3.1 Einleitung

Als Satellitenversuch zum „Systemversuch Cut&Carry“ (AP 5) wurde an der LFA ein weiterer Versuch angelegt, der die Vorfruchtwirkung und N_2 -Fixierungsleistung der dort verwendeten Klee grasmischung unter verschiedenen Anbauszenarien untersucht. Insbesondere die Entfernung des Klee grasschnittguts kann zu einer substantiellen 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-Vorfruchtwirkung 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 Frühljahrsaussaat 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-Vorfruchtwirkung erzielt als bei Herbstaussaat 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.

2.4.3.2 Material und Methoden

2.4.3.2.1 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 Randreihen 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 2.4–12: 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

2.4.3.2.2 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 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 $CaCl_2$ -Suspension), P (photometrisch; $NaHCO_3$ -Auszug) und K (spektrometrisch; $CaCl_2$ -Auszug)

Pflanzenproben

Alle Varianten wurden zu den 4 Schnittzeitpunkten (Tabelle 2.3-13: Beprobungstermine (T1 – T4) der Gründungsphase) und bei ggf. notwendigen Schröpfungsschnitten 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 2.4–13: 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. Schröpfungsschnitte 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 Schröpfungsschnitte. 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 Bearbeitung 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 Weißkohljüngpflanzen wurden am Tag vor der Pflanzung protektiv gegen Kleine Kohlflye 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.

2.4.3.3 Ergebnisse

Die tatsächlich realisierten Herbst-N_{min}-Niveaus lagen bei V1 (05.10.2018, 28 Tage nach Düngung der Variante „hoch“) mit $112 \pm 9,1 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „niedrig“ und $141 \pm 13,9 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „hoch“ auf deutlich höherem Niveau als bei V2 (20.09.2019, 30 Tage nach Düngung der Variante „hoch“) mit $55,8 \pm 8,42 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „niedrig“ und $88 \pm 8,9 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „hoch“. Zur Aussaat der Frühljahrsaussaaten lagen die Niveaus bei V1 mit $12 \pm 0,8 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „niedrig“ und $17 \pm 0,8 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „hoch“ auf niedrigerem Niveau als bei V2 mit $29 \pm 7,6 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „niedrig“ und $35 \pm 4,1 \text{ kg N}_{\min} \text{ ha}^{-1}$ „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-mengen 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 Herbstaussaat 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).

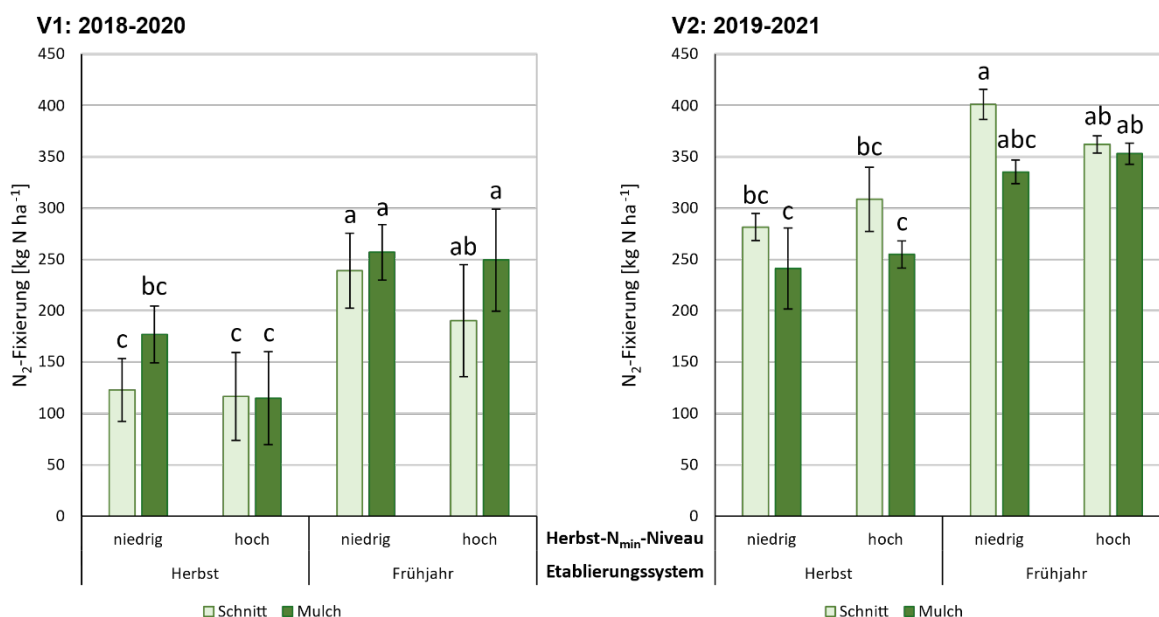


Abbildung 2.4-14: N₂-Fixierungsleistung in Abhängigkeit von Herbst-N_{min}-Niveau „hoch“ = Ausgangsniveau 112 kg N_{min} ha⁻¹ (2018) bzw. 56 kg N_{min} ha⁻¹ (2019) + 100 kg N ha⁻¹ als KAS. Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, α = 0,05).

Tabelle 2.4–14: Mittelwerte (n=3) der N_t-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 _t -Menge	C/N-Verhältnis	N ₂ -Fixierung (4. Schnitt)	N _t -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	83 c
		Mulch	34,4 bc	23,2 a	16 ab	117,7 cd	19,3 ab	73 c
	niedrig	Schnitt	32,2 bc	23,1 ab	12 b	135,4 cd	17,0 bcd	98 bc
		Mulch	37,9 abc	22,8 ab	18 ab	102,9 d	21,9 a	65 c
Frühjahr	hoch	Schnitt	46,4 ab	16,4 c	22 ab	232,4 a	12,7 d	198 a
		Mulch	40,5 abc	18,7 bc	16 ab	208,1 ab	13,8 cd	174 a
	niedrig	Schnitt	50,7 a	17,8 c	30 a	200,4 ab	12,9 d	176 a
		Mulch	41,3 abc	19,2 abc	20 ab	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 2.4–15: p-Werte kleiner 0,1 aus ANOVA der N₂-Fixierungsleistung zu den jeweiligen Schnittzeitpunkten (T1-T4) bzw. des C/N Verhältnisses zum Umbruchtermin T4.

	T1	N ₂ -Fixierung		T4	C/N T4
		T2	T3		
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

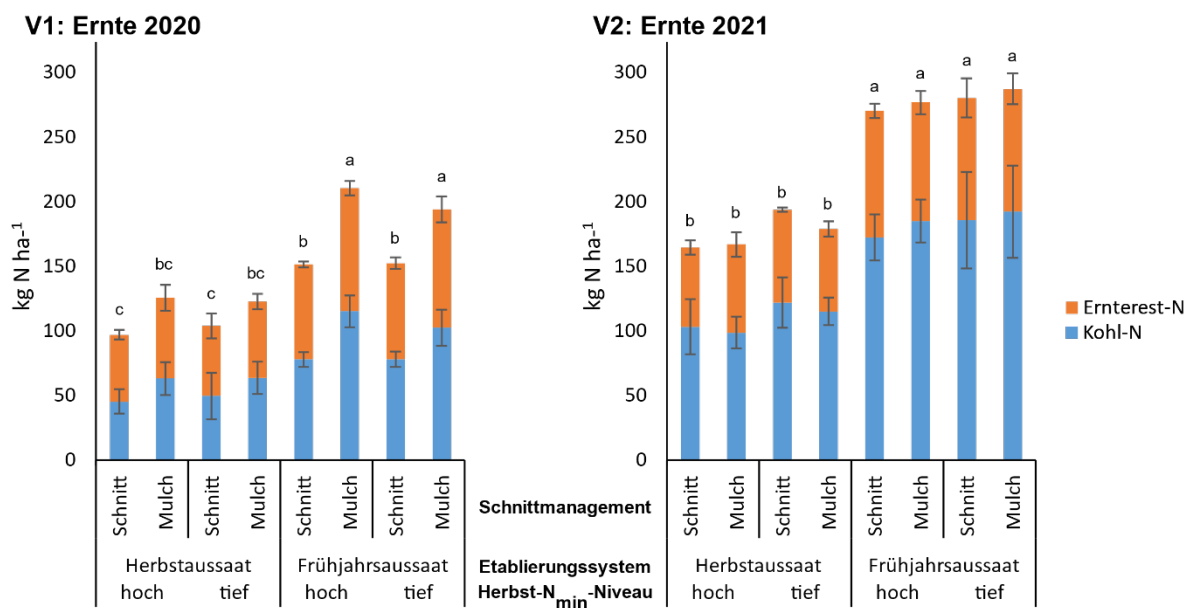
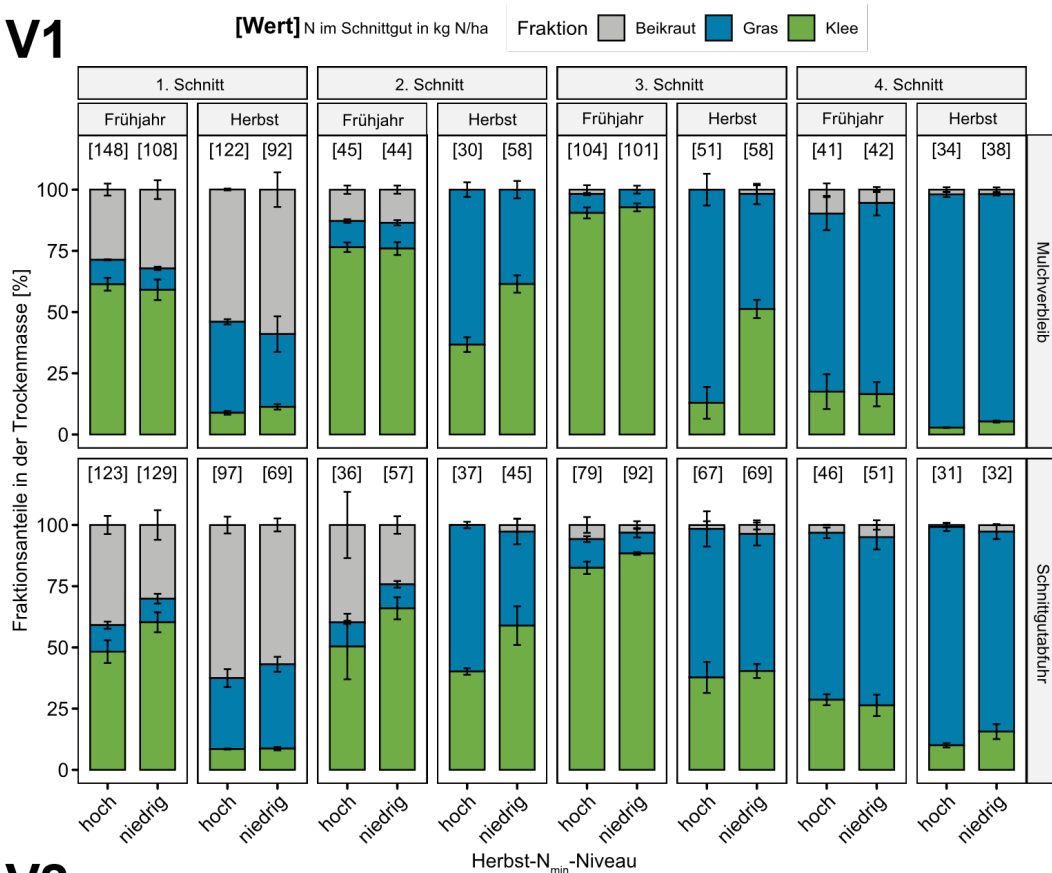


Abbildung 2.4-15: N-Aufnahme des nachgebauten Weißkohls unterschieden in Erntegut („Kohl-N“) und Ernterest. Mittelwerte ohne gemeinsamen Gruppierungsbuchstaben unterscheiden sich signifikant (LSD Post-hoc-Test, $\alpha = 0,05$).

Das mittlere (Roh-)Ertragsniveau des nachgebauten Weißkohls lag bei V2 (975 dt FM ha⁻¹) deutlich über dem von V1 (373 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 Gemeindezusammensetzung 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



V2

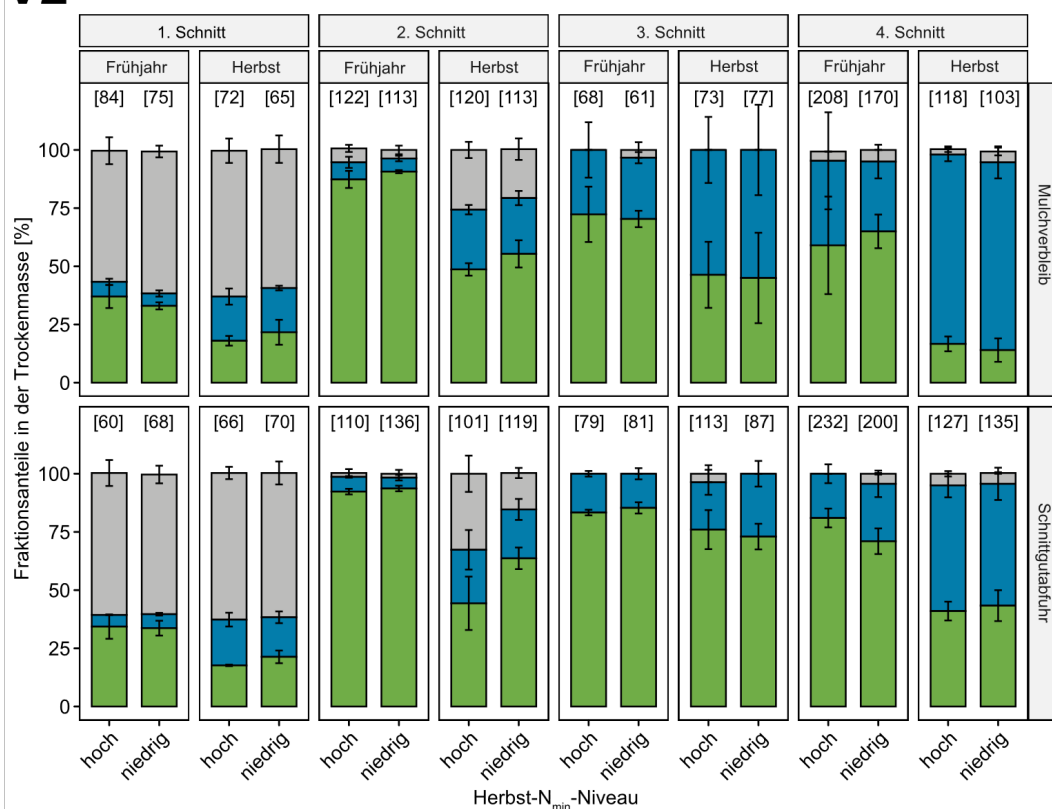


Abbildung 2.4-16: Mittlere Fraktionsanteile (Gras, Beikraut, Klee) und N_t-Mengen in der Schnittguttrockenmasse aller Versuchsvarianten zu allen abfuhrdifferenzierten Schnittterminen.

2.4.3.4 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 Frühljahrsblanksaat 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 Frühljahrsaussaaten 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 Frühljahrsaussaaten generell keine Schröpfungserfolge erfolgten, waren die Kleeanteile bei allen Schnitten gegenüber den Varianten der Herbstaussaat substanziell 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 Frühljahrsaussaaten durch das, nur bei den Frühljahrsaussaaten, 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 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 Schnittgutabfuhr in den untersuchten Szenarien nicht zu einer deutlichen Erhöhung der N_2 -

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 Kleeagrassystemen. 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.

2.4.4 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 Hortic* 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>

2.5 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)

2.5.1 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 N_2 -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 N_2 -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 N_2 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 Düngereigenschaften 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.

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

2.5.2.1 Material und Methoden

2.5.2.1.1 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) Kleeegrassilage
- 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 Kleeegrassilage 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 (Kleeegrassilage, 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.

2.5.2.1.2 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 und bei 40 °C (UHOH) bzw. 60 °C (GR) getrocknet. Die getrockneten Proben wurden zur weiteren Analyse in einer Edelstahlmühle (< 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 Gefriertrocknungsanlagen 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.

2.5.2.1.3 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.

2.5.2.2 Ergebnisse

2.5.2.2.1 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 NH₄⁺/N_T-Verhältnis, mittelhohe N_T-Gehalte auf TM-Basis.

Tabelle 2.5–1: Mittelwerte (MW) der Nährstoffkonzentrationen und des C/N-Verhältnisses der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 (n=4, Tofumolke n=6).

		Trocken- -masse	N_{total}	NH₄⁺-N	C	N	C/N- Verhältnis	S	P	K	Ca	Mg
Düngemittel¹⁾		(%)	(g kg ⁻¹ FM)	(g kg ⁻¹ FM)	(% DM)	(% DM)		(g kg ⁻¹ DM)	(g kg ⁻¹ DM)	(g kg ⁻¹ DM)	(g kg ⁻¹ DM)	(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- silage	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 2.5–2: Mittelwerte (MW) der Spurenelementkonzentrationen und der Gehalte an potentiell toxischen Elementen der untersuchten Düngemittel in 2019 und 2020 (n=4, Tofumolke n=6).

		Na	Cl	Zn	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Hg	Cd/P
Düngemittel¹⁾		(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(mg kg ⁻¹ DM)	(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- silage	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.

2.5.2.2.2 Erträge

In den übergreifenden Auswertungen der Standorte Kleinhohenheim und Grötzingen wurden gemäß den Ergebnissen der Varianzanalyse sowohl bei der Gesamtsprossmassebildung, 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 2.5–3: 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.

Varianz- ursache	Sprossmasse Kohl	Marktfähiger Kohlertrag	Nicht-marktfähiger Kohlertrag	Erntereste Kohl	Sprossertrag Spinat	Kornertrag Winterweizen	N-Konzentration Kohlkopf	N-Konzentration Ernterückstände	N-Konzentration Spinat	N-Konzentration Korn	N-Konzentration Stroh
Behand- 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- wirkung Kohlkopf	N-Aufnahme Erntereste Kohl	N-Aufnahme Kopf + Erntereste Kohl	Relative N-Dünge- wirkung Kohl + Reste	N-Abfuhr Spinat	N-Abfuhr Weizenkorn	N-Aufnahme Weizenstroh	Σ N-Abfuhr Kohl, Spinat, Korn	Relative N-Düngewir- kung Kohl+Spinat+Korn
Behand- 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 Gesamtbiomasse, 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 unbehandelte Kontrolle (63,1 t ha⁻¹, 8,9 t ha⁻¹ bzw. 20,7 t ha⁻¹) aus (Abbildung 2.4-1).

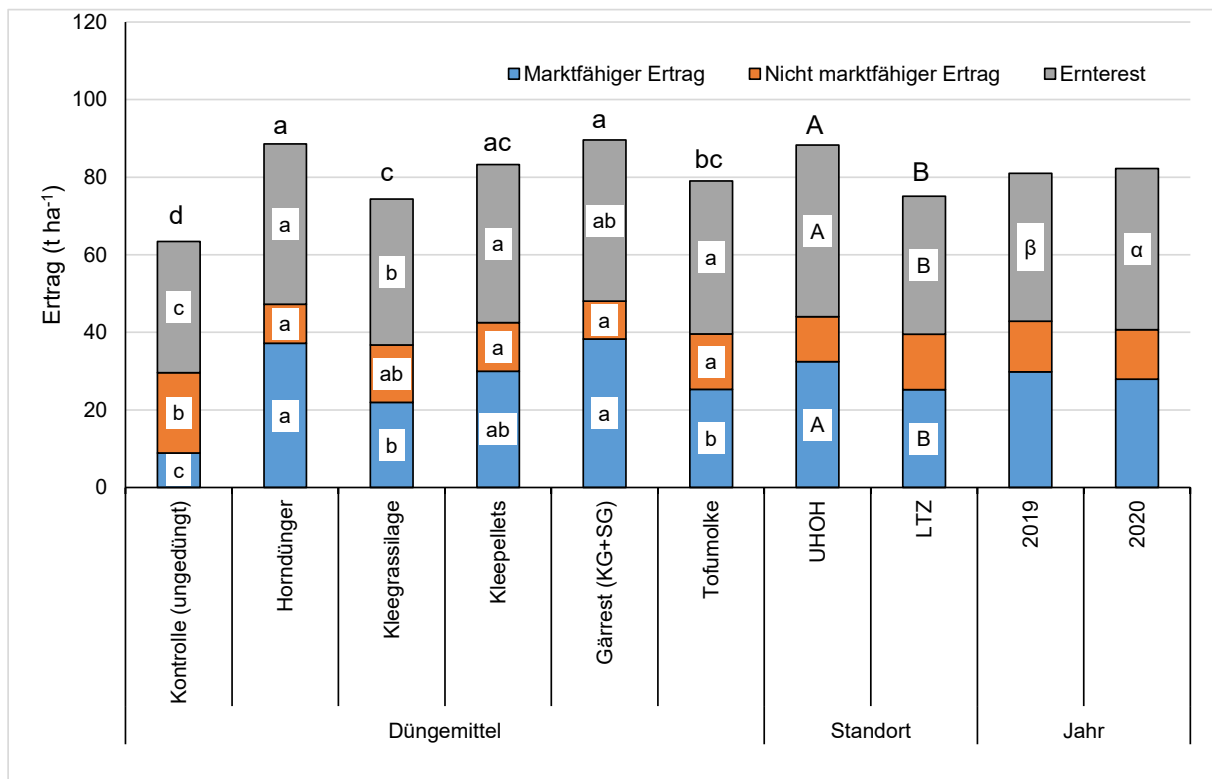


Abbildung 2.5-1: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel auf den Mittelwert der Weißkohlserträge (t ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2019 und 2020. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

Hohe Erträge wurden auch nach Düngung mit Kleepellets ermittelt, die niedrigsten Gesamterträge und Kopferträge wurden mit der Tofumolke und der Kleeegrassilage 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.

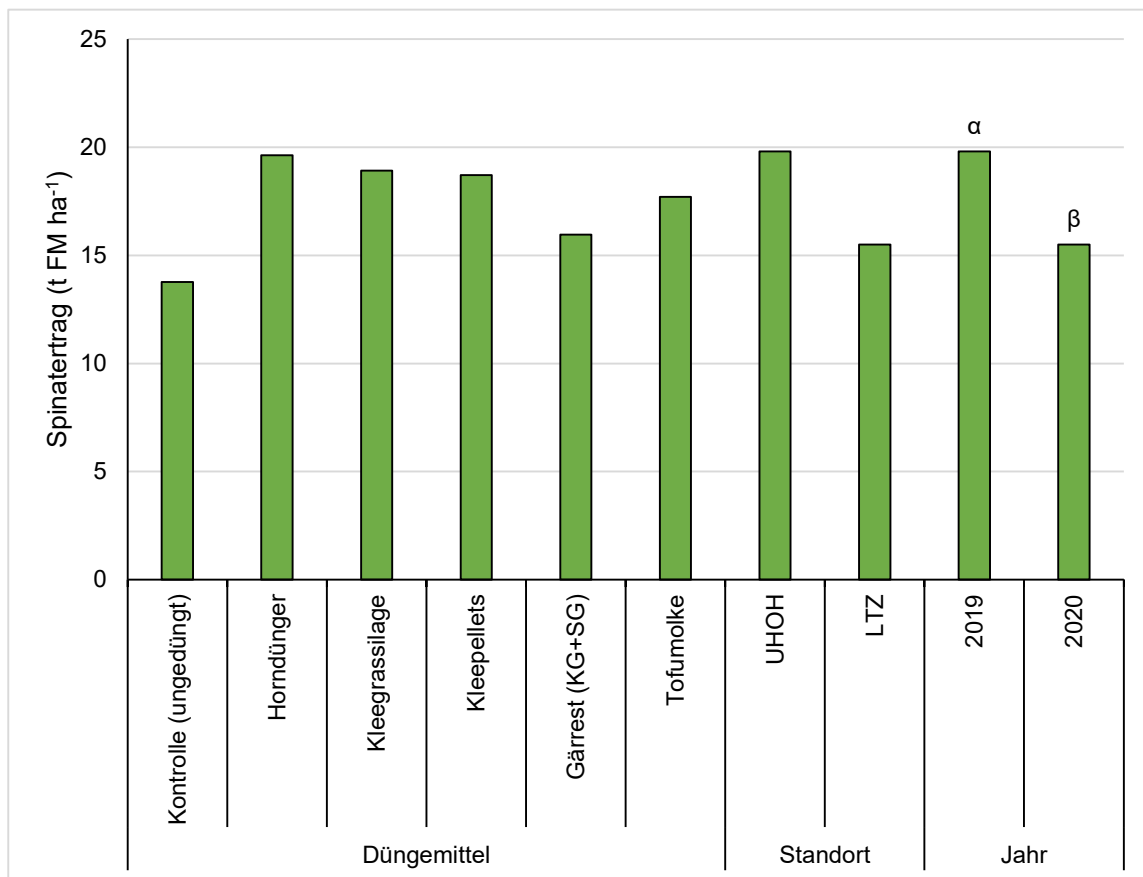


Abbildung 2.5-2: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die Nachwirkung bei Spinat – Mittelwert der Spinaterträge (t ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2019 und 2020. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen.

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 Klee grassilage 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.

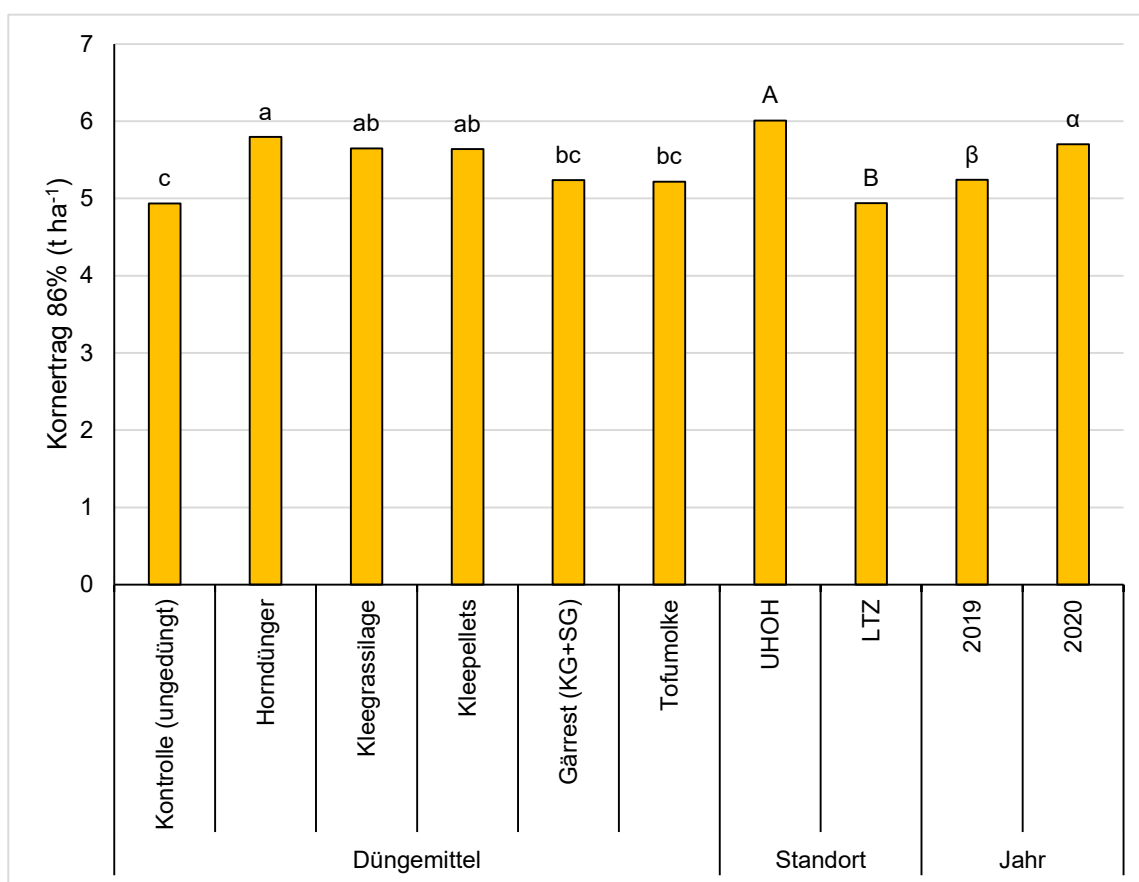


Abbildung 2.5-3: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die Nachwirkung Winterweizen – Mittelwert der Winterweizenerträge (t ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der TabelleAbbildung beziehen sich 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.

2.5.2.2.3 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 2.5–4: 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

2.5.2.2.4 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 unbedüngten Kontrolle (Abbildung 2.4-3). 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 unbedüngten 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.

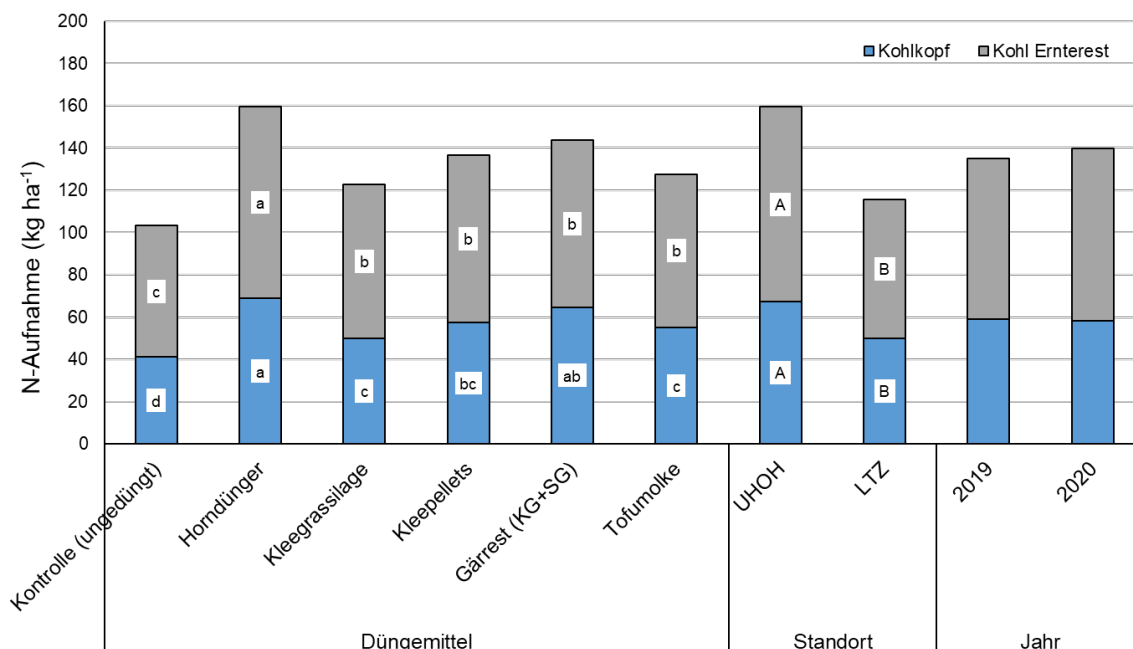


Abbildung 2.5-4: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel auf die N-Aufnahme von Weißkohl – Mittelwert an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Kleegras; SG = Schweinegülle; 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 (Abbildung 2.4-5). Der geringste Anstieg der N-Aufnahme wurde bei Kleegrassilage und Tofumolke gemessen.

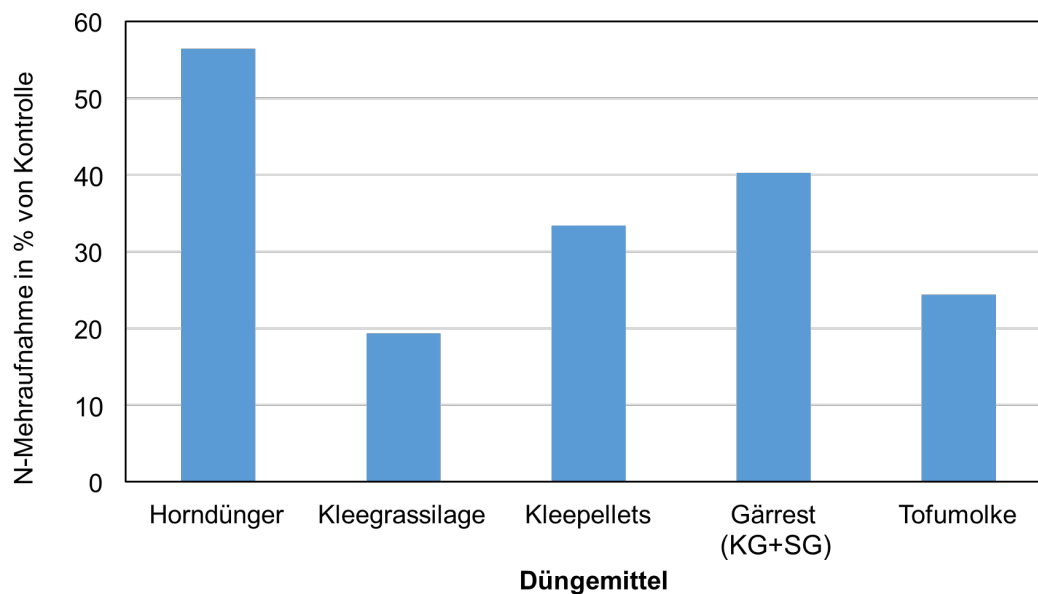


Abbildung 2.5-5: relativen N-Düngewirkung verschiedener organischer Düngemittel zu Weißkohl im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle – Mittelwert an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle.

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 kg N ha⁻¹) gemessen (Abbildung 2.4-8). Die Werte der übrigen Behandlungen liegen dazwischen.

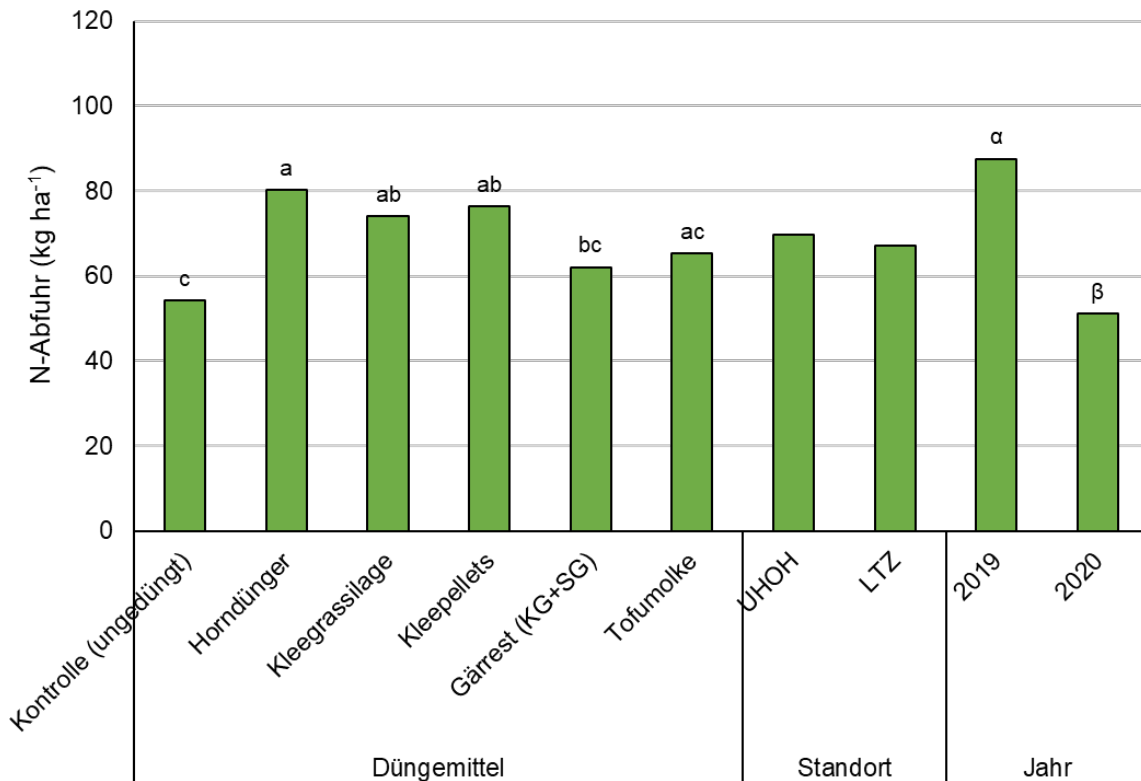


Abbildung 2.5-6: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Nachwirkung zur ungedüngten Zweitfrucht Spinat – Mittelwert der N-Abfuhr (kg N ha⁻¹) an den Standorten Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen 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.

Allerdings wurden bei den Korn-N-Abfuhr 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-Abfuhr der Behandlung Tofumolke nicht von der ungedüngten Kontrolle unterschieden, während am Standort Grötzingen die Behandlung Tofumolke die höchsten N-Abfuhr aufwies (Abbildung 2.4-8).

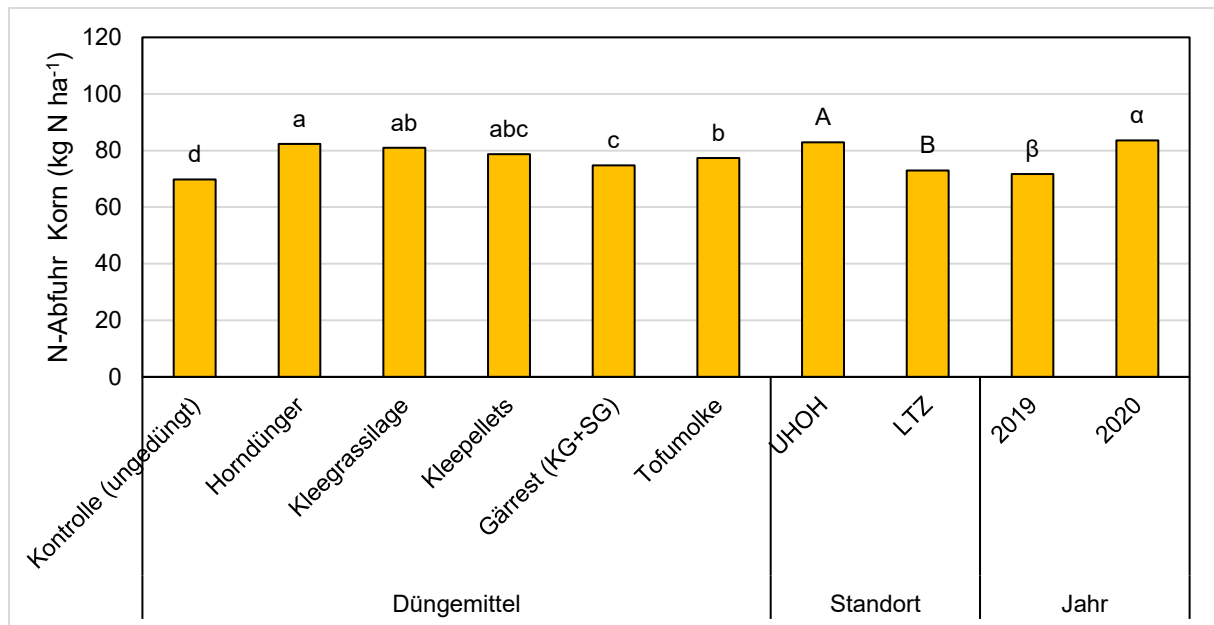


Abbildung 2.5-7: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Abfuhr bei der Messung der N-Nachwirkung zum ungedüngten Winterweizen als zweite Nachfrucht – Mittelwert der Korn-N-Abfuhr (kg N ha⁻¹) aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle; UHOH = Kleinhohenheim; LTZ = Grötzingen. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

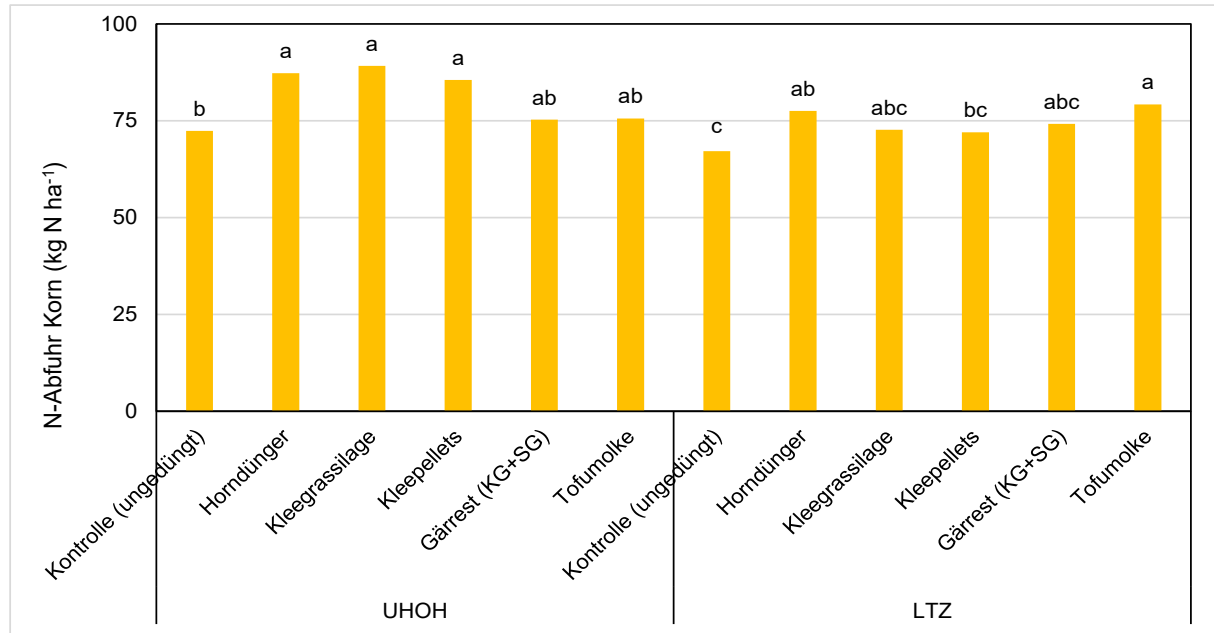


Abbildung 2.5-8: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die N-Abfuhr bei der Messung der N-Nachwirkung zum ungedüngten Winterweizen als zweite Nachfrucht – Mittelwert der Korn-N-Abfuhr (kg N ha⁻¹) getrennt ausgewiesen für die Standorte Kleinhohenheim und Grötzingen aus den Jahren 2020 und 2021. Jahresangaben in der Abbildung beziehen sich auf das Jahr der Düngung. Abkürzungen: KG = Klee gras; 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. Kleeegrassilage und Kleepellets zeigten eine eher geringe N-Direktwirkung, aber eine relativ starke N-Nachwirkung zur Zweitfrucht Spinat.

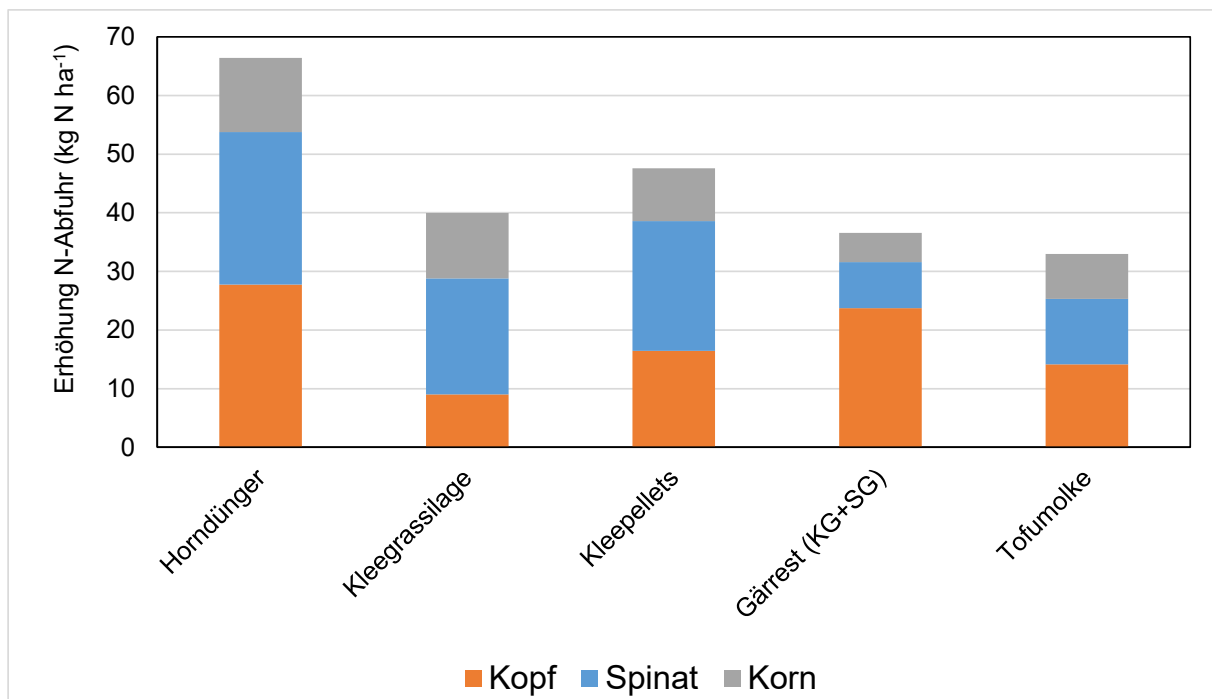


Abbildung 2.5-9: Einfluss verschiedener organischer Düngemittel bei einer Düngung zu Weißkohl auf die zusätzlichen N-Abfuhr von Weißkohl – Spinat und Winterweizen – (kg N ha^{-1}). Abkürzungen: KG = Klee gras; SG = Schweinegülle. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede mit $p \leq 0,05$ an.

2.5.2.3 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 Ernterückstände 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 Kleeegrassilagen im Vergleich zu Horndünger lässt auf eine eher langsame N-Freisetzung dieser beiden Düngemittel schließen.

Von den durchschnittlich 194,5 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 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).

2.5.2.4 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 KNO₃-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.
- Katroshan, 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 Hortic.* 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.

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

2.5.3.1 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

2.5.3.1.1 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.

2.5.3.1.2 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.

2.5.3.1.3 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.

2.5.3.1.4 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 2.5–5: Niederschlag und Beregnungsmenge der Jahre 2019-2021 in den Kulturen Weißkohl und Spinat

	2019		2020		2021	
	Niederschlag [L/m ²]	Beregnung [L/m ²]	Niederschlag [L/m ²]	Beregnung [L/m ²]	Niederschlag [L/m ²]	Beregnung [L/m ²]
Weißkohl	95	193	83	258	147	128
Spinat	50	120	71	95	49	93

2.5.3.1.5 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.

2.5.3.1.6 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 2.5–6: Boden-Analyseergebnisse der Versuchsflächen 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

2.5.3.1.7 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.

2.5.3.1.8 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 2.5–7: 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	
Kleegras 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.

2.5.3.1.9 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.

2.5.3.2 Ergebnisse

2.5.3.2.1 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 2.5–8: Gesamtaufwuchs, vermarktungsfähiger Ertrag und Erntereste jeweils $\pm$ Standardabweichung des Weißkohls 2019.

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

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

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 2.5–9: 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 2.5–10: 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.

2.5.3.2.2 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 ausdünnte. 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 2.5–11: 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.	$\pm 17,7$	-	-	-
Kleegras-Frisch	-	-	-	-	-	-	209,7	n.s.	$\pm 31,9$

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

2.5.3.2.3 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 2.5–12: 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 $\alpha = 0,05$

2.5.3.2.4 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 2.5–13: 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 $\alpha = 0,05$

2.5.3.3 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 durchwurzelten 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 Ernterückstände 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 Winterweizenerträge 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 Vinsasse 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 ein 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 2.5–14: 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

2.5.3.4 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.

2.5.3.5 Literaturverzeichnis

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

Anhang 2.4

Tabelle 2.5–15: N_{min}-Werte der Kulturfolge 2019-2020

Kultur	Datum	Entwicklungszustand	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	
	16.07.19	Ernte	HMP	22	9	27
			Luzerne-Silage	22	16	30
			KleePura	19	9	22
			Tofumolke	20	9	20
			Luzerne-Heu	18	7	31
Spinat	06.08.19	Aussaat	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
			Luzerne-Heu	70	43	36
	10.10.19	Ernte	HMP	0	0	15
			Luzerne-Silage	0	0	18
			KleePura	0	0	16
			Tofumolke	0	0	14
			Luzerne-Heu	0	0	20
WW	05.12.19	Ende Vegetation	HMP	12	16	11
			Luzerne-Silage	18	16	0
			KleePura	23	12	9
			Tofumolke	26	15	0
			Luzerne-Heu	27	14	0
	19.03.20	Begin Vegetation	HMP	0	0	0
			Luzerne-Silage	0	0	0
			KleePura	0	0	0
			Tofumolke	0	0	0
			Luzerne-Heu	0	0	0
	17.07.20	Ernte	HMP	17,55	0	0
			Luzerne-Silage	20,25	0	0
			KleePura	27	0	0
			Tofumolke	13,5	0	0
			Luzerne-Heu	25,65	0	0

Tabelle 2.5–16: N_{min}-Werte der Kulturfolge 2020-2021

Kultur	Datum	Entwicklungszustand	Variante	N _{min} [kg N ha ⁻¹]		
				0-30	30-60	60-90
Weißkohl	24.03.20	Beginn Vegetation	Mischprobe	19	25	27
	29.04.20	Pflanzung	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
	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
Spinat	24.08.20	Aussaat	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
	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
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
	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	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

Tabelle 2.5–17: 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-Silage	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-Silage	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-Silage	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-Silage	12	14	7
			KleePura	9	14	6
			Tofumolke	13	12	6
			Kleegras-Frisch	9	16	6

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

2.5.4.1 Einleitung

Ein Ansatz zur Erhöhung des N-Inputs und der N-Nutzungseffizienz von Stickstoff aus biologischer N_2 -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 Gemeinotyp, der Witterung und der Schnitthäufigkeit zu einer substanziellen Erhöhung der N_2 -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 N_2 -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) Substanziell höhere N_2 -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 Schnittguteinbringung (Indikatoren: Herbst- N_{min} , N-Bilanzsaldo 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

2.5.4.2 Material und Methoden

2.5.4.2.1 Standort

Siehe 2.3.2.3 Versuche in Norddeutschland

2.5.4.2.2 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 Fahrgassen 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 2.5–18: 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.

2.5.4.2.3 Probenahme und Analytik

Bodenproben

Zum jeweiligen Kulturbeginn (0–90 cm), nach Kulturende 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 Kulturende 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. Kleeegrasschnittgut zu jedem Schnitt (TS bei 70°C, Nt durch Verbrennungsmethode nach Dumas)
- Separate TS-Gehalte des letzten Kleeegrasschnitts für die Fraktionen Klee, Gras und Beikraut

2.5.4.2.4 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 Kleeegrasvorkultur (Umbruch Frühjahr 2020) bzw. Zufuhr von Transfermulch erfolgte die Düngung entsprechend des *OHD*-Systems. Das erste Fruchtfolgefeld (Kleeegras 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 2.5–19: N-Zufuhr mit Haarmehlpellets (HMP)

Kultur	Düngung	C&C	System	<i>OHD</i>
			<i>Mulch</i> [kg HMP-N ha ⁻¹]	
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 <i>OHD</i>		-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) → Kleeegras/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) → Kreisel → Direktsaat Rote Bete

Das Kleeegras (Camena 'Rotkleeegras 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 gedrillt. 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 Kleeegrasumbruch 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 Abflamngerät 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 beregnet.

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 2.5–20: 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 2.5–21: 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}			
Hauptnutzungsjahr			
Schröpschnitt		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	
davon N_{dfa}	17	14	[%] von Wurzel-/Stoppel-Biomasse- N_t

2.5.4.3 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 betrugen $0,81 \pm 0,13$ (OHD); $0,88 \pm 0,3$ (Mulch) und $0,86 \pm 0,31$ (C&C). Eine ANOVA ergab keine signifikanten Mittelwertunterschiede. Analog betrugen die P_2O_5 -Konzentrationen [mg/100g TM] $19,45 \pm 3,08$ (OHD); $19,38 \pm 6,45$ (Mulch) und $17,75 \pm 5,97$ (C&C). Eine ANOVA ergab auch hier keine signifikanten Mittelwertunterschiede.

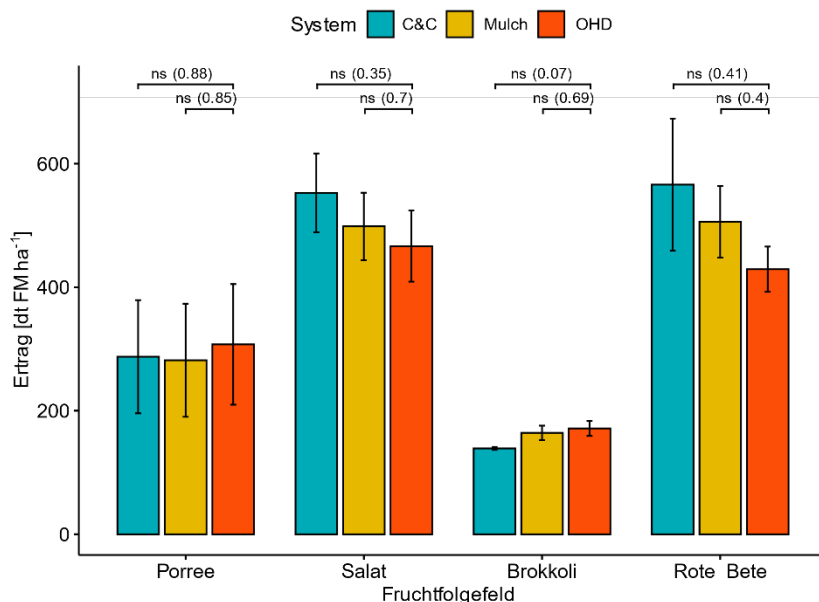


Abbildung 2.5-10: Erträge der vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder und Wiederholungen. Fruchtfolgefeld (in Klammern: n der Datensätze): Porree (6), Salat (4), Brokkoli (4), Rote Bete (2).

Tabelle 2.5–22: $N_{\min}$, 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			N-Abfuhr	N-Saldo
	Start	Ernte	Transfer- mulch-N	N ₂ fix	Brutto- Gesamt-N		
	[kg N _{min} ha ⁻¹]		[kg N _t ha ⁻¹]	[kg N ha ⁻¹]	[kg N ha ⁻¹]	[kg N _t ha ⁻¹]	[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 ² $N_{\min}$ unmittelbar vor Kleegrasumbruch

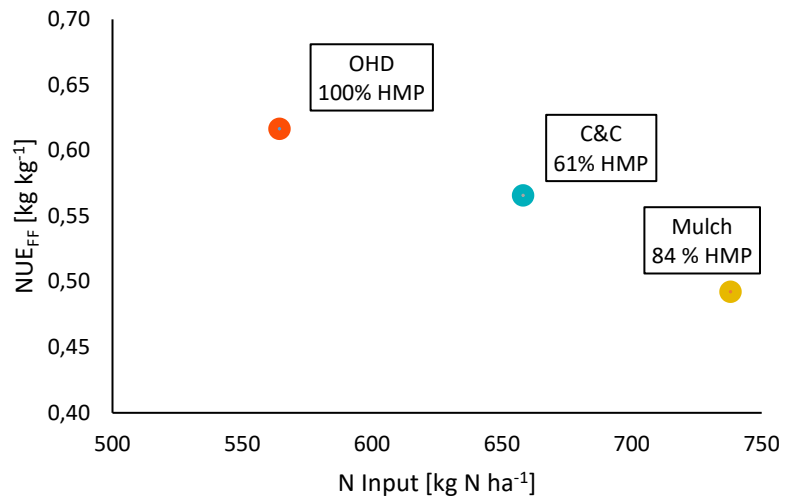


Abbildung 2.5-11: Mittlere N-Nutzungseffizienz der jeweiligen Gesamtfruchtfolge (NUE_{FF}) mit Standardabweichung. Berücksichtigt wurden alle vollständig differenzierten Fruchtfolgefelder.

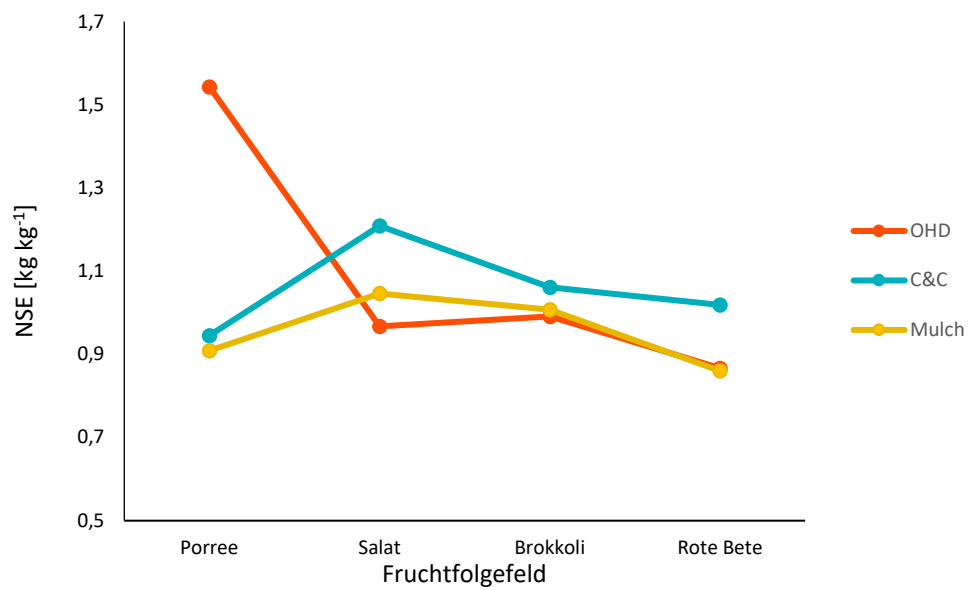


Abbildung 2.5-12: Mittlere N-Versorgungseffizienz (NSE) der Fruchtfolgefelder der Systeme mit Standardabweichungen..

Tabelle 2.5–23: 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).

2.5.4.4 Diskussion

Über den Versuchszeitraum 2018-2022 wurden im Hauptnutzungsjahr keine substanziell 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 N_{UEFF} zeigt jedoch, dass durch den gezielten Transfer von Schnittgut zu N-bedürftige Kulturen in C&C und deren Nachlieferungen die N_{UEFF} im Vergleich zu *Mulch*, bei gleichzeitig reduziertem OHD-Einsatz, gesteigert wurde. Die substanziell 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.

2.5.4.5 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-Klemedtsson, A., Klemedtsson, 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.

2.5.5 Ergebnisse Gewächshausversuche in Bamberg (LWG)

2.5.5.1 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?

2.5.5.2 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 2.5–24: 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 2.5–25: 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 2.5-13: Schattenwurf im Bestand durch die Konstruktion des GWH.

2.5.5.3 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).

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.

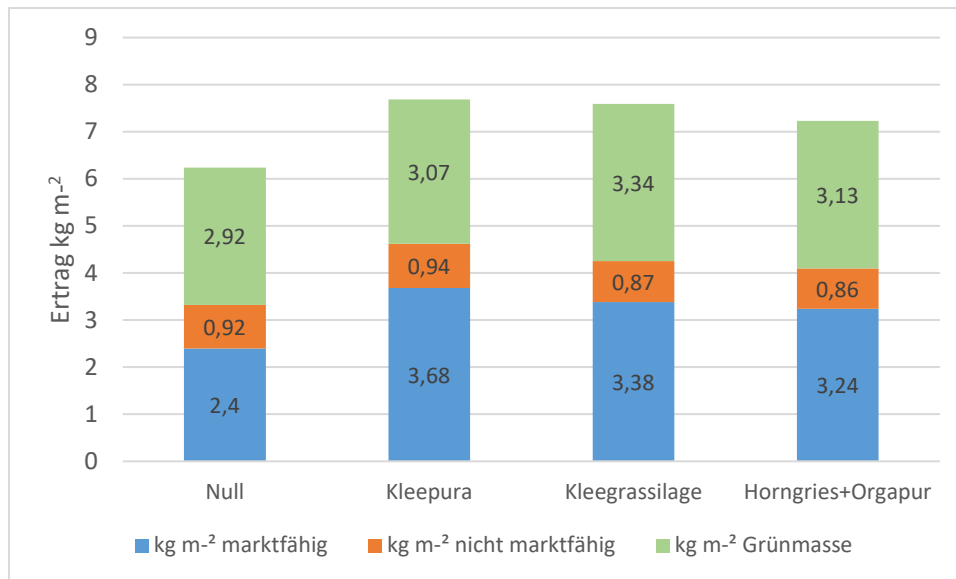


Abbildung 2.5-14: Einfluss der Düngung auf Ertrag Tomate und gebildete Grünmasse.

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 2.5-15: Gewächshaus mit umfangreichen Einbauten im Dachbereich am 9.3.2020 bei der Ausbringung der organischen Düngemittel nach Versuchsplan.

2.6 Düngewirkung als Interaktion von Dünger und Bodeneigenschaften

R. Kahle, H.J. Reents (TUM), A. Sradnick (IGZ)¹ und D. Horn (BGD-BAD)²

2.6.1 Einleitung

Je nach Standort und Bewirtschaftung können sehr unterschiedliche Mengen organischer Substanz (OBS) und Nährstoffe in den Böden auf-, aber auch abgebaut werden (Fließbach et al. 2000, Herencia und Maqueda 2016, Kolbe 2022, Levin et al. 2021, Stadler 2022). Daraus ergeben sich unterschiedliche Potenziale, Nährstoffe, insbesondere Stickstoff, für das Pflanzenwachstum freizusetzen oder zu binden.

Organische Dünger können sehr unterschiedliche N-Freisetzungsraten auf verschiedenen Standorten aufweisen (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 (Sradnick und Feller 2020).

Um dieses Wissen über die Bedingungen in Düngekalkulationsprogramme (N-Expert, NDICEA) nutzen zu können, müssen verschiedene messbare bzw. kategorisierbare Einflussfaktoren identifiziert werden. Der Humusgehalt und der Gehalt an organischem Stickstoff sind wichtige Einflussgrößen, da sie das Potential charakterisieren, aus dem Stickstoff freigesetzt werden kann. Die aktuelle N-Freisetzung ist zusätzlich von der Qualität der organischen Substanz abhängig, d.h. handelt es sich eher um jüngere Pflanzenrückstände oder um den langfristig akkumulierten Humus (Brock et al. 2016).

Der Humusgehalt ist eng mit der Bodenart, speziell dem Tongehalt (Körschens 1980) gekoppelt: Die organische Substanz verbindet sich mit den Mineraloberflächen zu Mineral-Humus-Komplexen (Ellerbrock et al. 2018, Lützow et al. 2006). Gleichzeitig beeinflusst der Ton die Struktur des Bodens und die Wasserverfügbarkeit, beides Eigenschaften für die Umsetzung der organischen Substanz (Lützow et al. 2008). Im Vergleich zu anderen Untersuchungen (Franko 1996) ist der Einfluss des Tongehalts für die N-Freisetzung im Rahmen der im Projekt behandelten Programme NDICEA und N-Expert bisher wenig charakterisiert und sollte deshalb in den Untersuchungen so weit bestimmt werden, um ihn letztlich als Faktor in die Düngebedarfsrechnungen einbeziehen zu können.

Neben der Bodenart ist die Bewirtschaftung (z.B. die Art und Intensität der Bodenbearbeitung, die Fruchtfolge) eine weitere standortspezifische Einflussgröße auf die N-Mineralisation und die Umsetzung organischer Dünger in pflanzenverfügbare N-Verbindungen (Poeplau et al. 2011). Eine dauerhaft hohe Versorgung mit organischen Düngern und Gründüngung (wie im ökologischen Gemüsebau teilweise üblich) hebt den die Menge des organischen Stickstoffs im Boden an. Dieser hat grundsätzlich ein höheres Potential in der N-Freisetzung, sowohl in der Menge als auch im Zeitverlauf. Die Effekte dieser längerfristigen

¹ Mit verantwortlich in der Leitung von AP6, Input zur Methodik Inkubationsversuche, Nutzung der Ergebnisse für N-Expert

² EUF Analysen der Böden aus den Versuchsstandorten der Betriebe

Bewirtschaftungsmaßnahmen sind bislang weniger untersucht und sollen deshalb einen weiteren Schwerpunkt der Untersuchungen bilden, um daraus zielgenauere N-Mineralisationsleistungen des Bodens für die Düngerbedarfsrechnungen abzuleiten.

Die Gesamtwirkung der N-Freisetzung im Ablauf von Anbauverfahren ergibt sich aus dem Wirkungsanteil des Bodens und des jeweiligen Düngemittels. Verschiedene Eigenschaften wie der Gesamtstickstoffgehalt, das C/N-Verhältnis des Düngers, der Anteil unterschiedlicher N-Verbindungen, aber auch die Partikelgröße oder die Herkunft des Materials haben einen Einfluss auf die Umsetzung des Materials (Brock et al. 2016). Die Eigenschaften und das Verhalten des Bodens treten nach der Düngung in Wechselwirkung und machen die Voraussage der Wirkung schwierig und unsicher.

Die praxisübliche Bodenuntersuchungsmethode zum Abschätzen des verfügbaren Stickstoffs im Boden ist die Bestimmung des Nitrat- (und Ammonium-) Gehalts in verschiedenen Bodenschichten ($N_{\min}$ -Methode), meist zu Kulturbeginn. Die Bestimmung des $N_{\min}$ -Gehalts stellt jedoch immer eine Momentaufnahme und das Resultat der vorangegangenen Umsetzungsprozesse dar, die stark und damit variabel von der Witterung beeinflusst sind. Durch Schwankungen von Temperatur und Feuchtigkeit, aber auch mit der Aufnahme durch die Pflanze oder N-Verluste durch Auswaschung oder Ausgasung sowie durch Immobilisierungsprozesse kann sich der $N_{\min}$ -Gehalt innerhalb kurzer Zeit ändern.

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 organischem Kohlenstoff und das C/N-Verhältnis des Bodens und der Dünger sowie die Aktivität der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden 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 Parameter. Bei der Berechnung des N-Düngebedarfs nach einer organischen Düngung kann es allerdings zu erheblichen Abweichungen zwischen Modellergebnissen und der Ertragswirkung kommen, da die Modelle die Bedingungen z.T. unzureichend abbilden. Eine differenziertere Feinabstimmung einzelner Einflussgrößen könnte dazu beitragen, diese Abweichungen zu minimieren. Zusätzliche bzw. andere Informationen über die Standortbedingungen und Bewirtschaftung und Düngungshistorie werden für ein besseres Ergebnis notwendig sein.

In Versuchen mit Böden aus langjährig ökologisch bewirtschafteten Gemüse- und Ackerbausystemen sollen anbausystemische Wirkungen und Wechselwirkungen mit Düngern abgebildet werden, um daraus Regeln und funktionale Zusammenhänge für die N-Freisetzung abzuleiten. Die Erkenntnisse und Daten aus den Versuchen werden verschiedenen Modellen und interessierten Arbeitsgruppen zur Verfügung gestellt: N-Expert am IGZ, NDICEA – Landwirtschaftskammer NRW (siehe 2.2), Web-Man – TU München (<https://web-man.org/>). Nach Rücksprache mit LWK-NRW werden die Daten zur N-Mineralisation benötigt, um zu überprüfen, ob die Umsatzrate der organischen Substanz und resultierenden N-Freisetzung in NDICEA korrekt abgebildet wird. Die Erkenntnisse aus den Versuchen aus AP 3 (siehe 2.2)

deuten darauf hin, dass NDICEA die Mineralisation in langjährig organisch gedüngten, intensiven Gemüsebaufruchtfolgen unterschätzt und eine Anpassung damit wünschenswert wäre.

Ziele des Arbeitspakets sind die Analyse der Ursachen für Unterschiede im N-Freisetzungsverhalten von verschiedenen Böden und Düngemitteln sowie Identifizierung von Analysemethoden bzw. Bodenparametern, um die N-Mineralisierung besser und sicher prognostizieren zu können. Die Ergebnisse und Daten sollen für die Modellierung des N-Umsatzes in Böden nach und vor organischer Düngung genutzt werden. Zur Charakterisierung des Einflusses auf die N-Verfügbarkeit wurden die Faktoren Boden (Tongehalt, Bodenserien von Flächen gleicher Bewirtschaftung), Bewirtschaftung (Dauerversuche, verschiedene Betriebe) und Düngung (Dauerversuche, C/N organischer Dünger) untersucht.

Dabei wurden folgende Hypothesen geprüft:

1. Mit steigendem Tongehalt sinkt die relative N-Mineralisation des Bodenstickstoffs.
2. Die Netto-N-Mineralisation eines organischen Düngemittels ist unabhängig vom Tongehalt.
3. Die Netto-N-Mineralisation sinkt mit weiterem C/N-Verhältnis der Düngemittel.
4. Die langfristige Art der Bewirtschaftung – Betriebssystem, Düngemanagement, Fruchtfolge, Leguminosenanteile – haben einen starken Einfluss auf die N-Nachlieferung aus dem Boden, der meist stärker ist als die Wirkung der ergänzenden Düngemittel

2.6.2 Material und Methoden

Zentraler methodischer Ansatz waren Inkubationsversuche, in denen Böden mit verschiedenen Eigenschaften – Tongehalt, langfristiges Düngemanagement, Fruchtfolgen mit differenzierten Leguminosenanteilen - mit verschiedenen organischen Düngemitteln kombiniert wurden. Die Inkubationen wurden in Brutschränken (Respirometer BSBdigi, SELUTECH GmbH, Hechingen, Deutschland) durchgeführt, in denen die Probengefäße belüftet werden konnten bei gleichzeitiger Begrenzung des Wasserverlusts (geschlossenes System, in dem der Sauerstoffverbrauch automatisch dokumentiert und ausgeglichen wird). Im Lauf der Inkubation wurde während der Inkubationszeit mehrfach beprobt, mit einer engen Staffelung am Anfang und weiteren Abständen am Schluss und die Stickstoffmenge in Form von Nitrat und Ammonium im Boden bestimmt. Als Maß der Stickstofffreisetzung diente die Netto-N-Mineralisationsrate.

$$\text{Netto-N-Mineralisation [\%]} = \frac{(N_{\text{min-Düngebehandlung}} - N_{\text{min-Kontrollboden}})}{N_{\text{min-Düngebehandlung}}} \times 100$$

Parallel zu diesen Versuchen wurden im Gewächshaus Pflanzenversuche durchgeführt, in 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 deren Ergebnisse. Im Gegensatz zu Inkubationsversuchen interagieren in einem natürlichen System

Pflanzenwurzeln mit Boden und Mikroorganismen und beeinflussen damit die Mineralisation in zusätzlicher Weise.

Der Effekt der Bodenart wurde durch Bodenserien mit unterschiedlichem Tongehalt geprüft, die jeweils von einem Standort mit gleicher Bewirtschaftungsvorgeschichte (Schlag) gewonnen wurden. Für die Berücksichtigung der Bewirtschaftungsvorgeschichte wurden Böden aus Dauerversuchen (Baumgartner et al. 2023, Reents et al. 2011) entnommen, dem TUM-Systemversuch (Tabelle 2.5-2) und TUM-Biomasseversuch (Tabelle 2.5-3) des Lehrstuhls für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme der TU-München, und untersucht. Als Einflussfaktoren wurden die Betriebssysteme - viehloser Marktfruchtbau und Klee-gras-Mulch, viehloser Marktfruchtbau und Biogas-Gärrestdüngung, Milchviehhaltung mit Mist oder Gülle sowie Fruchtfolgesysteme mit unterschiedlichen Anteilen an Leguminosen innerhalb eines Biomasse/Biogas-Systems, untersucht. Dazu kamen noch Böden aus Betrieben mit unterschiedlichen N-Bilanzsalden (s. 2.1).

Die Auswahl der Düngemittel für die Versuche orientierte sich einerseits an der Differenzierung nach C/N-Verhältnissen, als Indikator für die (mikrobielle) Umsetzbarkeit, andererseits an den in der Praxis üblichen sowie den in den Partnernversuchen (siehe 2.3 und 2.4) verwendeten Düngern. Als Kontrollen diente eine Null-Düngung. Horn- oder Haar-Dünger wurden als kommerzielle Handelsdünger im Vergleich zu anderen pflanzlichen Düngemitteln eingesetzt Tabelle 2.5-6.

Mit Hilfe von weiteren Bodenuntersuchungen wurden die verwendeten Böden hinsichtlich ihres Verhaltens zur N-Freisetzung und Umsetzung organischer Dünger charakterisiert. Aus der C_{org}- und N_t-Bestimmung wurde das C/N-Verhältnis abgeleitet, einem Maß für die potentielle Umsetzungsfähigkeit der organischen Substanz. 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.

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

2.6.2.1 Böden

Die verwendeten Böden stammten von langjährig ökologisch bewirtschafteten Flächen. Da das Kriterium „Unterschiede im Tongehalt“ innerhalb eines ansonsten einheitlich bewirtschafteten Schlages waren, wurde die (aktuelle/bisherige) gartenbauliche und ackerbauliche Nutzung der Flächen bei der Identifizierung und Auswahl der Böden nicht als primäres oder ausschließendes Kriterium betrachtet. Bei den Böden der Dauerversuche handelt es sich um ackerbauliche Betriebs- und Fruchtfolgesysteme.

Tabelle 2.6–1: Herkunft der Böden

Kürzel	Lage	Betrieb	Nutzung
VH	LK Freising	TUM Versuchsbetrieb	Ackerbau
HK	LK Freising	Landwirtschaftlicher Betrieb	Ackerbau
ED	LK Dingolfing Landau	Gärtnerischer Betrieb	Gemüsebau

ZF	LK Dingolfing Landau	Gärtnerischer Betrieb	Gemüsebau
MFS	LK Freising	TUM Systemversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
BGS	LK Freising	TUM Systemversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
MSS	LK Freising	TUM Systemversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
MGS	LK Freising	TUM Systemversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
STD	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
MF	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
LKG1	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
LKG2	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
STD+BG	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
MF+BG	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
LKG1+BG	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
LKG2+BG	LK Freising	TUM Biomasseversuch/ Versuchsbetrieb	Ackerbau
NS*	LK Freising	Gärtnerischer Betrieb	Gemüsebau
GA2*	LK Rems-Murr	Gärtnerischer Betrieb	Gemüsebau
GL*	LK Rems-Murr	Gärtnerischer Betrieb	Gemüsebau

* Betriebsböden, die in Kollaboration mit AP 2, 2.1 zusätzlich untersucht wurden, Versuchsergebnisse siehe 2.5.8 Anhang.

Der Systemversuch Viehhausen (SV) wurde im Jahr 2009 auf der Versuchsstation Viehhausen, 30 km nördlich von München, als Dauerfeldversuch angelegt. Ziel des Versuchs ist es, die Wirkungen unterschiedlicher Pflanzenbausysteme auf die Ertragsleistungen, Bodeneigenschaften und -Prozesse sowie Umweltwirkungen zu untersuchen. Der Versuch enthält vier ökologische Systeme, die durch spezifisches Management, Düngung und Fruchtfolgen abgebildet werden (Tabelle 2.5-2).

Tabelle 2.6–2: TUM-Systemversuch – Öko-Anbausysteme und deren spezifische Bewirtschaftung, Düngung und Fruchtfolgen

Boden ID	Anbausystem mit Leguminosen-%	Düngung	Fruchtfolge					
				1	2	3	4	5
MFS	Marktf Frucht	40	Gründüngung	LKG	WW	TR+ZF	AB	WR
BGS	Biogas	40	Biogas-Gärrest	LKG	WW	TR+ZF	AB	WR
MSS	Milchvieh-Stallmist	40	Stallmist	LKG	WW+ZF	SM	AB	WR
MGS	Milchvieh-Gülle	40	Gülle	LKG	WW+ZF	SM	AB	WR

LKG – Luzerne-Klee gras, WW – Winterweizen, TR – Triticale, ZF – Zwischenfrucht, AB – Ackerbohne, WR – Winterroggen, SM – Silomais.

Der TUM-Biomasseversuch (Versuchsstation des ökologischen Landbaus - Viehhausen) untersucht die Wirkungen von Anbausystemen (Fruchtfolgen als Betriebssysteme) mit Biogaserzeugung hinsichtlich Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und Produktqualität, Humus- und Nährstoffbilanzen und Treibhausgasen unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus (Reents et al. 2011, Simon 2021). Die 4-feldrigen Fruchtfolgen unterscheiden sich im Klee gras-, Silomais-, Ölfrucht- und Getreideanteil sowie unterschiedlichen Winterzwischenfrüchten: Senf (abfrierend), Futterroggen / Wickroggen (Biomassennutzung). Die Düngung erfolgt ohne / mit Biogasgärrest. Der Biogasgärrest wird systemkonform eingesetzt. Die Herkunft ist Biobetrieb Gut Eichethof in Hohenkammer. Seit 2010 werden die Gärreste separiert; im Versuch wird nur die flüssige Phase ausgebracht (Trockensubstanzgehalt 6-9 %). Substratzusammenstellung: 62 % Klee gras und GPS, 33 % Mist, 3 % Körnermais, 2 % Getreidekorn. Der Anteil der Biogassubstrate aus ökologischer

Erzeugung beträgt etwa 85 %. Der Versuch wurde 2004/05 angelegt und seit dieser Zeit differenziert gedüngt, so dass sich Langzeiteffekte abbilden konnten. In den Fruchtfolgen werden unterschiedliche Anteile an Energiepflanzen/ Nahrungspflanzen realisiert. Der besondere Vorteil dieses Versuches liegt in der bereits 19-jährigen Versuchsdauer, so dass kumulative Effekte auf Bodeneigenschaften und -prozesse erfasst werden können (Simon 2021, Levin et al. 2021). Die hier untersuchten Fruchtfolgen des Biomasseversuchs sind in Tabelle 2.5-3 beschrieben und unterscheiden sich in ihren Fruchtfolgegliedern in ihrem Leguminosenanteil (LA) zwischen 25-75 %.

Tabelle 2.6–3: TUM- Biomasseversuchs – Öko-Betriebssysteme und deren spezifische Bewirtschaftung, Düngung und Fruchtfolgen

Boden ID	System-Varianten		Düngung +/- Gärrest	Fruchtfolge			
		Leguminosen-% (LA)		1	2	3	4
STD	Standard	25	ohne	LKG	WW	SM	TR
MF	Marktfrucht	35*	ohne	LKG	WW	AB	WW
LKG1	Kleegrass	50	ohne	LKG	WW	LKG	TR
LKG2	Kleegrass	75	ohne	LKG	WW	LKG	LKG
STD+BG	Standard	25	mit	LKG	WW	SM	TR
MF+BG	Marktfrucht	35*	mit	LKG	WW	AB	WW
LKG1+BG	Kleegrass	50	mit	LKG	WW	LKG	TR
LKG2+BG	Kleegrass	75	mit	LKG	WW	LKG	LKG

LKG – Luzerne-Kleegrass, WW – Winterweizen, TR – Triticale, AB – Ackerbohne, SM – Mais.

* FF im Versuchsablaufs geändert, LA zu Beginn 25 %, heute 50 %.

Beide Dauerversuche eignen sich daher hervorragend, um auf einer langzeit-ökologisch bewirtschafteten Fläche den Einfluss von Fruchtfolge und Düngung auf die N-Umsetzung aus OBS (N-Nachlieferung) und Düngemittel-Umsetzung zu untersuchen.

Tabelle 2.6–4: Korngrößenverteilung und Bodenart

Boden-ID (0-30 cm)	Boden- art*	T %	U %	S %	Bezeichnung* DIN ISO 11277
VH Sand	Ls3	18,8	30,8	50,4	mittel sandiger Lehm
VH Lehm	Lu	23,2	52,1	24,7	schluffiger Lehm
VH Ton	Lt2	34,4	45,1	20,5	schwach toniger Lehm
HK Sand	Sl3	10,2	16,6	73,2	mittel lehmiger Sand
HK Lehm	Ls3	22,2	39,7	38,2	mittel sandiger Lehm
HK Ton	Lt2	32,2	44,3	23,5	schwach toniger Lehm
ED Lehm	Ut4	19,6	65,0	15,4	stark toniger Schluff
ED Ton	Lu	27,7	59,5	12,8	schluffiger Lehm
ZF Lehm	Lu	23,5	61,4	15,1	schluffiger Lehm
ZF Ton	Tu3	31,5	51,3	17,2	mittel schluffiger Ton
MFS	Lu	22,0	64,0	14,0	schluffiger Lehm
BGS	Lu	22,0	64,0	14,0	schluffiger Lehm
MSS	Lu	22,0	64,0	14,0	schluffiger Lehm
MGS	Lu	22,0	64,0	14,0	schluffiger Lehm
STD	Lt2	32,0	41,4	26,6	schwach toniger Lehm
MF	Lt2	33,0	41,8	25,2	schwach toniger Lehm
LKG1	Lt2	31,9	40,2	27,8	schwach toniger Lehm
LKG2	Lt2	31,9	40,2	27,8	schwach toniger Lehm

Bodenart und Bezeichnung nach KA5; * Bestimmung mittels Siebung und Sedimentation (SEDIMAT 4-12), siehe Tabelle 2.5-9.

Tabelle 2.6–5: Bodeneigenschaften

Boden	N _t	C _{org}	C/N	C _{mik}	R _h	C _{mik} / C _{org}	pH	P	K	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 CAL	mg/100g CAL	Gehalts- klasse*	klasse*	mg/kg	mg/kg	Verhältnis
VH Sand	0,09	0,88	9,7	413,1	15,6	47,0	6,4	3,9	10,0	B	C	44,2	322,7	7,3
VH Lehm	0,14	1,28	9,4	521,1	19,7	40,7	6,1	1,9	11,5	A	C	53,3	513,0	9,6
VH Ton	0,14	1,34	9,9	679,4	25,1	50,7	7,1	4,4	18,9	C	D	67,2	596,0	8,9
HK Sand	0,11	1,15	11,0	504,1	18,8	43,8	6,4	9,8	21,2	D	E	53,5	537,5	10,0
HK Lehm	0,19	1,85	9,7	750,4	26,1	40,7	6,7	9,1	34,5	D	E	76,1	809,0	10,6
HK Ton	0,15	1,61	11,1	772,8	27,6	47,9	7,3	11,3	37,3	D	E	74,1	777,0	10,5
ED Lehm	0,15	1,41	9,5	297,2	11,3	21,1	7,0	10,4	18,8	D	D	59,3	464,1	7,8
ED Ton	0,12	1,15	9,3	284,6	10,6	24,8	7,5	7,3	11,7	C	B	44,0	368,2	8,4
ZF Lehm	0,11	1,22	11,5	205,1	6,8	16,9	7,6	6,5	20,9	C	D	58,3	474,0	8,1
ZF Ton	0,11	1,21	11,5	231,2	7,5	19,1	7,3	4,5	20,9	C	D	43,2	388,7	9,0
MFS	0,14	1,33	9,8	367,6	10,8	27,7	6,0	8,8	19,5	D	D	48,8	499,0	10,2
BGS	0,14	1,38	9,6	370,5	11,0	26,9	6,0	6,5	17,5	C	D	48,1	498,8	10,4
MSS	0,13	1,30	9,7	364,4	10,0	28,1	6,2	6,4	16,9	C	D	43,0	454,8	10,6
MGS	0,10	1,29	9,5	285,1	8,5	22,2	6,0	6,2	18,3	C	D	44,8	458,9	10,2
STD	0,15	1,33	9,2	593,0	3,2	44,6	6,1	1,3	6,6	A	B	43,8	542,5	12,4
MF	0,12	1,13	9,3	458,0	2,5	40,5	5,7	0,5	6,5	A	B	33,7	447,4	13,3
LKG1	0,15	1,60	10,4	572,5	3,1	35,8	7,0	1,4	6,1	A	B	89,7	991,5	11,1
LKG2	0,15	1,55	10,5	801,4	4,3	51,7	6,7	1,1	5,4	A	B	64,5	728,5	11,3
STD+BG	0,15	1,53	10,0	572,5	3,1	37,4	6,2	1,8	12,1	A	C	57,4	670,0	11,7
MF+BG	0,12	1,17	9,7	686,9	3,7	58,7	5,9	0,7	8,7	A	C	39,8	519,5	13,1
LKG1+BG	0,16	1,72	12,4	686,9	3,7	39,9	7,1	2,8	14,3	B	C	84,8	857,0	10,1
LKG2+BG	0,17	1,79	10,5	686,9	3,7	38,4	6,6	1,9	10,4	A	C	97,6	1033,0	10,6
NS*	0,20	2,22	11,2	572,4	3,1	24,3	5,8	2,6	13,5	B	C	88,2	1301,5	14,8
GA2*	0,15	1,85	12,2	763,3	4,1	39,7	5,9	6,6	13,5	C	C	76,0	986,5	13,0
GL*	0,14	1,83	13,0	667,9	3,6	41,3	6,0	7,7	22,3	C	D	71,4	953,0	13,4

Erklärung der Bodenbezeichnung mit Herkunft und Nutzung, siehe Tabelle 2.5-1, Untersuchungsmethoden, siehe Tabelle 2.5-9; P- und K-Gehaltsklassen nach Vorgaben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Gelbes Heft). * Betriebsböden, die in Kollaboration mit 2.1 zusätzlich untersucht wurden, Versuchsergebnisse siehe 2.5.8 Anhang.

2.6.2.2 Düngemittel

Das Ziel bei der Auswahl war, übliche organische Handelsdünger (Keratindünger) mit alternativen Düngemitteln zu vergleichen, die unter anderem betriebsintern hergestellt werden können bzw. wurden. Als Keratindünger wurden handelsübliche Hornspäne und Haarpellets genutzt. Im Vergleich dazu wurden vor allem Produkte aus Klee (Kleepellets) oder Klee gras genutzt. Material von verschiedenen Klee grasschnitten, Ackerbohnen (Schrot) und Gelbsenf (Zwischenfrucht-Aufwuchs) stammten vom TUM-Versuchsbetrieb, Sonnenblumenpresskuchen stammte von einem Biolandbetrieb Wichtig bei der Auswahl war eine weite Spanne des C/N-Verhältnisses, das eine große Bedeutung für die

Umsetzungsfähigkeit des Düngers sowie für Immobilisations- und Re-Mineralisierungsprozesse hat.

Tabelle 2.6–6: In den Versuchen verwendeten Düngemittel

Düngemittel	Abkürzung	N _t (% TM)	C _t (% TM)	C/N Verhältnis
Null-Kontrolle	NK	0	0	0
Hornspäne*	Horn	16,9	51,3	3,0
Haarpellets**	Haar	13,8	49,1	3,6
Glutaminsäure	Glu	9,5	40,8	4,3
Ackerbohnschrot	AB2	4,3	43,8	10,2
Ackerbohnschrot	AB	4,1	44,0	10,8
Kleegras 10 (vegetativer Schnitt)	KG10	3,9	44,4	11,5
Kleepellets***	KP	3,4	44,6	13,1
Kleegras Silage (vegetativer Schnitt)	KGS	3,2	42,1	13,2
Kleegras 15 (vegetativer Schnitt)	KG15	3,0	44,1	14,9
Sonnenblumensamen (Presskuchen)****	SoBlu	3,4	50,9	15,1
Kleegras 20 (vegetativer Schnitt)	KG20	2,2	44,4	20,5
Gelb Senf 28 (vegetativer Schnitt)	GS28	1,5	43,3	28,0

* GO/ON! Hornspäne, gpi green partners interantional GmbH & Co. KG, Gladbeck, Deutschland. ** Osmo Haarmehl Plus, BV Rancheart, Tielt, Belgien. *** Kleepura Biodünger, Kleepura, Dresden, Deutschland, **** Bioland-Betrieb.

2.6.2.3 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 (TissueLyser2, QIAGEN, Düsseldorf, Deutschland). 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.

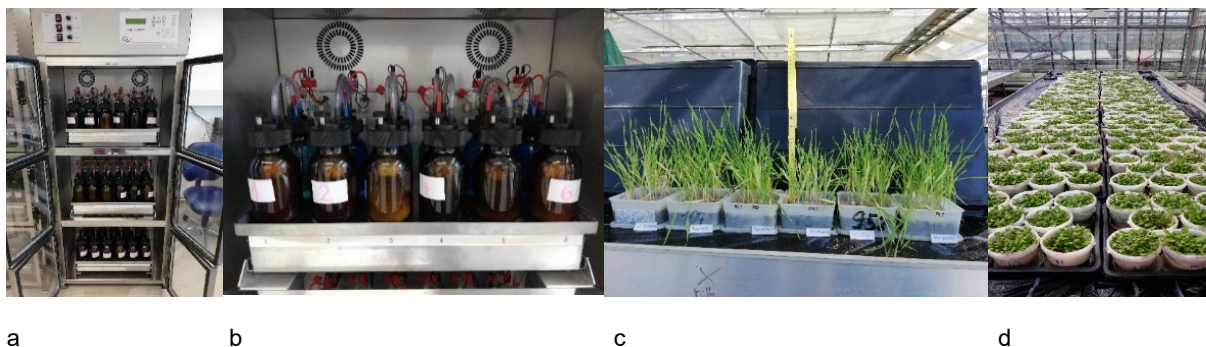


Abbildung 2.6-1: Inkubationsversuche und Pflanzenversuche. a = Respirometer-Brutschrank, b = Probengefäße im Respirometer, c = Wuchshöhe Roggen, d = großblättrige Kresse.

2.6.2.3.1 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, des langfristigen Betriebssystems (Düngung) oder des Leguminosenanteils (LA) in der Fruchtfolge sowie die Wechselwirkung mit verschiedenen Düngemitteln mit unterschiedlicher Abbaubarkeit (C/N-Verhältnis) zu erfassen.

Tabelle 2.6–7: Inkubationsversuche

Versuch	Boden	Bodenarten	Dünge- behandlungen	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}
6	MFS, BGS, MSS, MGS	-	Haar, Horn, AB, KG10, KP, KG15, NK	0, 100	57	18	50	9	3	NO ₃ ⁻ , Netto-N _{min} , R _h
7	STD, MF, LKG1, LKG2, STD+BG, MF+BG, LKG1+BG, LKG2+BG	-	Haar, Horn, AB2, KG10, KP, KG15, NK	0, 100	65	18	50	8	3	NO ₃ ⁻ , Netto-N _{min} , R _h
8*	NS, GA2, GL	-	Haar, AB2, KG10, KP, KG15, NK	0, 100	35	18	50	7	3	NO ₃ ⁻ , Netto-N _{min} , R _h

Kurzbezeichnung der Böden und Dünger sowie Bodenart und Tongehalt, siehe Tabelle 2.5-1, Tabelle 2.5-4, Tabelle 2.5-6 und Tabelle 2.5-9 für Analysemethoden. * Betriebsböden, die in Kollaboration mit AP 2 zusätzlich untersucht wurden, Versuchsergebnisse siehe 2.5.8 Anhang.

Inkubationsversuch 1

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

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

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

Optimierung der Versuchsbedingungen (Einfluss der Mehrfach-Beprobung der Respiration-Probengefäße auf Wassergehalt), Untersuchung des Einflusses der Bodenherkunft durch weitere Böden von Ackerbau- und Gemüsebaubetrieben, Einfluss der Bodenart und mikrobiellen Aktivität auf die Nitratbildung.

Inkubationsversuch 5

Alternative Versuchsbedingungen durch Einzel-Beprobung 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.

Inkubationsversuch 6

Untersuchung des Einflusses der langfristigen Düngevorgeschichte verschiedener Betriebssysteme des TUM-Systemversuchs auf die N-Mineralisation und mikrobielle Aktivität in Wechselwirkung mit unterschiedlichen Düngern verschiedener C/N-Verhältnisse.

Inkubationsversuch 7

Untersuchung des Einflusses der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte verschiedener Betriebssysteme mit Fruchtfolgen mit unterschiedlichen Anteilen an Leguminosen sowie Energiepflanzen/Nahrungspflanzen des TUM Biomasseversuchs auf die N-Mineralisation und mikrobielle Aktivität in Wechselwirkung mit unterschiedlichen Düngern verschiedener C/N-Verhältnisse.

Inkubationsversuch 8

Untersuchung von Böden/Flächen von Praxisbetrieben, zu denen Nährstoffbilanzierungsdaten (Hoftorbilanzen aus AP 2.1) vorliegen, um das Mineralisierungspotential mit den Betriebsbilanzen in Verbindung setzen zu können. Untersuchung des Mineralisationsniveaus weiterer gemüsebaulicher Praxisbetriebe und der Netto-Mineralisation unterschiedlicher Dünger mit verschiedener C/N-Verhältnissen.

2.6.2.3.2 Pflanzenversuche

Pflanzenversuche wurden in Anlehnung an die Neubauerversuche entwickelt (Neubauer 1937; Neubauer und Neubauer 1940). Diese basieren auf der Aufnahme der gesamten pflanzenverfügbaren Nährstoffe durch eine große Menge Pflanzen im Verhältnis zu einer geringen Bodenmenge. In den vorliegenden Versuchen wurde die Nitratbildung 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, des Betriebssystems oder des Leguminosenanteils (LA) der Fruchtfolge sowie des Düngemittels C/N-Verhältnisses (Abbaubarkeit) 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-Gehalte (Tabelle 2.5-8) der Pflanzen ermittelt.

Tabelle 2.6–8: Pflanzenversuche

Versuch	Boden	Bodenarten	Düngebehandlungen	Düngestufen [kg/ha]	Wiederholung	Dauer [Tage n. Auflaufen]	Temperatur [°C]	WK _{max} [%]	Pflanzen/ ltr. Boden	Kultur
1	VH	3	Horn, NK	0, 100	3	27	21	67	35 Pfl. / 400 g TB	Roggen*
2	VH, HK	3	Horn, Haar, KG15, KGS, KP, NK	0, 100	3	27	22	67	35 Pfl. / 400 g TB	Roggen*
3	VH, HK, ED, ZF	2 bzw. 3	Haar, AB, SoBlu, KP, NK	0, 100	3	42	19	67	25 Pfl. / 400 g TB	Roggen*
4	MFS, BGS, MGS, MSS	-	Haar, KG10, KG15, KG20, GS25, NK	0, 100	4	37	22	64	25 Pfl. / 1000 g TB	Großblättrige Kresse**
5	STD, MF, LKG1, LKG2, STD+BG, MF+BG, LKG1+BG, LKG2+BG	-	Haar, AB2, KG10, KP, KG15, NK	0, 100	4	36	20	45	30 Pfl. / 450 g TB	Großblättrige Kresse**
6***	NS, GA2, GL	-	Haar, AB2, KG10, KP, KG15, NK	0, 100	4	38	17	55	35 Pfl. / 1000 g TB	Großblättrige Kresse**

Kurzbezeichnung der Böden und Dünger sowie Bodenart und Tongehalt, siehe Tabelle 2.5-1, Tabelle 2.5-4, Tabelle 2.5-6. *SU PERFORMER, SAATEN-UNION GmbH, Isernhagen, Deutschland. **G251, Bingenheimer Saatgut AG, Echzell-Bingenheim, Deutschland. *** Betriebsböden, die in Kollaboration mit AP 2 zusätzlich untersucht wurden, Versuchsergebnisse siehe 2.5.8 Anhang.

Pflanzenversuch 1

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, Pflanzanzahl, Anpassung, Licht, Feuchtigkeit und Temperaturbedingungen im Gewächshaus, Logistik der Parametererfassung und Versuchsbetreuung.

Pflanzenversuch 2

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

Pflanzenversuch 3

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

Pflanzenversuch 4

Untersuchung des Einflusses der langfristigen Düngevorgeschichte verschiedener Betriebssysteme des TUM Systemversuchs auf die pflanzliche N-Verfügbarkeit/Aufnahme in Wechselwirkung mit unterschiedlichen Düngern verschiedener C/N-Verhältnisse.

Pflanzenversuch 5

Untersuchung des Einflusses der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte verschiedener Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs mit unterschiedlichen Anteilen an Leguminosen (sowie Energiepflanzen/Nahrungspflanzen) in der Fruchtfolge auf die pflanzliche N-Verfügbarkeit/Aufnahme in Wechselwirkung mit unterschiedlichen Düngern verschiedener C/N-Verhältnisse.

Pflanzenversuch 6

Untersuchung von Böden/Flächen von Praxisbetrieben zu denen bereits Nährstoffbilanzierungsdaten (Hoftorbilanzen aus 2.1) vorliegen, um das Mineralisierungspotential in der pflanzlichen N-Verfügbarkeit/Aufnahme mit den Betriebsbilanzen in Verbindung setzen zu können. Untersuchung des Mineralisationsniveaus weiterer gemüsebaulicher Praxisbetriebe und der pflanzlichen Netto-N-Aufnahme unterschiedlicher Dünger mit verschiedener C/N-Verhältnissen.

2.6.2.4 Untersuchungsmethoden

Die Böden wurden nach den im VDLUFA-Methodenbuch dokumentierten Methoden untersucht (Tabelle 2.5-9).

Tabelle 2.6–9: verwendete Methoden (nach VDLUFA-Methodenbuch I) und Analysegeräte

Kurz-bezeichnung	Methodenname	Methoden-nummer	Bemerkungen
pH-Wert (CaCl ₂)	Bestimmung des pH-Wertes	A 5.1.1 (2016)	pH-Messung in 0,01 m CaCl ₂ . SP2002 pH in Soil, Skalar Analytical B.V., Breda, Niederlande.
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, VarioMax V7.3.7., Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Deutschland.
C _{org}	Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung und Gasanalyse	A 4.1.3.2 (2016)	Elementaranalyse Verbrennung im Sauerstoffstrom bei 550 °C. VarioMax V7.3.7., Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold, Deutschland.
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 Gehaltsklassen zu berücksichtigen). AutoAnalyser 3 (AA3), SEAL Analytical – A Porvair Company, Norfolk, United Kingdom (SEAL Analytical Germany, Hamburg, Deutschland).
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. AutoAnalyser 3 (AA3), SEAL Analytical – A Porvair Company, Norfolk, United Kingdom (SEAL Analytical Germany, Hamburg, Deutschland).
Ch _{hw} und N _{hw}	Heißwasser-löslicher Kohlenstoff und Stickstoff	A 4.3.2 (2004)	Sieden in H ₂ O _{dest.} und Extraktion mit MgSO ₄ . DKL Heating Digester, VELP Scientifica Srl, Usmate Velate, Italien; TOC-L Analyser with TNM-L and ASI-L, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan (Shimadzu Europa GmbH, Duisburg, Deutschland).
EUF	Bodenanalyse mittels Elektro-Ultra-Filtration	A 6.1.7.3 (1997); A 6.4.2 (2002)	Durchgeführt durch den Bodengesundheitsdienst. Bestimmung löslicher organ. gebundener Pflanzennährstoffe (N, NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , P, K, Ca, Mg, S, B) in zwei Fraktionen, leicht und schwer löslich (nachlieferbare Nährstoffe).
Tongehalt / Bodenart	Texturanalyse / Partikelgrößenverteilung	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 (Trockenschrank-methode)	C 1.1.1 (2002)	Masseverlust durch Trocknen des frischen Bodens bei 105°C. Sartorius portable/handy, Sartorius AG, Göttingen, Deutschland; Trockenschrank, Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach, Deutschland.
WK _{max}	Bestimmung der maximalen Wasserhaltekapazität	A 13.2.3 (2002)	Masseverlust durch Trocknen von max. wiederbefeuchtetem homogenisiertem, getrockneten Boden. Sartorius portable/handy, Sartorius AG, Göttingen, Deutschland; Trockenschrank, Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach, Deutschland.
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). Respirometer BSBdigi, SELUTECH GmbH, Hechingen, Deutschland.
R _h	Bestimmung der Basalatmung (heterotrophe Bodenrespiration)		Maß für die Aktivität von Boden-mikroorganismen; Respirationsmessung über mehrere Tage, bei 18 °C; basiert auf Studien von Anderson & Domsch (1978), Scheu (1992) und Beck et al. (1997). Respirometer BSBdigi, SELUTECH GmbH, Hechingen, Deutschland

2.6.2.5 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' Packet; Wickham, 2016) und statistische Tests (Shapiro-Wilk-Test, Levene-Test, Fligner-Test; 'dplyr', 'car' und 'agricolae' Packet; 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' Packet und 'emmeans' Packet (Kuznetsova, 2017, Lenth 2022)). Korrelationen wurden nach Pearson & Spearman mit dem 'Hmisc' Packet berechnet (Harrell, 2022). Die hier angegebenen Werte der F-Statistik wurden jeweils auf eine ganze Zahl auf/abgerundet. Der F-Wert (F-Statistik) gibt das Verhältnis der Variation zwischen Stichprobenmittelwerten zur Variation innerhalb von Stichproben an. Je größer F, desto größer ist die Variation zwischen den Stichprobenmittelwerten im Verhältnis zur Variation innerhalb der Stichproben und desto größer die Wahrscheinlichkeit eines Unterschieds zwischen den Stichprobenmittelwerten gibt. Der p-Wert gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit das gemessene Ergebnis der Stichprobe von der Teststatistik abweicht und Unterschiede als statistische wahrscheinlich anzusehen sind.

2.6.3 Ergebnisse

2.6.3.1 Einfluss der Bodenart auf die N-Mineralisation

Über alle Betriebsböden zusammengefasst wurden sehr hohe N-Mineralisationsraten beobachtet (Abbildung 2.5-2), bis zu $300 \text{ kg N}_{\text{min}} \text{ ha}^{-1}$ in 37 Tagen. 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, u. a. auch dadurch bedingt, dass es zwischen ackerbaulicher und gärtnerischer Nutzung Unterschiede gab (Abbildung 2.5-4).

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) überwiegend 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. Über alle Standorte gemittelt hatte die Bodenart keinen Einfluss auf die N-Mineralisation wohl aber auf die Bodenatmung ($F = 89$; $p < 0,001$, Abbildung 2.5-2).

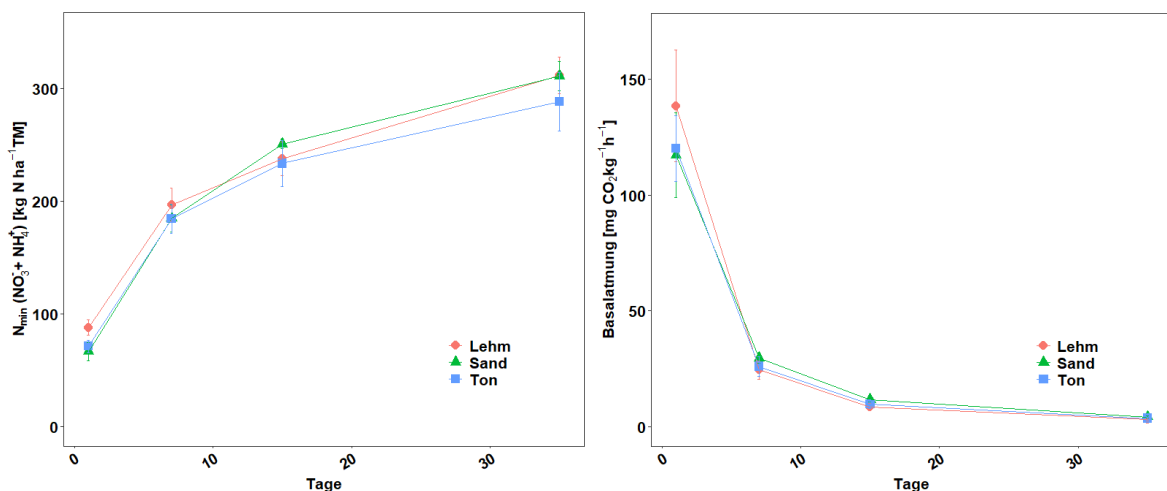


Abbildung 2.6-2: Verlauf der N_{min} -Vorräte und der mikrobiellen Aktivität in Abhängigkeit von der Bodenart; Mittelwerte aller Böden der 4 Standorte (VH, HK, ED, ZF); Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Standardfehlerbalken aus 5 Wiederholungen.

Das Pflanzenwachstum im Mittel aller Standorte 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 (Abbildung 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 Lehm Böden relativ höhere Werte ($F = 14$; $p < 0,001$) und die Tonböden die geringsten.

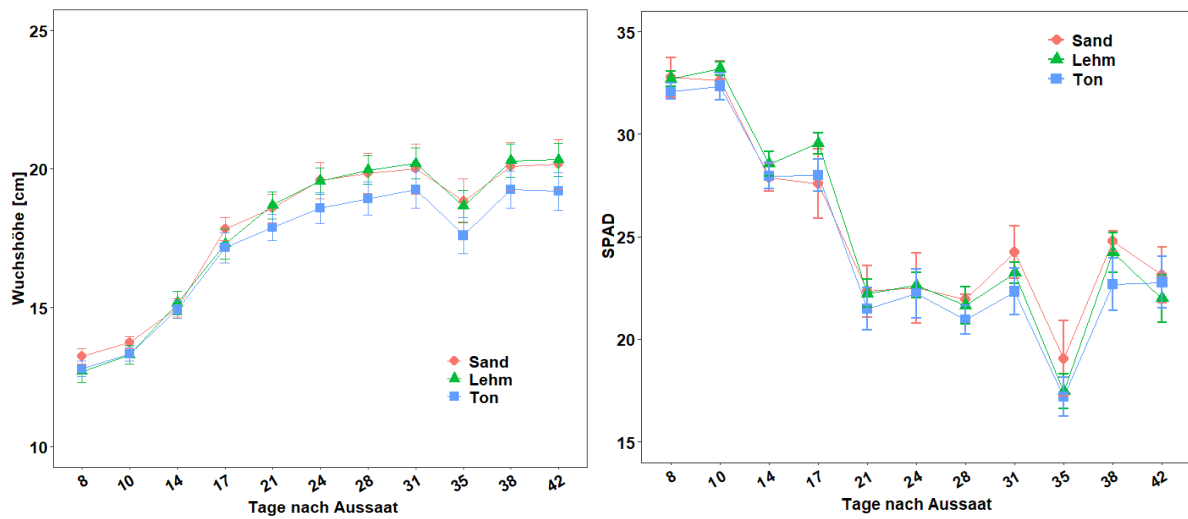


Abbildung 2.6-3: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart. Wuchshöhe sowie Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen; Mittelwerte der Böden der 4 Standorte (VH, HK, ED, ZF) aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

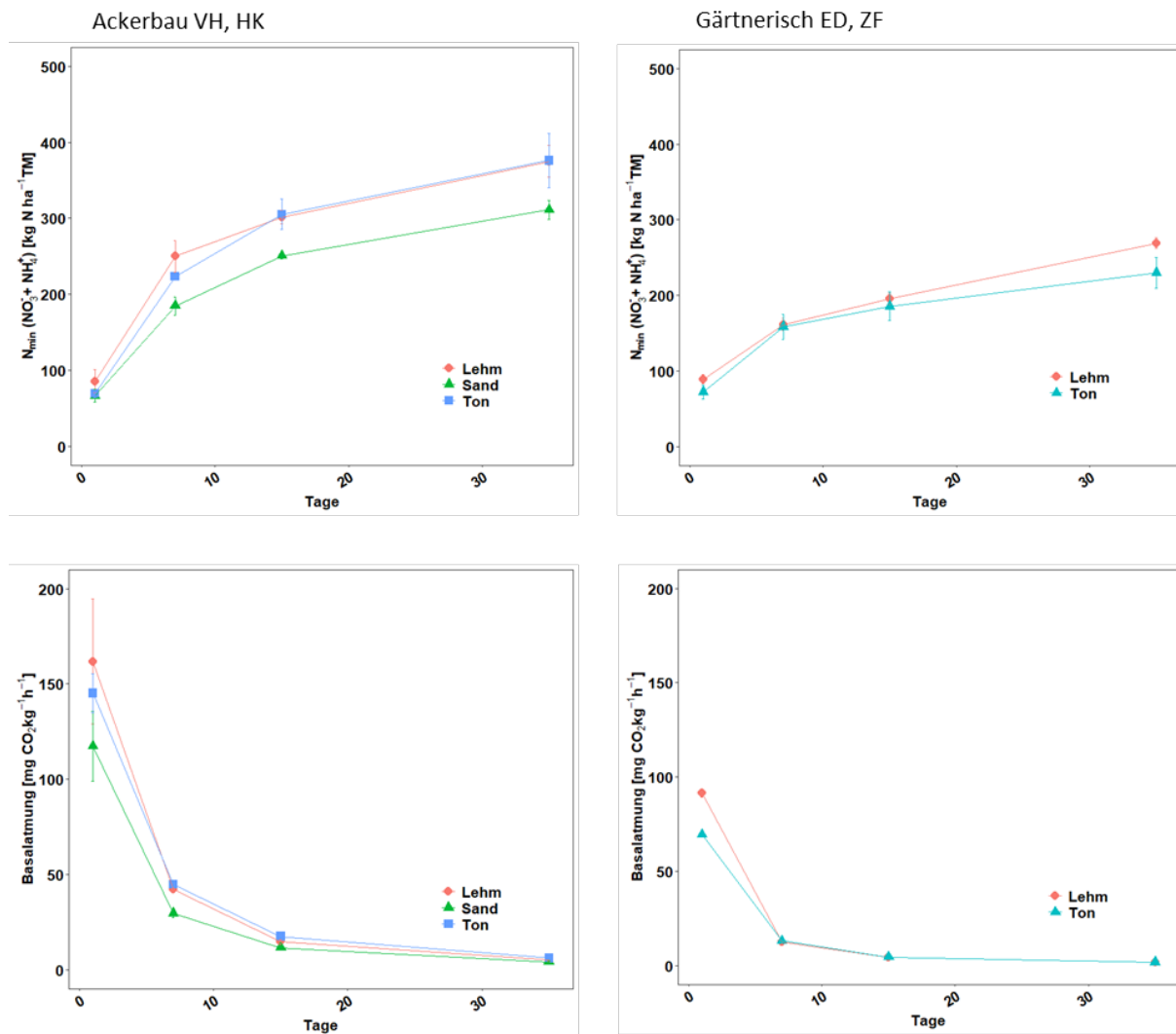


Abbildung 2.6-4: Verlauf der N_{min}-Entwicklung und der mikrobiellen Aktivität ackerbaulich und gartenbaulich genutzter Böden in Abhängigkeit von der Bodenart; Mittelwerte der Böden der ackerbaulich genutzten Standorte (VH, HK), links oben N_{min} und links unten R_h (Basalrespiration) sowie der gartenbaulich 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. Standardfehlerbalken aus 5 Wiederholungen.

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 $306,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ frei, der Lehm Boden $289,6 \text{ kg N ha}^{-1}$. Beim gartenbaulichen Tonboden wurden nur $157,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ und beim Lehm Boden $180,0 \text{ kg N ha}^{-1}$ frei. Der Sandboden der ackerbaulichen Böden mit einem mittleren Tongehalt von 14,5 % setzte durchschnittlich $244,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ um und hatte somit trotz geringerem Tongehalt eine deutlich höhere Mineralisationsleistung als die gartenbaulichen Böden. Bei den gartenbaulichen Böden hatte

der Lehm Boden mehr N mineralisiert als der Ton Boden. 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.

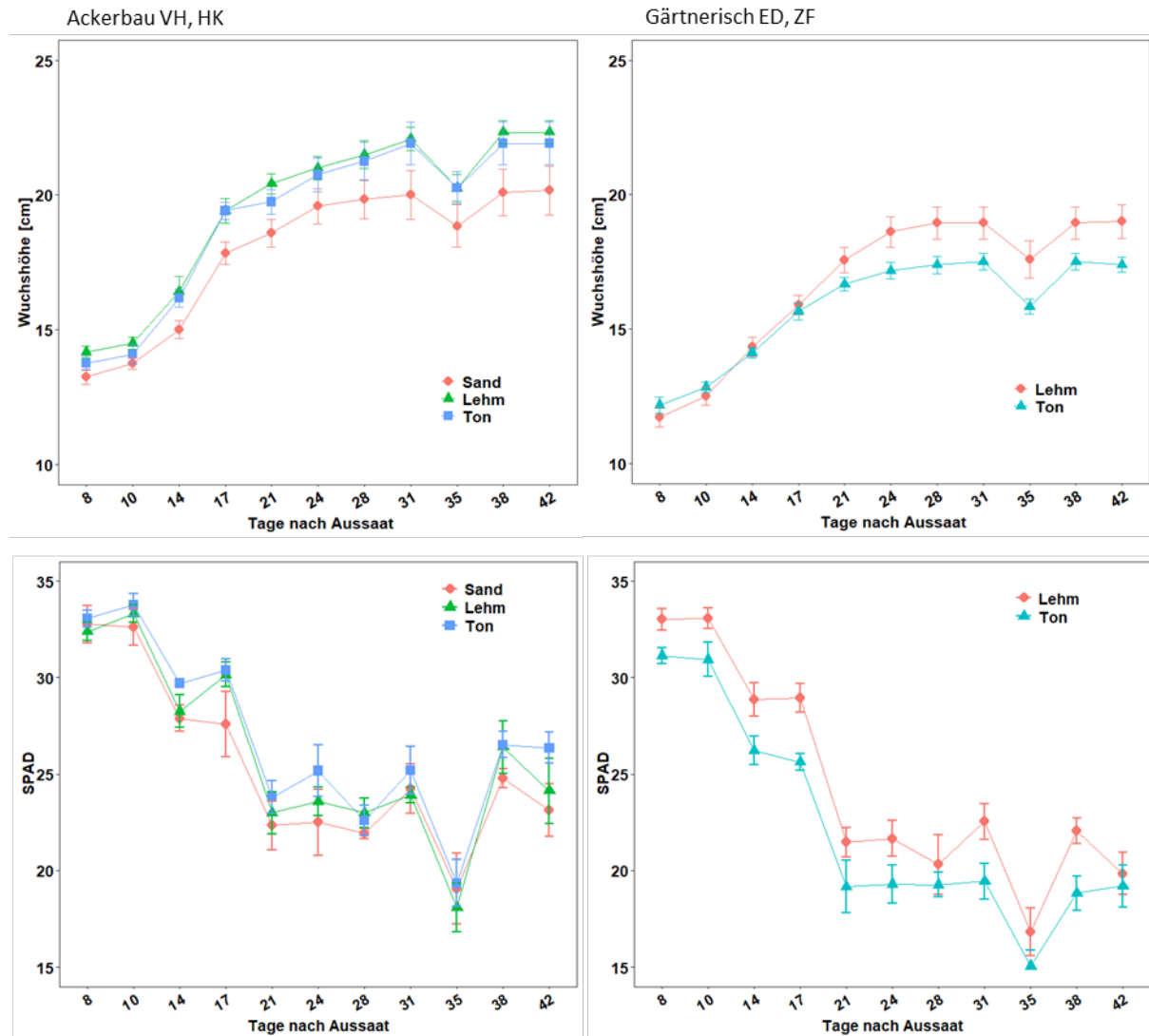


Abbildung 2.6-5: Verlauf der Pflanzenentwicklung ackerbaulich (links; Mittelwert VH und HK) und gartenbaulich (rechts; Mittelwert ED und ZF) genutzter Böden in Abhängigkeit von der Bodenart; Wuchshöhe (oben) sowie Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert (unten) von Roggen. Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

Die Auftrennung in die Bewirtschaftungsweise der Bodenherkunft zeigte für die Pflanzenentwicklung ebenfalls signifikante Unterschiede ($F = 23$; $p < 0,001$) sowie Effekte 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 Ton Boden führte zu den höchsten SPAD-Werten und größten Wuchshöhen, der Sand Boden 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.

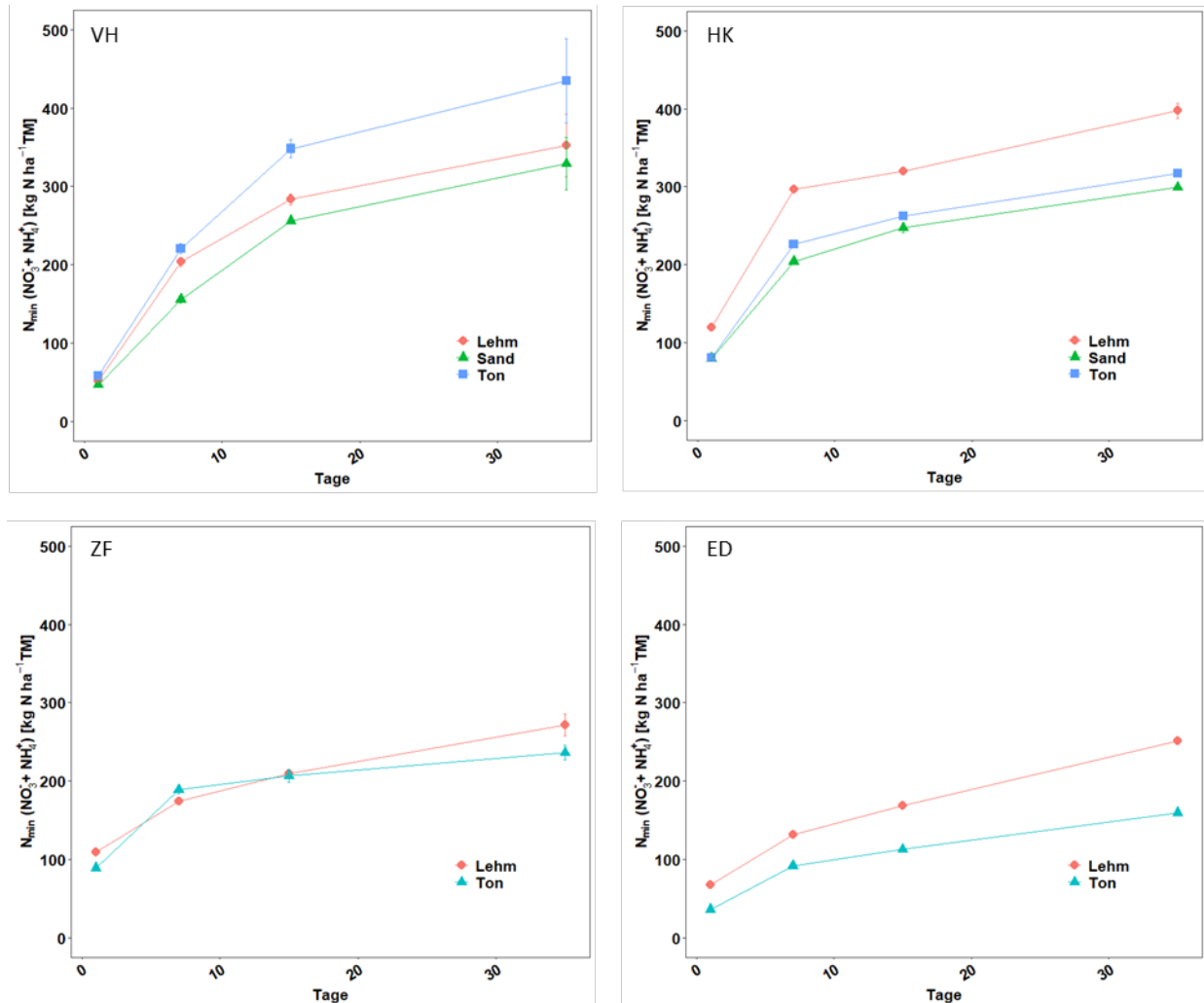


Abbildung 2.6-6: Verlauf der N_{min} -Entwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; ackerbaulich genutzte Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 5 Wiederholungen.

Die Standorte unterschieden sich in ihrer Mineralisierungsleistung ($F = 29$; $p < 0,001$), wobei die Böden aus Viehhausen (VH) deutlich mehr N mineralisierten, als die Böden aus Hohenkammer (HK) (Abbildung 2.5-6). Bei den gartenbaulichen Böden war die Mineralisierungsleistung der Böden aus Zeholfing (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 Lehm Boden 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 $25 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ im Vergleich zu $40 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ beim Lehm Boden und $43 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ beim Tonboden.

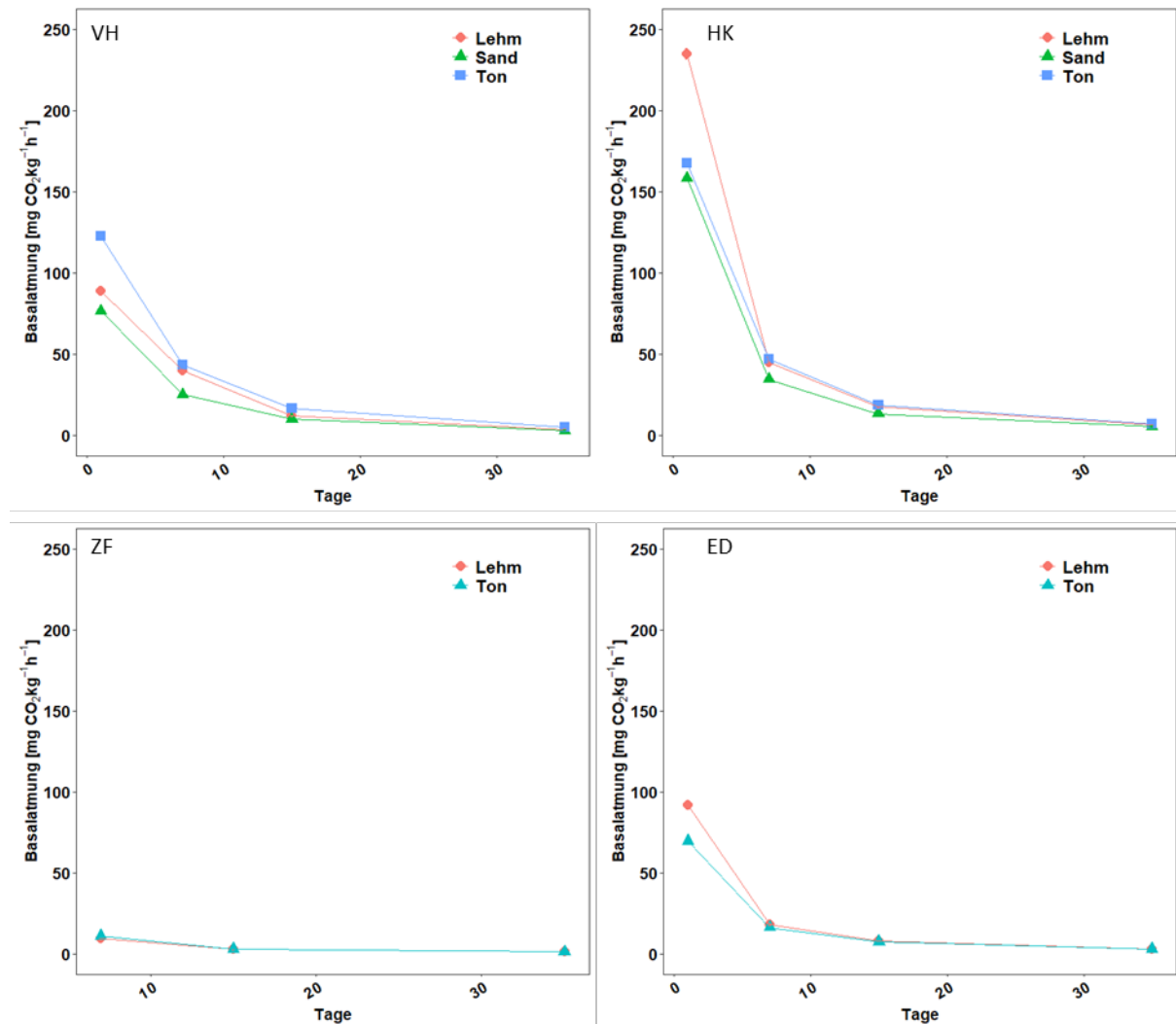


Abbildung 2.6-7: Verlauf der mikrobiellen Aktivität in Abhängigkeit von Bodenart je Standort; ackerbaulich genutzte Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Inkubationsversuch 4, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 5 Wiederholungen.

An allen Standorten hatte die Bodenart einen signifikanten Effekt auf die Bodenatmung. Bei den Böden aus Eichendorf (ED) wurde in dem Lehm Boden deutlich mehr N umgesetzt 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 Lehm Boden 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 ($F = 11$; $p < 0,005$) und ED ($F = 74$; $p < 0,01$). Bei den Böden beider Standorte erzielte der Lehm Boden die größte

Wuchshöhe. Nur für den Standort VH waren die Pflanzen auf dem Ton am größten. Die Bodenart machte keinen Unterschied für ZF.

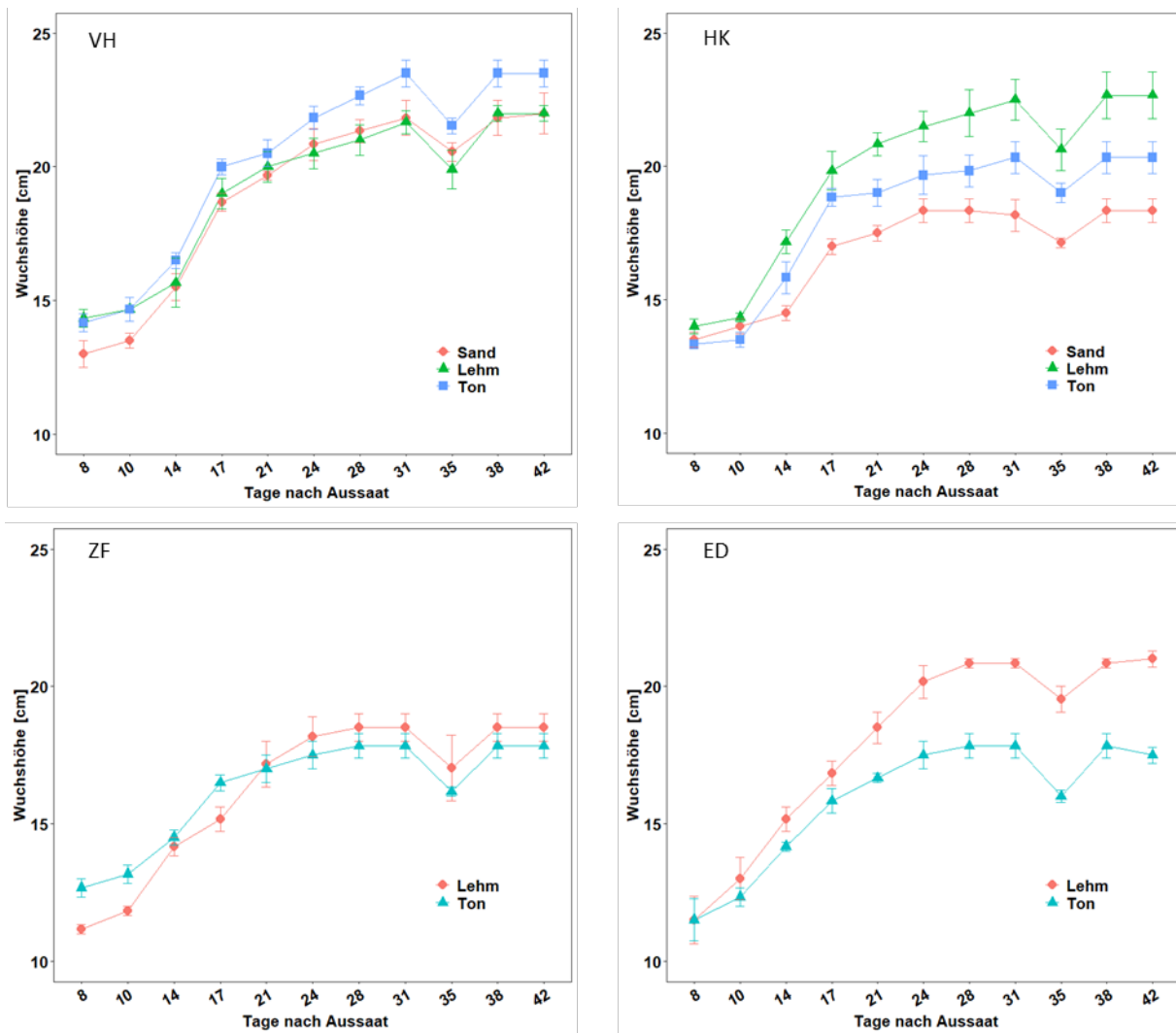


Abbildung 2.6-8: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; Wuchshöhe von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und der gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.

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

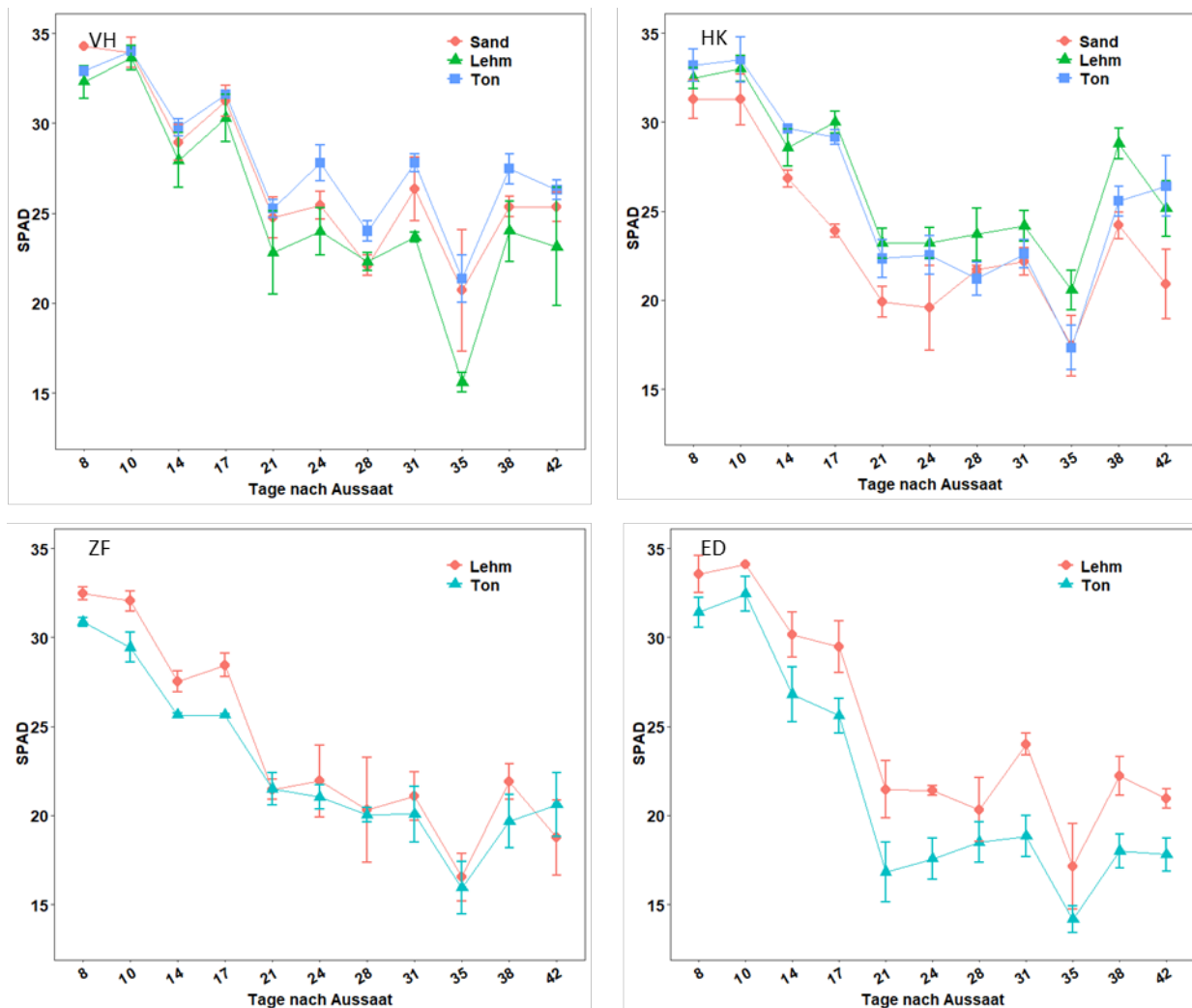


Abbildung 2.6-9: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von der Bodenart je Standort; Pflanzen-N-Status-SPAD-Wert von Roggen für die Böden der ackerbaulich genutzten Standorte VH, oben links, HK, oben rechts und der gartenbaulich genutzten ZF, unten links und ED, unten rechts; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.

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.

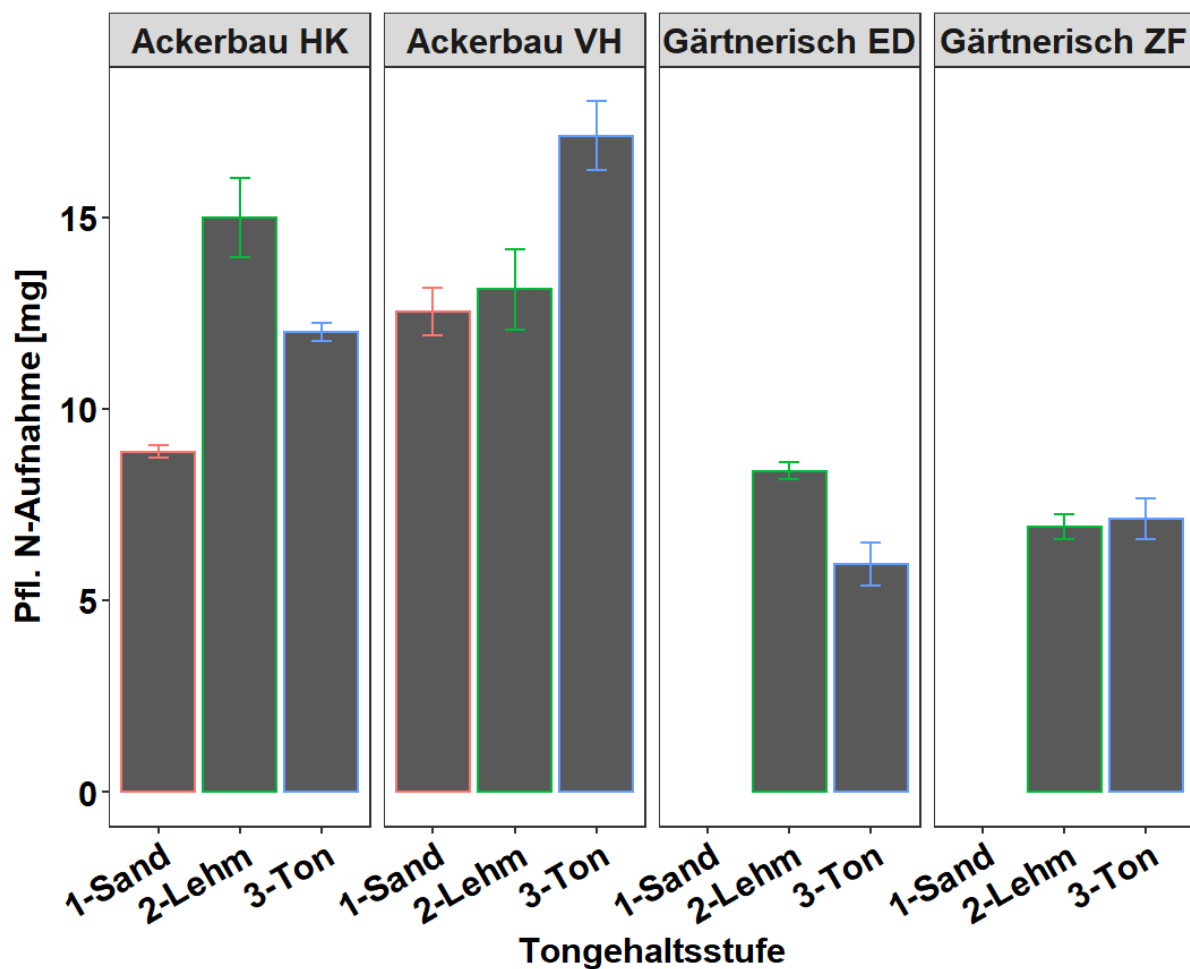


Abbildung 2.6-10: Pflanzliche N-Aufnahme von Roggen nach 42 Tagen in je Standort und Bodenart; Daten aus dem Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.

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 Lehmboden gefolgt vom Tonboden und Sandboden. Für ED konnte dem Lehmboden mehr Stickstoff entzogen werden ($F = 16$; $p < 0,05$).

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

Die am Ende des Versuchs erreichte maximale Netto-N-Mineralisation ist vom C/N-Verhältnis der Düngemittel ($F = 36$; $p < 0,001$) und der Bodenart ($F = 6$; $p < 0,01$) abhängig (Abbildung 2.5-11). Die Düngemittel wurden innerhalb von 66 Tagen im Mittel auf dem Lehmboden zu 29 %, auf dem Tonboden zu 18 % und auf dem Sandboden zu 2 % umgesetzt (hier nicht dargestellt). Über die Bodenarten gemittelt, wurde das Hornmehl und die Glutaminsäure zu 63 % und 62 %, der Klee gras-Schnitt mit C/N 11 zu 18 % umgesetzt. Der Stickstoff der Klee gras-Schnitte mit C/N 15 und 20 wurde immobilisiert zu -11 % und -43 %, d.h. mit steigendem C/N-

Verhältnis nahm die Umsetzbarkeit ab, wobei die Dünger mit $C/N > 10$ zu N-Festlegung führten. Eine Re-mineralisierung wurde nicht beobachtet. Für jede Bodenart war das Dünger-C/N-Verhältnis entscheidend für die N-Mineralisation, je höher das C/N-Verhältnis, desto weiter die Differenzierung der Bodenarten Abbildung 2.5-11. Im Sandboden ($F = 42$; $p < 0,001$) wurden Hornmehl und Glu zu 63 % und 68 % umgesetzt, 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 %.

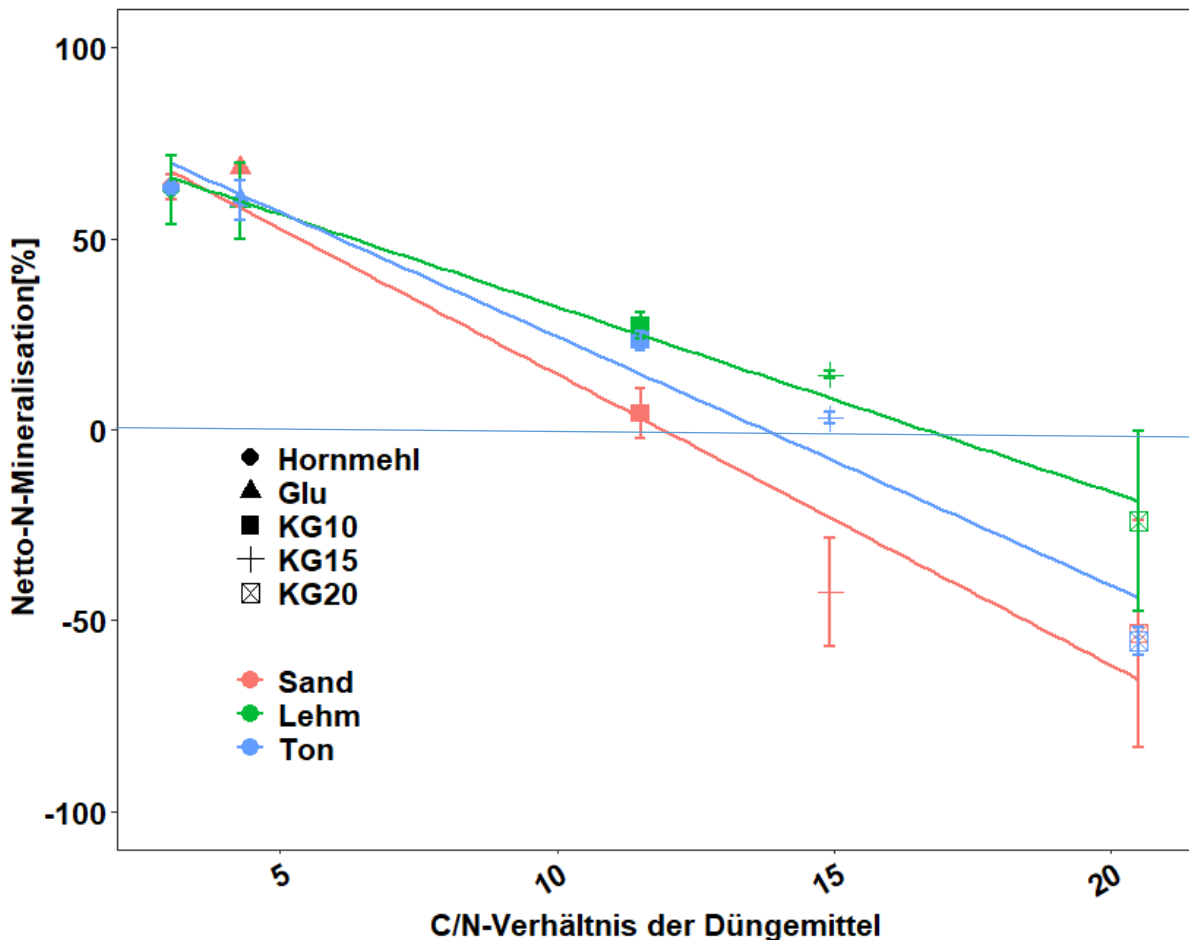


Abbildung 2.6-11: Maximale Netto-N-Mineralisation (66d 18°C) in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart (negative Werte = N-Immobilisation, Nitratwerte sind niedriger im Vergleich zu ungegüngt); Daten aus dem Inkubationsversuch 2 und dem Inkubationsversuch 5, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm; Hornmehl, Glu = Glutaminsäure, KG10 = Klee grasschnitt mit C/N 11, KG15 = Klee grasschnitt mit C/N 15, KG20 = Klee grasschnitt mit C/N 20. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.

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).

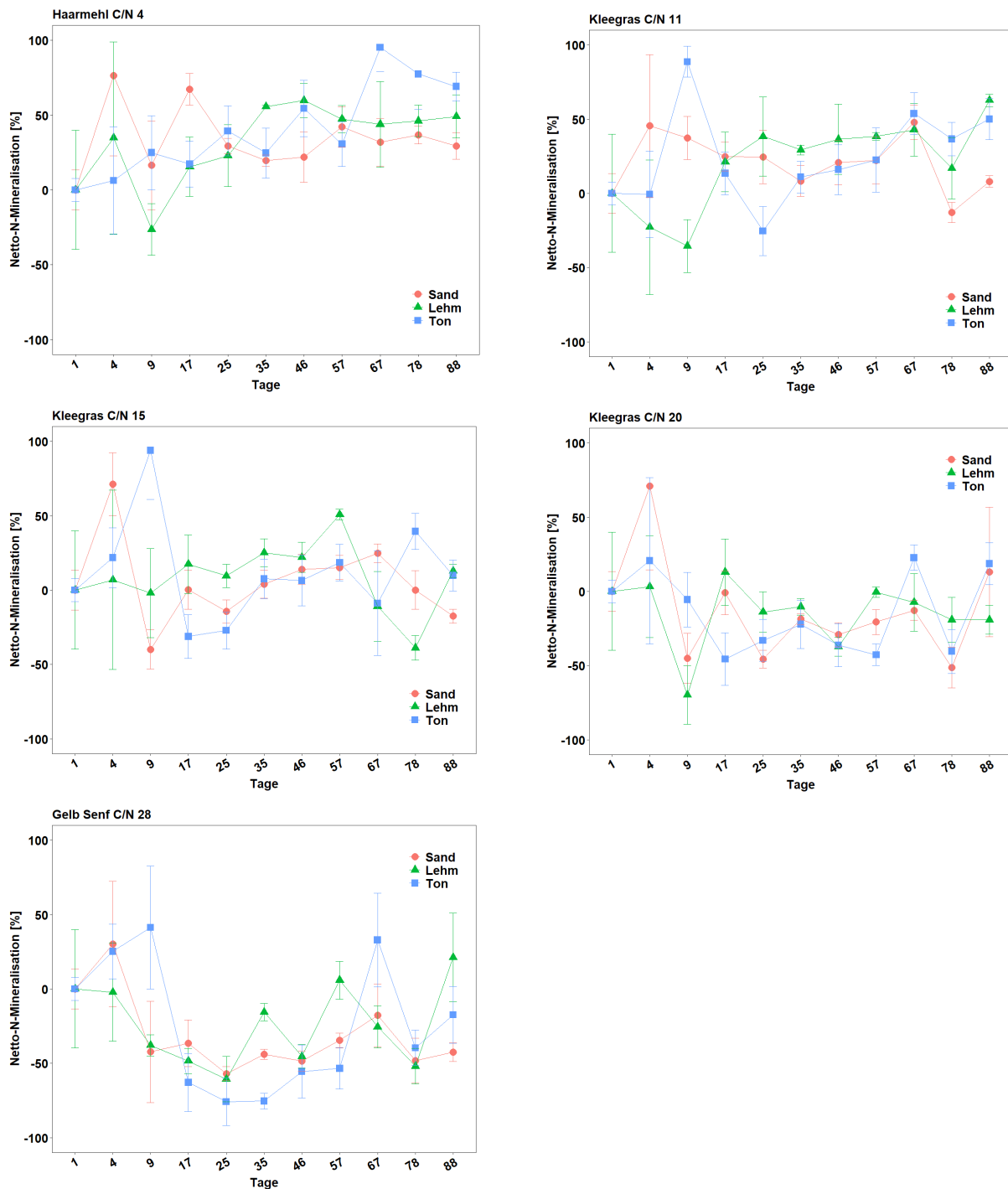


Abbildung 2.6-12: Verlauf der Netto-N-Mineralisation in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und Bodenart; Daten aus dem Inkubationsversuch 5; mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.

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. Der Effekt der Düngemittel war auf den Böden gleichartig, da keine statistische Wechselwirkung auftrat. 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 ($\text{Netto-N}_{\min} < 0$), siehe Lehm Boden an Tag 9. Das Klee gras mit C/N 11 konnte auf dem Sandboden nur zu 8 % umgesetzt werden (8 kg N von den gedüngten 100 kg N ha⁻¹) 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.

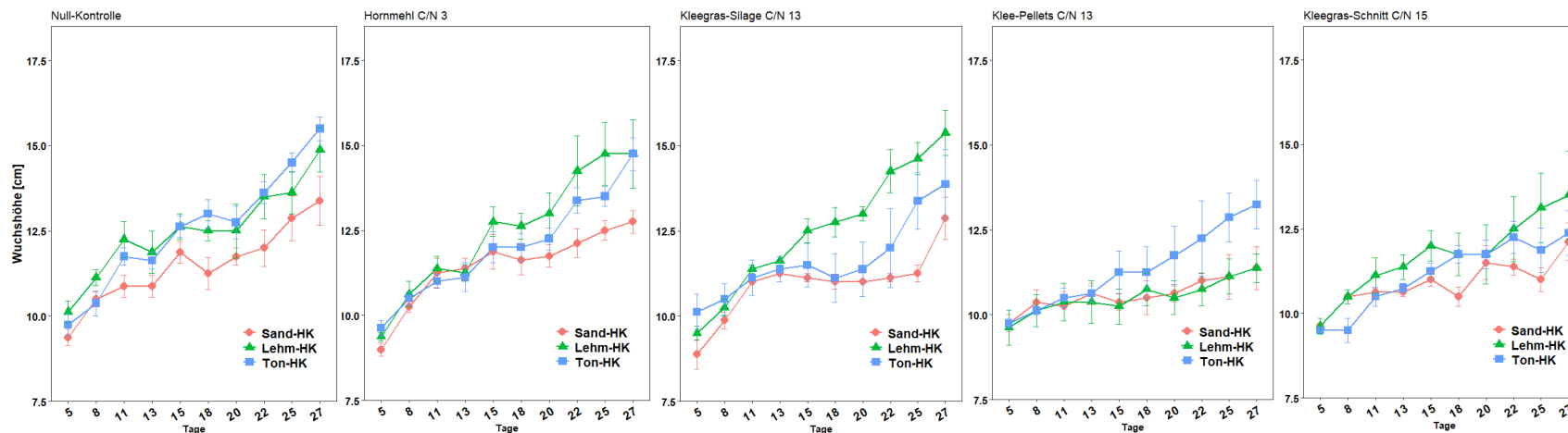


Abbildung 2.6-13: Verlauf der Pflanzenentwicklung in Abhängigkeit von Düngemittel und Bodenart des Standorts VH; Wuchshöhe von Roggen; Daten aus dem Pflanzenversuch 2, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

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 Lehmboden beobachtet werden. Im Allgemeinen führte die Düngerapplikation zu keinem geförderten Wachstum, sondern resultierte sogar in einer Wuchsverzögerung und geringerer finaler Wuchshöhe nach 27 Tagen. Im Vergleich der Düngemittel bewirkte Klee gras- und Kleepellet-Düngung ein geringeres Wachstum.

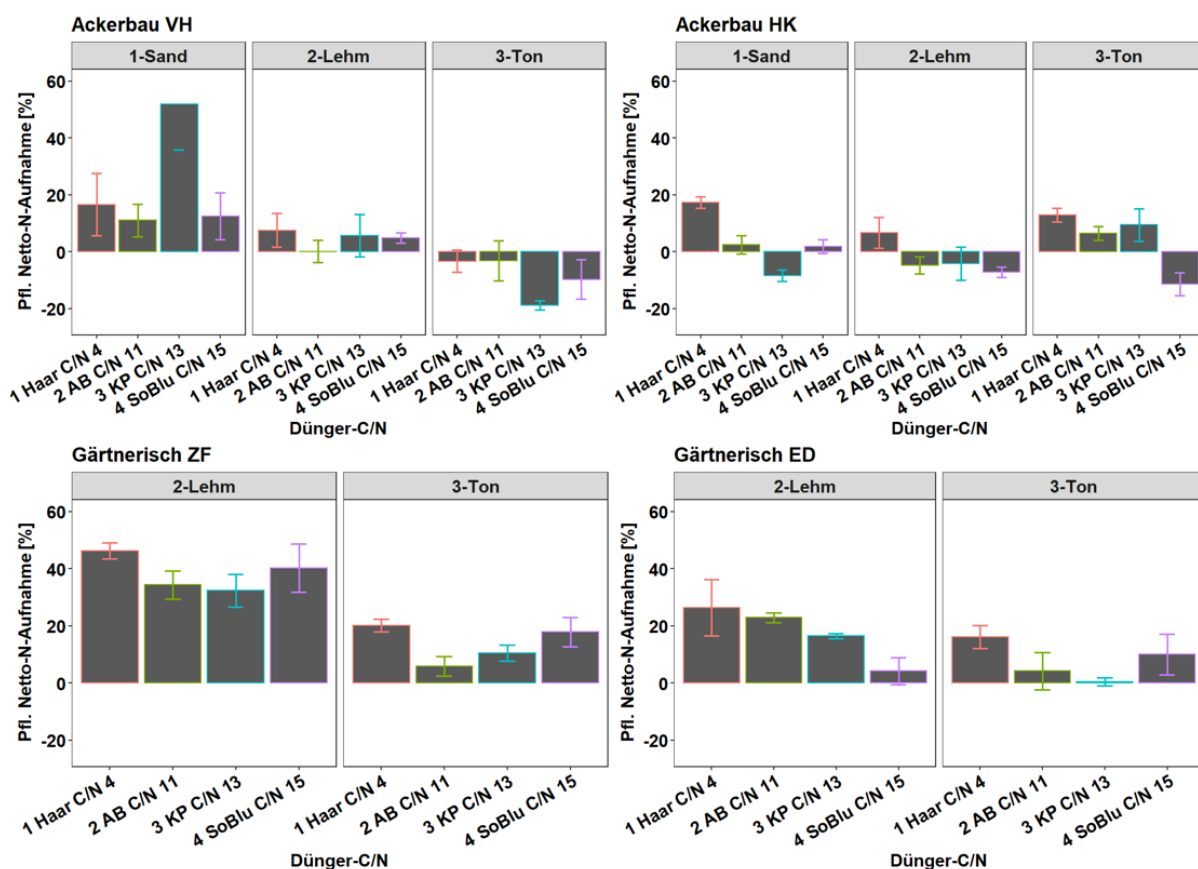


Abbildung 2.6-14: Düngereffekt in Abhängigkeit von der Bodenart und Dünger-C/N auf Pflanzen-Netto-N-Aufnahme von Roggen im Verhältnis zur ungedüngten Kontrolle nach 42 Tagen im Pflanzenversuch 3, mit Sand = sandiger Lehm; Lehm = schluffiger Lehm; Ton = toniger Lehm. Düngemittel: Haar C/N 4 = Haarmehlpellets, AB C/N 11 = Ackerbohnschrot, KP C/N 13 = Kleepellets und SoBlu C/N 15 = Sonnenblumensamen-Presskuchen. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.

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 Düngereffekt als auf dem Tonboden. Den größten Düngereffekt 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: $F = 3$; $p < 0,05$).

2.6.3.3 Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte auf die N-Mineralisation und pflanzliche N-Verfügbarkeit

2.6.3.3.1 Einfluss des Düngesystems

Die langfristig mit unterschiedlichen Düngesystemen gedüngten Böden (TUM Systemversuch) zeigten Unterschiede in der N Mineralisation ($F = 19$; $p < 0,001$) aus der organischen Bodensubstanz (OBS) im Inkubationsversuch im Zeitraum von 57 Tagen (Abbildung 2.5-15), Das mit Biogasgärrest gedüngte System (BGS) sowie das Marktfrucht-System (MFS; Gründüngung) mineralisierten mit 449 kg N/ha ($7,9 \text{ kg N/ha} \cdot \text{d}^{-1}$) und 422 kg N/ha ($7,4 \text{ kg N/ha} \cdot \text{d}^{-1}$) am meisten N.

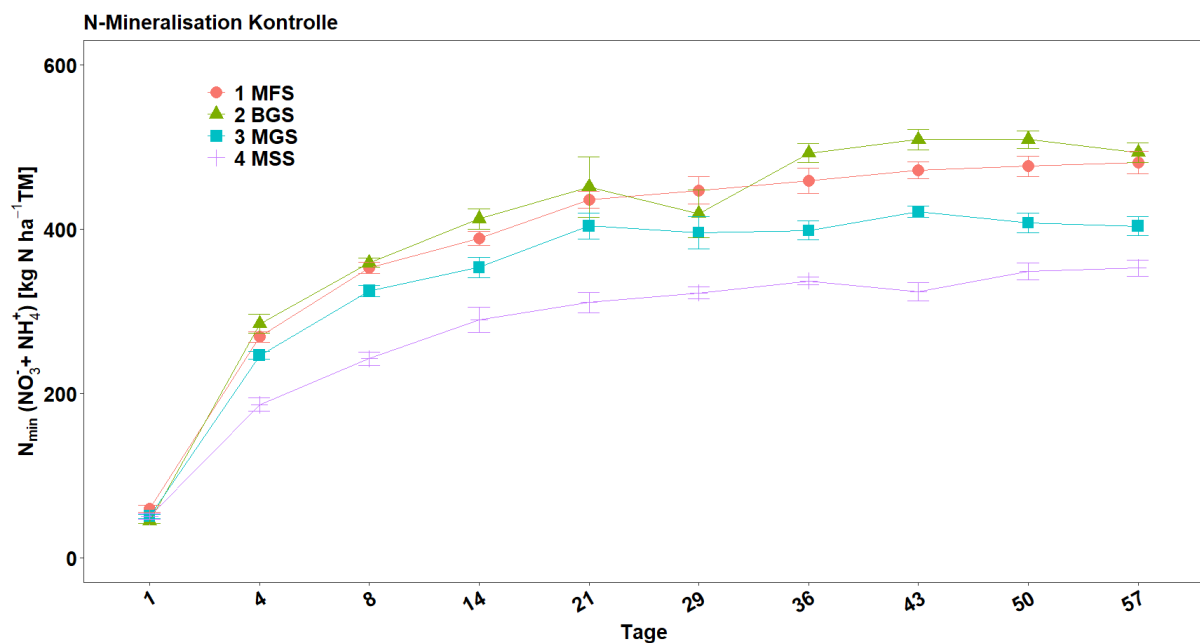


Abbildung 2.6-15: Verlauf der $N_{\min}$ -Entwicklung aus der OBS im Inkubationsversuch innerhalb 57 Tage in Abhängigkeit vom Düngesystem (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2): Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS). Daten aus Inkubationsversuch 6, Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 3 Wiederholungen.

Die Mineralisation des MFS ist vergleichsweise hoch und wird darauf zurückgeführt, dass die Probenahme im Winterweizen der Folgekultur vom Luzerne-Klee-Gras erfolgte. Die mit Gülle (MGS) und Stallmist (MSS) gedüngten Milchvieh-Systeme lieferten mit 353 kg N/ha ($6,2 \text{ kg N/ha} \cdot \text{d}^{-1}$) und 303 kg N/ha ($5,3 \text{ kg N/ha} \cdot \text{d}^{-1}$) 21 % und 33 % vergleichsweise weniger $N_{\min}$. Im Mittel der Systeme hatten die Böden nach 14 Tagen bereits 81 % der in der Zeit von 57 Tagen umgesetzten Gesamtmenge mineralisiert.

Im Pflanzenversuch (Abbildung 2.5-16) wurde die N-Mineralisierungsleistung, gemessen in der N Aufnahme der Pflanzen, nicht in der selben Relation beobachtet werden. Im MFS wurde zwar durch die Pflanzen am meisten N entzogen, jedoch unterschied sich nur das MSS mit einer deutlich geringeren N-Aufnahme.

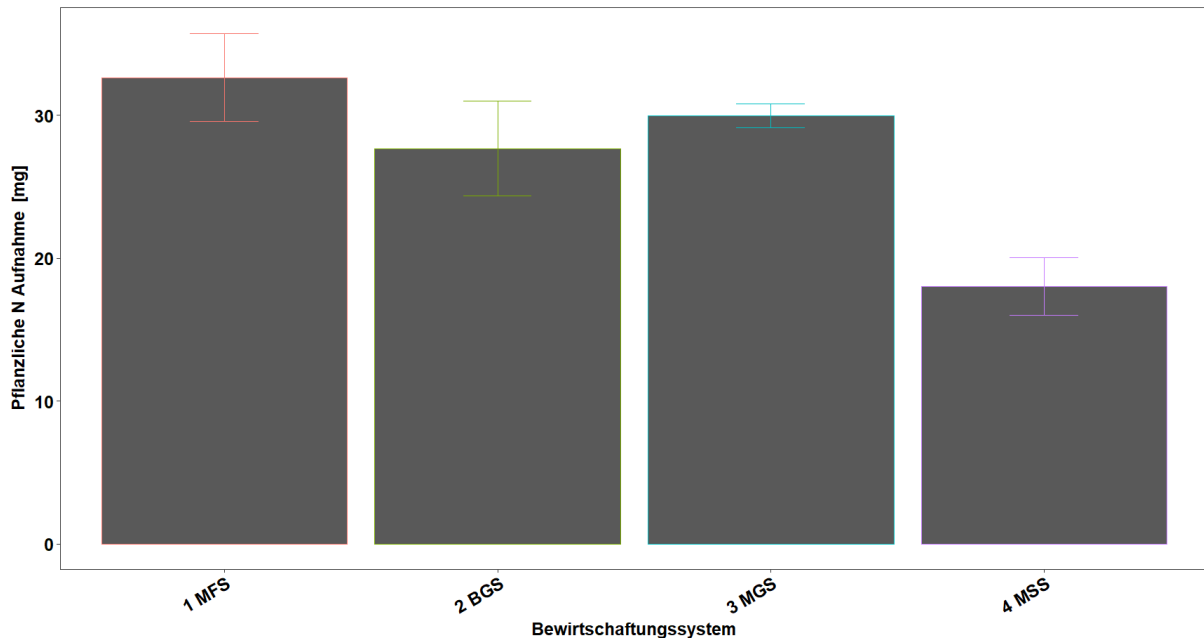


Abbildung 2.6-16: Pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen nach 37 Tagen (Pflanzenversuch 4) in Abhängigkeit vom Düngesystem (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2): Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler aus 4 Wiederholungen.

2.6.3.3.2 Einfluss des Betriebssystems (Fruchtfolge und Leguminosenanteil)

Bewirtschaftungsmaßnahmen haben einen Einfluss durch die kumulativen Langzeiteffekte der Düngung im Dauerversuch. Die Betriebssysteme ohne BG unterschieden sich signifikant ($F=74$; $p < 0,001$) und mineralisierten in 65 Tagen 264 kg N ha^{-1} , 196 kg N ha^{-1} , 159 kg N ha^{-1} und 124 kg N ha^{-1} für LKG2, LKG1, STD und MF, respektive (für die Berechnung wurde der Start- $N_{\min}$ -Wert vom finalen $N_{\min}$ -Wert abgezogen; Abbildung 2.5-17 zeigt die gemessenen Werte). Der LA korreliert deutlich mit der N Mineralisierung ($r = 0,89$; $p < 0,001$). Auf den BG gedüngten Böden konnte MF, mit 35 % LA, $178,7 \text{ kg N ha}^{-1}$, also 44 % mehr N mineralisieren, gefolgt von LKG1, mit 50 % LA, mit 28 % ($251,8 \text{ kg N ha}^{-1}$) mehr $N_{\min}$, STD mit 25 % LA mit 19 % mehr $N_{\min}$ und LKG2 mit 75 % LA hatte eine 8 % geringere N Mineralisierung.

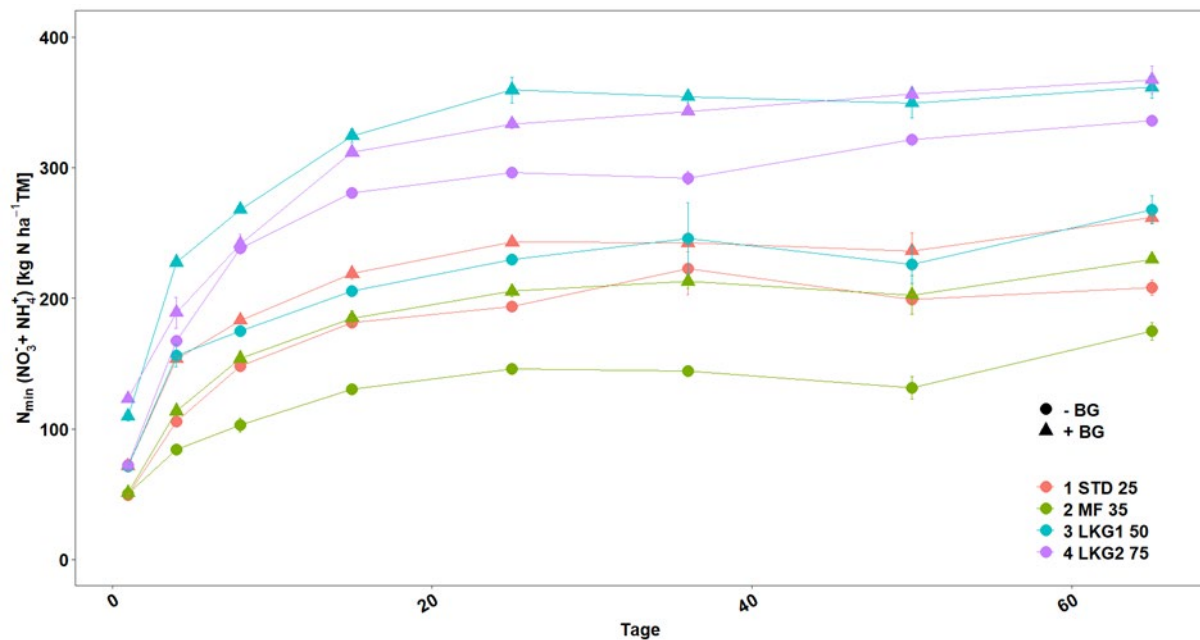


Abbildung 2.6-17: Entwicklung der N_{min} -Vorräte in ungedüngten Kontroll-Böden des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3), STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25% Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LKG1 50 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 75 % LA, „- BG“ – ohne Biogasgärrest, „+ BG“ – Nährstoffrückführung durch Biogasgärrest. Daten aus Inkubationsversuch 7, Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

Im Vergleich der Betriebssysteme mit BG unterschieden sich die beiden Systeme mit LA > 50 % von den beiden mit LA < 50 % ($F = 21$; $p < 0,001$), wobei der LA mit N_{min} korrelierte ($r = 0,72$; $p < 0,001$). LKG1 und LKG2 mineralisierten 252 kg N ha^{-1} und 244 kg N ha^{-1} . STD und MF mineralisierten 190 kg N ha^{-1} und 179 kg N ha^{-1} .

Im Vergleich aller Systeme, mit und ohne BG, unterschieden sich LKG2-BG, LKG1+BG und LKG2+BG mit der größten N-Mineralisation (mit 264 kg N ha^{-1} , 252 kg N ha^{-1} und 244 kg N ha^{-1} , respektive), von LKG1-BG (196 kg N ha^{-1}), STD+BG (190 kg N ha^{-1}), MF+BG (179 kg N ha^{-1}) und STD-BG (159 kg N ha^{-1}) mit der zweit größten N-Mineralisation, von MF-BG mit 124 kg N ha^{-1} . Sowohl das Betriebssystem mit LA ($F = 75$; $p < 0,001$), als auch BG ($F = 32$; $p < 0,001$) und deren Interaktion ($F = 11$; $p < 0,001$) hatten einen signifikanten Effekt auf die N-Mineralisation.

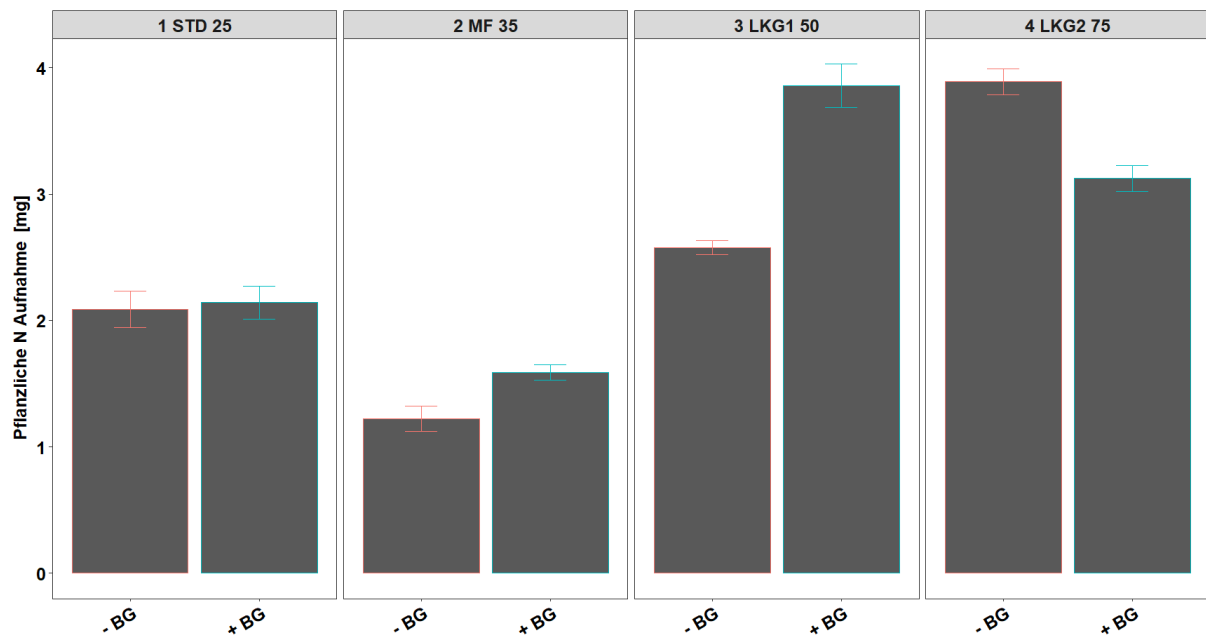


Abbildung 2.6-18: Pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen der verschiedenen Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3): STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25% Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LKG1 50 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 75 % LA, mit (+ BG) Biogasgärrest und ohne Biogasgärrest (-BG); Daten aus Pflanzenversuch 5, Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.

Die pflanzliche N-Aufnahme (Abbildung 2.5-18) nach 33 Tagen zeigte Effekte durch das Betriebssystem ($F = 146$; $p < 0,001$) und BG ($F = 8$; $p < 0,01$), wobei der LA mit der N-Aufnahme korrelierte ($r = 0,73$; $p < 0,001$). LKG2-BG und LKG1+BG hatten die größten N-Mengen aufgenommen, gefolgt von LK2+BG, von LKG1-BG, STD+BG und STD-BG. Bei MF konnten die Pflanzen ohne BG am wenigsten N aufnehmen. Beim Faktor Düngung mit Gärrest (BG) in LKG2 zeigte sich 20 % weniger N-Freisetzung für Pflanzen. Bei STD zeigte BG keine Wirkung. Die Pflanzen bei MF konnten durch BG 30 % mehr N aufnehmen und die von LKG1 50 % (Interaktion: $F = 27$; $p < 0,001$). Der Effekt des LA war stärker bei den Fruchtfolgen mit > 50 % LA ($F = 35$; $p < 0,001$).

2.6.3.4 Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte und Düngemittel-C/N-Verhältnis auf die Netto-N-Mineralisation

2.6.3.4.1 Einfluss des Düngesystems

Die Netto N-Mineralisation der Dünger im Inkubationsversuch wurde für die verschiedenen Anbausysteme im Vergleich zum nicht gedüngten Boden bestimmt. Die Untersuchung über einen Zeitraum von 57 Tagen ergab ähnliche Verlaufskurven mit Streuungen zu den verschiedenen Messterminen (Abbildung 2.5-19). Zu manchen Zeitpunkten wurden bspw. beim Horn-Dünger mit C/N 3 am 15. Tag 96 % im MGS erreicht, ~70 % im MS und MSS und 56 % im BS. Die einzelnen Kurven schwanken dazu stark, zum einen Zeitpunkt hat das eine System den höchsten N_{min} und zum nächsten oder übernächsten dann den niedrigsten etc.

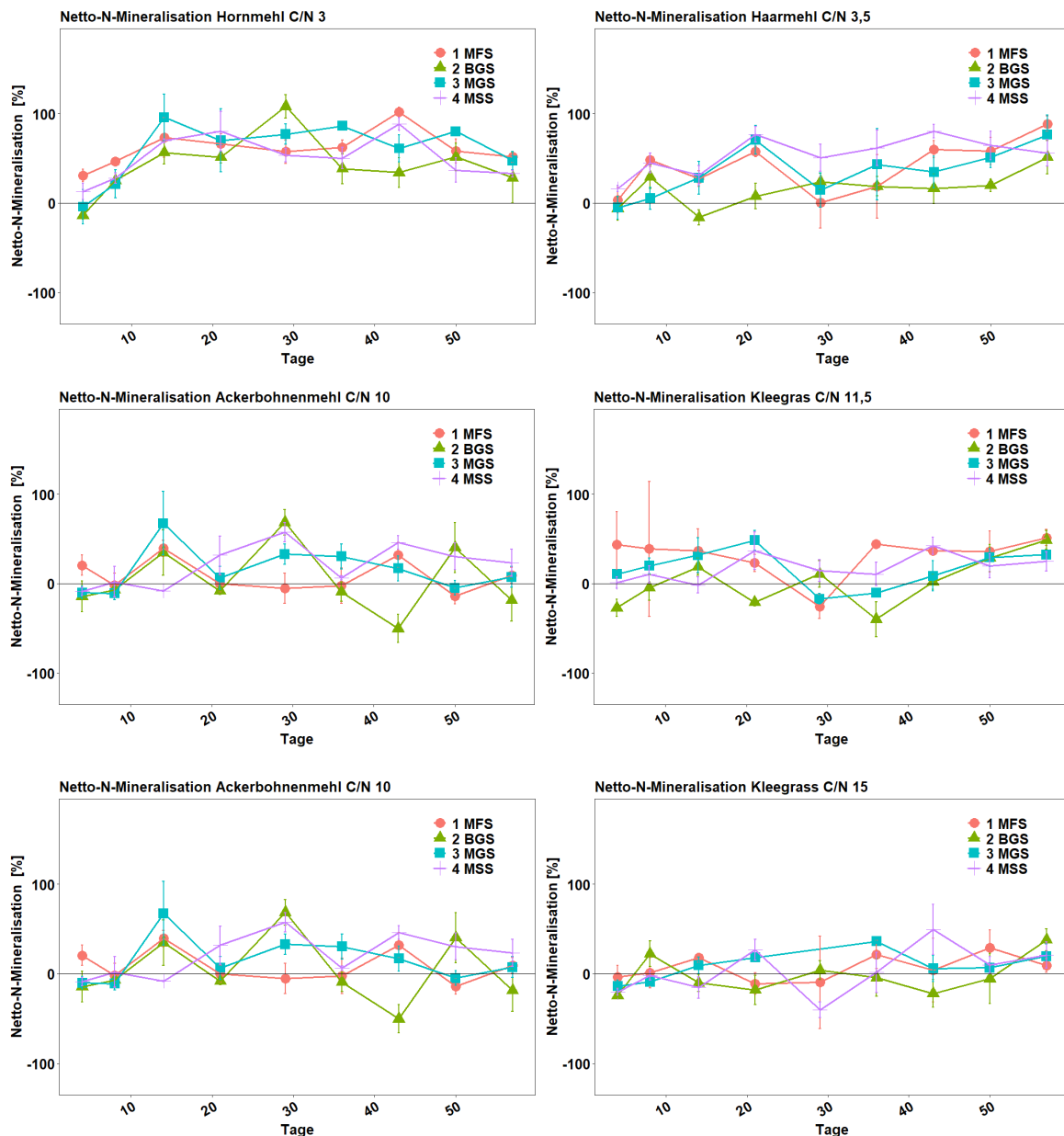


Abbildung 2.6-19: Verlauf der Netto-N-Mineralisation in Abhängigkeit von Düngemittel C/N-Verhältnis und langfristigem Düngesystem (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Daten aus Inkubationsversuch 6; Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

Im Laufe der 57 Tage kam es in Abhängigkeit des Düngemittels und Betriebssystems immer wieder zu Immobilisierungs- und Re-Mobilisierungsprozessen. Die große Schwankung und Unterschiede zwischen den einzelnen Messterminen relativiert allerdings die Aussagekraft. Für die weitere Betrachtung und Berechnung haben wir daher die Mittelwerte über alle Messtermine verwendet (Abbildung 2.5-20).

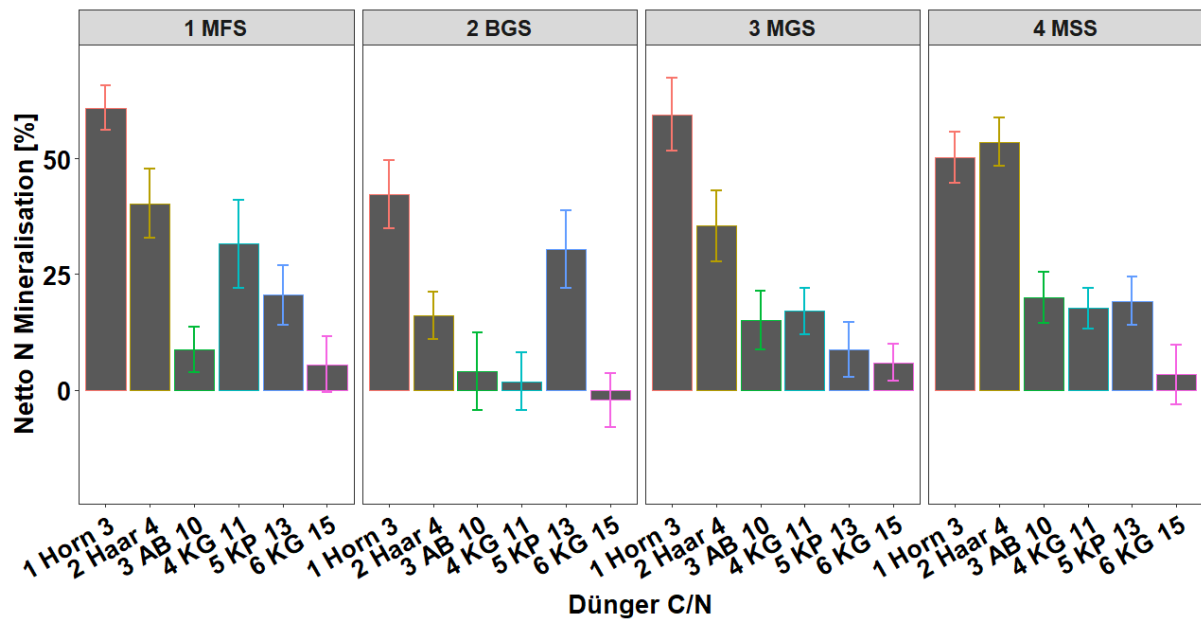


Abbildung 2.6-20: Mittlere Netto-N-Mineralisation [%] der verschiedenen Düngemittel über alle Messtermine der 57 Tage im Inkubationsversuch 6 der Düngesystemböden (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist – MSS in Abhängigkeit des Dünger-C/N. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

Gemittelt über alle Messtermine hatte sowohl das Bewirtschaftungssystem ($F = 4$; $p < 0,01$) sowie das Düngemittel ($F = 45$; $p < 0,001$) und deren Interaktion ($F = 2$; $p < 0,01$) einen Einfluss auf die Netto-N-Mineralisation. Tendenziell reagierten die Böden mit einzelnen Ausnahmen ähnlich, mit höherer Freisetzung bei engem Dünger-C/N. Insgesamt konnten durch Horn zusätzlich 53 % und durch Haar 36 % N mineralisiert werden. KP, KG 10, AB und KG 15 mineralisierten 20 %, 17 %, 12 % und 3 %, respektive. Je Düngesystem gab es Ausnahmen, dass einzelne Düngemittel nicht dem C/N entsprechend umgesetzt werden konnten, wie bei AB im MFS oder besser umgesetzt werden konnten, wie bei KP im BGS. Beim MSS spielte das Dünger-C/N keine Rolle, aber die tierischen Dünger (v.a. Haar) konnten mehr als doppelt so viel umgesetzt werden verglichen mit den pflanzlichen Düngern. Im BGS war die Freisetzung durch die Dünger im Mittel etwas geringer (im Mittel nur 11 % Umsetzung) und unterschied sich von MFS und MSS, die mit 21 % und 20 % den höchsten Düngerumsatz hatten. MGS konnten die Dünger zu 18 % mineralisieren. Insgesamt, durch die N-Mineralisation der Systeme aus der OBS und der zusätzlichen Netto-N-Mineralisation der Dünger konnten das BGS, mit 446 kg N ha^{-1} und das MFS mit 435 kg N ha^{-1} mehr N mineralisieren, als MGS mit 385 kg N ha^{-1} und MSS mit 318 kg N ha^{-1} .

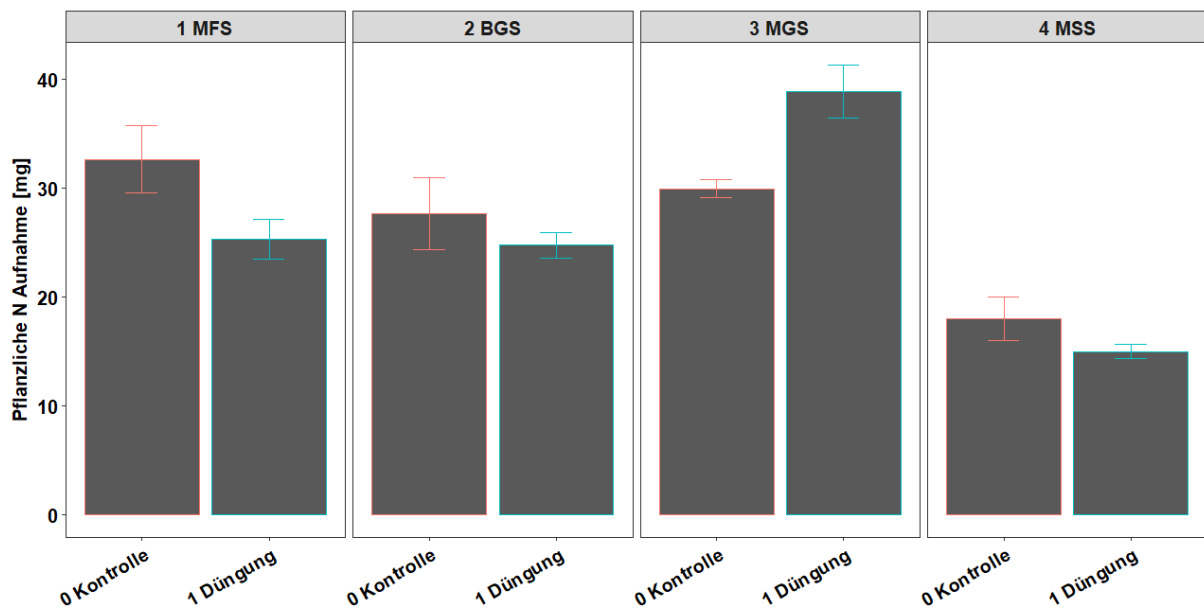


Abbildung 2.6-21: Finale pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen und aller Düngebehandlungen im Mittel nach 37 Tagen im Pflanzenversuch 4 der Düngesystemböden (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.

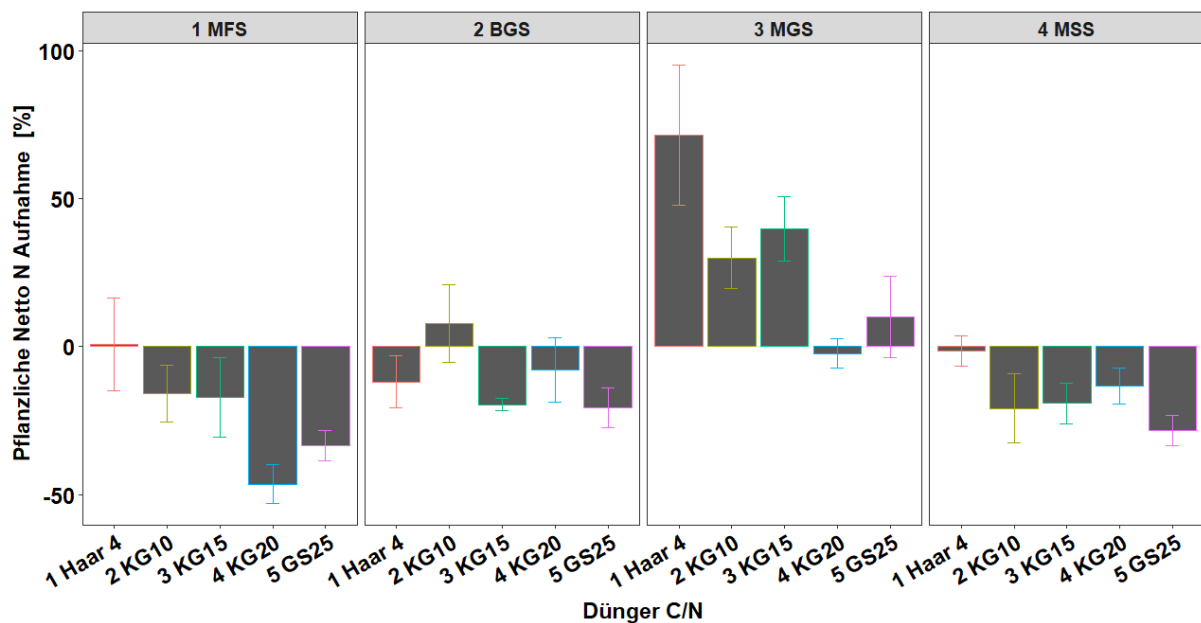


Abbildung 2.6-22: Finale pflanzliche N-Aufnahme in Abhängigkeit von Dünger (C/N) und langfristigem Düngemanagement (TUM Systemversuch, Tabelle 2.5-2) im Pflanzenversuch 4 (Tag 37); Marktfrucht/Gründüngung – MFS, Biogas - BGS, Milchvieh-Gülle - MGS und Milchvieh-Stallmist - MSS. Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.

Im Pflanzenversuch unterschieden sich die Systeme in der pflanzlichen N-Aufnahme ($F = 37$; $p < 0,001$). Die Düngung insgesamt hatte keinen signifikanten Effekt, aber es konnte eine Interaktion festgestellt werden ($F = 3$; $p < 0,05$). Die gedüngten Pflanzen des MGS konnten am meisten N aufnehmen (Abbildung 2.5-21). Bei allen anderen Düngesystemen traten

negative Düngeeffekte auf. Im MSS konnten die (gedüngten) Pflanzen am wenigsten N aufnehmen.

Die verschiedenen Düngemittel beeinflussten die pflanzliche N-Verfügbarkeit gemessen in der N-Aufnahme, wobei die Systeme zu unterschiedlichen Düngemittel-Netto-N-Aufnahmen führten ($F = 7$; $p < 0,001$). Es lag eine schwache Interaktion vor ($F = 2$; $p < 0,1$). Nur MGS unterschied sich von den anderen Systemen ($F = 25$; $p < 0,001$) und konnte im Durchschnitt die N-Aufnahme durch die Düngung um 30 % steigern, im Wesentlichen durch die Dünger mit $C/N \leq 15$ (Abbildung 2.5-22). Alle anderen Dünger hatten bei den anderen Systemen keine oder negative Düngeeffekte (reduziertes Wachstum, Biomassebildung und N-Aufnahme: Netto N < 100 %). So führte die Düngung bei BGS zu einer 11 % reduzierten N-Aufnahme, bei MSS zu -17 % und bei MFS zu -22 %. Die verschiedenen Dünger bzw. das Dünger C/N machte v.a. beim MGS und MFS einen Unterschied, wobei die beiden Dünger mit $C/N > 15$ zu deutlich geringeren N-Aufnahmen bzw. negativen Düngeeffekten führten. Im MSS konnten die Pflanzen am wenigsten N aufnehmen und die Düngung führte unabhängig vom Dünger C/N zur am stärksten reduzierten N-Aufnahme im Vergleich zur Kontrolle. Durchschnittlich über alle Systeme führte nur Haar zu einer zusätzlichen N-Aufnahme (15 %). KG10 unterschied sich nicht von der Kontrolle, KG15, KG20 und GS25 führten zu einer reduzierten N-Aufnahme von -4 %, -18 % und -18 %, respektive.

2.6.3.4.2 Einfluss des Betriebssystems (Fruchtfolge und Leguminosenanteil)

Die Betriebssysteme ohne BG ($F = 14$; $p < 0,001$) und das Düngemittel C/N ($F = 192$; $p < 0,001$) beeinflussten die Netto-N-Mineralisation. Horn und Haar konnte im Mittel zu 70 % und 52 % umgesetzt werden, AB und KG10 zu 31 % und 21 %, respektive. KP (2 %) und KG15 (-2 %) konnten in 65 Tagen nicht umgesetzt werden (Abbildung 2.5-23). Im LKG1 führte KG15 zu N-Immobilisierung, es lagen 17 % weniger N_{min} vor als bei der ungedüngten Kontrolle. Die größte Netto-Mineralisation im Mittel über alle Dünger hatte LKG2 mit 42 % und das STD mit 38 %. Diese beiden unterschieden sich von den anderen beiden Betriebssystemen mit 19 % und 17 % Netto-N-Mineralisation für LKG1 und MF, respektive.

Die Betriebssysteme mit BG hatten einen schwachen Effekt ($F = 3$; $p < 0,05$) auf die Netto-N-Mineralisation der Düngemittel (Abbildung 2.5-24). Die Dünger konnte im Mittel bei STD zu 45 % mineralisiert werden, zu 43 % bei MF, zu 30 % bei LKG1 und zu 29 % bei LKG2. Das Dünger-C/N war für die Umsetzung entscheidend ($F = 149$; $p < 0,001$). Tendenziell wurden die Dünger mit weiterem C/N zu einem größeren Prozentsatz umgesetzt. Horn konnte im Mittel zu 82 % umgesetzt werden, Haar zu 60 %, AB zu 43 %, KG10 zu 31 %, KG15 zu 11 % und KP zu 7 %. Eine Interaktion zwischen Betriebssystem und Dünger-C/N konnte jedoch statistisch nicht bestätigt werden.

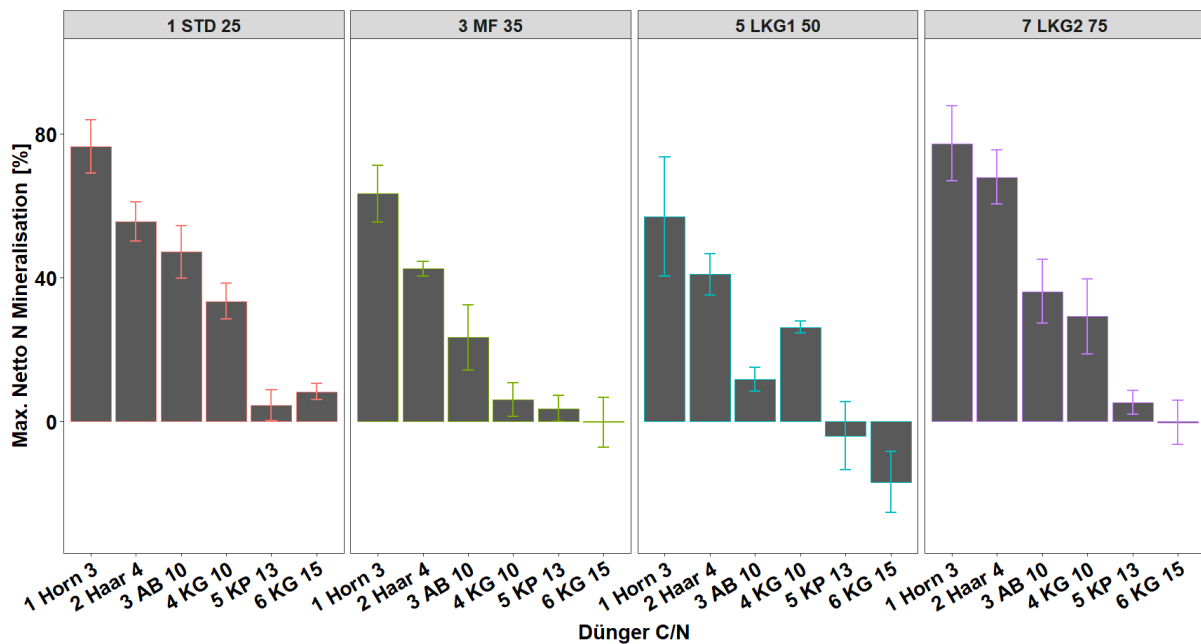


Abbildung 2.6-23: Maximale Netto-N-Mineralisation (Tag 65) der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) ohne Biogasgärest (- BG) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Inkubationsversuch 7, Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

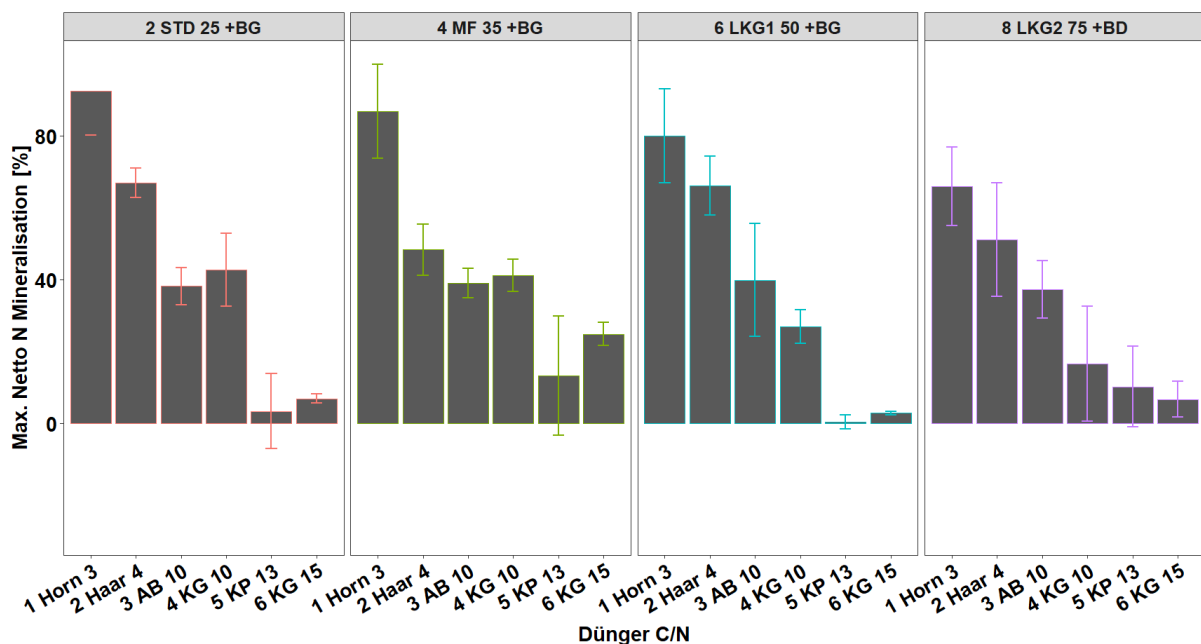


Abbildung 2.6-24: Maximale Netto-N-Mineralisation (Tag 65) der verschiedenen Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) mit langfristiger Nährstoffrückführung durch Biogasgärest (+ BG) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Inkubationsversuch 7, Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

Entsprechend war das Dünger-C/N ($F = 365$; $p < 0,001$) und auch das Betriebssystem ($F = 4$; $p < 0,05$) signifikant für die Netto-N-Mineralisation über alle Betriebssysteme mit und ohne BG. Die langfristige Nutzung von BG ($F = 10$; $p < 0,01$) führte zu 1/3 mehr Düngerumsatz, wobei sich der Düngeumsatz je Düngemittel und dessen C/N-Verhältnis unterschied (siehe Abbildung 2.5-23 und Abbildung 2.5-24). Die Dünger konnten in 65 Tagen bei den Betriebssystemen ohne BG im Mittel zu 29 % umgesetzt werden und bei den Betriebssystemen mit BG zu 38 %. Hierbei lag eine Interaktion mit dem Betriebssystem vor ($F = 5$; $p < 0,01$), wobei bei STD (mit und ohne BG) die Dünger zu 40 % umgesetzt werden konnten, beim LKG2 zu 34 %, beim MF zu 33 % und beim LKG1 zu 28 %.

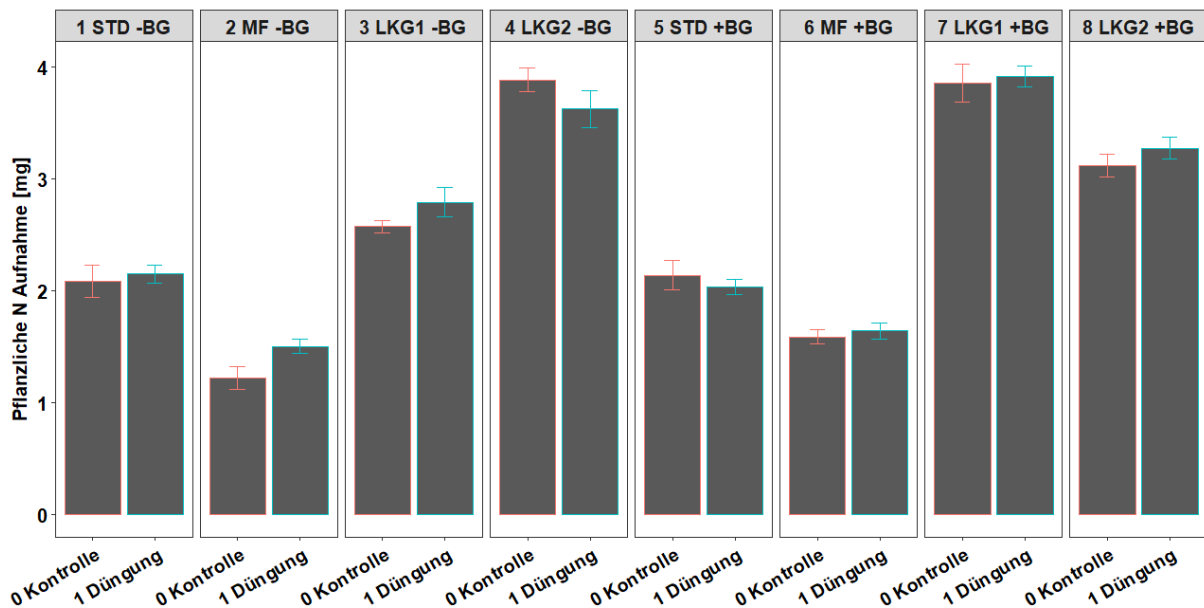


Abbildung 2.6-25: Finale nach 36 Tagen im Pflanzenversuch 5 mit den Böden der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3): STD 25 – Standard-pflanzliche N-Aufnahme der ungedüngten Kontrollen und aller Düngebehandlungen im Mittel Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LKG1 50 – Luzerne-Kleegrass-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Kleegrass-Fruchtfolge mit 75 % LA, mit (+ BG) Biogasgärrest und ohne Biogasgärrest (- BG;) zur Nährstoffrückführung; Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.

Das Betriebssystem ($F = 227$; $p < 0,001$), die langfristige BG Nutzung ($F = 11$; $p < 0,01$) und deren Interaktion ($F = 29$; $p < 0,001$) beeinflussten die finale pflanzliche N-Aufnahme (Abbildung 2.5-25). Die Düngung hatte keinen signifikanten Effekt und auch keine Interaktionen.

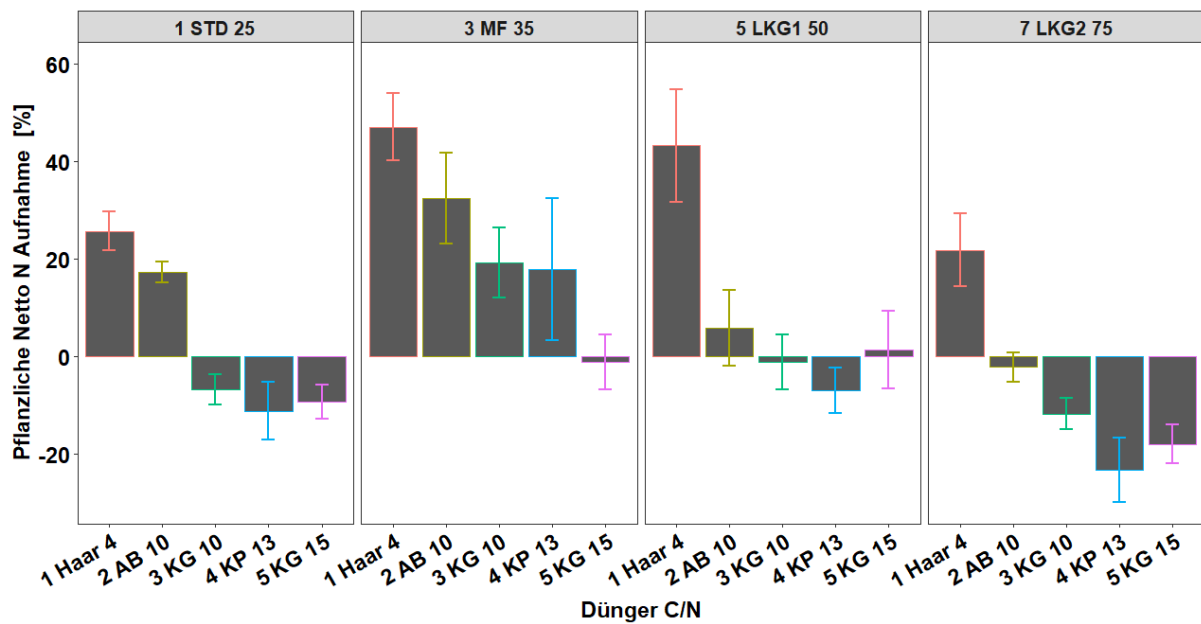


Abbildung 2.6-26: Pflanzliche Netto-N-Aufnahme der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) ohne Biogasgärest (- BG,) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LKG1 50 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Kleegras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Pflanzenversuch 5, Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.

Die Betriebssysteme ohne BG unterschieden ($F = 15$; $p < 0,001$) sich dennoch in ihrer Fähigkeit Dünger-N zu mineralisieren und den Pflanzen zu Verfügung zu stellen (Abbildung 2.5-31): Pflanzliche Netto N-Aufnahme der Betriebssysteme ohne BG). Der größte Düngeeffekt konnte bei MF beobachtet werden, mit durchschnittlich 23 % größerer N-Aufnahme. LKG1 konnte 8 % mehr aufnehmen, STD 3 % und bei LKG2 resultierte die Düngung in eine 7 % geringere N-Aufnahme. Die Düngemittel führten dementsprechend in Abhängigkeit ihres C/N-Verhältnisses ($F = 90$; $p < 0,001$) zu unterschiedlichen Netto-N-Aufnahmen, interagierten jedoch nicht mit dem Betriebssystem. Haar mit C/N 4 führte im Mittel zu 34 % Netto-N-Aufnahme, AB zu 13 %, KG10 hatte keinen Düngeeffekt, KP und KG15 führten zu einer 6 % und 7 % geringeren N-Aufnahme.

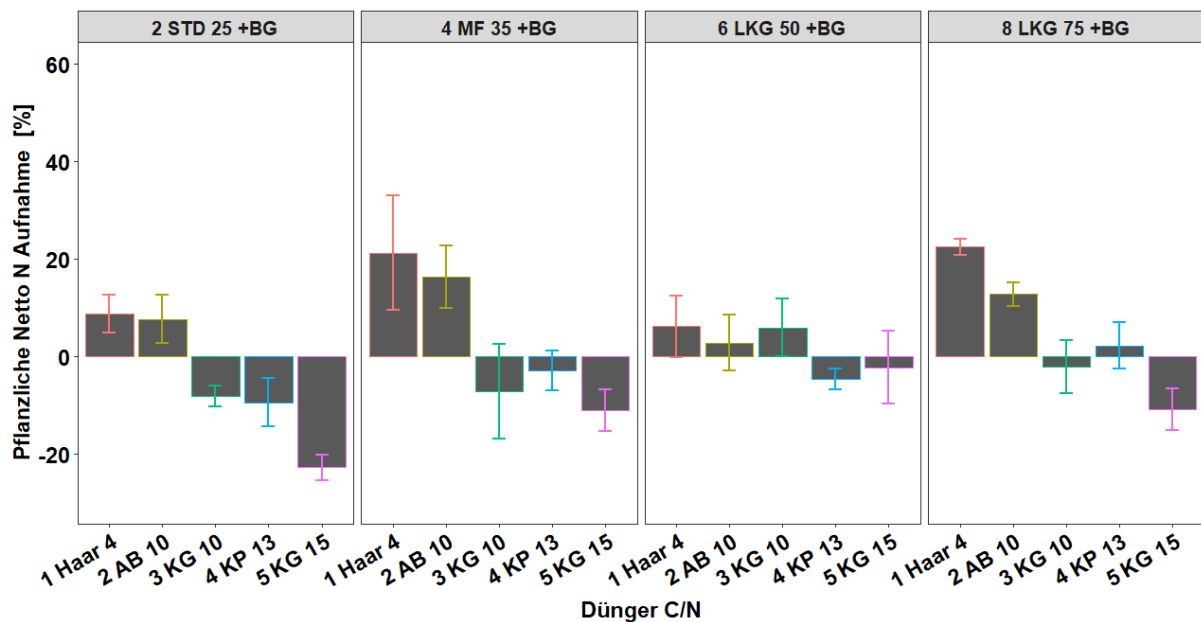


Abbildung 2.6-27: Pflanzliche Netto-N-Aufnahme der Betriebssysteme des TUM Biomasseversuchs (Tabelle 2.5-3) mit langfristiger Nährstoffrückführung durch Biogasgärest (+ BG) in Abhängigkeit des Düngers (C/N); STD 25 – Standard-Fruchtfolge mit 25 % Leguminosenanteil (LA), MF 35 – Marktfrucht-Fruchtfolge mit 35 % LA, LGK1 50 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 50 % LA, LKG2 75 – Luzerne-Klee-gras-Fruchtfolge mit 75 % LA, Daten aus Pflanzenversuch 5, Standardfehlerbalken aus 4 Wiederholungen.

Die Betriebssysteme mit BG hatten einen leichten Effekt ($F = 3$; $p < 0,1$) auf die Netto-N-Aufnahme der Pflanzen (Abbildung 2.5-26: Pflanzliche Netto N Aufnahme der Betriebssysteme mit BG). Bei LKG2 konnte durch die Düngung durchschnittlich 5 % mehr N aufgenommen werden, bei MF 3 %, bei LKG1 2 % und bei STD führte die Düngung zu einer 5 % geringeren N-Aufnahme. Das Dünger-C/N spielte eine signifikante Rolle ($F = 43$; $p < 0,001$), wobei nur Haar und AB zu einem positiven Düngeeffekt führten (15 % und 10 %, respektive) und sich von den anderen Düngern unterschieden, bei denen negative Düngeeffekte auftraten. Beim KG10 wurde 3 % weniger N aufgenommen, 4 % weniger bei KP und 12 % weniger bei KG15.

2.6.3.5 Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungs-potentials

Einfluss von Bodenart und Dünger-C/N auf die N-Freisetzung aus OBS und Düngemitteln

Das N-Freisetzungs-potential 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 2.5-2827 zeigt die Korrelation verschiedener Boden- und Pflanzenuntersuchungsparameter zueinander und mit der N-Menge aus dem Pflanzenversuch 3.

Von den Bodenuntersuchungen waren der Start-Nitrat-Wert ($\text{NO}_3\text{-DE}$) der EUF-Analyse und der C- und N-Gehalt der HWL-Extraktion (CHWL und NHWL) positiv mit der pflanzlichen N-Aufnahme korreliert ($r > 0,5$, $p < 0,001$) und negativ mit der Netto-N-Aufnahme. Diese war leicht positiv korreliert mit dem Dünger- N_t und leicht negativ mit dem Dünger-C/N. halt vor, sowie leicht positive mit K-Gehalt, NHWL, Corg und der pfl. Biomasse (FM und TM).

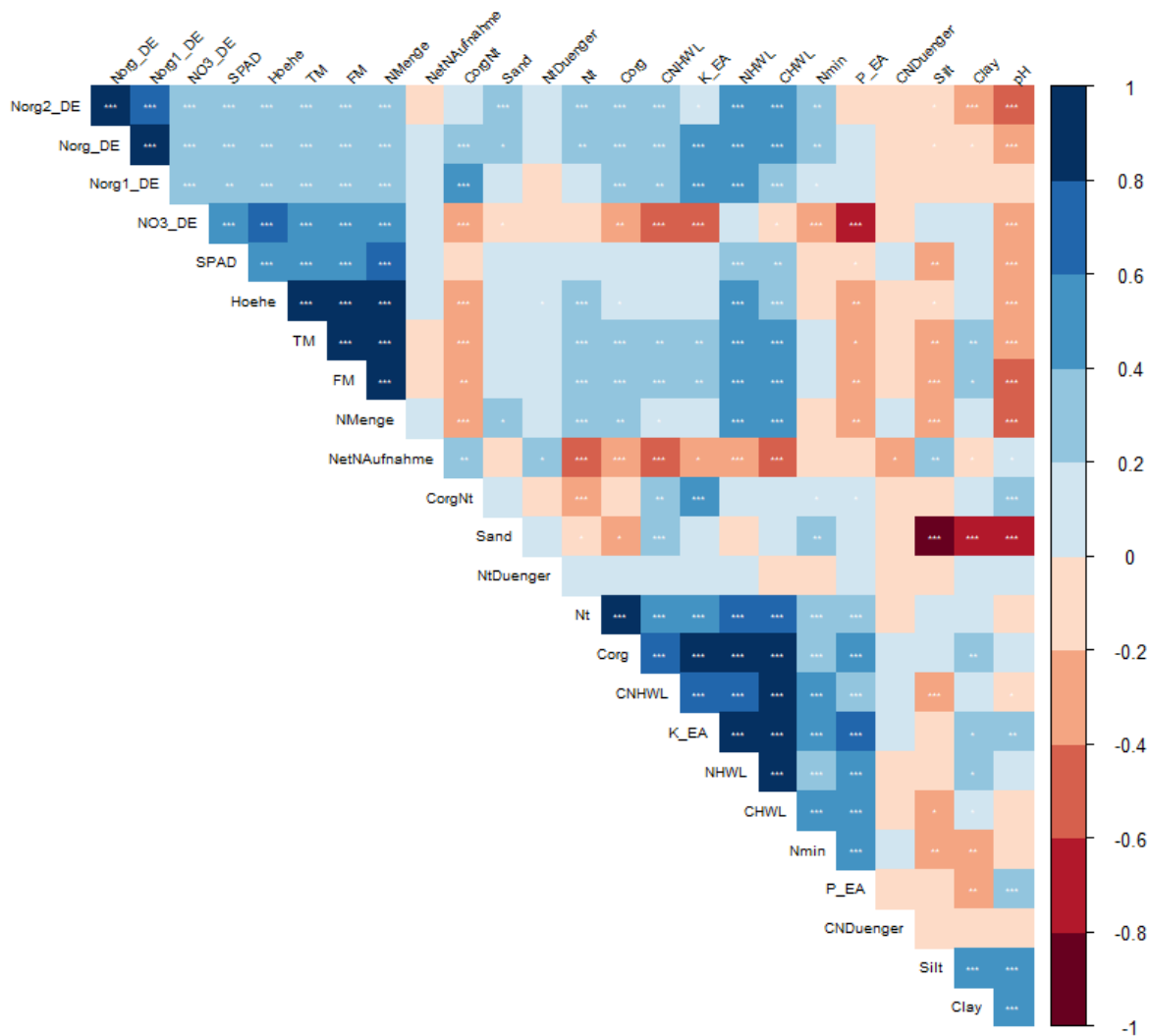


Abbildung 2.6-28: Korrelation unterschiedlicher Boden- und Pflanzenparameter.

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 = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, NHWL = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, C/NHWL = CHWL/NHWL-Verhältnis, C/NDuenger = 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).

Der Start $N_{\min}$ -Wert war nicht korreliert und hatte keine Signifikanz. Der pH-Wert war negativ mit der N-Aufnahme korreliert ($p < 0,001$), sowie schwach negativ der Schluffgehalt ($p < 0,001$), das C_{org}/N_t -Verhältnis ($p < 0,001$) und der P-Gehalt ($p < 0,01$). Der Tongehalt zeigte keine Korrelation weder mit der N-Aufnahme noch der Netto-N-Aufnahme. Er war negativ korreliert mit dem Sandgehalt und leicht negativ mit P-Gehalt, $N_{\min}$ und $N_{\text{org2\_DE}}$. Es lag eine positive Korrelation mit dem Schluffgehalt vor.

Einfluss des Düngesystems auf die N-Freisetzung aus der OBS

Bei den Korrelationen der Bodenparametern der ungedüngten Kontrollen im Inkubationsversuch der Düngesystemböden (TUM-Systemversuch) korrelierte $N_{\min}$ sowie Ammonium-N stark mit dem C_{org} und N_t -Gehalt der Böden sowie der mikrobiellen Aktivität (R_h) und den löslichen OS Fraktionen C_{hwl} und N_{hwl} , siehe Abbildung 2.5-29. Beide korrelierten negativ mit dem pH-Wert. Nitrat-N und Ammonium-N verhielten sich antagonistisch.

Die finale N-Menge, die die Pflanzen in 37 Tagen auf den Kontroll-Böden aufnahmen korrelierte positiv mit dem Start- $N_{\min}$, Start-Nitrat, N_{hwl} , C_{hwl} und dem K-Gehalt sowie negativ mit dem heißwasserlöslichen C/N-Verhältnis der Böden und dem pH-Wert (Abbildung 2.5-29). Der Start- $N_{\min}$ korrelierte positiv mit Nitrat und dem K-Gehalt, negativ mit Ammonium der mikrobiellen Biomasse (C_{mik}) und Aktivität (R_h) und C_{org} .

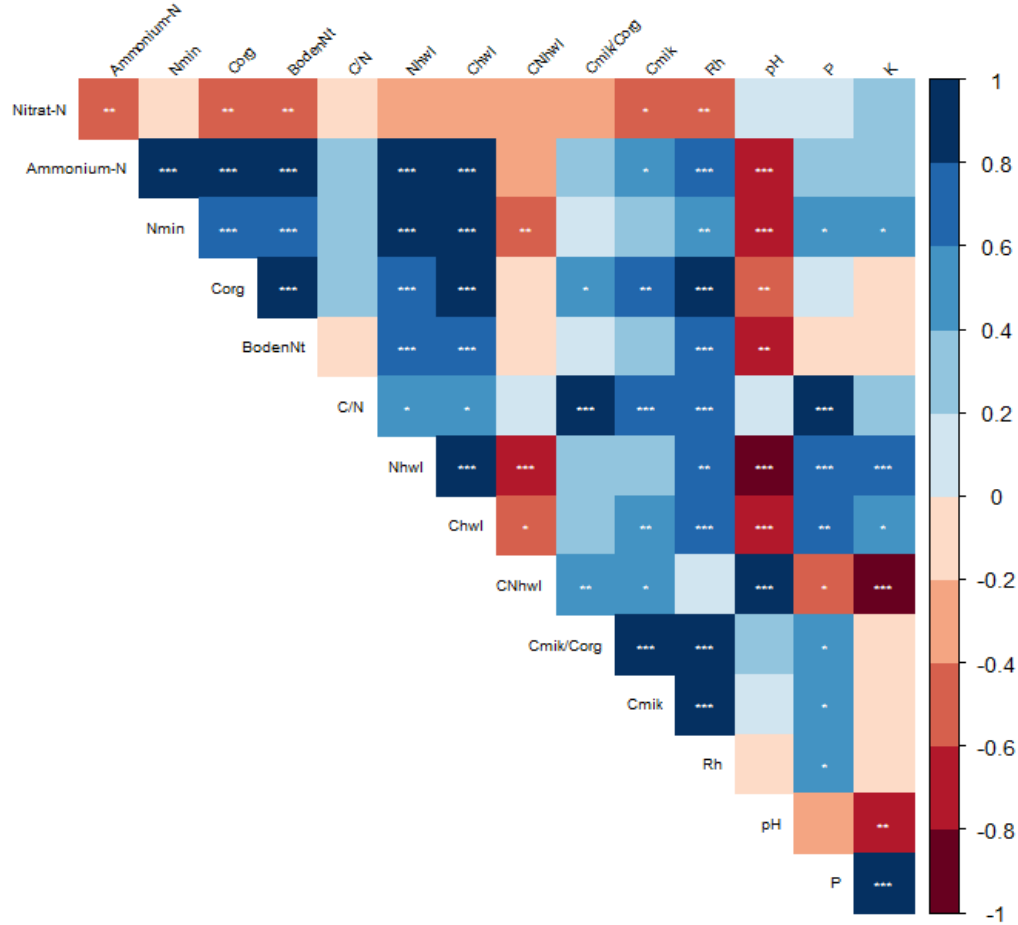


Abbildung 2.6-29: Korrelationen der Bodenparametern der ungedüngten Kontroll-Böden über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs (Inkubationsversuch 6) am Ende der Inkubationszeit nach 57 Tagen. Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität - Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizient), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. Nitrat-N =, Ammonium-N, Nmin = NO_3^- -N + NH_4^+ -N, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, BodenNt = Boden- N_t -Gehalt, C/N = $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}_t$ -Verhältnis, Nhwl = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, Chwl = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, CNhwl = $\text{C}_{\text{hwl}}/\text{N}_{\text{hwl}}$ -Verhältnis, Cmik/Corg = Verhältnis, Cmik = Boden-mikrobieller C-Gehalt, Rh = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse).

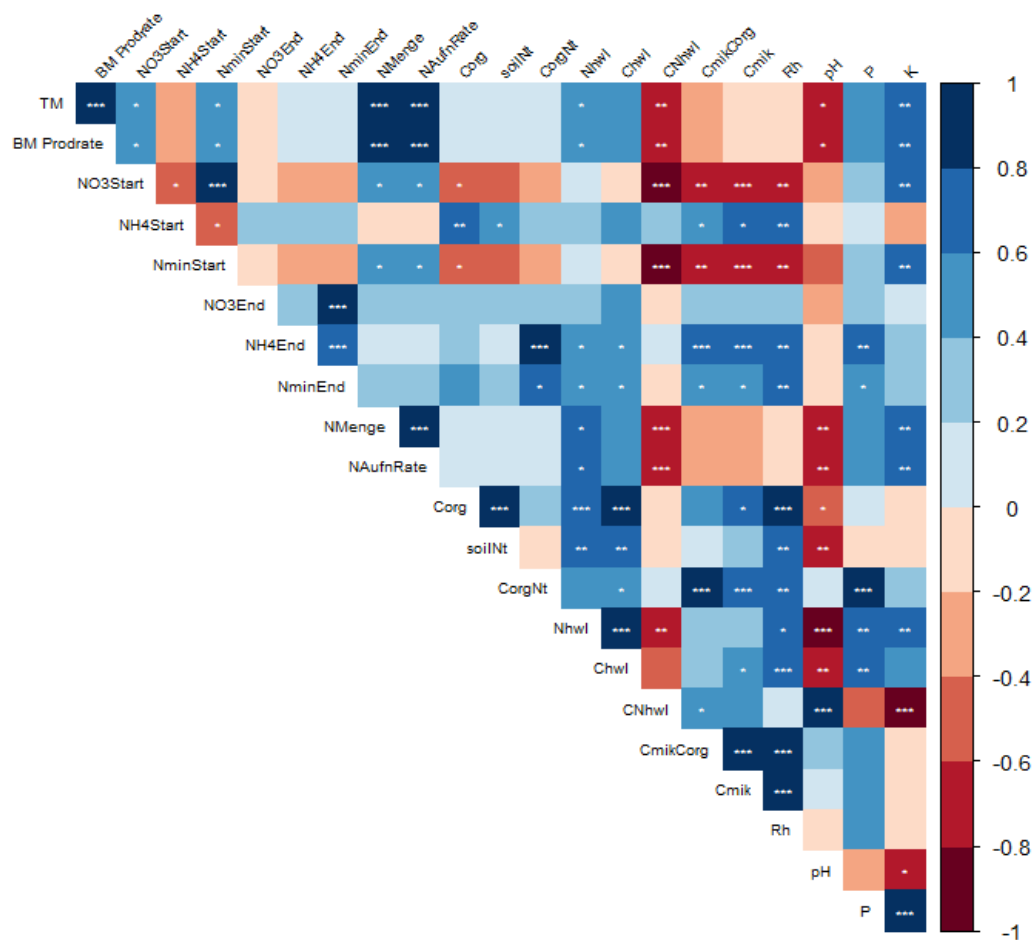


Abbildung 2.6-30: Korrelationen zwischen den Boden- und Pflanzenparametern der ungedüngten Kontroll-Böden über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs am Ende des Pflanzenversuchs 4 (Tag 37). Blau: positive Korr., rot: negative Korr., Farbintensität Ausdruck für den Korrelationskoeffizienten, *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, Signifikanzniveau nach Pearson und Spearman ($\alpha = 5$). TM = pflanzliche Trockenmasse, BM Prodrate = pflanzliche Biomasse-Produktionsrate, NO3Start = Nitrat-Startwert, NH4Start = Ammonium-Startwert, NminStart = $N_{\min}$ (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, NO3End = Nitrat-Endwert, NH4End = Ammonium-Endwert, NminEnd = $N_{\min}$ (Nitrat-N + Ammonium-N) Endwert, NMenge = finale pflanzliche N-Aufnahme, NAufnRate = pflanzliche N-Aufnahmerate, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, soilNt = Boden- N_t -Gehalt, CorgNt = C_{org}/N_t -Verhältnis, NhwI = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, ChwI = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, CNhwI = C_{hwI}/N_{hwI} -Verhältnis, CmikCorg = C_{mik}/C_{org} -Verhältnis Cmik = mikrobieller C, Rh = heterotrophe Respiration (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse).

Einfluss des Düngesystems auf die N-Freisetzung aus OBS und Düngemitteln

Nitrat und Ammonium korrelierten negativ, wobei Ammonium positiv mit dem Gesamt- $N_{\min}$ und $N_{\min}$ der ungedüngten Kontrollen ($N_{\min\_control}$) korrelierte. Diese korrelierten positiv mit C_{org} , N_t , N_{hwI} und C_{hwI} sowie C_{mik} und R_h , P und K. Das $N_{\min}$, aber auch das Nitrat waren mit der Dünger-Netto-N-Mineralisation positiv korreliert, nicht aber der $N_{\min}$ der Kontrollen noch das

Ammonium (Abbildung 2.5-30). Der Netto- $N_{\min}$ korrelierte ausschließlich mit diesen beiden Parametern.

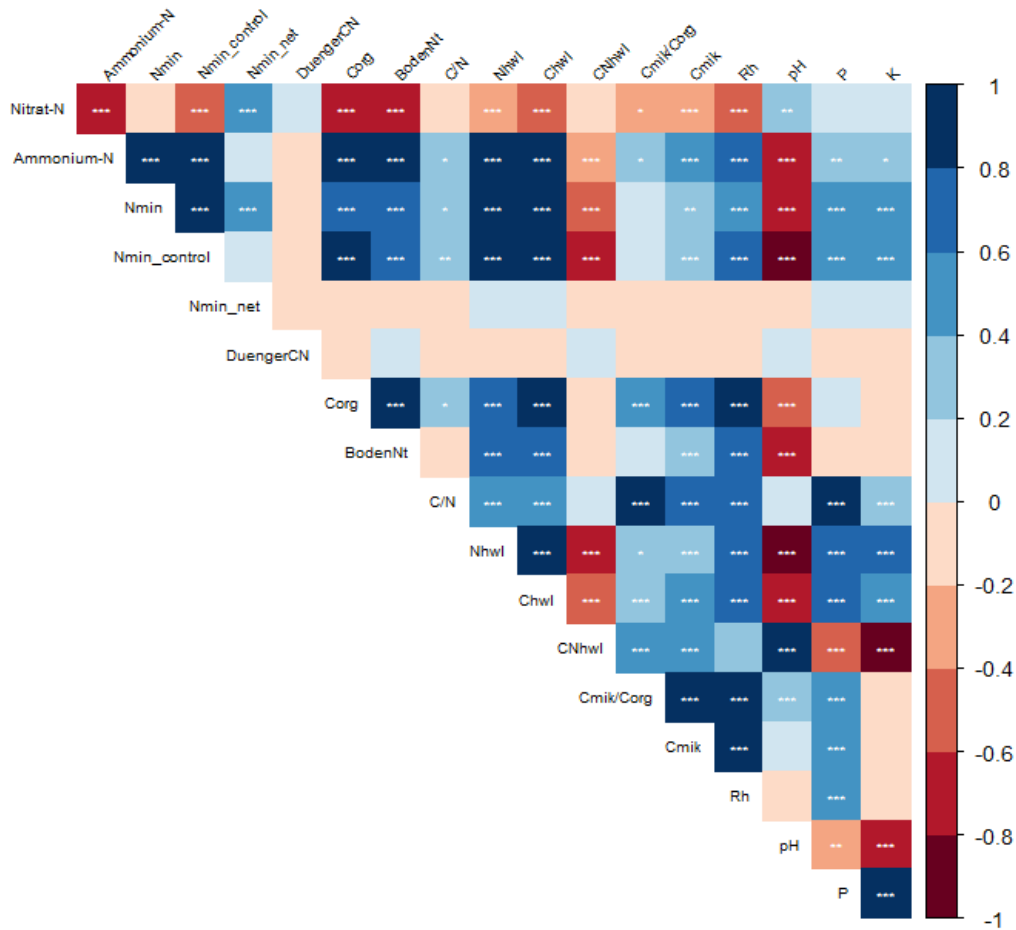


Abbildung 2.6-31: Korrelation zwischen Bodenparametern über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs (Inkubationsversuch 6) und Dünger am Ende der Inkubationszeit nach 57 Tagen. Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität - Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizient), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. Nitrat-N, Ammonium-N, Nmin = NO_3^- -N + NH_4^+ -N, Nmin_control = Nmin (NO_3^- -N + NH_4^+ -N) der Kontrollböden, Nmin_net = Dünger-Netto- $N_{\min}$, DuengerCN = Dünger-C/N-Verhältnis, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, BodenNt = Boden- N_t -Gehalt, C/N = Boden C_{org}/N_t -Verhältnis, NhwI = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, ChwI = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, CNhwI = C_{hwI}/N_{hwI} -Verhältnis, Cmik/Corg = Verhältnis, Cmik = Boden-mikrobieller C-Gehalt, Rh = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse).

Die von den Pflanzen aufgenommene N-Menge und Netto-N-Aufnahme korrelierten positiv mit Start- $N_{\min}$ und Start-Nitrat sowie negativ mit Start-Ammonium, Boden C/N (hwI + elementar), R_h , C_{mik}/C_{org} und dem Dünger-C/N. Die N-Aufnahme korrelierte des Weiteren positiv mit K und negativ mit dem pH, die Netto-N-Aufnahme negativ mit dem C_{org} und C_{hwI} und P.

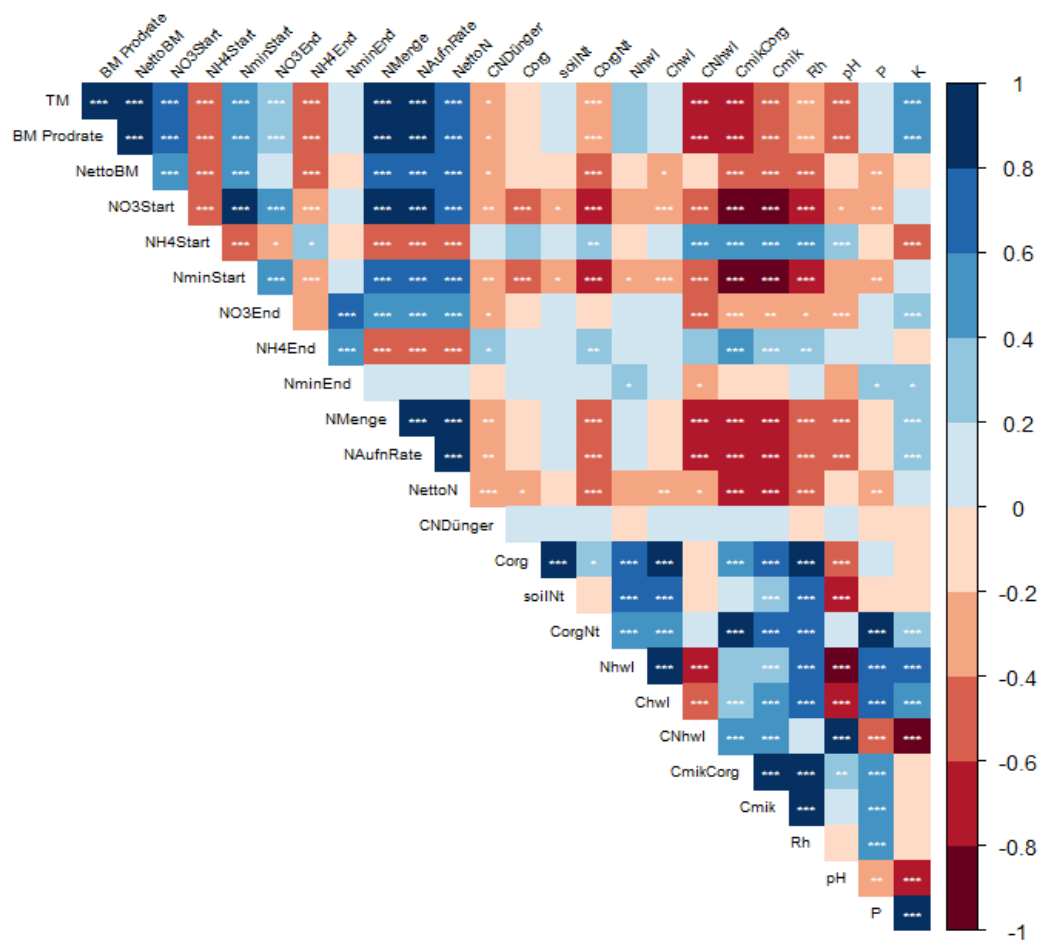


Abbildung 2.6-32: Korrelation zwischen Boden- und Pflanzenparametern über alle Düngesysteme des TUM Systemversuchs (Pflanzenversuchs 4) und Dünger am Ende der Inkubationszeit nach 37 Tagen. Blau - positive Korrelation, rot - negative Korrelation, Farbintensität - Grad der Korrelation (Korrelationskoeffizient), Sterne kennzeichnen das Signifikanzlevel der Korrelation mit *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, mit 95 % Konfidenzintervall nach Pearson & Spearman. TM = pflanzliche Trockenmasse, BM Prodrate = pflanzliche Biomasse-Produktionsrate, NettoBM = Pflanzliche Netto-Biomasse durch Düngung, NO3Start = Nitrat-Startwert, NH4Start = Ammonium-Startwert, NminStart = $N_{\min}$ (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, NO3End = Nitrat-Endwert, NH4End = Ammonium-Endwert, NminEnd = $N_{\min}$ (Nitrat-N + Ammonium-N) Endwert, NMenge = finale pflanzliche N-Aufnahme, NAufnRate = pflanzliche N-Aufnahmerate, NettoN = Pflanzliche Netto-N-Aufnahme durch Dünger, CNDünger = Dünger-C/N-Verhältnis, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, soilNt = Boden-Nt-Gehalt, CorgNt = C_{org}/N_t -Verhältnis, NhwI = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, ChwI = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, CNhwI = $C_{\text{hwI}}/N_{\text{hwI}}$ -Verhältnis, CmikCorg = $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis, Cmik = mikrobieller C, Rh = heterotrophe Respiration (mikrobielle Aktivität), pH = Boden-pH-Wert, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse).

Einfluss des Betriebssystems (Fruchtfolge) auf die N-Freisetzung aus OBS und Düngemitteln

Im Inkubationsversuch (7) der Düngesystemböden (Abbildung 2.5-32) korrelierte der N_{min} (mit Düngung) positiv mit dem Start- N_{min} , dem Nitrat-N, dem N_{min} der ungedüngten Kontrollen sowie auch der mikrobiellen Aktivität und schwach mit dem Netto- N_{min} . N_{min} korrelierte des Weiteren mit allen anderen Parametern positiv bis auf mit dem Boden-C/ N_{hwl} (negativ) sowie dem Dünger-C/N und Ammonium-N (keine Korr.). Das Netto- N_{min} korrelierte schwach positiv mit dem N_{min} und Nitrat-N und ansonsten schwach negativ mit Dünger-C/N, Leguminosenanteil, C_{org}/N_t , C_{hwl} , N_{hwl} und pH.

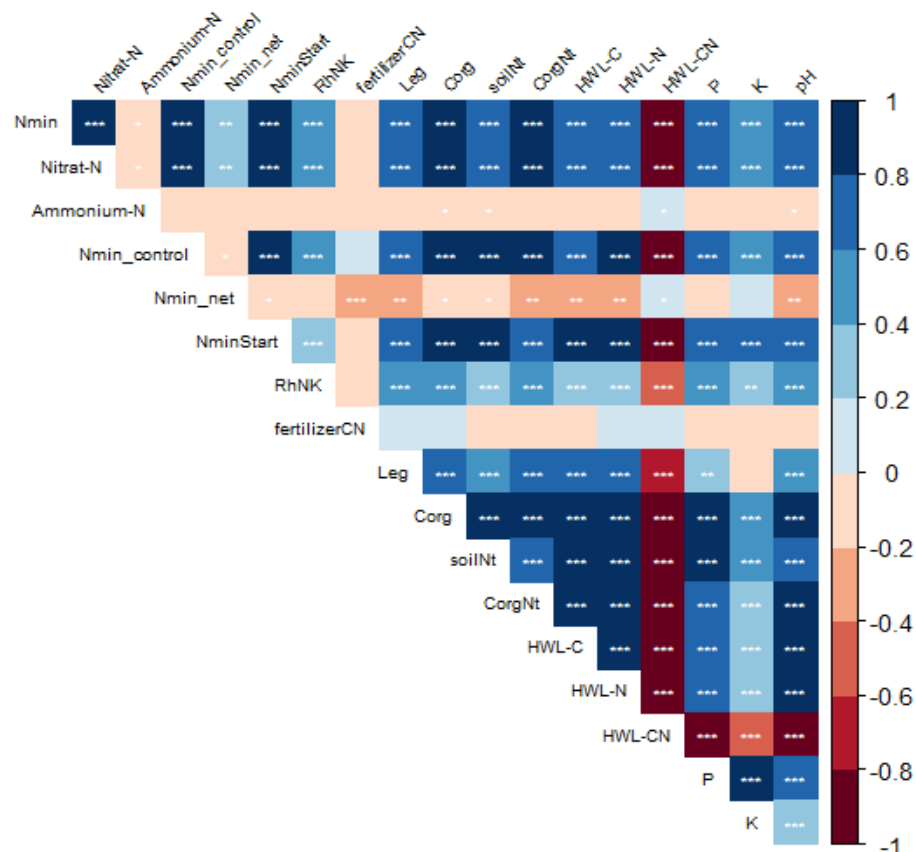


Abbildung 2.6-33: Korrelation zwischen Bodenparametern über alle Betriebssysteme (Fruchtfolgen) und Dünger am Ende des Inkubationsversuchs 7 mit den TUM-Biomasseversuchsböden nach 65 Tagen. Blau: positive Korr., rot: negative Korr., Farbintensität Ausdruck für den Korrelationskoeffizienten, *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, Signifikanzniveau nach Pearson und Spearman ($\alpha = 5$). N_{min} = $NO_3-N + NH_4-N$, Nitrat-N, Ammonium-N, $N_{min\_control}$ = N_{min} ($NO_3-N + NH_4-N$) der Kontrollböden, N_{min_net} = Dünger-Netto- N_{min} , $N_{minStart}$ = N_{min} (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, RhNK = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität) der Kontrolle (Tag 8-15), fertilizerCN = Dünger-C/N-Verhältnis, Leg = Leguminosenanteil, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, soilNt = Boden-Nt-Gehalt, CorgNt = Boden Corg/Nt-Verhältnis, HWL-C = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, HWL-N = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, HWL-CN = C_{hwl}/N_{hwl} -Verhältnis, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse), pH = Boden-pH-Wert.

Die Pflanzen-N-Aufnahme (Abbildung 2.5-34) korrelierte positiv mit dem Start- N_{min} und $-NO_3^-$. Diese Parameter korrelierten wiederum positiv mit dem pH, C_{org} , N_t und C_{rog}/N_t -Verhältnis der Böden als auch dem LA, welche Parameter ebenfalls positiv miteinander korrelierten. Die

pflanzliche Netto-N-Aufnahme korrelierte schwach positiv mit der pflanzlichen N-Aufnahme und schwach negativ mit dem Dünger-C/N. Die Netto-N-Aufnahme korrelierte schwach mit der gesamt N-Aufnahme und schwach negativ mit dem Dünger-C/N und der mikrobiellen Aktivität der ungedüngten Kontrollböden (Grundaktivität des Betriebssystems).

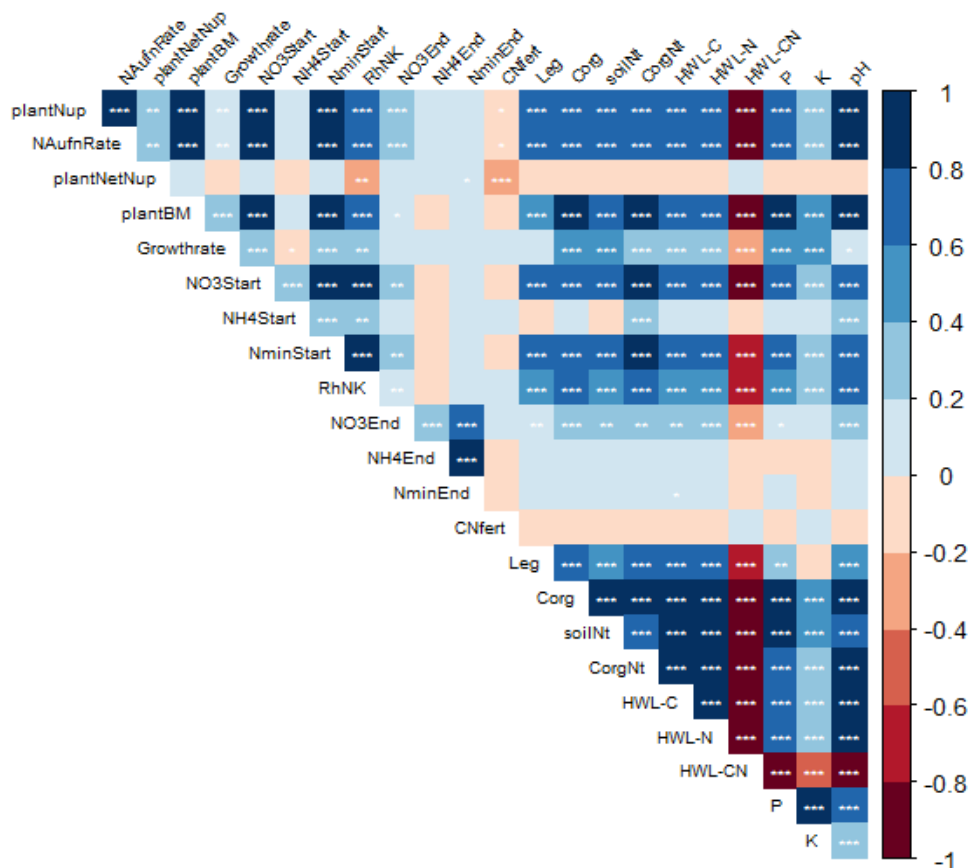


Abbildung 2.6-34: Korrelationen zwischen den Boden- und Pflanzenparametern über alle Betriebssysteme (Fruchtfolgen) und Dünger am Ende des Pflanzenversuchs 6 mit den TUM-Biomasseversuchsböden (Tag 37). Blau: positive Korr., rot: negative Korr., Farbintensität Ausdruck für den Korrelationskoeffizienten, *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, Signifikanzniveau nach Pearson und Spearman ($\alpha = 5$). plantNup = finale pflanzliche N-Aufnahme, NAufnRate = pflanzliche N-Aufnahmerate, plantNetNup = Pflanzliche Netto-N-Aufnahme durch Dünger, plantBM = pflanzliche Trockenmasse, Growthrate = pflanzliche Biomasse-Produktionsrate, NO3Start = Nitrat-Startwert, NH4Start = Ammonium-Startwert, NminStart = Nmin (Nitrat-N + Ammonium-N) Startwert, RhNK = heterotrophe Bodenatmung (mikrobielle Aktivität) der Kontrolle (Tag 8-15), NO3End = Nitrat-Endwert, NH4End = Ammonium-Endwert, NminEnd = Nmin (Nitrat-N + Ammonium-N) Endwert, CNfert = Dünger-C/N-Verhältnis, Leg = Leguminosenanteil, Corg = Boden-organischer-C-Gehalt, soilNt = Boden-Nt-Gehalt, CorgNt = Corg/Nt-Verhältnis, Chwl = heißwasserlöslicher Boden-C-Gehalt, Nhwl = heißwasserlöslicher Boden-N-Gehalt, CNhwl = Chwl/Nhwl-Verhältnis, P = Boden-P-Gehalt (Elementar-Analyse), K = Boden-K-Gehalt (Elementar-Analyse), pH = Boden-pH-Wert.

2.6.4 Diskussion

Um die Stickstoff-Verfügbarkeit für Pflanzen, aber auch das allgemeine Potential eines Bodens zur Stickstoff-Freisetzung hinsichtlich Düngeneffizienz und nachhaltigem Nährstoffmanagement besser zu verstehen und für die Modellierung greifbar (Parametrisierung) zu machen, wurden kontrollierte Model-Versuche durchgeführt. Diese helfen dabei einzelne Einfluss-Faktoren gezielt auszuschalten bzw. zu untersuchen, können jedoch die natürlichen Bedingungen eines Agrarökosystems nur entsprechend begrenzt darstellen. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse dienen somit der Validierung und Optimierung von Modell-Algorithmen (N-Expert, NDICEA, WEB-MAN), die einer Düngeberechnung zu Grunde liegen. Hierbei ist stets zu beachten, dass die aus Modell-Versuchen gewonnenen Daten und Ergebnisse nicht für die direkte Übertragung in die Praxis erzeugt werden, sondern Zusammenhänge und Tendenzen darstellen, die unter reale Bedingungen im Feld aufgrund von variablen Betriebs- und Standortbedingungen sowie Umwelteinflüssen überschattet werden oder andersartig ausprägt sein könnten. Die Standort- und Betriebsbedingungen beeinflussen den Boden langfristig, sodass sich dieser von anderen Böden unterscheiden lässt, die abweichende Einflüsse erfahren haben. So bilden sich an verschiedene Standorte unterschiedliche Produktionsbedingungen (WK_{max} , KAK, C_{org} , N_t , R_h , etc.), die mit Nährstoff-Speicherung und -Freisetzung interagieren.

Um den Einfluss verschiedener Faktoren des Bodens und des agronomischen Managements auf die Stickstoff-Mineralisierung aus der organischen Bodensubstanz und organischen Düngern zu untersuchen, eignen sich die in dieser Studie verwendeten Böden der TUM Dauerversuche sowie die Böden von verschiedenen Acker- und Gartenbaubetrieben. Diese spiegeln die langfristigen Einflussfaktoren des agronomischen Managements auf den Boden wieder, wie bspw. Fruchtfolge, Leguminosenanteil und Düngung (Art der Nährstoffrückführung) und gewährleisten so relative Vergleichbarkeit und machen eine Interpretation der einzelnen Faktoren möglich, obgleich der modellhaften Versuchsbedingungen (Dauer, konstanter Wassergehalt und Temperatur, homogenisierte, wiederbefeuchtete Böden, etc.).

2.6.4.1 Einfluss des Tongehalts auf die N-Mineralisation

Um den Einfluss des Tongehalts unter möglichst realistischen Bedingungen mit einem natürlich gewachsenen Boden (nicht durch künstliches Zufügen von Ton) untersuchen zu können, mussten Bodenserien gefunden werden, bei denen ein Tongehaltsgradient innerhalb einer gleichbewirtschafteten Fläche vorlag. Unter der Prämisse, dass ein höherer Tongehalt mit einem höheren C_{org} -Gehalt einhergeht, wurde Flächen ausgeschlossen bei denen dies nicht gegeben war, bspw. da aufgrund der Hangneigung Erosionsprozesse stattfanden, die für einen Tongehaltsgradienten verantwortlich sind, jedoch ebenso die anderen Bodeneigenschaften beeinflussen, sodass die Unterschiede zwischen oberem Hang und

unterem Hang neben dem Tongehalt so groß sind und nicht kausal auf diesen zurückgeführt werden können. Aufgrund dessen, konnten nur eine begrenzte Anzahl an Flächen gefunden werden.

Da der Tongehalt mit diversen Bodeneigenschaften und –Parametern assoziiert ist, die ebenfalls das Mineralisationspotential beeinflussen (z.B.: C_{org} und C_{mik}), haben wir in den Hypothesen einen Zusammenhang zwischen Tongehalt und der N-Mineralisation des Bodenstickstoffs aus der OBS angenommen.

Der Tongehalt hatte über die verschiedenen Standorte und Betriebe betrachtet, Einfluss auf Höhe und Verlauf der N-Freisetzung, war aber uneinheitlich in Ausmaß und teilweise auch in der Ausrichtung. Die standortübergreifende Betrachtung der N-Mineralisation der OBS über alle vier Bodenherkünfte (VH, HK, ED, ZF) konnte deshalb keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit des Tongehalts ausweisen. Die mikrobielle Aktivität war ebenfalls vom Tongehalt beeinflusst. Da die Mikroorganismen hauptverantwortlich für die N-Mineralisation, die N-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 (z.B. Bodentyp, organischen Bodensubstanz, Tiefe bearbeiteter Horizont 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, 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 umgekehrt bedeutet, dass mit steigendem Tongehalt die relative Mineralisation Boden-Stickstoff zunimmt. 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 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 können 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 2.5-5, können die beobachteten N-Mineralisationen nicht eindeutig erklärt werden, siehe 2.5.3.5. 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.

Hypothese 1: Als generelle Aussage über alle Böden, dass mit zunehmendem Tongehalt die relative Mineralisation des Boden-N sinkt, kann die Hypothese nicht bestätigt werden, am einzelnen Standort kann sie zutreffen. Die langfristige Bewirtschaftung kann mehr Auswirkung haben als der alleinige Einfluss des Tonanteils, dessen Interaktion mit Standorteigenschaften variieren kann.

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

In der Interaktion mit den Düngemitteln hatte sowohl die Bodenart als auch die Art des Düngemittels bzw. dessen C/N-Verhältnis einen Einfluss auf die Netto-Mineralisation (Abbildung 2.5-11, Abbildung 2.5-12 und Abbildung 2.5-14). Eine statistische Interaktion konnte jedoch im Pflanzenversuch bestätigt werden. In Abhängigkeit von der Bodenart wurden die Dünger unterschiedlich weit umgesetzt. Die höchste Umsetzung beim Inkubationsversuch 2 (Tabelle 2.5-7) wurde im Lehm Boden vom Tonboden und Sandboden beobachtet. Im

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 Bindungsoberfläche (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 Vergleich 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.

Hypothese 2: Die Ergebnisse zeigen, dass die Netto-N-Mineralisation des organischen Düngemittels nicht unabhängig vom Tongehalt ist, selbst, wenn keine eindeutige Aussage über die Wechselwirkung von Tongehalt und Düngemittel C/N-Verhältnis getroffen werden kann. Damit kann die Hypothese 2 als widerlegt gelten.

Bei Betrachtung der Düngemittel führten diejenigen zu N-Immobilisierung mit $\text{C/N} > 10$ (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, Abbildung 2.5-9, unterschied sich bspw. die Wuchshöhenentwicklung nach Klee gras-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 2.5-8), 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 2.5-8) 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 Düngeeffekt hatte als im Tonboden. Auch im Inkubationsversuch 5 (Tabelle 2.5-7) 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).

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 sich ähnlich verhielten. Die Wuchshöhenentwicklung zeigte, dass die Düngerapplikation zu keinem geförderten Wachstum führte, sondern (im Vergleich zur Kontrolle) sogar zu Wachstumsverzögerung 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 2.5-8) zeigte sich dies durch mehr und weniger starke Wachstumsbeeinträchtigung. Dieser spiegelt auch der Pflanzenversuch 3 wieder (Abbildung 2.5-14). Der Pflanzenversuch 3 (Tabelle 2.5-8) verdeutlicht in diesem Sinne durch die Betrachtung aller Standorte die unterschiedlichen Zusammenhänge von Bodenart und Düngenumsetzung. 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 Inkubationsversuch 5 (Tabelle 2.5-7) war ebenfalls geringer im Vergleich zum Lehm- und Tonboden.

Hypothese 3: Die Hauptaussage, dass die Netto-N-Mineralisation sinkt mit weiterem C/N-Verhältnis der Düngemittel gilt übergreifend, auch wenn es im Einzelfall nicht immer so klar differenziert. Der Rückgang der Mineralisation mit dem weiteren C/N-Verhältnis scheint beim Lehm am geringsten, beim Sand am stärksten. Der Übergang von Mineralisierung zu Festlegung für den Bereich zwischen C/N 12 und 17 festgelegt werden auf der Erfahrung der Versuche.

2.6.4.3 Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte auf die Boden N-Mineralisation

Die Boden N-Mineralisation und pflanzliche N-Aufnahme war durch die Bewirtschaftungsvorgeschichte beeinflusst. Dies sowohl durch die langfristige Art der Nährstoffrückführung (Gründüngung, BG, Gülle, Stallmist) als auch durch die Fruchtfolge. Hierbei konnte auf den viehlosen Betriebssystemen des TUM-Systemversuchs, voran beim BG-System, die größte N-Mineralisation, C_{org} -Gehalt und mikrobielle Biomasse und -Aktivität festgestellt werden.

Der Boden C_{org} sowie die Zusammensetzung und „Produktivität“ (Mineralisationsaktivität in Menge und Zeit in Abhängigkeit des Substrats) der mikrobiellen Gemeinschaft sind durch das Betriebssystem und die damit deren jeweilig einhergehende Düngung beeinflusst (s. C und N in Tabelle 2.5-5), da diese das Boden Mikrobiom aufgebaut, welches für die Mineralisation verantwortlich ist.

Die Böden setzten in der kurzen Versuchslaufzeit der Inkubationen (8 Wochen) beachtliche Mengen N aus der OBS frei, im Mittel 382 kg N/ ha (Böden des Systemversuchs). Hierbei ist zu beachten, dass es sich um trockene, wiederbefeuchtete Böden in einem kontrollierten, geschlossenen Versuchssystem handelt, aus dem weder Gas noch Wasser entweichen kann. Unter natürlichen Bedingungen wäre eine derartige Mineralisationsleistung auch nur unter

besonderen Bedingungen erreichbar, zeigt allerdings das Potential des Bodens in Kombination mit seiner langfristigen Bewirtschaftungsweise N zu mineralisieren.

Im Pflanzenversuch waren diese Unterschiede nicht so deutlich zu sehen. Nur das Stallmist-System (MSS) unterschied sich durch eine deutlich geringere N-Aufnahme der Pflanzen. Das BGS und das MSS hatten denselben niedrigen $N_{\min}$ -Startwert zur Aussaat (18 kg N ha^{-1}), jedoch konnte das BGS im Vergleich genug N für die Pflanzen zu Verfügung stellen. Dies könnte durch eine höhere N-Mineralisierungsrate erklärt werden, wie im Inkubationsversuch gezeigt werden konnte (33 %). Das Gülle-System (MGS) hatte in der Inkubation zwar eine geringere N-Nachlieferung aus der OBS im Vergleich zu den beiden viehlosen Düngesystemen, dennoch konnten die Pflanzen gleich viel N aufnehmen. Es scheint also weitere Faktoren im Boden zu geben, die auf das Betriebssystem zurückzuführen sind und mit den Pflanzen interagieren bzw. deren N-Verfügbarkeit und -Aufnahme beeinflussen.

Die N-Mineralisation kann auch durch Unterschiede im Betriebssystem durch die Fruchtfolge beeinflusst sein. Obwohl die Varianten des Systemversuchs, außer der Art der Düngung, soweit wie möglich gleich bewirtschaftet wurden, haben die Gülle- und Stallmist-Systeme durch Silomais anstatt Triticale als Fruchtfolgefeld eine Frucht mit hohem N-Bedarf, durch die gleichzeitig potentiell weniger Wurzeleistung für den Aufbau der OBS bereitsteht. Diese beiden Systeme unterschieden sich nicht signifikant in der N-Mineralisation, jedoch lag die Mineralisation des Biogas-Systems tendenziell über der des Marktfrucht-Systems. Bei der Inkubation der Böden des TUM-Biomasseversuchs korrelierte der $N_{\min}$ positiv mit dem LA, mit und ohne BG. Je höher der LA desto größer war auch der Unterschied des Start $N_{\min}$ zwischen mit und ohne BG, mit Ausnahme von MF. Die Mineralisationsleistung je Betriebssystem war allerdings nicht entsprechend. Auf den BG gedüngten Böden konnte MF (35 % LA) 44 % mehr N mineralisieren, LKG1 (50 % LA) 28 %, STD (25 % LA) 19 % und LKG2 (75 % LA) hatte eine 8 % geringere N-Mineralisation. Dies kann auf zu viel Grasanteil im Klee-gras-Fruchtfolgeglied aus dem Vorjahr zurückgeführt werden. Das Betriebssystem MF mit der geringsten Mineralisationsleistung ohne BG, reagierte am stärksten auf BG und konnte die Mineralisationsleistung relativ am meisten steigern. Im Vergleich aller Betriebssysteme (mit und ohne BG) mineralisierte MF+BG damit insgesamt jedoch lediglich mehr als STD-BG. Die mit BG gedüngten Böden hatten im Mittel einen 45 % (28 kg N ha^{-1}) höheren Start $N_{\min}$ -Wert und mit $3,3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ eine 16 % höhere Mineralisationsleistung. In 65 Tagen setzten die BG gedüngten Böden im Mittel 30 kg mehr um als die Böden ohne BG. Die Betriebssysteme mit $LA > 50 \%$ konnten signifikant mehr N mineralisieren. Die pflanzliche N-Aufnahme konnte die Beobachtungen der Mineralisation im Inkubationsversuch bestätigen und zeigte vergleichbare Verhältnismäßigkeiten. Nur das MF+BG hatte trotz höherer Mineralisationsleistung im Inkubationsversuch eine geringere pflanzliche N-Aufnahme. Das LKG2, das mit BG eine reduzierte Boden N-Mineralisation hatte, zeigte entsprechend ein reduzierte pflanzliche N-Aufnahme (-20 %). Der Effekt von BG unterschied sich von den Vergleichssystemen ohne Rückführung von Ernteresten. Bei den Systemen mit weniger als

50 % LA konnten durch BG verhältnismäßig weniger N aufgenommen werden. Bei STD hatte BG, trotz 19 % mehr $N_{\min}$ im Inkubationsversuch, keinen Effekt auf die pflanzlich N-Aufnahme. Bei MF konnte zwar durch BG 30 % mehr N aufgenommen werden (bei 50 % mehr $N_{\min}$ im Inkubationsversuch), bei LKG1 sogar 50 % (obwohl nur 28 % mehr N in der Inkubation mineralisiert wurden). Hier könnte es je System eine minimale kritische gesamt pflanzenverfügbare N-Menge geben, betrachtet man die Bedeutung des Start- $N_{\min}$ und die Betriebssystem-individuelle Mineralisierungsleistung. Der Effekt des LA war stärker bei den Fruchtfolgen mit > 50 % LA.

2.6.4.4 Einfluss der langfristigen Bewirtschaftungsvorgeschichte und Düngemittel-C/N-Verhältnis auf die Netto-N-Mineralisation

Die Netto-N-Mineralisation der Dünger im Inkubationsversuch zeigte ähnliche Verlaufskurven der Düngemittel je Betriebssystem jedoch mit z.T. großen Schwankungen zwischen den einzelnen Terminen, Betriebssystemen und Düngemitteln (Abbildung 2.5-19). Ein Teil der Schwankung könnte dadurch erklärt werden, dass die verschiedenen Düngemittel auf Grund ihrer Eigenschaften in Abhängigkeit des Bodenmikrobioms unterschiedlich schnell umgesetzt werden. Die Umsetzung und Aufnahme geschehen in Schüben/Wellen entlang eines allgemeinen Umsetzungstrends. Unsere vorherigen Versuche haben die Tendenz gezeigt, dass der Hauptumsatz in den ersten zwei Wochen geschieht, sich dann die Behandlungen ggf. zunehmend unterscheiden und ab ca. 4-5 Wochen (35 d) nicht wesentlich mehr mineralisiert wird. Diese initiale Hauptmineralisationsphase kann je nach Düngemittel zu anfänglicher N-Immobilisierung führen, abhängig von Betriebssystem und Düngemittel-C/N (Abbildung 2.5-19). Der Horndünger konnte im Inkubationsversuch 6; (Systemversuchsböden) bspw. bei MGS in den ersten 2 Wochen bis zu 96 % umgesetzt werden (die Netto-N-Mineralisation schwankte zwischen den Betriebssystemen zwischen 57-96 %), jedoch nahm $N_{\min}$ nach 35 Tagen wieder ab, sodass zu Ende der Inkubation nach 57 Tagen der „finale“ zusätzliche N-Umsatz bei 48 % bzw. 48 kg N ha⁻¹ lag (die Spanne zwischen den Systemen reichte von 28 bis 52 %). Um einen repräsentativen Vergleich der Systeme zu bekommen und eine allgemeingültigere Aussage über den System-Einfluss auf den Düngemittelumsatz zu bekommen, haben wir anstatt der Betrachtung von Einzelterminen den Mittelwert aller Termine gewählt, der den generellen Umsetzungstrend in einem Einzelwert widerspiegelt (Abbildung 2.5-20). Diese Ergebnisse bestätigten einen signifikanten Einfluss des Düngesystems, sowie eine Interaktion mit den Düngemitteln auf die Netto-N-Mineralisation. Auch hier wurde die allgemeine Tendenz deutlich, dass Düngemittel in Abhängigkeit ihres C/N-Verhältnisses bei engerem C/N zu größerem N-Umsatz bzw. N-Freisetzung führen. Einzelne Ausnahmen, wie AB bei MFS oder KP bei BGS, könnten mit individuellen Düngeigenschaften zu tun haben, die ebenfalls Einfluss auf die Umsetzbarkeit und Interaktion mit dem Boden haben. Andersherum könnte es für das Betriebssystem spezifische Bodenmikrobiom leichter oder schwerer sein, bestimmte Düngemittel umzusetzen aufgrund des langfristigen konstanten

Düngemanagements (TUM-Systemversuch), im Sinne einer mikrobiellen Anpassung an Nahrungsverfügbarkeit und -Gewohnheit. Bei BGS war die N-Freisetzung durch die Mineralisation der Dünger zwar etwas geringer als bei den anderen Systemen (Abbildung 2.5-20), allerdings war die N-Mineralisation (und mikrobielle Aktivität; hier nicht gezeigt) aus der OBS am höchsten (Abbildung 2.5-15). Das MFS hatte zwar eine ähnliche Mineralisation aus der OBS, jedoch einen höheren Düngerumsatz der einzelnen Düngemittel. Hier zeigt sich die Bedeutung des langfristigen Düngesystems auf den akuten Düngerumsatz. Es gab Wechselwirkungen zwischen Düngesystemen und Wirkung der organischen Dünger, wobei der Varianzanteil der Dünger höher war als die der Systeme. D.h. das Düngesystem hatte v.a. einen signifikanten Effekt, wenn man die einzelnen Düngemittel betrachtet. Die mittlere N-Mineralisation aus Düngern und OBS über alle Messtermine zeigt die Qualität des Düngesystems N zu mineralisieren, der damit potentiell den Pflanzen zur Verfügung steht. Im Inkubationsversuch unterschieden sich BGS mit 446 kg N ha^{-1} und MFS mit 435 kg N ha^{-1} nicht signifikant, jedoch von den beiden Milchvieh-Systemen ($F = 101$; $p < 0,001$). Das MGS mineralisierte 385 kg N ha^{-1} und MSS 318 kg N ha^{-1} . Der akute Düngeeffekt hatte somit geringere Bedeutung (anteilig) als das Langzeit-Düngesystem ($N_{\min}$ aus OBS), jedoch unterschieden sich die Düngemittel in ihrem Umsatz je Düngesystem. Das Düngesystem mit dem geringsten Düngeeffekt (BGS) hatte die größte N-Mineralisation aus der OBS und die größte gesamt $N_{\min}$ -Bereitstellung für die Pflanzen. Entsprechend hatten die Milchviehsysteme MSS und MGS einen größeren Düngeeffekt durch die Düngemittel, jedoch eine geringere N-Mineralisation aus der OBS und eine geringere gesamt N-Mineralisation. Es sollte beachtet werden, dass bei niedriger N-Mineralisation aus der OBS der zusätzliche N-Input durch die Dünger relativ betrachtet im Verhältnis zu mehr N-Freisetzung führt. Dies verdeutlicht nochmals den Einfluss des langfristigen Bewirtschaftungssystems und dessen N-Nachlieferung aus der OBS. Ausnahme war hier das MFS, das die höchste Düngewirkung hatte und gleiche N-Mineralisation aus der OBS wie das BGS, sich jedoch im gemittelten gesamt $N_{\min}$ Umsatz nicht unterschied. Dies widerspiegelt auf der anderen Seite ebenso die untergeordnete Rolle der Zusatzdüngung durch die hier getesteten Düngemittel, insgesamt. Nur durch Horn konnten zusätzliche 53 % und durch Haar 36 % mehr N mineralisiert werden. KP, KG 10, AB und KG 15 mineralisierten 20 %, 17 %, 12 % und 3 %, respektive.

Im Pflanzenversuch (4) führte nur Haar (mit $C/N < 10$) zu einer größeren N-Aufnahme der Pflanzen (15 %), KG10 hatte keinen Effekt und KG15 (-4 %), KG20 (-18 %) und GS25 (-18 %) resultierten in negative Düngeeffekte (Abbildung 2.5-22). Gemittelt hatte die Düngung, entsprechend der Inkubation, ebenso wenig einen signifikanten Effekt auf die absolute N-Aufnahme (mg), Abbildung 2.5-21. Die Systeme unterschieden sich zwar, da sie sich bereits ohne Düngung unterschieden (Abbildung 2.5-16), allerdings schnitten hierbei die Systeme in der pflanzlichen N-Aufnahme aufgrund der Interaktion mit der Düngung anders ab als im Inkubationsversuch. Trotz der in der Inkubation festgestellten größeren pflanzenverfügbaren $N_{\min}$ -Menge bei BGS und MFS (Abbildung 2.5-15) hatten die Pflanzen durch die Düngung eine

geringere N-Aufnahmen (Abbildung 2.5-21). Es unterschied sich nur das MGS, bei dem ein positiver Düngeeffekt auftrat. Entsprechend konnten die Pflanzen bei MGS am meisten N aufnehmen, BGS und MFS unterschieden sich nicht und MSS hatte die geringste N-Aufnahme. Die N-Aufnahme und Netto-N-Aufnahme korrelierte dabei im Allgemeinen schwach negativ mit dem Dünger-C/N (Abbildung 2.5-32). Im Inkubationsversuch hingegen korrelierte weder die N-Mineralisation (aus OBS und inklusive Düngung) noch die Netto-N-Mineralisation mit dem Dünger-C/N (Abbildung 2.5-31).

Beim Vergleich der Betriebssysteme des TUM-Biomasseversuchs, die sich maßgeblich durch den LA in der Fruchtfolge unterscheiden, korrelierte der LA im Inkubationsversuch (7) positiv mit der N-Mineralisation, sowie schwach negativ mit der Netto-N-Mineralisation der Dünger (Abbildung 2.5-33). Dies hebt die Bedeutung des LA für die N-Nachlieferung der Betriebssysteme (aus der OBS) hervor. Das Dünger-C/N korrelierte lediglich schwach negativ mit der Dünger-Netto-N-Mineralisation, allerdings war das C/N-Verhältnis signifikant für die Düngenumsetzung und zeigte gemittelt über alle Betriebssysteme, mit und ohne BG, den klaren Trend der Abnahme der Netto-N-Mineralisation bei weiterem Dünger-C/N. Horn mit C/N 3 konnte zu 75 % mineralisiert werden, Haar mit C/N 4 zu 55 %, AB mit C/N 10 zu 34 %, KG10 mit C/N 11 zu 28 %, KP mit C/N 13 zu 5 % und KG15 mit C/N 15 zu 4 %. Im Pflanzenversuch 6 (Abbildung 2.5-34) korrelierte der LA ebenso positiv mit der pflanzlichen N-Aufnahme, jedoch nicht mit der Netto-N-Aufnahme durch die Düngung. Das Dünger-C/N korrelierte entsprechend der Inkubation lediglich schwach negativ mit der Netto-N-Aufnahme der Pflanzen. Die Düngung insgesamt hatte keinen signifikanten Effekt und auch keine Interaktionen. Dies hebt die Bedeutung des langfristigen Betriebssystems hervor, das hier die größte Bedeutung für die N-Verfügbarkeit und somit die pflanzliche N-Aufnahme hatte. Obwohl die Düngung für die akute N-Mineralisation und Pflanzenverfügbarkeit nur eine untergeordnete Rolle spielte, konnten in Abhängigkeit des Betriebssystems unterschiedlich starke Düngeeffekte festgestellt werden. Tendenziell hatten die Betriebssysteme, die eine geringere N-Mineralisation der OBS hatten, einen relativ größeren (positiven) Einfluss durch die Düngung und umgekehrt. Die langfristige Nährstoffrückführung durch BG gegenüber ungedüngten (-BG) beeinflussten die N-Verfügbarkeit und führte im Mittel insgesamt zu 1/3 mehr Düngerumsatz. Hierbei unterschied sich der Wirkungsgrad mit den Betriebssystemen, gemessen in der pflanzlichen N-Aufnahme (Abbildung 2.5-25). Im Vergleich zu den Betriebssystemen ohne BG hatte BG nur einen positiven Einfluss auf den Düngeeffekt Effekt bei LKG2, da dieser auf den Böden ohne BG negativ war (geringeren N-Aufnahme). Dennoch war die gesamte N-Aufnahme bei LKG2-BG höher als bei LKG2+BG mit und ohne Düngung. Bei den anderen Betriebssystemen führte BG zu geringerem Düngerumsatz bzw. geringerer zusätzlicher pflanzlicher N-Aufnahme der Pflanzen durch die Düngung (Vergleich des relativen Düngerumsatzes je Betriebssystem). Bei MF und LKG1 führte BG zu erhöhter N-Mineralisation (OBS) und entsprechend geringerem Netto-N-Düngereffekt. Am deutlichsten war dies bei MF mit dem größten Düngereffekt ohne BG, 23 % (und der geringsten N-Mineralisation aus der OBS, Abbildung 2.5-17) und mit BG nur

eine 3 % größere N-Aufnahme durch die Düngung (trotz doppelter mittlerer Dünger-N-Mineralisation im Inkubationsversuch). Allerdings war die N-Aufnahme der Kontrollen (N-Bereitstellung aus der Mineralisation der OBS) höher mit BG und unterschied sich nicht von der gedüngten Variante ohne BG. Die langfristige Nährstoffrückführung durch BG förderte somit die System-N-Nachlieferung und glich die zusätzliche Netto-N-Mineralisation und -Verfügbarkeit durch die Düngung aus. Mit und ohne BG führten nur die Dünger mit $C/N \leq 10$ zu einer Netto-N-Mineralisation zwischen 20 % und 80 % entsprechend des Dünger-C/N, wobei auf den Böden mit BG je Düngemittel 10 % mehr N mineralisiert werden konnte.

Hypothese 4: Wie in der Hypothese postuliert, waren Effekte der langfristigen Bewirtschaftungsmaßnahmen auf N-Mineralisation meist stärker als die Wirkungen der kurzfristigen Ergänzungsdünger, bzw. sie beeinflussten die N-Freisetzung aus den Düngern.

Die gemessene Mineralisationsleistung im Vergleich der Betriebs- und Dünagesysteme stellt eine Grundaktivität und Mineralisations-Leistungspotential dar, was für eine in Dünge-Modellen besser angepasste Düngung mitberücksichtigt werden sollte. Beispielsweise, könnten zur besseren Prognostizierung des N-Umsatzes die Schwankung der Dünge Wirkung einbezogen werden und mit Systemfaktoren kombiniert werden. Nach „langfristiger“ (mind. 5 Jahre) Biogasgärrest Düngung könnte eine Nachlieferungssteigerung aus der OBS dazugerechnet (+15 %) sowie ein gesteigerter Düngeumsatz (+10 %) bei gleichzeitiger Reduzierung der Streuung der Dünge Wirkung (-10 %) angepasst werden. Entsprechend könnte bei einem „langfristigen“ Leguminosenanteil in der FF von > 50 % ebenfalls die N-Nachlieferung aus der OBS gesteigert werden. Bei LA > 75 % ist eine BG-Nutzung und Zusatzdüngung nicht nötig.

2.6.4.5 Bodenuntersuchungen zur Charakterisierung des N-Freisetzungspotentials

Eine genauere Erfassung des N-Versorgungsstatus des Bodens zur Berechnung des Düngebedarfs könnte zu einer bedarfsgerechteren Düngung verhelfen, Überdüngung vorbeugen, um so langfristig die N-Versorgung zu stabilisieren. Für die Düngeberechnung in der Modellierung spielen neben der Erfassung der N-Quellen wie N-Gehalt im Boden, N-Input durch die Dünger und dem aktuellen N_{min} -Status des Bodens, etc. auch andere Faktoren/Parameter (Tongehalt, C_{org} , LA, pH, etc.) eine Rolle, die mit der N-Dynamik interagieren können. Die mit verschiedenen Analysemethoden untersuchten Boden- und Pflanzenparameter der Inkubations- und Pflanzenversuche wurde durch Korrelationsanalysen mit der N-Mineralisation, der pflanzlichen N-Aufnahme und gegeneinander in Verbindung gebracht.

Die Korrelationszusammenhänge können dabei helfen die Gewichtung einzelner Parameter bzw. Untersuchungsmethoden besser deuten und einordnen zu können für die Schätzung und Prognostizierung der N-Mineralisation hinsichtlich der Modellierung. Die Korrelationen der Untersuchungsparameter mit der N-Mineralisation und Pflanzen-N-Aufnahme weisen auf

deren Zusammenhang und möglichen Bedeutung im Mineralisationsprozess hin. Wenn die Korrelationen der Boden- und Pflanzenparameter mit der wissenschaftlichen Fragestellung (Tongehalt, Düngesystem, Fruchtfolge/LA) aufgrund der unterschiedlichen Böden/Bewirtschaftungssysteme in Richtung und Stärke variieren, können diese Unterschiede auf Unterschiede im Bewirtschaftungssystem zurückzuführen sein sowie Gemeinsamkeiten auf Bewirtschaftungssystem unabhängige, die für allgemeingültigere Zusammenhänge in der N-Mineralisation für die Modellierung in Betracht gezogen werden sollten.

Die Unterschiede der Korrelationen im Inkubationsversuch mit und ohne Düngung sowie im Pflanzenversuch mit und ohne Düngung widerspiegeln den Einfluss der Faktoren Düngung und/ oder Pflanze auf das System Boden und dessen N-Mineralisationsprozess. Gemeinsame Korrelationen verhelfen die in den Versuchsergebnissen dargestellten Beobachtungen zu untermauern, müssen jedoch in den Kontext der Versuchsergebnisse gestellt werden. Bspw. korrelierten bei den Systemversuchsböden (Einfluss des langfristigen Düngesystems) und Biomasseversuchsböden (Einfluss der langfristigen Fruchtfolge/LA) die N-Mineralisation (OBS) und Pflanzen-N-Aufnahme positiv mit der Netto-N-Mineralisation und Netto-N-Aufnahme, was bedeutet, dass je größer die N-Mineralisation des Bodens aus der OBS, desto größer ist die Düngemittel-N-Mineralisation. Das ist zwar korrekt, jedoch bekommt die Dünger-Netto-N-Mineralisation eine andere/untergeordnete Bedeutung im Kontext der Versuchsergebnisse, da diese zeigten, dass je größer die N-Mineralisation der OBS, desto kleiner die Netto-N-Mineralisation der Dünger anteilig an der gesamt N-Mineralisation.

Unsere Versuche deuten darauf hin, dass die $N_{\min}$ Untersuchung vor Beginn der Bewirtschaftung als Parameter als Hauptkriterium/ Berechnungsbasis der üblichen Düngeplanung (DüV) evtl. nicht ausreichend stabil und verlässlich ist, um eine adäquate N-Nachlieferung und Zusatzdüngemenge abzuschätzen, zumal bei den üblichen kommerziellen $N_{\min}$ -Untersuchungen meist nur das Nitrat berücksichtigt und/oder berichtet wird. Der Start- $N_{\min}$ zu Beginn der Versuche korrelierte unterschiedlich bei den unterschiedlichen Versuchsböden. Bei den Tongehaltsböden (Abbildung 2.5-28) lag keine Korrelation mit der pflanzlichen N-Aufnahme oder Netto-N-Aufnahme vor, Düngesystemböden (TUM Systemversuch; (Abbildung 2.5-30 und Abbildung 2.5-32) und Fruchtfolgeböden (TUM Biomasseversuch; Abbildung 2.5-33 und Abbildung 2.5-34) eine positive mit beiden Parametern. Bei den Kontrollen der Düngesystemböden zeigte sich in der Inkubation, dass Nitrat und Ammonium negativ korrelierten und Ammonium positiv mit dem Gesamt- $N_{\min}$ (Abbildung 2.5-29, Abbildung 2.5-30). Deren gemeinsame positive Korrelationen mit anderen Bodenparametern (C_{org} , N_t , N_{hwl} , C_{hwl} , C_{mik} und R_h) heben die Bedeutung des Ammoniums im Vergleich zum Nitrat in Bodenprozessen hervor. Das Nitrat war auf der anderen Seite mit der Dünger-Netto-N-Mineralisation, Abbildung 2.5-31 (sowie mit der pflanzlichen (Netto-) N-Aufnahme, Abbildung 2.5-32) positiv korreliert. Dies deutet darauf hin, dass durch die Düngermineralisation mehr Nitrat entsteht und durch die Mineralisation der OBS mehr

Ammonium freisetzt wird. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Ammoniumanteil im Verlauf der Vegetationszeit/Versuchszeit stark schwankt und im Vergleich zum Nitrat wesentlich geringer ist (1 - 30 % den Gesamt-N_{min}). Bei den Fruchtfolgeböden (TUM-Biomasseversuch) war das Nitrat-N stärker mit dem Start-N_{min} korreliert (Abbildung 2.5-33) und im Gegensatz zum Ammonium-N auch mit der pflanzlichen N-Aufnahme (Abbildung 2.5-34). Es ist daher zu empfehlen bei der N_{min}-Analyse beide Ionen für ein realistisches Gesamt-N_{min} in Betracht zu ziehen. Im Vergleich zu den Düngesystemböden korrelierte bei den Fruchtfolgeböden die pflanzliche Netto-N-Aufnahme lediglich schwach positiv mit der pflanzlichen Gesamt-N-Aufnahme und schwach negativ mit dem Dünger-C/N, hier ließ sich also kein direkter Zusammenhang mit einzelnen Parametern ableiten. Die Korrelationsanalyse der Bodenuntersuchungsparameter der Tongehaltsböden im Pflanzenversuch deutet des Weiteren auf das Potential der HWL und der EUF Analysen hin, anstatt des üblichen N_{min}-Werts als Ausgangsbasiswert für Düngeberechnungsmodelle den EUF-Nitrat-Wert oder den N_{HWL}-Gehalt zu verwenden, da diese im Gegensatz (positiv) mit der von den Pflanzen aufgenommenen Menge N korreliert waren (Abbildung 2.5-28). Bei den Fruchtfolgeböden war dies bei N_{HWL} ebenso der Fall (Abbildung 2.5-34), EUF wurde nicht mitbestimmt, aber auch der Start-N_{min} (und -NO₃⁻) war (stärker) positiv mit der N-Aufnahme korreliert. Bei den Düngesystemböden korrelierte der N_{hwil} nicht mit der pflanzlichen N-Aufnahme, jedoch der Start-N_{min} (und -NO₃⁻).

Im Allgemeinen konnten bei den Inkubationsversuchen verschiedene Parameter festgestellt werden, die häufiger und stärker (Korrelationskoeffizient) mit der N-Mineralisation (OBS) korrelierten: C_{org}, C_{hwil}, N_{hwil}, C_{hwil}/N_{hwil}, N_t und pH. Die Netto-N-Mineralisation korrelierte lediglich mit dem (Start-) N_{min}. Bei den Pflanzenversuchen korrelierten häufiger C_{hwil}, N_{hwil}, C_{hwil}/N_{hwil} und pH, aber auch (Start-) N_{min}. Die Netto-N-Aufnahme korrelierten außer mit dem pH, mit denselben Parametern, sowie mit C_{org}, N_t und C_{org}/N_t. Insgesamt fiel auf, dass die heißwasserlöslichen Extraktionen (mit einzelnen Ausnahmen, v.a., wenn Dünger appliziert wurden), aber besonders das C_{hwil}/N_{hwil} und der pH am häufigsten an Korrelationen mit der N- und Netto-N-Mineralisation sowie pflanzlichen N- und Netto-N-Aufnahme beteiligt waren.

Die Ergebnisse der verschiedenen Bodenanalysemethoden und -Parameter in Kombination mit den Korrelationsanalysen haben zwar keine Standort- und System-übergreifende, deutliche Aussage ergeben, aber die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass aufgrund der Komplexität der Böden, die durch die Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsvorgeschichte beeinflusst sind, diese individuell zu betrachten sind. Die Mineralisierungsleistung und Bedeutung einzelner Bodenparameter variierte deutlich mit dem Standort und seiner Nutzungsvorgeschichte. Daher ist für die Modellierung diese zur Prognostizierung der Mineralisation unbedingt miteinzubeziehen. Hierbei könnten bspw. zusätzliche Stufen (bzw. feinere Abstufung) der geschätzten N-Mineralisation berücksichtigt werden, in Abhängigkeit des Anteils und der Art an tierischen (bspw. Kompost, Gülle,

Hornspäne) und pflanzlichen (bspw. Klee gras-Mulch/ -Silage, Leguminosenschrot) Düngemitteln, deren C/N (bspw. < 5, < 10, < 15, > 20) oder des Leguminosen-Klee gras-Anteils in der Fruchtfolge (</> 50%). Je nach Vorwissen dieser Einflussgrößen könnte bspw. auch ein Faktor/ Koeffizient berechnet werden, der auf den gemessenen Start- $N_{\min}$ wirkt.

2.6.5 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-Freisetzungsverhalten von verschiedenen Böden und Düngemitteln zu identifizieren, diese Ergebnisse für die Parametrisierung und Modellvalidierung, den Programmen zur Berechnung der N-Düngung (N-Expert, NDICEA) zur Verfügung zu stellen (siehe 2.2). Fokus der Untersuchungen lag auf dem Einfluss der Bodenart, – speziell der Tongehalt –, Bewirtschaftung – Fruchtfolge und Düngung und des C/N-Verhältnisses der Düngemittel.

Methodik

Die N-Freisetzung wurde in Boden-Inkubationsversuchen bei 18 °C und in Pflanzenversuchen bis 66 Tage in Gefäßen mit Roggen, Kresse bestimmt. Als Maß für den verfügbaren Stickstoff wurde in der Inkubation der $N_{\min}$ -Wert ($\text{NO}_3\text{-N}$, + $\text{NH}_4\text{-N}$) genutzt, in den Pflanzenversuchen die N-Aufnahme der Pflanzen.

Für die Versuche wurden ausgewählte Böden untersucht

- a) Böden jeweils gleichartig bewirtschafteter Betriebsflächen aber mit unterschiedlichen Tongehalten, wobei die Betriebssysteme unterschiedlich waren – Ackerbau, Gartenbau.
- b) Böden aus Dauerdüngungsversuchen, einerseits vier verschiedene Betriebssysteme - Marktfrucht mit Klee gras Gründüngung (MFS), Marktfrucht mit Biogasgärrest aus Klee gras (BGS), Milchvieh mit Rindergülle (MGS), Milchvieh mit Stallmist (MMS) - und andererseits vier verschiedene Fruchtfolgesysteme mit unterschiedlichem Leguminosenanteilen (STD 25 Standard 25%, MF Marktfrucht 35%, LKG1 50 LuzerneKlee gras 50%, LKG2 Luzerne Klee gras 75%) ohne (-BG) und mit (+BG) Biogasgärrest Düngung.

Alle Böden wurden in den Experimenten mit organischen Handelsdüngern, die eine Spanne im C/N-Verhältnis von 6-25 aufwiesen, kombiniert.

Ergebnisse

Die Bodenart hat einen Einfluss auf die N-Mineralisation aus der organischen Bodensubstanz. Mit höherem Tongehalt verlief die Mineralisation anfänglich schneller und erreichte letztlich auch höhere $N_{\min}$ Werte, speziell im Vergleich mit Sandböden. Allerdings gab es starke Unterschiede je nach Standort, sowohl in der Höhe der Mineralisation als auch der Bodenarten zueinander.

In Kombination mit den organischen Düngern waren sowohl die Bodenart als auch die Art des Düngemittels bzw. dessen C/N-Verhältnis ausschlaggebend für die Netto-N-Mineralisation. Die Bodenart beeinflusste die Düngewirkung graduell, die Dünger auf dem Lehm- und Sandboden hatten einen größeren relativen Düngereffekt als auf Tonboden. Je weiter das C/N-Verhältnis der Düngemittel, desto geringer die Düngewirkung. Schon ab einem C/N von > 10 kann es zu Festlegung von Dünger-N im Boden kommen, ab C/N 15 war es deutlich, im Pflanzenversuch kam es zu Wachstumsverzögerungen.

Die Bewirtschaftung war ein weiterer Einflussfaktor für die N-Freisetzung. Die Böden aus den gartenbaulichen Betrieben hatten eine geringere Freisetzung aus den ungedüngten Böden, setzten die geprüften Dünger aber effektiver um als die ackerbaulich genutzten Böden.

Aus den Erfahrungen mit der unterschiedlichen N-Freisetzung in den Böden der Praxisbetriebe wurden für die weiteren Untersuchungen Böden aus Dauerversuchen herangezogen, bei denen die Bewirtschaftungsmaßnahmen definiert sind und über längere Zeit (12 - 20 a) in gleicher Weise praktiziert werden. Damit sollten Zusammenhänge zwischen einzelnen Maßnahmen und der N-Freisetzung der Böden geprüft und erklärt werden.

In den Versuchen hatten die unterschiedlichen Bewirtschaftungen (Fruchtfolgen, Düngung) Effekte auf die N-Freisetzung aus den Böden und den organischen Düngern. Die Systemversuchsböden der Systeme Marktfrucht mit Gründüngung (MFS) und Marktfrucht mit Biogasgärresten (BGS) zeigten im Inkubationsversuch eine höhere N-Freisetzung als die Milchviehsysteme mit Gülle (MGS) und Stallmist (MSS) mit den niedrigsten Werten. In den Böden von MFS und MGS hatten die Pflanzen die höchsten N-Aufnahmen. Die Netto-N-Mineralisierung der organischen Dünger nahm in allen Kombinationen mit dem weiteren C/N-Verhältnis ab. Außer in MGS war die Netto-N-Aufnahme der Pflanzen negativ, d.h. der zugeführte Dünger-N wurde im Pflanzenversuch in den Böden der anderen Systeme vermehrt festgelegt.

Bei den Biomasseversuchsböden nahm die N-Nachlieferung mit dem Leguminosenanteil (LA) zu, wobei die höchsten Mineralisationsraten bei Klee-Grasanteilen von 50 % bzw. 75 % fast gleichwertig waren. Bei gleichen LA bildeten die langfristig mit Biogasgärresten gedüngten Böden deutlich mehr $N_{\min}$. Die N-Düngewirkung der organischen Ergänzungsdünger nahm mit höherem C/N-Verhältnis ab, sowohl in der Netto-N-Mineralisation als auch in der N-Pflanzenaufnahme. Das Niveau zwischen den Fruchtfolge-Systemen war nur geringfügig unterschiedlicher – deutlicher in der N-Aufnahme als in der Inkubation. Die Netto-N-Mineralisation war in den Böden mit Biogasgärrestdüngung höher im Vergleich zu den ungedüngten Fruchtfolgesystemen, die Pflanzen-Netto-N-Aufnahme war dagegen geringer.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen die Bedeutung des langfristigen Bewirtschaftungssystems für die N-Mineralisation und den Düngemittelumsatz, sei es die Art der Düngung, Fruchtfolge oder Leguminosenanteil. Langfristig wiederholte Zufuhr von

Düngern mit umsetzbaren N-Verbindungen wie in Gülle oder Gründüngung erhöhen die Grundverfügbarkeit des Stickstoffs, zusätzliche Dünger können umgesetzt werden, der Düngeeffekt kann aber geringer sein, wobei die Zusatzdüngung nur in Abhängigkeit vom Düngemittel einen positiven Düngeeffekt hatte, die Dünger mit $C/N < 10$ konnten besser umgesetzt werden. Für Fruchtfolgen mit höherem Leguminosenanteil gilt die Aussage in vergleichbarer Weise, allerdings ist die Wirkung von Leguminosen-Grasgemengen höher als von Körnerleguminosen.

Neben dem Start- N_{min} als Parameter für den Boden N-Status und die N-Nachlieferungsprognose wurden zusätzliche Parameter aus anderen Analysemethoden geprüft. Sie haben nicht immer eindeutig in einen Bezug zu N_{min} Entwicklung in der Kulturzeit. Von den untersuchten Kennwerten haben C_{hwl} und N_{hwl} das Potenzial für eine ergänzende Präzisierung der Aussage zu N-Mineralisierung.

2.6.6 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. Durch langfristige Biogassgärrest-Düngung oder einen Leguminosenanteil von $> 50\%$ in der Fruchtfolge können die N-Nachlieferung aus der OBS und der Dünger-N-Umsatz gesteigert werden. Weiter entwickelte Modelle zur Düngerberechnung sollten Informationen zur Bewirtschaftungsvorgeschichte mit aufnehmen, da diese die Boden-/ Betriebs-spezifischen Unterschiede in der N-Mineralisation am stärksten beeinflusste. Die Systeme mit dem geringsten Düngeeffekt aus den zugeführten Handelsdüngern hatte die größte N-Mineralisation aus der OBS und die größte gesamt N_{min} -Bereitstellung (für die Pflanzen) und umgekehrt. Die Ergebnisse heben die Bedeutung der speziellen Bewirtschaftungsvorgeschichte für das weitere Verständnis und die Verbesserung der Düngeeffizienz hervor.

2.6.7 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>.
- Baumgartner, Thomas; Winkhart, Felizitas; Schmid, Harald; Hülsbergen, K. J. (2023): Treibhausgasbilanzen ökologischer und konventioneller Anbausysteme: Ergebnisse eines zwölfjährigen Dauerfeldversuchs. In: V. Bibic und Knut Schmidtke (Hg.): One Step Ahead - einen Schritt voraus! Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Frick, 7. bis 10. März 2023. Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. 1. Aufl. Berlin: Verlag Dr. Köster, nn.
- 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>.
- Brock, C.; Möller, D.; Dannehl, T. und Blumenstein, .2016: Sicherung der Humusversorgung mit Grün- und Stroh düngung. BÖLN-Projekt HumuGS. FKZ 2011NA061. JLU Giessen, Professur für Organischen Landbau, und Universität Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften, D www.orgprints.org/30763/.
- Dercon, G., Deckers, J., Poesen, J., Govers, G., Sánchez, H., Ramírez, M., Venegas, R., Tacauri, R., Loaiza, G. 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>.
- Ellerbrock, Ruth H.; Gerke, Horst H. (2018): Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 181 (5), S. 721–736. DOI: 10.1002/jpln.201800093.
- Fließbach, A.; Mäder, P.; Dubois, D.; Gunst, L. (2000): Results from a 21 year old field trial. Organic farming enhances soil fertility and biodiversity, FiBL Doss, p 15. Hg. v. Research Institute of Organic Agriculture (FiBL). Zürich (FiBL Dossier). Online verfügbar unter www.fibl.ch.
- 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/>
- Franke, Uwe (1996): Simulation der Kohlenstoff-Stickstoff-Dynamik in Agrarlandschaften. In: *LANDBAUFORSCHUNG VÖLKENRODE* (3), S. 114–120.
- 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>.
- Gerd Dercon, Jozef Deckers, Jean Poesen, Gerard Govers, Henry Sánchez, Marco Ramírez, Raúl Vanegas, Eduardo Tacuri, George Loaiza, Habib-ur-Rahman, M., Raza, A., Ahrends, H.E. Hüging, H., Gaiser, T.; 2022: Impact of in-field soil heterogeneity on biomass and yield of winter triticale 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.
- Herencia, J. F.; Maqueda, C. (2016): Effects of time and dose of organic fertilizers on soil fertility, nutrient content and yield of vegetables. In: *JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE* 154 (8), S. 1343–1361. DOI: 10.1017/S0021859615001136.
- 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.
- Kolbe, Hartmut (2022): Comparative Analysis of Soil Fertility, Productivity, and Sustainability of Organic Farming in Central Europe—Part 2: Cultivation Systems with Different Intensities of Fertilization and Legume N₂ Fixation as well as Perspectives for Future Development. In: *Agronomy* 12 (9), S. 2060. DOI: 10.3390/agronomy12092060.
- Körschens M (1980): Beziehungen zwischen Feinanteil, Ct- und Nt-Gehalt des Bodens. *Archiv Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 24: 585-592.
- 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>.
- Levin, K. S.; Auerswald, K.; Reents, H. J.; Hülsbergen, K.-J. 2021: Effects of Organic Energy Crop Rotations and Fertilisation with the Liquid Digestate Phase on Organic Carbon in the Topsoil. In: *Agronomy* 11 (7), S. 1393. DOI: 10.3390/agronomy11071393.
- Lützw, M. v.; Kögel-Knabner, I.; Ekschmitt, K.; Matzner, E.; Guggenberger, G.; Marschner, B.; Flessa, H. (2006): Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. In: *European Journal of Soil Science* 57 (4), S. 426–445. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.
- Lützw, Margit von; Kögel-Knabner, Ingrid; Ludwig, Bernard; Matzner, Egbert; Flessa, Heinz; Ekschmitt, Klemens et al. (2008): Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171 (1), S. 111–124. DOI: 10.1002/jpln.200700047.
- Manzoni, S.; Porporato, A. 2009: Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. In: *Soil Biology and Biochemistry* 41 (7), S. 1355–1379. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.02.031.
- 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>.
- Poeplau, Christopher; Don, Axel; VESTERDAL, LARS; Leifeld, Jens; van WESEMAEL, B. A.S.; SCHUMACHER, JENS; GENSIOR, ANDREAS (2011): Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. In: *Global Change Biology* 17 (7), S. 2415–2427. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x.
- Reents, H.-J., Kimmelmann, S., Kainz, M. und Hülsbergen, K.-J 2011: Biogas-Fruchtfolgeversuch Viehhausen - Versuchsanlage sowie Ertrags- und Qualitätseffekte bei Winterweizen. In: G. Leithold, K. Becker, C. Brock, S. Fischinger, A.-K Spiegel, K. Spory, Wilbois K.-P und Williges U. (Hg.): Es geht ums Ganze: Forschen im Dialog von Wissenschaft und Praxis. 11. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Gießen, 11.-18.3. 2 Bände: Dr. Köster, Berlin.
- 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>.

- Sawicka, B., Krochmal-Marczak, B., Pszczółkowski, 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.
- Schomberg, Harry H.; Wietholter, Sirio; Griffin, Timothy S.; Reeves, D. Wayne; Cabrera, Miguel L.; Fisher, Dwight S. et al. (2009): Assessing Indices for Predicting Potential Nitrogen Mineralization in Soils under Different Management Systems. In: *Soil Sci. Soc. Am. j.* 73 (5), S. 1575–1586. DOI: 10.2136/sssaj2008.0303.
- Simon, A.I.L. (2021): Langzeitwirkungen von Gärresten in Energiepflanzenfruchtfolgen auf Bodeneigenschaften und Bodenprozesse unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus / Anja Irina Lissy Simon. Berlin: Köster (Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme).
- 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>.
- Sradnick, A., Feller, C., Fink, M., 2017: Nährstoffgehalte und N-Mineralisierung organischer Düngemittel. URL: http://www.igzev.de/publikationen/IGZ_Organische_Duenger.pdf
- Stadler, C.; Heuwinkel, H. 2008: Vegetabile N-Dünger im Ökologischen Gemüsebau. In: *Schule und Beratung* (1-2/08).
- Stadler, C.; Tucher, S. von; Schmidhalter, U.; Gutser, R.; Heuwinkel, H. 2006: Nitrogen release from plant-derived and industrially processed organic fertilizers used in organic horticulture. In: *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 169 (4), S. 549–556. DOI: 10.1002/jpln.200520579.
- Stadler, Christina (2022): Interactions between nitrogen release from organic fertilisers and organic horticultural soils. In: *IAS* 35, S. 47–57. DOI: 10.16886/IAS.2022.06.
- 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>
- Vargas, T.d., Concilio, A., Woyann, L.G. Santos, R.H.S., Cheng, W. 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. Gaiser T., Garofalo P., Giglio L., Giola P., Hoffmann M P., Iocola I., Lana M., Lewan E., Maharjan G. R., Moriondo M., Mula L., Nendel C., Pohankova, Roggero P. P. Trombi G, 2018: The response of process-based agro-ecosystem models to within-field variability in site conditions. *Field Crops Research*, 228, 1–19, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.021>.
- Wickham, H., 2016: *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- 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., 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.

2.6.8 Anhang zusätzliche Betriebsergebnisse

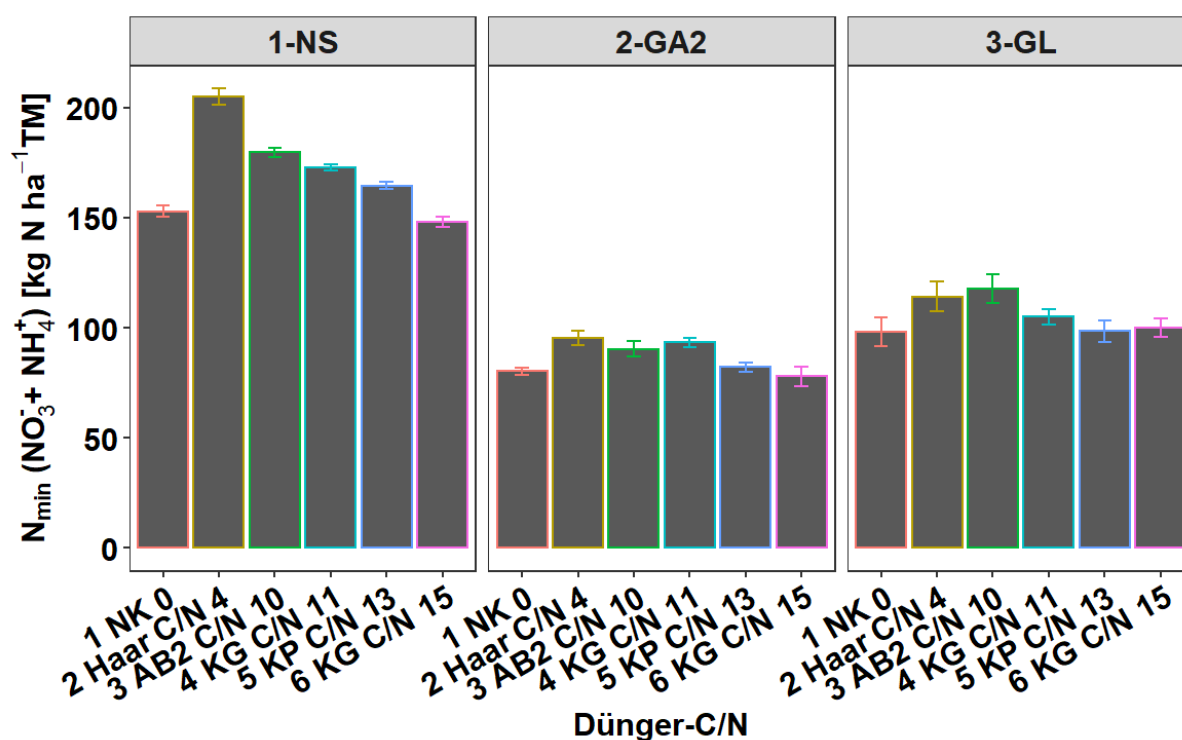


Abbildung 2.6-35: Finale N-Mineralisation auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) mit und ohne Düngung nach 35 Tagen im Inkubationsversuch 8. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

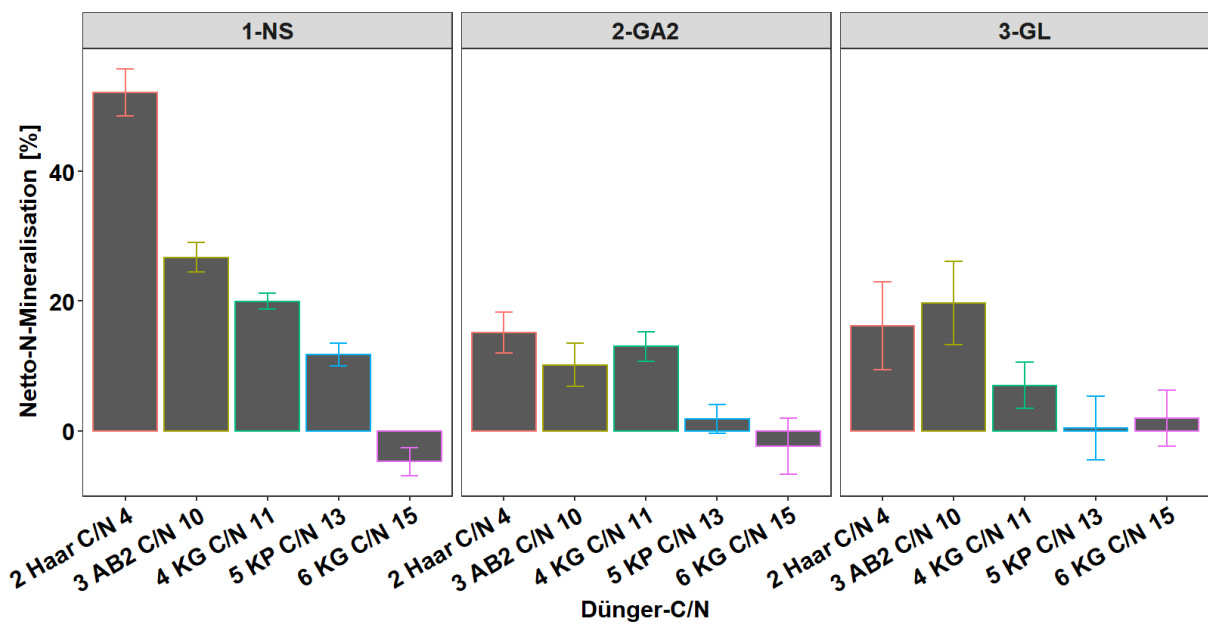


Abbildung 2.6-36: Finale Netto-N-Mineralisation verschiedener organischer Dünger auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) nach 35 Tagen im Inkubationsversuch 8. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

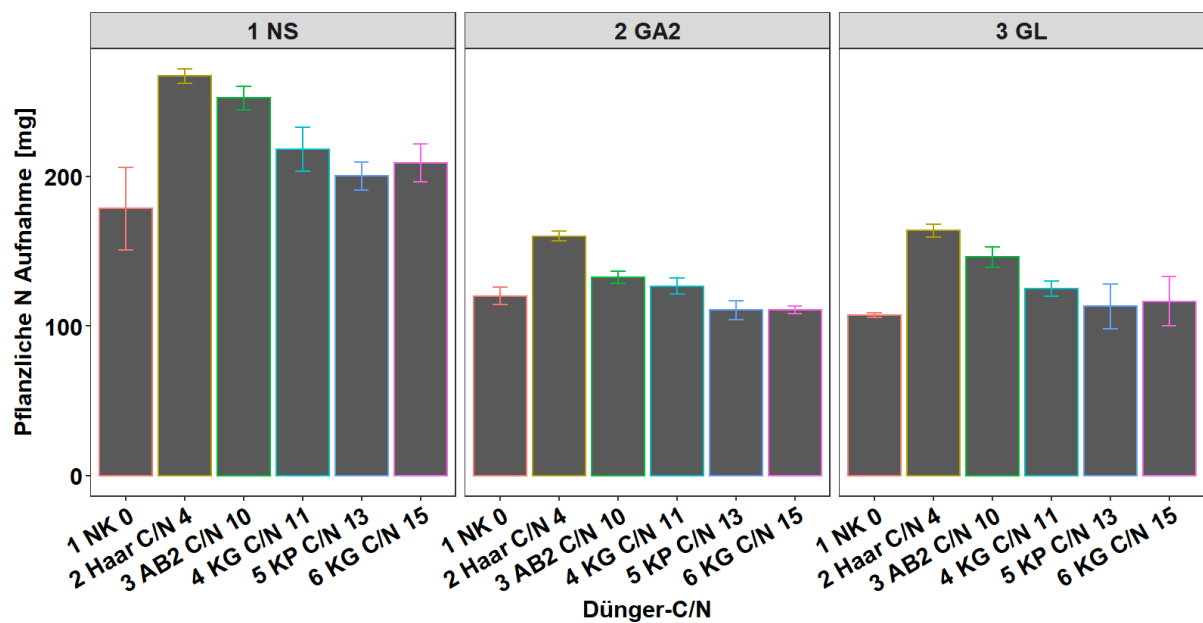


Abbildung 2.6-37: Finale pflanzliche N-Aufnahme auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) mit und ohne Düngung nach 38 Tagen im Pflanzenversuch 6. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

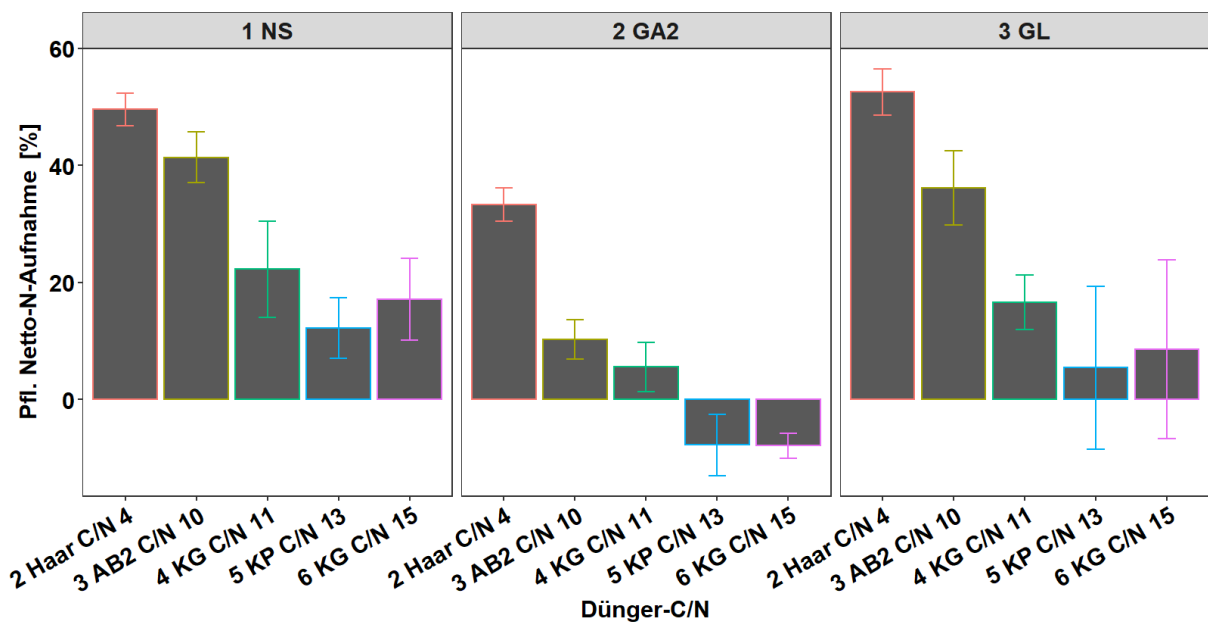


Abbildung 2.6-38: Finale pflanzliche Netto-N-Aufnahme auf Schlägen gartenbaulicher Betriebe (NS, GA2, GL) mit und ohne Düngung nach 38 Tagen im Pflanzenversuch 6. Standardfehlerbalken aus 3 Wiederholungen.

3 Ökologischer Gemüsebau - Herausforderungen und Lösungsansätze

3.1 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, Hülshbergen 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 Herkunft, 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.

3.2 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 Düngeverordnung 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 Betriebe 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 Düngebedarfsrechnung 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). 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.

3.3 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 angepasst 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 Düngebedarfsermittlung in Feldversuchen mit Weißkohl und Salat verglichen worden. Der Düngebedarf 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 Düngeempfehlung durchschnittlich 25 % niedriger (7-56 %). Die Abweichungen der Düngeempfehlungen 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 Düngeplanung 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 würden solche Modelle genutzt werden. Die dazu durchgeführten betrieblichen Erhebungen haben gezeigt, dass die Nutzung von IT-Tools in landwirtschaftlichen Betrieben stark variiert – größere Betriebe und jüngere Betriebsleiter setzen häufiger digitale Lösungen ein als kleinere oder von älteren Personen geführte

Betriebe. Durch gesetzliche Vorgaben wie die Düngeverordnung und Anforderungen von Verbänden steigt der Dokumentationsaufwand, was den Einsatz digitaler Hilfsmittel eigentlich notwendig macht, dennoch werden solche EDV-Tools bisher nur in geringem Umfang eingesetzt. Um eine stärkere Nutzung zu erzielen, sind benutzerfreundliche, mobile Anwendungen sowie Tools, die kompatible Schnittstellen zu bestehenden Dokumentationsportalen besitzen, notwendig.

Der Einsatz von Tools wie N-Expert und NDICEA, die speziell für den ökologischen Gemüsebau entwickelt wurden, bedeutet derzeit für den Praxisbetrieb einen zusätzlichen Aufwand, da Daten zum Teil mehrfach eingegeben werden müssen. Ihre Nutzung und Akzeptanz würde bei den Praktikern würde steigen, wenn ihre Ergebnisse für die Düngebedarfsermittlung der Düngeverordnung deutschlandweit anerkannt würden und Doppeleingaben nicht mehr nötig wären.

Ein zentrales Problem ist die föderale Struktur Deutschlands, die länderspezifische Anpassungen erfordert und die Entwicklung wirtschaftlich tragfähiger IT-Lösungen erschwert. Eine einheitliche Datenerfassung wäre hier hilfreich – auch für die Beratung, die bisher aufgrund hohen Aufwands nur punktuell IT-Tools einsetzt.

Die Bekanntheit von N-Expert und NDICEA ist bisher vor allem in der Beratung vorhanden; in den Betrieben selbst werden sie kaum genutzt. Um das zu ändern, sind gezielte Schulungen notwendig, die den praktischen Nutzen der Tools verdeutlichen.

3.4 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
 - Betriebsflächen erweitern – mehr Feldfutterbau
 - Feldfutterbauanteil in Relation zu Gemüse erhöhen
 - 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 Kleeinsaat 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.

3.4.1 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 Düngeeffekt 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 Herbstsaaten von Klee gras. Es wurden allerdings weder Auswirkungen auf die N₂-Fixierungsleistung noch auf den Vorfruchtwert nachgewiesen werden. Dagegen hatte die Kombination von Grünroggen im Winter mit Frühjahrsblanksaat Vorteile bei N₂-Fixierung, Kleeanteil und Vorfruchtwert für den nachfolgenden Kohlanbau. Die Ergebnisse zu den Managementvarianten Mulchen und Ernte des Klee grasses waren über die Versuchsjahre hinweg widersprüchlich, in einem Jahr konnte mit dem Schnittsystem ein deutlich höher N₂-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 grasssystemen. 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.

3.5 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.

3.6 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.

Weiter entwickelte Modelle zur Düngerberechnung sollten Informationen zur Bewirtschaftungsvorgeschichte mit aufnehmen, da diese die Boden-/ Betriebs-spezifischen Unterschiede in der N-Mineralisation am stärksten beeinflusste. Die Systeme mit dem geringsten Düngeeffekt aus den zugeführten Handelsdüngern hatte die größte N-Mineralisation aus der OBS und die größte gesamt $N_{\min}$ -Bereitstellung (für die Pflanzen) und umgekehrt. Die Ergebnisse heben die Bedeutung der speziellen Bewirtschaftungsvorgeschichte für das weitere Verständnis und die Verbesserung der Düngereffizienz hervor.

3.7 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 Hortic.* 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, 1-13. doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.017

4 Übersicht der Veröffentlichungen zum Projekt

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- Stein, S. (2024). The challenge to achieve a balanced fertilization management in intensive organic vegetable production – approaches for improvement. Dissertation, Universität Hohenheim. <https://hohpublica.uni-hohenheim.de/items/1b7dd68d-74e8-4494-8144-4128db966f2e>
- Stein, S.; Zikeli, S.; Möller, K. (2025): Carry-Over Effect of Leguminous Winter Cover Crops and Living Mulches on Winter Wheat as a Second Main Crop Following White Cabbage. In: *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 188 (1), S. 63–77. DOI: 10.1002/jpln.202300362.
- Stein, S., Hartung, J., Zikeli, S., Möller, K., & Reents, H. J. (2024). Status quo of fertilization strategies and nutrient farm gate budgets on stockless organic vegetable farms in Germany. *Org. Agr.* **14**, 199–212. <https://doi.org/10.1007/s13165-024-00458-5>
- Stein, S.; Hartung, J.; Perkons, U.; Möller, K.; Zikeli, S. (2023): Plant and soil N of different winter cover crops as green manure for subsequent organic white cabbage. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 127 (2), S. 285–298. DOI: 10.1007/s10705-023-10306-9.
- 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 Hortic.* 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, Gää-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, Villmar-Aumenu
- 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, Wintertagung Bioland NRW
- Kahle, R.; Reents, H. J. 2019: Nährstoffmanagement im Ökologischen Gemüsebau mit neuen Düngestrategien 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 München-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 Zukunft, 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 Wirtschaftsgrundlage. Präsentation, Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenu
- Kahle, R., 2022: Einfluss der Bodenart auf N-Mineralisationsdynamik organischer Düngemittel. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenu
- Kahle, R., 2022: Nährstoffmanagement im Ökologischen Gemüsebau mit neuen Düngestrategien und EDV-gestützten Tools- Nutri@ÖkoGemüse. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenu
- Kahle, R.; Schad, P. D.; Reents, H.J. Egenolf, K., 2022: Nutzen und Anwendung Modell-gestützter Düngung im intensiven ökologischen Gemüsebau. Präsentation, Fachberatertagung „Ökologischer Gartenbau“ 08.-10. November 2022, Herzberg, CH
- Kahle, R.; Reents, H.J. 2024: Stickstoffverfügbarkeit als Resultat der Interaktion von Düngemittel und Bodeneigenschaften. 17. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Landwirtschaft und Ernährung – Transformation macht nur gemeinsam Sinn, 5.–8. März 2024, Gießen. Tagungsband auf <https://orgprints.org/>

- Kahle, R.; Reents, H.J. 2024: Nitrogen availability as result of interaction between fertilizer and soil properties. Tropentag 2024, Vienna, Austria, September 11-13, proceedings <https://www.tropentag.de/2024/abstracts/full/761.pdf>
- Katroschan, K.-U.; Besand, F. 2021. Nutri@ÖkoGemüse – Ausgewählte Zwischenergebnisse aus Arbeitspaket 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-Gemüsebau, 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 - Zwischenergebnisse aus dem Verbundprojekt Nutri@ÖkoGemüse, 30. Fachberatertagung der Bundesfachgruppe Gemüsebau, Präsentation (online), 11.03.2021
- Reents, H.J., 2021: Nutri@ÖkoGemüse – Problemstellung und Forschungskonzept. Nährstoffmanagement 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. Wissenschaftstagung 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. S.; Zikeli, S.; Möller, K., 2022: Legumer Lebendmulch im Weißkohlbanbau. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenu
- 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. S.; Zikeli, S.; Möller, K., 2022: Legumer Lebendmulch im Weißkohlbanbau. Poster Öko-Feldtage, 28.-30. Juni 2022, Villmar-Aumenu
- 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 Hortic. 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. In: C. Bibic und Knut Schmidtke (Hg.): One Step Ahead – einen

Schritt voraus! Beiträge zur 16. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Frick. FibL. Berlin: Dr. Köster, zuletzt geprüft am 29.08.2024.

- Stein S., Weiler C. S., 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. <https://orgprints.org/id/eprint/44772/>
- 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. S.; 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. S.; 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
- Weiler, C. S.; Jauß, V.; Reents, H. J.; Zikeli, S., 2024: Gründe zur (Nicht-)Nutzung von IT-Tools zum Dünge-/Nährstoffmanagement im ökologischen Gemüsebau. Poster, 17. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Landwirtschaft und Ernährung – Transformation macht nur gemeinsam Sinn, 5.–8. März 2024, Gießen. Tagungsband auf <https://orgprints.org/>
- Weiler, C. S., Reents, H. J.; Zikeli, S., 2024: Analysing organic horticultural growers' acceptance of IT tools for nutrient management – a case study from Germany. Präsentation, IV International Organic Fruit Symposium and II International Organic Vegetable Symposium, 17. – 20. September, Warschau, Polen.

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=f8xIzauNRg4>
- 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.

Workshops für interessierte Landwirt*Innen, Gärtner*Innen und Berater*Innen:

- 14.05.23 Ökofeldtage: Stoffstrombilanzen in Gemüsebaubetriebe? Stoffstrombilanzierungen für ökologische Gemüsebaubetriebe; Referenten: Jens Amelung, Karin Rather (beide LVG Heidelberg)
- 24.01.24 NDICEA: Online-Workshop: Der Einsatz des Stickstoffmanagement-Tools NDICEA in der Dünge- und Fruchtfolgeplanung im ökologischen Feldgemüseanbau; Referenten: Philipp Schad (LWK NRW) und Geert-Jan van der Burgt (Louis Bolk Institut)
- 27.02.24 N-Expert: Online-Workshop: Dünge- und Fruchtfolgeplanung im Freilandgemüseanbau mit dem Nährstoffmanagement-Tool N-Expert; Referent: André Sradnick (IGZ)

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 Düngemitteln 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-Freisetzungsrate 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 Klee-einsaaten 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 Gründüngungs-Biomasse und andererseits aus dem niedrigeren C/N-Verhältnis. Der Kohl hatte den verfügbaren Stickstoff im Boden weitgehend aufgenommen, denn es wurden keine höheren Nmin-Reste nach der Ernte gemessen. In den

Saatzeitversuchen hatten die Gründüngungen aus der Frühjahrsansaat meist eine stärkere Wirkung auf den nachfolgenden Kohl als die Herbstsaat. 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. Die langjährige Bewirtschaftung – Betriebssystem, Formen der organischen Dünger, Fruchtfolge mit Leguminosenanteil – haben Einfluss auf die N-Freisetzung und Effizienz der organischen Ergänzungsdünger. Wiederholte Anwendung leicht umsetzbarer organischer Dünger (z.B. Gärreste), setzt mehr N frei aus dem Boden und den zugeführten Düngemitteln. Je weiter das C/N-Verhältnis des Düngemittels, desto geringer war die N-Freisetzung mit Unterschieden in Höhe und Zeitverlauf sowie Standort und Betrieb. Die Bedeutung des Düngemittel C/N-Verhältnisses und des Tongehalts stehen in Wechselwirkung mit anderen standortspezifischen Eigenschaften. Die bisherige Bewirtschaftungsweise – Betriebssysteme, Fruchtfolgen, Leguminosenanteile in der Fruchtfolge oder langfristig eingesetzte betriebliche Düngemittel haben starken Einfluss auf die Mineralisierungsprozesse der N-Freisetzung aus dem Boden und ergänzenden N-reichen Handelsdünger.

Innerhalb des Projekts wurden Modellsysteme zu genaueren flächen- und kulturartsspezifischen 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 betrieblichem Ansatz oder nach DüV. Während der Projektlaufzeit ist eine Internet-basierte S-Bilanzierung hinzugekommen.

In Projekt sind die Modelle mit anderen Verfahren zur Düngedarfsermittlung in Feldversuchen mit Weißkohl und Salat verglichen worden. Der errechnete Düngedarf nach N-Expert bzw. NDICEA lag in drei Weißkohlversuchen z. T. deutlich unter dem Darf 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)

Menge (kg, dt, t)

(Anteil für Gewächshaus/Folientunnel %)

.....

e) Pflanzgutzukauf

Substratmischung

Stück +Topfgröße

(Anteil für Gewächshaus/Folientunnel %)

.....

Eigene Anzucht? Substratzukauf (Menge, Nährstoffinhalt):

.....

f)	Leguminosenkulturen	(N ₂	Bindung)	Ertrag (t FM ha ⁻¹ , ggf. TM-Gehalt)
Art /	Zusammensetzung:	Kleegras,	legume ZF,	oder Bestandeshöhe (cm) (bei
Körnerleguminose			Fläche (ha)	Kleegras 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	Anzahl Kisten	Größe/ Einheit Kiste
	(kg, dt, t)	oder Bund	oder Bund

1

.....

50

b) Abgabe von Wirtschaftsdüngern/ Kleegras	Menge (kg, dt, t, m ³)

.....

3) Kulturliste:
Nr. Kultur

Bezugsjahr:
Fläche (ha)

Nicht beerntet*
(Fläche bzw.
Anteile)

(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.

6.2 Anhang 2.3.3.1: Fragebogen der quantitativen Umfrage

1. Nutzen Sie Software/Tools auf ihrem Betrieb?

Zur Anbauplanung, zur Düngeplanung, zur Dokumentation, für die Buchhaltung, usw.

☐ Ja Weiter mit Frage 2.

☐ Nein Weiter mit Frage 9.

2. Wofür nutzen Sie die Ergebnisse der Tools?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Kontrolle (DÜV, Öko-Kontrolle, GlobalGAP)

☐ Strategische Betriebsentscheidungen

☐ Flächenplanung

☐ Düngeplanung

☐ Kostenkalkulation

☐ Buchhaltung

☐ Anderes:

3a. Welche Software/Tools nutzen Sie in Ihrem Betrieb für die Anbauplanung?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Gemüse Anbauplaner (Rukola Soft)

☐ PC-Gärtner

☐ Tabellen-Kalkulationsprogramm (z.B. Excel)

☐ Handschriftlich

☐ MyFarm24 (HELM Software)

☐ ProFlura

☐ EDV-Ring (BLUCom, ...)

☐ Andere:

3b. Wie sind Sie auf die von Ihnen verwendeten Tools zur Anbauplanung aufmerksam geworden?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Beratung

☐ Gesetzliche Vorgabe

☐ Firmenkontakte

☐ Handel

☐ Eigeninteresse

☐ Berufskolleg*Innen

☐ Andere:

4a. Welche Software/Tools nutzen Sie in Ihrem Betrieb für die Düngeplanung?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ MyFarm24 (HELM-Software)

☐ Stickstoff-Düngebedarfsermittlung GEMÜSE, Erdbeere - DLR Rheinlandpfalz

☐ Düngung BW

☐ NDICEA

☐ N-Saldo-Rechner (ZALF)

☐ WAS (Wetterauer Agrar Service)

☐ Tabellen-Kalkulationsprogramme (Excel)

☐ Online Portale der Bundesländer (BESyD)

☐ N-Expert

☐ ProFlura

☐ Handschriftlich

☐ Andere:

4b. Wie sind Sie auf die von Ihnen verwendeten Tools zur Düngeplanung aufmerksam geworden?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Beratung

☐ Gesetzliche Vorgabe

☐ Firmenkontakte

☐ Handel

☐ Eigeninteresse

☐ Berufskolleg*Innen

☐ Andere:

5a. Welche Software/Tools nutzen Sie in Ihrem Betrieb für die Buchhaltung?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Billy Rechnung (HELM-Software)

☐ ANOVA

☐ Gemüsebauplaner

☐ EDV-Ring (BLUCom, ...)

☐ Lexware-Buchhaltungsprogramm

☐ Andere:

5b. Wie sind Sie auf die von Ihnen verwendeten Tools zur Buchhaltung aufmerksam geworden?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Beratung

☐ Gesetzliche Vorgabe

☐ Firmenkontakte

☐ Handel

☐ Eigeninteresse

☐ Berufskolleg*Innen

☐ Andere:

6. Sind Sie zufrieden mit den von Ihnen bereits verwendeten Tools?

☐ Ja

☐ Nein

☐ Teils/Teils

7. Was fehlt Ihrer Meinung nach in den von Ihnen verwendeten Tools?

8. Wo gibt es Ihrer Meinung nach Verbesserungspotential?

Weiter mit Frage 12.

9. Warum haben Sie bis jetzt keine Tools genutzt?

10. Planen Sie in Zukunft eine Software/ ein Tool zur Düngeplanung einzusetzen?

11. Was sollte ein von Ihnen verwendetes Tool können bzw. welche Informationen sollte es liefern?

12. Bewirtschaften Sie Ihren Betrieb nach den Richtlinien der EU-Öko-Verordnung oder nach Richtlinien eines Öko-Anbauverbandes?

☐ Ja, nach den Richtlinien eines Öko-Anbauverbandes Weiter mit Frage 13.

☐ Ja, nur nach EU-Öko-Verordnung Weiter mit Frage 13.

☐ Nein, d.h. nach konventioneller Landwirtschaft Weiter mit Frage 15.

13. Seit wann bewirtschaften Sie ihren Betrieb ökologisch?

☐ In der Umstellung

☐ 3 bis 5 Jahre

☐ 5 bis 10 Jahre

☐ 10 bis 20 Jahre

☐ Mehr als 20 Jahre

14. Welchem Öko-Anbauverband ist ihr Betrieb zugehörig?

☐ Bioland

☐ Naturland

☐ Demeter

☐ Anderer:

15. Ist Ihr Betrieb GlobalGap zertifiziert?

☐ Ja

☐ Nein

☐ Keine Angabe

Bei ökolog. Bewirtschaftung – weiter mit Frage 16.

Bei konv. Bewirtschaftung – weiter mit Frage 17.

16. Welche Düngemittel verwenden Sie auf ihrem Betrieb?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Zugekaufte Wirtschaftsdünger

☐ Zugekaufte, für den ökologischen Landbau zugelassene mineralische Handelsdünger

☐ Zugekaufte, für den ökologischen Landbau zugelassene organische Handelsdünger

☐ Eigene Wirtschaftsdünger

☐ Sonstige:

Weiter mit Frage 18.

17. Welche Düngemittel verwenden Sie auf ihrem Betrieb?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Eigene Wirtschaftsdünger

☐ Zugekaufte Wirtschaftdünger

☐ Mineraldünger

☐ Sonstige:

18. Auf welcher Basis treffen Sie Ihre Düngeentscheidung?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Erfahrung

☐ DÜV Vorgabe

☐ Ertragserwartung

☐ Nährstoffbilanzen

☐ Tools

☐ Vorfrucht

☐ Sonstiges:

19. Was sind für Sie die wichtigsten Kriterien bei der Düngung?

Mehrfachnennungen sind möglich.

☐ Kosten

☐ Ertrag

☐ Auswirkungen auf die Umwelt

☐ Verwertung auf dem Betrieb anfallender Wirtschaftsdünger

☐ Arbeitswirtschaftlichkeit

☐ Sonstige:

Allgemeine Fragen:

20. Welches Geschlecht haben Sie?

☐ Männlich

☐ Weiblich

☐ Divers

☐ Keine Angabe

21. Wie alt sind Sie?

☐ Jünger als 20 Jahre

☐ 20-29 Jahre

☐ 30-39 Jahre

☐ 40-49 Jahre

☐ 50-59 Jahre

☐ 60 Jahre oder älter

☐ Keine Angabe

22. In welchem Bundesland liegt Ihr Betrieb?

☐ Baden-Württemberg

☐ Bayern

☐ Berlin

☐ Brandenburg

☐ Bremen

☐ Hamburg

☐ Hessen

☐ Mecklenburg-Vorpommern

☐ Niedersachsen

☐ Nordrhein-Westfalen

☐ Rheinland-Pfalz

☐ Saarland

☐ Sachsen

☐ Sachsen-Anhalt

☐ Schleswig-Holstein

☐ Thüringen

☐ Keine Angabe

23. Welche Ausbildung haben Sie abgeschlossen?

Höchster Abschluss

- ☐ Landwirtschaftliche Lehre
- ☐ Staatlich geprüfte/r Landwirt*In
- ☐ Fachschule/staatlich geprüfte/r Agrarbetriebswirt*In
- ☐ Weiterführende landwirtschaftliche Ausbildung (Meister*In)
- ☐ Landwirtschaftliches Studium (Bachelor)
- ☐ Landwirtschaftliches Studium (Master)
- ☐ Keine landwirtschaftliche Ausbildung
- ☐ Andere:
- ☐ Keine Angabe

24. Welche Funktion übernehmen Sie im Betrieb?

- ☐ Geschäftsführer*In
- ☐ Eigentümer*In / Betriebsleiter*In
- ☐ Angestellte/r Betriebsleiter*In
- ☐ Angestellte/r Bereichsleiter*In
- ☐ Hofnachfolger*In
- ☐ Leitung Gemüseproduktion
- ☐ Familiäre Hilfskraft
- ☐ Andere:
- ☐ Keine Angabe

25. Wie groß ist Ihr Betrieb?

- ☐ Unter 2 ha
- ☐ 2 bis 4 ha
- ☐ 5 bis 9 ha
- ☐ 10 bis 39 ha
- ☐ 40 bis 99 ha
- ☐ Mehr als 100 ha

26. Wie viel ist davon Gemüsebaufläche?

- ☐ Unter 1 ha
- ☐ 1 ha
- ☐ 2 bis 4 ha
- ☐ 5 bis 9 ha
- ☐ 10 bis 19 ha
- ☐ 20 bis 49 ha
- ☐ 50 bis 99 ha
- ☐ Mehr als 100 ha

27. Wie viele Kulturen bauen Sie auf Ihrem Betrieb an?

- ☐ Weniger als 5
- ☐ 5 bis 10
- ☐ 10 bis 30
- ☐ Mehr als 30

28. Wie bewirtschaften Sie Ihren Betrieb?

- ☐ Im Vollerwerb
- ☐ Im Nebenerwerb

29. Wie vermarkten Sie Ihre Produkte?

☐ Solidarische Landwirtschaft (SoLaWi)

☐ Gemüsebau vor allem mit Direktvermarktung

☐ Gemüsebau vor allem mit Vertrieb über den Großhandel

☐ Gemüsebau mit Direktvermarktung und Großhandel zu gleichen Anteilen

☐ Landwirtschaftlicher Betrieb mit Feldgemüseanbau

☐ Sonstiges:

30a. Workshop: Wären Sie im nächsten Jahr (2024) an einem Workshop (online) eines der Tools zur Düngeempfehlung interessiert, das im Rahmen unseres Projektes weiterentwickelt wurde?

☐ Ja, ich bin interessiert. Meine E-Mail Adresse ist:

☐ Nein, ich habe kein Interesse.

30b. Demo-Betrieb: Wären Sie an einer praktischen Anwendung eines der Tools in Ihrem Betrieb interessiert?

☐ Ja, ich bin interessiert. Meine E-Mail Adresse ist:

☐ Nein, ich habe kein Interesse.

6.3 Anhang 2.3.3.2: Fragebogen für qualitative Expert*Inneninterviews

Umfrage zur Softwarenutzung für das Nährstoffmanagement im ökologischen Gemüsebau



Die umfangreiche Datenverarbeitung ist ein Kennzeichen des modernen ökologischen Gemüsebaus. Betriebe haben einerseits umfangreiche Dokumentationspflichten, andererseits wird die Datenverarbeitung für Planungen, Verarbeitung, Kontrolle und betriebswirtschaftliche Auswertungen genutzt. Für die verschiedenen Aufgaben werden unterschiedliche Programme, Apps, Datenblätter oder Internetanwendungen – hier allgemein als "Tools/Software" bezeichnet - genutzt.

Name: _____

Betreute Region/en: _____

Anzahl an betreuten Gemüsebaubetrieben: _____

Ø Betriebsgrößen: _____

Betriebsarten: _____

Nutzung von Tools

Frage: Wie ist Ihre Erfahrung: Wann und wieso nutzen Landwirt*Innen/Gärtner*Innen Tools/Software auf ihrem Betrieb?

Frage: Welche Software wird von den von Ihnen beratenden Betrieben verwendet? (Buchhaltung/Anbauplanung/Düngeplanung)

Nährstoffmanagement auf den Betrieben

Frage: Werden Tools/Software zur Nährstoffbilanzierung auf den Betrieben verwendet?

Frage: Was sind fördernde und behindernde Faktoren für die Akzeptanz d. Tools zur N-Düngung und zur Nährstoffbilanzierung?

Frage: Empfehlen Sie in Ihren Beratungsgesprächen bestimmte Tools zur Düngeplanung/ zum Nährstoffmanagement?

Frage: Welche Bedeutung hat Nährstoffmanagement für die einzelnen Betriebe? Gibt es Unterschiede zwischen den Betrieben (Betriebsgröße, Anzahl Kulturen, Region, Alter des Betriebsleiters)?

Frage: Wie planen die Betriebe das Stickstoffmanagement? Haben Sie das Gefühl, dass die Betriebe zusätzliche (externe) Unterstützung bräuchten? Können Sie als Berater dies leisten?

Beratung/Weiterbildung zu Nährstoffmanagement-Tools

Frage: Gibt es in Ihrem Bundesland Aktivitäten von den zuständigen Behörden (externe Beratung neben der Verbandberatung) für das Düngemanagement und speziell für den Gemüsebau?

Frage: Wie ist aktuell die Rolle von den Firmen die Software im Bereich Düngung anbieten? Gibt es Schulungen zur Nutzung der Software?

Frage: Haben Sie bereits an Schulungen/Weiterbildungen zu diesen Tools teilgenommen bzw. besteht die Möglichkeit dazu?

Frage: Für wen sind Ihrer Meinung nach Schulungen/Workshops zu den Tools sinnvoll? Für Landwirt*Innen, Gärtner*Innen, Berater*Innen?

Frage: Besteht von Ihrer Seite aus Interesse an solchen Workshops? Welche Themenbereiche würden Sie dort am meisten interessieren?

Die Förderung des Vorhabens Nutri@Ökogemüse (FKZ: 2818OE062) erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

6.4 Anhang 2.3.4.1: Interviewleitfaden für Expert*Inneinterviews – Nährstoff-management in SoLaWi/Market Garden Betrieben

Experteninterviews: Fragebogen an SoLaWis/Market Gardens

Betrieb:

Datum:

Experte:

Aufgabe im Betrieb:

Alter:

Seit wann dabei:

Ausbildung/Studium im Agrar/gärtnerischen Bereich:

Allgemeines

1. Wie groß ist Ihr Betrieb/landwirtschaftliche Fläche?
2. Seit wann gibt es Ihren Betrieb?
3. Welche Ausrichtung hat Ihr Betrieb (Gemüse, Viehhaltung, Obst, ...)
4. Sie Sie biologisch zertifiziert?
 - a. Falls ja, seit wann?
 - b. EU oder auch privates Biosiegel?
5. Wie würden sie Ihren Boden beschreiben? (Bodentyp, Bodenpunkte)
6. Gibt es Besonderheiten an Ihrem Hof/Standort?

Thema Gemüseanbau

1. Wie groß ist die Gemüseanbaufläche und wie viele Gemüsekulturen werden insgesamt angebaut?
2. Baues Sie Gemüse im geschützten Bereich an?
 - a. Falls ja, auf welcher Fläche und welche Kulturen?
3. Wie viele unterschiedliche Gemüsekulturen bauen Sie über das Jahr verteilt an?
4. Nutzen Sie eine Software zur Anbauplanung?
5. Wie schätzen Sie Ihre Erträge ein? Sind diese über die Jahre gleichgeblieben oder haben zu-/abgenommen?
6. Mulchen Sie Ihre Flächen?

- a. Falls ja, wie (Plastikmulch, Transfermulch,...)
- b. Falls ja, bei welchen Kulturen? Pflanzung im gemulchten Bestand?

Thema Nährstoffversorgung:

1. Welchen Stellenwert, von 1-10, hat die Düngung und das Nährstoffmanagement auf Ihrem Betrieb? Wie ist Ihre Fruchtfolge gestaltet/aufgebaut? Werden Zwischenfrüchte und/oder Leguminosen auf den Flächen angebaut?
2. Ziehen Sie regelmäßig Bodenproben und lassen Sie das von Ihnen verwendete Düngemittel analysieren?
3. Welche Düngemittel werden bei welchen Kulturen genutzt? Wie hoch sind die Düngemittelgaben?
 - a. Stammen die Düngemittel von Ihrem eigenen Betrieb?
4. Was passiert mit anfallenden Ernteresten oder Produkte mangelnder Qualität?
5. Wie erfolgt die Düngeentscheidung auf Ihrem Betrieb? Erfolgt diese kulturspezifisch und ist an den Bedarf angepasst?
6. Falls ein Anbau im geschützten Bereich stattfindet, wie unterscheidet sich Ihr Nährstoffmanagement dort zum Freilandgemüse?
7. Kennen Sie Nährstoffmanagement-Tools? Wenn ja, welche und haben Sie schon ein solches genutzt?
8. Haben Sie schon von den Nährstoffmanagement-Tools NDICEA und N-Expert gehört oder eine Hoftorbilanz für Ihren Betrieb erstellt?
9. Wenn Ihnen ein Tool eine andere Düngeempfehlung vorschlägt oder ein Ungleichgewicht festgestellt werden würde, würden Sie Ihr Düngemanagement anpassen, wenn die Software eine Düngeempfehlung gibt, die nicht mit Ihrer aktuellen Düngestrategie übereinstimmt? Würden Sie bei Nährstoffungleichgewichten Ihre Düngung anpassen?

6.5 Anhang 2.3.4.1.4.1: Analyseergebnisse der Düngemittelproben

Betrieb	Düngemittel	N	C/N	P	K	Mg	S	Cl
		[%]				[mg 100g ⁻¹]		
1	Haarmehlpellets	13,8	3,58	328	206	63,7	1318	172
	Siforga	3,35	9	1308	7378	585	2663	633
2	Bio Agenasol	5,71	7,66	1210	1645	468	581	301
	Hornpellets	14,1	3,14	354	225	129	2053	198
3	Haarmehlpellets	13,5	3,6	350	200	55,9	1558	206
	Patentkali + Algenkalk	0,25	9,8	96,3	19474	5112	14498	2004
4	Provita	5,45	7,97	1160	1974	500	743	369
	Hornmehl	14,6	3,06	257	305	83	2108	370
	Phytogran	8,98	2,7	413	406	141	1639	560
	Hannover-Mischung	4,61	9,26	469	961	184	190	90,6
	Haarmehlpellets	14,6	3,6	151	143	31,4	1921	147
	Schafswollpellets	10,4	3,69	86,7	2881	195	2142	84,1
5	Pflanzenkompost	0,57	12,7	176	679	260	126	86,8
	Gekaufter	0,87	15,4	157	600	335	102	79,4
	Kompost Hornspäne	13,1	3,17	416	404	142	1496	294
6	Mist m. Spelt	1,82	20,3	454	2027	406	220	407
	Palaterra Bio	6,48	5,35	1417	5858	253	4093	246
	eig. Kompost	0,64	14,2	220	777	1133	142	13,3
	Schafswollpellets	9,38	4,38	89	5180	143	1962	376
	Mist m. Stroh	2,48	11,7	547	3267	600	307	852
	zugekaufter Stallmist	1,01	22,8	167	794	515	121	109
7	Hühnermist	2,11	9,05	1711	1921	596	304	317
	Algenkalk	0,10	116	66,3	120	1976	326	288
	Hornspäne	15,0	3,07	66,6	205	53,7	1980	319
	Horngrieß	14,6	3,07	236	198	42,8	1909	320
	Schafswollpellets	9,77	4,31	103	4618	90,4	1971	409
	Gesteinsmehl	0,06	150	29,7	837	9718	171	34,3
	Kompost	1,04	17,1	217	592	578	166	24,6
	Vinasse	5,19	5,76	257	5778	59,7	1162	1573
8	Mist	1,45	23,3	216	1031	259	214	142
9	Vinasse	5,23	5,78	265	5832	39,9	865	1482
	Brennnesseljauche	-	-	2434	658	15627	356	3354
	BioRegio Erde	0,79	28,4	121	893	369	185	49,8
	eig. Kompost	0,60	12,8	180	618	449	86,9	35,3