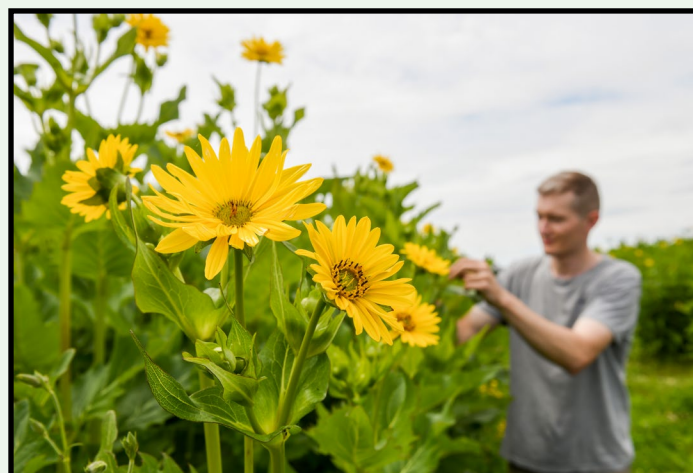


75

Berichte aus dem TFZ

Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie



**Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen
und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in
Durchwachsener Silphie**



Entwicklung von Umbruch- strategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie

Sebastian Parzefall
Michael Grieb
Maendy Fritz

Berichte aus dem TFZ 75

Straubing, Juni 2022

Titel: Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie

Autoren: Sebastian Parzefall
Michael Grieb
Dr. Maendy Fritz

Projektleitung: Dr. Maendy Fritz

Mitarbeiter: Stefan Wiesent (TFZ)
Isabella Wohlfeld (Bachelorandin, TUM)

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen G2/N/18/04 gefördert. Die Projektlaufzeit ging vom 01.01.2019 bis zum 31.12.2021. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2022

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008
Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Sebastian Parzefall, Anna Grundner, Ulrich Eidenschink
Gestaltung: Sebastian Parzefall
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2022

Fotos: Tobias Hase (Titelbild, 60), restliche Bilder TFZ

Der Bericht kann kostenlos und in Farbe unter www.tfz.bayern.de/publikationen heruntergeladen werden.

Abstract (deutsch)

Die Dauerkulturen *Silphium perfoliatum* (Durchwachsene Silphie) und *Sida hermaphrodita* (Sida) können als Inputsubstrat für die Biogaserzeugung eingesetzt werden. Nach Ablauf der Nutzungsdauer müssen mehrjährige Energiepflanzen wieder umgebrochen werden. Im Zeitraum von 2019 bis 2021 wurden in Ostbayern Feldversuche durchgeführt, um die Stickstoff-Düngung (N-Düngung) von Durchwachsener Silphie (D. Silphie) zu untersuchen und Strategien für den Umbruch von D. Silphie und Sida zu entwickeln.

Im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von D. Silphie wurden drei Faktoren variiert: 1) Düngerart (Gärreste nur Frühjahr, Gärrest Herbst und Frühjahr, Mineraldünger), 2) Düngungszeitpunkt im Frühjahr (früh, früh und spät) und 3) N-Bedarfswert (100, 150, 200 kg N/ha, inkl. N_{\min}). Im Gesamtmittel wurde ein Ertrag von 136,6 dt TM/ha erreicht. Eine mineralische N-Düngung führte gegenüber einer Gärrestdüngung zu signifikant höheren Erträgen und N-Abfuhr. Bei einer Gärrestdüngung nur im Frühjahr wurden gegenüber der Variante mit Herbstdüngung ebenfalls signifikant höhere Erträge erreicht, was auf eine schlechtere N-Effizienz der Herbstgabe hinweist. Eine Aufteilung der Frühjahrsdüngung zeigte keine eindeutigen Effekte. Bis zu einem N-Bedarfswert von 150 kg N/ha nahmen die Trockenmasseerträge signifikant zu, bei weiterer Steigerung der N-Zufuhr war der Ertragszuwachs geringer. Die N-Gehalte des Ernteguts lagen mit 0,73 kg N/dt TM auf einem niedrigen Niveau. Dadurch fiel auch die N-Abfuhr sehr niedrig aus, so dass in den mit Gärrest gedüngten Varianten hohe N-Bilanzüberschüsse gegeben waren. Dennoch waren nach der Ernte und zu Vegetationsende durchgehend sehr niedrige N_{\min} -Mengen im Boden vorhanden. Eine vollständige Deckung des N-Bedarfs von D. Silphie ausschließlich mit Gärresten erscheint nach derzeitigem Versuchsstand wegen nicht optimaler N-Verwertung zumindest bei oberflächlicher Ausbringung nicht sinnvoll.

Für die Untersuchung des Umbruchs von D. Silphie und Sida wurden die Umbruchmethode (Fräse, Grubber, Pflug) und die nachfolgende Kultur (Wintergetreide, Mais) variiert. Der Umbruch und die Ansaat von Triticale wurde bei beiden Dauerkulturen Ende September 2019 durchgeführt, Mitte April des Folgejahrs wurde Mais gesät. Im zweiten Jahr nach dem Umbruch wurden die Kulturen getauscht. Bezüglich Sida wurde ein zweiter Umbruchversuch im Frühjahr 2021 mit Mais als Folgekultur angelegt. Der geringste Durchwuchsbesatz war bei beiden Dauerkulturen nach dem Umbruch mit der Fräse (ca. 7–8 cm tief) zu beobachten, wobei bei Sida weniger deutliche Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden waren. Durch die Fräse zerkleinerte Wurzeln stellten für einen Wiederaustrieb weniger Reservestoffe zur Verfügung, so dass kleinere, schwächere Triebe mit einer geringeren Triebkraft resultierten. Einzelne kräftige Triebe wiesen allerdings darauf hin, dass eine etwas größere Arbeitstiefe gewählt und gleichmäßig eingehalten werden sollte. Der Umbruch von D. Silphie mit dem Pflug führte nachfolgend zum stärksten Durchwuchs, der zudem zeitlich versetzt erschien, was die Bekämpfung erschwerte. Als Folgekultur erwies sich Mais besser geeignet, da dieser Vorteile bei der chemischen Bekämpfung und durch seine Wuchshöhe eine bessere Durchwuchsunterdrückung bietet. Eine erhöhte N-Nachlieferung nach dem Umbruch der Dauerkulturen war nicht festzustellen, dafür war jedoch vermutlich die Standdauer der untersuchten Bestände mit fünf Jahren zu kurz.

Abstract (englisch)

The perennial crops *Silphium perfoliatum* (cup plant) and *Sida hermaphrodita* (sida) can be used as input substrate for biogas production. At the end of their useful cropping time, stands with perennial energy crops must be converted to arable land again. In the period from 2019 to 2021, field trials were conducted in Eastern Bavaria to investigate the nitrogen (N) fertilisation of cup plant and to develop strategies for the conversion of cup plant and sida.

In the field trial to optimise N fertilisation of cup plant, three factors were varied: 1) type of fertiliser (digestate only spring, digestate autumn and spring, mineral fertiliser), 2) fertilisation timing in spring (early, early and late) and 3) N demand (100, 150, 200 kg N/ha, incl. N_{\min}). The overall average yield was 136,6 dt DM/ha. Mineral N fertilisation resulted in significantly higher yields and N removal compared to digestate fertilisation. With digestate fertilisation only in spring, significantly higher yields were achieved compared to the variant with autumn fertilisation, indicating a poorer N efficiency of the autumn application. Splitting the spring fertilisation showed no clear effects. Dry matter yields increased significantly up to an N demand of 150 kg N/ha. Yield increases were lower with further increases in N supply. The N content of the harvested crop reached a level of only 0,73 kg N/dt DM. As a result, N removal was also very low, resulting in high N balance surpluses in the variants fertilised with digestate. Nevertheless, very low N_{\min} quantities were consistently present in the soil after harvest and at the end of vegetation. A complete coverage of the N requirement of cup plant exclusively with digestate does not appear to be reasonable according to the current results due to non-optimal N utilisation, at least in case of surface application.

For the study of the conversion of cup plant and Sida stands, the conversion method (rotary hoe, cultivator, plough) and the subsequent crop (winter cereals, maize) were varied. The conversion and subsequent sowing of triticale was carried out for both permanent crops at the end of September 2019, maize was sown in mid-April of the following year. In the second year after conversion, the crops were swapped. Regarding Sida, a second conversion experiment was set up in spring 2021 with maize as the subsequent crop. The lowest infestation with volunteer plants was observed after conversion with the rotary hoe (approx. 7–8 cm deep), with less clear differences between the variants in the case of Sida. Roots shredded by the rotary hoe provided less reserve material for resprouting, resulting in smaller, weaker shoots with less vigour. However, individual strong shoots indicated that a slightly greater working depth should be selected and uniformly maintained. The ploughing conversion of cup plant subsequently led to the strongest growth of volunteer plants, which also appeared staggered, making control more difficult. Maize proved to be a more suitable successor crop, as it offers advantages in chemical control and better suppression of volunteer plants due to its height. An increased N supply after the conversion of the permanent crops could not be determined, but the stand duration of the investigated perennial crops (five years) was probably too short.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	5
Abstract (englisch)	6
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	23
1 Einleitung	29
2 Stand des Wissens	31
2.1 Ausdauernde Rohstoffpflanzen	31
2.1.1 Durchwachsene Silphie	31
2.1.2 Sida	32
2.2 Düngung mit Gärresten	33
2.3 Nährstoffbedarf von Silphie	35
2.4 Gärrestdüngung von Durchwachsener Silphie	37
2.5 Umbruchstrategien für Durchwachsene Silphie und Sida	37
2.5.1 Durchwachsene Silphie	38
2.5.2 Sida	39
3 Problemstellung und Zielsetzung	41
4 Material und Methoden	43
4.1 Versuchsstandort	43
4.2 Witterung im Versuchszeitraum	44
4.3 Feldversuch zur Optimierung der Stickstoffdüngung in Durchwachsener Silphie	46
4.3.1 Versuchsaufbau	46
4.3.2 Pflanzenbauliche Maßnahmen und Düngung	49
4.3.3 Probenahmen und Ertragserfassung	54
4.3.4 Witterungsbedingungen bei Ausbringung der Gärreste.....	57
4.3.5 Nährstoffbilanzierung	59
4.3.6 Drohnengestützte Erfassung von Bestandsparametern	59
4.3.6.1 Multispektralaufnahmen	59
4.3.6.2 Digitale Höhenmessung.....	62
4.3.7 Bestimmung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie	65
4.4 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen	68
4.4.1 Silphie- und Sidaumbuch (Anlagejahr 2019).....	68
4.4.1.1 Versuchsaufbau	68
4.4.1.2 Umbruch der Dauerkulturflächen	71
4.4.1.3 Pflanzenbauliche Maßnahmen in den Folgekulturen	73
4.4.1.3.1 Versuchsjahr 2020	73

4.4.1.3.2	Versuchsjahr 2021	75
4.4.1.3.3	Düngung.....	76
4.4.1.4	Boden- und Pflanzenproben.....	77
4.4.1.5	Durchwuchsbestimmung und weitere Bonituren.....	78
4.4.2	Sidaumbruch (Anlagejahr 2021).....	79
4.4.2.1	Versuchsaufbau	79
4.4.2.2	Umbruch der Sidafläche.....	80
4.4.2.3	Pflanzenbauliche Maßnahmen in den Folgekulturen.....	80
4.4.2.4	Boden- und Pflanzenproben.....	80
4.4.2.5	Durchwuchsbestimmung und weitere Bonituren.....	81
4.5	Analysemethoden	81
4.5.1	Bodenproben.....	81
4.5.2	Pflanzenproben	82
4.5.3	Gärrestproben	82
4.6	Statistische Auswertung.....	83
5	Ergebnisse und Diskussion	87
5.1	Optimierung der Stickstoffdüngung in Durchwachsener Silphie.....	87
5.1.1	Nährstoffzufuhr durch organische und mineralische Düngung	87
5.1.1.1	Zusammensetzung der verwendeten Gärreste.....	87
5.1.1.2	Nährstoffzufuhr in den Düngevarianten.....	89
5.1.2	Trockenmasseerträge	92
5.1.3	Nährstoffgehalte und -abfuhr.....	105
5.1.3.1	Nährstoffgehalte.....	105
5.1.3.2	Nährstoffabfuhr	108
5.1.4	Stickstoffbilanz	114
5.1.5	Untersuchung der Menge mineralischen Stickstoffs im Boden.....	116
5.1.5.1	Mineralischer Stickstoff im Boden zu Vegetationsbeginn	116
5.1.5.2	Mineralischer Stickstoff im Boden nach der Ernte	117
5.1.5.3	Mineralischer Stickstoff im Boden zu Vegetationsende	119
5.1.5.4	Mineralischer Stickstoff im Boden im Jahresverlauf	121
5.1.6	Drohngestützte Erfassung von Bestandsparametern	122
5.1.6.1	Spektralmessungen.....	122
5.1.6.2	Digitale Höhenmessungen	130
5.1.7	Bestimmung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie.....	134
5.1.8	Zusammenfassende Diskussion.....	141
5.2	Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen	147
5.2.1	Umbruch von Durchwachsener Silphie.....	147
5.2.1.1	Charakterisierung der letzten Ernte von Durchwachsener Silphie.....	147
5.2.1.2	Umbruchverfahren.....	148
5.2.1.3	Durchwuchs und Entwicklung der Folgekulturen	154
5.2.1.3.1	Wintertriticale im Jahr 2020	154
5.2.1.3.2	Mais im Jahr 2020	165
5.2.1.3.3	Mais im Jahr 2021	178
5.2.1.3.4	Winterweizen im Jahr 2021	185
5.2.1.4	Nährstoffabfuhr und -gehalte in den Folgekulturen.....	192
5.2.1.4.1	Erstes Jahr nach dem Umbruch (2020).....	192
5.2.1.4.2	Zweites Jahr nach dem Umbruch (2021).....	194
5.2.1.5	Mineralisationsdynamik nach dem Umbruch	196
5.2.1.5.1	Abschätzung der Stickstoffnachlieferung.....	196

5.2.1.5.2	Mineralischer Stickstoff im Boden unter den Folgekulturen.....	205
5.2.1.5.3	Schlussfolgerung Stickstoffnachlieferung.....	209
5.2.1.6	Zusammenfassende Diskussion	211
5.2.2	Umbruch von Sida	218
5.2.2.1	Charakterisierung der letzten Ernte von Sida.....	218
5.2.2.2	Umbruchverfahren	219
5.2.2.3	Durchwuchs und Entwicklung der Folgekulturen.....	224
5.2.2.3.1	Wintertriticale im Jahr 2020 (Anlagejahr 2019)	224
5.2.2.3.2	Mais im Jahr 2020 (Anlagejahr 2019)	235
5.2.2.3.3	Mais im Jahr 2021 (Anlagejahr 2021)	241
5.2.2.4	Nährstoffabfuhr und -gehalte in den Folgekulturen	251
5.2.2.4.1	Sidaumbruch Anlagejahr 2019.....	251
5.2.2.4.2	Sidaumbruch Anlagejahr 2021.....	253
5.2.2.5	Mineralisationsdynamik nach dem Umbruch.....	255
5.2.2.5.1	Abschätzung der Stickstoffnachlieferung	255
5.2.2.5.2	Mineralischer Stickstoff im Boden unter den Folgekulturen.....	259
5.2.2.5.3	Schlussfolgerung Stickstoffnachlieferung.....	262
5.2.2.6	Zusammenfassende Diskussion	262
6	Wissenstransfer	265
6.1	Wissenstransfer im Projektzeitraum	265
6.2	Wurzelbild von Durchwachsener Silphie im Bodenprofil	267
7	Schlussfolgerungen für die Praxis	271
7.1	Stickstoffdüngung von Durchwachsener Silphie.....	271
7.2	Umbruch von Durchwachsener Silphie	272
7.3	Umbruch von Sida	274
	Quellenverzeichnis	277
	Anhang	293

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Die Dauerkulturen Durchwachsene Silphie (links) und Sida (rechts).....	31
Abbildung 2:	Witterungsverlauf der Versuchsjahre 2019, 2020 und 2021 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961–1990); Datengrundlage DWD (2021) [33] [35] [31] [29], Wetterstation Straubing.....	45
Abbildung 3:	Blick auf den Feldversuch zur Optimierung der Stickstoffdüngung von Durchwachsener Silphie am 22. Juni 2021	47
Abbildung 4:	Gärrestausbringung auf die Versuchspartellen mit einem Parzellengüllefass mit seitlich geführtem Schleppschlauchverteiler im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie Ende März 2021	50
Abbildung 5:	„Quantofix N-Volumeter“ als Schnelltest zur Ermittlung des Ammoniumgehalts unmittelbar vor der Gärrestdüngung der Versuchspartellen.....	52
Abbildung 6:	Bearbeitung der Bereiche zwischen den Silphiereihen mit einer Reihenfräse zur Unkrautbekämpfung.....	53
Abbildung 7:	Ertragserfassung der Erntepartellen mit einem Häcksler mit seitlichen Trennmessern nach dem Entfernen der Stirnränder im Versuchsjahr 2021	55
Abbildung 8:	Versuchsdrohne mit Multispektralsensor (links) und RGB-Sensor (rechts).....	60
Abbildung 9:	Ausschnitt aus der Software „Mini GIS V2“ mit den Erntepartellen der Versuchsanlage im Vordergrund und den NDVI-Werten der Versuchsfläche aus der Messung vom 28. April 2020 im Hintergrund (als Farbwerte dargestellt).....	61
Abbildung 10:	Die Differenz aus digitalem Oberflächenmodell vom 23. Juli 2020 (links) und digitalem Geländemodell (Mitte) ergibt die Wuchshöhe (rechts); gleiche Farbwerte repräsentieren identische Höhen innerhalb eines Kartenausschnitts.....	63
Abbildung 11:	Einer von vier Ground Control Points zur Georeferenzierung nach dessen Platzierung Anfang April 2020.....	65
Abbildung 12:	Parzelle im Silphiebestand für die Untersuchung des Wachstumsverlaufs nach Entnahme der ersten Biomasseproben am 7. Mai 2020	67
Abbildung 13:	Blick auf die Versuchsanlage zur Untersuchung des Umbruchs von Durchwachsener Silphie am 16. Juni 2020	70
Abbildung 14:	Blick auf die Versuchsanlage zur Untersuchung des Umbruchs von Durchwachsener Silphie am 22. Juni 2021	70
Abbildung 15:	In den Umbruchversuchen eingesetzte Bodenbearbeitungsgeräte (von links nach rechts: Pflug, Grubber, Fräse)	73

Abbildung 16: Gärrestdüngung im Herbst 2019 mit schlechter Infiltration und nur sehr vereinzelt vorhandenem kräftigeren Wiederaustrieb der Silphiepflanzen	90
Abbildung 17: Erste Gärrestdüngung im Frühjahr am 25. März 2021 mit schlechter Infiltration der Gärreste in Boden	91
Abbildung 18: Gärrestausbringung in Durchwachsener Silphie zum zweiten Frühjahrstermin am 7. Mai 2020	92
Abbildung 19: Parzellen des Silphiedüngungsversuchs am 2. Juli 2020 (oben, BBCH 55) und 22. Juni 2021 (unten, BBCH 36) mit noch deutlich erkennbaren Reihen in den Parzellen mit geringer N-Düngung	93
Abbildung 20: Blick auf den Düngungsversuch mit Durchwachsener Silphie am 22. Juni 2021 während des Schossens (BBCH 36)	94
Abbildung 21: Blick auf den Düngungsversuch mit Durchwachsener Silphie am 27. Juli 2021 gegen Ende der Blüte des Haupttriebs (BBCH 67)	94
Abbildung 22: Mittleres Lager und Ineinander-Hängen der Stängel von Durchwachsener Silphie kurz vor der Ernte am 14. September 2021 in einer Parzelle mit hoher N-Düngung	95
Abbildung 23: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{\min}) im Mittel über die mineralisch und mit Gärresten gedüngten Varianten; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	98
Abbildung 24: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von der Düngerart; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	99
Abbildung 25: Bestandshöhe von Durchwachsener Silphie zu zwei Terminen während der Wachstumsphase und zur Ernte in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{\min}) im Mittel über die mineralisch und organisch mit Gärresten gedüngten Varianten; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey jeweils für einen Messtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	101
Abbildung 26: Kantenlänge der Stängel von Durchwachsener Silphie zum Erntetermin in Abhängigkeit von der Düngerart und dem N-Bedarfswert (inkl. N_{\min}) im Mittel der Jahre 2020 und 2021; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	102
Abbildung 27: Stängeldichte von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit des N-Bedarfswerts (inkl. N_{\min}), des Zeitpunkts der Frühjahrsdüngung und der Düngerart im Mittel der Jahre 2020 und 2021; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	104

Abbildung 28:	N-Gehalte des Ernteguts von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von der Düngerart und dem N-Bedarfswert (inkl. N_{\min}); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.....	107
Abbildung 29:	Stickstoffabfuhr von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von der Art der N-Düngung (links) und dem N-Bedarfswert (rechts); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.....	109
Abbildung 30:	Trockenmasseerträge und N-Abfuhr von Durchwachsener Silphie bei rein mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit von der Höhe der N-Zufuhr im Vergleich zum N-Düngebedarf nach Düngeverordnung (DüV).....	113
Abbildung 31:	Stickstoffbilanz von Durchwachsener Silphie bei Düngung mit Gärresten (nur Frühjahr bzw. Herbst und Frühjahr) und rein mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{\min}); N-Verluste und sonstige N-Einträge wurden nicht berücksichtigt	114
Abbildung 32:	Menge mineralischen Stickstoffs (N_{\min}) im Boden nach der Ernte von Durchwachsener Silphie nach Düngung mit Gärresten (nur Frühjahr bzw. Herbst und Frühjahr) oder rein mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung in den Varianten mit einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe	117
Abbildung 33:	Mineralischer Stickstoff im Boden zu Vegetationsende bei Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von der Düngerart bei einem N-Bedarfswert (inkl. N_{\min}) von 200 kg N/ha und einer einmaligen Frühjahrsdüngung; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe.....	120
Abbildung 34:	Mineralischer Stickstoff (N_{\min}) im Boden nach Düngung mit Gärresten (nur Frühjahr bzw. Herbst und Frühjahr) oder rein mineralischer N-Düngung in den Varianten mit einmaliger Frühjahrsdüngung und einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha (je Tiefe: n = 4; *: variantenscharf n = 1)	122
Abbildung 35:	Quadratische Beziehung zwischen den NDVI-Mittelwerten zu BBCH 35 zum Ernteertrag; Pseudo R^2 der Regression: 41,7 %, n = 193.....	123
Abbildung 36:	Durch Farbwerte visualisierte NDVI-Werte der Versuchsfläche aus der Messung vom 26. Mai 2020; je dunkler die Färbung, desto höher die Werte.....	124
Abbildung 37:	Silphiebestand der Versuchspartellen am 30. Juni 2020, BBCH 51–55	125
Abbildung 38:	Polynomische Beziehung 4. Grades zwischen den LCI-Mittelwerten zu BBCH 35 zum Ernteertrag; Pseudo R^2 der Regression: 61,3 %, n = 193	129

Abbildung 39: Vegetationsindex LCI zum Knospenstadium (BBCH 51–55) in Abhängigkeit von der Düngerart und der Höhe des N-Bedarfswerts (inkl. N_{\min}); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	129
Abbildung 40: Einfluss der Düngerart und des N-Bedarfswerts (inkl. N_{\min}) auf die Wuchshöhe von Durchwachsener Silphie bestimmt über Drohnenaufnahmen vom 23. Juli 2020 und 20. Juli 2021 (BBCH 65); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	133
Abbildung 41: Verlauf des Trockenmasseertrags, der Bestandshöhe und des Trockensubstanzgehalts der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Pseudo- R^2 der Regressionen: Trockenmasseertrag $R^2 = 97,5 \%$, $n = 69$, Bestandshöhe $R^2 = 98,7 \%$, $n = 70$, Trockensubstanzgehalt $R^2 = 93,2 \%$, $n = 68$	134
Abbildung 42: Entwicklung der N-, P_2O_5 -, K_2O - und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Pseudo- R^2 der Regressionen, $n = 70$: N-Gehalt $R^2 = 95,2 \%$, P_2O_5 -Gehalt $R^2 = 91,0 \%$, K_2O -Gehalt $R^2 = 94,9 \%$, MgO-Gehalt $R^2 = 28,7 \%$	137
Abbildung 43: Verlauf der Stickstoffaufnahme sowie der im Boden in 0 bis 90 cm Tiefe vorhandenen N_{\min} -Menge im Mittel der drei Versuchsjahre; die roten Quadrate stellen den N_{\min} -Vorrat im Boden dar, der unter Berücksichtigung der beiden Düngemaßnahmen den Pflanzen theoretisch zur Verfügung stand, Pseudo- R^2 der Regressionen: N-Aufnahme $R^2 = 81,4 \%$, $n = 69$, N_{\min} $R^2 = 50,0 \%$, $n = 70$	139
Abbildung 44: Verlauf der P_2O_5 -, K_2O - und MgO-Aufnahme von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Pseudo- R^2 der Regressionen, $n = 69$: P_2O_5 -Aufnahme $R^2 = 87,8 \%$, K_2O -Aufnahme $R^2 = 91,8 \%$, MgO-Aufnahme $R^2 = 89,2 \%$	140
Abbildung 45: Wiederaustrieb und Keimung von Silphiepflanzen zum Zeitpunkt des Umbruchs Ende September mit auf der Bodenoberfläche verbliebenen Pflanzenresten, die bei der Ernte nicht erfasst wurden...	149
Abbildung 46: Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Pflug am 30. September 2019	150
Abbildung 47: Teilweise nicht vollständig gewendete bzw. eingemischte Wurzelstöcke in der Pflugvariante aufgrund eines mangelnden Tiefeneinzugs des Pflugs.....	150
Abbildung 48: Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber am 30. September 2019	151
Abbildung 49: Bodenoberfläche nach Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber auf ca. 20 bis 25 cm Arbeitstiefe	152
Abbildung 50: Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse am 30. September 2019	153

Abbildung 51:	Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse auf ca. 7 bis 8 cm Arbeitstiefe.....	153
Abbildung 52:	Mit der Fräse zerkleinerter Übergangsbereich von Wurzel zum Spross von Durchwachsener Silphie mit Knospenansätzen und intaktem Wiederaustrieb nach der Ernte	154
Abbildung 53:	Behinderung des Sävorgangs durch an der Bodenoberfläche vorhandene Wurzelballen von Durchwachsener Silphie nach dem Umbruch mit einem Grubber	155
Abbildung 54:	Zahlreiche Regenwurmröhren an der Bodenoberfläche sieben Tage nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse	156
Abbildung 55:	Im Herbst aufgelaufene Silphiepflanzen und geschädigte Triticalepflanzen mit verzögerter Entwicklung und kleineren, teilweise rosa bis violett gefärbten Blättern nach dem Silphieumbruch mit einer Fräse.....	157
Abbildung 56:	Entwicklung der nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber im Jahr 2019 gesäten Triticale zu Vegetationsende am 28. November.....	157
Abbildung 57:	Kräftiger Silphiedurchwuchs nach dem Umbruch mit einem Grubber in nachfolgend gesäter Wintertriticale am 6. April 2020.....	158
Abbildung 58:	Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im ersten Jahr nach dem Umbruch in nachfolgend gesäter Wintertriticale in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	159
Abbildung 59:	Blick auf einen Teilbereich des Silphieumbruchversuchs mit den Umbruchvarianten Fräse (obere Reihe) und Pflug (untere Reihe).....	160
Abbildung 60:	Silphietriebe in Triticale mit leichten Herbizidschäden am 21. April 2020, etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation im Frühjahr....	161
Abbildung 61:	Unterdrückung des Silphiedurchwuchses durch Beschattung während der Schossphase der Triticale im Mai.....	162
Abbildung 62:	Silphiedurchwuchs nach dem Umbruch mit dem Pflug in nachfolgend gesäter Triticale kurz vor deren Ernte am 14. Juli 2020.....	163
Abbildung 63:	Korn- und Stroherträge von Triticale (86 % TS) nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	164
Abbildung 64:	Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im ersten Jahr nach dem Umbruch in nachfolgend gesättem Mais in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	166
Abbildung 65:	Kräftiger und zahlreicher Silphiedurchwuchs nach dem Auflaufen des Mais (BBCH 12) am 5. Mai 2020 in den gegrubberten (oben rechts) und gepflügten (unten links) Parzellen im Vergleich zum Umbruch mit einer Fräse (oben links und unten rechts).....	167

Abbildung 66:	Kräftiger Silphiedurchwuchstrieb aus tief eingearbeiteten Knospen in der gepflügten Variante (links) und weniger kräftige Triebe aus zerkleinerten, flach eingemischten Wurzelteilen nach dem Umbruch mit der Fräse (rechts) am 7. Mai 2020	168
Abbildung 67:	Durch Herbizideinsatz in Mais geschädigte kräftige Silphietriebe in einer mit dem Pflug umgebrochenen ehemaligen Silphieparzelle am 3. Juni 2020 etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation.....	169
Abbildung 68:	Nach dem Herbizideinsatz an der Bodenoberfläche erschienene Silphietriebe ohne Herbizidschädigung am 3. Juni 2020 in einer mit dem Pflug umgebrochenen Silphieparzelle.....	170
Abbildung 69:	Weitgehend intakter und kräftiger Silphietrieb neben stark geschädigten und teilweise fast vollständig abgestorbenen Trieben am 3. Juni 2020, etwa zwei Wochen nach dem Herbizideinsatz in den Maisparzellen	170
Abbildung 70:	Beginnende Regeneration der durch den Herbizideinsatz in Mais geschädigten Silphietriebe am 16. Juni 2020, etwa vier Wochen nach der Herbizidanwendung.....	171
Abbildung 71:	Langsame Regeneration der durch den Herbizideinsatz geschädigten Silphietriebe, überwachsen von den Maispflanzen, gegen Ende Juni im ersten Jahr nach dem Umbruch.....	172
Abbildung 72:	Silphiedurchwuchs aus zerkleinerten Wurzelteilen mit unterschiedlich langen unterirdischen Sprossabschnitten am 3. Juni 2020, nach dem Umbruch mit einer krummentief arbeitenden Fräse Anfang April 2020...	174
Abbildung 73:	Schwach entwickelter Silphiedurchwuchs am 8. Oktober 2020 nach der Ernte einer Mais-Sorghum-Mischung und dem vorausgegangenen Umbruch mit einer krummentief arbeitenden Fräse im Frühjahr	175
Abbildung 74:	Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.....	176
Abbildung 75:	Silphiedurchwuchs in Silomais Anfang September 2020, nach dem Umbruch der Dauerkultur mit einem Pflug im Herbst des Vorjahrs.....	177
Abbildung 76:	Bis auf einzelne kräftige Silphietriebe weitgehend durchwuchsfreie Silomaisparzelle Anfang September 2020, nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse im Herbst des Vorjahrs	177
Abbildung 77:	Durch Flachgrubberbearbeitung am 23. April 2021 abgeschnittener Wurzelballen von Durchwachsener Silphie nach ursprünglichem Umbruch mit einem Grubber.....	178
Abbildung 78:	Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im zweiten Jahr nach dem Umbruch in Mais (Vorfrucht: Wintertriticale) in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.....	179

Abbildung 79:	Durchwuchsbesatz am 1. Juni 2021, drei Tage vor der Herbizidapplikation in Mais im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug (links) bzw. Fräse (rechts)	180
Abbildung 80:	Undeterminiertes Wachstum von Silphiedurchwuchstrieben infolge der Herbizidapplikation in Mais im Jahr 2021, etwa eine Woche nach der Ausbringung	181
Abbildung 81:	Aufrollen der Blätter und Absterben der meisten Silphietriebe am 17. Juni 2021, etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation in Mais ...	181
Abbildung 82:	Silomais fast ohne Silphiedurchwuchs kurz vor der Ernte Ende September im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse	183
Abbildung 83:	Silomais mit geringem Silphiedurchwuchs (meist ohne Schossen) kurz vor der Ernte Ende September im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber	184
Abbildung 84:	Silomais mit deutlichem Silphiedurchwuchs (meist ohne Schossen) kurz vor der Ernte Ende September im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Pflug	184
Abbildung 85:	Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	185
Abbildung 86:	Erster Silphiedurchwuchs in Winterweizen Ende März 2021 im zweiten Jahr nach dem Umbruch	186
Abbildung 87:	Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im zweiten Jahr nach dem Umbruch in Winterweizen (Vorrucht: Mais) in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	187
Abbildung 88:	Silphiedurchwuchs in Winterweizen mit Herbizidschädigung durch Sulfonylharnstoffpräparat etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation im Jahr 2021	188
Abbildung 89:	Starke Schädigung eines Silphiedurchwuchstrieb am Rand einer Weizenparzelle am 1. Juni 2021, elf Tage nach der zweiten Herbizidmaßnahme	189
Abbildung 90:	Verkümmerte Silphietriebe mit leichter Regeneration unter Winterweizen kurz vor der Ernte im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie	190
Abbildung 91:	Korn- und Stroherträge von Winterweizen (86 % TS) im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	191
Abbildung 92:	Stickstoffabfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) im Jahr 2020 nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst	

	2019 mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	193
Abbildung 93:	Stickstoffabfuhr von Silomais und Winterweizen (Korn und Stroh) im Jahr 2021 nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	195
Abbildung 94:	Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs (N_{\min}) im Boden nach der letzten Ernte von Durchwachsener Silphie im September 2019 und dem anschließenden Umbruch Ende September; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe	197
Abbildung 95:	N-Abfuhr im ersten und zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie und auf angrenzender Praxisfläche in den Parzellen, in denen eigentlich keine N-Düngung ausgebracht werden sollte (Praxis: $n = 3$, Mais 2020 bzw. Weizen 2021 $n = 7$, Triticale 2020 bzw. Mais 2021 $n = 4$); Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	201
Abbildung 96:	N-Abfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) und N_{\min} -Mengen im Boden zu Vegetationsbeginn, nach der Ernte der Folgekultur und zu Vegetationsende im ersten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in den Parzellen ohne N-Düngung und auf angrenzender Praxisfläche (Mais Praxis: $n = 3$, Mais Umbruch: $n = 7$, Triticale Umbruch: $n = 4$); Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen der N-Abfuhr bzw. N_{\min} -Mengen für die gesamte Beprobungstiefe	202
Abbildung 97:	Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs (N_{\min}) im Boden auf einer an den Silphieumbruchversuch angrenzenden Praxisfläche; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe	203
Abbildung 98:	Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}) nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in den Folgekulturen Triticale (1. Jahr) und Mais (2. Jahr) zu Vegetationsbeginn, nach der Ernte und zu Vegetationsende; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey jeweils innerhalb eines Probenahmetermins, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe	205
Abbildung 99:	Schwache Entwicklung der nach Triticale gesäten Zwischenfrucht mit Dauerkulturdurchwuchs Ende November 2020	206
Abbildung 100:	Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}) nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in den Folgekulturen Mais (1. Jahr) und Winterweizen (2. Jahr) zu Vegetationsbeginn, nach der Ernte und zu Vegetationsende; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey jeweils innerhalb eines Probenahmetermins, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe	207

Abbildung 101: Aufsicht auf einen Wurzelstock von Durchwachsener Silphie mit zahlreichen rosa gefärbten Knospen zum Zeitpunkt des beginnenden Austriebs der Pflanze im Frühjahr	211
Abbildung 102: Vertikale Ausdehnung der Knospen bildenden Strukturen der Wurzelstöcke von Durchwachsener Silphie.....	213
Abbildung 103: Wurzelballen von Sida mit relativ dicken Seitenwurzeln und hell gefärbten Erneuerungsknospen an der Basis der Triebe	220
Abbildung 104: Fünf Jahre alter Sidabestand in Wolferkofen nach dem Umbruch mit einem Pflug am 26. September 2019	221
Abbildung 105: Zehn Jahre alter Sidabestand im TFZ-Schaugarten nach dem Umbruch mit einem Pflug am 21. April 2021	221
Abbildung 106: Sidabestand nach dem Umbruch mit einem Grubber am 26. September 2019.....	222
Abbildung 107: Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Sida mit einem Grubber am 26. September 2019.....	223
Abbildung 108: Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Sida mit einer Fräse am 26. September 2019.....	224
Abbildung 109: Saatbett nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einer Fräse und nachfolgender Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge	225
Abbildung 110: Saatbett nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einem Grubber und nachfolgender Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge .	226
Abbildung 111: Saatbett nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einem Pflug und nachfolgender Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge	226
Abbildung 112: Blick auf einen Wurzelballen von Sida mit weißlichen Erneuerungsknospen am Triebansatz zum Umbruchzeitpunkt Ende September.....	227
Abbildung 113: Intakte Knospen bei oberflächlich eingearbeiteten Wurzelstöcken von Sida zu Vegetationsende im Versuchsjahr 2019 nach dem Ende September erfolgten Umbruch	228
Abbildung 114: Durchwuchs von Sida nach einem Umbruch im Herbst 2019 in nachfolgend gesäter Wintertriticale in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	229
Abbildung 115: Sidadurchwuchs nach dem Umbruch mit einem Grubber im Herbst 2019 in nachfolgend gesäter Triticale zu Beginn des Schossens am 21. April 2020	230
Abbildung 116: Ausbildung von Sidatrieben an ehemaligen Seitenwurzeln Anfang Mai 2020 nach dem Umbruch von Sida mit einem Grubber im Herbst 2019	231
Abbildung 117: Sidadurchwuchs überragt Triticale deutlich gegen Ende der Abreife der Triticale am 14. Juli 2020	232

Abbildung 118: Korn- und Stroherträge von Triticale (86 % TS) nach dem Umbruch von Sida mit Pflug, Grubber oder Fräse im Herbst 2019; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	233
Abbildung 119: Durchwuchs von Sida nach einem Umbruch im Herbst 2019 in der Folgekultur Mais in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	235
Abbildung 120: Kräftiger Sidadurchwuchs in Mais am 5. Mai 2020 nach dem Umbruch im Herbst des Vorjahrs	236
Abbildung 121: Wiederaustrieb von Sida aus zerkleinerten Wurzelteilen nach dem Umbruch mit einem Grubber (links, 13. Mai 2020) oder einer krumentiefen Bearbeitung mit einer Fräse (rechts, 3. Juni 2020).....	237
Abbildung 122: Durch den Herbizideinsatz in Mais geschädigte Sidatriebe am 28. Mai 2020, etwa eine Woche nach der Herbizidapplikation.....	238
Abbildung 123: Durch Herbizidmaßnahme geschädigter Sidatrieb mit beginnendem Wiederaustrieb im unteren Stängelbereich am 16. Juni 2020, etwa vier Wochen nach der Herbizidapplikation in Mais.....	238
Abbildung 124: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Sida mit Pflug, Grubber oder Fräse im Herbst 2019; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.....	240
Abbildung 125: Sidadurchwuchs nach dem Umbruch im Herbst 2019 in nachfolgendem Silomais zum Erntetermin am 15. September 2020 in der Grubbervariante.....	240
Abbildung 126: Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Sida im Frühjahr 2021 mit einer Fräse (links) bzw. einem Pflug (rechts) und nachfolgender Saatbettbereitung nach der Maissaat	241
Abbildung 127: Erster Sidadurchwuchs am 6. Mai 2021 nach dem Umbruch des Sidabestands am 21. April in nachfolgend gesättem Mais.....	242
Abbildung 128: Durchwuchs von Sida nach einem Umbruch im Frühjahr 2021 in der Folgekultur Mais in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen	243
Abbildung 129: Sidadurchwuchs nach dem Umbruch im Frühjahr 2021 mit einem Pflug in nachfolgend gesättem Mais am 1. Juni, kurz vor der Herbizidapplikation	243
Abbildung 130: Durch Krähenfraß während des Feldaufgangs stark ausgedünnte Maisparzellen der Versuchsanlage zur Untersuchung des Sidaumbruchs im TFZ-Schaugarten am 9. August 2021	244

Abbildung 131: Starke Schädigung der Sidatriebe am 17. Juni 2021, zwei Wochen nach dem Herbizideinsatz in dem nach dem Umbruch im Frühjahr gesäten Mais.....	245
Abbildung 132: Später erschienene Sidatriebe ohne Herbizidschäden neben stark geschädigten Trieben am 17. Juni 2021 zwei Wochen nach der Herbizidapplikation.....	245
Abbildung 133: Sidadurchwuchs in Mais Ende September vor der Ernte nach dem Umbruch mit einer Fräse im Frühjahr.....	247
Abbildung 134: Sidadurchwuchs in Mais Ende September vor der Ernte nach dem Umbruch mit einem Pflug im Frühjahr.....	247
Abbildung 135: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Sida mit Pflug oder Fräse im Frühjahr 2021; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.....	248
Abbildung 136: Intakte Sidawurzeln im Oktober 2021 nach der Maisernte in den mit dem Pflug im Frühjahr 2021 umgebrochenen Parzellen mit Resten der Sidadurchwuchstriebe (grünlich).....	250
Abbildung 137: Abgestorbene und teilweise verrottete Sidawurzeln im Oktober 2021 nach der Maisernte, entnommen aus den mit Fräse im Frühjahr 2021 umgebrochenen Parzellen.....	250
Abbildung 138: Stickstoffabfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) im Jahr 2020 nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen.....	252
Abbildung 139: N-Abfuhr von Mais nach dem Umbruch von Sida mit Pflug oder Fräse im Frühjahr (links) und N_{\min} -Mengen vor dem Umbruch zu Vegetationsbeginn und nach der Maisernte (rechts).....	254
Abbildung 140: Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{\min}) nach der letzten Ernte von Sida im September 2019 und deren Umbruch Ende September; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe.....	255
Abbildung 141: N-Abfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) und N_{\min} -Mengen im Boden zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte der Folgekultur nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in den Parzellen ohne N-Düngung und auf einer angrenzenden Praxisfläche (Mais Praxis: $n = 3$, Mais Umbruch: $n = 7$, Triticale Umbruch: $n = 4$); Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen der N-Abfuhr bzw. N_{\min} -Mengen für die gesamte Beprobungstiefe.....	257
Abbildung 142: Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{\min}) auf einer zum Sidaumbruchversuch in Wolferkofen angrenzenden Praxisfläche von Ende November 2019 bis Ende November 2020; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe.....	258

Abbildung 143: Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}) nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesäter Wintertriticale (mit N-Düngung) zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe 259

Abbildung 144: Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}) nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesättem Silomais (mit N-Düngung) zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe 261

Abbildung 145: Besuchergruppe bei der Feldführung am TFZ-Feldtag, 28. August 2019 in Straubing, vor einer Versuchsfläche mit Durchwachsener Silphie 265

Abbildung 146: Erläuterungen zum Bodenprofil und zum Wurzelsystem der Durchwachsenen Silphie am TFZ-Feldtag, 28. August 2019 in Straubing, durch Wissenschaftler Sebastian Parzefall 266

Abbildung 147: Vorstellung der Versuche durch zuständigen Wissenschaftler und Diskussion mit Teilnehmerinnen der Expertenführung im Rahmen der offenen Feldversuche am TFZ am 26. August 2021 267

Abbildung 148: Bodenprofil angrenzend an eine Silphiefläche mit freigelegtem Wurzelsystem und teilweise bis über 200 cm tief reichenden Wurzeln (insbesondere im oberen Profilbereich bereits relativ stark ausgetrocknet) 268

Abbildung 149: Detailaufnahme einer bis auf über 2,5 m Tiefe reichenden Silphiewurzel im Bereich von 60 bis 80 cm Bodentiefe 269

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Nährstoffgehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie zur Ernte	36
Tabelle 2:	Faktorielle Struktur des Feldversuchs zur Optimierung der Stickstoffdüngung von Durchwachsener Silphie	48
Tabelle 3:	Witterungsbedingungen (Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer) am Tag der Gärrestausbringungen und den jeweiligen drei Folgetagen; Datengrundlage DWD (2021) [33] [35] [32] [34], Wetterstation Straubing	58
Tabelle 4:	Berechnungsformeln weiterer Vegetationsindizes	62
Tabelle 5:	Stickstoffdüngung im Versuch zur Bestimmung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie	67
Tabelle 6:	Pflanzenschutzmaßnahmen in den Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie und Sida im Versuchsjahr 2020	74
Tabelle 7:	Pflanzenschutzmaßnahmen in den Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie und Sida im Versuchsjahr 2021	76
Tabelle 8:	Probenahmen zur Untersuchung des Bodens auf mineralischen Stickstoff im Versuch zur Untersuchung des Umbruchs von Durchwachsener Silphie und Sida	78
Tabelle 9:	Untersuchungsparameter und angewandte Analysemethoden bei Bodenproben [140]	82
Tabelle 10:	Untersuchungsparameter und angewandte Analysemethoden bei Pflanzenproben [139]	82
Tabelle 11:	Untersuchungsparameter und angewandte Analysemethoden bei Gärrestproben	83
Tabelle 12:	Stoffliche Zusammensetzung der ausgebrachten Gärreste in den Versuchsjahren	88
Tabelle 13:	Nährstoffgehalte von Durchwachsener Silphie im Mittel der Versuchsjahre in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{min}) und der Düngerart (Gärrest F = Gärrest nur Frühjahr, Gärrest H + F = Gärrest Herbst und Frühjahr, min = mineralisch); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey	106
Tabelle 14:	Korrelationskoeffizienten nach Pearson sowie Grad der polynomischen Beziehung des NDVI zum Trockenmasseertrag zur Ernte im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie	123
Tabelle 15:	NDVI-Werte gegen Ende des Schossens und im Knospenstadium von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit der Düngerart und des N-Bedarfswerts; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen	

	signifikante Mittelwertdifferenzen nach nicht parametrischem Friedman-Test	126
Tabelle 16:	Korrelationskoeffizienten nach Pearson sowie Grad der polynomischen Beziehung des LCI und SAVI zum Trockenmasseertrag zur Ernte im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie	128
Tabelle 17:	Nährstoffgehalte und -abfuhr des Ernteguts von Durchwachsener Silphie bei rein mineralischer Düngung oder Düngung mit Gärresten im für den Umbruch vorgesehenen Silphieversuch im letzten Erntejahr; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen.....	148
Tabelle 18:	Bestandsdichte, Wuchshöhe und Tausendkornmasse (TKM) von Triticale mit und ohne Stickstoffdüngung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey	165
Tabelle 19:	Bestandsdichte, Wuchshöhe zur Blüte und Tausendkornmasse (TKM) von Winterweizen nach dem Umbruch mit Pflug, Grubber oder Fräse und durchgeführter Stickstoffdüngung sowie im Mittel der ungedüngten Parzellen.....	192
Tabelle 20:	Nährstoffgehalte und -abfuhr von Triticale und Mais im ersten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie bei leicht reduzierter mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey	194
Tabelle 21:	Nährstoffgehalte und -abfuhr von Winterweizen und Mais im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie bei praxisüblicher N-Düngung in Abhängigkeit von der Umbruchmethode	196
Tabelle 22:	Nährstoffgehalte und Nährstoffabfuhr des Ernteguts von Sida bei rein mineralischer Düngung oder Düngung mit Gärresten im für den Umbruch vorgesehenen Sidaversuch im letzten Erntejahr	219
Tabelle 23:	Bestandsdichte, Wuchshöhe und Tausendkornmasse (TKM) von Triticale mit und ohne Stickstoffdüngung nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einem Pflug, Grubber oder einer Fräse; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey	234
Tabelle 24:	Nährstoffgehalte und -abfuhr von Triticale und Mais nach dem Umbruch von Sida bei leicht reduzierter mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey.....	253
Tabelle 25:	Nährstoffgehalte und -abfuhr von Mais nach dem Umbruch von Sida im Frühjahr 2021 in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey	254

Tabelle 26:	Probenahmezeitpunkte für die Erfassung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2019.....	293
Tabelle 27:	Probenahmezeitpunkte für die Erfassung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2020.....	293
Tabelle 28:	Probenahmezeitpunkte für die Erfassung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2021.....	294
Tabelle 29:	Beprobungsschärfe der N _{min} -Untersuchungen im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie	294
Tabelle 30:	Düngebedarfsermittlung der Folgekulturen Silomais und Triticale nach Umbruch von Durchwachsener Silphie (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2020	295
Tabelle 31:	Düngebedarfsermittlung der Folgekulturen Silomais und Triticale nach Umbruch von Sida (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2020	295
Tabelle 32:	Düngebedarfsermittlung von Winterweizen nach Umbruch von Durchwachsener Silphie (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2021.....	296
Tabelle 33:	Düngebedarfsermittlung von Silomais nach Umbruch von Durchwachsener Silphie (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2021.....	296
Tabelle 34:	Durch mineralische P-/K-Düngung im Versuch zum Umbruch von Durchwachsener Silphie am 29. März 2021 ausgebrachte Nährstoffmengen.....	297
Tabelle 35:	Ausgebrachte N-Mengen für das Erntejahr 2019 im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie	297
Tabelle 36:	Ausgebrachte N-Mengen für das Erntejahr 2020 im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie	298
Tabelle 37:	Ausgebrachte N-Mengen für das Erntejahr 2021 im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie	299
Tabelle 38:	Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha) von Durchwachsener Silphie und N _{min} -Mengen im Boden in 0 bis 90 cm Tiefe zur Ernte (N _{min} E) und zu Vegetationsende (N _{min} VE) im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre (N _{min} VE nur zwei Jahre); Gär F = Gärrest nur Frühjahr, Gär H+F = Gärrest Herbst und Frühjahr, min = mineralisch, 1 T = 1 Termin, 2 T = 2 Termine, 3 Jahre: n = 12, 2 Jahre: n = 8 (Ausnahmen: ¹¹ : n = 11, ¹⁰ : n = 10, ⁹ : n = 9, ⁸ : n = 8)	300
Tabelle 39:	Mittelwerte (n = 12) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P ₂ O ₅ -Gehalte (P ₂ O ₅), K ₂ O-Gehalte (K ₂ O) und MgO-Gehalte des Ernteguts von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Gär F = Gärrest nur Frühjahr, Gär H+F = Gärrest Herbst und Frühjahr, min = mineralisch, 1 T = 1 Termin, 2 T = 2 Termine (*: n = 11)	301
Tabelle 40:	Korrelation nach Pearson zwischen verschiedenen Vegetationsindizes und dem Trockenmasseertrag zur Ernte in den Jahren 2019 (n = 62), 2020 (n = 61) und 2021 (n = 70).....	302

Tabelle 41:	Mittlere Abweichung berechnet als RMSE (cm) zwischen den aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Koordinaten der Höhenreferenzen und den tatsächlichen Koordinaten	302
Tabelle 42:	Mittlere Abweichung berechnet als RMSE (m) zwischen den händisch gemessenen Pflanzenhöhen der Silphieparzellen und den anhand verschiedener Quantilbereiche aus dem Wuchshöhenmodell abgeleiteten Pflanzenhöhen	303
Tabelle 43:	Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen (R^2) der händisch gemessenen Pflanzenhöhen der Silphieparzellen und der anhand verschiedener Quantilbereiche aus dem Wuchshöhenmodell abgeleiteten Pflanzenhöhen	303
Tabelle 44:	Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha), Trockensubstanzgehalte (TS) und N_{\min} -Mengen (N_{\min}) im Boden im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2019; *: $n = 1$	304
Tabelle 45:	Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P_2O_5 -Gehalte (P_2O_5), K_2O -Gehalte (K_2O) und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2019	304
Tabelle 46:	Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha), Trockensubstanzgehalte (TS) und N_{\min} -Mengen (N_{\min}) im Boden im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2020	305
Tabelle 47:	Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P_2O_5 -Gehalte (P_2O_5), K_2O -Gehalte (K_2O) und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2020	305
Tabelle 48:	Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha), Trockensubstanzgehalte (TS) und N_{\min} -Mengen (N_{\min}) im Boden im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2021	306
Tabelle 49:	Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P_2O_5 -Gehalte (P_2O_5), K_2O -Gehalte (K_2O) und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2021	306
Tabelle 50:	Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebje Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der ersten Folgekultur Wintertriticale an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020	307

Tabelle 51:	Mittelwerte (n = 4) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der ersten Folgekultur Silomais an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020.....	307
Tabelle 52:	Mittelwerte (n = 4) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der zweiten Folgekultur Winterweizen an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2021	308
Tabelle 53:	Mittelwerte (n = 4) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der zweiten Folgekultur Silomais an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2021.....	308
Tabelle 54:	Mittelwerte (n = 4) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesäter Wintertriticale an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020.....	309
Tabelle 55:	Mittelwerte (n = 4) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesättem Silomais an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020	309
Tabelle 56:	Mittelwerte (n = 4) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Sida im Frühjahr 2021 in nachfolgend gesättem Silomais an verschiedenen Boniturterminen.....	310
Tabelle 57:	Nährstoffgehalte der Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche..	310
Tabelle 58:	Nährstoffabfuhr der Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche..	311
Tabelle 59:	Nährstoffgehalte von Triticale und Mais nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche.....	311
Tabelle 60:	Nährstoffabfuhr von Triticale und Mais nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche.....	312

1 Einleitung

Die Produktion von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen ist ein wichtiger Teil der Energiewende und unterstützt die nachhaltige Wertschöpfung im ländlichen Raum. Um die Erzeugung von Biogassubstraten weiterzuentwickeln, werden alternative Pflanzenarten benötigt, die gegenüber klassischen Substratpflanzen wie Mais einen volkswirtschaftlichen Mehrwert bieten. Zu den aussichtsreichsten Alternativen zählt die ausdauernde Energiepflanze Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) [143] [9], während sich die ebenfalls ausdauernde Staudenpflanze Sida (*Sida hermaphrodita* L.) für eine Biogasnutzung wegen ungenügender Methanerträge nur als bedingt geeignet erwiesen hat und über eine Festbrennstoffnutzung deutlich besser verwertet werden kann [96] [15] [122] [51] [74] [69] [146]. Die Durchwachsene Silphie (Silphie) zeigt eine potenziell gute Eignung als Biogassubstrat mit Methanausbeuten ca. 15 bis 20 % unterhalb von Silomais [13] [51] [65] [69] [146]. Zusammen mit dem hohen Biomasseertrag [12] [69] [146] und der Einführung einer kostengünstigeren Etablierung mittels Saatverfahren hat dies zu einer Zunahme der bayerischen Anbaufläche beigetragen. Im Zeitraum von 2015 bis 2020 stieg diese von etwa 65 ha auf 1769 ha (davon 764 ha ökologische Vorrangfläche) an, wohingegen für Sida ein Rückgang von 31 auf 15 ha zu verzeichnen war [130] [131].

Wie andere Dauerkulturen bietet die Durchwachsene Silphie eine nahezu ganzjährige Bodenbedeckung und Bodenruhe, da während der Nutzungsdauer keine Bodenbearbeitung erfolgt [43] [56]. Zudem ist der Boden dauerhaft durchwurzelt, so dass der Anbau von Durchwachsener Silphie zum Schutz vor Bodenerosion beiträgt [114]. Darüber hinaus zeigt sich ein positiver Einfluss auf die Bodenstruktur, das Bodenleben und vermutlich auch den Humusgehalt [27] [118] [114]. Die Durchwachsene Silphie bietet durch ihre lange Blühdauer, die von Juli bis September reicht, zu einem relativ späten Zeitpunkt noch Nahrung für Insekten [27]. Durch die Stickstoff-Aufnahme (N-Aufnahme) des Wiederaustriebs nach der Ernte im Herbst und die Verringerung von Oberflächenabfluss kann außerdem der Nährstoffaustrag reduziert und ein Beitrag zum Gewässerschutz geleistet werden [27] [69] [79]. Die Nutzungsdauer von Dauerkulturbeständen kann bei Durchwachsener Silphie über zehn Jahre und bei Sida etwa zwanzig Jahre betragen, ohne Ertragsrückgänge hinnehmen zu müssen [16] [137] [13].

Als Nebenprodukt der Biogasproduktion entstehen Gärreste. Um weitestgehend geschlossene Stoffkreisläufe zu erreichen, sollten diese Mehrnährstoffdünger wieder auf landwirtschaftliche Flächen rückgeführt werden. Wird Durchwachsene Silphie in Biogasanlagen eingesetzt, so sollte diese folglich im Rahmen einer sinnvollen Nährstoffverwertung auch mit Gärresten gedüngt werden. Die Einsparung mineralischer Düngemittel wirkt sich dabei insbesondere bezüglich des Stickstoffs positiv auf die Treibhausgasbilanz aus [58]. Für eine ausreichende Stickstoffausnutzung sind jedoch verlustmindernde Ausbringverfahren erforderlich [128]. Des Weiteren fördert die ausgebrachte organische Substanz den Humusaufbau und das Bodenleben [58] [23] [94]. Humus wiederum verbessert die Aggregatstabilität und Pufferfunktionen des Bodens, wodurch dessen Widerstandsfähigkeit gegenüber Extremwetterereignissen erhöht werden kann. Außerdem kann durch die Steige-

zung des Nährstoffspeichervermögens des Bodens der Austrag von Nährstoffen ins Grundwasser reduziert werden.

Trotz des ausdauernden Wuchstyps der entsprechenden Pflanzenarten müssen auch Flächen mit Dauerkulturen spätestens bei Eintreten deutlicher Ertragsdepressionen oder der Beendigung von Pachtverhältnissen umgebrochen werden. Da sich die Praxisetablierung dieser Kulturen noch in der Anfangsphase befindet, liegen hierzu nur wenige Informationen vor. Somit ist es bedeutend, entsprechendes Wissen zu erlangen, um interessierten Landwirten bereits vor der Anlage Informationen über die spätere Rückführung der Fläche in die geregelte Fruchtfolge geben zu können.

2 Stand des Wissens

2.1 Ausdauernde Rohstoffpflanzen

Zu den ökologischen Vorteilen ausdauernder Energiepflanzen zählt in erster Linie die Tatsache, dass durch den Wegfall der jährlichen Bodenbearbeitung eine lange Bodenruhe erreicht wird. Darüber hinaus wird weitgehend über die ganze Vegetationsperiode eine Bodenbedeckung geboten und der Pflanzenschutzmitteleinsatz beschränkt sich in der Regel auf Herbizidanwendungen im Etablierungsjahr [69] [114]. Zusätzlich ist durch die hohe Zufuhr an Streu- und Wurzelmasse gegenüber dem Anbau von Silomais ein Anstieg der Bodenhumusgehalte zu erwarten [55] [44] [27] [116] [59] [114]. Blühende Arten wie die Durchwachsene Silphie und Sida dienen durch ihr Angebot an Pollen und Nektar zudem als Nahrungsquelle für Insekten und liefern dadurch einen zusätzlichen ökologischen Mehrwert [27] [69] (Abbildung 1).



Abbildung 1: Die Dauerkulturen Durchwachsene Silphie (links) und Sida (rechts)

2.1.1 Durchwachsene Silphie

Die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) ist eine ausdauernde Staude aus der Familie der Korbblütler (Asteraceae). Sie stammt aus den Prärien im östlichen Teil Nordamerikas und wurde etwa um 1750 in Europa eingeführt [132]. In ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet tritt sie hauptsächlich in Bereichen mit hoher Boden- und Luftfeuchte wie Flusstälern, Fluss- und Seeufern auf [123]. Zunächst wurde sie als mögliche Futterpflanze

untersucht [123] [40]. Aktuell wird die Silphie dank ihrer hohen Biomasseproduktion und Methanausbeute von ca. 250 bis 290 IN/kg oTM auch als Energiepflanze zur Biogaserzeugung genutzt [13] [65] [27] [53] [133] [69] [146]. Wegen des natürlichen Vorkommens auf Standorten mit guter Wasserversorgung verfügt die Pflanze aber über kein herausragendes Wasseraneignungsvermögen [119]. Auch die Wassernutzungseffizienz liegt unter dem Niveau von Mais [120] und die trockenheitsbedingten Ertragsrückgänge sind höher als bei Mais, so dass für hohe Silphieerträge eine gute Wasserverfügbarkeit erforderlich ist [117]. Im Jahr der Etablierung verbleibt die C3-Pflanze im Rosettenstadium [123]. Ab dem zweiten Standjahr erfolgt im Frühjahr ab etwa 5 °C Tagesdurchschnittstemperatur ein Wiederaustrieb [123]. Die Pflanze wächst anschließend in die Höhe und bildet während der Blühphase durch wiederholte Verzweigung oberhalb der Terminalknospe zahlreiche Blütenstände, wodurch eine lange Blühdauer erreicht wird [132] [27]. Der Stängel ist vierkantig und die Pflanze erreicht eine Wuchshöhe von über drei Meter [123]. Die Nutzungsdauer beträgt mindestens zehn Jahre [132] [13]. Im Rahmen von Untersuchungen des Instituts für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL-IAB) konnte in Versuchen [50] sowie auf Praxisflächen [22] bei Silphie eine größere Anzahl, Biomasse und Artenzahl an Regenwürmern im Vergleich zu einer konventionellen Ackerbewirtschaftung festgestellt werden. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch von EMMERLING (2014) [43] und DAUBER et al. (2015) [27] beobachtet. Darüber hinaus bietet die Durchwachsene Silphie ein attraktives Pollen- und Nektarangebot für Honigbienen, Hummeln und Schwebfliegen [69]. Ein weiterer ökologischer Vorteil der Durchwachsenen Silphie und auch anderer Dauerkulturen besteht darin, dass nach der Ernte nur sehr geringe Mengen mineralischen Stickstoffs (N_{min}) im Boden verbleiben [13] [56] [133] [59] [50]. Durch die N-Aufnahme des Wiederaustriebs nach der Ernte im Herbst kann eine zusätzliche temporäre Stickstoffspeicherung erfolgen, so dass die Durchwachsene Silphie einem Nitrataustrag über Winter effektiv entgegenwirkt [27] [133] [61]. Die Durchwachsene Silphie zeigt somit insgesamt eine ähnliche ökologische Wirkung wie Ackergras und bietet insbesondere gegenüber Mais Vorteile für den Gewässer- und Bodenschutz [61].

2.1.2 Sida

Die ausdauernde Energiepflanze Sida (*Sida hermaphrodita* L.) gehört zur Familie der Malvengewächse (Malvaceae). Ihr natürliches Verbreitungsgebiet beschränkt sich ebenfalls auf Gebiete im Osten Nordamerikas [129]. Dort wächst sie wie Durchwachsene Silphie überwiegend in feuchten Habitaten im Bereich von Flussauen [129]. Im ersten Anbaujahr investiert die C3-Pflanze einen Großteil der Assimilate in die Ausbildung ihres Wurzelsystems, so dass der Aufwuchs im Etablierungsjahr zu gering für eine Nutzung bleibt. Zusätzlich zur langsamen Jugendentwicklung kann die Pflanze aufgrund ihrer Wuchsform für keine ausreichende Beikrautunterdrückung sorgen, so dass sich die Etablierung geschlossener Bestände schwierig gestaltet [142] [69]. Ab dem zweiten Jahr bildet die Pflanze einen bis zu 3,5 Meter hohen strauchartigen Aufwuchs [137]. Dabei zeigt die Sida ein indeterminiertes Wachstum und bildet während der Vegetationsperiode laufend neue blütentragende Seitentriebe nach [51]. Die Staude kann laut Literaturangaben etwa zwanzig

Jahre lang energetisch genutzt werden [16] [137]. Für eine Biogasnutzung sollte die Ernte im grünen Zustand erfolgen, wobei bis zu zwei Schnitte möglich sind [51] [69]. Allerdings ist bei einer derartig intensiven Nutzung durch die stärkere Störung des pflanzlichen Entwicklungszyklus von einer Verringerung der Nutzungsdauer auszugehen [96] [74]. Darüber hinaus werden bei Nutzung als Biogassubstrat vergleichsweise geringe Biomasseerträge erreicht und die Methanausbeute von Sida liegt mit etwa 220 bis 250 l_N/kg oTM aufgrund der relativ hohen Ligningehalte deutlich unter dem Niveau von Silomais [15] [96] [122] [74] [69] [146]. Aus diesen Gründen hat sich eine Festbrennstoffnutzung des abgestorbenen Sidaaufwuchses mit Ernte vor bzw. nach Winter am energetisch sinnvollsten und nachhaltigsten erwiesen [137] [52] [51] [122] [74] [69], zumal Sida die für eine thermische Verwertung als Festbrennstoff erforderlichen Eigenschaften besitzt [122] [74] [69].

2.2 Düngung mit Gärresten

Die Reststoffe der Biogasvergärung werden als Gärreste oder Gärprodukte bezeichnet und sind bereits seit längerem Gegenstand der Forschung. Gärreste gelten als wertvolle organisch-mineralische Düngemittel, da die Nährstoffe der Ausgangssubstrate während der Vergärung zu einem hohen Anteil mineralisiert werden und somit teilweise direkt in pflanzenverfügbarer Form vorliegen [66]. Im Pflanzenbau ist Stickstoff der Nährstoff mit den größten Ertrags- und Qualitätseinflüssen [147]. Gärreste enthalten neben organischen Stickstoffverbindungen auch direkt pflanzenverfügbaren Ammoniumstickstoff (NH₄-N), so dass die N-Düngewirkung und das Mineraldüngeräquivalent je nach Gärrestzusammensetzung variieren können. Als Folge des Abbaus organischer Verbindungen weisen Gärreste meist hohe NH₄-Anteile [64], eine hohe Abbaustabilität der verbleibenden organischen Substanz und niedrige Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnisse (C/N-Verhältnisse) auf [102] [62]. Deshalb sind insbesondere gegenüber unvergorener Gülle ein geringeres Immobilisationspotenzial und eine hohe kurzfristige sowie gut abschätzbare N-Wirkung zu erwarten [62] [103]. Da Gärreste zusätzlich über hohe pH-Werte im Bereich von 8,0 verfügen, ist je nach Infiltrationseigenschaften und Ausbringverfahren die Gefahr von Ammoniakemissionen im Anschluss an die Ausbringung erhöht [108] [125] [103]. Zur Vermeidung von Verlusten sollte die Ausbringung nicht bei verlustfördernder Witterung und außerdem bodennah per Schleppschlauch oder Schleppschuh erfolgen. Durch Injektion können Gärreste auch direkt in den Boden eingebracht werden. Ansonsten ist auf unbestelltem Acker bei bodennaher Ausbringung zusätzlich eine unverzügliche Einarbeitung erforderlich [99] [134].

Eine Düngeplanung nach Standardwerten ist bei Gärresten ohne vorherige Nährstoffanalyse nicht sinnvoll und deshalb auch nicht zulässig, da die Nährstoffgehalte in Abhängigkeit des Inputsubstrats, des Gärprozesses und der Verweilzeit in den Gärbehältern stark schwanken können [77] [81]. Dies zeigt auch eine Untersuchung von 83 Biogasanlagen, bei der für den Gehalt an Gesamtstickstoff (N_{ges}) Werte im Bereich von 1,3 und 7,7 kg je Tonne Gärrest festgestellt wurden [28]. Der Ammoniumanteil schwankte dabei zusätzlich zwischen 30 und 87 % [28]. Gärprodukte enthalten außerdem signifikante Anteile an Phosphor- und Kalium-Verbindungen (P- und K-Verbindungen) sowie weitere Makro- und Mik-

ronährstoffe [11]. Eine rein an Stickstoff orientierte Düngeplanung birgt die Gefahr von Nährstoffüberschüssen, da Stickstoffverbindungen während der Lagerung sowie der Ausbringung verlustgefährdet sind und so eine relative Anreicherung der weiteren Nährelemente erfolgen kann.

Auf Kulturschäden durch Gärreste wurde bisher nicht hingewiesen. Des Weiteren ist eine Reduktion der Keimfähigkeit von Unkrautsamen nach Durchlauf des Biogasprozesses zu erwarten [3] [66]. Zusätzlich ist bezüglich der Pathogene typischer Inputpflanzen eine Hygienisierung während der Biogasvergärung wahrscheinlich [66].

Die anaerobe Fermentation im Biogasreaktor führt zu einem hochgradigen Abbau der leicht umsetzbaren organischen Substanz des Inputsubstrats, so dass die in den Gärresten verbleibende organische Substanz eine relativ hohe Abbaustabilität aufweist [102] [62] [88]. Dabei ist die organische Substanz von Gärresten unter anderem auch gegenüber Rindergülle als abbaustabiler einzuschätzen [94]. Konsequenterweise verringert sich durch eine Biogasvergärung im Vergleich zur Zufuhr der unvergorenen Ausgangsprodukte der Eintrag von Kohlenstoff in den Boden [102] [45]. Zur erwarteten Humusreproduktionsleistung von Gärresten liegen allerdings noch keine endgültigen Ergebnisse vor [41]. Es wird dennoch davon ausgegangen, dass die anaerobe Vergärung keinen Einfluss auf den Eintrag abbaustabiler Kohlenstoffverbindungen hat, die langfristig zum Aufbau organischer Bodensubstanz beitragen [88]. Folglich wird der organisch gebundene Kohlenstoff in Gärresten aktuell etwa mit einem Humifizierungskoeffizienten von 0,35 bis 0,40 bewertet [62] [63].

Der Anbau von Energiepflanzen wirkt oft humuszehrend, da die gesamte oberirdische Biomasse abgefahren wird [58] [21]. Insbesondere in Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil an ertragsstarken C4-Pflanzen wie Mais, Sorghumhirse und Sudangras entsteht ein hoher Humusreproduktionsbedarf. Eine Gärrestdüngung kann somit zum Ausgleich der verlorenen organischen Substanz beitragen [94] [21]. Infolge der Mineralisation organischer N-Verbindungen durch den Abbau der organischen Substanz während der anaeroben Fermentation weisen Gärreste hohe NH_4 -Gehalte und niedrige C/N-Verhältnisse auf [64] [89]. Dies führt dazu, dass die für eine Humusreproduktion benötigte Düngermenge aufgrund der Limitierung durch die N-Zufuhr meist nicht zugeführt werden darf [62] [58] [45]. Je nach Höhe des vom Ertragsniveau abhängigen Gärrestanfalls und dessen Nährstoffgehalten ist folglich in Energiepflanzenfruchtfolgen ein weiterer Humusausgleich erforderlich. Dieser muss über eine angepasste Fruchtfolgegestaltung oder eine anderweitige Kohlenstoffzufuhr erfolgen [62] [58].

Eine positive Bodenwirkung von Gärresten konnte auch in einem zehnjährigen Forschungsprojekt zur Überprüfung der langfristigen Nachhaltigkeit von Biogasbetriebssystemen aufgezeigt werden. Bezüglich der Regenwurmabundanz konnte auf den vier bayerischen Untersuchungsstandorten bei organischer Düngung mit Rindergülle oder Gärresten ein signifikanter Anstieg der Individuenzahl gegenüber rein mineralisch gedüngten Varianten beobachtet werden [21]. Darüber hinaus war wie auch in anderen Versuchen [104] [94] keine Bodenversauerung durch Einsatz von Gärresten nachzuweisen. Zudem wurde aufgezeigt, dass eine Gärrestdüngung nicht zu einer Veränderung der Populationsstruktur

der Bodenmikroorganismen oder einer Verringerung der Makroaggregatstabilität führt [94]. Eine positive Wirkung von Gärresten auf die Aggregatstabilität wurde auch in anderen Studien beobachtet [94] [21]. Im Hinblick auf die Gesamtbewertung pflanzlicher Produktionssysteme bietet die Substitution von Mineraldünger durch Gärreste die Möglichkeit zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Energiepflanzenenerzeugung. Im Vergleich dazu sind die zusätzlichen Emissionen durch höheren Dieselverbrauch für Transport und Ausbringung der Gärreste zu vernachlässigen [58].

Bezüglich der Ertragswirkung von Gärresten konnte von FORMOWITZ (2014) [49] aufgezeigt werden, dass bei einer Gärrestdüngung gegenüber einer rein mineralischen Düngung mindestens gleichwertige Erträge in einer Energiepflanzenfruchtfolge möglich sind. Hierbei wurde für die Bemessung der Gärrestdüngung ein Mineraldüngeräquivalent in Höhe von 70 % des N_{ges} unterstellt. Grundsätzlich korreliert das Mineraldüngeräquivalent (meist bezogen auf den Trockenmasseertrag) von Gärresten mit dem NH_4 -Gehalt und kann sich je nach Jahreswitterung, Fruchtart und Ausbringungsverlusten in einem Bereich von 40 bis 70 %, teilweise bis 100 % bezogen auf den gesamten N-Gehalt bewegen [64] [104]. Eine hohe kurzfristige N-Wirkung von Gärresten wird durch hohe NH_4 -Anteile und die hohe Abbaustabilität der organischen Substanz ermöglicht [64]. Diese trägt zu einem im Vergleich zu Gülle deutlich reduzierten Immobilisationspotenzial bei, so dass die N-Wirkung meist relativ gut abschätzbar ist und sich auch ein gezielter Einsatz anbietet [64] [62].

2.3 Nährstoffbedarf von Silphie

Infolge mehrerer Untersuchungen sind die Gehalte der mengenmäßig wichtigsten Pflanzennährstoffe Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium (Mg) und Calcium (Ca) im Erntegut von Silphie bekannt (Tabelle 1). Bezüglich des N-Gehalts wurden zum Erntezeitpunkt für eine Biogasnutzung Werte im Bereich von 0,81 [84] bis 1,57 kg N/dt TM [69] gemessen. Meist lagen diese jedoch im Bereich von 0,9 kg N/dt TM [133] [14]. Hierbei ist insbesondere der Einfluss des Erntezeitpunkts entscheidend, da der N-Gehalt von Pflanzenorganen in der Regel mit zunehmendem Alter abnimmt [7]. Bei Durchwachsener Silphie nimmt darüber hinaus der Anteil der stickstoffreichen Blätter mit zunehmendem Wachstum gegenüber dem des Stängels ab [123]. Aktuell wird für die N-Versorgung von Durchwachsener Silphie von einem Bedarf von etwa 0,9 bis 1 kg N/dt TM Ertragserwartung ausgegangen [12] [10], wobei nach Düngeverordnung als Bedarfswert 1,0 kg N/dt TM angesetzt werden darf.

Tabelle 1: Nährstoffgehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie zur Ernte

Quelle	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO
	Einheit	kg/dt TM			
LUNENBERG und HARTMANN (2016) [84]	0,81	0,48	1,70	0,65	3,09
STOLZENBURG et al. (2016) [133]	0,9	0,4	2,3	0,5	2,7
HARTMANN et al. (2017) [69]	1,27	0,47	3,03	0,62	2,82
BIERTÜMPFEL et al. (2018) [14]	0,88	0,41	2,24	0,58	–
KÖHLER und BIERTÜMPFEL (2018) [79]	0,84	–	–	–	–
LFL (2018) [10]	1,00	0,50	2,29	0,64	–
FÖRSTER et al. (2020) [50]	1,03	0,34	1,61	0,76	2,93
GRUNWALD et al. (2020) [61]	1,28	–	–	–	–
USTAK und MUNOZ (2018) [138]	1,2	–	–	–	–
PICHARD (2012) [100]	0,99	–	–	–	–

Somit hat sich gezeigt, dass auch mehrjährige Energiepflanzen eine vergleichbar hohe Nährstoffabfuhr wie einjährige Kulturen aufweisen, wenn sie im grünen Zustand geerntet werden [113]. Diese ist deutlich höher als bei Dauerkulturen, bei denen die abgestorbene oberirdische Biomasse für eine Festbrennstoffnutzung eingesetzt wird, so dass Dauerkulturen aus Nährstoffsicht nicht generell als „low input“-Kulturen bezeichnet werden können.

Zu den Mikronährstoffgehalten von Silphie wurde bisher nur eine Untersuchung durchgeführt [138]. Bis auf Kupfer und Zink lagen bei Silphie signifikant höhere Mikronährstoffentzüge im Vergleich zu Mais vor, der größte Unterschied war bei Bor gegeben. Darüber hinaus wird auf einen deutlich höheren Entzug der basisch wirksamen Kationen Kalium, Magnesium und Calcium gegenüber Mais hingewiesen. Neben einem ausreichend hohen pH-Wert scheint auch die Verfügbarkeit dieser Nährstoffe bedeutsam, da auf einem sauren Standort eine positive Ertragswirkung durch Kalkung nachgewiesen wurde [75].

Bei Anbau von Silphie zur Biogaserzeugung werden folglich insbesondere große Mengen an Kalium und Calcium von der Fläche abgefahren. Diese werden über eine Gärrestdüngung in der Regel nicht ausreichend zurückgeführt, da die Anteile von Silphie am Substratinput meist gering sind [138]. Eine hohe Nährstoffabfuhr kann bei fehlendem Ausgleich durch Düngung zu einem starken Rückgang der Gehalte im Boden führen, wie auf einem sandigen Standort nach drei Jahren Silphienutzung hinsichtlich der P-, K-, Mg- und Ca-Gehalte im Boden beobachtet wurde [24].

2.4 Gärrestdüngung von Durchwachsener Silphie

Laut BIERTÜMPFEL und CONRAD (2013) [13] zeigt die Durchwachsene Silphie eine sehr gute Ausnutzung der über eine Gärrestdüngung im Frühjahr zugeführten Nährstoffe. In einem Vergleich mit rein mineralischer N-Düngung wurde hierbei in einem vierjährigen Versuch bei Gärrestdüngung ein mindestens gleichhohes Ertragsniveau erzielt. Die N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte bewegten sich in allen Varianten auf einem einheitlich niedrigen Niveau.

KÖHLER und BIERTÜMPFEL (2018) [79] verglichen in weiteren Versuchen verschiedene Düngestrategien für Durchwachsene Silphie. Dabei führte eine Aufteilung der Gärrestdüngung auf zwei Frühjahrstermine oder die Verwendung von Nitrifikationsinhibitoren nach vier Jahren Versuchsdauer meist zu keinen signifikanten Ertragsunterschieden gegenüber einer einmaligen Gärrestdüngung oder einer mineralischen N-Düngung. Eine Kombination aus mineralischer Stickstoffdüngung und Gärrestdüngung lieferte tendenziell die höchsten Erträge. Auch die Gehalte mineralischen Stickstoffs im Boden nach der Ernte wurden durch die differenzierten Düngungsstrategien nicht beeinflusst und waren in allen Varianten auf einem sehr niedrigen Niveau.

Grundsätzlich sollte eine mineralische N-Düngung bzw. Gärrestdüngung zum Austrieb im zeitigen Frühjahr zwischen Ende März und Mitte April durchgeführt werden, um Beschädigungen an den Schosstrieben zu vermeiden [12] [14]. Der Silphieanbau-Dienstleister „Donau-Silphie“ (Metzler & Brodmann Saaten GmbH, Ostrach, Deutschland) empfiehlt, die erste N-Düngung im Frühjahr bereits möglichst früh nach Ende der Sperrfrist (31. Januar) vorzunehmen [18]. Eine frühe Andüngung ist erforderlich, da diese vorwiegend die Stängeldicke beeinflusst, wohingegen spätere N-Gaben eher die Stängellänge und somit die Lageranfälligkeit fördern. Als mögliche Strategie bei einem Einsatz von Gärresten wird geraten, sehr früh mit einer geringen Menge Stickstoff mineralisch anzudüngen und Gärreste auszubringen, sobald eine ausreichende Befahrbarkeit gegeben ist. Eine Herstdüngung wird als sinnvoll angesehen, wenn die entsprechende Fläche im Frühjahr erst spät befahrbar ist [18]. Früh ausgebrachte zu hohe Gaben werden jedoch auch als problematisch angesehen, da dies bei ausreichenden Niederschlägen zu einer stärkeren Bestockung und somit einer Vielzahl an dünnen Stängeln mit erhöhter Lageranfälligkeit und möglichen Ernteproblemen führen kann [14].

Im Hinblick auf eine Reduzierung von Ammoniakverlusten bei der Gärrestausbringung in Durchwachsener Silphie sind bislang keine Untersuchungen veröffentlicht worden.

2.5 Umbruchstrategien für Durchwachsene Silphie und Sida

Aufgrund der großen Menge an Ernte- und Wurzelrückständen und der dadurch zu erwartenden Humusanreicherung während der Nutzungsdauer von Dauerkulturen [112] ist von einem hohen Mineralisationspotenzial nach dem Umbruch auszugehen. Die jährliche Zufuhr organischer Substanz wird bei Durchwachsener Silphie auf etwa 1–2 t/ha Blattfall während der Vegetation und ca. 1 t/ha Wiederaustrieb nach der Ernte vor Winter ge-

schätzt [27]. Hinzu kommt, dass ein Großteil der erheblichen Wurzelbiomasse von etwa 8 t/ha jährlich regeneriert werden muss [119]. Durch diese Zufuhr organischer Substanz ist während der Standdauer von Durchwachsener Silphie ein Anstieg der Humusgehalte zu erwarten [44] [60] [114]. Zudem wird bezüglich der Wurzeln von ähnlichen N-Gehalten wie bei der oberirdischen Biomasse ausgegangen [133]. Wird angenommen, dass mehrjährige Energiepflanzen ein ähnlich hohes Mineralisationspotenzial wie mehrjährige Feldgrasbestände oder Dauergrünland aufweisen, so müsste mit einer N-Nachlieferung von 200 bis 300 kg N/ha im ersten Jahr nach dem Umbruch gerechnet werden [141] [71]. RUF und EMMERLING (2020) [112] kamen jedoch zu der Schlussfolgerung, dass bei Dauerkultur-Anbausystemen größere Mengen stabilisierter organischer Substanz gespeichert werden können, wobei diese stabilisierten Pools nach dem Umbruch nicht so leicht mineralisiert werden und somit den Humusvorrat und die Bodenqualität länger erhalten.

Mehrjährige Energiepflanzen wie Durchwachsene Silphie bieten somit zwar niedrige N_{\min} -Mengen nach der Ernte im Einzeljahr, aber auch der Zeitraum nach dem Umbruch und eine dann eventuell eintretende erhöhte N-Mineralisation müssen beachtet werden und in die ökologische Gesamtbewertung miteinfließen [133].

2.5.1 Durchwachsene Silphie

Laut HALLER und FRITZ (2015) [67] kann ein Silphiebestand genutzt werden, bis die Ertragsleistung stark abnimmt. Die Nutzungsdauer sollte jedoch mindestens fünf Jahre betragen, um eine Verbesserung der von Regenwürmern gesteuerten Bodenfunktionen zu erreichen und die weiteren agrarökologischen Vorteile der Dauerkultur zu nutzen [121]. Das von Durchwachsener Silphie ausgehende Invasionspotenzial wird als gering eingeschätzt, da die Pflanze keine tiefreichenden Rhizome und keine Ausläufer bildet [12]. Des Weiteren weisen die aus Samen gekeimten Jungpflanzen eine langsame Jugendentwicklung und nur eine geringe Konkurrenzskraft auf [12].

Für einen Umbruch wird geraten, Silphieflächen nach Ende der Nutzung eventuell mit einem nicht selektiven Herbizid zu behandeln und nach mehrmaliger Bearbeitung mit einer Scheibenegge oder einem Grubber mit einem Pflug umzubrechen [14]. Für die effektive Bekämpfung eines möglichen Durchwuchses wird empfohlen, nachfolgend Getreide [67] [14] oder Mais anzubauen [133]. GERSTBERGER und OTT (2020) [57] raten für eine Beseitigung von Durchwachsener Silphie nach deren Nutzungszeitraum zu einem tiefen Pflügen mit einem Scheibenpflug nach der letzten Ernte und anschließendem Grubbern. Nachfolgend sollte eine gut beschattende Kultur wie Roggen angebaut werden, um den Wiederaustrieb zu behindern. Ein Herbizideinsatz in der Folgekultur wird dabei nicht als zwingend notwendig angesehen, da im Falle eines vermehrten Austriebs der gesamte Aufwuchs auch als Grünroggen für eine Biogasnutzung geerntet werden kann.

Abgesehen von diesen, nicht auf Feldversuchen basierenden Empfehlungen veröffentlichten bisher nur SCHITTENHELM et al. (2021) [115] eine wissenschaftliche Studie zum Umbruch Durchwachsener Silphie. Hierbei wurden an einem sandigen Standort acht Jahre alte Silphieparzellen durch zweimaliges Fräsen Mitte Dezember und Anfang April umgebrochen. Anschließend wurden die Pflanzenrückstände untergepflügt und Mais gesät.

Zum Vergleich dienten ein gleich alter Feldgrasbestand und Mais in Selbstfolge. Im ersten Jahr nach dem Umbruch zeigte sich in den ehemaligen Silphieparzellen ein stärkerer Unkrautbesatz insbesondere mit Gemeinem Kreuzkraut und Vogelmiere. Durch den zweimaligen Einsatz eines Clopyralid-haltigen Herbizids konnte auftretender Silphiedurchwuchs gut bekämpft werden. Triebe, die erst nach der zweiten Behandlung erschienen, wurden nicht erfasst, im Wachstum jedoch durch die Beschattung des Maises gehemmt. Im Vergleich zu den anderen beiden Vorkulturen zeigte der Mais auf den ehemaligen Silphieparzellen eine bessere und schnellere Entwicklung, die gegenüber den Feldgrasparzellen bzw. den Mais-Selbstfolgeparzellen zu 10,2 bzw. 13,6 % höheren Erträgen führte. Die N_{\min} -Mengen zur Maissaat waren noch auf einem sehr niedrigen Niveau, nach der Ernte verblieben insbesondere nach dem Umbruch des Feldgrases bzw. der Silphie mit 194 bzw. 123 kg N/ha deutlich erhöhte Mengen im Boden. Daraus wurde eine N-Nettomineralisation nach dem Umbruch von 238 kg N/ha bei Feldgras, 222 kg N/ha bei Silphie und 129 kg N/ha bei Mais-Selbstfolge berechnet, so dass die N-Düngung der Folgekultur nach Silphie reduziert werden sollte. Wegen der später einsetzenden Mineralisation nach Mais wird aber eine Startdüngung als sinnvoll angesehen. Insgesamt erwies sich in der Studie Mais als gute Folgefrucht nach Durchwachsener Silphie, da dieser über eine hohe N-Aufnahmekapazität verfügt und eine gute Unterdrückung spät erscheinender Silphiedurchwuchstriebe bietet. Hohe N-Überschüsse nach der Ernte können jedoch kaum mehr sinnvoll verwertet werden, weshalb die Herausforderung laut SCHITTENHELM et al. (2021) [115] vor allem darin besteht, das hohe N-Angebot aus der Mineralisation durch nachfolgende Kulturen zu nutzen. Der Umbruch selbst und die Bekämpfung des Wiederaustriebs waren in diesem Versuch einfach möglich, wobei die Kosten für das Fräsen und die zusätzlichen Anforderungen beim Herbizideinsatz durch die Einsparung von N-Dünger wieder ausgeglichen werden.

2.5.2 Sida

Laut UST'AK (2008) [137] ist für einen erfolgreichen Umbruch von Sida eine Kombination mechanischer und chemischer Verfahren erforderlich, wobei der Einsatz der unterschiedlichen Maßnahmen zu verschiedenen Wachstumsstadien erfolgen muss. Für eine optimale Wirkung sollte eine Bodenbearbeitung mit einem Pflug mit Vorschäler in einem niedrigen Pflanzenbestand und bei trockenen Bedingungen nach der Ernte erfolgen. Für eine gute Herbizidwirkung ist hingegen ein höherer Pflanzenbestand erforderlich, um eine Wirkstoffaufnahme und -verlagerung in alle Pflanzenteile zu erreichen. Chemische Maßnahmen sollten deshalb im Herbst oder Frühjahr durchgeführt werden.

3 Problemstellung und Zielsetzung

Der Anbau mehrjähriger Energiepflanzen wie der Durchwachsenen Silphie gewinnt in der landwirtschaftlichen Praxis zunehmend an Bedeutung. Die Durchwachsene Silphie kann wie auch die Dauerkultur Sida als Biogassubstrat genutzt werden. In diesem Fall wird zur Nährstoffrückführung eine Düngung mit Gärresten angestrebt. Eine hohe N-Ausnutzung einer Gärrestdüngung durch die Pflanzen ist für eine geringe Umweltwirkung von entscheidender Bedeutung. Neben der Aufwandmenge beeinflussen insbesondere der Düngetermin und die angewandte Ausbringtechnik die Effizienz einer organischen Düngung [64] [63]. Bisherige Untersuchungsergebnisse zur Düngung von Durchwachsener Silphie mit Gärresten weisen auf eine gute N-Verwertung hin [13] [79]. Die Versuchsfelder beschränken sich allerdings auf Standorte in Thüringen. Für eine Überprüfung der Ergebnisse und möglicher Einflussfaktoren sind weitere mehrjährige Versuche auf unterschiedlichen Standorten notwendig.

Neben der Etablierung und Kulturführung von Dauerkulturen stellen auch deren Umbruch und die Rekultivierung der Fläche wichtige Punkte dar, denn viele Landwirte werden sich nicht für die Anlage einer Dauerkultur wie Durchwachsene Silphie oder Sida entscheiden, wenn eine Rückführung der Fläche in die betriebliche Fruchtfolge nicht problemlos möglich ist oder noch keinerlei Erfahrungen dazu vorliegen. Darüber hinaus nimmt die mit Durchwachsener Silphie genutzte Fläche in Bayern weiter zu und bis jetzt wurden noch keine speziellen Versuche zu dieser Thematik durchgeführt, so dass auch in diesem Bereich dringender Forschungsbedarf besteht.

Optimierung der Stickstoffdüngung von Durchwachsener Silphie

Ziel des Versuchsvorhabens ist es, verschiedene Strategien und Stellgrößen der N-Düngung von Durchwachsener Silphie zu untersuchen und deren Einfluss auf den Ertrag und die N-Ausnutzung zu identifizieren. Im Vordergrund steht die Verwertung einer Gärrestdüngung von Durchwachsener Silphie zu verschiedenen Ausbringterminen. Zu diesem Zweck soll die Ertragswirkung des über eine Gärrestdüngung zugeführten Stickstoffs mit einer rein mineralischen N-Düngung verglichen werden. Zusätzlich soll die Frage beantwortet werden, ob eine Gärrestdüngung im Herbst zu Durchwachsener Silphie sinnvoll ist oder mangels Verwertung nur unnötig das Nitratauswaschungspotenzial erhöht. Auch der Zeitpunkt der Düngergabe im Frühjahr kann die Effizienz der organischen Düngung beeinflussen. Als weiterer Versuchsfaktor soll deshalb die Aufteilung der Frühjahrsdüngung auf einen oder zwei Termine untersucht werden. Durch die Variation der Höhe der N-Zufuhr soll der N-Düngebedarf von Durchwachsener Silphie überprüft werden.

Darüber hinaus soll der genaue Wachstumsverlauf inklusive des zeitlichen Verlaufs der N-Aufnahme von Durchwachsener Silphie bei optimaler N-Versorgung durch wiederholte Analysen ermittelt werden. Die gewonnenen Ergebnisse könnten zusammen mit dem bisherigen Wissen Möglichkeiten für eine weitere Optimierung der N-Verwertung aufzeigen.

Entwicklung von Umbruchstrategien

Ziel ist es, Umbruchstrategien für die Dauerkulturen Durchwachsene Silphie und Sida zu entwickeln, die auf den Einsatz nicht selektiver Herbizide verzichten. Hierfür sollen verschiedene rein mechanische Umbruchverfahren als Alternative zu Totalherbiziden bewertet und zusätzlich die nachfolgende Kultur variiert werden, um Unterschiede hinsichtlich der Konkurrenzkraft gegenüber einem möglichen Dauerkulturdurchwuchs sowie die vorhandenen Bekämpfungsmöglichkeiten zu prüfen.

Des Weiteren ist die Höhe der N-Nachlieferung in den Folgejahren von großem Interesse, da aufgrund der erwarteten Humusanreicherung sowie der großen Menge an Ernte- und Wurzelrückständen ein gesteigertes Mineralisationspotenzial vermutet wird [27] [44]. Aufgrund der relativ kurzen Standdauer der für das Projekt verfügbaren Dauerkulturflächen wird die tatsächliche Humusanreicherung allerdings deutlich geringer ausfallen als nach Ablauf der anzustrebenden Nutzungsdauer von etwa fünfzehn Jahren [50]. Darüber hinaus werden die gewonnenen Daten zum Umfang und der Dynamik der zu erwartenden Mineralisation stark vom Standort und der Jahreswitterung abhängen. Dennoch sollen durch die Auswertung der Versuche erste Anhaltswerte für eine Anpassung der N-Düngung in den Jahren nach einem Umbruch bereitgestellt werden. Zusätzlich können Strategien erarbeitet werden, um Stickstoffausträge während und nach der Umbruchphase zu vermeiden.

Für beide Fragestellungen (Durchwuchs und Nährstoffnachlieferung) soll der Einfluss des für den Umbruch verwendeten Bodenbearbeitungsgeräts untersucht werden.

4 Material und Methoden

4.1 Versuchsstandort

Im Rahmen dieses Projekts wurden mehrere Feldversuche durchgeführt und ausgewertet. Für die Untersuchung des Umbruchs der Dauerkulturen Durchwachsene Silphie und Sida standen bereits etablierte Versuchsanlagen mit den jeweiligen Kulturen zur Verfügung. Die Standorte aller Versuchsanlagen befanden sich in Niederbayern, südlich von Straubing, wobei eine Versuchsanlage mit der Kultur Sida nordwestlich der Ortschaft Wolferkofen (48,825° n. B., 12,629° ö. L., 345 m NHN) lokalisiert war. Die Versuchsanlage mit Durchwachsener Silphie lag zwischen Straubing und Aiterhofen (48,852° n. B., 12,591° ö. L., 345 m NHN). Beide Versuchsanlagen wurden ursprünglich im Jahr 2015 für Herbizidversuche im Rahmen des am TFZ durchgeführten Projekts „Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung“ angelegt und bis 2016 rein mineralisch gedüngt [69]. Von 2017 bis 2018 wurden die beiden Dauerkulturversuche für Feldversuche zur Gärrestdüngung von Dauerkulturen genutzt [97]. Dabei wurden die Versuchsanlagen über einen Zeitraum von zwei Jahren streifenweise rein mineralisch oder ausschließlich mit Gärresten aus der Biogaserzeugung gedüngt. Die Einteilung der mineralischen und organischen Düngung blieb über den gesamten Versuchszeitraum identisch bestehen. Die ehemalige Sidafläche in Wolferkofen stand allerdings nur bis Ende 2020 für eine Versuchsauswertung zur Verfügung. Als Ersatz wurde im Frühjahr 2021 der Umbruch dieser Dauerkultur auf einer weiteren Sidafläche im Schaugarten des TFZ untersucht (48,860° n. B., 12,585° ö. L., 345 m NHN). Dieser Bestand wurde im Jahr 2011 etabliert.

Im Vorgängerprojekt „Gärrestdüngung in Dauerkulturen: Optimierung der Düngetermine“ wurde außerdem südlich von Straubing im Frühjahr 2017 ein Exaktversuch zur Untersuchung der N-Düngung in Durchwachsener Silphie neu angelegt (48,857° n. B., 12,586° ö. L., 345 m NHN) [97]. Dieser Feldversuch wurde im aktuellen Projektvorhaben mit identischem Aufbau fortgeführt. Die Ackerfläche wurde zuletzt im Jahr 2015 für Feldversuche genutzt. Im Jahr 2016 war die Fläche mit Winterweizen bewachsen und wurde einheitlich bewirtschaftet.

Die Versuchsflächen des aktuellen Projektvorhabens befanden sich somit alle im fruchtbaren „Gäuboden“, einem flachen und intensiv landwirtschaftlich geprägten Gebiet im Schwemmland der Donau. Die Region wird dem Boden-Klima-Raum „Gäu, Donau- und Inntal“ zugeordnet [110]. Die Böden der Versuchsflächen sind aus Lössablagerungen entstanden, die Bodenart (nach Bodenschätzung) ist als Lehm eingestuft. Die Flächen weisen Bodenzahlen im Bereich von 76 bis 80 auf. Das vieljährige Mittel (1961–1990) der Jahresdurchschnittstemperaturen der Versuchsstandorte beträgt 8,3 °C bei einer Jahresniederschlagssumme von 783,5 mm [31] [29]. Die Standorte der Versuchsflächen sind folglich durch sehr fruchtbare, lehmige Böden mit einer guten Wasserspeicherfähigkeit und ein gemäßigttes Klima mit ausreichend Niederschlägen geprägt. Somit bieten sie ideale Bedingungen für eine pflanzenbauliche Nutzung.

4.2 Witterung im Versuchszeitraum

In Abbildung 2 sind die Monatsmittelwerte der Tagesdurchschnittstemperaturen und die monatlichen Niederschlagssummen der drei Versuchsjahre im Projektzeitraum im Vergleich zu den vieljährigen Mittelwerten abgebildet. Für die aktuellen Wetterdaten und die langjährigen Mittelwerte wurden die Daten der zu den Versuchsflächen nahegelegenen Wetterstation „Straubing“ des Deutschen Wetterdiensts verwendet [33] [35] [31] [29].

Beim Vergleich der drei Jahre 2019, 2020 und 2021 zeigt sich, dass vor allem die Wintermonate Dezember, Januar und Februar deutlicher wärmer als das vieljährige Mittel ausfielen. Dies gilt insbesondere für das Jahr 2020, weshalb der Austrieb der Durchwachsenden Silphie dort bereits Mitte März erfolgte. Im Jahr 2021 trieb die Durchwachsene Silphie wegen der kühleren Spätwinter- und Märzwitterung dagegen erst gegen Ende März aus. Neben der milden Winterwitterung im Projektzeitraum ist außerdem der trockene April hervorzuheben, wobei geringe Niederschlagsmengen im April am Versuchsstandort in den letzten Jahren bereits vermehrt zu beobachten waren. Es dominierte im April in allen drei Versuchsjahren fast durchgehend hoher Luftdruck, was letztendlich zu dem starken Niederschlagsdefizit führte. In den Versuchsjahren 2019 und 2020 war der April zudem deutlich wärmer als das vieljährige Mittel und wies eine überdurchschnittliche Sonnenscheindauer auf. Der Mai fiel in allen drei Versuchsjahren kühler als das langjährige Mittel aus und war 2019 und 2021 zusätzlich niederschlagsreich. Auch in den Sommermonaten Juni, Juli und August war in allen Versuchsjahren die globale Erwärmung sichtbar. Dies gilt vor allem für den Monat Juni, für den im Jahr 2019 mit 4,4 K und 2021 mit 3,2 K jeweils die größte Temperaturabweichung zum Referenzzeitraum gemessen wurde. Im Jahr 2020 war der Juni hingegen nicht ganz so warm und der deutlich zu milde Februar wies die größte Temperaturabweichung auf. Bei den Sommermonaten war nur der August 2021 zu kühl und zugleich sehr wechselhaft. Während der Herbst im Jahr 2019 eher trocken war, fielen im Jahr 2020 ausreichend Niederschläge. Abgesehen vom April, der in allen Versuchsjahren deutlich zu trocken ausfiel, regnete es während der Vegetationsperiode im Mai 2020 sowie im Juli 2019 und 2020 deutlich zu wenig. Insgesamt war das Jahr 2019 somit durch ein eher warmes und trockenes Frühjahr, einen feuchten und kühlen Mai sowie einen eher trockenen und heißen Sommer geprägt. Auch das Jahr 2020 zeichnete sich durch ein sehr trockenes und warmes Frühjahr aus. Der niederschlagsreiche Juni und ausreichende Niederschläge im Juli und August verhinderten allerdings zusammen mit den nicht ganz so hohen Temperaturen eine größere Sommertrockenheit wie im Vorjahr. Demgegenüber war das Frühjahr im Jahr 2021 zu Beginn eher kühl und extrem trocken. Ab Mai und auch den gesamten Sommer über fielen dann jedoch ausreichend Niederschläge, so dass in diesem Jahr über die gesamte Wachstumsperiode ausreichend Wasser zur Verfügung stand. Bis auf den sehr warmen Juni lagen die Temperaturen im Sommer 2021 im Durchschnitt, die Sonnenscheindauer fiel allerdings abgesehen vom Juni unterdurchschnittlich aus.

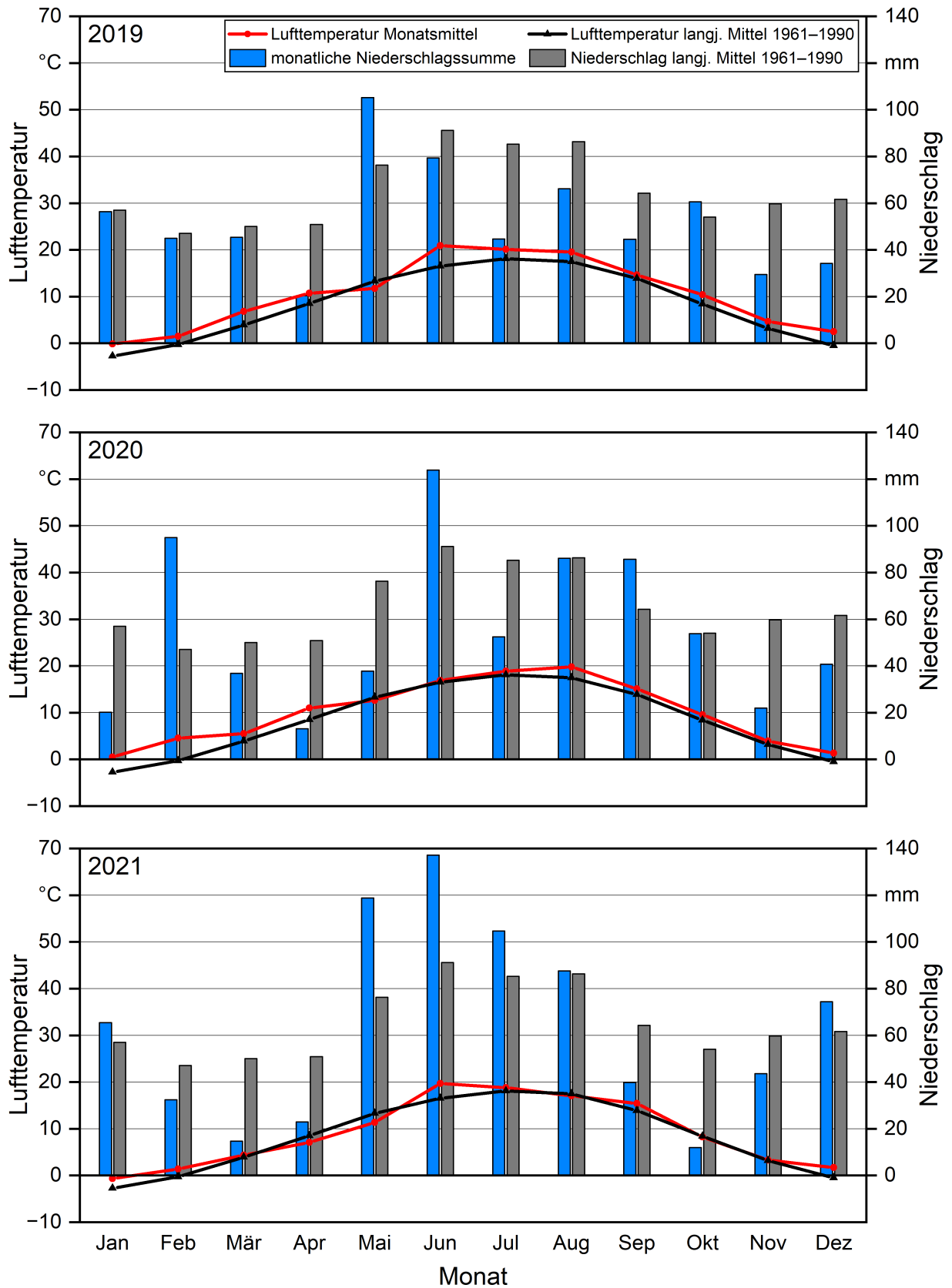


Abbildung 2: Witterungsverlauf der Versuchsjahre 2019, 2020 und 2021 im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961–1990); Datengrundlage DWD (2021) [33] [35] [31] [29], Wetterstation Straubing

Die Wuchsleistung von Durchwachsener Silphie am Standort Straubing war ungeachtet altersbedingter Veränderungen im Jahr 2021 tendenziell am schlechtesten. Es scheint somit, dass vor allem die Kombination aus trockenem und kühlem Frühjahr gefolgt von einem gemäßigten und eher sonnenarmen Sommer besonders schlecht für das Wachstum von Durchwachsener Silphie ist, obwohl durch die hohen Sommerniederschläge im Jahr 2021 zu keinem Zeitpunkt Trockenstress vorhanden war. In den Jahren 2019 und 2020 waren durch das wärmere Frühjahr und den eher trockeneren und heißeren Sommer offenbar bessere Wachstumsbedingungen für Durchwachsene Silphie vorhanden. Es muss allerdings beachtet werden, dass deutlicher Trockenstress am Standort Straubing auch im Jahr 2019 mit stärker ausgeprägter Sommertrockenheit zu keinem Zeitpunkt zu beobachten war. Die Sommerniederschläge reichten zusammen mit dem hohen Wasserspeichervermögen des sehr guten Standorts offenbar aus, so dass das tiefreichende Wurzelsystem ausreichend Wasser bereitstellen konnte.

Der Mais in den Umbruchversuchen profitierte dagegen deutlich vom warmen und trockenen Frühjahr und den ab Juni einsetzenden Niederschlägen im Jahr 2020. Demgegenüber litt die Triticale ebenfalls stark unter der Frühjahrstrockenheit und die gegen Ende der Blüte gefallenen Niederschläge kamen für diese Kultur fast zu spät. Auch im Jahr 2021 lagen sehr gute Wachstumsbedingungen für Mais vor, der vor allem vom warmen und feuchten Juni profitierte. Das kühle Frühjahr und der Sommer ohne ausgeprägte Hitzeperiode verzögerten die Abreife allerdings etwas. Auch das Wintergetreide konnte im Jahr 2021 durch die Niederschläge im Mai eine hohe Bestandsdichte ausbilden.

Im vorliegenden Versuchsbericht genannte Entwicklungsstadien wurden anhand der BBCH-Skala bestimmt und sind mit dem entsprechenden BBCH-Code bezeichnet [86].

4.3 Feldversuch zur Optimierung der Stickstoffdüngung in Durchwachsener Silphie

4.3.1 Versuchsaufbau

Die zugrunde liegende Versuchsanlage wurde im Rahmen des Vorgängerprojekts im Frühjahr 2017 neu angelegt mit der Zielsetzung, die N-Düngung von Durchwachsener Silphie weiter zu untersuchen [97]. Dieser Feldversuch wurde im hier behandelten Projekt mit identischem Aufbau fortgeführt. Als Anlagemethode wurde ein vierfach wiederholtes lateinisches Rechteck mit vollständigen Blöcken und Säulen (semilateinisches Quadrat) verwendet, um mögliche Bodenunterschiede auszugleichen. Damit die Effekte verschiedener Stellgrößen der N-Düngung getrennt betrachtet werden können, wurde ein dreifaktorieller Versuchsaufbau gewählt (Abbildung 3).



Abbildung 3: Blick auf den Feldversuch zur Optimierung der Stickstoffdüngung von Durchwachsener Silphie am 22. Juni 2021

Den ersten Faktor bildete die Düngerart, um die Ertragswirkung und N-Ausnutzung einer Düngung ausschließlich mit Gärresten im Vergleich zu einer rein mineralischen N-Düngung bewerten zu können (Tabelle 2). Als alternative Düngestrategie wurde neben einer Gärrestdüngung bzw. einer mineralischen Düngung im Frühjahr auch eine Gärrestvariante untersucht, in der ein Teil des Düngedarfs über Gärreste im Herbst ausgebracht wurde. Die Herbstdüngung startete im Herbst 2018, so dass diese Variante im ersten Versuchsjahr des aktuellen Projekts bereits verfügbar war. Eine Herbstdüngung zu Durchwachsener Silphie ist nach aktueller Düngeverordnung erlaubt, da die Silphie bezüglich der Düngedarfsermittlung und der Sperrfristen wie Kulturen des mehrjährigen Feldfutterbaus zu behandeln ist. Im mehrjährigen Feldfutterbau ist eine Herbstdüngung mit flüssigen organischen Düngern nach der letzten Ernte bis zum 1. November in Höhe von 60 kg N_{ges}/ha bzw. 30 kg NH₄-N/ha zulässig. In den nach Düngeverordnung ausgewiesenen roten Gebieten gilt eine erweiterte Sperrfrist, so dass die Düngung bis 1. Oktober erfolgen muss. Bis zu diesem Termin wurde auch in diesem Versuch eine Herbstdüngung angestrebt. Für die Identifikation des optimalen Düngezeitpunkts und des Nährstoffangebots stellt die Aufteilung der Frühjahrsdüngung einen weiteren Einflussfaktor dar. Als Faktorstufen wurden hier eine einmalige frühe Gabe und eine zu gleichen Teilen in eine frühe und späte Gabe aufgeteilte Düngung gewählt. Der Termin für die späte Gabe orientierte sich dabei an der letztmöglichen Befahrbarkeit für eine Gärrestausringung, die in etwa bis zum Beginn des Schossens der Silphiepflanzen gegeben ist [97]. Als dritter Faktor wurde die Höhe der N-

Zufuhr über den N-Bedarfswert in drei Stufen variiert. Der N-Bedarfswert bildet die Grundlage für die Berechnung der zu düngenden N-Menge in der Düngedarfsermittlung nach Düngeverordnung [20]. Anhand der Variation der N-Zufuhr wurde eine Überprüfung des aktuell vorgeschriebenen Niveaus der N-Düngung von Durchwachsener Silphie durchgeführt. Hierbei wurde auch der Standardwert für den N-Gehalt des Ernteguts von Durchwachsener Silphie, auf dem die Berechnung des N-Düngedarfs basiert, kritisch betrachtet.

Tabelle 2: Faktorielle Struktur des Feldversuchs zur Optimierung der Stickstoffdüngung von Durchwachsener Silphie

Faktoren	Faktorstufen
1. Faktor: Düngerart und Strategie der Gärrestdüngung	
	1) Gärrest nur Frühjahr
	2) Gärrest Herbst und Frühjahr
	3) mineralisch nur Frühjahr
2. Faktor: Düngungszeitpunkt Frühjahr	
	a) eine Gabe: früh
	b) Aufteilung in zwei Gaben: früh und spät
3. Faktor: N-Bedarfswert (inkl. N_{\min})	
	A) 100 kg N/ha
	B) 150 kg N/ha
	C) 200 kg N/ha

Versuchsdesign: dreifaktorielles semilateinisches Quadrat mit vier Wiederholungen

Alle Varianten erhalten einen mineralischen P- und K-Ausgleich bezogen auf die Abfuhr bei standorttypischem Ertrag.

Die Gärrestdüngung mit Herstdüngung als Teil des ersten Versuchsfaktors wurde bei der Anlage des Versuchs im Jahr 2017 bereits mitberücksichtigt, so dass drei Faktorstufen für den ersten Faktor eingeplant wurden. Die Versuchsanlage bestand somit bei vierfacher Wiederholung insgesamt aus 72 Parzellen. Inklusive der beiden Stirnränder von jeweils 1,5 m betrug die Parzellenlänge 12,0 m, die Breite 4,5 m. Das Abgrenzen der Parzellenlängen sowie der 1,5 m breiten Stirnränder der Parzellen erfolgte GPS-gesteuert mit einer Reihenfräse. Dazu wurde der Versuch, der ursprünglich nicht mit GPS-Technik gesät wurde, nachträglich erfasst und die Fahrspuren entsprechend angelegt.

Die Etablierung der Versuchspartellen mit Durchwachsener Silphie im Rahmen des Vorprojekts wurde über eine Untersaat in Silomais erreicht. Dieses Verfahren wird auch in der Praxis angewandt, um dem Ertragsausfall im Jahr der Anlage von Beständen mit Durch-

wachsenen Silphie entgegenzuwirken. Die Ansaat der Durchwachsenen Silphie erfolgte am 23. Mai 2017 zusammen mit der Deckfrucht Silomais. Dieser wurde für eine ausreichende Entwicklung der Untersaat nur mit halber Saatstärke ausgesät. Der Reihenabstand beider Kulturen betrug jeweils 75 cm, wobei eine Reihe mit Durchwachsener Silphie genau mittig zwischen zwei Maisreihen platziert wurde. Eine Parzellenbreite umfasste somit sechs Pflanzenreihen von Durchwachsener Silphie. Im Etablierungsjahr konnte der Unkrautdruck durch eine Behandlung mit Stomp Aqua und eine zusätzliche mechanische Unkrautbekämpfung kontrolliert werden. Zur N-Versorgung beider Kulturen wurde die Fläche homogen mit dem Mineraldünger Kalkammonsalpeter gedüngt. Der Mais wurde im September 2017 gehäckselt, so dass die Versuchspartellen im Jahr 2018 für die unterschiedliche Düngung der Varianten und Versuchsauswertung genutzt werden konnten.

Als Folge der Etablierungsmethode zeigten die Silphiepflanzen im ersten Erntejahr allerdings ein stark gehemmtes Wachstum und erreichten meist keinen vollständigen Reihenschluss [97]. Dadurch verunkrauteten die Parzellen außerdem sehr stark. Die extreme Trockenheit im Jahr 2018 beschränkte das Wachstum der Durchwachsenen Silphie zusätzlich. Die Ergebnisse des ersten Erntejahrs wurden folglich in der Gesamtauswertung dieses Versuchs im Rahmen des hier behandelten Projekts nicht berücksichtigt.

4.3.2 Pflanzenbauliche Maßnahmen und Düngung

Über die Versuchsfaktoren wurde die N-Düngung von Durchwachsener Silphie variiert, so dass sich diese von Parzelle zu Parzelle unterschied. Um die Varianten mit Gärrestdüngung sowohl räumlich als auch mengenmäßig möglichst exakt düngen zu können wurde ein Parzellengüllefass (Zunhammer GmbH, Traunreut, Deutschland) verwendet. Dieses verfügte über einen seitlich angeordneten Schleppschlauchverteiler, so dass die Gärreste bodennah ausgebracht wurden und wegen der entsprechend angelegten Längswege keine Überfahrt der Versuchspartellen erforderlich war (Abbildung 4). Zeitnah zu den jeweiligen Gärrestdüngungen wurden auch die entsprechenden Mineraldüngervarianten mit mineralischem N-Dünger in Form von Kalkammonsalpeter mit einem Parzellendüngerstreuer gedüngt. Die auszubringenden Gärreste wurden bis auf die Herbstgabe im Jahr 2020 von derselben Biogasanlage bezogen. Die entsprechende Anlage verfügte über eine direkte Gaseinspeisung mit einer Leistung von 10 MW. Als Gärsubstrate wurden ausschließlich nachwachsende Rohstoffe eingesetzt, wobei sich der Substratinput aus etwa 60 % Maissilage, 20 % Getreide-Ganzpflanzensilage und 20 % Grassilage zusammensetzte. Die Gärrestlagerbehälter waren abgedeckt. Aus logistischen Gründen musste im Herbst 2020 für die Herstdüngung der Gärrest von einer anderen Biogasanlage bezogen werden. Diese wies eine elektrische Leistung von 550 kW auf und als Substrate wurden 15 % Hühnertrockenkot, 78 % Maissilage und 7 % Getreide-Ganzpflanzensilage eingesetzt.



Abbildung 4: Gärrestausbringung auf die Versuchspartzen mit einem Parzellengülle-fass mit seitlich geführtem Schleppschlauchverteiler im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie Ende März 2021

Bei Durchwachsener Silphie bestand mit der Novellierung der Düngeverordnung im Jahr 2017 zunächst die Möglichkeit die Düngebedarfsermittlung entweder nach der Methode für Acker oder mehrjährigen Feldfutterbau durchzuführen. In der Ackermethode wird der N-Düngebedarf ausgehend von einem ertragsabhängigen Bedarfswert unter Abzug des im Frühjahr im Boden vorhandenen N_{\min} -Vorrats berechnet. Erfolgt die Düngebedarfsermittlung nach dem Schema des mehrjährigen Feldfutterbaus, so wird der N-Düngebedarf auf Basis der N-Abfuhr berechnet. Eine Berücksichtigung der N_{\min} -Menge zu Vegetationsbeginn erfolgt nicht. Sollte allerdings eine Herstdüngung durchgeführt werden, war die Durchwachsene Silphie notwendigerweise dem mehrjährigen Feldfutterbau zuzuordnen. Vermutlich deshalb ist seit der erneuten Überarbeitung der Düngeverordnung im Jahr 2020 die Düngebedarfsermittlung für Durchwachsene Silphie auf die Methode für mehrjährigen Feldfutterbau festgelegt worden. Bei der Düngebedarfsermittlung nach mehrjährigem Feldfutterbau kann aktuell ein N-Bedarfswert von 1,0 kg N/dt TM Ertragserwartung angesetzt werden. Die Höhe dieses maximalen Nährstoffbedarfs soll anhand der Versuchsergebnisse überprüft werden.

Die Höhe der N-Düngung der Versuchsvarianten wurde auf Basis der im Versuch variierten N-Bedarfswerte berechnet. Hierbei wurden im Gegensatz zur aktuell vorgeschriebenen Vorgehensweise bei der Düngebedarfsermittlung auch die N_{\min} -Vorräte berücksichtigt. Dies gilt auch für die Varianten mit Herstdüngung. Ziel dieser Vorgehensweise war,

in allen Versuchsjahren identische pflanzenverfügbare N-Mengen bereitzustellen. In den verschiedenen Varianten wurde folglich zur Ermittlung des N-Düngebedarfs die im Boden zu Vegetationsbeginn vorhandene N_{\min} -Menge vom N-Bedarfswert abgezogen. Als N_{\min} -Wert wurde in allen Varianten der Durchschnitt der Versuchsfläche verwendet. In den Gärrestvarianten, in denen die Deckung des N-Düngebedarfs wie im ersten Versuchsjahr ausschließlich über Gärreste erfolgte, wurde zusätzlich die N-Nachlieferung aus der Vorjahresdüngung berücksichtigt. Diese wurde, wie laut Düngeverordnung vorgegeben, in Höhe von 10 % der gesamten N-Zufuhr angerechnet. Die Herbstdüngung zu Durchwachsener Silphie wurde im darauffolgenden Erntejahr dem Düngebedarf vollständig angerechnet. Anhand des verbleibenden Bedarfs wurden die auszubringenden Gärrestmengen über die von der Biogasanlage für den entsprechenden Ausbringzeitraum ausgegebenen N_{ges} - und NH_4 -Gehalte berechnet. Dabei wurde bis zum Jahr 2020 eine Mindestwirksamkeit in Höhe des NH_4 -Gehalts bzw. 50 % des N_{ges} -Gehalts unterstellt. Darüber hinaus wurden Ausbringungsverluste in Höhe von 10,5 % der anzurechnenden N-Menge berücksichtigt, so dass meist ein Mineraldüngeräquivalent von knapp 90 % des NH_4 -Gehalts gegeben war. Im Jahr 2021 wurde wie von der überarbeiteten Düngeverordnung [20] vorgegeben eine Mindestwirksamkeit von 60 % unterstellt. Zudem wurden keine Ausbringungsverluste mehr berücksichtigt, so dass die N-Zufuhr aus Gärresten bei gleicher Stickstoffstufe etwas geringer war.

Zur Überprüfung und gegebenenfalls auch Anpassung der zur Berechnung der Ausbringungsmenge verwendeten, vorläufigen NH_4 -Gehalte wurde zusammen mit der Entnahme der Proben für eine Laboranalyse auch eine Teilmenge direkt vor der Ausbringung mit einem Stickstoff-Schnellbestimmungstest (Quantofix N-Volumeter, Terraflor GmbH, Iserlohn, Deutschland) auf ihren NH_4 -Gehalt analysiert (Abbildung 5). Dieses Schnelltestverfahren basiert auf der Oxidation des im Gärrest (oder anderen flüssigen organischen Düngern) enthaltenen Ammoniums zu gasförmigen Stickstoffverbindungen durch Hypochlorige Säure. Über die Messung des gebildeten Gasvolumens wird der NH_4 -Gehalt ermittelt. Das Ergebnis wurde nach ca. fünf Minuten Reaktionsdauer an der Geräteskala abgelesen. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurde der NH_4 -Gehalt des ausgebrachten Gärrests mit einer Abweichung von ca. 10 % zur späteren Laboranalyse und somit relativ genau bestimmt. Folglich wurden die angestrebten N-Mengen im Rahmen der Gärrestdüngung auch ziemlich genau erreicht.



Abbildung 5: „Quantofix N-Volumeter“ als Schnelltest zur Ermittlung des Ammoniumgehalts unmittelbar vor der Gärrestdüngung der Versuchspartizellen

Darüber hinaus wurde in den Jahren 2020 und 2021 eine mineralische P- und K-Ausgleichsdüngung durchgeführt. Hierfür wurde ein P-/K-Dünger mit 11 % P_2O_5 und 34 % K_2O (2020) bzw. 11,7 % P_2O_5 und 35,2 % K_2O (2021) verwendet. Die Höhe der P-/K-Düngung wurde so gewählt, dass die insgesamt über Düngung zugeführten K-Mengen jeder Variante 350 kg K_2O/ha (Versuchsjahr 2020) oder 360 kg K_2O/ha (Versuchsjahr 2021) betragen, was dem K-Bedarf von Durchwachsener Silphie bei einem mittleren Ertragsniveau von etwa 150 dt TM/ha entspricht. Die damit verbundene P-Zufuhr überstieg die P-Abfuhr von Durchwachsener Silphie bei entsprechendem Ertragsniveau folglich etwas. Dies war erforderlich, um Einflüsse unterschiedlicher P-Versorgungen möglichst auszuschließen, da die P-Gehalte der Versuchspartizellen bei einer Grundbodenanalyse der gesamten Versuchsfläche sehr unterschiedliche und teilweise auch relativ niedrige Werte aufwiesen. Zusätzlich wurden über den P-/K-Dünger eine geringe Menge Schwefel (S) und im Jahr 2021 auch Stickstoff zugeführt. Dieser wurde bei der N-Zufuhr über Gärreste bzw. Mineraldünger berücksichtigt. Im Jahr 2019 konnte ein P-/K-Ausgleich aufgrund des zum geplanten Termin bereits zu weit vorangeschrittenen Wachstums der Silphiepflanzen nicht mehr durchgeführt werden. Die mineralische P-/K-Düngung erfolgte im Jahr 2020 am 7. April und im Jahr 2021 am 29. März.

Aufgrund des eingeschränkten Wachstums der Silphiepflanzen im ersten Erntejahr (2018) verunkrautete der Bestand in diesem Jahr stark. Um die Altverunkrautung nach der Ernte zu beseitigen und eine erneute Unkrautkonkurrenz in der neuen Wachstumsperiode zu

vermeiden, wurde im Herbst 2018 und Frühjahr 2019 eine mechanische Unkrautbekämpfung im Zwischenreihenbereich mit einer Reihenfräse durchgeführt (Abbildung 6). Dabei wurden jedoch vereinzelt abschnittsweise die Reihen der Silphiepflanzen ebenfalls mit der Fräse erfasst. Teilweise trieben die Pflanzen während der Vegetation noch aus, einzelne Reihen fielen jedoch komplett aus. Da mitunter auch Reihen der Ernteparzellen betroffen waren, mussten in diesen Fällen Reihen der Randparzellen für die Ertragserfassung herangezogen werden. Obwohl im Jahr 2020 die geschädigten Reihen fast komplett wieder austrieben, blieben sie dennoch in der Entwicklung zurück und einige Ernteparzellen mussten erneut auf Randreihen verschoben werden. Die mechanische Unkrautregulierung mit der Reihenfräse wurde zusätzlich auch im Frühjahr 2020 und 2021 nach der ersten Gärrestdüngung wiederholt, um eine erneute Verunkrautung zu vermeiden. Diese Pflegemaßnahme wurde zwei (2020) bzw. fünf (2021) Tage nach der Gärrestdüngung durchgeführt, so dass zugleich auch die zuvor ausgebrachten Gärreste eingearbeitet wurden.



Abbildung 6: Bearbeitung der Bereiche zwischen den Silphiereihen mit einer Reihenfräse zur Unkrautbekämpfung

Auf der Fläche vorhandene Ungräser wurden durch die Fräsmaßnahmen im Frühjahr 2019 nur unzureichend bekämpft, so dass die Versuchspartellen am 10. April 2019 zur Gräserbekämpfung zusätzlich mit 1,0 l/ha „Select 240 EC“ (240 g/l Clethodim + 2,0 l/ha Formulierungshilfsstoff) behandelt wurden. Die Applikation führte zu keiner sichtbaren Kulturschädigung. Aufgrund anhaltend trocken-kühler Witterung im Anschluss an die Anwendung war jedoch auch die Bekämpfungswirkung auf die Ungräser nicht optimal.

Im Herbst 2019 erfolgte nach der Ernte am 24. September zusätzlich eine Erhaltungskalkung mit kohlen-saurem Magnesiumkalk (70 % CaCO_3 , 20 % MgCO_3) und einer Aufwandmenge von 40 dt/ha. Auf der westlichen Hälfte der Versuchsfläche wurde 50 % mehr ausgebracht, da eine parzellenscharfe Beprobung des Bodens zu Projektbeginn in diesem Bereich ein niedrigeres Niveau der pH-Werte von teilweise nur 5,9 aufzeigte.

4.3.3 Probenahmen und Ertragserfassung

Um die auszubringende Gärrestmenge an die aktuellen Nährstoffgehalte des verwendeten Biogasgärrests anpassen zu können, waren jeweils vor den Ausbringungsterminen im Frühjahr und Herbst Kenntnisse über den Gehalt an Ammonium-N und Gesamt-N erforderlich. Hierzu wurden vorläufig die Werte der laufenden Analysen der abgebenden Biogasanlage verwendet und gegebenenfalls entsprechend den über den Schnelltest bestimmten NH_4 -Gehalten angepasst. Zu allen Gärrestdüngungen wurden zusätzlich Gärrestproben für eine Laboranalyse entnommen, um die tatsächlichen Nährstoffgehalte des ausgebrachten Gärrests zu erfassen. Anhand dieser Analyseergebnisse wurden die tatsächlich ausgebrachten Nährstoffmengen berechnet.

Zu Vegetationsbeginn im Frühjahr, im Anschluss an die Ernte im Herbst und zu Vegetationsende wurde eine Untersuchung des Bodens auf den Gehalt mineralischen Stickstoffs durchgeführt. Zu Projektende erfolgte keine N_{min} -Probenahme zu Vegetationsende mehr. Die Probenahmen erfolgten mit Ausnahme der Beprobung zu Vegetationsbeginn im Jahr 2019 parzellenscharf. Es wurden allerdings aus Kapazitäts- und Kostengründen meist nur die Prüfglieder mit der höchsten N-Düngestufe (N-Bedarfswert: 200 kg N/ha) beprobt (siehe Anhang). Die Beprobung wurde in allen Fällen bis auf eine Tiefe von 90 cm, unterteilt in drei gleichmäßige Tiefenabschnitte, durchgeführt. Die Ergebnisse der Frühjahrsuntersuchung wurden für die Berechnung der auszubringenden N-Menge im Rahmen der Düngebedarfsermittlung verwendet. Anhand der Ergebnisse der beiden Beprobungstermine nach der Ernte lassen sich Aussagen über die Verwertung des gedüngten Stickstoffs und eine möglicherweise bereits erfolgte Verlagerung des mineralischen Stickstoffs im Boden ableiten. Zusätzlich kann das Risiko für einen Nitrataustrag und Lachgasverluste über Winter beurteilt werden. Des Weiteren wurde im Frühjahr 2019 zu Projektbeginn eine parzellenscharfe Untersuchung des Bodens hinsichtlich des pH-Werts sowie der Gehalte an Phosphor, Kalium und Magnesium durchgeführt, um eventuell vorhandene Unterschiede innerhalb der Versuchsfläche aufzuzeigen. Bei parzellenscharfen Beprobungen des Bodens wurden drei Einstiche je Parzelle entnommen und daraus eine Mischprobe für die Analyse erstellt.

Für die Ertragserfassung der Versuchspartellen zur Ernte wurden nach Entfernen der Stirn- und Seitenränder jeweils zwei Pflanzenreihen in der Mitte der Partellen verwogen. Hierfür wurde ein Traktorgespann aus einem Scheibenradhäcksler im Frontanbau (Champion C 2200, Maschinenfabrik Kemper GmbH & Co. KG, Stadtlohn, Deutschland) mit gekoppeltem Probenehmer im Heckanbau (J. Haldrup a/s, Løgstør, Dänemark) verwendet (Abbildung 7). Die Breite der Erntepartellen betrug folglich 1,50 m, so dass für die Ertragserfassung eine Fläche von 13,5 m² verwendet wurde. Aufgrund der Schädigung ein-

zelter Pflanzenreihen durch die Unkrautregulierung mit einer Reihenfräse musste dieser Bereich der Ertragserfassung in einzelnen Parzellen seitlich verschoben werden. Während des Erntevorgangs wurden über den Probenehmer aus dem laufenden Erntegutstrom Proben für die Bestimmung des Trockensubstanzgehalts (TS-Gehalt) und der Nährstoffgehalte des Ernteguts entnommen.



Abbildung 7: Ertragserfassung der Ernteparzellen mit einem Häcksler mit seitlichen Trennmessern nach dem Entfernen der Stirnränder im Versuchsjahr 2021

Im Versuchsjahr 2020 wurde die Ernte durch die starke Seitenneigung der Pflanzen und teilweise Lager deutlich erschwert. Bei der Ernte konnte deshalb in einigen Fällen nicht der gesamte Aufwuchs der Ernteparzellen korrekt erfasst werden. Diese Parzellen wurden von der Auswertung der Erträge und der daraus abgeleiteten Merkmale ausgeschlossen. Da die Pflanzen auch im Folgejahr eine starke Neigung aufwiesen, wurden an den Erntevorsatz hydraulisch angetriebene seitliche Trennmesser montiert. Damit war auch in stärker lagernden Parzellen eine nahezu störungsfreie Ernte möglich. Das Lager der Parzellen wurde zum Erntetermin anhand der entsprechenden Boniturrichtlinien für Sorghumversuche bonitiert.

Die während der Ernte der Versuchspartellen entnommenen Proben für die Trockensubstanzgehaltsbestimmung wurden unmittelbar auf dem Feld für die Aufnahme der Frischmasse verwogen. Anschließend erfolgte eine Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C für mindestens 48 Stunden bis zur Gewichtskonstanz. Durch eine erneute Rückwaage

wurde die Trockenmasse (TM) erfasst. Über den Quotienten der beiden Massen wurde der Trockensubstanzgehalt (TS) der oberirdischen Biomasse der Ernteparzellen bestimmt, der für die Berechnung der Trockenmasseerträge herangezogen wurde. Des Weiteren wurden bei der Ernte Pflanzenproben entnommen, die im Labor auf ihren Gehalt an den Makronährstoffen N, P, K und Mg mittels Elementaranalyse untersucht wurden. Die Vortrocknung dieser Inhaltsstoffproben erfolgte bei 60 °C im Trockenschrank oder mittels Satzrocknung. Unter Berücksichtigung der Trockenmasseerträge wurden daraus die flächenbezogenen Nährstoffabfuhrer berechnet. Die Bestandshöhe der Versuchspartellen wurde an zwei Terminen während der Wachstumsphase von Durchwachsener Silphie (Ende Juni bis Anfang Juli sowie Ende Juli bis Anfang August) und zum Erntetermin gemessen.

Laut BRODMANN (2020) [18] fördert eine frühe N-Düngung zu Durchwachsener Silphie die Stängeldicke, während eine spätere Düngung eher das Längenwachstum und somit die Lagergefahr steigert. Andererseits wird jedoch auch einem frühen hohen N-Angebot wegen der Förderung der Triebdichte eine Erhöhung der Lageranfälligkeit zugeschrieben [14]. Eine unterschiedliche Terminierung der ersten N-Gabe war zwar nicht Teil der Versuchsfrage. Dennoch könnten sich die ausgebrachten N-Düngertypen eventuell in ihrer Wirkungsgeschwindigkeit im Hinblick auf die Pflanzenaufnahme unterscheiden. Um zu überprüfen, ob zwischen den Varianten dieses Versuchs Unterschiede in der Stängeldicke und Triebdichte feststellbar sind, wurden in den Versuchsjahren 2020 und 2021 nach der Ernte entsprechende Bonituren an den ca. 15 cm langen Stängelresten durchgeführt. Für die Bestimmung der Stängeldicke wurde je Parzelle der Durchmesser von acht zufällig ausgewählten Stängeln der Ernteparzellen kurz oberhalb des ersten sichtbar gestreckten Internodiums gemessen. Die Messstelle befand sich folglich meist kurz unterhalb der Schnitthöhe der Ernte. Für die Stängeldicke wurde die Kantenlänge der weitgehend quadratischen Stängel verwendet. Zusätzlich wurden an zwei zufällig ausgewählten Stellen der Ernteparzellen die Triebzahlen auf einer Länge von 2,0 m ausgezählt. Für jede Parzelle wurde aus den Einzelwerten der Stängeldurchmesser bzw. Triebzahlen je m² jeweils ein Mittelwert berechnet und statistisch ausgewertet.

Bei einer sinnvollen Verwertung einer Herstdüngung sollten die Silphiepflanzen den Stickstoff nach der Düngung im Herbst aufnehmen und in den überdauernden Spross- bzw. Wurzelteilen bis zum Austrieb im Frühjahr speichern. Um dies zu überprüfen, wurden am 4. März 2021 kurz vor Vegetationsbeginn und somit vor dem Austrieb der Pflanzen versuchsweise Proben der oberflächennahen Spross- und Wurzelstrukturen entnommen und auf ihren Stickstoffgehalt analysiert. Hierbei wurden die Gärrestvarianten mit und ohne Herstdüngung und zugleich einmaliger Frühjahrsdüngung bei einem N-Bedarfswert von 150 kg N/ha beprobt. Für die Probenahme wurden Rendreihen der Versuchspartellen verwendet, aus denen entsprechend dem Reihenabstand auf einer Breite von 75 cm und einer Länge von 1,0 m auf ca. 25 cm Tiefe der gesamte Boden entnommen wurde. Die Wurzeln wurden anschließend grob gereinigt. Hierbei wurde ein Großteil der anhaftenden Erde und zugleich jedoch auch Feinwurzeln entfernt, so dass in der Probe überwiegend dickere Wurzeln verblieben. Die vorgereinigten Wurzeln wurden in Wasser eingeweicht und die restliche verbliebene Erde abgewaschen. Anschließend wurden die Wurzeln luftgetrock-

net und in einem Gartenhäcksler zerkleinert und verwogen. Je Gesamtprobe wurde eine Teilprobe für die Trockensubstanzgehaltsbestimmung entnommen und bei 105 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anhand dieser Informationen wurde die Wurzel trockenmasse je Hektar berechnet. Darüber hinaus wurden N-, P-, K- und Mg-Gehalte der Wurzelproben bestimmt. Unter Berücksichtigung der Wurzel trockenmasse je Hektar wurde daraus die entsprechende Nährstoffaufnahme bzw. -speicherung in den oberflächennahen Wurzelstrukturen bestimmt.

4.3.4 Witterungsbedingungen bei Ausbringung der Gärreste

Die Witterungsbedingungen während und nach der Ausbringung organischer Dünger mit einem wesentlichen Gehalt an Ammonium haben einen entscheidenden Einfluss auf die die Höhe von Ammoniakverlusten [126] [125]. Hierbei sind insbesondere Faktoren wie Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Sonneneinstrahlung entscheidend [125]. Dies gilt insbesondere, wenn wie im vorliegenden Versuch Gärrest oberflächlich auf die bewachsenen Parzellen abgelegt und nicht direkt in den Boden eingebracht wird. Die entsprechenden Witterungsparameter sind nachfolgend in Tabelle 3 für den Tag der Ausbringung und die zwei Folgetage der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Gärrestdüngungen aufgelistet. Es ist davon auszugehen, dass sich der Großteil der Ammoniakverluste innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Ausbringung ereignet und nach vier Tagen die Ammoniakvolatilisation weitgehend abgeschlossen ist [151].

Die Gärrestdüngung im Herbst 2018, die erste Gabe im Frühjahr 2019, die beiden Frühjahrsgaben im Jahr 2020 und die erste Frühjahrsgabe im Jahr 2021 erfolgten im Hinblick auf Ammoniakemissionen in recht ungünstigen Witterungsabschnitten, da keine Niederschläge im Anschluss an die Ausbringung zu verzeichnen waren und zugleich täglich eine lange Sonnenscheindauer gegeben war. Emissionsmindernd bei der Ausbringung im Herbst 2018 sowie jeweils der ersten Gabe im Frühjahr 2020 und 2021 wirkten sich dagegen die noch niedrigen Temperaturen und die teilweise geringe Windgeschwindigkeit aus.

Ein günstiger Zeitpunkt für die Ausbringung organischer Dünger war bei der Gärrestdüngung im Herbst 2019, Herbst 2020 sowie der zweiten Frühjahrsgabe im Jahr 2019 und 2021 gegeben. Die Ausbringung konnte an diesen Tagen meist bei bewölktem Himmel und geringen Windgeschwindigkeiten erfolgen. Außerdem regnete es an den Folgetagen. Optimale Bedingungen lagen dabei im Herbst 2019 und Frühjahr 2021 vor, da innerhalb von zwölf Stunden nach der Ausbringung erste nennenswerte Niederschlagsmengen fielen. An den anderen beiden Düngeterminen war der Abstand zu kräftigen Niederschlägen, die für eine zusätzliche Infiltration des Gärrests in den Boden sorgten, größer. Es muss beachtet werden, dass zwei Tage nach der ersten Gärrestdüngung im Frühjahr 2020 eine Bearbeitung des Zwischenreihenbereichs mit einer Reihenfräse zur Unkrautbekämpfung erfolgte. Durch diesen Arbeitsgang wurde auch der Gärrest eingearbeitet. Von einer deutlichen Reduktion der Gesamtverluste gegenüber einer praxisüblichen Schleppschlauchausbringung ohne Einarbeitung ist dennoch nicht auszugehen, da sich bis dahin normalerweise bereits ein Großteil der Verluste ereignet hatte [101].

Tabelle 3: Witterungsbedingungen (Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer) am Tag der Gärrestaubsbringungen und den jeweiligen drei Folgetagen; Datengrundlage DWD (2021) [33] [35] [32] [34], Wetterstation Straubing

Gärrestdüngung	Datum	Lufttemperatur (Tagesmittel)	Niederschlag (Tagessumme)	Windgeschwindigkeit (Tagesmittel)	Sonnenscheindauer (Tagessumme)
Einheit		°C	mm	m/s	h
Herbst 2018	25.09.	7,7	0,0	2,1	10,0
1. Folgetag	26.09.	8,0	0,0	2,2	9,4
2. Folgetag	27.09.	10,6	0,0	1,7	10,9
Frühjahr 2019 1. Gabe	01.04.	9,8	0,0	3,3	9,4
1. Folgetag	02.04.	9,8	0,0	2,7	10,4
2. Folgetag	03.04.	12,9	0,0	3,8	7,9
Frühjahr 2019 2. Gabe	08.05.	11,0	0,9	3,2	2,3
1. Folgetag	09.05.	12,2	3,0	3,3	5,2
2. Folgetag	10.05.	12,1	2,4	3,2	3,8
Herbst 2019	07.10.	8,3	0,0	1,6	0,0
1. Folgetag	08.10.	10,2	15,9	2,9	0,0
2. Folgetag	09.10.	11,4	6,9	3,0	0,0
Frühjahr 2020 1. Gabe	24.03.	0,7	0,0	2,7	11,4
1. Folgetag	25.03.	1,6	0,0	6,1	11,5
2. Folgetag	26.03.	4,3	0,0	8,0	5,1
Frühjahr 2020 2. Gabe	07.05.	11,6	0,0	2,1	13,6
1. Folgetag	08.05.	14,9	0,0	2,3	12,1
2. Folgetag	09.05.	16,9	0,0	2,2	7,0
Herbst 2020	24.09.	15,3	9,4	2,4	4,0
1. Folgetag	25.09.	10,7	20,5	3,0	0,0
2. Folgetag	26.09.	7,6	16,4	4,3	0,0
Frühjahr 2021 1. Gabe	25.03.	6,4	0,0	1,5	11,0
1. Folgetag	26.03.	8,8	0,0	2,2	11,1
2. Folgetag	27.03.	8,3	0,4	4,1	2,9
Frühjahr 2021 2. Gabe	11.05.	18,7	12,1	3,2	5,3
1. Folgetag	12.05.	11,8	14,1	3,4	0,0
2. Folgetag	13.05.	10,3	11,1	2,8	0,0

Die Ausbringung der zweiten Gärrestgabe im Frühjahr erfolgte in allen drei Versuchsjahren Anfang Mai, so dass jahreszeitlich bedingt bereits ein höheres Temperaturniveau vorlag. Andererseits wirkte sich der zu diesem Termin bereits ca. 35 cm hohe Pflanzenbewuchs durch die Beschattung und den Windschutz wahrscheinlich emissionsmindernd aus. Dennoch kann eine Benetzung der Blätter auch eine Vergrößerung der emittierenden Oberfläche bewirken. Somit lässt sich schwierig abschätzen, zu welchem der beiden Hauptdüngetermine im Frühjahr im Hinblick auf Ausbringungsverluste günstigere Bedingungen gegeben waren.

4.3.5 Nährstoffbilanzierung

Aus den erhobenen Erträgen, den Nährstoffgehalten des Ernteguts und den über Düngung zugeführten Nährstoffmengen wurden Nährstoffsalden berechnet. Unbekannte Faktoren wie N-Verluste, sonstige N-Einträge und die in den Ernte- und Wurzelrückständen enthaltenen Nährstoffmengen wurden nicht berücksichtigt. Anhand von Unterschieden im Nährstoffsaldo und über die im Boden nach der Ernte vorhandene N_{\min} -Menge wurde die Ausnutzung des über die Düngung zugeführten Stickstoffs beurteilt. Darüber hinaus wurde über die N-Abfuhr der oberirdischen Biomasse auch die Pflanzenverfügbarkeit des in Form von Gärresten ausgebrachten Stickstoffs im Vergleich zur mineralischen N-Düngung über ein Mineraldüngeräquivalent abgeschätzt. Die Berechnung des Mineraldüngeräquivalents erfolgte ausgehend von der Beziehung zwischen der N-Abfuhr bei mineralischer Düngung und der über Mineraldünger zugeführten N-Menge.

4.3.6 Drohnengestützte Erfassung von Bestandsparametern

4.3.6.1 Multispektralaufnahmen

Während der Wachstumsphase von Durchwachsener Silphie wurden mit einer Drohne (Abbildung 8, Matrice M210, DJI Co. Ltd., Shenzhen Guangdong, PRC) wiederholt Multispektralaufnahmen der Versuchspartellen angefertigt. Daraus wurden verschiedene Vegetationsindizes berechnet, anhand derer ergänzende Aussagen zur Biomassebildung und N-Aufnahme der Versuchsvarianten abgeleitet wurden.

Für die Erzeugung georeferenzierter Multispektraldaten müssen zahlreiche Einzelaufnahmen des Sensors zu einer Gesamtdatei verrechnet werden. Hierfür wurden entlang einer Flugroute über die Versuchsfläche in gleichmäßigen Abständen Bildaufnahmen mit lotrechter Aufnahmeachse erzeugt. Die Höhe der Befliegung betrug 30 m bei einer Überlappung zur Seite und in Flugrichtung von 70 bis 80 %. Zur optischen Erfassung des Pflanzenaufwuchses kam eine Multispektralkamera (RedEdge-MX, Micasense Inc., Seattle, WA, USA) zum Einsatz. Diese erzeugte passive Aufnahmen der Strahlungsreflexion des Pflanzenbestands in fünf definierten Wellenlängenkanälen. Über die fünf Messkanäle wurden die Wellenlängen 475 nm (blau), 560 nm (grün), 670 nm (rot), 720 nm (*red edge*) und 840 nm (nahinfrarot, NIR) erfasst. Anhand einer gleichzeitigen Messung der auftreffenden Sonnenstrahlung mit einem zum Multispektralsensor abgestimmten Tageslichtsensor wurde der Anteil der reflektierten Strahlung der entsprechenden Wellenlängen berechnet.

und als Bilddatei mit Positionssignal ausgegeben. Um die Daten verschiedener Messtermine vergleichen zu können, wurde außerdem eine Kalibrierung des Sensors vorgenommen. Hierzu wurden zu Beginn jeder Befliegung Aufnahmen eines Kalibrierungspanels (calibrated reflectance panel, Micasense Inc., Seattle, WA, USA) erzeugt und später für die Kalibrierung in der Fotogrammetrie-Software verwendet.



Abbildung 8: Versuchsdrohne mit Multispektralsensor (links) und RGB-Sensor (rechts)

Aus den Reflexionsanteilen der verschiedenen Wellenlängen lassen sich wiederum verschiedene Vegetationsindizes wie der NDVI (*normalized difference vegetation index* [111], Formel 4.1) berechnen. Der NDVI weist bekanntermaßen eine Beziehung zur oberirdischen Biomasse auf und kann somit zur Beurteilung des Pflanzenaufwuchses herangezogen werden [87]. Die Beziehung zur N-Aufnahme ist beim NDVI hingegen weniger gut ausgeprägt.

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot} \quad ([111]) \quad (4.1)$$

NDVI: normalized difference vegetation index

NIR: Reflexionsanteil des Lichts im Bereich der Nahinfrarotstrahlung (hier: Messkanal der Multispektralkamera von 840 nm)

Rot: Reflexionsanteil des Lichts im Bereich roter Strahlung (hier: Messkanal der Multispektralkamera von 670 nm)

Die Einzelbilder aus den Multispektralaufnahmen einer Befliegung wurden über die Software „Pix4Dmapper“ (Version 4.6.4, Pix4D S.A., Prilly, Schweiz) zu einem georeferenzierten Gesamtbild (Orthofoto) des Versuchs verrechnet. Anschließend wurde unter Berücksichtigung der entsprechenden Wellenlängenkanäle ein Bild der Indexwerte berechnet und anhand dessen über die GIS-Software „Mini GIS V2“ (Version 2.11.1.0, iXmap Services GmbH & Co. KG, Regenstauf, Deutschland) die mittleren Werte im Bereich der einzelnen Parzellen des Versuchs ermittelt (Abbildung 9). Die Berechnung der Mittelwerte der Vegetationsindizes je Parzelle erfolgten für den Bereich der jeweiligen Ernteparzellen.

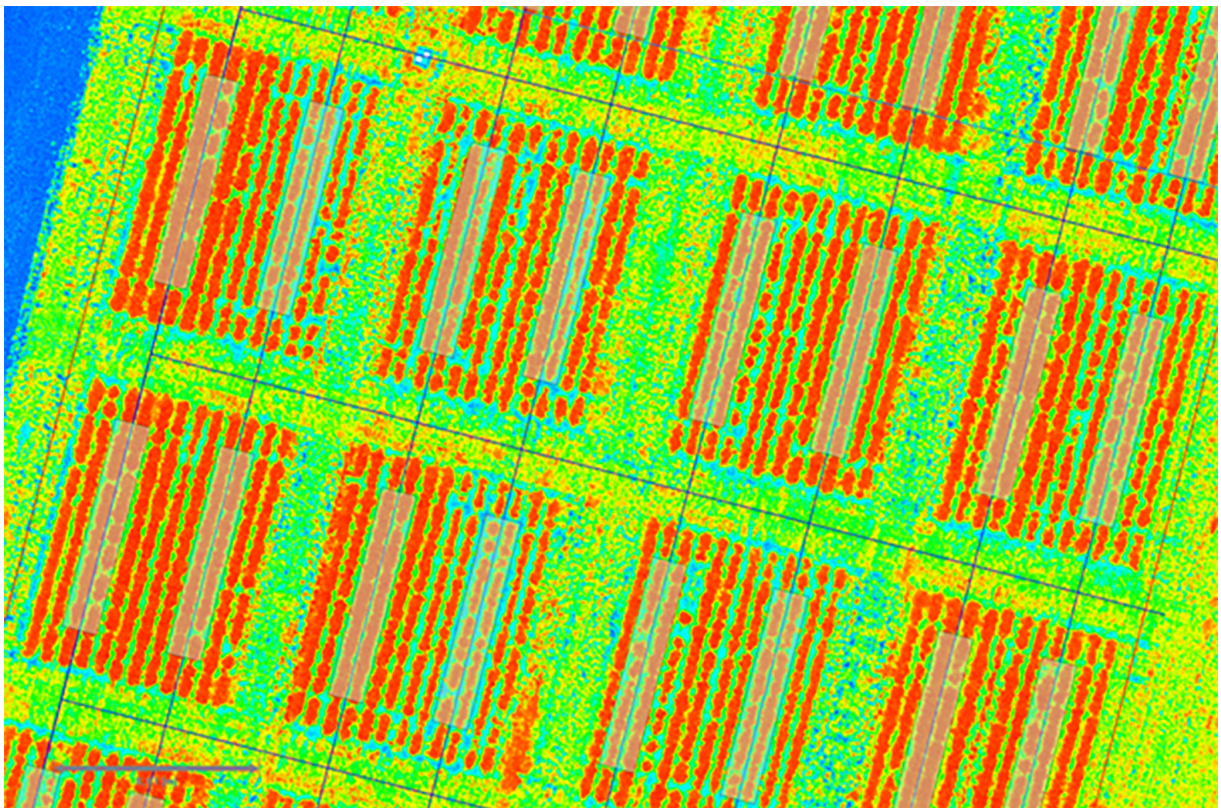


Abbildung 9: Ausschnitt aus der Software „Mini GIS V2“ mit den Ernteparzellen der Versuchsanlage im Vordergrund und den NDVI-Werten der Versuchsfläche aus der Messung vom 28. April 2020 im Hintergrund (als Farbwerte dargestellt)

Bei der Verrechnung der Einzelbilder der Messaufnahmen vom 11. Juli 2019 wurden aus unbekanntem Gründen bei einigen Aufnahmen im westlichen Teil der Versuchsfläche keine Verknüpfungspunkte gefunden. Für diesen Bereich konnten zu diesem Termin folglich keine Indexwerte berechnet werden, so dass meist nur drei verwertbare Wiederholungen der Parzellen gegeben waren. Im Versuchsjahr 2020 wurde am 28. April, 13. Mai, 26. Mai und 26. Juni eine Rasterbefliegung zur Aufnahme von Multispektralbildern durchgeführt. Im Jahr 2021 wurden am 15. Juni und 13. Juli Multispektralaufnahmen der Versuchspartellen erzeugt. Neben dem NDVI wurden außerdem die nachfolgend in Tabelle 4 dargestellten Vegetationsindizes berechnet und deren Korrelation mit dem Ernteertrag überprüft.

Tabelle 4: Berechnungsformeln weiterer Vegetationsindizes

Vegetationsindex	Abkürzung	Formel	Referenz
<i>normalized difference vegetation index</i>	NDVI	$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rot}}{\text{NIR} + \text{Rot}}$	[111]
<i>soil adjusted vegetation index</i>	SAVI	$1,5 \times \frac{\text{NIR} - \text{Rot}}{\text{NIR} + \text{Rot} + 0,5}$	[73]
<i>leaf chlorophyll index</i>	LCI	$\frac{\text{NIR} - \text{rededge}}{\text{NIR} + \text{Rot}}$	[26]
<i>normalized difference red edge index</i>	NDRE	$\frac{\text{NIR} - \text{rededge}}{\text{NIR} + \text{rededge}}$	[8]
<i>infrared – red ratio</i>	IR/R	$\frac{\text{NIR}}{\text{Rot}}$	[98]
<i>infrared – green ratio</i>	IR/G	$\frac{\text{NIR}}{\text{Grün}}$	[135]
<i>green – red ratio</i>	G/R	$\frac{\text{Grün}}{\text{Rot}}$	[152]

4.3.6.2 Digitale Höhenmessung

Außerdem wurde eine Methode zur digitalen Höhenmessung im Feldversuchswesen auf der Basis von Drohnenaufnahmen getestet. Die Methode basiert darauf, dass zunächst von einer Fläche ohne Bewuchs mittels einer Befliegung und Rasterfotoaufnahme ein digitales Geländemodell (DGM bzw. DTM) erzeugt wird. Weitere Drohnenaufnahmen zu späteren Terminen mit entsprechendem Pflanzenaufwuchs der Versuchspartellen werden zu einem digitalen Oberflächenmodell (DOM bzw. DSM) verrechnet. Über die Differenz des Höhenniveaus beider Oberflächen lässt sich anschließend ein Raster der Wuchshöhe der Pflanzen berechnen (Höhenmodell, *Canopy Height Model*, CHM) (Abbildung 10), an dem für einzelne Punkte oder bestimmte Flächen die Höhendifferenz gegenüber dem Bezugsniveau abgelesen werden kann. Im Feldversuchswesen ist oft die mittlere Pflanzenhöhe einer Parzelle bedeutend. Um hierfür aus dem Höhenmodell korrekte Werte zu er-

halten, muss aus der Gesamtzahl der Höhenwerte im Bereich einer Parzelle der passende Bereich bzw. die passende statistische Kenngröße ausgewählt werden.

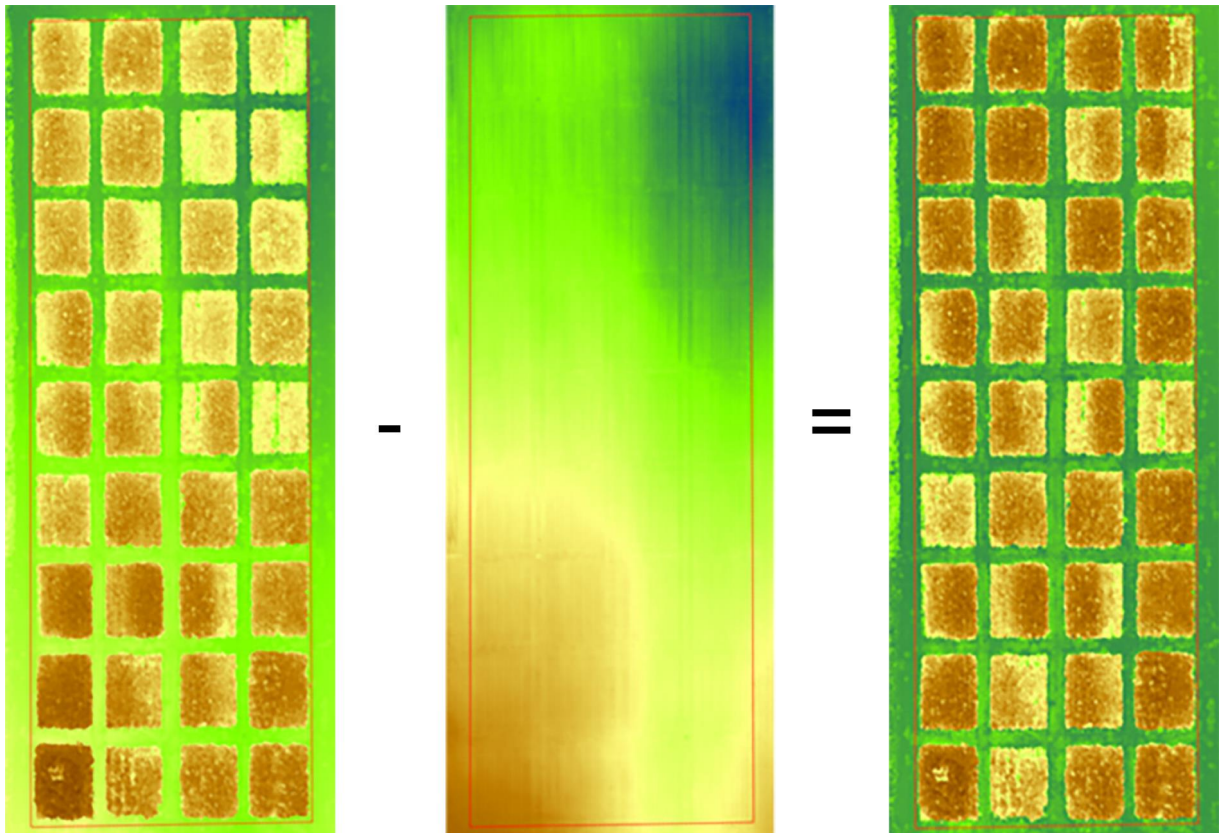


Abbildung 10: Die Differenz aus digitalem Oberflächenmodell vom 23. Juli 2020 (links) und digitalem Geländemodell (Mitte) ergibt die Wuchshöhe (rechts); gleiche Farbwerte repräsentieren identische Höhen innerhalb eines Kartenausschnitts

Für die Fotoaufnahmen wurde eine mit einer 20-Megapixel-RGB-Kamera ausgestattete Drohne vom Typ „Mavic 2 Pro“ (DJI Co. Ltd., Shenzhen Guangdong, PRC) verwendet. Über die Software „Pix4D Capture“ wurde ein Flugplan für die Rasterfotoaufnahmen erstellt. Die Verrechnung der Einzelbilder zu einer georeferenzierten Punktwolke und die Erzeugung der Oberflächenmodelle als Rasterdateien erfolgten wie bei den Multispektralaufnahmen mit der Software „Pix4Dmapper“ (Version 4.3.33, Pix4D S.A., Prilly, Schweiz).

Bei der Befliegung wird den einzelnen Bildern eine *Geolocation* zugewiesen, die aber bei Drohnen ohne integrierte Real-Time-Kinematik-Korrektur (RTK-Korrektur) je nach Signalstärke eine absolute Abweichung von 0,5 m und mehr aufweisen kann. Daraus resultiert ein relativ großer räumlicher Fehler zwischen zwei verschiedenen Erfassungsterminen. Für Höhenmessungen, die aus einem Vergleich von Höhenmodellen unterschiedlicher Erfassungstermine erfolgen, ist folglich ein fixes Bezugsniveau in beiden Oberflächenmodellen erforderlich. Dieses wird über sogenannte Passpunkte oder *Ground Control Points* erreicht. Hierbei handelt es sich um feste, eindeutig in den Drohnenaufnahmen erkennbare

Punkte, die nicht überwachsen werden und sowohl bei der Aufnahme des Geländemodells als auch zum Zeitpunkt der eigentlichen Höhenmessung vorhanden sind. Für diese Punkte muss außerdem die exakte geografische Position bekannt sein.

Um die Genauigkeit der Methode zu verbessern, wurden im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie vier *Ground Control Points* platziert. Hierfür wurde auf quadratische Betonfliesen mit 0,5 m Kantenlänge ein Schachbrettmuster aufgetragen, um in den Drohnenaufnahmen eindeutig und schnell den Mittelpunkt bestimmen zu können (Abbildung 11). Darüber hinaus gewährleisteten die Platten mit einer Dicke von 5 cm eine ausreichende Stabilität, um bei Pflege- und Erntearbeiten überfahren werden zu können. Die Koordinaten der Plattenmittelpunkte wurden anschließend mit einem RTK-GPS-Empfänger (S900 GNSS Receiver, Stonex Srl, Paderno, Italien) exakt bestimmt und in die Fotogrammetrie-Software zur Verbesserung der geografischen Genauigkeit aufgenommen.

Die Aufnahme des Grundgeländes der Versuchsfläche ohne größeren Bewuchs erfolgte am 7. April für das Jahr 2020 und am 2. März für das Jahr 2021. Zur Höhenmessung wurden im Versuchsjahr 2020 Befliegungen am 13. Mai, 4. Juni, 2. Juli, 23. Juli und vor der Ernte am 1. September durchgeführt. Hierbei wurde eine Flughöhe von 20 m, eine Überlappung in Flugrichtung von 80 % und eine seitliche Überlappung von 70 % gewählt. Leider konnten aus den Befliegungen am 2. Juli und zur Ernte am 1. September aus unbekanntem Gründen keine fehlerfreien Gesamtbilder und Oberflächenmodelle berechnet werden. Ein direkter Vergleich mit den an diesen Terminen zugleich durchgeführten physikalischen Höhenmessungen mit einer Messlatte war somit nicht möglich.

Im Versuchsjahr 2021 wurden die drohnengestützten Messungen der Pflanzenhöhe von Durchwachsener Silphie durch eine Bachelorarbeit einer Studierenden des Wissenschaftszentrums Straubing (Technische Universität München) erweitert. Neben Drohnenaufnahmen zur Höhenmessung wurden zugleich auch umfangreiche physikalische Messungen für einen direkten Vergleich der beiden Verfahren zur Höhenmessung durchgeführt. Die Messungen erfolgten am 8. Juni, 29. Juni, 20. Juli und 9. August. Für die händischen Messungen wurde an jedem Termin mit einer Messlatte an zehn zufällig ausgewählten Silphietrieben der Ernteparzellen die Pflanzenhöhe bestimmt, wobei von der Bodenoberfläche bis zum höchsten Punkt der Pflanze gemessen wurde. Die Drohnenaufnahmen wurden immer jeweils um die Mittagszeit (11:30 bis 13:00 Uhr) erstellt. Zu jedem Termin wurde eine Befliegung in sowohl 25 als auch 35 m Flughöhe durchgeführt, um den Einfluss der Flughöhe auf Genauigkeit und Verzerrung dieses Messverfahrens zu untersuchen. Die Überlappung in Flugrichtung betrug jeweils 80 % und die seitliche Überlappung 70 % bei 25 m Flughöhe bzw. 80 % bei 35 m Flughöhe. Zusätzlich wurden für eine Überprüfung der Genauigkeit der erzeugten Höhenmodelle Höhenreferenzen platziert. Hierfür wurden Kunststoffkisten verwendet, aus denen durch Umdrehen und Stapeln fünf unterschiedlich hohe Säulen erstellt wurden. Der Mittelpunkt der Bodenfläche der jeweils obersten Kisten wurde markiert und die exakten Koordinaten an jedem Messtermin mit einem RTK-GPS-Empfänger bestimmt. Zur Bewertung der Genauigkeit wurde der RMSE (*Root Mean Square Error*) zwischen den gemessenen Koordinaten der Höhenreferenzen und den aus den Höhenmodellen geschätzten Koordinaten berechnet. Des Weiteren wur-

den die RMSEs und die Korrelationen zwischen den aus dem CHM geschätzten Pflanzenhöhen und den händisch gemessenen Pflanzenhöhen bestimmt. Für die aus dem Höhenmodell geschätzten Pflanzenhöhen wurden die Mittelwerte der Quantile 70 bis 80 %, 80 bis 90 % und 90 bis 99 % der Rasterwerte des CHM im Bereich der Ernteparzellen verwendet, um herauszufinden, welche Werte des Wuchshöhenrasters am besten für die Ermittlung der absoluten Pflanzenhöhen geeignet sind. Die Mittelwerte der Quantilbereiche wurden jeweils aus den Quantilen ganzzahliger Prozentwerte gebildet.



Abbildung 11: Einer von vier Ground Control Points zur Georeferenzierung nach dessen Platzierung Anfang April 2020

4.3.7 Bestimmung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie

Der Wachstumsverlauf sowie der Verlauf der Stickstoffaufnahme von Durchwachsener Silphie wurde durch Beprobung einer im Jahr 2017 etablierten Silphiefläche (Länge: 40 m, Breite: 8 m) bestimmt. Die Anlage dieser Fläche erfolgte in Reinsaat mit einem Reihenabstand von 0,5 m. Auf dieser Fläche wurden Teilparzellen festgelegt, aus denen in allen Versuchsjahren an mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden Terminen wiederholte Pflanzen- und Bodenproben entnommen wurden. In den Jahren 2020 und 2021 wurde hierzu die Fläche in drei Blöcke unterteilt, in denen jeweils acht Parzellen mit einer Breite von 1,5 m und einer Länge von 3,6 m enthalten waren. Innerhalb eines Blocks wurden die Schnitttermine zufällig den Parzellen zugeordnet. Im Jahr 2019 erfolgte ebenfalls eine Blockbildung, jedoch waren in den Blöcken nur sieben Parzellen enthalten und die Parzel-

lenlänge betrug 3,1 m. Im Gegensatz zu den beiden Folgejahren wurde in diesem Jahr für die Ertragerfassung zum Erntetermin eine zusammenhängende Teilfläche von 24,0 m² beprobt. Dagegen wurde die Bestimmung des Trockenmasseertrags zum Erntetermin in den Versuchsjahren 2020 und 2021 entsprechend den Probenahmen während der Wachstumsphase durchgeführt. Die Probenahmefläche je Schnitttermin betrug in den Jahren 2020 und 2021 5,4 m² und war somit etwas größer als im ersten Projektjahr (4,65 m²). Die Steigerung der Beprobungsfläche wurde in der Hoffnung realisiert, den Versuchsfehler zu reduzieren. Die Schnitttermine wurden außerdem jährlich neu innerhalb der Blöcke verteilt. Seitlich zwischen zwei Parzellen war dabei immer mindestens eine Pflanzenreihe als verbleibende Pufferfläche vorhanden. In Saatrichtung war zwischen zwei Parzellen ein Abstand von 1,1 m (2020 und 2021) bzw. 1,5 m (2019) gegeben. Durch den verbleibenden Pflanzenbewuchs zwischen zwei Parzellen sollte eine Beeinflussung des Pflanzenwachstums benachbarter Parzellen aufgrund der unterschiedlichen Schnitttermine vermieden werden.

In allen Versuchsjahren wurden während der Vegetation sieben Schnitttermine und eine Probenahme zum eigentlichen Erntetermin durchgeführt. Die Pflanzenproben wurden für eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die gesamte Projektlaufzeit an vergleichbaren Terminen entnommen. In den Jahren 2019 und 2020 startete die Probenahme Anfang Mai zu Beginn des Schossens, während 2021 wegen der feucht-kühlen Witterung im Mai erst Ende Mai begonnen wurde. Alle Schnitttermine sind im Anhang in Tabelle 26, Tabelle 27 und Tabelle 28 aufgeführt.

An den einzelnen Schnittterminen wurde jeweils zunächst die Bestandshöhe ermittelt, der oberirdische Pflanzenbewuchs ca. 5 cm über der Bodenoberfläche entfernt und für die Bestimmung der Frischmasse verwogen (Abbildung 12). Anschließend wurden die Pflanzenproben in einem Laborhäcksler zerkleinert und Mischproben für die Trockensubstanzgehaltsbestimmung und Nährstoffgehaltsuntersuchung entnommen. Die Trocknung der Proben zur Trockensubstanzgehaltsbestimmung erfolgte bei 105 °C. Die Inhaltsstoffproben wurden bei 60 °C getrocknet und auf ihren Gehalt an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium analysiert. Neben der N-Aufnahme der oberirdischen Biomasse wurde zu den einzelnen Schnittterminen auch die Menge mineralischen Stickstoffs im Boden bestimmt. Hierzu wurden jeweils nach dem Entfernen des Pflanzenaufwuchses Bodenproben aus den Tiefenbereichen 0 bis 30 cm, 30 bis 60 cm und 60 bis 90 cm entnommen. Je Parzelle wurden vier Einstiche durchgeführt.



Abbildung 12: Parzelle im Silphiebestand für die Untersuchung des Wachstumsverlaufs nach Entnahme der ersten Biomasseproben am 7. Mai 2020

Der beprobte Silphiebestand wurde ausschließlich mineralisch gedüngt. Die gesamte N-Düngung in den Versuchsjahren 2019, 2020 und 2021 betrug 130 kg N/ha, 140 kg N/ha bzw. 170 kg N/ha, wobei zwei Teilgaben erfolgten (Tabelle 5). Im Versuchsjahr 2021 wurde die N-Düngung aufgrund des hohen Ertragsniveaus der Vorjahre erhöht. Bis zur ersten Pflanzen- und Bodenprobenahme war in allen Versuchsjahren die gesamte N-Düngung ausgebracht. Für die N-Düngung wurde fast ausschließlich Kalkammonsalpeter verwendet.

Tabelle 5: Stickstoffdüngung im Versuch zur Bestimmung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie

Versuchsjahr	Termin	N-Düngung	Düngerart
2019	12. März	60 kg N/ha	Kalkammonsalpeter (27 % N)
2019	16. April	70 kg N/ha	Kalkammonsalpeter (27 % N)
2020	27. März	80 kg N/ha	Kalkammonsalpeter (27 % N)
2020	23. April	60 kg N/ha	Kalkammonsalpeter (27 % N)
2021	03. März	50 kg N/ha	Ammonsulfatsalpeter (26 % N)
2021	30. März	120 kg N/ha	Kalkammonsalpeter (27 % N)

4.4 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen

Für die Untersuchung der Umbruchstrategien wurde im Jahr 2019 je ein Versuch für den Umbruch von Durchwachsener Silphie und Sida mit identischem Aufbau angelegt. Während der Silphieumbruchversuch bis Projektende fortgeführt wurde, musste der entsprechende Versuch zum Umbruch von Sida Ende 2020 beendet werden. Im Jahr 2021 wurde ein neuer Versuch zum Umbruch von Sida im Frühjahr angelegt.

4.4.1 Silphie- und Sidaumbruch (Anlagejahr 2019)

4.4.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau der im Jahr 2019 angelegten Umbruchversuche in Straubing (Durchwachsene Silphie) und Wolferkofen (Sida) wurde so an die beiden für den Umbruch zur Verfügung stehenden Versuchsflächen angepasst, dass diese bestmöglich genutzt wurden. Hierbei musste ein Kompromiss zwischen der getesteten Anzahl unterschiedlicher Varianten, der Wiederholungszahl sowie der Randomisation eingegangen werden. Darüber hinaus war die praktische Durchführbarkeit der Bodenbearbeitungs-, Pflege- und Erntearbeiten zu beachten. Die Versuchsfläche mit Durchwachsener Silphie am Standort Straubing bestand aus 63 Parzellen, die in sieben Spalten und neun Reihen angeordnet waren. Der zum Umbruch zur Verfügung stehende Sidaversuch in Wolferkofen war aus 81 Parzellen (neun Spalten und neun Reihen) aufgebaut. Zusätzlich wurde versucht zu beachten, dass aufgrund der Vornutzung der Versuchsflächen für Gärrestdüngungsversuche von 2017 bis 2018 eine unterschiedliche, entweder rein mineralische oder rein organische N-Düngung in den einzelnen Parzellenspalten gegeben war. Eine entsprechende Düngung der Parzellen wurde auch im Frühjahr 2019 weitergeführt, um bei der Auswertung des anschließenden Umbruchs eventuell bereits den Effekt einer mehrjährigen organischen Düngung beurteilen zu können.

Als Varianten für die Umbruchmethode wurden die Bodenbearbeitungsgeräte Pflug, Grubber und Fräse gewählt. Für ein möglichst homogenes und repräsentatives Arbeitsbild wurden die Bearbeitungsvarianten senkrecht zu den ursprünglichen Dauerkulturparzellen und der späteren Saatrichtung ausgerichtet. Zusätzlich wurde die Bodenbearbeitung über die gesamte Versuchsbreite auf jeweils einer Parzellenreihe einheitlich durchgeführt. Jede dritte Parzellenreihe wurde für spätere Wendewege ausgespart und mit der Fräse umgebrochen. Somit verblieben bei der Versuchsanlage mit Durchwachsener Silphie für den Umbruchversuch 42 Parzellen (Abbildung 13). Bei der Sidafläche wurde die Versuchsanlage des Umbruchversuchs auf die gleiche Parzellenanzahl beschränkt. Die zur Verfügung stehenden Parzellen wurden anschließend in einen Teil mit und ohne N-Düngung aufgeteilt. Der gedüngte Bereich diente in erster Linie der Untersuchung des Dauerkulturdurchwuchses.

Neben der Umbruchmethode wurde als zweiter Versuchsfaktor die nachfolgende Kultur variiert. Da die Dauerkulturen Durchwachsene Silphie und in geringem Maße auch Sida primär in Biogasbetrieben Verwendung finden, wurden als Folgekulturen im ersten Jahr nach dem Umbruch Mais (*Zea mays* L.) und Triticale (*Triticum* × *Secale cereale*) gewählt.

Darüber hinaus wird der Anbau von Mais oder Getreide für eine Bekämpfung von Silphiedurchwuchs als geeignet angesehen [67] [14] [133]. Dieser Versuchsfaktor wurde randomisiert und auf vier Wiederholungen (Blöcke) verteilt. Eine gleichmäßige Verteilung der Folgekulturen auf die Streifen mit unterschiedlicher Düngung der Vorjahre war allerdings aufgrund der begrenzt zur Verfügung stehenden Anzahl an Parzellen nicht möglich. Des Weiteren wurde die Randomisation dadurch eingeschränkt, dass aus Gründen der Versuchsdurchführung immer zwei Parzellen mit der gleichen Fruchtart direkt aufeinanderfolgen mussten. Im zweiten Jahr nach dem Umbruch wurden die Folgekulturen jeweils vertauscht (Abbildung 14). Da sich der Saatzeitpunkt des Wintergetreides wegen der feuchten Herbstwitterung im Jahr 2020 allerdings sehr weit nach hinten verschob, musste anstelle von Triticale nach der ersten Folgekultur Mais ein Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) gesät werden.

Die Parzellen ohne N-Düngung wurden für eine genauere Bestimmung der N-Mineralisation nach dem Umbruch verwendet. Hierfür wurden in diesem Bereich neben den beiden Folgekulturen Mais und Triticale zur Beprobung des Bodens auch unbewachsene Parzellen angelegt. Durch wiederholtes Fräsen wurden Ackerbegleitflora und Dauerkulturdurchwuchs beseitigt, damit die Parzellen über die gesamte Vegetationsperiode nach dem Umbruch möglichst unbewachsen waren. Aufgrund der eingeschränkten Parzellenanzahl war dort eine gleichmäßige Berücksichtigung der unterschiedlichen Düngung der Vorjahre zusammen mit den beiden Versuchsfaktoren ebenfalls nicht möglich. Um die gemessenen Werte für die N-Nachlieferung zumindest ansatzweise mit denen einer unter standorttypischer Fruchtfolge stehenden Ackerfläche vergleichen zu können, wurden außerdem je Standort auf einem an der Versuchsfläche angrenzenden Praxisschlag Parzellen mit Mais bzw. ohne Bewuchs angelegt und im Hinblick auf die N-Nachlieferung untersucht.

Auch bei den ungedüngten Parzellen war eine gleichmäßige Randomisation der Umbruchverfahren über die unterschiedliche Düngungsvorgeschichte nicht möglich, so dass für diesen Teil eine varianzanalytische Auswertung nicht sinnvoll war.



Abbildung 13: Blick auf die Versuchsanlage zur Untersuchung des Umbruchs von Durchwachsener Silphie am 16. Juni 2020



Abbildung 14: Blick auf die Versuchsanlage zur Untersuchung des Umbruchs von Durchwachsener Silphie am 22. Juni 2021

4.4.1.2 Umbruch der Dauerkulturflächen

Die Berechnung des N-Düngebedarfs von Durchwachsener Silphie für die Düngung der Dauerkultur im Frühjahr 2019 wurde ausgehend von einer Ertragserwartung von 154 dt TM/ha durchgeführt. Nach der zum damaligen Zeitpunkt noch möglichen Berechnung des N-Düngebedarfs von Durchwachsener Silphie nach der Düngebedarfsermittlung für Ackerkulturen belief sich der N-Bedarfswert auf 150 kg N/ha. Abzüglich eines N_{\min} -Werts von nur 11 kg N/ha (Durchschnitt der Versuchsfläche) ergab sich ein Düngebedarf von 139 kg N/ha. Dieser Bedarf wurde in den rein mineralisch gedüngten Varianten in Form von Kalkammonsalpeter in einer Gabe am 5. April ausgebracht. In den in den Vorjahren mit Gärresten gedüngten Varianten sollte der N-Bedarf erneut ausschließlich mit Gärresten gedeckt werden. Die auszubringende Menge wurde dabei ausgehend vom N-Düngebedarf unter den Vorgaben der Düngeverordnung entsprechend dem in 4.3.2 beschriebenen Vorgehen berechnet. Der Gärrest wurde am 2. April in einer Gabe mit einem Parzellengüllefass ausgebracht.

Bei Sida war bei einer Ertragserwartung von etwa 110 dt TM/ha ein N-Bedarfswert von 100 kg N/ha gegeben [10]. Bei einem N_{\min} -Vorrat im Frühjahr von 20 kg N/ha belief sich somit der N-Düngebedarf für den letztmaligen Aufwuchs der Dauerkultur im Jahr 2019 auf 80 kg N/ha. Die mineralische N-Düngung erfolgte ebenfalls am 5. April. Die Gärrestvarianten wurden am 2. April gedüngt. Die Gärreste für die Düngung der beiden Umbruchflächen stammten aus derselben Biogasanlage wie beim Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie. Ätزشäden nach der Gärrestdüngung wurden weder bei Sida noch bei Durchwachsener Silphie beobachtet.

Am 25. April wurde zusätzlich auf beiden Versuchsflächen eine mineralische P- und K-Düngung mit einem P-/K-Mischdünger (14,6 % P_2O_5 , 29,2 % K_2O , 4,3 % S) durchgeführt. Vorrangiges Ziel dieser Maßnahme war, die fehlende Zufuhr dieser Nährelemente in den Varianten mit rein mineralischer N-Düngung auszugleichen und für die Folgekulturen nach dem Umbruch einheitliche Bodengehalte im optimalen Bereich auf der gesamten Versuchsfläche bereitzustellen. Die P-/K-Zufuhr erfolgte in Höhe der erwarteten Abfuhr, wobei in den organisch gedüngten Varianten die Nährstoffzufuhr über die Gärreste berücksichtigt wurde. Die zugeführten Nährstoffmengen bei Durchwachsener Silphie beliefen sich auf 292 kg K_2O /ha und 146 kg P_2O_5 /ha in den mineralisch gedüngten Parzellen und 146 kg K_2O /ha und 73 kg P_2O_5 /ha bei organischer Düngung. Bei Sida wurden in den Parzellen mit mineralischer N-Düngung 195 kg K_2O /ha und 97 kg P_2O_5 /ha ausgebracht, in den mit Gärresten gedüngten Parzellen 78 kg K_2O /ha und 39 kg P_2O_5 /ha. Eine Grundbodenuntersuchung der unterschiedlich gedüngten Streifen nach der Ernte im Jahr 2019 bestätigte, dass zwischen den beiden Düngungsvarianten keine bedeutenden Unterschiede hinsichtlich der Bodengehalte dieser Nährelemente vorlagen. Des Weiteren erfolgte auf der Silphiefläche nach der Ernte eine Erhaltungskalkung mit 40 dt/ha kohlensaurem Magnesiumkalk (70 % $CaCO_3$, 20 % $MgCO_3$), da dort insbesondere in den mineralisch gedüngten Varianten der pH-Wert mit 6,2 am unteren Ende des optimalen Bereichs lag.

Der Umbruch der Durchwachsenen Silphie wurde am 30. September durchgeführt, die Sidafläche wurde am 27. September umgebrochen. Die Erträge der beiden Dauerkulturen

wurden zuvor entsprechend den unterschiedlich organisch und mineralisch gedüngten Parzellenspalten streifenweise mit einem Traktor mit Frontanbauhäcksler sowie Probenahme- und Wiegeeinheit erfasst. Nach der Ernte wurde bei beiden Dauerkulturflächen die Triebdichte der einzelnen Parzellen ausgezählt, die später für die Untersuchung des Umbruchs herangezogen wurden. Hierbei wurden je Parzelle unter Ausschluss eines Randbereichs von ca. 1,0 m drei Zählungen auf einer Fläche von 1,0 m² durchgeführt. Die Platzierung der drei Zählbereiche in einer Parzelle wurde zufällig gewählt. Sehr dünne Triebe wurden von der Zählung ausgeschlossen. Die auf diese Weise ermittelten Triebdichten je Parzelle wurden im Folgejahr als mögliche Kovariable bei der varianzanalytischen Auswertung des Durchwuchses getestet.

Der Umbruch mit den unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten wurde anschließend quer zur Fahrtrichtung der ursprünglichen Parzellen über die gesamte Versuchsbreite durchgeführt. Bezüglich der Randomisation waren dadurch Großteilstücke ähnlich einer Spaltenanlage gegeben. Für die Pflugvariante wurde ein Zweischarpflug (Kverneland AS, Kverneland, Norwegen) mit mechanischer Steinsicherung und einer Schnittbreite je Körper von 36,5 cm verwendet. Der Körperabstand betrug 80 cm. Als Grubber wurde ein zweibalkiger Grubber (Smaragd 9, Lemken GmbH & Co. KG, Alpen, Deutschland) mit Einebnungsscheiben und Rohrstabwalze mit 3,0 m Arbeitsbreite verwendet. Dieser verfügte über sieben Zinkträger, an denen jeweils 45 cm breite Flügelschare montiert waren. Bei etwa 43 cm Strichabstand wies das Gerät somit eine geringe Überlappung der Schare auf. In der Fräsvariante wurde als Fräse eine 1,8 m breite Bodenfräse (HR 16-180, Howard Iberica S.A., Les Franqueses del Vallès, Spanien) eingesetzt. Alle Geräte wurden an entsprechend leistungsfähigen Traktoren angebaut, um eine ausreichende Arbeitsgeschwindigkeit zu ermöglichen (Abbildung 15).

Die Saatbettbereitung zur Aussaat der Triticale im Herbst des Umbruchjahrs erfolgte am 1. Oktober kurz nach dem Umbruch der beiden Dauerkulturflächen und direkt vor der nachfolgenden Aussaat. Hierfür wurden eine Kreiselegge mit Zahnpackerwalze im Heckanbau und eine Cambridgewalze im Frontanbau verwendet. Für eine bessere Einebnung der Oberfläche erfolgte die Saatbettbereitung in Richtung der vorausgegangenen Bodenbearbeitung für den Umbruch und somit senkrecht zur späteren Saatrichtung. Darüber hinaus wurde die gesamte Versuchsfläche bearbeitet, so dass auch auf den späteren Maisparzellen bereits im Herbst eine einebnende Saatbettbereitung durchgeführt wurde.

In den Versuchsjahren 2020 und 2021 wurden die unbestellten Parzellen, die für die Untersuchung der N-Mineralisation möglichst über die gesamte Vegetationsperiode unbewachsen sein sollten, bei Bedarf mit einer Fräse, Kreiselegge oder einem Flachgrubber bearbeitet. Im Jahr 2020 konnten sie dadurch bis Anfang August weitgehend frei von stärkerem Bewuchs gehalten werden. Ende August war jedoch in Wolferkofen auf den umgebrochenen Sidaparzellen ein deutlicher Unkraut- und Sidabesatz vorhanden. Auch die Fläche des Silphieumbruchs zeigte insbesondere in den gepflügten und gegrubberten Varianten einen starken Silphiebesatz. Im Jahr 2021 waren im Silphieumbruchversuch die entsprechenden Parzellen bis in den Herbst größtenteils unbewachsen.



Abbildung 15: In den Umbruchversuchen eingesetzte Bodenbearbeitungsgeräte (von links nach rechts: Pflug, Grubber, Fräse)

4.4.1.3 Pflanzenbauliche Maßnahmen in den Folgekulturen

4.4.1.3.1 Versuchsjahr 2020

Die Wintertriticale mit Ansaat im Herbst des Umbruchjahrs wurde sowohl nach Durchwachsener Silphie als auch nach Sida am 1. Oktober mit einer Bandkopf-Parzellensämaschine (Inotec Engineering GmbH, Ilshofen, Deutschland) gesät. Es wurde gebeiztes Saatgut („Landor CT-FM“) der Sorte „Agostino“ verwendet. Das Saatgut wurde über Scheibenschare in den Boden abgelegt, der Reihenabstand betrug 14,5 cm. Für eine exakte Tiefenführung waren Tiefenführungsrollen montiert. Die Aussaatstärke in beiden Umbruchversuchen war mit 370 keimfähigen Körnern je m² relativ hoch angesetzt, da wegen der Wurzelrückstände die Gefahr eines ungenügenden Bodenschlusses und Feldaufgangs bestand. Die Spurführung des Traktors bei allen Aussaatvorgängen erfolgte GPS-gesteuert. Die Parzellen der ursprünglichen Dauerkulturversuche wurden hierfür bereits vor dem Umbruch über GPS erfasst, so dass anschließend nach dem Umbruch die Aussaat exakt in die ursprünglichen Parzellen durchgeführt werden konnte. Nach der Ernte der Triticale im Versuchsjahr 2020 wurde das auf den Parzellen nach dem Verwiegen verbliebene Stroh gemulcht. Anschließend erfolgte am 18. August eine Stoppelbearbeitung mit dem Grubber. Am 20. August wurde auf die gegrubberten Parzellen nach einer Saattbettbereitung mit der Kreiselegge eine leguminosenfreie Zwischenfruchtmischung (DSV „Terralife – Aquapro ohne Buchweizen“: 12 % Öllein, 8 % Phazelie, 5 % Sudangras, 15 %

Sorghum, 4 % Saflor, 7 % Sonnenblume, 14 % Ramtilkraut, 35 % Rauhafer) mit der Parzellensämaschine mit einer Saatstärke von 25 kg/ha ausgesät.

Der Silomais im Versuchsjahr 2020 wurde am 16. April in Einzelkornsaat gesät. Die Saatstärke betrug 10 Körner/m², als Sorte wurde „LG 30258“ verwendet. Die entsprechenden Parzellen wurden am 26. März und unmittelbar vor der Saat auf Sätiefe (ca. 6–7 cm) mit einer Kreiselegge bearbeitet, um den bereits vorhandenen Dauerkulturdurchwuchs und gekeimter Unkräuter zu beseitigen. Zusammen mit der Aussaat wurde eine Unterfußdüngung in Höhe von 30 kg N/ha und 77 kg P₂O₅/ha mit einem NP-Dünger (18 % N, 46 % P₂O₅) abgelegt. Diese wurde im Versuchsjahr 2020 unbeabsichtigt auch bei der Aussaat des Mais in den Parzellen, in denen eigentlich keine N-Düngung hätte erfolgen sollen, ausgebracht.

Alle weiteren pflanzenbaulichen Maßnahmen wie Saatbettbereitung und Pflanzenschutz wurden in allen Varianten bei beiden Umbruchversuchen jeweils für Triticale und Mais einheitlich durchgeführt. Die Pflanzenschutzmaßnahmen sind in Tabelle 6 aufgeführt. Bezüglich der Terminierung der Herbizidapplikation, der Mittelauswahl und der Anzahl der notwendigen Behandlungen wurde im Versuchsjahr 2020 nicht zwischen den beiden Umbruchversuchen differenziert. Die Herbizidanwendung in Triticale erfolgte im Jahr 2020 am 9. April in BBCH 23–24 und somit relativ spät. Neben einer Fungizidanwendung zu Blühbeginn am 20. Mai wurden keine weiteren Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt. In den Maisparzellen wurden die Herbizide am 20. Mai und somit ebenfalls relativ spät im Vier-Blatt-Stadium der Kultur ausgebracht. Bei den am 20. Mai durchgeführten Pflanzenschutzmaßnahmen waren wegen zeitweise auffrischenden Winds keine optimalen Anwendungsbedingungen gegeben.

Tabelle 6: Pflanzenschutzmaßnahmen in den Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie und Sida im Versuchsjahr 2020

Pflanzenschutzmaßnahme	Kultur	Datum	BBCH	Handelsname	Aufwandmenge	Wirkstoff
Herbizid	Triticale	9. April	23–24	Atlantis WG	300 g/ha	Mesosulfuron, Iodosulfuron
Formulierungshilfsstoff	Triticale	9. April	23–24	Formulierungshilfsstoff für Atlantis WG	0,6 l/ha	–
Herbizid	Triticale	9. April	23–24	Pointer SX	60 g/ha	Tribenuron Methyl
Fungizid	Triticale	20. Mai	61	Input Xpro	1,5 l/ha	Prothioconazol, Spiroxamine, Bixafen
Herbizid	Mais	20. Mai	14	Spectrum	1,0 l/ha	Dimethenamid-P
Herbizid	Mais	20. Mai	14	Callisto	1,0 l/ha	Mesotrione
Herbizid	Mais	20. Mai	14	B235	0,4 l/ha	Bromoxynil

4.4.1.3.2 Versuchsjahr 2021

Wegen anhaltend feuchter Witterung im Oktober konnte die geplante Aussaat der Triticale für das Jahr 2021 nicht termingerecht bis Mitte Oktober erfolgen, so dass auf einen spätsaatverträglichen Winterweizen gewechselt wurde. Die Maisparzellen des Vorjahrs wurden nach der Ernte zunächst gemulcht und vor der Saat am 6. November gepflügt. Am 10. November wurde eine Saatbettbereitung mit der Kreiselegge durchgeführt und anschließend der Winterweizen der Sorte „RGT Reform“ (Beizung: „Lador CT-FM“) mit einer Saatstärke von 400 keimfähigen Körnern je Quadratmeter mit gleicher Technik wie im Vorjahr gesät. Wegen milder Temperaturen im November war der Feldaufgang bereits eine Woche später zu verzeichnen.

Auf den Triticaleparzellen des Vorjahrs wurde im Jahr 2021 Silomais gesät. Die nach der Getreideernte gesäte Zwischenfrucht war im Frühjahr zwar vollständig abgestorben, es war jedoch ein hoher Besatz mit Ausfallgetreide vorhanden. Deshalb wurden die entsprechenden Parzellen am 21. April zunächst gemulcht und zwei Tage später mit einem Federzinkengrubber (Supermaxx Bio, Güttler GmbH, Kirchheim/Teck, Deutschland) 7 bis 8 cm tief bearbeitet. Das Gerät war mit Gänsefußscharen ausgestattet und es erfolgten zwei Überfahrten, um den Ausfallgetreide- und Unkrautbesatz sowie bereits vorhandenen Silphiedurchwuchs sicher zu beseitigen. Am 27. April wurde eine Saatbettbereitung mit der Kreiselegge durchgeführt und anschließend der Mais (Sorte: „Agrogant“) in Einzelkornsaat mit einer Saatstärke von 10 Körnern/m² gesät. Zusammen mit der Aussaat wurde in den Maisparzellen mit N-Düngung eine Unterfußdüngung in Höhe von 30 kg N/ha und 77 kg P₂O₅/ha mit einem NP-Dünger (18 % N, 46 % P₂O₅) ausgebracht.

Die im Versuchsjahr 2021 im Versuch zum Umbruch von Durchwachsener Silphie durchgeführten Pflanzenschutzmaßnahmen sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Herbizidanwendung in Winterweizen im Jahr 2021 wurde aufgrund des späten Saattermins und somit der verzögerten Frühjahrsentwicklung erst am 23. April durchgeführt. Am 21. Mai erfolgte zusätzlich eine Spätanwendung mit einem Wuchsstoffherbizid („Ariane C“), um noch vorhandene bzw. neu erschienene Silphietriebe zu bekämpfen. Wegen der kühlen Witterung im Mai wurde die Entwicklung sowohl des Maises als auch der Unkräuter verlangsamt. Günstige Witterungsbedingungen für den Herbizideinsatz waren außerdem erst Anfang Juni gegeben, so dass die Herbizidapplikation in den Maisparzellen erst am 4. Juni erfolgte.

Tabelle 7: Pflanzenschutzmaßnahmen in den Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie und Sida im Versuchsjahr 2021

Pflanzenschutzmaßnahme	Kultur	Datum	BBCH	Handelsname	Aufwandmenge	Wirkstoff
Herbizid	Winterweizen	23. April	23–30	Saracen	0,1 l/ha	Florasulam
Herbizid	Winterweizen	23. April	23–30	Traxos	1,2 l/ha	Clodinafop, Cloquintocet, Pinoxaden
Wachstumsregler	Winterweizen	23. April	23–30	Acucel	0,8 l/ha	Chlormequat
Herbizid	Winterweizen	21. Mai	37	Ariane C	1,5 l/ha	Clopyralid, Fluroxypyr, Florasulam
Herbizid	Mais	4. Juni	13–14	Arrat	0,2 kg/ha	Dicamba, Tritosulfuron
Formulierungshilfsstoff	Mais	4. Juni	13–14	Dash E.C.	1,0 l/ha	Ölsäure, Fettsäuremethylester, Fettalkoholalkoxylat
Herbizid	Mais	4. Juni	13–14	Elumis	1,0 l/ha	Nicosulfuron, Mesotrione
Herbizid	Mais	4. Juni	13–14	Spectrum	1,25 l/ha	Dimethenamid-P

4.4.1.3.3 Düngung

Der N-Düngebedarf für Folgekulturen Silomais und Triticale bzw. Winterweizen wurde anhand der nach Düngeverordnung vorgeschriebenen Düngebedarfsermittlung [20] berechnet (siehe Anhang Tabelle 30, Tabelle 31, und Tabelle 33). Hierfür wurde vom N-Bedarfswert zunächst die zu Vegetationsbeginn (Wintergetreide) bzw. vor der Saat (Mais) im Boden vorhandene Menge mineralischen Stickstoffs abgezogen. Darüber hinaus wurde im Jahr 2020 die Nachlieferung aus der organischen Düngung des Vorjahrs in den entsprechenden Parzellen berücksichtigt. Zusätzlich war nach dem Umbruch der Dauerkulturflächen eine erhöhte N-Nachlieferung aus der Umsetzung der großen Menge an Ernte-/Wurzelresten sowie einer Humusanreicherung zu erwarten. Wegen der kürzeren Vegetationszeit der Triticale wurde bei dieser Kultur im Jahr 2020 ein Abschlag von 10 kg N/ha angesetzt. Bei Silomais hingegen wurde ein Abschlag von 20 kg N/ha berücksichtigt, da aufgrund des Wachstums bis in den Herbst von einer besseren Ausnutzung der erwarteten N-Nachlieferung ausgegangen wurde. Im Versuchsjahr 2021 wurde bei beiden Kulturen kein Abschlag mehr berücksichtigt. Bei der Bemessung des N-Düngebedarfs wurde dagegen in Abhängigkeit von der Umbruchmethode der entsprechend variantenscharf erhobene N_{\min} -Wert berücksichtigt.

Die erste N-Düngung der Triticaleparzellen beider Umbruchversuche erfolgte im Versuchsjahr 2020 am 26. März. Die zweite N-Gabe wurde am 23. April ausgebracht. Neben der Unterfußdüngung zur Saat wurden die Maisparzellen am 27. Mai mit Stickstoff ge-

düngt. Bis auf die Unterfußdüngung wurde in allen Fällen Kalkammonsalpeter als mineralischer N-Dünger verwendet. In den Winterweizenparzellen mit N-Düngung wurde im zweiten Jahr nach dem Umbruch am 3. März, 9. April und 20. Mai mineralischer N-Dünger ausgebracht. Die Gabe zu Vegetationsbeginn in Winterweizen erfolgte mit Ammonsulfatsalpeter (26 % N, 13 % S), alle weiteren Düngergaben mit Kalkammonsalpeter. Bei der ersten N-Gabe (50 kg N/ha) wurden fälschlicherweise alle Winterweizenparzellen gedüngt und nicht nur diejenigen, für die eine N-Düngung vorgesehen war. Zusätzlich zur Unterfußdüngung wurde der restliche N-Düngebedarf der Maisparzellen mit einer N-Düngung am 20. Mai in Form von Kalkammonsalpeter verabreicht.

Für den Ausgleich der P-/K-Abfuhr des Vorjahrs wurde am 29. März 2021 ein P-/K-Mischdünger (11,7 % P₂O₅, 35,2 % K₂O, 2,2 % N, 3,5 % S) ausgebracht, der zugleich auch einen geringen Anteil an Stickstoff in Form von NH₄-N enthielt. Sowohl bei Winterweizen als auch Silomais wurde somit auch über die P-/K-Düngung ein Teil des N-Düngebedarfs gedeckt. Da auch die Mais-/Winterweizenparzellen ohne N-Düngung einen geringen P-/K-Ausgleich erhielten, wurde hier ebenfalls über diese Düngergabe eine geringe N-Menge zugeführt.

4.4.1.4 Boden- und Pflanzenproben

Die im Versuch als Folgekultur gesäten Wintergetreidearten wurden nicht im Sinne einer Biogasverwertung in Form einer Ganzpflanzensilage mit einem Häcksler geerntet, sondern gedroschen, um zu prüfen, ob durch den vorhandenen Durchwuchs der Drusch gestört wird. Ein Häckseln des Getreides gegen Ende der Milchreife und eine Verwendung als Biogassubstrat wären grundsätzlich auch bei extremem Dauerkulturdurchwuchs problemlos möglich. Die Triticale wurde deshalb zum Zeitpunkt der Kornreife mit einem Parzellenmähdrescher geerntet. Hierbei wurde der Frischmasseertrag der Ernteparzellen erfasst. Die Stroherträge wurden im Anschluss per Hand mit einer Wiegeplane und einer Kranwaage erhoben. Vor der Ernte wurde aus den Ernteparzellen vorhandener Dauerkulturdurchwuchs entfernt, damit dieser zu keiner zusätzlichen Befeuchtung des Ernteguts führte und bei der Strohverwiegung nur der tatsächliche Getreidestrohertrag erfasst wurde. Die Silomaisparzellen wurden mit einem Scheibenradhäcksler geerntet und über einen daran gekoppelten Probenehmer der Frischmasseertrag bestimmt. Hierbei wurden zugleich aus dem laufenden Erntegutstrom Proben für die Trockensubstanzgehaltsbestimmung und Nährstoffgehaltsuntersuchung entnommen. Ein Teil der Erntemenge an Getreide wurde für die Trockensubstanzgehaltsbestimmung verwendet, der Rest für die Bestimmung des Kornertrags gereinigt und eine Teilprobe der gereinigten Ware für die Nährstoffgehaltsuntersuchung verwendet. Von der Strohmenge der Ernteparzellen wurde ebenfalls je eine Teilprobe für die Trockensubstanzgehaltsbestimmung und die Inhaltsstoffanalyse entnommen. Für die Bestimmung des Trockensubstanzgehalts wurden die Proben im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anhand der Trockensubstanzgehalte wurden die Trockenmasseerträge je Hektar berechnet. Bei den Inhaltsstoffproben wurden die N-, P-, K- und Mg-Gehalte mittels Elementaranalyse bestimmt. Unter Berücksichtigung des Trockenmasseertrags wurden damit die flächenbezogenen Nährstoffabfuhr berechnet.

Im Herbst des Umbruchjahrs wurde zu Vegetationsende eine parzellenscharfe Beprobung des Bodens auf mineralischen Stickstoff durchgeführt. In den beiden Folgejahren wurden in den mit Getreide bzw. Mais bestellten Parzellen zu Vegetationsbeginn (Getreide) bzw. vor der Saat (Mais) sowie im Anschluss an die Ernte Bodenproben für eine Untersuchung auf mineralischen Stickstoff entnommen. Im Jahr 2020 wurden außerdem N_{\min} -Proben aller Parzellen zu Vegetationsende gezogen. Um die Mineralisationsdynamik in den ersten beiden Jahren nach dem Umbruch abzubilden, wurde zusätzlich der Boden aller unbewachsenen Parzellen zu diesen und zwei weiteren Terminen während der Vegetation auf den Gehalt mineralischen Stickstoffs untersucht (Tabelle 8). Für die N_{\min} -Untersuchungen wurden Bodenproben aus den Tiefenabschnitten 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm entnommen.

Tabelle 8: Probenahmen zur Untersuchung des Bodens auf mineralischen Stickstoff im Versuch zur Untersuchung des Umbruchs von Durchwachsener Silphie und Sida

Versuchsjahr	Datum	Beprobungsschärfe	Varianten/Aufwuchs
2019	19. November	parzellenscharf	Triticale + Mais (Folgejahr)
2020	17. März	parzellenscharf	Triticale + unbewachsen
2020	2. April	parzellenscharf	Mais (vor Saat)
2020	13. Mai	parzellenscharf	unbewachsen
2020	25. Juni	parzellenscharf	unbewachsen
2020	6. August	parzellenscharf	Triticale (nach Ernte) + unbewachsen
2020	17. September	parzellenscharf	Mais (nach Ernte) + unbewachsen
2020	30. November	parzellenscharf	alle Parzellen
2021	4. März	parzellenscharf	unbewachsen
2021	4. März	variantenscharf	Winterweizen mit N-Düngung
2021	9. April	variantenscharf	Mais mit N-Düngung (vor Saat)
2021	20. Mai	parzellenscharf	unbewachsen
2021	28. Juni	parzellenscharf	unbewachsen
2021	13. August	parzellenscharf	Winterweizen (nach Ernte) + unbewachsen
2021	7. Oktober	parzellenscharf	Mais (nach Ernte) + unbewachsen

4.4.1.5 Durchwuchsbestimmung und weitere Bonituren

Der Dauerkulturdurchwuchs in beiden Umbruchversuchen wurde anhand der dafür vorgesehenen gedüngten Getreide- und Maisparzellen an mehreren Terminen bestimmt. Hierfür wurde der Dauerkulturdurchwuchs im mittleren Bereich der Ernteparzellen an zwei zufällig platzierten, je ein Quadratmeter großen Untersuchungsflächen ausgezählt. Diese wurden

markiert, damit im Anschluss an die Aussaat, nach der Herbizidanwendung und zur Ernte die Auszählung immer auf denselben Teilstücken stattfand. Dadurch waren die Wirkung der Herbizidanwendung und die weitere Entwicklung bis zur Ernte direkt darstellbar. Im Versuchsjahr 2020 wurde am 18. März der Durchwuchs sowohl bei Triticale als auch in den zu diesem Termin noch unbewachsenen späteren Maisparzellen erfasst. Am 5. Mai erfolgte eine weitere Durchwuchsbestimmung nach dem Feldaufgang des Maises sowie bei Triticale etwa vier Wochen nach der Herbizidbehandlung der entsprechenden Parzellen. Am 16. Juni wurde der Dauerkulturdurchwuchs ausschließlich in den Maisparzellen ermittelt, um die Wirkung der dortigen Herbizidapplikation zu erfassen. Bei der Auszählung wurde zusätzlich zwischen herbizidgeschädigten und ungeschädigten Durchwuchstrieben unterschieden. Bei den Bonituren im Frühjahr wurden neben den Durchwuchstrieben auch die gekeimten Pflanzen gezählt. Am 21. Juli wurde der Durchwuchsbesatz zum Erntetermin der Triticaleparzellen und am 3. September in den Maisparzellen bestimmt. Hierbei wurden allerdings nur die kräftigeren Triebe mit mehr als zwei Blättern bzw. einem Blattpaar berücksichtigt. Des Weiteren wurden zu den Ernteterminen jeweils auch die mittleren sowie maximalen Wuchshöhen der Durchwuchstriebe gemessen.

Im Versuchsjahr 2021 wurde am 30. März der Durchwuchs in den Maisparzellen des Silphieumbruchversuchs erfasst. Am 13. April erfolgte eine Auszählung aller Parzellen. Am 22. April, kurz vor der Herbizidanwendung in den Winterweizenparzellen, wurde dort der Ausgangsbefall erneut bestimmt. Die Herbizidwirkung auf den Durchwuchs in den Weizenparzellen wurde am 6. und 18. Mai bonitiert, wobei am 18. Mai auch der erste Durchwuchs nach der Maissaat gezählt wurde. Am 1. Juni wurde der Besatz mit Silphietrieben vor der Herbizidanwendung in den Maisparzellen erfasst. Weitere Bonituren erfolgten am 17. Juni und 8. Juli zur Kontrolle der Herbizidwirkung. Bei den Durchwuchsbonituren zur Beurteilung der Herbizidleistung wurde zwischen geschädigten und ungeschädigten Durchwuchstrieben unterschieden. Am 11. August wurde der Silphiedurchwuchs zum Erntetermin des Weizens und am 30. September in den Maisparzellen kurz vor deren Ernte erfasst.

Darüber hinaus erfolgte auch bei den Folgekulturen Getreide und Mais eine Höhenmessung zur Ernte. Bei Getreide wurden zusätzlich die Bestandsdichte in Ähren pro Quadratmeter zum Zeitpunkt der Blüte (BBCH 65) und die Tausendkornmasse des Ernteguts bestimmt.

4.4.2 Sidaumbruch (Anlagejahr 2021)

4.4.2.1 Versuchsaufbau

Im Jahr 2021 wurde ein weiterer Versuch zum Umbruch von Sida angelegt, um zu untersuchen, wie sich ein Umbruch im Frühjahr auf den nachfolgenden Durchwuchsbesatz in einer Sommerung (Silomais) auswirkt. Die umgebrochene Sidafläche wurde im Jahr 2011 durch Pflanzung etabliert und anschließend jährlich im Herbst für eine Biogasverwertung geerntet. Durch den Schnitt der Sida im grünen Zustand zur Silagebereitung werden die Pflanzen stärker geschädigt als bei einer Brennstoffnutzung der abgestorbenen Biomasse

im Frühjahr. Deshalb war der Bestand bereits stark verunkrautet und wäre auch in der Praxis umzubereiten gewesen. Wegen der begrenzten Fläche konnten bei vier Wiederholungen nur zwei Umbruchmethoden miteinander verglichen werden. Hierbei wurde wegen des stark unterschiedlichen Bodeneingriffs der Umbruch mit der Fräse und dem Pflug betrachtet. Als Anlagemethode des Versuchs wurde eine randomisierte Blockanlage mit vollständigen Blöcken gewählt.

4.4.2.2 Umbruch der Sidafläche

Der Umbruch erfolgte je nach Variante mit einem Zweischar-Pflug oder einer 1,8 m breiten Fräse am 21. April. Es wurden die gleichen Geräte wie bei den im Herbst 2019 umgebrochenen Flächen verwendet. Die Arbeitstiefe des Pflugs betrug ca. 27 cm, die der Fräse 8–10 cm. Vor dem Umbruch wurde die Fläche zunächst gemulcht, am Tag nach dem Umbruch wurde auf der gesamten Fläche eine Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge durchgeführt. Für eine gute Einebnung wurde eine Arbeitstiefe von 7 cm gewählt.

4.4.2.3 Pflanzenbauliche Maßnahmen in den Folgekulturen

Vor dem Umbruch wurde am 30. März eine Grundnährstoffdüngung der Sidaparzellen durchgeführt und 120 kg P₂O₅, 360 kg K₂O, 23 kg N (als NH₄-N) und 36 kg S je Hektar ausgebracht. Am 27. April, sechs Tage nach dem Umbruch, wurde in allen Umbruchvarianten als Folgekultur Silomais (Sorte: „Agrogant“) gesät. Die Saatstärke betrug 10 Körner/m², die Saattiefe etwa 5 cm. Zusammen mit der Saat wurde ein NP-Dünger (18 % N, 46 % P₂O₅) als Unterfußdüngung unterhalb der Saatreihe abgelegt, die ausgebrachte Nährstoffmenge je Hektar betrug 30 kg N und 77 kg P₂O₅. Der verbleibende Düngebedarf von 150 kg N/ha wurde am 20. Mai im Ein-Blatt-Stadium des Mais in Form von Kalkammonsalpeter ausgebracht. Für die Berechnung des N-Düngebedarfs wurde ein Bedarfswert von 230 kg N/ha zugrunde gelegt, wovon neben dem N_{min}-Wert von 20 kg N/ha weitere 10 kg N/ha für eine erwartete höhere N-Nachlieferung abgezogen wurden.

Der Herbizideinsatz im Mais erfolgte im Sidaumbruchversuch im Versuchsjahr 2021 wie in den entsprechenden Parzellen des Silphieumbruchversuchs am 4. Juni. Es wurde die gleiche blattaktive Kombination aus ALS-Hemmer, Wuchsstoffherbizid und Carotinoidsynthesehemmer (0,2 kg/ha Arrat, 1,0 l/ha Dash E.C., 1,0 l/ha Elumis) ergänzt um 1,25 l/ha Spectrum für eine Bodenwirkung appliziert.

4.4.2.4 Boden- und Pflanzenproben

Die Erfassung der Frischmasseerträge je Parzelle erfolgte entsprechend den anderen beiden Umbruchversuchen mit einem Scheibenradhäcksler im Frontanbau und Probennehmer im Heck. Bei der Ernte wurden gleichzeitig Proben für Trockensubstanzgehalts- und Nährstoffgehaltsuntersuchungen aus dem laufenden Erntegutstrom entnommen. Die Bestimmung des Trockensubstanzgehalts erfolgte gravimetrisch durch Bestimmung des Gewichtsverlusts nach Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz. Ausgehend von den

Trockensubstanzgehalten und Frischmasseerträgen wurden die Trockenmasseerträge je Hektar berechnet. Darüber hinaus wurden die N-, P-, K- und Mg-Gehalte des Ernteguts analysiert und für die Berechnung der Nährstoffabfuhr verwendet.

Vor dem Umbruch der Sida wurde zu Vegetationsbeginn am 1. März die Menge mineralischen Stickstoffs im Boden im Mittel der Versuchsfläche bestimmt. Zusätzlich wurde nach der Silomaisernte eine parzellenscharfe Untersuchung der N_{\min} -Menge im Boden durchgeführt. Die Entnahme der entsprechenden Bodenproben erfolgte zu allen Terminen aus 0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm Tiefe.

4.4.2.5 Durchwuchsbestimmung und weitere Bonituren

Die Ermittlung des Dauerkulturdurchwuchses nach dem Umbruch erfolgte im 2021 neu angelegten Sidaumbruchversuch entsprechend der Vorgehensweise der anderen beiden Umbruchversuche. Hierfür wurden in den Ernteparzellen je zwei Beobachtungsquadrate mit einer Fläche von jeweils einem Quadratmeter markiert und an mehreren Terminen der darin auftretende Durchwuchsbesatz bestimmt. Die erste Bonitur wurde am 1. Juni kurz vor dem Herbizideinsatz und etwa fünf Wochen nach der Maissaat durchgeführt. Weitere Durchwuchserfassungen erfolgten am 17. Juni und 8. Juli zwei bzw. vier Wochen nach der Herbizidapplikation zur Beurteilung der Wirkungsleistung. Bei diesen beiden Terminen wurde zwischen herbizidgeschädigten und intakten Trieben unterschieden. Eine abschließende Durchwuchsbonitur erfolgte kurz vor der Maisernte am 30. September. Zusätzlich wurde an diesem Termin die Wuchshöhe der Durchwuchstriebe erfasst. Zum Erntetermin wurde außerdem eine Höhenmessung der Maispflanzen der Ernteparzellen durchgeführt.

4.5 Analysemethoden

4.5.1 Bodenproben

Die Beprobung des Bodens auf mineralischen Stickstoff erfolgte in allen Fällen bis auf 90 cm Tiefe aufgeteilt in drei Tiefenbereiche (0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm), wobei jede Schicht gesondert auf die darin enthaltene Menge mineralischen Stickstoffs untersucht wurde. Bei den parzellenscharfen Probenahmen wurden drei bis vier Einstiche je Parzelle durchgeführt und daraus eine Mischprobe für die Analyse erstellt. Die für eine N_{\min} -Untersuchung vorgesehenen Bodenproben wurden direkt nach der Probenahme gekühlt und anschließend bis zum Transport in das Analyselabor bei ca. -20 °C gefroren gelagert. Zum mineralischen Stickstoff im Boden zählen die Stickstoffverbindungen Ammonium und Nitrat. Der Gehalt der beiden Ionen wurde im Labor auf Basis der nachfolgend in Tabelle 9 aufgeführten Methoden analysiert. Eine präzise Bestimmung der Lagerungsdichte der einzelnen Beprobungsschichten erfolgte nicht. Die flächenbezogenen Mengen der beiden Stickstofffraktionen wurden deshalb aus den ermittelten Gehaltswerten unter Annahme einer Trockenrohddichte von 1,4 kg/l für die Bodenschicht 0–30 cm, 1,5 kg/l für die Probenahmetiefen 30–60 cm und 1,6 kg/l bei 60–90 cm berechnet. Die nachfolgend im Bericht aufgeführten N_{\min} -Mengen beziehen sich immer auf die Summe aus Ammo-

ium- und Nitratstickstoff. Für die Untersuchung von Bodenproben auf die Parameter pH-Wert, P-, K- und Mg- Gehalt erfolgte die Probenahme bei 0–30 cm Tiefe. Die entsprechenden Analysemethoden sind ebenfalls in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Untersuchungsparameter und angewandte Analysemethoden bei Bodenproben [140]

Parameter	Analysemethode
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	VDLUFA MB. Bd. 1, Abschnitt 6.1.4.1
Nitratstickstoff (NO ₃ -N)	VDLUFA MB. Bd. 1, Abschnitt 6.1.4.1
Phosphor (P)	VDLUFA MB. Bd. 1, Abschnitt 6.2.1.1
Kalium (K)	VDLUFA MB. Bd. 1, Abschnitt 6.2.1.1
Magnesium (Mg)	VDLUFA MB. Bd. 1, Abschnitt 6.2.4.1
pH-Wert	VDLUFA MB. Bd. 1, Abschnitt 5.1.1

4.5.2 Pflanzenproben

Die Pflanzenproben der verschiedenen Teilversuche dieses Projekts wurden auf ihre Gehalte an N, P, K und Mg analysiert. Hierfür wurden die entsprechenden Proben nach der Entnahme bei 60 °C im Trockenschrank oder einer Satz Trocknung vorgetrocknet. Die Laboranalyse erfolgte nach den in Tabelle 10 aufgelisteten Methoden.

Tabelle 10: Untersuchungsparameter und angewandte Analysemethoden bei Pflanzenproben [139]

Parameter	Analysemethode
Rohproteingehalt (XP)	VDLUFA MB. Bd. 3 4.1.1. 1993/3. Erg. (Kjeldahl)
Stickstoff (N)	Berechnung aus Rohproteingehalt (XP/6,25 bzw. XP/5,7 bei Weizenkornproben)
Phosphor (P)	VDLUFA MB. Bd. 3 A 10.8.2. 2006/6. Erg.
Kalium (K)	VDLUFA MB. Bd. 3 A 10.8.2. 2006/6. Erg.
Magnesium (Mg)	VDLUFA MB. Bd. 3 A 10.8.2. 2006/6. Erg.

4.5.3 Gärrestproben

An den einzelnen Ausbringungsterminen wurde je Termin aus dem verwendeten Zubringergüllefass (ca. 15 m³) oder dem Parzellengüllefass eine Gärrestprobe für eine Inhaltsstoffuntersuchung entnommen. Hierbei wurde zunächst ein Eimer mit einer Menge von 10 l befüllt und anschließend homogenisiert. Aus dieser homogenisierten Teilmenge

wurde wiederum die zu analysierende Probe entnommen und mit nachfolgend gelisteten Methoden (Tabelle 11) auf die entsprechenden Parameter untersucht.

Tabelle 11: Untersuchungsparameter und angewandte Analysemethoden bei Gärrestproben

Parameter	Analysemethode
Vorbehandlung: Königswasseraufschluss	DIN EN 13657: 2003-01 [37]
Wassergehalt	Methodenbuch der BGK: 2006-09 [19]
Trockensubstanzgehalt (TS)	Berechnung aus Wassergehalt
Gehalt organischer Substanz	DIN EN 13039: 2012-01 [39]
pH-Wert	DIN EN 12176: 1998-06 [36]
Gesamtstickstoff (N_{ges})	Methodenbuch der BGK: 2006-09 [19]
C/N-Verhältnis	Berechnung aus org. Substanz und N_{ges}
Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$)	Methodenbuch der BGK: 2006-09 [19]
Phosphor (P)	DIN EN ISO 11885: 2009-09 [38]
Kalium (K)	DIN EN ISO 11885: 2009-09 [38]
Magnesium (Mg)	DIN EN ISO 11885: 2009-09 [38]

4.6 Statistische Auswertung

Für die statistische Datenanalyse der erhobenen Merkmale wurde die Software „SAS“ (Version 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) verwendet. Die Varianzanalysen wurden mithilfe der Prozedur MIXED durchgeführt, hierbei wurden adjustierte Mittelwerte berechnet. Bei den im Bericht aufgeführten und den in Grafiken dargestellten Mittelwerten der Parzellenversuche handelt es sich sofern nicht abweichend angegeben immer um adjustierte Mittelwerte. Standardabweichungen und sonstige Mittelwerte wurden mittels der MEAN-Prozedur berechnet. Waren die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse nicht gegeben, wurde auf den nicht parametrischen Friedman-Test ausgewichen. Für Regressionsanalysen wurde die Prozedur GLM verwendet. Regressionen mit gemischten Modellen wurden mit der Prozedur GLIMMIX erstellt. Hierbei wurde das Bestimmtheitsmaß der Regression anhand des Quotienten der Fehlervarianz des Modells und des Null-Modells (nur Intercept) geschätzt. Als Signifikanzniveau wurde $\alpha = 5\%$ gewählt. Signifikante Unterschiede zwischen Faktorstufen sind im folgenden Bericht mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet. Paarweise Mittelwertvergleiche erfolgten nach der Tukey-Methode auf der Basis gemittelter Grenzdifferenzen. Für die grafischen Ergebnisdarstellungen wurde das Programm „OriginPro“ (Version 2019, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) herangezogen.

Der Feldversuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie wurde im Rahmen der Varianzanalyse als dreifaktorielles semilateinisches Quadrat mit vier Wiederholungen ausgewertet [109]. Hierbei wurden neben Säulen- und Blockeffekten auch die Kombinationsstrukturen aus Säulen und Blöcken als zufällige Effekte im Blockmodell berücksichtigt. Für die Identifikation sinnvoller Mittelwertvergleiche wurde ein SAS-Makro von MUNZERT (2015) [93] herangezogen. Die Auswertung des mineralischen Stickstoffs im Boden erfolgte unter Einbeziehung der Beprobungstiefe als wiederholter Faktor. Als Varianz-Kovarianz-Struktur wurde sofern nicht anders angegeben ein autoregressives Modell (SAS-Option: „type = ar(1)“) zugrunde gelegt. Für die Gesamtauswertung aller Versuchsjahre wurde der Jahreseinfluss als zufälliger Faktor in das Modell aufgenommen.

Lineare und polynomische Anpassungen wurden bei der Auswertung einzelner Jahre über die SAS-Prozedur GLM erstellt. Regressionen mit Daten mehrerer Versuchsjahre wurden als gemischte Modelle über die Prozedur GLIMMIX mit dem Jahreseffekt als zufälligem Faktor gerechnet. Gegebenenfalls wurde eine Logarithmierung der Zielvariable durchgeführt. War keine Normalverteilung der Residuen zu erreichen, wurde auf eine robuste Regressionsanalyse mit der Prozedur ROBUSTREG ausgewichen. Falls nicht abweichend angegeben wurde hierbei die LTS-Methode angewandt.

Die Erträge der letztmaligen Beerntung der Dauerkulturf Flächen wurden durch eine gesamte Beerntung der unterschiedlich gedüngten Parzellenspalten ermittelt und als vollständig randomisierte Anlage verrechnet. Bei der statistischen Auswertung der N_{\min} -Untersuchung zu Vegetationsende in den Umbruchversuchen im Umbruchjahr 2019 wurden als Faktoren die vorausgegangene Düngung, die Umbruchmethode und die nachfolgende Kultur berücksichtigt. Die Faktorstufenkombinationen dieser Faktoren lagen jedoch aufgrund der begrenzten Parzellenanzahl nur zweifach wiederholt vor und waren zudem nicht gleichmäßig auf Blöcke verteilt. Folglich konnten bei der Auswertung immer nur zwei Faktoren gleichzeitig berücksichtigt werden. Die Umbruchmethode und die vorausgegangene Düngung wurden trotz der teilweise eingeschränkten Randomisation als Großteilstücke einer Spalt- bzw. Streifenanlage betrachtet.

Die Auszählung des Dauerkulturdurchwuchses wurde über ein generalisiertes lineares Modell mit der Prozedur GENMOD ausgewertet, wobei als Beobachtungen die Mittelwerte der zwei Auszählungen je Parzelle und Termin verwendet wurden. Als Link-Funktion wurde eine logarithmische Transformation gewählt und eine Poisson-Verteilung angenommen. Die Anpassung eines Überdispersionsparameters war im Modell enthalten. Die unterschiedliche Düngung der Vorjahre wurden nicht berücksichtigt und die Auswertung erfolgte getrennt für beide Kulturen, so dass eine Verrechnung als Blockanlage mit der Umbruchmethode als Prüffaktor möglich war. Die Verwendung der Triebdichte der ehemaligen Dauerkultur vor dem Umbruch als Kovariate im Modell zeigte keinen signifikanten Effekt und wurde folglich nicht in das endgültige Modell aufgenommen.

Erträge und weitere Merkmale wurden aufgrund der eingeschränkten Zahl an Wiederholungen ebenfalls getrennt für beide Kulturen als Blockanlage und nur unter Berücksichtigung der Umbruchmethode ausgewertet. Für die in den ungedüngten Teilbereichen erhobenen Merkmale wurden ausschließlich Mittelwerte berechnet. Eine varianzanalytische

Auswertung der Daten konnte nicht durchgeführt werden, da dort kein richtiges Versuchsdesign und auch keine vollständige Randomisation vorlagen.

Für die statistischen Auswertungen der drohnenbasierten Höhenmessungen im Jahr 2021 im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde die Software R (Version 4.0.3) verwendet. Die zugehörigen linearen Regressionen wurden mit dem Befehl „lm()“ berechnet. Der RMSE wurde anhand nachfolgender Formel (4.2) ermittelt.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{n}} \quad (4.2)$$

M_i tatsächlich (gemessene) Werte

E_i geschätzte Werte aus Modell

Abweichungen von den hier aufgeführten Methoden sowie weitere Einzelheiten zur statistischen Auswertung sind im Ergebnisteil bei den entsprechenden Untersuchungsmerkmalen angegeben.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Optimierung der Stickstoffdüngung in Durchwachsener Silphie

5.1.1 Nährstoffzufuhr durch organische und mineralische Düngung

5.1.1.1 Zusammensetzung der verwendeten Gärreste

Die in diesem Projekt verwendeten Gärreste wurden bis auf die Herbstgabe im Jahr 2020 durchgehend von derselben Biogasanlage bezogen. Die Ergebnisse der Inhaltsstoffuntersuchungen der zu den jeweiligen Düngeterminen ausgebrachten Gärreste sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Im bisherigen Untersuchungszeitraum wies der pH-Wert die geringste Variation auf und erwies sich somit als der konstanteste Untersuchungsparameter. Die pH-Werte der verwendeten Gärreste lagen im Bereich zwischen 7,6 und 8,5. Im Mittel war ein pH-Wert von 7,9 gegeben. Der Anstieg des pH-Werts von Gärresten auf Werte über 7,5 ist typisch und bedingt durch den Abbau organischer Säuren, den Anstieg des NH_4 -Gehalts und die Freisetzung von H_2S während des Gärprozesses [90]. In anderen Untersuchungen wurden für Nawaro-Anlagen (Einsatz ausschließlich nachwachsender Rohstoffe als Gärsubstrat) und Kofermentationsanlagen im Mittel pH-Werte zwischen 7,7 und 8,3 nachgewiesen [49] [103] [66] [150]. Hinsichtlich des pH-Werts lagen die verwendeten Gärreste somit im mittleren Bereich. Es ist zu beachten, dass der im Herbst 2020 eingesetzte Gärrest von einer Anlage mit abweichender Substratzusammensetzung stammte. Darüber hinaus war der von dieser Anlage bezogene Gärrest ziemlich dünnflüssig.

Die Phosphor- und Magnesiumgehalte lagen im Mittel bei $1,20 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{m}^3$ bzw. $0,45 \text{ kg MgO}/\text{m}^3$ und wiesen die größten relativen Schwankungen bei den untersuchten Parametern auf. Hierbei war eine gewisse positive Korrelation mit dem Trockensubstanzgehalt erkennbar. Bei ähnlichen Trockensubstanzgehalten lagen dennoch die Mittelwerte der Phosphorgehalte der Gärreste aus anderen Untersuchungen sowohl für Nawaro- als auch Kofermentationsanlagen mit ca. $1,8 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{m}^3$ meist etwas höher [103] [66] [49]. Die Kaliumgehalte der in diesem Projekt verwendeten Gärreste waren dagegen mit durchschnittlich $4,09 \text{ kg K}_2\text{O}/\text{m}^3$ deutlich höher als in den zuvor angesprochenen Studien und lagen eher im Bereich des Werts, den WENDLAND und LICHTI (2012) [148] im Mittel für Gärreste von Praxisbetrieben feststellen konnten. Allerdings waren dort mit durchschnittlich 6,5 % auch höhere Trockensubstanzgehalte vorhanden. Die Trockensubstanzgehalte der im Projekt eingesetzten Gärreste betragen im Durchschnitt nur 5,3 %. Andere Autoren berichten von durchschnittlichen TS-Gehalten im Bereich von 5,2 bis 7,0 % [103] [66] [150], wobei jedoch auch bezüglich der TS-Gehalte eine starke Abhängigkeit vom Inputsubstrat zu beobachten ist [2]. Laut MÖLLER et al. 2019 [90] sowie REINHOLD und ZORN (2015) [105] weisen Gärreste aus der überwiegenden Vergärung von Energiepflanzen in der Regel höhere Trockensubstanzgehalte von etwa 10 % auf [105], so dass die TS-Gehalte der verwendeten Gärreste, die fast ausschließlich aus einer Nawaro-Anlage stammten, als verhältnismäßig niedrig einzustufen sind.

Bezogen auf die Trockenmasse waren bei den verwendeten Gärresten ähnliche N_{ges} -Gehalte und Ammoniumgehalte wie bei WENDLAND und LICHTI (2012) [148] festzustellen. Im Vergleich zu anderen Untersuchungen waren diese jedoch etwas erhöht [103] [66] [49]. Der NH_4 -N Anteil am N_{ges} lag mit durchschnittlich 60 % auf dem Niveau anderer Biogasanlagen mit vergleichbaren Inputsubstraten, wie aus einer Vielzahl untersuchter Gärreste in anderen Studien hervorgeht [103] [66] [49] [148] [42]. Dieses Verhältnis war zudem relativ konstant und befand sich – typisch für rohfaserreiche Energiepflanzen – meist im Bereich von 50 bis 60 % [90].

Tabelle 12: Stoffliche Zusammensetzung der ausgebrachten Gärreste in den Versuchsjahren

Zeitpunkt der Ausbringung	Datum	TS	org. Subst.	C/N	pH	N_{ges}	NH_4 -N	P_2O_5	K_2O	MgO
Einheit		kg/m ³	kg/m ³			kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Herbst 2018	25.09.	55,0	40,0	5,5	8,5	4,20	1,96	1,09	4,43	0,5
Frühjahr 2019 1. Termin (früh)	01.04.	50,0	36,0	4,6	7,8	4,5	2,40	1,12	4,48	0,4
Frühjahr 2019 2. Termin (spät)	08.05.	66,0	49,0	5,5	8,1	5,2	2,83	1,71	5,60	0,7
Herbst 2019	07.10.	55,0	40,0	5,1	7,9	5,6	3,32	1,12	5,67	0,4
Frühjahr 2020 1. Termin (früh)	24.03.	56,0	40,0	4,1	7,6	5,62	3,56	0,73	5,41	0,18
Frühjahr 2020 2. Termin (spät)	07.05.	70,0	48,6	4,8	7,7	5,91	3,57	2,19	5,52	1,0
Herbst 2020*	24.09.	40,0	–	–	8,3	5,9	4,20	1,40	5,50	0,3
Frühjahr 2021 1. Termin (früh)	25.03.	43,6	31,8	4,7	7,7	3,9	2,8	0,63	4,71	0,25
Frühjahr 2021 2. Termin (spät)	11.05.	41,9	30,8	4,6	7,9	3,9	2,4	0,83	4,09	0,33
Mittelwert		53,1	39,5	4,7	7,9	4,97	3,00	1,20	5,05	0,45

* Zu diesem Ausbringungstermin musste ersatzweise Gärrest einer anderen Biogasanlage verwendet werden.

Grundsätzlich zeigte sich, dass für die Nährstoffgehalte und sonstige stoffliche Zusammensetzung von Gärresten keine Standardwerte angenommen werden können, da je nach Fermentationsbedingungen und insbesondere in Abhängigkeit des im entsprechenden Zeitraum eingesetzten Inputsubstrats [82] starke Schwankungen in der Zusammensetzung der Gärreste möglich sind [148]. Für eine optimale pflanzenbauliche und umweltgerechte Verwertung sind bei Gärresten folglich laufende Inhaltsstoffuntersuchungen unbedingt notwendig [148]. Voraussetzung vor der Probenahme und auch der Ausbringung ist eine konsequente Homogenisierung, da ansonsten die tatsächlichen Nährstoffgehalte nicht korrekt erfasst werden und zusätzliche Abweichungen von den angestrebten Ausbringungsmengen entstehen können.

Des Weiteren wurde das Verhältnis des organischen Kohlenstoffs zum Gesamtstickstoff ($C_{\text{org}}/N_{\text{ges}}$ -Verhältnis) und zum organischen Stickstoff ($C_{\text{org}}/N_{\text{org}}$ -Verhältnis) für die ausgebrachten Gärreste berechnet. Hierbei wurde der C_{org} -Gehalt der Gärreste basierend auf einem Kohlenstoffgehalt der organischen Substanz von 58 % abgeleitet. Im Durchschnitt der eingesetzten Gärreste (ohne Herbstgabe 2020) betrug das $C_{\text{org}}/N_{\text{ges}}$ -Verhältnis 4,75. In anderen Untersuchungen wie beispielsweise bei HERRMANN et al. (2013) [72] oder FORMOWITZ (2014) [49] wurden hingegen im Mittel der untersuchten Gärreste höhere Werte im Bereich von 6,6 bis 8,1 festgestellt. Das $C_{\text{org}}/N_{\text{ges}}$ -Verhältnis wird häufig für die Bewertung der N-Nachlieferung herangezogen. Jedoch ist das $C_{\text{org}}/N_{\text{org}}$ -Verhältnis für die Beurteilung der Stickstoffnettonmineralisation und somit der pflanzenbaulichen Stickstoffwirksamkeit eines organischen Düngers besser geeignet [42]. Unter einem $C_{\text{org}}/N_{\text{org}}$ -Verhältnis von 20 bis 40, je nach Abbaustabilität der organischen Substanz, wird von einer Stickstofffreisetzung beim Abbau ausgegangen [25]. Für die Abschätzung der kurzfristigen Stickstofffreisetzung ist folglich insbesondere das $C_{\text{org}}/N_{\text{org}}$ -Verhältnis der abbaubaren organischen Substanz entscheidend [64]. Das $C_{\text{org}}/N_{\text{org}}$ -Verhältnis der untersuchten Gärreste lag im Mittel bei 11,8, da jedoch die Abbaustabilität nicht bekannt ist, sind Aussagen über die N-Mineralisation nach der Ausbringung kaum möglich.

5.1.1.2 Nährstoffzufuhr in den Düngevarianten

Zu den einzelnen Ausbringungsterminen waren die genauen Nährstoffgehalte der eingesetzten Gärreste noch nicht bekannt. Zusätzlich zu den Nährstoffangaben der Biogasanlage erfolgte eine Abschätzung des NH_4 -Gehalts mittels Schnelltest, so dass die Ausbringungsmengen auf Basis dieser vorläufigen Werte angepasst wurden. Nach der Laboranalyse der ausgebrachten Gärreste konnten mit den vorliegenden Nährstoffgehalten die tatsächlich in den Gärrestvarianten ausgebrachten Nährstoffmengen berechnet werden. Die zu den einzelnen Terminen sowie Varianten tatsächlich ausgebrachten N-Mengen sind für die drei Projektjahre im Anhang in Tabelle 35, Tabelle 36 und Tabelle 37 aufgelistet.

Die Herbstdüngung wurde in den entsprechenden Varianten am 25. September 2018, 7. Oktober 2019 und 25. September 2020 durchgeführt. Hierbei wurde in allen Jahren die nach Düngeverordnung maximal erlaubte Menge von 60 kg N_{ges} /ha bzw. 30 kg $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha ziemlich genau eingehalten. In der Regel wirkte die Ammoniummenge begrenzend. Ein deutlicher Wiederaustrieb war zu den Terminen der Herbstdüngung in allen Jahren nur

vereinzelt vorhanden (Abbildung 16). Des Weiteren war der Boden der Versuchspartellen wegen des Befahrens im Rahmen der Ernte oberflächlich leicht verdichtet, so dass der ausgebrachte Gärrest trotz der geringen Aufwandmengen von 8–11 m³/ha nur sehr langsam in den Boden infiltrierte. Dies gilt insbesondere für die Herbstdüngung im Jahr 2019, bei der der Boden wegen vorausgegangener Niederschläge zur Ernte oberflächlich feucht war. Die im Herbst ausgebrachte Menge pflanzenverfügbaren Stickstoffs wurde im Folgejahr vollständig dem Düngebedarf in den jeweiligen Varianten angerechnet.



Abbildung 16: Gärrestdüngung im Herbst 2019 mit schlechter Infiltration und nur sehr vereinzelt vorhandenem kräftigeren Wiederaustrieb der Silphiepflanzen

Die N_{\min} -Untersuchung zu Vegetationsbeginn im Jahr 2019 ergab einen N_{\min} -Vorrat im Boden von durchschnittlich 16 kg N/ha (variantenscharfe Beprobung). In den Jahren 2020 und 2021, in denen nur Bodenproben aus den Varianten mit einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha entnommen wurden, betrug die mittlere N_{\min} -Menge im Boden 30 bzw. 17 kg N/ha. Unterschiede zwischen den mineralisch und den mit Gärresten gedüngten Varianten waren kaum vorhanden und nicht signifikant. Damit waren die N_{\min} -Mengen zu Vegetationsbeginn auf einem sehr niedrigen Niveau und es wurde in allen drei Versuchsjahren als Differenz zum N-Bedarfswert eine ähnlich hohe N-Menge ausgebracht.

Die erste Gärrestdüngung erfolgte Ende März bis Anfang April zum Austrieb der Durchwachsenen Silphie, wobei der Austrieb in den Jahren 2019 und 2020 wegen höherer Temperaturen im März früher stattfand und die Pflanzen zum Düngetermin bereits etwas wei-

terentwickelt waren. In allen drei Versuchsjahren war der Boden durch eine etwa Mitte März bis Ende April andauernde Hochdruckwetterphase bereits abgetrocknet und teilweise verkrustet. Dadurch infiltrierten die ausgebrachten Gärreste meist nur sehr langsam in den Boden (Abbildung 17). Die zweite Gärrestdüngung wurde in allen drei Projektjahren gegen Ende der ersten Maidekade durchgeführt (7. bis 11. Mai). Die Pflanzen hatten zu diesem Zeitpunkt eine Wuchshöhe von 25 bis 35 cm erreicht und befanden sich zu Beginn des Schossens (BBCH 31–32, Abbildung 18). Die Düngung zu diesem Zeitpunkt war noch problemlos möglich und der Schleppschlauchverteiler des Parzellengüllefassens verursachte beim Überstreifen der Pflanzen keine sichtbaren Schäden. Zu den beiden Gärrestdüngungsterminen wurde in den Varianten mit mineralischer N-Düngung Mineraldünger ausgebracht. Vor allem der Dünger der ersten N-Gabe wurde wegen der trockenen Witterung im April erst stark verzögert aufgelöst und in den Boden eingewaschen.



Abbildung 17: Erste Gärrestdüngung im Frühjahr am 25. März 2021 mit schlechter Infiltration der Gärreste in Boden

Durch die Aufteilung der N-Düngung auf einen zusätzlichen späteren Termin können eventuell Ammoniakemissionen reduziert werden, da infolge des vorangeschrittenen Pflanzenwachstums eine höhere Ammoniakaufnahme durch den Pflanzenbestand möglich ist [127]. Außerdem könnten die veränderten mikrometeorologischen Bedingungen an der Bodenoberfläche zu einer Verlustreduktion beitragen. Im Gegenzug ist jedoch bei späterer Düngung mit einem höheren Temperaturniveau zu rechnen. Darüber hinaus kann die Aufteilung einer Güllegabe zu höheren Ammoniakverlusten führen, da im Gegensatz zu einer einmaligen Gabe ein geringerer Anteil in den Boden infiltriert [126].

In Bezug auf die Auswertung der zweiten Gärrestgabe muss beachtet werden, dass in allen Versuchsjahren einige Tage nach der ersten Gärrestdüngung eine Bearbeitung des Zwischenreihenbereichs mit einer Reihenfräse zur Unkrautbekämpfung durchgeführt wurde. Durch die geringen Niederschläge im April war der Boden zum zweiten Ausbringungstermin zwischen den Reihen der Silphiepflanzen immer noch ziemlich locker, so dass die Infiltration der Gärreste möglicherweise verbessert wurde und sich gegenüber praxisüblichen Bedingungen ohne zuvor gefrästen Boden geringere Ammoniakverluste einstellten [124] (Abbildung 18).



Abbildung 18: Gärrestausbringung in Durchwachsener Silphie zum zweiten Frühjahrstermin am 7. Mai 2020

5.1.2 Trockenmasseerträge

Im Gegensatz zum ersten Erntejahr (2018) zeigten die Silphiepflanzen ab dem Versuchsjahr 2019 im zweiten Erntejahr ein deutlich kräftigeres Wachstum. Im ersten Erntejahr war das Wachstum der Pflanzen als Folge der Etablierung über eine Untersaat stark eingeschränkt. Zusätzlich wirkten sich die extreme Trockenheit im Jahr 2018 verbunden mit den hohen Temperaturen sowie die starke Verunkrautung negativ auf die Pflanzenentwicklung aus, so dass nur ein sehr niedriger Durchschnittsertrag von 48,7 dt TM/ha erreicht wurde. Die Altverunkrautung und neu aufkeimende Unkräuter im Frühjahr wurden durch den Einsatz einer Reihenfräse im Herbst 2018 und Frühjahr 2019, 2020 und 2021 zumindest im Zwischenreihenbereich vollständig entfernt. Darüber hinaus wiesen die Pflanzen ab dem

zweiten Erntejahr insgesamt ein kräftigeres Wachstum auf und es wurde in fast allen Varianten ein Reihenschluss erreicht, so dass während der Vegetation aufgelaufene Unkräuter meist erfolgreich unterdrückt wurden. Auch ein Teil der durch Frässhäden bei der Unkrautkontrolle entstandenen Fehlstellen in den Silphiereihen konnte sich ab dem Versuchsjahr 2020 wieder regenerieren, so dass ab dem Schossen eine weitgehend gute Unkrautunterdrückung gegeben war. Dies gilt auch für die Varianten mit geringerer N-Zufuhr bzw. N-Düngewirkung, bei denen der Reihenschluss erst Ende Juni und somit etwa vier Wochen nach den besser mit Stickstoff versorgten Varianten eintrat (Abbildung 19).



Abbildung 19: Parzellen des Silphiedüngungsversuchs am 2. Juli 2020 (oben, BBCH 55) und 22. Juni 2021 (unten, BBCH 36) mit noch deutlich erkennbaren Reihen in den Parzellen mit geringer N-Düngung

Die Bereiche, in denen Silphiepflanzen durch das Fräsen geschädigt wurden, waren dennoch auch in den Versuchsjahren 2020 und 2021 noch längere Zeit erkennbar (Abbildung 20). Somit waren die entstandenen Lücken gegen Ende Juli zwar teilweise wieder etwas geschlossen (Abbildung 21), eine Verschiebung der Ernteparzellen war dennoch weiterhin notwendig, wenn größere Bereiche betroffen waren.



Abbildung 20: Blick auf den Düngungsversuch mit Durchwachsener Silphie am 22. Juni 2021 während des Schossens (BBCH 36)



Abbildung 21: Blick auf den Düngungsversuch mit Durchwachsener Silphie am 27. Juli 2021 gegen Ende der Blüte des Haupttriebs (BBCH 67)

Die Ernte im Versuchsjahr 2019 erfolgte am 12. September, im zweiten Projektjahr wurde die Ernte etwas früher, am 8. September durchgeführt. Im Jahr 2021 wurde die Abreife der Durchwachsenen Silphie durch den feuchten und mäßig warmen Sommer stark verzögert, wodurch die Parzellen erst am 23. September geerntet wurden. Im zweiten Projektjahr waren durch das teilweise starke Lager der Versuchspartellen Ernte und Ertragserfassung im Gegensatz zum ersten Versuchsjahr, in dem bis auf eine leichte

Schräglage kein Lager auftrat, nicht optimal möglich (Abbildung 22). Für Parzellen, in denen die Pflanzen nicht vollständig vom Häcksler erfasst worden waren, konnten keine korrekten Ertragswerte ermittelt werden. Diese Parzellen mussten folglich von der weiteren Auswertung der Erträge und daraus berechneter Größen ausgeschlossen werden. Insgesamt konnten im Jahr 2020 elf Parzellen nur fehlerhaft beerntet werden und wurden verworfen. Obwohl die Pflanzen im Jahr 2021 ein noch stärkeres Lager aufwiesen, war mithilfe von Seitenmessern am Schneidvorsatz des Häckslers eine störungsfreie Ernte möglich. Im Jahr 2019 trat hingegen kein Lager auf, was eventuell auf die noch geringere Stängeldichte und somit kräftigere und standfestere Stängel zurückzuführen ist.



Abbildung 22: Mittleres Lager und Ineinander-Hängen der Stängel von Durchwachsener Silphie kurz vor der Ernte am 14. September 2021 in einer Parzelle mit hoher N-Düngung

Das Lager zum Erntetermin wurde in den davon betroffenen Jahren 2020 und 2021 bonitiert, um einen möglichen Zusammenhang mit der N-Düngung aufzuzeigen. Eine varianzanalytische Auswertung der Boniturnoten zwischen 1 und 9 über ein nicht parametrisches einfaktorielles Verfahren (Friedman-Test) ergab, dass sowohl der N-Bedarfswert ($p < 0,0001$) als auch die Düngerart ($p < 0,0001$) einen sehr hoch signifikanten Einfluss auf das Auftreten von Lager hatten. Bei einer Steigerung des N-Angebots von 100 auf 150 kg N/ha nahm die Lagerneigung signifikant zu. Zwischen einem N-Angebot von 150 kg N/ha und 200 kg N/ha waren keine signifikanten Unterschiede in der Lagerbonitur gegeben. Tendenziell war allerdings das Lager der Pflanzen auf der höchsten N-Stufe wie

zu erwarten am stärksten. Somit konnte bestätigt werden, dass sich eine hohe N-Versorgung negativ auf die Standfestigkeit von Silphie auswirkt [50]. Darüber hinaus bewirkte eine Düngung mit Gärresten eine signifikant niedrigere Lagerneigung als eine mineralische N-Düngung. Dies deutet darauf hin, dass die N-Verwertung bei einer Gärrestdüngung schlechter als bei einer mineralischen N-Düngung war oder der ausgebrachte Stickstoff den Pflanzen zu weniger kritischen Entwicklungsphasen zur Verfügung stand. Das tendenziell etwas geringere Lager in den Varianten mit Herbsdüngung im Vergleich zu einer Frühjahrsdüngung mit Gärresten lässt zusätzlich darauf schließen, dass die Herbstgabe die N-Verwertung der Frühjahrsgabe nicht ganz erreichte. Andererseits wurde in den Varianten mit Herbsdüngung im Frühjahr eine geringere N-Menge ausgebracht, was wiederum einen Einfluss auf die Stängeldichte und somit Lagerbildung gehabt haben könnte. Dem gegenüber steht jedoch die Tatsache, dass im Hinblick auf die Aufteilung der Frühjahrsdüngung eine Aufteilung auf zwei Gaben tendenziell zu stärkerem Lager führte.

Im Gesamtmittel aller Versuchsjahre wurde ein Trockenmasseertrag von 136,6 dt TM/ha erreicht. Die höchsten Erträge waren mit durchschnittlich 147,4 dt TM/ha im Jahr 2019 gegeben. Im Jahr 2020 lag der Ertrag trotz günstiger Witterung mit 128,6 dt TM/ha deutlich niedriger und auch unterhalb des Niveaus von 2021 mit 133,3 dt TM/ha. Die mittlere Bestandshöhe zur Ernte war dagegen in den Jahren 2019 und 2020 mit 2,66 m und 2,67 m beinahe identisch und größer als im Jahr 2021 mit 2,55 m. Dies zeigt, dass eine identische Wuchshöhe allein noch kein identisches Ertragsniveau bedeuten muss. Bei Durchwachsener Silphie wird der Ertrag zwar vor allem durch die Stängelmasse gebildet [76], da dieser der Pflanze als Assimilatspeicher dient [27]. Die Ertragshöhe hängt somit primär von der Bestandshöhe ab, so die Standfestigkeit des Bestands von entscheidender Bedeutung ist und gegebenenfalls ertragslimitierend wirkt [116]. Die Stängelmasse wird neben der Pflanzenhöhe aber auch durch den Stängeldurchmesser beeinflusst [149], so dass davon auszugehen ist, dass dieser geringer als im Jahr 2019 war. Ein kleinerer Stängeldurchmesser könnte unter anderem auch mit dem erhöhten Lager ab dem Jahr 2020 zusammenhängen. Es wird angenommen, dass mit zunehmendem Alter von Silphiebeständen die Stängelanzahl zunimmt, während der Stängeldurchmesser und somit die Standfestigkeit abnehmen [27].

In den Parzellen, die anhand eines N-Bedarfswerts von 100 kg N/ha gedüngt wurden, waren zum Erntezeitpunkt meist die untersten drei bis vier Blattpaare abgestorben und ca. 50 % der Blütenstände abgereift. Auf dem N-Niveau von 150 kg N/ha waren vier bis fünf Blattpaare abgestorben. Etwa ein Drittel der Blütenstände war abgereift. In den Varianten mit höchster N-Düngung waren wegen der stärkeren Beschattung durch größere Blätter und stärker verzweigte Blütenbereiche bereits fünf bis sieben Blattpaare abgestorben. Darüber hinaus waren, vermutlich wegen der Entwicklungsverzögerung infolge der besseren N-Versorgung, nur ca. 20 % der Blütenstände abgereift. Dadurch befand sich auch der Schwerpunkt der Pflanzen weiter oben, was die Lageranfälligkeit zusätzlich verstärkte. Das Absterben der untersten Blätter während der Vegetation ist durch Lichtmangel bedingt und setzt etwa Anfang Juni ein [120]. Die Blattverluste mindern zwar wegen Ertragsverlusten vor der Ernte die Produktivität, tragen aber andererseits durch eine zusätzliche Streuzufuhr zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und Biodiversität bei [27].

Das mittlere Ertragsniveau von Durchwachsener Silphie für den Versuchsstandort, das aus anderen Untersuchungen bekannt ist, beläuft sich auf etwa 185 dt TM/ha [70] [69] [50]. Ein entsprechendes Niveau wurde in den Versuchsjahren 2020 und 2021 nicht erreicht und im Jahr 2019 nur bei rein mineralischer Düngung und einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha. Auch das bayernweite Mittel von ca. 148 dt TM/ha (sechs Standorte, fünf Jahre) [69] [50], wurde in den Jahren 2020 und 2021 nur in den mineralisch gedüngten Varianten auf höchster N-Düngestufe erreicht. Der in Reinsaat im Jahr 2017 gesäte Bestand, der für die Untersuchung der N-Aufnahme von Durchwachsener Silphie verwendet wurde, erreichte im Jahr 2020 bei einer mineralischen N-Düngung von 140 kg N/ha einen Trockenmasseertrag von 178,3 dt/ha. Im Jahr 2021 wurden bei 170 kg N/ha nur 148,0 dt TM/ha erzielt. Die Ertragsleistung des ersten Versuchsjahrs konnte in diesem Bestand trotz etwas höherer N-Düngung ebenfalls nicht erreicht werden. Insgesamt ist somit davon auszugehen, dass die Witterungsbedingungen vor allem im Jahr 2021 weniger gut für das Wachstum von Durchwachsener Silphie geeignet waren (siehe 4.2). Darüber hinaus war im Vergleich zum Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie bei entsprechender N-Düngung bis zum Jahr 2020 ein höheres Ertragsniveau gegeben. Im Jahr 2021, das dem vierten Erntejahr der beiden Versuchsanlagen entspricht, hatten die in Untersaat etablierten Silphieparzellen mit vergleichbarer N-Düngung das Ertragsniveau des in Reinsaat etablierten Bestands erreicht. BIER-TÜMPFEL und CONRAD (2013) [13] gehen dagegen davon aus, dass in Untersaat etablierte Bestände bereits im dritten Jahr das Ertragsniveau in Reinsaat angelegter Bestände erreichen, was somit nicht ganz bestätigt werden konnte.

Bei der Verrechnung aller Versuchsjahre war ein signifikanter Einfluss des N-Bedarfswerts ($p = 0,0033$) und der Düngerart ($p < 0,0001$) auf den Trockenmasseertrag festzustellen (Abbildung 23, Abbildung 24). Der Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung zeigte keinen signifikanten Ertragseffekt. In allen Jahren war dabei auch optisch ein deutlicher Einfluss der Höhe des N-Angebots auf die Biomassebildung sichtbar. Neben dem Trockenmasseertrag hatte der N-Bedarfswert auch einen signifikanten Einfluss auf die Wuchshöhe zu allen drei Messterminen (Abbildung 25). Im Hinblick auf die Trockenmasseerträge bewirkte eine Erhöhung des N-Bedarfswerts von 100 auf 150 kg N/ha eine fast doppelt so hohe Ertragssteigerung wie die weitere Steigerung auf 200 kg N/ha. Dementsprechend führte nur eine Steigerung des N-Bedarfswerts von 100 auf 150 bzw. 200 kg N/ha zu signifikant höheren Trockenmasseerträgen. Dennoch ist wegen der tendenziellen Ertragszunahme auch zwischen einem N-Bedarfswert von 150 und 200 kg N/ha eine Ertragssteigerung bei Erhöhung der N-Düngung zu erwarten. Dies gilt insbesondere, da bei rein mineralischer N-Düngung die Ertragszunahme bei Steigerung der N-Düngung relativ gleichmäßig war. In anderen Untersuchungen wurde ebenfalls eine Steigerung des Trockenmasseertrags bei zunehmender N-Düngung von Durchwachsener Silphie bis 200 kg N/ha beobachtet [100] [133]. Bei PICHARD (2012) [100] wurde das Ertragsmaximum bei einer N-Düngung von 300 kg N/ha erreicht, es lag eine quadratische Beziehung zwischen N-Düngung und Ertrag vor. Ab einer N-Zufuhr von 200 kg N/ha war jedoch nur noch eine geringfügige Steigerung möglich. STOLZENBURG et al. (2016) [133] registrierten bereits ab 200 kg N/ha keine weitere Ertragssteigerung. Die höchste N-Nutzungseffizienz war in beiden Fällen auf der ersten N-Stufe gegeben (100 bzw. 160 kg N/ha). Somit ist davon auszugehen, dass auch

im vorliegenden Versuch die ersten Kilogramm Düngerstickstoff die höchste Ertragswirkung hatten und bei einer N-Düngung über 200 kg N/ha kein deutlicher Ertragszuwachs mehr zu erwarten gewesen wäre. Bei STOLZENBURG et al. (2016) [133] wurde die Methan- ausbeute zudem nicht durch das N-Düngungsniveau beeinflusst.

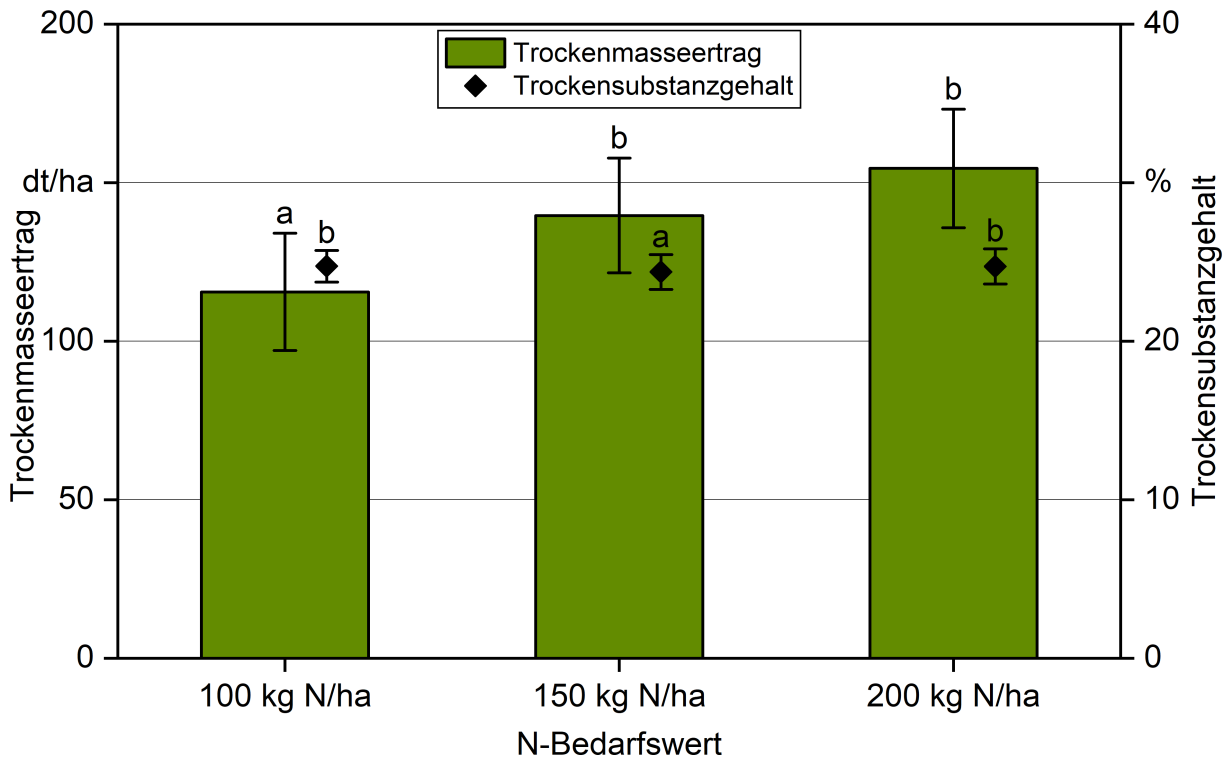


Abbildung 23: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{min}) im Mittel über die mineralisch und mit Gärresten gedüngten Varianten; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Neben der Höhe der N-Zufuhr zeigte auch die Art der N-Düngung einen signifikanten Ertragseffekt, während der Trockensubstanzgehalt durch diesen Faktor nicht beeinflusst wurde. Eine mineralische N-Düngung zu Durchwachsener Silphie führte mit 145,3 dt/ha zu signifikant höheren Trockenmasseerträgen im Vergleich zu einer Düngung mit Gärresten (Abbildung 24). Bei einer Gärrestdüngung im Frühjahr und Herbst lagen die Erträge mit 128,7 dt TM/ha signifikant niedriger als bei einer Gärrestdüngung ausschließlich im Frühjahr. Die Gärrestvariante mit Frühjahrsdüngung erreichte hinsichtlich des Ertrags mit 135,7 dt TM/ha ein Niveau zwischen den anderen beiden Varianten. Die geringsten Unterschiede zwischen mineralischer N-Düngung und Gärrestdüngung wiesen die Jahre 2019 und 2021 auf. Dies gilt insbesondere für eine Gärrestdüngung ausschließlich im Frühjahr, während die Variante mit Herbstdüngung vor allem im Jahr 2021 stärker im Ertrag abfiel. Die niedrigeren Erträge bei einer Teilgabe der gesamten Gärrestmenge im Herbst deuten darauf hin, dass der im Herbst ausgebrachte Gärrest gegenüber einer Ausbringung im Frühjahr eine schlechtere N-Düngewirkung und somit N-Effizienz aufweist.

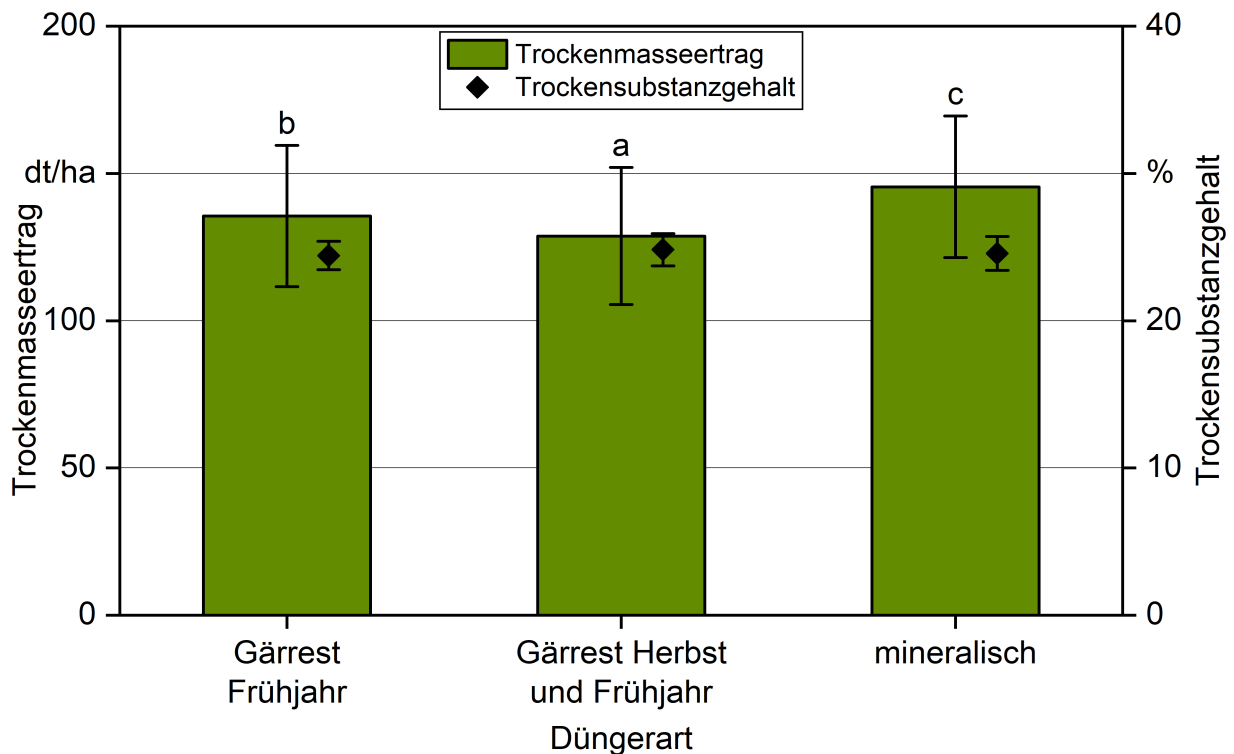


Abbildung 24: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von der Düngerart; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Aber auch bei einer Frühjahrsapplikation der Gärreste konnte die unterstellte N-Wirkung nicht erreicht werden. Die ausgebrachte Gärrestmenge wurde anhand des Ammoniumgehalts unter Berücksichtigung von Ausbringungsverlusten von 10,5 % (nur Jahr 2019 und 2020) abgeleitet. Die Erträge in den organisch gedüngten Varianten lagen dabei im Vergleich zur rein mineralischen N-Düngung ca. 10 dt TM/ha und somit knapp 7 % niedriger. Die schlechtere N-Verwertung ist vermutlich auf erhöhte gasförmige Ammoniakverluste zurückzuführen. Darüber hinaus könnte auch die in der Düngebedarfsermittlung unterstellte N-Nachlieferung aus der organischen Düngung des Vorjahrs (23 kg N/ha im Durchschnitt über alle organisch gedüngten Varianten) nicht erreicht oder optimal von den Pflanzen verwertet worden sein.

Die Aufteilung der Frühjahrsdüngung zeigte hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag. Im Durchschnitt der Jahre waren keine Ertragsunterschiede zwischen einer ausschließlich frühen oder auf einen zusätzlichen späten Termin aufgeteilten Frühjahrsdüngung festzustellen. Tendenziell führte jedoch eine geteilte Frühjahrsdüngung bei einer Gärrestdüngung mit Herbstgabe eher zu niedrigeren und bei einer mineralischen N-Düngung zu höheren Erträgen. Ursache hierfür könnte sein, dass bei geteilter Frühjahrsdüngung infolge der höheren Temperaturen beim zweiten Ausbringetermin Anfang Mai höhere Ammoniakverluste im Anschluss an die Ausbringung auftraten. Zusätzlich ist bei einer Aufteilung einer Güllegabe auf zwei Teilgaben gegenüber der Ausbringung in einer Gabe mit eher höheren Verlusten zu rechnen, da der Anteil der infiltrierten Menge an der

ausgebrachten Menge abnimmt [126]. In den rein mineralisch gedüngten Varianten könnte die Aufteilung auf zwei Teilgaben die N-Düngewirkung hingegen durch eine bessere Anpassung an den Verlauf der N-Aufnahme der Pflanzen erhöht haben (siehe 5.1.7).

Der Trockensubstanzgehalt zum Erntetermin lag im Mittel bei 24,6 % und somit auf einem für die Ernte von Durchwachsener Silphie zur Biogasnutzung typischen Niveau [100] [50]. Bei Durchwachsener Silphie ist trotz der relativ niedrigen TS-Gehalte von 25 bis 26 % eine Silierung problemlos möglich [13]. Bei der Auswertung der TS-Gehalte wurde ein Ausreißer entfernt, um die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse zu gewährleisten. Die TS-Gehalte zur Ernte wurden signifikant durch das Niveau der N-Düngung beeinflusst ($p = 0,0204$). Erstaunlicherweise führte hierbei die höchste N-Zufuhr zu signifikant höheren TS-Gehalten als bei einem N-Bedarfswert von 150 kg N/ha. Die niedrigsten TS-Gehalte lagen demnach bei einem N-Bedarfswert von 150 kg N/ha vor. Die Unterschiede gegenüber den anderen beiden Düngestufen waren mit ca. 0,4 % (absolut) allerdings relativ gering. Eine Aufteilung der Frühjahrsdüngung hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Trockensubstanzgehalt. Insgesamt war jedoch über alle Düngerarten die Tendenz zu niedrigeren TS-Gehalten bei geteilter Frühjahrsdüngung zu beobachten. Dieses Ergebnis könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei einer geteilten Frühjahrsdüngung durch das später während der Wachstumsphase vorliegende N-Angebot eine geringfügige Verzögerung der Abreife und somit niedrigere TS-Gehalte hervorgerufen wurden.

Entsprechend den Trockenmasseerträgen zeigte der N-Bedarfswert außerdem einen signifikanten Einfluss auf die Pflanzenhöhe ($p < 0,01$) zu allen drei Messterminen (Abbildung 25). Die Wuchshöhe nahm mit Ausnahme der Messung Ende Juli ebenfalls nur bei einer Steigerung des N-Bedarfswerts von 100 auf 150 kg N/ha signifikant zu. Bei der Messung zum Ende der Blüte des Haupttriebs führte auch eine Steigerung des N-Bedarfswerts von 150 auf 200 kg N/ha zu signifikant längeren Pflanzen. Bei allen Messterminen bewirkte diese zusätzliche N-Düngung jedoch einen geringeren Höhenzuwachs als die Steigerung von 100 auf 150 kg N/ha. Die Art der N-Düngung zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Wuchshöhe. Bei der Höhenmessung zum Erntetermin war allerdings eine signifikante Wechselwirkung zwischen Düngerart und N-Bedarfswert gegeben ($p = 0,0117$). Entsprechend dem Biomasseertrag waren bei mineralischer N-Düngung tendenziell höhere Pflanzen vorzufinden als bei Gärrestdüngung. Ebenso führte eine alleinige Frühjahrsdüngung mit Gärresten zu tendenziell höheren Pflanzen als eine zusätzliche Herstdüngung. Da der Biomasseertrag von Silphie primär durch die Stängelmasse gebildet wird [76], war ein Zusammenhang zwischen der Pflanzenhöhe und dem Trockenmasseertrag zu erwarten. Die Korrelation zwischen den Höhenmessungen und dem Trockenmasseertrag zur Ernte betrug 0,49 bis 0,67 (Pearson r) und lag somit im mittleren Bereich. Die stärkste lineare Beziehung war zur Höhenmessung zum Erntetermin gegeben. PICHARD (2012) [100] konnte ebenfalls eine Zunahme der Pflanzenhöhe bei einer Steigerung der N-Düngung beobachten, wobei die Höhe mit dem Ernteertrag korreliert war. In anderen Studien wurde dagegen teilweise kein linearer Zusammenhang (niedrige Korrelation) zwischen Wuchshöhe und Trockenmasseertrag zum Erntezeitpunkt nachgewiesen [133]. Von einer linearen Beziehung zwischen Pflanzenhöhe und Biomasseertrag kann bei den hier vorliegenden Korrelationswerten auch nicht ausgegangen werden.

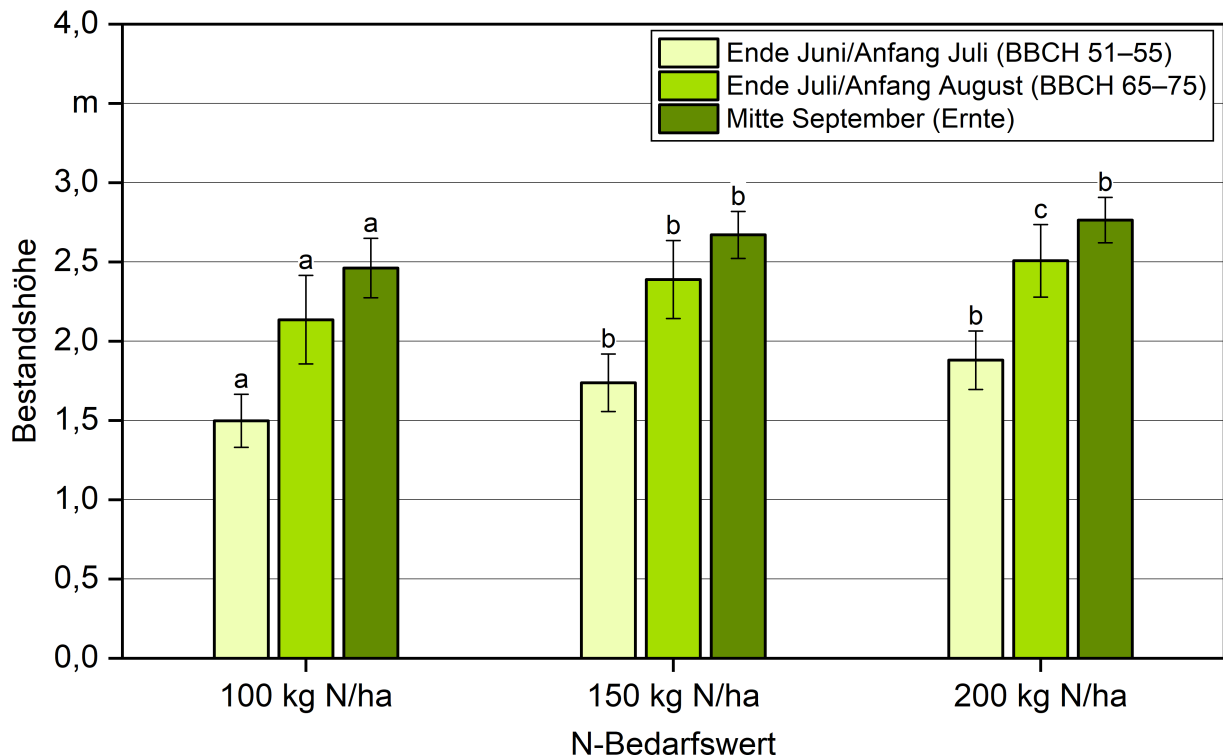


Abbildung 25: Bestandshöhe von Durchwachsener Silphie zu zwei Terminen während der Wachstumsphase und zur Ernte in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{min}) im Mittel über die mineralisch und organisch mit Gärresten gedüngten Varianten; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey jeweils für einen Messtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Darüber hinaus wurde untersucht, ob Zeitpunkt und Höhe der N-Düngung Stängeldichte, Stängeldicke (gemessen als Kantenlänge des quadratischen Stängels) und Pflanzenhöhe beeinflussen. Bezüglich der Wuchshöhe konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich einer geteilten und einmaligen Frühjahrsdüngung nachgewiesen werden.

Die Stängeldicke der Silphietriebe zum Erntetermin wurde signifikant durch die Höhe des N-Bedarfswerts beeinflusst ($p < 0,0001$). Zudem war ein signifikanter Einfluss der Wechselwirkungen aus N-Bedarfswert und Düngerart bzw. Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung gegeben ($p = 0,0029$ bzw. $p = 0,0173$) (Abbildung 26). Der Effekt der Düngerart war knapp nicht mehr signifikant. Die gemessene Stängeldicke betrug im Mittel 11,0 mm, was bei einem quadratischen Stängel einem Durchmesser von 15,6 mm entspricht. WEVER et al. (2019) [149] konnten in ihren Untersuchungen zur genetischen Variation der Durchwachsenen Silphie einen etwas höheren Stängeldurchmesser von 18,9 mm feststellen. BURY et al. (2020) [24] konnten hingegen bei einer N-Düngung von 100 kg N/ha mit 13,1 bzw. 12,3 mm ähnliche Stängeldurchmesser beobachten wie bei entsprechender N-Düngung im vorliegenden Projekt. Im hier behandelten Versuch führte jede Steigerung der N-Düngung zu signifikant dickeren Stängeln. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Düngerarten war eine ähnliche Differenzierung wie beim Trockenmasseertrag festzustellen. Im Vergleich zur Gärrestdüngung im Herbst und Frühjahr waren die Stängel in den mineralisch

mit Stickstoff gedüngten Parzellen signifikant dicker. Aus diesem Grund war auch eine relativ hohe Korrelation (Pearson $r = 0,63$, $n = 131$) zwischen dem Trockenmasseertrag zur Ernte und dem Stängeldurchmesser feststellen. Es wird außerdem von einer positiven Korrelation zwischen dem Stängeldurchmesser und der Pflanzenhöhe berichtet [24]. Der Korrelationskoeffizient für diesen Zusammenhang lag im vorliegenden Versuch bei 0,66 ($n = 144$), was logisch erscheint, da auch die Pflanzenhöhe positiv mit dem Ertrag korreliert ist.

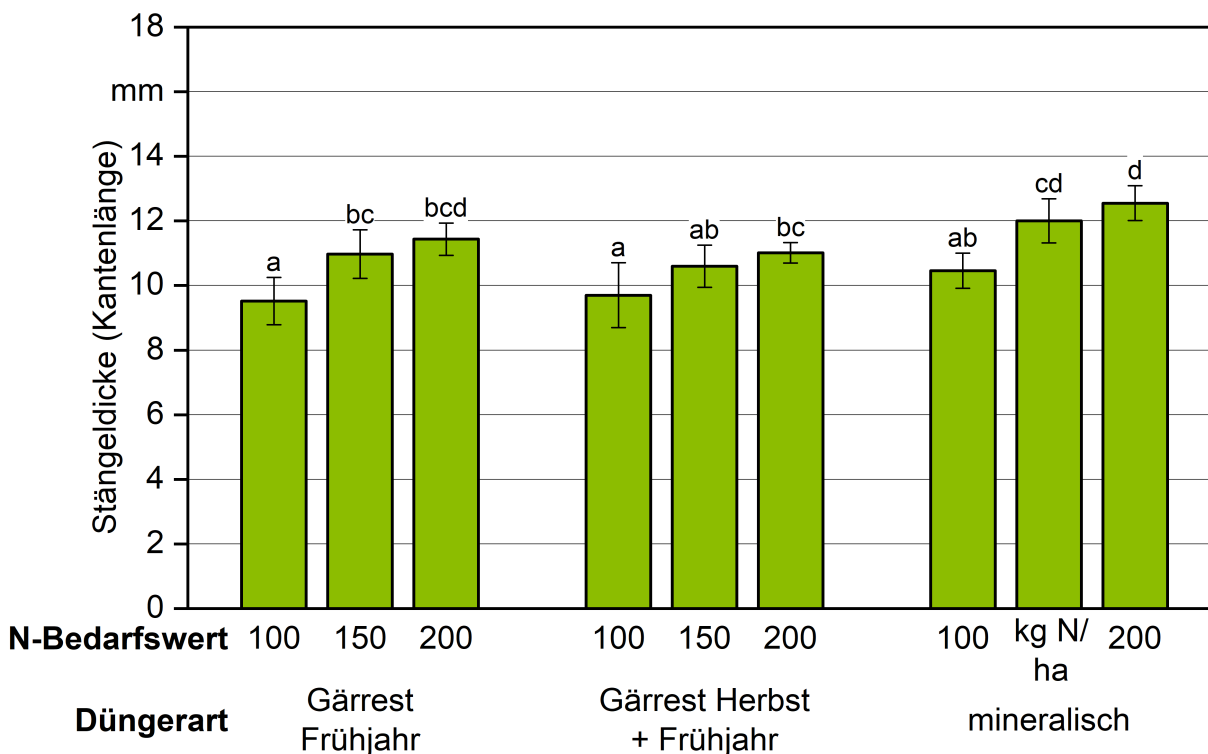


Abbildung 26: Kantenlänge der Stängel von Durchwachsener Silphie zum Erntetermin in Abhängigkeit von der Düngerart und dem N-Bedarfswert (inkl. N_{min}) im Mittel der Jahre 2020 und 2021; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Da der Ertrag von Durchwachsener Silphie überwiegend über die Stängelmasse bereitgestellt wird [76] ist somit neben der Pflanzenhöhe und der Anzahl an Internodien auch ein gesteigerter Stängeldurchmesser ein mögliches Zuchtziel dieser Pflanzenart [149]. Im Hinblick auf die Variation der N-Düngung konnte nicht beobachtet werden, dass eine Aufteilung der N-Düngung die Stängeldicke beeinflusste. Eine unterschiedliche Terminierung der ersten N-Gabe zu Vegetationsbeginn wurde jedoch nicht untersucht.

Die mittlere Stängeldichte aller Varianten lag bei 29,4 Stängel/m² und somit im Bereich von 20 bis 35 Stängel/m², was als Schwankungsbreite für die Stängeldichte stabiler, mehrjähriger Bestände angegeben wird [57]. BURY et al. (2020) [24] konnten bei einem per Saatverfahren etablierten Bestand im dritten Erntejahr ebenfalls eine Stängeldichte von

29,4 Stängel/m² beobachten, wobei sich die Pflanzendichte seit der Etablierung von 14,8 auf 6,4 Pflanzen/m² verringerte. Der Wert von 40 Stängel/m², den STANFORD (1992) [132] für die Stängeldichte etablierter Bestände ausgewiesen hat, wurde hingegen nicht erreicht. Wie in einer anderen Studie und anhand Abbildung 27 ersichtlich war die Stängeldichte nicht mit dem Trockenmasseertrag korreliert (Pearson $r = 0,1$, $n = 131$) [6]. Bezüglich der Stängeldichte war ein signifikanter Einfluss der Düngerart ($p = 0,0137$) nachzuweisen. Eine mineralische N-Düngung führte im Vergleich zu einer Gärrestdüngung im Herbst und Frühjahr zu signifikant geringeren Stängeldichten. Darüber hinaus beeinflusste auch der Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung die Stängeldichte sehr hoch signifikant ($p < 0,0001$), wobei bei einer einmaligen Frühjahrsdüngung mit 30,8 Stängel/m² eine höhere Stängeldichte als bei geteilter Frühjahrsdüngung mit 28,1 Stängel/m² vorzufinden war. Dies deutet darauf hin, dass ein frühes N-Angebot für die Pflanzen die Stängeldichte erhöht, wie auch von BIERTÜMPFEL et al. (2018) [14] festgestellt wurde. Eine gleichzeitige Verringerung des Stängeldurchmessers war jedoch im vorliegenden Versuch nur tendenziell zu beobachten. Zudem waren die Stängeldichte und der Triebdurchmesser insgesamt nur leicht negativ zueinander korreliert (Pearson $r = -0,19$, $n = 144$). Ein entsprechendes Phänomen konnte auch von PICHARD (2012) [100] beobachtet werden. Bei einem Versuch mit unterschiedlichen Pflanzendichten bei Durchwachsener Silphie zeigte sich, dass höhere Pflanzendichten zu dünneren Stängeln und weniger Stängeln je Pflanze führten. Darüber hinaus war im vorliegenden Projekt kein Zusammenhang zum Lager zur Ernte gegeben, da dieses in den Varianten mit geteilter Frühjahrsdüngung tendenziell höher war.

Des Weiteren zeigte neben der Wechselwirkung aus Düngerart und Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung auch die Wechselwirkung aller drei Versuchsfaktoren einen signifikanten Einfluss auf die Triebdichte ($p = 0,0035$ bzw. $p = 0,0177$), so dass Vergleiche zwischen den Varianten auf dieser Ebene vorgenommen werden sollten (Abbildung 27). Die höchsten Stängeldichten waren dabei bei einer Gärrestdüngung im Herbst und Frühjahr und einmaliger Frühjahrsdüngung gegeben, die geringsten bei mineralischer N-Düngung und geteilter Frühjahrsdüngung. Dies deutet daraufhin, dass im ersten Fall den Pflanzen zu Beginn der Wachstumsphase am meisten Stickstoff zur Verfügung stand, so dass sich mehr konkurrenzfähige Triebe ausbilden konnten. Dieses N-Angebot stammte vermutlich einerseits aus der Herbstgabe, die wahrscheinlich zumindest teilweise über die Nährstoffspeicherung in den Wurzeln im Folgejahr für das Triebwachstum zur Verfügung stand. Zudem bewirkte eine Gärrestdüngung zu Vegetationsbeginn ein sofortiges N-Angebot für die Pflanzen, da der flüssige Dünger in den Boden infiltrierte und das gelöste Ammonium von den Wurzeln aufgenommen werden konnte. Wegen der in allen Jahren vorherrschenden überwiegend trockenen Witterungsphase zum Zeitpunkt der ersten N-Düngung lösten sich die Mineraldüngerkörner erst nach Niederschlägen auf. Bis diese eintraten, verging in allen Versuchsjahren mindestens eine Woche, im Jahr 2020 sogar vier Wochen. Dadurch setzte die N-Düngewirkung der ersten N-Gabe erst stark verzögert ein.

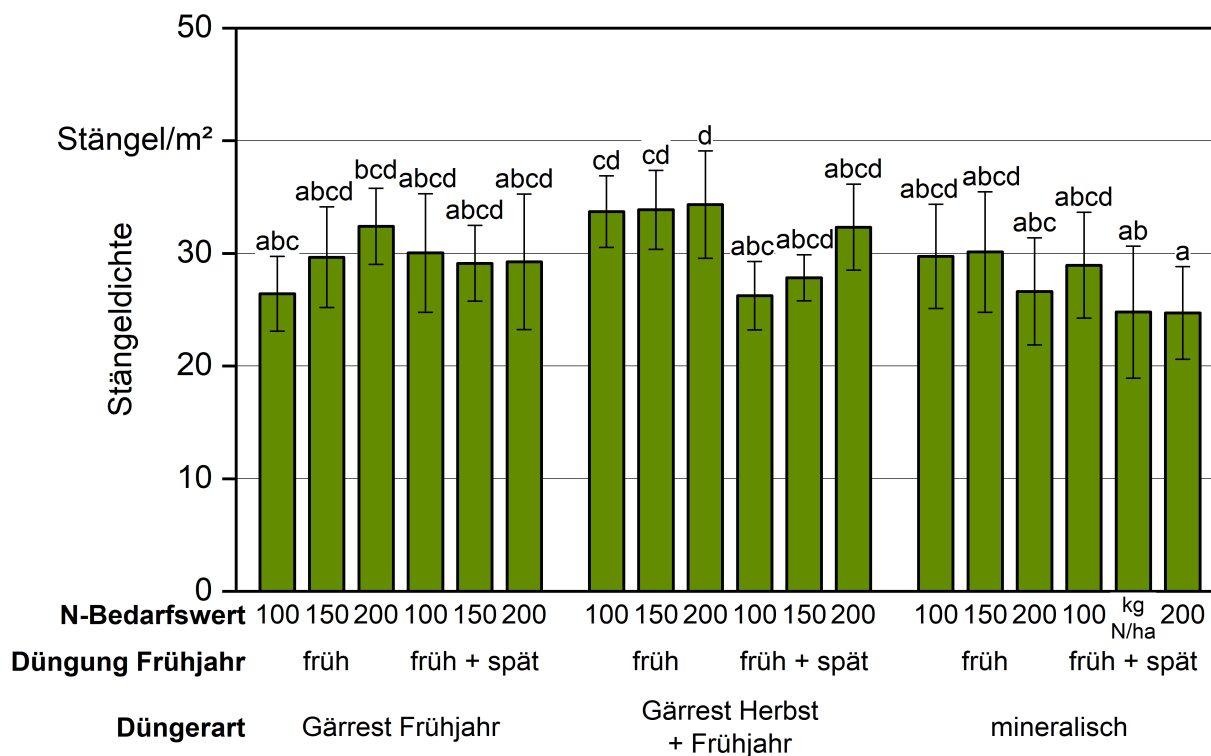


Abbildung 27: Stängeldichte von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit des N-Bedarfswerts (inkl. N_{min}), des Zeitpunkts der Frühjahrsdüngung und der Düngerart im Mittel der Jahre 2020 und 2021; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Die Beziehung zwischen dem Trockenmasseertrag und dem N-Bedarfswert wurde zusätzlich über eine lineare Regression ausgewertet, wobei der Bedarfswert in diesem Fall als quantitativer Faktor betrachtet wurde. Der N-Bedarfswert verfügt allerdings nur über drei Stufen, so dass eine derartige Auswertung nur bedingt möglich ist und der Zusammenhang höchstens bis zu einer polynomischen Beziehung zweiten Grades überprüft werden kann. Obwohl zwischen Düngung und Ertrag eine quadratische Beziehung zu vermuten ist [100], konnte eine entsprechende Auswertung nur einen linearen Zusammenhang ($R^2 = 59\%$) bestätigen. Eine signifikante Wechselwirkung des N-Bedarfswerts zu einem anderen Versuchsfaktor war nicht gegeben. Folglich wurde unabhängig von der Düngerart und dem Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung im Bereich von 100 bis 200 kg N/ha des N-Bedarfswerts eine Ertragssteigerung von 0,39 dt TM/ha je zusätzlichem Kilogramm je Hektar an N-Angebot im Frühjahr erreicht.

5.1.3 Nährstoffgehalte und -abfuhr

5.1.3.1 Nährstoffgehalte

Im Mittel über alle Varianten wurden im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie Nährstoffgehalte in Höhe von 0,73 kg N/dt TM, 0,42 kg P₂O₅/dt TM, 1,98 kg K₂O/dt TM und 0,51 kg MgO/dt TM ermittelt. Im Vergleich der einzelnen Versuchsjahre nahmen seit 2019 die Mg-Gehalte eher ab, während die P-Gehalte leicht anstiegen. Gleichzeitig waren die Trockenmasseerträge im Jahr 2019 am höchsten, so dass die Mg-Gehalte eher positiv (Pearson $r = 0,31$, $n = 203$) und die P-Gehalte eher negativ (Pearson $r = -0,52$, $n = 203$) mit den Trockenmasseerträgen korreliert waren. Verglichen mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen (siehe 2.3) wurden für alle untersuchten Nährelemente ca. 10 bis 20 % niedrigere Werte festgestellt. Wegen der durchgeführten P- und K-Ausgleichsdüngung sind deutliche Unterschiede im Nährstoffangebot zwischen den Varianten unwahrscheinlich. Darüber hinaus wurde durch diese Düngung auch die maximale Abfuhr ausreichend ausgeglichen.

Die varianzanalytische Auswertung zeigte bis auf die K-Gehalte bei allen untersuchten Nährelementen einen signifikanten Effekt der Düngerart und der Höhe des N-Bedarfswerts auf (Tabelle 13). Um die Voraussetzungen der Varianzanalyse zu erfüllen, war bei N- und Mg-Gehalten eine logarithmische Datentransformation erforderlich. Darüber hinaus war außer bei den P-Gehalten auch eine signifikante Wechselwirkung aus Düngerart und N-Bedarfswert vorhanden. Signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey waren bei den K-Gehalten allerdings auch hier nicht gegeben. Der Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung hatte keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Nährstoffgehalte.

Bezüglich der P-Gehalte war festzustellen, dass eine Steigerung der N-Zufuhr zu einer Reduktion der P-Gehalte führte. Darüber hinaus waren in den mit Gärrest gedüngten Varianten signifikant höhere P-Gehalte nachzuweisen. Diese Beobachtung steht in Übereinstimmung mit der negativen Korrelation der P-Gehalte zum Ertrag und ist vermutlich auf einen Verdünnungseffekt zurückzuführen, da bei mineralischer Düngung bzw. höherer N-Zufuhr höhere Trockenmasseerträge erreicht wurden. Die Tatsache, dass hinsichtlich der P-Abfuhr keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf den Faktor Düngerart bzw. N-Bedarfswert gegeben waren, bestätigen diese Vermutung. Demzufolge ist nicht davon auszugehen, dass die Erträge in den mineralischen Varianten durch eine ungenügende P-Versorgung negativ beeinflusst wurden. Die K-Gehalte lagen über alle N-Stufen weitgehend auf identischem Niveau. In Kombination mit den Düngerarten zeigt sich jedoch, dass bei Gärrestdüngung die K-Gehalte bei höherer N-Zufuhr tendenziell zunahmen, während sie bei mineralischer N-Düngung eher abnahmen.

Die Mg-Gehalte wiesen im Gegensatz zu den P-Gehalten eine positive Korrelation zum Trockenmasseertrag auf und nahmen deshalb bei einer Steigerung der N-Zufuhr, insbesondere bei mineralischer N-Düngung, signifikant zu. Gegenüber einer mineralischen N-Düngung lagen die Mg-Gehalte bei Gärrestdüngung signifikant niedriger und auch unterhalb der Werte vergleichbarer Untersuchungen, während bei mineralischer Düngung durchschnittliche Werte gegeben waren (siehe 2.3).

Tabelle 13: Nährstoffgehalte von Durchwachsener Silphie im Mittel der Versuchsjahre in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{min}) und der Düngerart (Gärrest F = Gärrest nur Frühjahr, Gärrest H + F = Gärrest Herbst und Frühjahr, min = mineralisch); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey

Düngerart	N-Bedarfswert	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
	Einheit	kg/dt TM	kg/dt TM	kg/dt TM	kg/dt TM
Gärrest F		0,70 a	0,44 b	2,04	0,47 a
Gärrest H + F		0,69 a	0,44 b	1,96	0,49 a
min		0,79 b	0,38 a	1,95	0,57 b
	100 kg N/ha	0,69 a	0,47 b	1,95	0,48 a
	150 kg N/ha	0,73 ab	0,42 ab	2,01	0,51 a
	200 kg N/ha	0,76 b	0,37 a	2,00	0,54 b
Gärrest F	100 kg N/ha	0,66 a	0,48	1,95	0,46 a
Gärrest F	150 kg N/ha	0,72 ab	0,44	2,08	0,47 a
Gärrest F	200 kg N/ha	0,71 ab	0,40	2,10	0,48 a
Gärrest H + F	100 kg N/ha	0,68 ab	0,49	1,91	0,48 ab
Gärrest H + F	150 kg N/ha	0,70 ab	0,44	1,97	0,48 a
Gärrest H + F	200 kg N/ha	0,70 ab	0,40	2,01	0,50 ab
min	100 kg N/ha	0,72 ab	0,42	1,99	0,49 a
min	150 kg N/ha	0,78 bc	0,38	1,97	0,57 b
min	200 kg N/ha	0,88 c	0,33	1,88	0,65 c

Eine eindeutige, wenn auch nicht immer signifikante Zunahme der N-Gehalte bei gesteigerter N-Düngung war nur bei mineralischer N-Düngung festzustellen (Abbildung 28). Die höchsten N-Gehalte über den gesamten Versuchszeitraum waren mit durchschnittlich 0,88 kg N/dt TM bei rein mineralischer N-Düngung und einem N-Angebot von 200 kg N/ha zu beobachten. Diese waren gegenüber den N-Gehalten aller N-Stufen der Gärrestvarianten signifikant höher und entsprachen dem für Durchwachsene Silphie aus anderen Untersuchungen bekannten Niveau (siehe 2.3). Bei Gärrestdüngung lagen mit durchschnittlich 0,7 kg N/dt TM deutlich niedrigere Gehalte vor. Zudem konnten bei Gärrestdüngung keine signifikanten Unterschiede über die N-Stufen nachgewiesen werden. Bei rein mineralischer N-Düngung wurde ein durchschnittlicher N-Gehalt von 0,79 kg N/dt TM erreicht. Im Vergleich zu einer rein mineralischen N-Düngung führte eine Gärrestdüngung somit zu signifikant geringeren N-Gehalten. Auffallend ist des Weiteren, dass trotz später Ernte im Jahr 2021 eher höhere N-Gehalte als im Jahr 2019 vorlagen, was vermutlich auf das deutlich geringere Ertragsniveau im Jahr 2021 zurückzuführen ist. Die deutlichen Unterschiede in den N-Gehalten zwischen Gärrestdüngung und rein mineralischer N-Düngung

weisen erneut darauf hin, dass die Gärreste die in der Düngebedarfsermittlung unterstellte N-Wirkung im Anwendungsjahr und evtl. Nachlieferung im Folgejahr nicht erreicht haben.

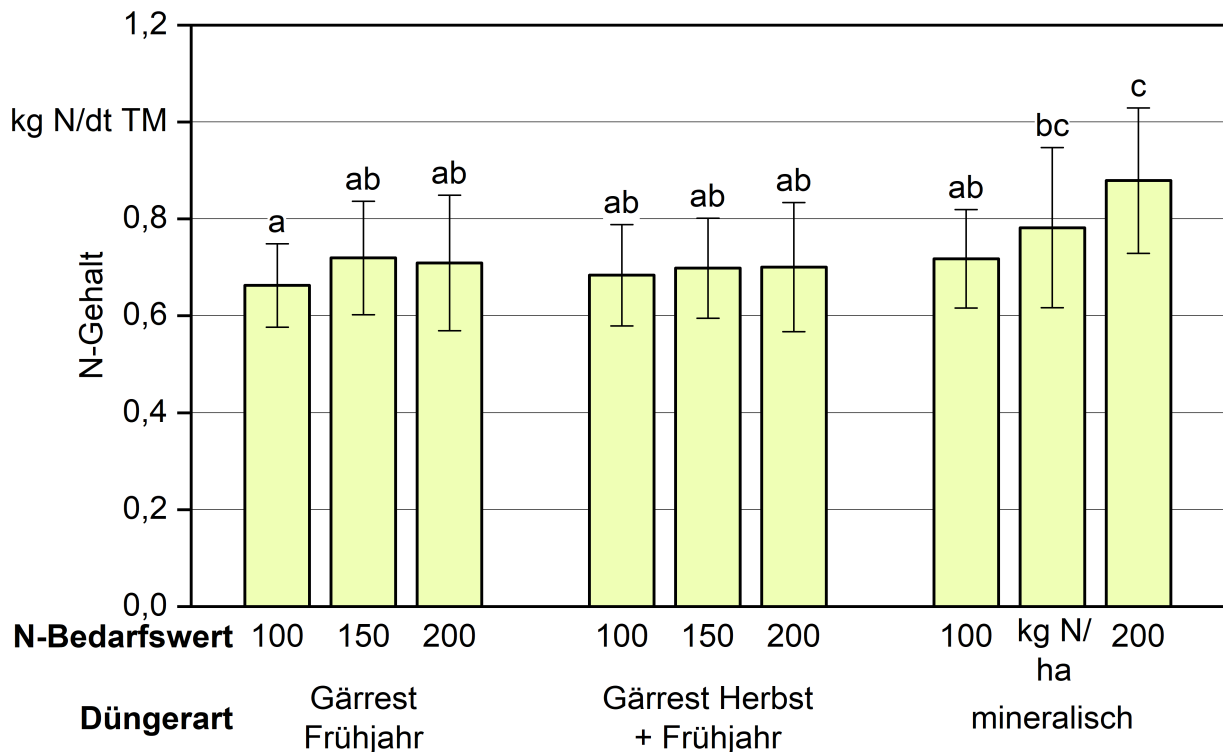


Abbildung 28: N-Gehalte des Ernteguts von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von der Düngerart und dem N-Bedarfswert (inkl. N_{min}); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

In anderen N-Steigerungsversuchen mit Durchwachsener Silphie wurde ebenfalls eine Steigerung der N-Gehalte mit zunehmender N-Zufuhr beobachtet [100] [133]. In diesen Studien erfolgte die N-Düngung ausschließlich durch Mineraldünger. In einer Studie wurde dabei eine Steigerung der N-Gehalte mit zunehmender N-Zufuhr von 160 auf 240 kg N/ha von 0,93 auf 1,15 kg N/dt TM festgestellt [133]. Auch PICHARD (2012) [100] konnte bei einer Steigerung der N-Düngung von 0 auf 400 kg N/ha eine tendenzielle Zunahme der N-Gehalte des Ernteguts je nach Standort von 0,77 bis 1,07 kg N/dt TM, 1,04 bis 1,44 kg N/dt TM und 0,74 bis 0,99 kg N/dt TM beobachten. Das dabei erzielte Ertragsniveau war vergleichbar mit dem Ertragspotenzial bayerischer Standorte [50]. Zudem unterschieden sich in dieser Untersuchung die N-Gehalte bei identischer N-Düngung und ähnlichem Ertragsniveau je nach Standorteinfluss deutlich. Im Gegensatz zum vorliegenden Projekt lagen die N-Gehalte in dieser Untersuchung bei einem N-Düngungsniveau von 200 kg N/ha im Mittel der Standorte mit 1,0 kg N/dt TM deutlich höher und auf dem Niveau des bayerischen Standardwerts für die Düngebedarfsermittlung.

5.1.3.2 Nährstoffabfuhr

Es wurde ein signifikanter Einfluss des N-Bedarfswerts auf die Kaliumabfuhr festgestellt ($p = 0,0009$), wobei eine Steigerung der N-Düngung und somit des Trockenmasseertrags auch zu einer signifikanten Zunahme der K-Abfuhr führte. Darüber hinaus hatten die Düngerart ($p = 0,0398$) und die Wechselwirkung aus Düngerart und N-Bedarfswert ($p = 0,0008$) einen signifikanten Einfluss auf die Kaliumabfuhr. Da die Kaliumgehalte kaum durch die Versuchsfaktoren beeinflusst wurden, variierte die Kaliumabfuhr somit entsprechend den Trockenmasseerträgen. Auf der niedrigsten N-Stufe wurde eine Kaliumabfuhr von 226 kg K_2O/ha erreicht, während auf der höchsten Stufe 307 kg K_2O/ha gegeben waren. Die Phosphorgehalte waren im Gegensatz zu den Kaliumgehalten eher negativ mit den Ernteerträgen korreliert. Folglich hatte kein Versuchsfaktor einen signifikanten Einfluss auf die P-Abfuhr und diese lag in allen Varianten fast auf gleichem Niveau von durchschnittlich 56 kg P_2O_5/ha . Erstaunlich ist, dass die P-Abfuhr im Jahr 2021 bei eher niedrigem Ertragsniveau mit durchschnittlich 64 kg N/ha am höchsten war. Die Mg-Abfuhr belief sich im Durchschnitt aller Varianten auf 70 kg MgO/ha . Wegen der leicht positiven Korrelation der Mg-Gehalte mit dem Trockenmasseertrag zeigten die Düngerart ($p = 0,006$), der N-Bedarfswert ($p = 0,0012$) sowie die Wechselwirkung aus Düngerart und Aufteilung der Frühjahrsdüngung ($p = 0,0424$) bzw. Düngerart und N-Bedarfswert ($p = 0,0016$) einen signifikanten Effekt auf die Mg-Abfuhr. Die höheren Mg-Gehalte bei mineralischer N-Düngung führten zusammen mit den tendenziell höheren Trockenmasseerträgen auch zu signifikant höheren Mg-Abfuhr. Die Unterschiede zu den mit Gärrest gedüngten Varianten nahmen mit zunehmender N-Düngung und steigenden Erträgen zu und betragen im Mittel etwa 20 kg MgO/ha . Insgesamt wurde allerdings für die Abfuhr der Nährelemente Phosphor, Kalium und Magnesium, wegen der leicht unterdurchschnittlichen Gehaltswerte, das Niveau anderer Untersuchungen nicht erreicht [14].

Die Stickstoffabfuhr im Versuchsjahr 2020 lag trotz des niedrigen Ertragsniveaus mit durchschnittlich 96,7 kg N/ha fast auf dem Niveau des ersten Versuchsjahrs von 98,4 kg N/ha. Obwohl auch im Jahr 2021 das Ertragsniveau ähnlich niedrig wie im Jahr 2020 war, wurde mit 103,7 kg N/ha sogar eine höhere N-Abfuhr erreicht. Im Mittel aller drei Versuchsjahre betrug die N-Abfuhr 99,4 kg N/ha. Die varianzanalytische Auswertung der N-Abfuhr ergab sowohl einen signifikanten Einfluss der Düngerart ($p = 0,0044$) als auch der Höhe des N-Bedarfswerts ($p = 0,0014$) (Abbildung 29). Hierbei war eine logarithmische Transformation der Werte erforderlich, um die Modellvoraussetzungen zu erfüllen. Eine mineralische N-Düngung führte gegenüber den beiden Gärrestvarianten entsprechend den Erträgen zu einer signifikant höheren N-Abfuhr. Darüber hinaus war bei einer Steigerung des N-Bedarfs von 100 auf 150 kg N/ha eine signifikante Erhöhung der N-Abfuhr festzustellen, während eine weitere Steigerung auf 200 kg N/ha gerade nicht mehr zu einer signifikant höheren N-Abfuhr beitrug (Mittelwertvergleich nach Tukey). STOLZENBURG et al. (2016) [133] konnten ebenfalls in einem N-Steigerungsversuch mit Durchwachsener Silphie eine Zunahme der N-Abfuhr bis zu einem N-Düngungsniveau von 200 kg N/ha feststellen. Bei weiterer Erhöhung der N-Düngung auf 240 kg N/ha war allerdings keine weitere Steigerung der N-Abfuhr möglich. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch eine weitere Studie zur N-Düngung von Durchwachsener Silphie, die einen Rückgang der N-Ver-

wertung bereits ab einer mineralischen N-Düngung von 100 kg N/ha beobachtete [100]. Bei einer N-Düngung über 200 kg N/ha war ebenfalls nur noch eine sehr geringe Ausnutzung der zusätzlichen N-Zufuhr gegeben.

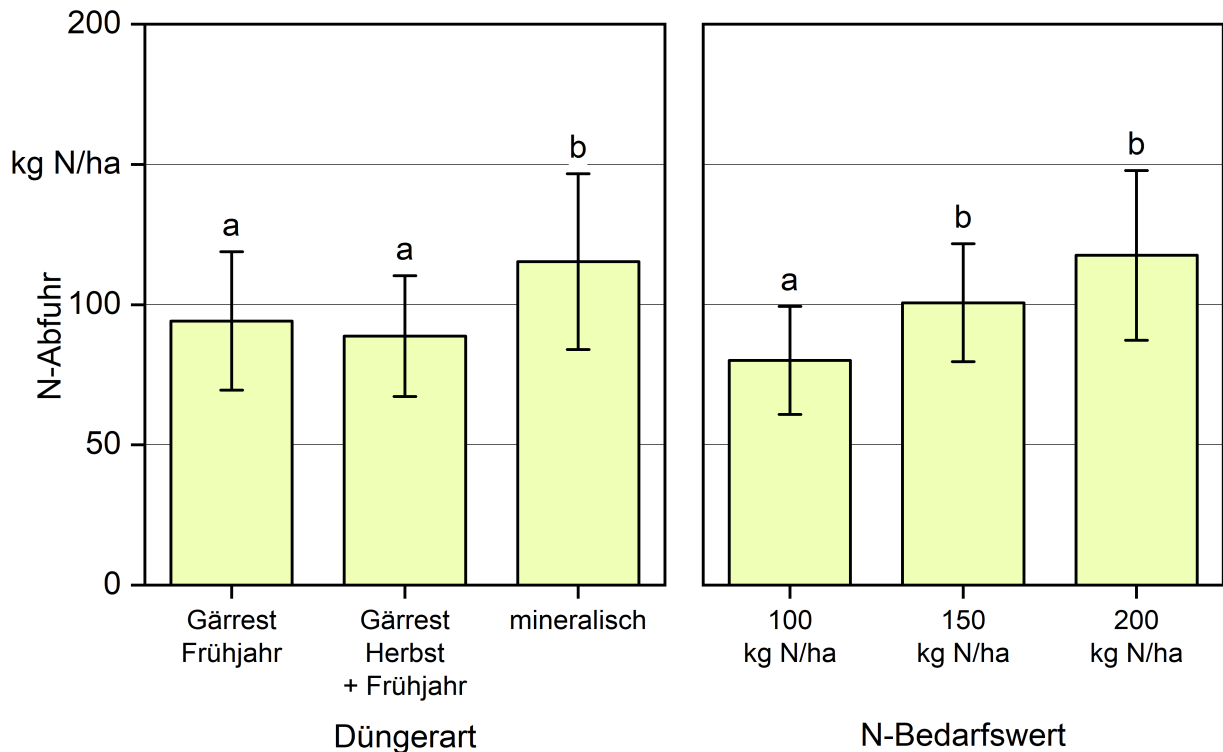


Abbildung 29: Stickstoffabfuhr von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von der Art der N-Düngung (links) und dem N-Bedarfswert (rechts); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Der Zeitpunkt der N-Düngung im Frühjahr hatte entsprechend dem Trockenmasseertrag keinen signifikanten Einfluss auf die Höhe der N-Abfuhr. Tendenziell war bei einer geteilten Frühjahrsdüngung eine höhere N-Abfuhr zu beobachten. Die Unterschiede waren zwar gering, aber durchgehend für alle Düngerarten vorhanden. Eventuell verzögerte das spätere N-Angebot die Abreife und N-Rückverlagerung in die Überdauerungsorgane etwas. Darüber hinaus könnten gasförmige N-Verluste durch den Pflanzenbewuchs beim zweiten Düngetermin doch etwas reduziert worden sein [127].

Grundsätzlich ist die N-Wirkung organischer Dünger in Bezug auf mögliche Mineralisations- und Immobilisationsprozesse sowie Ammoniakverluste im Zeitraum nach der Ausbringung schwierig abzuschätzen. Die Hauptursache dafür, dass im vorliegenden Versuch die Gärrestvarianten die unterstellte N-Düngewirkung nicht erreichten und folglich eine relativ schlechte N-Verwertung zeigten, ist vermutlich höheren Ammoniakverlusten zuzuschreiben. Zusätzlich könnte auch die N-Nachlieferung aus der organischen Düngung der Vorjahre unter den angesetzten Mindestwerten gelegen haben. Der Grund für das allgemein niedrige Niveau der N-Gehalte und somit N-Abfuhr bleibt hingegen unklar. Even-

tuell könnte dies immer noch auf eine Nachwirkung der ungenügenden Pflanzenentwicklung im Etablierungsjahr unter der Deckfrucht zurückzuführen sein. Weitere Unklarheiten verursachte in diesem Zusammenhang der im selben Jahr in Reinsaat etablierte Bestand, der für die Untersuchung des Wachstumsverlaufs herangezogen wurde. Dieser wies trotz relativ geringer N-Düngung von 130 kg N/ha im Jahr 2019 bzw. 140 kg N/ha im Jahr 2020 neben einem höheren Trockenmasseertrag auch einen höheren N-Gehalt (0,86 bzw. 0,92 kg N/dt TM) wie bei entsprechender mineralischer Düngung im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie auf. Im Jahr 2021 waren keine Unterschiede mehr vorhanden.

Entsprechend den Unterschieden im Bereich der Trockenmasseerträge wies auch die N-Abfuhr der Gärrestvariante mit Herbstdüngung gegenüber einer Gärrestdüngung ausschließlich im Frühjahr tendenziell ein niedrigeres Niveau auf. Eine identische N-Verwertung von Herbst- und Frühjahrsdüngung war somit während der Projektlaufzeit nicht gegeben. Um dies genauer zu überprüfen, wurden im Frühjahr 2021 vor Vegetationsbeginn Proben der Wurzelstöcke und Wurzeln bis 25 cm Tiefe aus Parzellen mit Gärrestdüngung nur im Frühjahr und zum Vergleich mit Herbst- und Frühjahrsdüngung entnommen. Hinsichtlich der Wurzelrockenmasse in der Beprobungstiefe wurden bei Gärrestdüngung im Herbst und Frühjahr 77 dt/ha und bei alleiniger Frühjahrsdüngung 49 dt/ha gemessen. Wegen der hohen Varianz der Einzelwerte war dieser Unterschied allerdings nicht signifikant. Die großen Schwankungen waren vermutlich auf die sehr kleinen Probenahmeflächen von nur jeweils 0,75 m² zurückzuführen. Die oberflächennahe Wurzelmasse wurde deshalb für beide Varianten als identisch angesehen und für die Berechnung der jeweils enthaltenen Nährstoffmengen der Gesamtmittelwert von 63 dt TM/ha verwendet. Folglich wären Unterschiede in den Nährstoffaufnahmen auf Unterschiede der Nährstoffgehalte zurückzuführen. Die Wurzelrockenmasse stimmt sehr gut mit den Ergebnissen von SCHOO et al. (2017) [119] überein, die in ihren Untersuchungen eine Gesamtwurzelmasse bei Durchwachsener Silphie von 84 dt TM/ha ermittelten, wovon sich 70 % in den oberen 30 cm befanden. Im Hinblick auf die P-, K- und Mg-Gehalte waren kaum Unterschiede zwischen den Varianten vorhanden, die zudem nicht signifikant waren. Die P-, K- und Mg-Gehalte betragen im Mittel 0,40, 1,87 bzw. 0,34 kg/dt TM. Die P- und K-Gehalte der Wurzelstöcke erreichten damit ca. 80 % der Gehalte der oberirdischen Biomasse, bei Magnesium lagen diese etwa bei 60 %. Bei einer guten Verwertung der Herbstgabe wäre zu erwarten, dass das zusätzliche Stickstoffangebot im Herbst von den Pflanzen aufgenommen wird und über eine Vergrößerung der Nährstoffreserven den Pflanzen im Folgejahr zum Wachstum zur Verfügung steht. Die N-Gehalte und somit die N-Aufnahme der oberflächennahen Bereiche der Wurzelstöcke zeigten allerdings ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen einer Gärrestdüngung ausschließlich im Frühjahr und Frühjahrs- und Herbstdüngung. Tendenziell waren jedoch bei der untersuchten Variante mit Herbstdüngung höhere N-Gehalte und somit eine höhere N-Aufnahme gegeben. Die Unterschiede in den N-Gehalten waren mit 0,67 kg N/dt TM bei Herbst- und Frühjahrsdüngung im Vergleich zu 0,58 kg N/dt TM bei alleiniger Frühjahrsdüngung deutlich größer als bei den anderen untersuchten Nährelementen. Unter der Annahme gleicher Wurzelmassen würde dies eine höhere N-Aufnahme bei Herbstdüngung von ca. 5 kg N/ha bedeuten. Bei einer Zufuhr von etwa 30 kg N/ha pflanzenverfügbarem Stickstoff über eine Herbstdü-

gung mit Gärresten wäre dadurch noch keine ausreichende Verwertung einer Herbstgabe zu begründen, insbesondere da im vorliegenden Versuch die Herbstdüngung bei günstiger Witterung erfolgte und sich somit keine allzu hohen Ammoniakverluste ereignet haben dürften. Auch die tatsächlich beobachtete N-Düngewirkung der Herbstgabe lässt sich dadurch noch nicht erklären, da der Unterschied in der N-Aufnahme beider Varianten im Mittel nur 5 kg N/ha betrug. Verglichen mit der N-Effizienz einer Frühjahrsdüngung war diejenige der Herbstgabe somit halb so hoch, so dass insgesamt noch von einer ausreichenden Verwertung ausgegangen werden kann. Da zudem keine erhöhten N_{\min} -Mengen im Boden zu Vegetationsende vorlagen, spricht auch aus Umweltsicht nichts gegen eine Herbstdüngung von Durchwachsener Silphie mit Gärresten.

In einem weiteren Schritt wurden anhand der N-Abfuhr die Mineraldüngeräquivalente der Gärrestvarianten berechnet. Hierzu wurde zunächst für die rein mineralisch gedüngten Varianten jahresweise die Beziehung zwischen der N-Abfuhr und der gedüngten N-Menge über eine Regression untersucht. Für alle drei Versuchsjahre ergab sich ein linearer Zusammenhang. Anhand der Geradengleichung wurde anschließend für die Gärrestvarianten ausgehend von der N-Abfuhr die Menge an Mineraldünger-N berechnet, die für das Erreichen einer entsprechend hohen N-Abfuhr erforderlich gewesen wäre. Wird diese durch Gärreste substituierte Menge an Mineraldünger-N durch die N-Menge geteilt, die über Gärreste zum Erreichen der N-Abfuhr zugeführt werden musste, ergibt sich das Mineraldüngeräquivalent bezogen auf den Gesamtstickstoff bzw. Ammoniumstickstoff. Negative Werte wurden auf ein Mineraldüngeräquivalent von 0 % gesetzt.

Im Gesamtmittel war ein Mineraldüngeräquivalent von 41 % bezogen auf den N_{ges} bzw. 67 % bezogen auf den $\text{NH}_4\text{-N}$ gegeben. Im Vergleich der Einzeljahre wies das Jahr 2020 mit nur 25 % bzw. 40 % bezogen auf den N_{ges} bzw. $\text{NH}_4\text{-N}$ mit Abstand die schlechtesten Mineraldüngeräquivalente und somit die schlechteste N-Wirkung der Gärreste auf. Die statistische Auswertung des Mineraldüngeräquivalents erfolgte nur für die mit Gärresten gedüngten Varianten. Hierbei war eine Wurzeltransformation der Werte erforderlich, um die Voraussetzungen der Varianzanalyse zu erfüllen. Im Hinblick auf das Mineraldüngeräquivalent des N_{ges} und auch des $\text{NH}_4\text{-N}$ zeigte kein Versuchsfaktor einen signifikanten Einfluss.

Entsprechend der Stickstoffabfuhr wurden tendenziell jedoch bei einer Gärrestdüngung nur im Frühjahr höhere Mineraldüngeräquivalente und somit eine bessere N-Verwertung gegenüber einer Gärrestdüngung im Herbst und im Frühjahr erreicht. Das Mineraldüngeräquivalent bezogen auf den N_{ges} bzw. $\text{NH}_4\text{-N}$ lag dabei bei einer Frühjahrsdüngung bei 44 bzw. 71 %. Bei einer zusätzlichen Herbstdüngung war im Mittel ein Mineraldüngeräquivalent von 39 bzw. 64 % gegeben. Im Hinblick auf die Aufteilung der Frühjahrsdüngung zeigten sich tendenziell keine Unterschiede zwischen einer einmaligen frühen Gabe und einer auf zwei Gaben aufgeteilten Düngung. Die tendenziell beste N-Wirkung der Gärreste im Hinblick auf die Höhe der N-Zufuhr war bei einem N-Bedarfswert von 150 kg N/ha gegeben. Bezogen auf den N_{ges} bzw. $\text{NH}_4\text{-N}$ wurde hier ein Mineraldüngeräquivalent von 48 bzw. 78 % erreicht. Bei höherer oder niedrigerer N-Zufuhr über Gärreste war die Wirkung gegenüber einer mineralischen N-Düngung tendenziell schlechter. Sehr ungewöhnlich ist, dass das schlechteste Mineraldüngeräquivalent auf der niedrigsten N-Stufe vorlag. Nor-

malerweise wäre zu erwarten gewesen, dass sich das Mineraldüngeräquivalent mit zunehmender Höhe der Gärrestdüngung verschlechterte. Wahrscheinlich wurde jedoch das Niveau der N-Abfuhr bei sehr geringer mineralischer N-Düngung durch eine zu flache Regressionsgerade überschätzt.

Ähnliche Mineraldüngeräquivalente für die Düngung mit Biogasgärresten wurden auch von LICHTI et al. (2012) [82] bei einer Fruchtfolge aus Silomais, GPS-Getreide und Weidelgras beobachtet. Bei einer Düngung von Silomais mit Biogasgärresten und direkter Einarbeitung vor der Saat sind allerdings durchaus höhere Mineraldüngeräquivalente möglich [83]. In der Düngebedarfsermittlung des hier behandelten Versuchsvorhabens wurde den Gärresten eine N-Düngewirkung entsprechend ihrem $\text{NH}_4\text{-N}$ Anteil unterstellt. In den Jahren 2019 und 2020 wurden zusätzlich 10,5 % Ausbringungsverluste berücksichtigt. Dies würde im Mittel der Versuchsjahre einem Mineraldüngeräquivalent von ca. 93 % bezogen auf den $\text{NH}_4\text{-N}$ bzw. ca. 55 % des N_{ges} entsprechen. Verglichen mit den berechneten Werten wurde die unterstellte N-Düngewirkung folglich nicht erreicht. Die Tatsache, dass bei niedriger N-Düngung (N-Bedarfswert 100 kg N/ha) ein geringeres Mineraldüngeräquivalent gegeben war, lag insbesondere an den niedrigen Werten des Jahrs 2020. Diese waren durch eine sehr hohe N-Abfuhr bei mineralischer N-Düngung auf der entsprechenden N-Stufe bedingt und dadurch vermutlich etwas unterschätzt. Normalerweise ist bis zu einer N-Zufuhr von 120 kg N_{ges} /ha eine optimale N-Verwertung aus organischen Düngern zu erwarten [62]. Erhöhte Ammoniakverluste könnten die Ursache für die unzureichende N-Wirkung insbesondere in den Gärrestvarianten mit höchster N-Zufuhr (N-Bedarfswert 200 kg N/ha) sein. Diese sind bei einer oberflächlichen Ausbringung ohne Einarbeitung wie im vorliegenden Versuch grundsätzlich stark von der Witterung im Anschluss an die Ausbringung abhängig [125]. In Parzellenversuchen muss zusätzlich beachtet werden, dass Ammoniakverluste gegenüber Praxisschlägen erhöht sein können, da die windüberströmte gedüngte Fläche geringer und somit ein größerer Konzentrationsunterschied zwischen Bodenoberfläche und Atmosphäre gegeben ist [125].

Aussagen zum optimalen Niveau der N-Düngung von Durchwachsener Silphie sollten anhand der rein mineralisch gedüngten Varianten getroffen werden, da dort der Einfluss möglicher N-Verluste geringer ist. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die ausgebrachte N-Menge das potenziell pflanzenverfügbare N-Angebot aus der Düngung darstellt. Aktuell ist der Düngebedarf von Durchwachsener Silphie anhand der Methode für mehrjährigen Feldfutterbau zu berechnen (siehe 4.3.2). Für die Methode des mehrjährigen Feldfutterbaus muss kein N_{min} -Vorrat im Frühjahr berücksichtigt werden. Bei rein mineralischer Düngung entspricht der maximale N-Düngebedarf der Höhe der zu erwartenden N-Abfuhr, die sich wiederum anhand eines N-Gehalts von 1,0 kg N/dt TM über das Ertragsniveau berechnet (Abbildung 30).

Liegt der tatsächlich im Versuch erzielte Ertrag über dem erwarteten Ertrag bei entsprechender N-Düngung, bedeutet dies, dass die zugrunde liegende Beziehung von 1 kg N je Hektar Düngebedarf je dt Trockenmasse je Hektar Ertrag zu hoch angesetzt war. Der starke Anstieg der N-Abfuhr und somit der N-Gehalte ab einer N-Düngung von etwa 170 kg N/ha deutet darauf hin, dass das maximale jährliche Ertragspotenzial erreicht wurde.

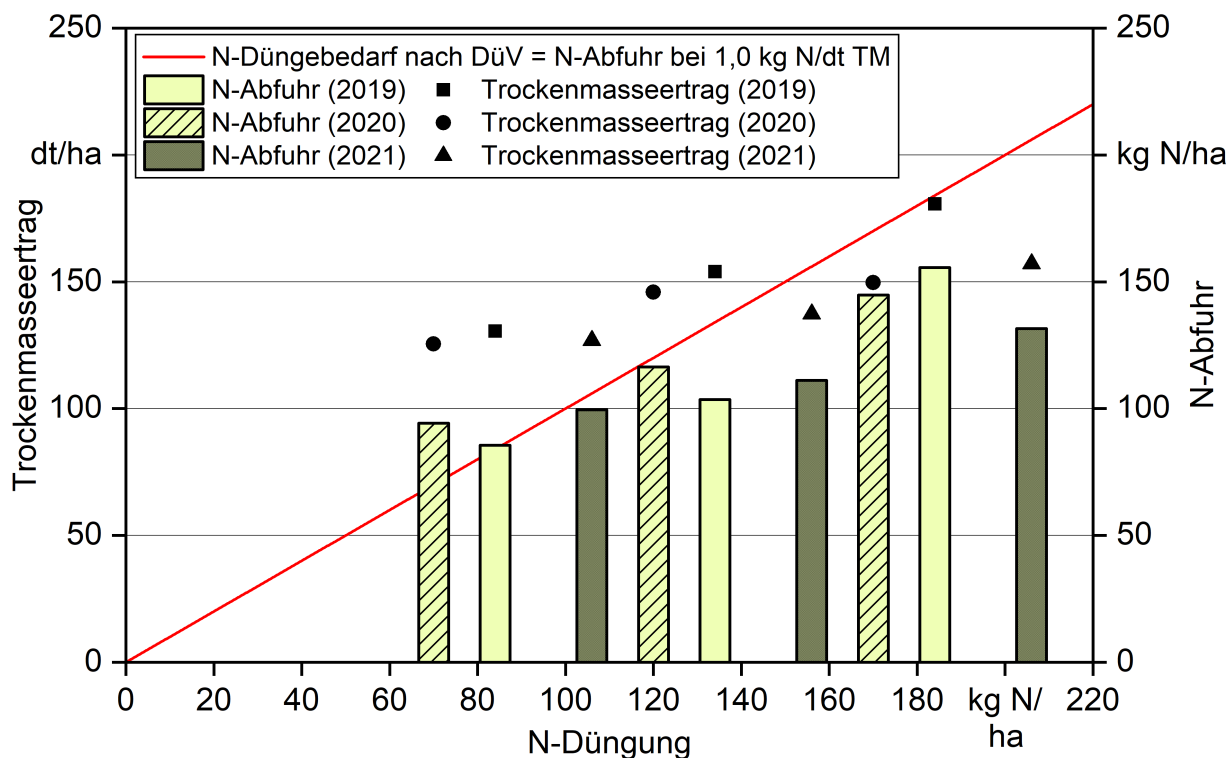


Abbildung 30: Trockenmasseerträge und N-Abfuhr von Durchwachsener Silphie bei rein mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit von der Höhe der N-Zufuhr im Vergleich zum N-Düngebedarf nach Düngerverordnung (DüV)

Wie die relativ niedrigen N-Gehalte der bisherigen Versuchsjahre aufzeigen und auch von BIERTÜMPFEL et al. (2018) [14] vorgeschlagen wird, liegt der N-Gehalt des Ernteguts von Durchwachsener Silphie insgesamt eher unter 1,0 kg N/dt TM, im Bereich von 0,9 kg N/dt TM. Bestätigt wird diese Tatsache auch durch die weiteren Ertragserhebungen bei Durchwachsener Silphie, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die N-Gehalte von Durchwachsener Silphie bei späterer Ernte abnehmen [100], wie auch die laufenden Probenahmen dieses Projekts gezeigt haben (siehe 5.1.7). Im Hinblick auf den Düngebedarf muss beachtet werden, dass wegen unvermeidbarer Verluste die jährliche N-Düngung zu Durchwachsener Silphie die jährliche Netto-N-Aufnahme aus dem Boden vermutlich etwas übersteigen sollte. Wie hoch diese tatsächlich ist, ist allerdings schwierig abzuschätzen, da ein Großteil der in die oberirdische Biomasse aufgenommenen Nährstoffe zur Abreife wieder in die Wurzeln als Reserven für das Folgejahr zurückverlagert wird. Vermutlich wird diese etwas oberhalb der Nährstoffabfuhr liegen. Da am Versuchsstandort zudem sehr gute Bodenverhältnisse mit einer guten Durchwurzelbarkeit gegeben waren, ist zugleich von einer optimalen Nährstoffverfügbarkeit auszugehen. Um an weniger günstigen Standorten den Pflanzen ebenfalls ausreichend Stickstoff für das Wachstum bereitstellen zu können, scheint ein gewisser Sicherheitspuffer durchaus sinnvoll. Andererseits müssen in Bayern aktuell bei der Düngebedarfsermittlung mehrjähriger Energiepflanzen keine N_{\min} -Werte berücksichtigt werden. Eine geringfügige Absenkung des N-Bedarfswerts würde vermutlich kaum zu Mindererträgen führen, ist im Hinblick auf eine mögliche Nitratauswaschungsgefahr aber nicht erfor-

derlich. Eine Absenkung des N-Bedarfswerts von 1,0 kg N/dt TM wird somit nicht für notwendig erachtet. Bei einer Gärrestdüngung sollte dabei der potenziell mögliche Düngebedarf ausgeschöpft werden und Maßnahmen für eine Erhöhung der N-Verwertung umgesetzt werden. Bei einer mineralischen N-Düngung sind dagegen durchaus Düngereinsparungen von bis 20 % möglich.

5.1.4 Stickstoffbilanz

Bei der Düngung mit Gärresten oder Mineraldünger wurden unterschiedlich hohe N-Mengen ausgebracht. Über die Variation des N-Bedarfswerts erfolgte zusätzlich eine Steigerung der N-Zufuhr innerhalb der jeweiligen Varianten. Im Rahmen der N-Bilanz wurden aus der N-Zufuhr durch Düngung und der N-Abfuhr über das Erntegut die N-Salden berechnet. Die Höhe gasförmiger N-Verluste und sonstiger Stickstoffverlustpfade bzw. Stickstoffeinträge war nicht bekannt. Entsprechende Positionen wurden deshalb nicht berücksichtigt. Die N-Salden im Mittel des gesamten Versuchszeitraums in Abhängigkeit des N-Bedarfswerts und der Düngerart sind nachfolgend in Abbildung 31 dargestellt. Es wurde nicht hinsichtlich des Zeitpunkts der Frühjahrsdüngung differenziert, da keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der N-Abfuhr bestanden.

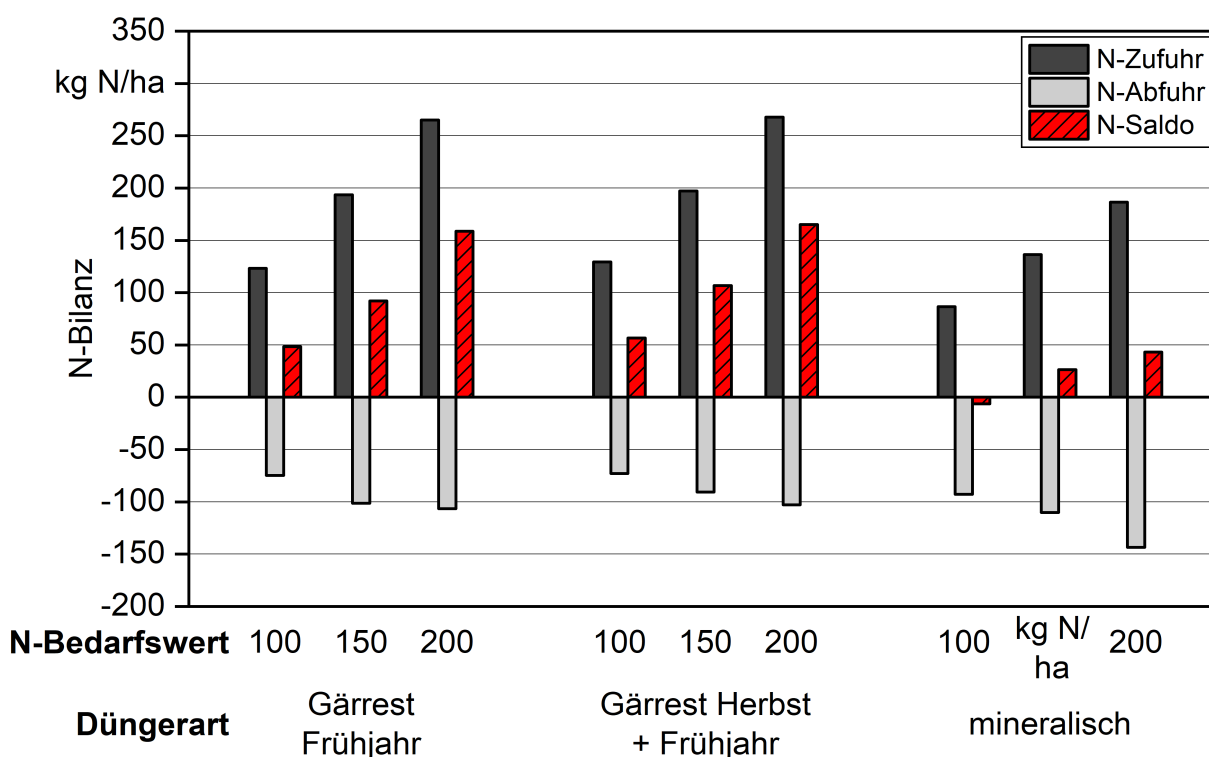


Abbildung 31: Stickstoffbilanz von Durchwachsener Silphie bei Düngung mit Gärresten (nur Frühjahr bzw. Herbst und Frühjahr) und rein mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit vom N-Bedarfswert (inkl. N_{min}); N-Verluste und sonstige N-Einträge wurden nicht berücksichtigt

Da in den Gärrestvarianten die Deckung des N-Düngebedarfs ausschließlich über Gärreste erfolgte und eine N-Düngewirkung etwa in Höhe des Ammoniumgehalts unterstellt wurde, war dort die gesamte N-Zufuhr ca. 40 % höher als bei rein mineralischer N-Düngung. Zugleich waren die N-Abfuhrer deutlich niedriger, so dass sich für die mit Gärresten gedüngten Varianten deutlich höhere N-Salden ergaben. Bei rein mineralischer N-Düngung bewegten sich diese im Bereich von -6 bis 43 kg N/ha und somit in einem optimalen Bereich, in dem die Gefahr für N-Verluste gering und gleichzeitig ein Erhalt der Bodenfruchtbarkeit zu erwarten ist. Die N-Salden nahmen mit einer Steigerung der N-Düngung relativ gleichmäßig zu. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die N-Zufuhr bis zu einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha auch von den Pflanzen verwertet wurde. GRUNWALD et al. (2020) [59] konnten bei einer N-Düngung von 170 kg N/ha eine ausgeglichene bis leicht negative N-Bilanz bei Durchwachsener Silphie beobachten, Silomais im Gegenzug wies jedoch eine niedrigere N-Bilanz auf. Im Gegensatz dazu waren bei den Gärrestvarianten auf der niedrigsten N-Stufe bereits N-Salden von 48 bis 57 kg N/ha gegeben. Damit wäre bei einem N-Bedarfswert von 100 kg N/ha noch eine ausreichende Verwertung einer Gärrestgabe gegeben gewesen. Aus den niedrigen Mineraldüngeräquivalenten auf dieser Stufe war dies eher nicht zu erkennen. Diese lagen allerdings vor allem wegen der hohen N-Abfuhr bei mineralischer N-Düngung auf einem niedrigen Niveau.

Die N-Salden stiegen in den mit Gärrest gedüngten Varianten mit zunehmender N-Zufuhr bis auf 159 kg N/ha bei Gärrestdüngung nur im Frühjahr und 165 kg N/ha bei zusätzlicher Herstdüngung an. Dies lässt vermuten, dass die über Gärreste zugeführte Menge an $\text{NH}_4\text{-N}$, die eigentlich pflanzenverfügbar sein müsste, nicht entsprechend in die oberirdische Biomasse aufgenommen werden konnte. Die Ausbringung eines Teils der Gärreste (ca. 50 kg N_{ges} /ha) im Herbst des Vorjahrs bewirkte einen Anstieg der N-Bilanzen von durchschnittlich 10 kg N/ha. Wie bereits mehrfach angesprochen zeigte die Herstdüngung eine etwas schlechtere N-Effizienz als eine Frühjahrsgabe mit Gärresten. Insgesamt nahm die N-Verwertung bei mineralischer, aber noch deutlicher bei organischer Düngung mit Gärresten mit zunehmender N-Zufuhr ab.

Ursache für die höheren N-Salden bei organischer Düngung ist, dass kurzfristig betrachtet nur ein Teil des gesamten enthaltenen Stickstoffs pflanzenverfügbar ist. Dieser Teil ist zudem stark verlustgefährdet. Die langfristige Nachlieferung aus der N-Mineralisation von N_{org} ist außerdem meist weniger effektiv von den Pflanzen nutzbar. Aus diesen Gründen war in den Gärrestvarianten eine höhere Zufuhr an Gesamtstickstoff erforderlich, um den Pflanzen identische Mengen verfügbaren Stickstoffs bereitzustellen. Erstaunlich ist, dass KÖHLER und BIERTÜMPFEL (2018) [79] eine bessere N-Verwertung bei Gärrestdüngung im Vergleich zu rein mineralischer Düngung und auch deutlich negative N-Bilanzen nachweisen konnten. Im vorliegenden Versuch wurde dagegen nicht einmal die unterstellte N-Wirkung der Gärreste erreicht und der über Mineraldünger zugeführte Stickstoff zeigte eine deutlich bessere N-Verwertung (siehe auch 5.1.3).

5.1.5 Untersuchung der Menge mineralischen Stickstoffs im Boden

Grundwasser ist für die Trinkwasserversorgung von entscheidender Bedeutung und stellt somit eine lebenswichtige Ressource dar. Da über die Wintermonate der Wassereintrag durch Niederschläge häufig die Verdunstung übersteigt, kommt es in der Regel in diesem Zeitraum zur Sickerwasserbildung. Im Wurzelraum vorhandener Nitratstickstoff kann auf diese Weise bis ins Grundwasser verlagert werden und die Trinkwasserqualität beeinträchtigen. Der Zusammenhang zwischen Nitratgehalt im Grundwasser und Nitratgehalt im Boden ist dabei sehr stark von Niederschlagsmengen abhängig.

5.1.5.1 Mineralischer Stickstoff im Boden zu Vegetationsbeginn

Die Untersuchung der zu Vegetationsbeginn im Boden vorhandenen N_{\min} -Menge wurde in den Versuchsjahren 2020 und 2021 parzellenscharf in allen Varianten mit einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha und einer einmaligen Frühjahrsdüngung durchgeführt. Hierbei wurde ein N_{\min} -Vorrat von durchschnittlich 24 kg N/ha ermittelt. Bei der variantenscharfen Beprobung (alle Varianten) im Frühjahr 2019 wurden Werte zwischen 13 und 20 kg N/ha nachgewiesen. In den Jahren 2020 und 2021 lag die N_{\min} -Menge zu Vegetationsbeginn im Vergleich mit den entsprechenden Varianten im Jahr 2019 um ca. 8 kg N/ha höher. Insgesamt kann folglich bei Durchwachsener Silphie selbst bei sehr hoher N-Düngung im Vorjahr von sehr niedrigen N_{\min} -Vorräten im Boden zu Vegetationsbeginn ausgegangen werden.

Für die Jahre 2020 und 2021 war auch eine varianzanalytische Auswertung über den gesamten Versuchszeitraum hinsichtlich des Einflusses der Art der N-Düngung auf die N_{\min} -Vorräte im Frühjahr möglich. Hierfür war eine Logarithmierung der Werte erforderlich. Signifikante Unterschiede zwischen den Düngevarianten waren jedoch nicht gegeben. Im Mittel waren bei Gärrestdüngung im Frühjahr 20 kg N/ha, bei Gärrestdüngung im Frühjahr und Herbst 30 kg N/ha sowie bei mineralischer N-Düngung im Frühjahr 22 kg N/ha mineralischer Stickstoff im Boden vorhanden. Tendenziell zeigte sich demzufolge eine höhere N_{\min} -Menge bei Gärrestdüngung im Herbst, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass durch die zusätzliche Zufuhr organischer Substanz eine erhöhte Mineralisation während der teilweise recht milden Wintermonate stattfand. Dies erscheint wahrscheinlich, da das Gesamtniveau der N_{\min} -Vorräte zu Vegetationsende (Jahre 2019 und 2020) im Vergleich dazu deutlich niedriger lag. Die Unterschiede zwischen den Gärrestvarianten mit und ohne Herstdüngung sind zwischen den Jahren allerdings gegensätzlich. Darüber hinaus lagen auch bei der Beprobung zu Vegetationsbeginn im Jahr 2019 die N_{\min} -Mengen der Gärrestvarianten mit und ohne Herstdüngung mit 17 bzw. 16 kg N/ha auf einem ähnlichen Niveau, so dass aus dem Gesamttrend nicht auf eine unvollständige Verwertung der Herstdüngung geschlossen werden kann. Bei rein mineralischer N-Düngung betrug die mittlere N_{\min} -Menge ebenfalls 16 kg N/ha. Des Weiteren befanden sich in allen Proben zu Vegetationsbeginn etwa zwei Drittel der N_{\min} -Menge in den oberen 30 cm Bodentiefe. Wegen der insgesamt eher unterdurchschnittlichen Winterniederschläge kam es vermutlich zu keiner nennenswerten Nitratverlagerung aus dem Beprobungsbereich heraus.

5.1.5.2 Mineralischer Stickstoff im Boden nach der Ernte

Einen möglichen Hinweis auf den Verbleib der nicht über das Erntegut abgeführten N-Menge bietet der im Boden nach der Ernte noch vorhandene mineralische Stickstoff (Abbildung 32). Dieser lag im Durchschnitt der Jahre 2019 bis 2021 im beprobten Tiefenbereich von 0 bis 90 cm im Mittel über alle Varianten mit höchster N-Zufuhr bei 18 kg N/ha ($n = 72$), wobei sich etwa 70 % davon in den oberen 30 cm des Beprobungsbereichs befanden. Mit zunehmender Beprobungstiefe nahm die N_{\min} -Menge im Boden dementsprechend deutlich ab.

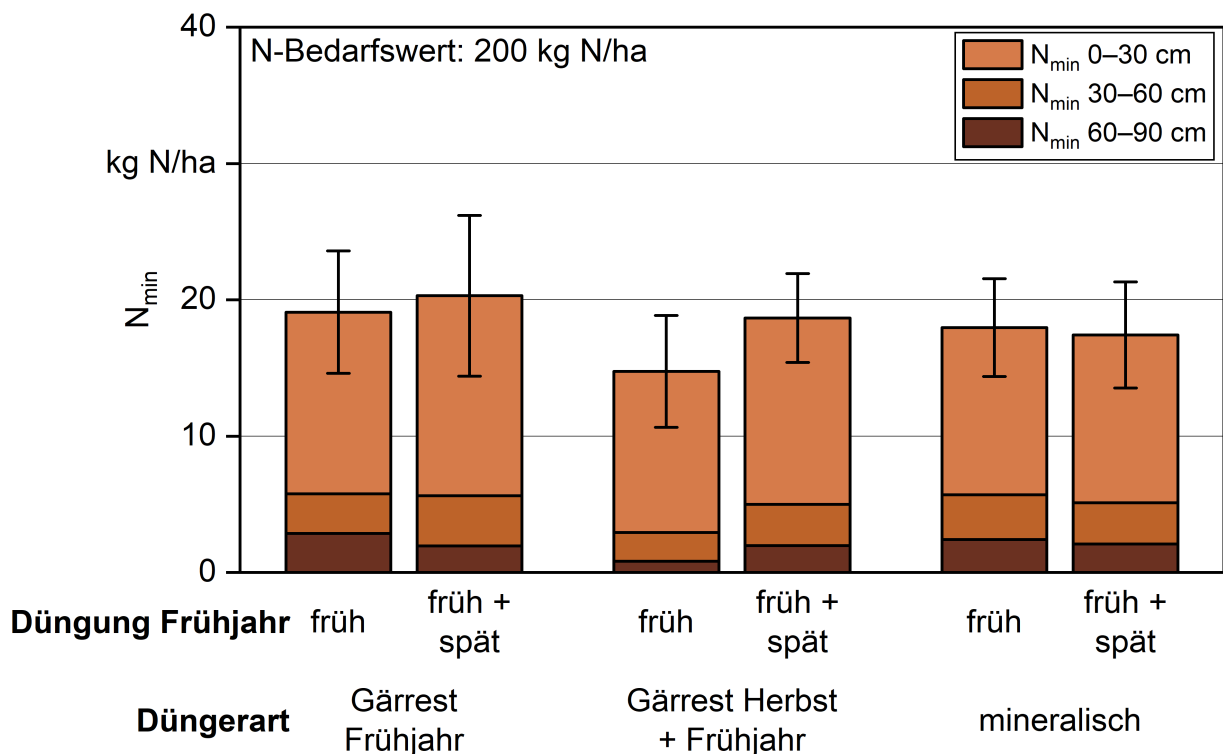


Abbildung 32: Menge mineralischen Stickstoffs (N_{\min}) im Boden nach der Ernte von Durchwachsener Silphie nach Düngung mit Gärresten (nur Frühjahr bzw. Herbst und Frühjahr) oder rein mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung in den Varianten mit einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Insgesamt waren somit sehr niedrige Rest- N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte vorhanden, obwohl auf dieser N-Stufe die N-Zufuhr die N-Abfuhr auch bei mineralischer N-Düngung deutlich überstieg. Für die Varianten mit geringerer N-Zufuhr erfolgte in den Jahren 2020 und 2021 keine Beprobung. Im Jahr 2019 war der Einfluss einer unterschiedlich hohen N-Zufuhr durch tendenziell höhere N_{\min} -Mengen nach der Ernte erkennbar. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass die N_{\min} -Mengen nach der Ernte in den entsprechenden Varianten auch in den Jahren 2020 und 2021 unter dem Niveau der Varianten mit maximaler N-Düngung lagen. Mit weniger als 20 kg N/ha bewegten sich die N_{\min} -

Mengen im Boden nach der Ernte im Projektzeitraum auf einem sehr niedrigen Niveau. Derart niedrige N_{\min} -Reste im Boden nach der Ernte können als typisch für die Dauerkultur Durchwachsene Silphie angesehen werden, da diese auch in zahlreichen anderen Untersuchungen beobachtet wurden [13] [69] [50] [79]. Im Gegensatz zum vorliegenden Versuch waren in einigen Studien zusätzlich auch stark negative N-Bilanzen gegeben [13] [79] (siehe 5.1.4). Dennoch wurde auch im hier behandelten Versuch der im Boden vorhandene pflanzenverfügbare Stickstoff unter Durchwachsener Silphie von der Düngung bis zur Ernte nahezu vollständig verbraucht. Aufgrund der eher knappen Niederschläge und des hohen Wasserspeichervermögens des Bodens ist von keiner Nitratauswaschung während der Vegetation auszugehen. Niedrige N_{\min} -Mengen nach der Ernte stellen einen der wesentlichen ökologischen Vorteile von Durchwachsener Silphie dar, da dadurch die Gefahr für Nitratausträge ins Grundwasser und die Gefahr für Lachgasverluste während der Wintermonate reduziert sind [61]. Höhere Rest- N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte sind dagegen eher die Ausnahme, können aber standort- und witterungsbedingt auftreten [133].

Für die varianzanalytische Auswertung war eine Wurzeltransformation der Daten erforderlich, für die Varianz-Kovarianz-Struktur wurde der Typ „Compound-Symmetrie (cs)“ gewählt. Weder die Art der N-Düngung noch die Aufteilung der Düngung im Frühjahr hatten einen signifikanten Einfluss auf die gesamte N_{\min} -Menge im Boden nach der Ernte. Eine Gärrestdüngung zeigte trotz geringerer Erträge gegenüber einer mineralischen N-Düngung keine erhöhten N_{\min} -Mengen nach der Ernte. Dies gilt auch für die Variante mit Herbstdüngung, die tendenziell sogar die niedrigsten N_{\min} -Mengen nach der Ernte aufwies. Der Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung hatte keinen Effekt auf den mineralischen Stickstoff im Boden. Tendenziell waren jedoch bei einer geteilten Frühjahrsdüngung minimal höhere Rest- N_{\min} -Mengen im Boden vorhanden.

Selbst wenn die unzureichende N-Wirkung in den mit Gärresten gedüngten Varianten auf erhöhte Ammoniakverluste zurückzuführen war, so bleibt immer noch die Frage, warum die zugeführte N-Menge trotz der relativ niedrigen N-Abfuhr in beiden Versuchsjahren auch in den mineralisch gedüngten Varianten keinen eindeutigen Einfluss auf die Höhe des N_{\min} -Rests nach der Ernte zeigte. Auch STOLZENBURG et al. (2016) [133] konnten bei hohen N-Düngergaben relativ niedrige N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte von Durchwachsener Silphie feststellen. Die N_{\min} -Mengen zeigten dabei ebenfalls keinen eindeutigen Zusammenhang zur ausgebrachten N-Menge. Wie die Untersuchungen zum Wachstumsverlauf von Durchwachsener Silphie insbesondere im Jahr 2020 ergaben, kann die oberirdische Biomasse zum Beginn der Blüte durchaus eine höhere N-Aufnahme als zur Ernte aufweisen. Ein Teil der zum Aufbau des Blattapparats und der Stängelmasse verwendeten Nährstoffe wurden zur Abreife wieder in Wurzelbereiche zurückverlagert. Die Nährstoffrückverlagerung in die Wurzeln war vermutlich die Hauptursache für die geringe N-Abfuhr. Zu den niedrigen N_{\min} -Mengen könnte allerdings auch eine Stickstoffimmobilisation und/oder -verluste beigetragen haben. Wie bereits angesprochen spielt der Verlustfaktor sicherlich in den Gärrestvarianten eine größere Rolle. Laut SCHOO et al. (2017) [119] muss außerdem ein Großteil des Wurzelsystems von Durchwachsener Silphie jährlich regeneriert werden. Abgestorbene Wurzeln werden zudem vermutlich nur langsam im Bo-

den umgesetzt. Die Wurzelrockenmasse von Durchwachsener Silphie beträgt in etwa 8 t TM/ha, wovon jährlich etwa 60 % erneuert werden müssen [27]. Bei einem N-Gehalt der Wurzelmasse entsprechend den Untersuchungsergebnissen im Rahmen dieses Projekts ist auch dadurch jährlich ein nicht zu vernachlässigender N-Bedarf gegeben.

Eine Verlagerung in tiefere Bodenbereiche unterhalb des beprobten Bereichs ist dagegen auszuschließen, da der im Boden nach der Ernte vorhandene mineralische Stickstoff im Mittel über beide Jahre zu über 70 % in 0 bis 30 cm Bodentiefe vorlag. In Bezug auf die N-Bilanzüberschüsse kommt bei den Gärrestvarianten hinzu, dass etwa die Hälfte des über Gärreste zugeführten Stickstoffs in organischer Bindung vorlag. Davon wurde sicherlich ein Großteil auch zur Ernte der Durchwachsenen Silphie noch nicht mineralisiert, so dass der kurzfristige Beitrag dieser Stickstofffraktion zum N_{\min} -Pool eher gering ist. Langfristig trägt dieser organisch gebundene Stickstoff jedoch zur Vergrößerung des Stickstoffvorrats des Bodens bei und wird bei weiterem Um- und Abbau der organischen Substanz mineralisiert. Somit verbleibt vermutlich die Wurzelbiomasse von Durchwachsener Silphie als bedeutendste Senke für einen Teil des Düngestickstoffs.

5.1.5.3 Mineralischer Stickstoff im Boden zu Vegetationsende

Bei Durchwachsener Silphie wird davon ausgegangen, dass durch den Wiederaustrieb nach der Ernte eine weitere N-Aufnahme verbunden mit einer temporären Stickstoffspeicherung und eventuell auch weitere Absenkung des N_{\min} -Gehalts im Boden vor Winter erfolgen kann. GRUNWALD et al. (2020) [61] konnten beispielsweise eine N-Aufnahme im Wiederaustrieb von Durchwachsener Silphie nach der Ernte bis November von ca. 22 kg N/ha feststellen. Aus diesem Grund werden bisher auch eine ausreichende Verwertung und eine geringe Umweltbelastung bei einer Herbstdüngung erwartet. Um dies zu überprüfen, wurde in den Versuchsjahren 2019 und 2020 Ende November erneut eine N_{\min} -Beprobung für die Bestimmung des N_{\min} -Vorrats im Boden zu Vegetationsende durchgeführt. Die Probenahme wurde im Versuchsjahr 2019 auf die Parzellen beschränkt, die anhand eines N-Bedarfswerts von 200 kg N/ha und zu einem Termin im Frühjahr gedüngt worden waren. Im Jahr 2020 wurden alle Parzellen des Versuchs auf ihre N_{\min} -Menge im Boden zu Vegetationsende untersucht. Nach dem Entfernen eines extremen Ausreißers lagen die N_{\min} -Mengen im Boden in 0 bis 90 cm Tiefe zu Vegetationsende im Jahr 2019 im Mittel bei 14,6 kg N/ha. Im Jahr 2020 mussten ebenfalls drei Parzellen von der Auswertung ausgeschlossen werden, da diese im Vergleich zu den restlichen Wiederholungen in den beiden unteren Probenahmeschichten deutlich höhere N_{\min} -Mengen aufwiesen. In den im Vorjahr beprobten Varianten war im Jahr 2020 im Mittel eine N_{\min} -Menge von nur 9,2 kg N/ha vorhanden. Das Gesamtmittel aller Parzellen im Jahr 2020 belief sich auf 8,7 kg N/ha und lag damit auf einem sehr niedrigen Niveau. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass bei der Dauerkultur Durchwachsene Silphie nur sehr niedrige N_{\min} -Mengen im Boden zu Beginn der Vegetationsruhe vorliegen. Die Gefahr von Nitrateinträgen ins Grundwasser über die Wintermonate ist demzufolge deutlich reduziert [61]. Im Gegensatz zum ersten Projektjahr wurde im Jahr 2020 auch in den Varianten mit Herbstdüngung ein tendenzieller Rückgang der N_{\min} -Mengen im Boden im Vergleich zu den Werten der entsprechenden Parzellen nach der Ernte festgestellt. Eine Verlagerung unterhalb

der Beprobungstiefe ist dabei unwahrscheinlich, so dass vermutlich entweder eine Aufnahme durch die Silphiepflanzen oder eine Immobilisation zu dem Rückgang führte.

Bei einer gemeinsamen Auswertung der N_{\min} -Mengen im Boden zu Vegetationsende in den Jahren 2019 und 2020 konnte kein signifikanter Einfluss der Art der N-Düngung festgestellt werden (Abbildung 33). Hierzu war erneut eine Wurzeltransformation erforderlich. Tendenziell waren die geringsten N_{\min} -Mengen bei rein mineralischer N-Düngung vorzufinden, während eine Gärrestdüngung im Herbst und Frühjahr zu den höchsten Werten führte, gleichzeitig aber auch die größten Schwankungen aufwies. Auf eine unzureichende Verwertung der Herbstgabe kann deshalb aber nicht geschlossen werden, da gegenüber den N_{\min} -Mengen nach der Ernte in den entsprechenden Parzellen auch bei den Varianten mit Herbstdüngung eine Reduktion zu beobachten war.

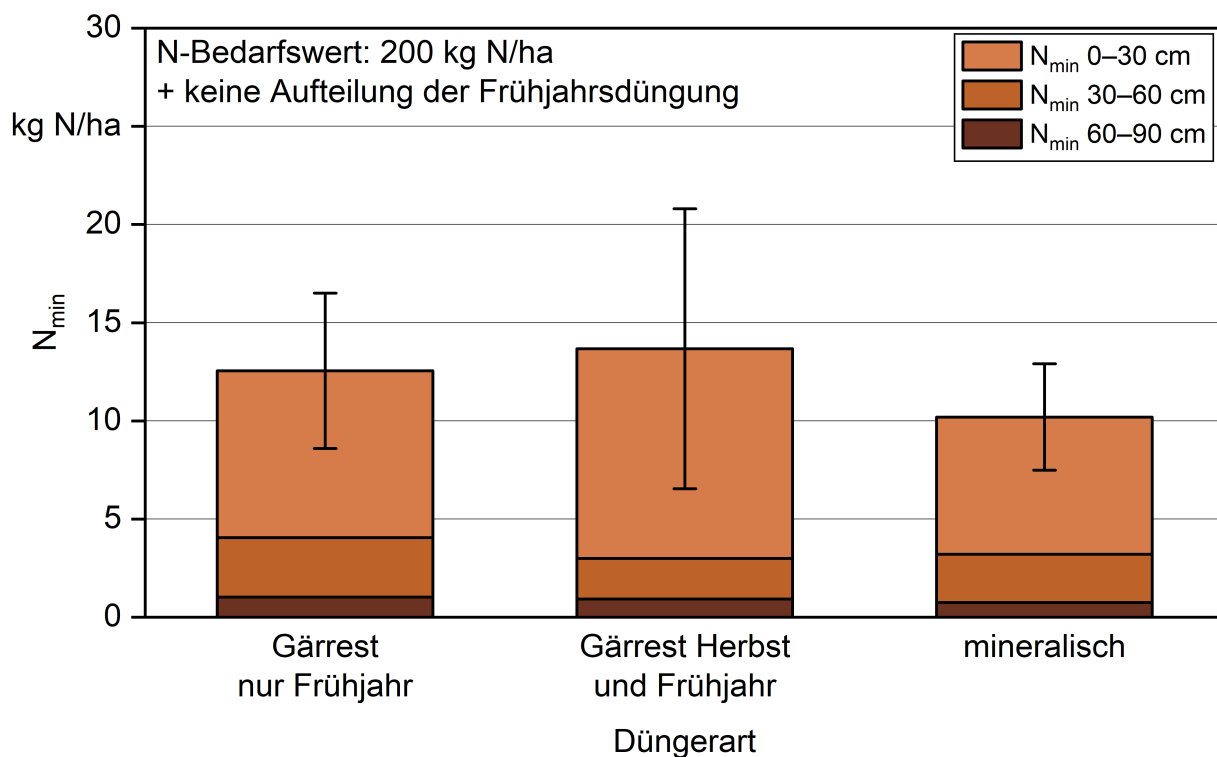


Abbildung 33: Mineralischer Stickstoff im Boden zu Vegetationsende bei Durchwachsender Silphie in Abhängigkeit von der Düngerart bei einem N-Bedarfswert (inkl. N_{\min}) von 200 kg N/ha und einer einmaligen Frühjahrsdüngung; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Bei der Herbstdüngung mit Gärresten war eine wesentliche Verringerung des Eintrags mineralischen Stickstoffs in den Boden als Folge von Ammoniakverlusten auszuschließen, da zu den Düngeterminen günstige Witterungsbedingungen mit teilweise rasch auf die Ausbringung folgenden Niederschlägen vorlagen (siehe auch 4.3.4). Das im Falle der Herbstdüngung somit zusätzlich vorliegende mineralische N-Angebot von ca. 30 kg N/ha wurde demzufolge bis Vegetationsende größtenteils entweder durch Pflanzenaufnahme

oder Immobilisation verwertet. Der Großteil der Unterschiede zwischen den Varianten ohne und mit Herbstdüngung bestand in beiden Jahren in deutlich höheren Ammoniummengen im Oberboden bei ausgebrachter Herbstdüngung. Dies deutet darauf hin, dass entweder die Nitrifikation wegen niedriger Bodentemperaturen noch nicht vollständig abgeschlossen war oder seit der Ausbringung bereits Stickstoff aus der leicht umsetzbaren organischen Substanz des kürzlich ausgebrachten Gärrests mineralisiert wurde.

In Bezug auf den Wiederaustrieb der Silphiepflanzen nach der Ernte war optisch keine Wachstumsförderung durch eine Herbstdüngung zu erkennen. Der Wiederaustrieb war in allen Jahren innerhalb der Parzellen sehr ungleichmäßig und meist gering entwickelt, wobei die Triebe nur wenige und recht kleine Blätter aufwiesen. Eine vollständige Bodenbedeckung wurde in keinem Projektjahr erreicht. Trotz der geringen Menge seit der Ernte gebildeter oberirdischer Biomasse deuten die N_{\min} -Mengen zu Vegetationsende darauf hin, dass die Pflanzen offenbar in der Lage waren, die verfügbare N-Menge der Herbstdüngung größtenteils zu verwerten. Eine Einlagerung in das Wurzelsystem für den Wiederaustrieb im Folgejahr erscheint diesbezüglich am wahrscheinlichsten.

5.1.5.4 Mineralischer Stickstoff im Boden im Jahresverlauf

Die Menge mineralischen Stickstoffs im Boden wurde in allen Versuchsjahren zu den Terminen Ernte, Vegetationsende und -beginn durchgehend für die Varianten mit einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha und einmaliger Frühjahrsdüngung durchgeführt (Abbildung 34). Dabei zeigten sich bis jetzt kaum Unterschiede zwischen den Beprobungsterminen. Nur die N_{\min} -Mengen zu Vegetationsbeginn im Jahr 2020 waren etwas höher als bei den restlichen Beprobungen, aber insgesamt immer noch auf einem niedrigen Niveau. Des Weiteren nahm die N_{\min} -Menge von der Ernte bis Vegetationsende tendenziell leicht ab. Dies war besonders im Jahr 2020 relativ gleichmäßig über die betrachteten Varianten zu beobachten. Insgesamt waren in den mit Gärresten gedüngten Varianten tendenziell geringfügig höhere N_{\min} -Mengen vorzufinden. Signifikante Unterschiede waren allerdings an keinem Termin nachzuweisen. Wegen des fast durchgehend sehr niedrigen Niveaus der N_{\min} -Mengen ist außerdem eine Auswaschung größerer N-Mengen während des Anbaus von Durchwachsener Silphie auch bei zusätzlicher Herbstdüngung mit Gärresten unwahrscheinlich.

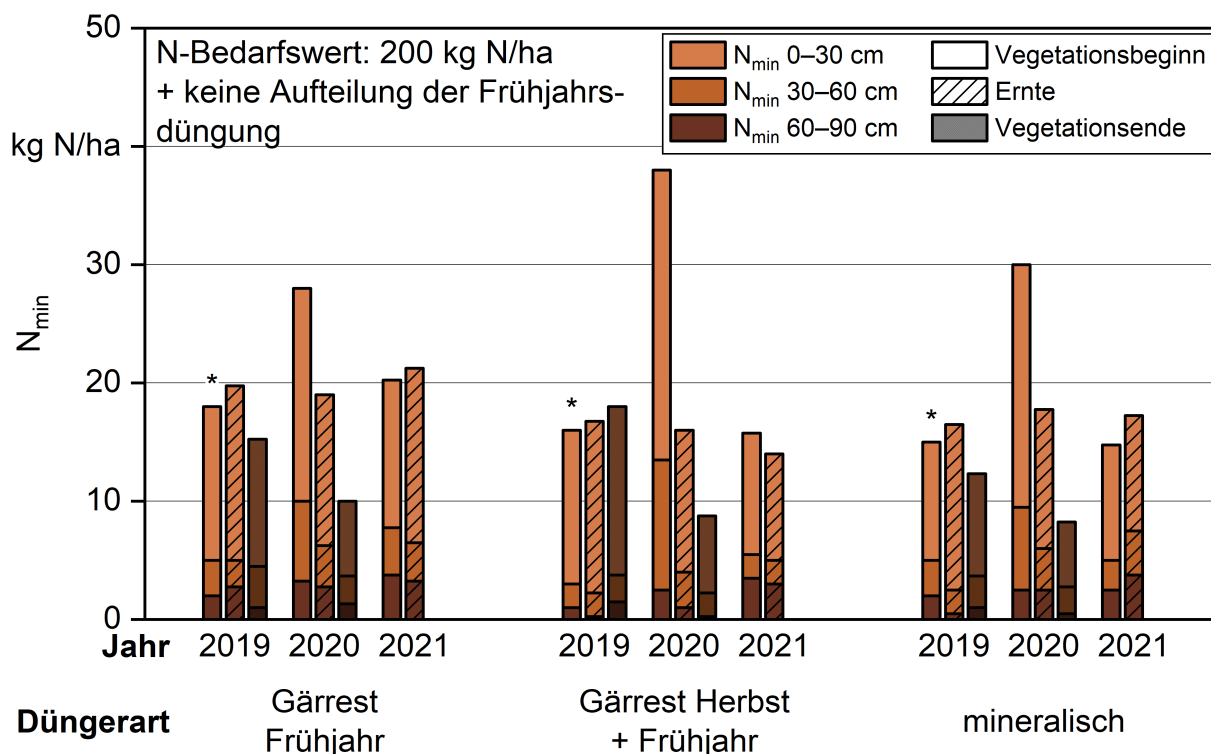


Abbildung 34: Mineralischer Stickstoff (N_{min}) im Boden nach Düngung mit Gärresten (nur Frühjahr bzw. Herbst und Frühjahr) oder rein mineralischer N-Düngung in den Varianten mit einmaliger Frühjahrsdüngung und einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha (je Tiefe: $n = 4$; *: variantenscharf $n = 1$)

5.1.6 Drohnengestützte Erfassung von Bestandsparametern

5.1.6.1 Spektralmessungen

Eine Rasterbefliegung der Versuchsfläche mit einer Drohne zur Aufnahme von Multispektralbildern wurde in den Versuchsjahren 2020 und 2021 an den in Tabelle 14 aufgelisteten Terminen und Entwicklungsstadien von Durchwachsener Silphie durchgeführt. Im Jahr 2019 zeigte sich bei ersten Messungen eine schlechte Korrelation des NDVI zum Ernteertrag bei fortgeschrittenen Entwicklungsstadien von Durchwachsener Silphie (nicht aufgeführt), so dass die Messungen in den Jahren 2020 und 2021 zu früheren Terminen vor Blühbeginn durchgeführt wurden. Sinnvoll bei derartigen Messungen wäre eine gleichzeitige Erfassung des jeweiligen Ertrags der oberirdischen Biomasse gewesen, um die Eignung des Messtermins für die Charakterisierung des aktuellen Biomasseaufwuchses untersuchen zu können. Da hierfür jedoch keine zusätzlichen Entnahmebereiche im ursprünglichen Versuchsaufbau vorgesehen waren, konnte nur der Zusammenhang der jeweiligen Indexwerte zum Trockenmasseertrag zur Ernte überprüft werden. Für die Regressionsanalyse wurden nur die korrekt beernteten Parzellen berücksichtigt. Darüber hinaus wurden für das Jahr 2019 die Parzellen mit Frässhäden von der Auswertung ausgeschlossen.

Tabelle 14: Korrelationskoeffizienten nach Pearson sowie Grad der polynomischen Beziehung des NDVI zum Trockenmasseertrag zur Ernte im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie

Zeitpunkt der Aufnahmen	Entwicklungsstadium (BBCH)	Beziehung zum Trockenmasseertrag (Ernte)	n	Bestimmtheitsmaß Regression	Korrelationskoeffizient
25.04.2019	30	linear	62	39,2 %	0,51
04.06.2019	35	quadratisch	62	68,3 %	0,63
28.04.2020	30–31	linear	61	34,5 %	0,46
13.05.2020	32	linear	61	40,9 %	0,54
26.05.2020	34	kubisch	61	69,8 %	0,74
26.06.2020	51	quadratisch	61	69,3 %	0,66
15.06.2021	35	quadratisch	70	47,4 %	0,57
13.07.2021	55	linear	70	34,8 %	0,43

Die Beziehung zwischen den Indexwerten und den Trockenmasseerträgen zur Ernte konnte entweder durch eine lineare, quadratische oder kubische Regression beschrieben werden. Die Bestimmtheitsmaße lagen im Bereich von 35 bis 70 %, wobei die Messungen zum Ende des Schossens den ausgeprägtesten Zusammenhang zum Ernteertrag aufwiesen (Abbildung 35).

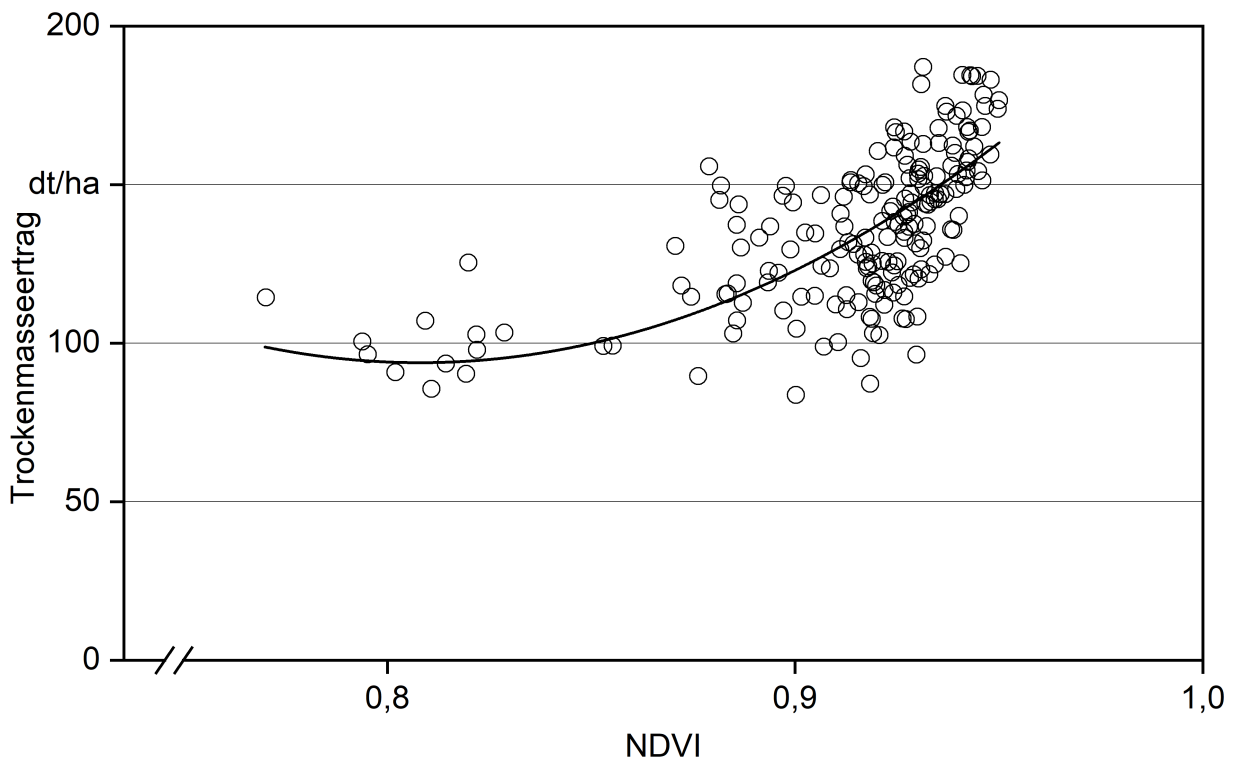


Abbildung 35: Quadratische Beziehung zwischen den NDVI-Mittelwerten zu BBCH 35 zum Ernteertrag; Pseudo R^2 der Regression: 41,7 %, $n = 193$

Zu Beginn des Schossens wie auch bei der letzten Messung im Jahr 2021, kurz vor der Blüte, war die Beziehung wie auch im ersten Projektjahr weniger deutlich ausgeprägt. Die Indexwerte waren zu allen aufgeführten Messterminen positiv mit den Ernteerträgen korreliert, so dass steigende NDVI-Werte höheren Erträgen entsprachen. Dagegen nahmen im Jahr 2019 die NDVI-Werte des Messtermins Anfang August bei steigenden Trockenmasseerträgen eher ab und lagen auch insgesamt auf einem niedrigeren Niveau. Es war allerdings zu diesem Termin keine eindeutige Beziehung zwischen den NDVI-Werten und den Erträgen vorhanden. Gleiches gilt auch für die Spektralmessung zu Blühbeginn im Jahr 2019. Dies deutet darauf hin, dass die gelbe Blütenfarbe oder die beginnende Abreife den Rotanteil im Reflexionsspektrum erhöhten und somit den Indexwert senkten und verfälschten. Durch die Anfang August blühenden Blütenstände der Nebentriebe war zu diesem Termin ein hoher Blütenanteil gegeben. Zum Messtermin Anfang Juli war der Anteil der geöffneten Blüten noch geringer. Somit konnten anhand der Befliegung vom 6. August 2019 trotz der Nähe zum Erntetermin keine Aussagen zum Ernteertrag getroffen werden, obwohl dieser mit einer Spannweite von 84 bis 218 dt TM/ha im Jahr 2019 eine große Variation zwischen den Versuchspartzellen zeigte. Insgesamt erscheinen somit nur Messtermine von Ende Mai bis Ende Juni während der Schossphase und des Erscheinens der ersten Blütenanlagen von Durchwachsener Silphie für Ertragsmessungen geeignet (Abbildung 36, Abbildung 37). Bei den sehr frühen Messterminen zu Beginn des Schossens war noch keine ausreichende Differenzierung im Wachstum vorhanden. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass in den Varianten mit geteilter Düngung ein Teil des N-Düngebedarfs erst Anfang Mai ausgebracht wurde, also erst nach oder kurz vor der Spektralmessung.

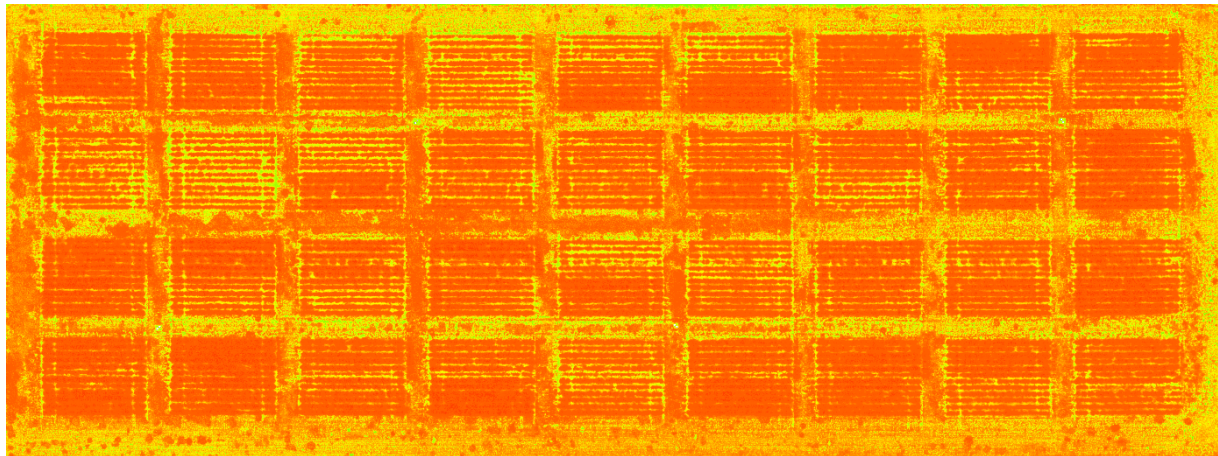


Abbildung 36: Durch Farbwerte visualisierte NDVI-Werte der Versuchsfeldfläche aus der Messung vom 26. Mai 2020; je dunkler die Färbung, desto höher die Werte



Abbildung 37: Silphiebestand der Versuchspartellen am 30. Juni 2020, BBCH 51–55

Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass der NDVI eine hohe Sensitivität vor allem bei einem geringen Niveau der Biomasseerträge und bei geringer Bodenbedeckung durch Pflanzen aufweist [46]. Bei hohen Pflanzendichten und dem Vorliegen eines hohen Blattflächenindex treten dagegen Sättigungseffekte ein. Dadurch ist der Einsatz dieses Index zur Charakterisierung von Pflanzenbeständen vorwiegend auf frühe Entwicklungsstadien beschränkt [4] [46]. Da bei Durchwachsener Silphie frühzeitig eine vollständige Bodenbedeckung erreicht wird und der Blattflächenindex während der Wachstumsphase bis Mitte Juni auf etwa 10 ansteigt [120], kann der Einsatz dieses Vegetationsindex zur Charakterisierung des Biomasseaufwuchses nur bei frühen Entwicklungsstadien sinnvoll sein. Dies steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Spektralmessungen dieses Projekts. Wegen der großen Reihenweite von 75 cm waren offenbar Ende Juni bei einer Wuchshöhe von bis zu 200 cm und kurz vor Reihenschluss der Varianten mit geringer N-Düngung noch gute Bedingungen für die Charakterisierung des Biomasseaufwuchses gegeben (Tabelle 14). Der Biomasseaufwuchs zeigte zu diesem Termin bereits deutliche Unterschiede zwischen den Varianten (Abbildung 19) und stand offenbar bereits in enger Beziehung zum Ernteertrag. Bei der Messung Mitte Juli im Jahr 2021 im Knospenstadium der Silphie (BBCH 55) traten allerdings vermutlich bereits Sättigungseffekte auf, da nur einzelne Blüten geöffnet waren.

Wegen der geringen Bodenbedeckung und Überlappung der Silphiepflanzen zu den frühen Messterminen Anfang Mai hätten eigentlich ideale Voraussetzungen für die Charakterisierung des Biomasseaufwuchses anhand der NDVI-Werte vorliegen müssen. Die im

Vergleich zu den anderen Terminen deutlich größeren Spannweiten der NDVI-Werte bestätigen dies und deuten darauf hin, dass zu diesen Aufnahmezeitpunkten noch keine Sättigungseffekte vorlagen. Bei den Messterminen Ende April in den Jahren 2019 und 2020 muss allerdings zusätzlich beachtet werden, dass zu diesem Zeitpunkt noch ein starker Einfluss der ersten Düngegabe gegeben war. Die varianzanalytische Auswertung ergab, dass zu diesem Zeitpunkt in den mit Gärrest gedüngten Varianten die NDVI-Werte signifikant höher als bei mineralischer N-Düngung waren (Tabelle 15). Die Varianten mit Herbstdüngung wiesen außerdem tendenziell höhere NDVI-Werte gegenüber den Gärrestvarianten mit ausschließlicher Frühjahrsdüngung auf.

Tabelle 15: NDVI-Werte gegen Ende des Schossens und im Knospenstadium von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit der Düngerart und des N-Bedarfswerts; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach nicht parametrischem Friedman-Test

Versuchsfaktor	NDVI BBCH 30 n = 134	NDVI BBCH 34–35 n = 206	NDVI BBCH 51–55 n = 144
Düngerart			
Gärrest nur Frühjahr	0,500 b	0,915	0,940 ab
Gärrest Herbst und Frühjahr	0,525 b	0,912	0,938 a
mineralisch	0,455 a	0,914	0,942 b
Aufteilung Frühjahrsdüngung			
früh	0,500	0,913	0,940
früh + spät	0,486	0,915	0,941
N-Bedarfswert			
100 kg N/ha	0,446	0,892 a	0,935 a
150 kg N/ha	0,496	0,920 b	0,943 b
200 kg N/ha	0,537	0,929 c	0,943 b

Unter der Voraussetzung, dass höhere NDVI-Werte auf eine höhere oberirdische Biomasse hindeuten, war bei Gärrestdüngung die Pflanzenentwicklung in den ersten drei Wochen nach der ersten Düngung offenbar besser als bei mineralischer Düngung. Ursache hierfür könnte sein, dass seit der Düngung Ende März bzw. Anfang April in allen Versuchsjahren kaum Niederschläge fielen, so dass der Mineraldünger erst verspätet und eventuell noch nicht vollständig gelöst wurde. Die Gärreste infiltrierten dagegen bereits nach der Ausbringung in den Boden und führten somit zumindest frühzeitig zu einem höheren N-Angebot und einer Wachstumsförderung im Vergleich mit den mineralisch gedüngten Varianten. Erstaunlicherweise hatte die Höhe des Bedarfswerts einen deutlich größeren Einfluss auf den Indexwert als die Höhe der über die erste Gabe zugeführten N-Menge. Dies

deutet darauf hin, dass bis zum damaligen Zeitpunkt vor allem Stickstoff aus den Nährstoffreserven des Vorjahrs für die Biomassebildung verwendet wurde und weniger der aktuell ausgebrachte Stickstoff. Dies würde darüber hinaus das anfänglich bessere Wachstum der Varianten mit Herbstdüngung erklären, da dies auf die zusätzliche N-Aufnahme im Herbst zurückzuführen sein könnte. Zur Ernte zeigten die mit Gärrest gedüngten Varianten hingegen eher niedrigere Erträge, so dass dadurch die schlechte Korrelation zwischen den NDVI-Werten des Messtermins Ende April und den Ernteerträgen erklärt wird. Aufgrund des frühzeitigen Messtermins und der geringen Wuchshöhe wäre die Beziehung zur aktuell zum Messzeitpunkt vorhandenen oberirdischen Biomasse vermutlich deutlich besser gewesen.

Im Hinblick auf die NDVI-Werte der Spektralmessungen, die zu BBCH 35–55 durchgeführt wurden, waren keine Voraussetzungen für die Auswertung über eine Varianzanalyse gegeben. Der Einfluss der Versuchsfaktoren wurde deshalb über ein nicht parametrisches Verfahren ausgewertet (Friedman-Test). Hierbei zeigte bei den Messungen sowohl zum Ende des Schossens als auch im Knospenstadium der N-Bedarfswert einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der NDVI-Werte. In BBCH 35 waren signifikante Unterschiede zwischen allen drei Faktorstufen vorhanden, während bei der späteren Messung zwischen den Varianten mit einem N-Bedarf von 150 und 200 kg N/ha keine Unterschiede mehr gegeben waren. Diese Differenzierung war auch für den Ernteertrag festzustellen, so dass die Unterschiede in der Biomassebildung zwischen den entsprechenden Dünge­stufen offenbar gegen Ende Juni bis Mitte Juli zurückgingen. Zum Messtermin Ende Mai hatten sich auch die zu Schossbeginn noch vorliegenden Unterschiede zwischen den Düngerarten ausgeglichen, da der Mineraldünger durch Niederschläge von den Pflanzen aufgenommen werden konnte. Vor der Blüte wiesen die mineralisch gedüngten Varianten dann bereits signifikant höhere Indexwerte gegenüber den Gärrestvarianten auf. Das durch Ausbringungsverluste bei Gärrestdüngung verringerte Gesamtangebot an Stickstoff machte sich offenbar zu diesem Zeitpunkt bemerkbar.

Um zu überprüfen, ob andere Vegetationsindizes besser für die Charakterisierung des Biomasseaufwuchses von Durchwachsener Silphie geeignet sind, wurden auch die Beziehung zwischen dem Ernteertrag und folgenden Vegetationsindizes untersucht: SAVI, NDRE, LCI, IR/R, IR/G, G/R. Die Korrelationen der Indexwerte der vier Messtermine zum Trockenmasseertrag zur Ernte sind im Anhang in Tabelle 40 aufgelistet. Korrelationen über dem Niveau des NDVI über alle Messtermine wiesen vor allem der SAVI und LCI auf (Tabelle 16).

Tabelle 16: Korrelationskoeffizienten nach Pearson sowie Grad der polynomischen Beziehung des LCI und SAVI zum Trockenmasseertrag zur Ernte im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie

Index	Zeitpunkt der Aufnahmen	Entwicklungsstadium (BBCH)	Beziehung zum Trockenmasseertrag (Ernte)	Bestimmtheitsmaß Regression	Korrelationskoeffizient
LCI	25.04.2019	30	quadratisch	35,8 %	0,51
	04.06.2019	35	quadratisch	83,3 %	0,83
	28.04.2020	30–31	linear	34,2 %	0,45
	13.05.2020	32	linear	42,8 %	0,53
	26.05.2020	34	linear	75,3 %	0,81
	26.06.2020	51	linear	71,5 %	0,78
	15.06.2021	35	linear	55,1 %	0,70
	13.07.2021	55	linear	57,8 %	0,70
SAVI	25.04.2019	30	quadratisch	41,9 %	0,54
	04.06.2019	35	linear	63,3 %	0,73
	28.04.2020	30–31	linear	35,4 %	0,46
	13.05.2020	32	kubisch	50,8 %	0,58
	26.05.2020	34	linear	67,7 %	0,74
	26.06.2020	51	kubisch	81,9 %	0,83
	15.06.2021	35	linear	52,2 %	0,64
	13.07.2021	55	linear	41,0	0,55

Zu BBCH 35 war zudem eine sehr gute Beziehung des LCI zum Ernteertrag vorhanden (Abbildung 38). Eine deutliche Verbesserung gegenüber dem NDVI war auch zu den Messterminen während des Knospenstadiums gegeben. Der LCI und der SAVI weisen offenbar bei hohem Biomasseaufwuchs nicht so schnell Sättigungseffekte auf wie der NDVI. Bei der varianzanalytischen Auswertung des LCI zu den Messungen in BBCH 51–55 wurden entsprechend dem NDVI signifikante Effekte der Düngerart ($p < 0,0001$) und des N-Bedarfswerts ($p = 0,0131$) festgestellt (Abbildung 39). Anhand der LCI-Werte wurde der Biomasseaufwuchs der Gärrestvariante mit Herbstdüngung jedoch signifikant niedriger als der der anderen beiden Varianten eingestuft. Dieser Unterschied blieb vermutlich bis zur Ernte bestehen und führte letztendlich zu signifikanten Ertragsunterschieden zwischen diesen Faktorstufen. Des Weiteren hatte auch der Zeitpunkt der Frühjahrsdüngung einen signifikanten Einfluss auf die LCI-Werte in BBCH 51–55 ($p = 0,0115$), wobei höhere Werte bei einer geteilten Frühjahrsdüngung zu diesem Messtermin einen höheren Biomasseaufwuchs vermuten lassen. Dies konnte so zum Erntetermin im Mittel der Versuchsjahre nicht mehr nachgewiesen werden. Es ist allerdings zu beachten, dass für die Berechnung der LCI-Werte wegen der teilweise fehlerhaften Messungen im Jahr 2019 nur die Jahre 2020 und 2021 berücksichtigt wurden.

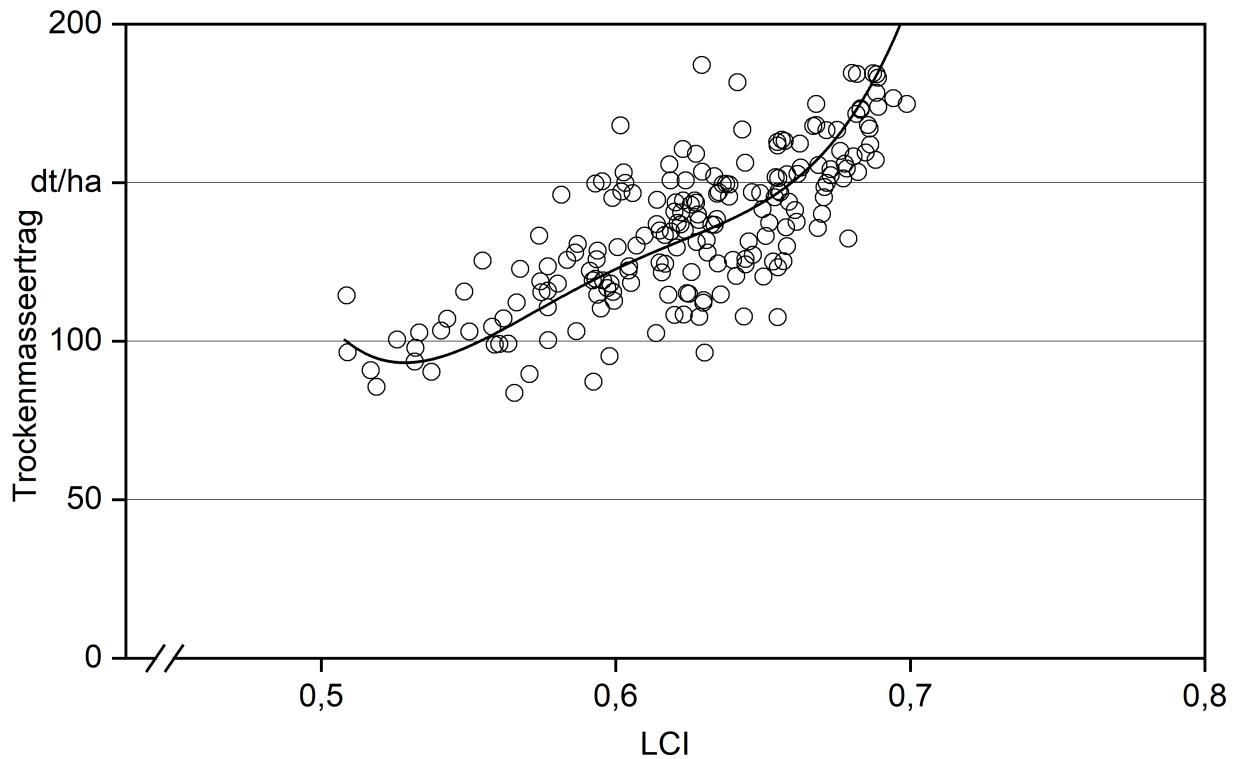


Abbildung 38: Polynomische Beziehung 4. Grades zwischen den LCI-Mittelwerten zu BBCH 35 zum Ernteertrag; Pseudo R^2 der Regression: 61,3 %, $n = 193$

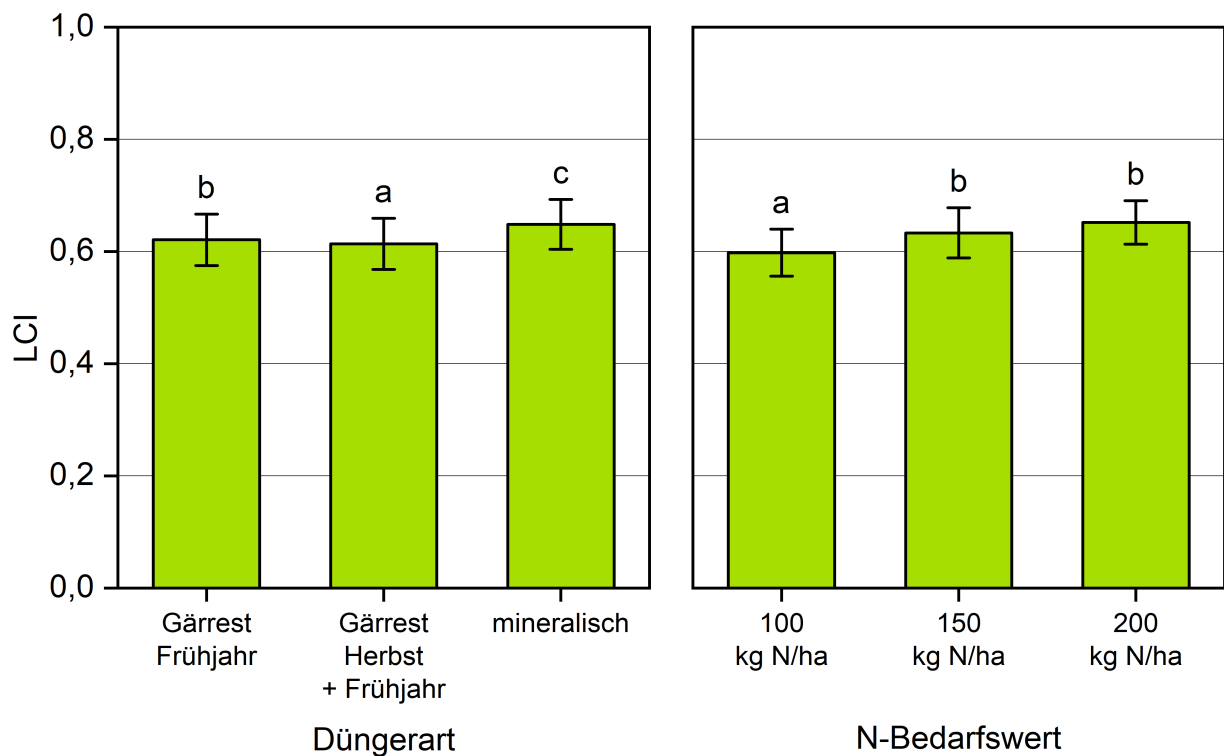


Abbildung 39: Vegetationsindex LCI zum Knospenstadium (BBCH 51–55) in Abhängigkeit von der Düngerart und der Höhe des N-Bedarfswerts (inkl. N_{min}); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Alle bisher aufgeführten Werte wurden aus den Mittelwerten der einzelnen Datenpunkte der erstellten Rasterkarte mit Indexwerten im Bereich der Erntefläche berechnet. Über eine Korrelationsanalyse wurde außerdem überprüft, ob nicht der Median der Indexwerte besser für die Charakterisierung des Biomasseaufwuchses geeignet wäre, da darauf Extremwerte keinen so großen Einfluss haben. Große Unterschiede zwischen diesen beiden statistischen Maßzahlen waren jedoch nicht festzustellen, so dass der Mittelwert als geeignet angesehen werden kann.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die aus den Spektralmessungen erzielbaren Erkenntnisse in Bezug auf die Versuchsfrage eingeschränkt sind. Dennoch konnten aufschlussreiche Beobachtungen im Hinblick auf die Wuchsleistung von Durchwachsener Silphie in Abhängigkeit von Art und Menge der N-Zufuhr gemacht werden. Zudem zeigte sich, dass bei Verwendung des NDVI als Vegetationsindex zur Charakterisierung des Biomasseaufwuchses von Durchwachsener Silphie aufgrund von Sättigungseffekten bei hoher Pflanzendichte und hohen Beständen frühzeitige Messtermine erforderlich sind. Wird davon ausgegangen, dass der NDVI die oberirdische Biomasse abbildet, so war zumindest bis zum Knospenstadium der Silphie ein Einfluss der unterschiedlichen N-Zufuhr erkennbar. Im Vergleich zum NDVI wiesen der LCI bzw. der SAVI eine stärkere und meist lineare Beziehung zum Ernteertrag auf. Da ein Messtermin Ende Mai bis Mitte Juni auch bei diesen Indizes die beste Beziehung zum Trockenmasseertrag zur Ernte lieferte, könnten die zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Messungen in die Erstellung einer Ertragskarte miteinfließen. Auf deren Basis könnte dann eine teilflächenspezifische Düngung realisiert werden.

5.1.6.2 Digitale Höhenmessungen

In den Versuchsjahren 2020 und 2021 wurden drohnengestützte Bildaufnahmen als Basis für eine digitale Höhenmessung verwendet. Leider konnte für das Versuchsjahr 2020 aus den Daten vom 2. Juli und zum Erntetermin kein korrektes Höhenmodell für die gesamte Versuchsfläche durch die Fotogrammetrie-Software berechnet werden. Da dies die beiden Termine waren, zu denen auch mit einer Messlatte manuelle Höhenmessungen der Versuchspartellen vorgenommen wurden, war ein direkter Vergleich beider Verfahren für das Jahr 2020 nicht möglich.

Bei den im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführten Bildaufnahmen mit der Drohne im Jahr 2021 waren dagegen umfangreiche Vergleiche zu zeitgleich durchgeführten händischen Messungen möglich. Zusätzlich wurden Drohnenaufnahmen in zwei unterschiedlichen Flughöhen erstellt. Zunächst wurde allerdings über den RSME die Genauigkeit der erstellten Oberflächenmodelle (DSM) anhand der auf der Versuchsfläche platzierten Höhenreferenzen überprüft. Hierbei wurden für die x-Koordinate im Mittel über alle vier Messtermine ein RSME von 1,0 cm, für die y-Koordinate von 1,2 cm und für die z-Koordinate von 5,5 cm berechnet. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Flughöhen zeigte sich tendenziell eine höhere Genauigkeit bei 35 m Flughöhe. Im Vergleich zu anderen Studien lagen diese Abweichungen bis auf den letzten Messtermin Anfang August auf einem ähnlichen Niveau im Bereich von 0,63 bis 3,09 cm [68] [17]. Bei der Messung Anfang August

wurden für die z-Koordinate deutlich höhere RSME von 9,8 bzw. 9,9 bei 25 bzw. 35 m Flughöhe festgestellt. Ursache hierfür könnte der deutlich stärkere Wind während dieses Messtermins im Vergleich zu den anderen Terminen gewesen sein. Die Verwendung des daraus erstellten Höhenmodells ist für die Ableitung von Pflanzenhöhen somit nur bedingt geeignet, während die ersten drei Messtermine auch bezüglich der z-Koordinate eine hohe Genauigkeit erreichten.

Das Problem bei der weiteren Auswertung der erhaltenen Wuchshöhenraster bis zur Ausgabe von Wuchshöhen der Pflanzen im Bereich der einzelnen Parzellen besteht darin, dass wegen der hohen Auflösung der errechneten Höhenmodelle in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanzen neben tieferliegenden Blättern auch einzelne Lücken zwischen den Pflanzen erfasst werden. Die Rasterwerte können somit stark innerhalb der Parzellen schwanken. Im Idealfall soll wie bei der händischen Messung immer der höchste Punkt einer Pflanze die Wuchshöhe darstellen. Während der Blüte von Silphie wären dies die Blütenstände der Nebentriebe.

Um zu klären, welche aus den einzelnen Höhenniveauwerten der Ernteparzellen berechnete statistische Größe eine manuelle Messung am besten repräsentiert, wurden im Jahr 2020 der Mittelwert, der Median und der Maximalwert der Höhenwerte einer Parzelle anhand der Korrelation zwischen den Messwerten der Drohnenmessung vom 23. Juli und der manuellen Messungen vom 7. August und 8. September verglichen. Hierbei wurde überprüft, ob Unterschiede zwischen den Wuchshöhen der Parzellen in gleicher Relation abgebildet wurden. Eine Bewertung der absoluten Genauigkeit der digitalen Höhenmessung war wegen des zu großen zeitlichen Abstands der vorhandenen digitalen und manuellen Messungen nicht möglich. Die Korrelationsanalyse ergab, dass für die Bewertung von relativen Unterschieden zwischen den Parzellen der Maximalwert mit einer Korrelation von 0,86 bzw. 0,81 am wenigsten geeignet war. Zwischen dem Median und dem Mittelwert waren kaum Unterschiede vorhanden. Beide erreichten Korrelationen von 0,92 bzw. 0,88 mit den manuellen Messungen vom 7. August bzw. 8. September und konnten somit zumindest die Unterschiede zwischen den Parzellen gut erfassen.

Bei den Höhenmessungen im Jahr 2021 lagen zeitgleich sowohl Messungen anhand der Drohnenaufnahmen als auch manuelle Messungen vor, so dass ein direkter Vergleich möglich war. Für die untersuchten Mittelwerte der drei Quantilbereiche (70–80 %, 80–90 % und 90–99 %) lag die Abweichung (RSME) der ersten drei Befliegungen bei 0,06–0,13 m bzw. 0,04–0,14 m bei 25 bzw. 35 m Flughöhe. Andere Studien erzielten ähnliche Abweichungen im Bereich von weniger als 0,2 m [68] [95]. Beim vierten Messtermin wurden jedoch mit einem RSME mit 0,16–0,29 m (25 m Flughöhe) bzw. 0,12–0,28 m (35 m Flughöhe) stärkere Abweichungen festgestellt. In Abhängigkeit von der Pflanzenentwicklung wiesen im Bereich BBCH 33–35 die Quantile 90–99 %, für BBCH 51 die Quantile 80–90 %, für BBCH 59–65 die Quantile 70–80 % und für BBCH 75 die Quantile 90–99 % die geringsten RMSEs auf. Insgesamt über alle Messtermine waren die Quantile 80–90 % und 90–99 % für die Bestimmung der Pflanzenhöhe am besten geeignet und erreichten im Mittel über alle Messtermine eine Abweichung von 0,12 (25 m Flughöhe) bzw. 0,10 m (35 m Flughöhe).

Auch in den im Jahr 2021 durchgeführten Messungen bestand deshalb meist eine sehr hohe Korrelation zwischen den händisch gemessenen und aus der Drohnenbefliegung generierten Höhenwerten. Bis auf die erste Befliegung bei einer Wuchshöhe von 25 m lag das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionen der ersten drei Messtermine über 90 %. In anderen Studien konnten Bestimmtheitsmaße auf ähnlich hohem Niveau nachgewiesen werden [95] [68]. Bei der ersten Messung mit 25 m Flughöhe wurde dagegen nur ein Bestimmtheitsmaß von 0,53–0,56 erreicht. Auch beim vierten Messtermin streuten die Wertepaare stärker und das Bestimmtheitsmaß bewegte sich im Bereich 0,78–0,80 (35 m Flughöhe) und 0,55–0,57 (25 m Flughöhe). Hierbei führte womöglich das stärkere Lager einzelner Parzellen zu einer schlechteren Abbildung der Unterschiede zwischen den Parzellen. Darüber hinaus schwankten die Pflanzen bei der Bildaufnahme wegen der Wuchshöhe und den etwas windigeren Bedingungen stärker als bei den vorherigen Aufnahmen. Dadurch könnten durch die Fotogrammetrie-Software nur wenige Verknüpfungspunkte zwischen den Bildern erkannt werden, was sich negativ auf die Modellgenauigkeit auswirkte (siehe oben).

Bei den digitalen Höhenmessungen vom 23. Juli 2020 und 20. Juli 2021, die jeweils zu Blühbeginn stattfanden, wurde ein signifikanter Wechselwirkungseffekt ($p = 0,0449$) zwischen Düngerart und N-Bedarfswert festgestellt (Abbildung 40). In Bezug auf die Düngerart waren dem Ernteertrag entsprechende Unterschiede in der Wuchshöhe zu beobachten. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass bei Gärrestdüngung jede Steigerung der Düngermenge zu signifikant gesteigerten Wuchshöhen führte. Bei mineralischer N-Düngung dagegen nahm die Wuchshöhe bei einer Erhöhung des N-Bedarfswerts von 150 auf 200 kg N/ha nur noch minimal zu, lag jedoch insgesamt auf einem höheren Niveau. Dies deutet darauf hin, dass dort die gleiche Düngewirkung bereits bei geringerer N-Zufuhr erreicht wurde und auf der höchsten N-Stufe bereits gewisse Sättigungseffekte auftraten.

Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Verwendung einer Drohne zur digitalen Höhenmessung im Feldversuchswesen brauchbare Ergebnisse liefert. Insbesondere bei deutlich unterschiedlich hohen Einzelpflanzen in einer Parzelle, wie dies bei Durchwachsener Silphie in der Regel der Fall ist, ist eine manuelle Messung eventuell fehlerbehaftet, da nur eine eingeschränkte Anzahl an Trieben je Parzelle gemessen werden kann. Durch die digitale Messung wird hingegen die gesamte Parzelle erfasst, so dass bei einem gleichzeitig geringeren Zeitaufwand vermutlich sogar exaktere Messwerte als bei einer händischen Messung erhalten werden.

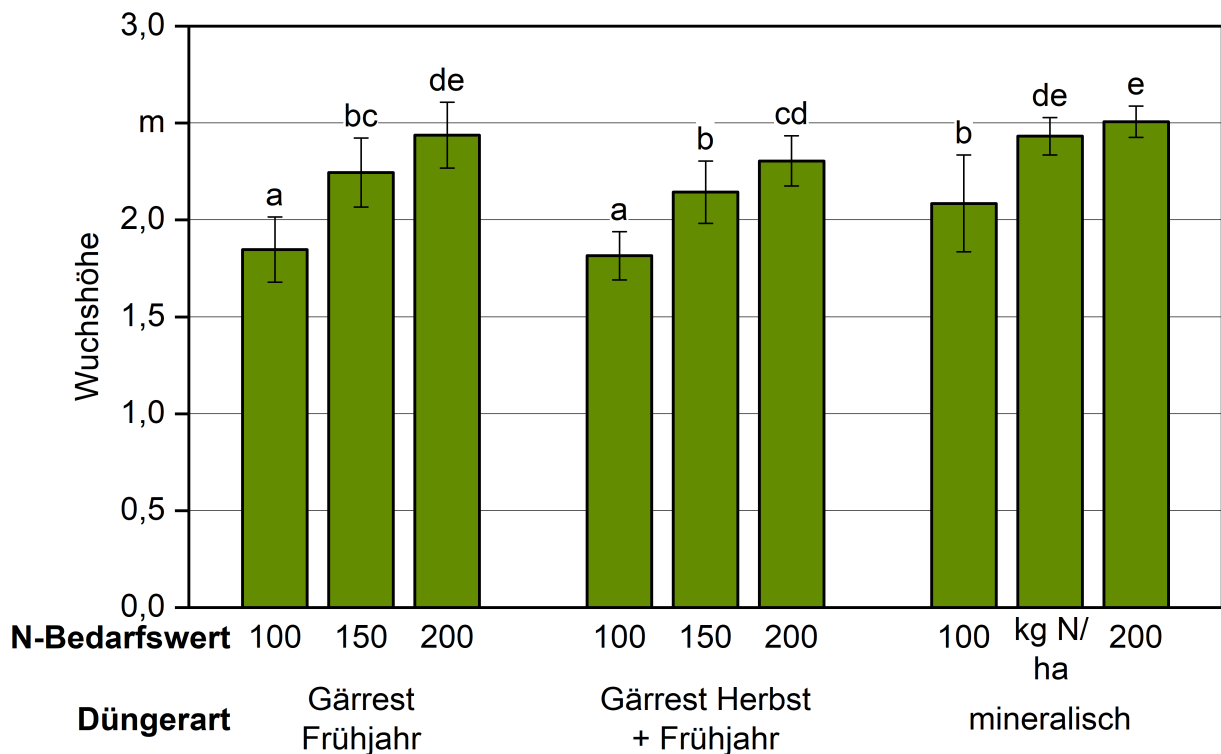


Abbildung 40: Einfluss der Düngerart und des N-Bedarfswerts (inkl. N_{min}) auf die Wuchshöhe von Durchwachsener Silphie bestimmt über Drohnenaufnahmen vom 23. Juli 2020 und 20. Juli 2021 (BBCH 65); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Die Herausforderungen bestehen darin, dass für optimale Ergebnisse je nach Entwicklungsstadium unterschiedliche Bereiche der Pixelwerte ausgewählt werden müssen. Außerdem müssen die Einstellungen der Flugparameter der Drohne beachtet werden. Bezüglich der Flughöhe zeigte sich bisher, dass eine Befliegung auf 35 m Höhe Höhenwerte lieferte, die eine geringere Abweichung von den manuellen Messwerten aufwiesen. Die bei dieser Höhe erhaltenen Höhenmodelle waren mit einer *Ground Sampling Distance* von 0,8 cm immer noch sehr hoch aufgelöst. Infolge des geringeren Speicher- und Rechenbedarfs ist somit eine Befliegung auf 35 m einer Flughöhe von 25 m zu bevorzugen. Weitere Herausforderungen beim Einsatz von Drohnen zur Messung der Pflanzenhöhe bestehen in der Abhängigkeit der Qualität der Oberflächenmodelle von den Witterungsbedingungen bei der Bilderfassung [144]. Insbesondere Wind und wechselnde Lichtverhältnisse können die Genauigkeit beeinträchtigen, da weniger Verknüpfungspunkte zwischen den Bildern gefunden werden. Somit ist es von Vorteil, wenn Höhenreferenzen oder ähnliche Kontrollpunkte für eine Überprüfung der Genauigkeit der Oberflächenmodelle vorhanden sind.

Aus der Pflanzenhöhe lassen sich letztendlich Informationen über den Biomasseaufwuchs ableiten. Eine Kombination mit weiteren Drohnen Daten, wie beispielsweise aus Multispektralaufnahmen erstellte Vegetationsindizes, könnte die Genauigkeit insbesondere bei lückigen Beständen verbessern. Für die landwirtschaftliche Praxis kann das Verfahren der drohnenbasierten Höhenmessung auf diese Weise zur Erstellung von Ertragskarten der

Silphieschläge eingesetzt werden. Für eine Ertragsschätzung wäre vermutlich eine Höhenmessung während der Vollblüte Anfang August am besten geeignet. Zu diesem Termin haben die Pflanzen ihre maximale Höhe erreicht und Lager tritt meist noch nicht auf. Für die Messung der Pflanzenhöhen scheint zu diesem Termin die Verwendung der Quantile 90–99 % des Wuchshöhenrasters nach bisherigen Ergebnissen am besten geeignet. Für einen erfolgreichen Transfer in die Praxis sollte außerdem die Genauigkeit dieses Verfahrens der Höhenmessung in hängigem Gelände überprüft werden. Darüber hinaus müsste in ähnlichen Versuchen überprüft werden, ob die bisher für ein bestimmtes Entwicklungsstadium optimalen Quantilbereiche konsistent sind oder zusätzlich durch andere Einflüsse, wie z. B. die Qualität der Bildaufnahmen, beeinflusst werden.

5.1.7 Bestimmung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie

Für die Untersuchung des Wachstumsverlaufs und der Stickstoffaufnahme von Durchwachsener Silphie wurden in allen drei Projektjahren von Anfang Mai zu Beginn des Schossens (BBCH 32, in 2021: BBCH 33–34) bis zur Ernte an acht Terminen Pflanzen- und Bodenproben entnommen. Die Probenahmen erfolgten bis auf die Ernte im Jahr 2019 in dreifacher Wiederholung. Die genauen Termine sind in Tabelle 26, Tabelle 27 und Tabelle 28 im Anhang aufgeführt. In Abbildung 41 ist der Verlauf der Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Wuchshöhen der drei Jahre zusammengefasst.

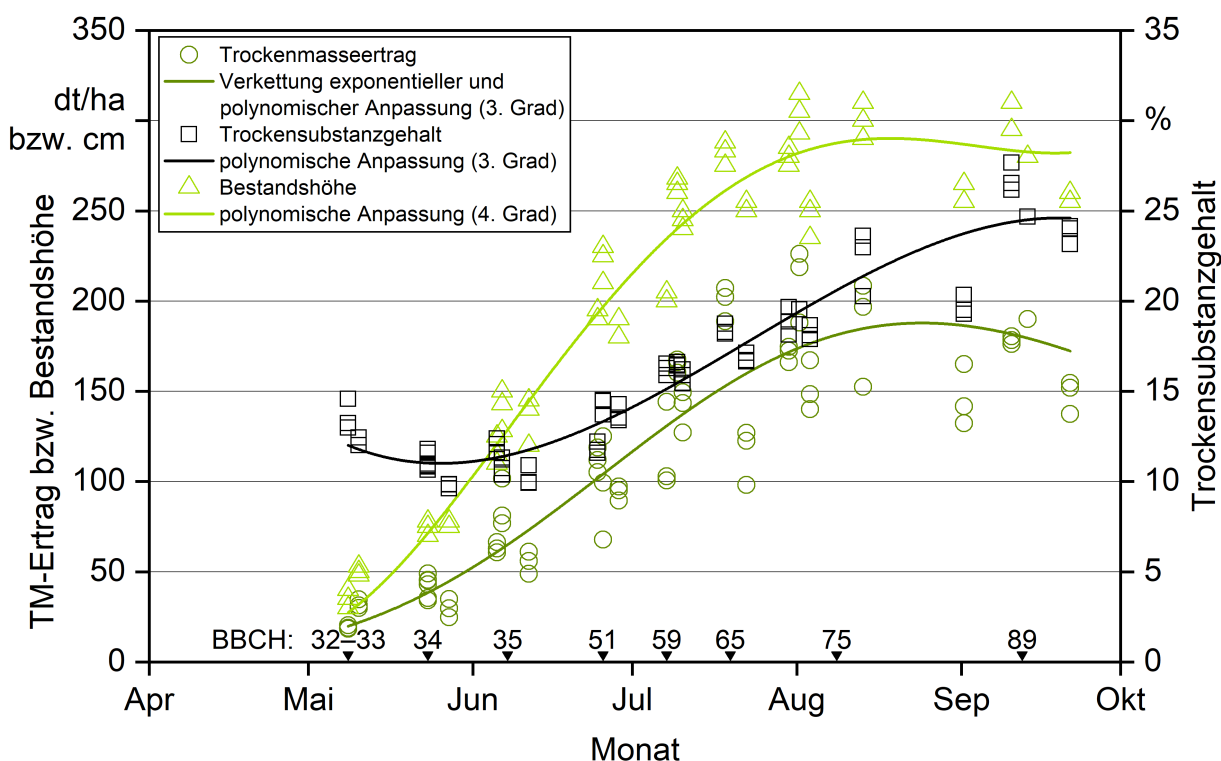


Abbildung 41: Verlauf des Trockenmasseertrags, der Bestandshöhe und des Trockensubstanzgehalts der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Pseudo- R^2 der Regressionen: Trockenmasseertrag $R^2 = 97,5 \%$, $n = 69$, Bestandshöhe $R^2 = 98,7 \%$, $n = 70$, Trockensubstanzgehalt $R^2 = 93,2 \%$, $n = 68$

In allen drei Versuchsjahren war der höchste Trockenmasseertrag (Mittelwert 183,0 dt/ha) bei der Probenahme Anfang August festzustellen. Zur Ernte wurde ein Ertrag von 167,0 dt TM/ha erreicht, der Trockensubstanzgehalt lag Anfang August mit etwa 20 % noch nicht im erntefähigen Bereich. In einer vergleichbaren Studie wurde ebenfalls ein Ertragsrückgang während der Abreife bei einer gleichzeitigen Zunahme der Trockensubstanzgehalte beobachtet [85]. Von Mitte August bis Anfang Oktober gingen die Erträge von 172 auf 130 dt TM/ha noch stärker zurück, das maximale Ertragsniveau war bis Anfang September vorhanden. Der beobachtete Ertragsrückgang ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei Durchwachsener Silphie durch die schnelle Zunahme des Blattflächenindex im Verlauf des Wachstums die unteren Blätter absterben. Der daraus resultierende Blattabfall während der Vegetation wird auf ca. 10 bis 20 t TM/ha geschätzt [120], so dass dadurch bereits der beobachtete Ertragsrückgang zu erklären wäre. In den Probenahmeparzellen waren Ende Juli meist die untersten drei bis vier Blattpaare abgestorben, jedoch noch nicht abgefallen. Bis zur Ernte stieg die Zahl auf ca. sechs abgestorbene Blattpaare an und die untersten waren bereits abgefallen. Extremer Trockenstress, der zu zusätzlichem Blattfall hätte führen können, war nicht zu beobachten. Ein weiterer Grund für den Rückgang der oberirdischen Biomasse könnte die Nährstoffrückverlagerung der Dauerkultur in die Wurzel sein.

Bei der Auswertung der Trockenmasseerträge musste ein Ausreißer entfernt werden. Danach konnte über die Verkettung einer Exponentialfunktion und eines Polynoms dritten Grads eine gute Anpassung an die Daten erreicht werden ($R^2 = 97,5 \%$, Abbildung 41). Der Wiederaustrieb der Silphiepflanzen im Frühjahr begann in der Regel Anfang bis Mitte März. Zu diesem Zeitpunkt war keine oberirdische Biomasse vorhanden, da ein möglicher Wiederaustrieb nach der Ernte über den Winter abfriert [27]. Während der ersten sechs bis acht Wochen nach Beginn des Austriebs bis zum Beginn der Probenahmen Anfang Mai nahmen die oberirdische Biomasse und die Pflanzenhöhe nur sehr langsam zu. Ab Beginn des Schossens erhöhte sich der Biomassezuwachs der Pflanzen deutlich und erreichte das Maximum etwa Ende Juni bei Erscheinen des Blütenstands des Haupttriebs. Im Anschluss nahm die Zuwachsrate wieder ab und der zur Ernte erzielte Ertrag war bereits Anfang August vorhanden. Der maximale Ertrag lag laut Regressionskurve gegen Ende August vor, was MAST et al. (2013) [85] in ihren Untersuchungen ebenfalls beobachten konnten. Wie bereits erwähnt waren zu diesem Zeitpunkt mit ca. 20 % allerdings noch keine erntefähigen Trockensubstanzgehalte gegeben. Weitere Nettoassimilation bis zur Ernte bzw. zum Eintreten der Vegetationsruhe wird von Durchwachsener Silphie neben der Samenbildung vermutlich hauptsächlich für die Bildung von Reservestoffen und deren Einlagerung ins Wurzelsystem verbraucht. Als Hauptwachstumsphase von Durchwachsener Silphie, die den Zeitraum mit dem größten Biomassezuwachs umfasst, kann somit die Phase von Mitte Mai bis Ende Juli angesehen werden. GERSTBERGER und OTT (2020) [57] geben für die Hauptzuwachs- und Hauptnährstoffaufnahme ebenfalls den Zeitraum von Mai bis Ende Juli an. An anderer Stelle wird erwähnt, dass die größte Zunahme oberirdischer Biomasse bei Durchwachsener Silphie bei Temperaturen von 10 bis 15 °C erwartet wird [123]. Dies würde am Versuchsstandort dem Zeitraum von Anfang Mai bis Mitte Juni entsprechen.

Der Wachstumsverlauf von Durchwachsener Silphie deutet somit darauf hin, dass aus Sicht des maximalen Trockenmasseertrags eine frühere Ernte ab Mitte August zu höheren Erträgen führen könnte. Hinsichtlich der TS-Gehalte ist eine Ernte bei etwa 25 % möglich, denn auch bei diesen immer noch relativ niedrigen TS-Gehalten entstehen keine Sickersäfte bei der Silierung [57]. Entgegen der Aussage von BRODMANN (2020) [18] konnten FÖRSTER et al. (2020) [50] in Versuchen an mehreren Standorten keine höhere Methan- ausbeute bei einer Ernte Mitte August im Vergleich zu Anfang September feststellen. Bei MAST et al. (2013) [85] nahm die Methan- ausbeute bei verschiedenen Ernteterminen von Mitte August bis Mitte September sogar zu. Folglich sollte weiterhin an einer Ernte Ende August bis Anfang September festgehalten werden, um durch eine ausreichende Nährstoffrückverlagerung auch eine gute Regenerationsfähigkeit der Pflanzen zu erhalten. Durch eine weiter fortgeschrittene Nährstoffrückverlagerung ist zudem eine geringere Nährstoffabfuhr und langfristig eventuell ein geringerer Düngbedarf zu erwarten. Darüber hinaus ist eine frühe Ernte von Nachteil für Wildbestäuber mit später Aktivitätsperiode, so dass ein Teil des agrarökologischen Potenzials der Durchwachsenen Silphie ungenutzt bleibt [121] [91].

Die Trockensubstanzgehalte stiegen von 10 bis 12 % während der Schossphase bis zur Ernte kontinuierlich an. Die Phase der stärksten Zunahme war zu Blühbeginn Mitte Juli zu verzeichnen, wobei die Trockensubstanzgehalte in diesem Zeitraum jede Woche etwa um 1,5 % absolut zunahm. Erntefähige Trockensubstanzgehalte von ca. 25 % [12] waren ab Ende August bis Anfang September gegeben. Die Phase des stärksten Höhenzuwachses war Mitte Juni gegen Ende der Schossphase vorzufinden. Des Weiteren zeigte der Trockenmasseertrag der einzelnen Beprobungstermine eine starke positive Korrelation mit der Wuchshöhe (Pearson $r = 0,95$). Im Vergleich zum Verlauf der Biomasseentwicklung eilte das Höhenwachstum jedoch etwas voraus. Das Höhenwachstum war Anfang August zu Beginn der Fruchtentwicklung des Haupttriebs abgeschlossen und die maximale Wuchshöhe somit erreicht. Diese veränderte sich bis zur Ernte nicht mehr wesentlich.

An allen Probenahmeterminen wurde die oberirdische Biomasse auch auf ihren Gehalt an den Nährelementen Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium untersucht (Abbildung 42). Die N- und K-Gehalte zeigten einen starken Rückgang von ca. 3,7 kg N/dt TM bzw. 4,8 kg K₂O/dt TM auf 0,92 kg N/dt TM bzw. 2,0 kg K₂O/dt TM während der Wachstumsphase bis zur Ernte. Der Rückgang der Gehaltswerte verlief bis Ende Juli relativ gleichmäßig, schwächte sich zur Abreife hin vor allem bei Stickstoff deutlich ab. Der Verlauf der logarithmierten N-Gehalte war dabei sehr gut über eine polynomische Funktion 3. Grades anzunähern ($R^2 = 95,2$). Auch die P-Gehalte gingen von Schossbeginn Anfang Mai bis Anfang August von 1,15 kg P₂O₅/dt TM auf ca. 0,55 kg P₂O₅/dt TM zurück, was in etwa bereits dem Niveau zum Erntetermin entsprach. Demgegenüber änderten sich die Mg-Gehalte im Laufe der Wachstumsphase von Durchwachsener Silphie kaum, wobei im Mittel 0,68 kg MgO/dt TM gegeben waren. Die Mg-Gehalte lagen zu Beginn der Schossphase Anfang Mai mit ca. 0,63 kg MgO/dt TM eher niedriger und stiegen im Gegensatz zu den anderen Nährelementen bis zur Blühphase von Durchwachsener Silphie sogar leicht an.

Gegen Blühende und im Laufe der Abreife nahmen die Mg-Gehalte ebenfalls leicht ab und sanken bis zur Ernte mit 0,59 kg MgO/dt TM leicht unter das Ausgangsniveau.

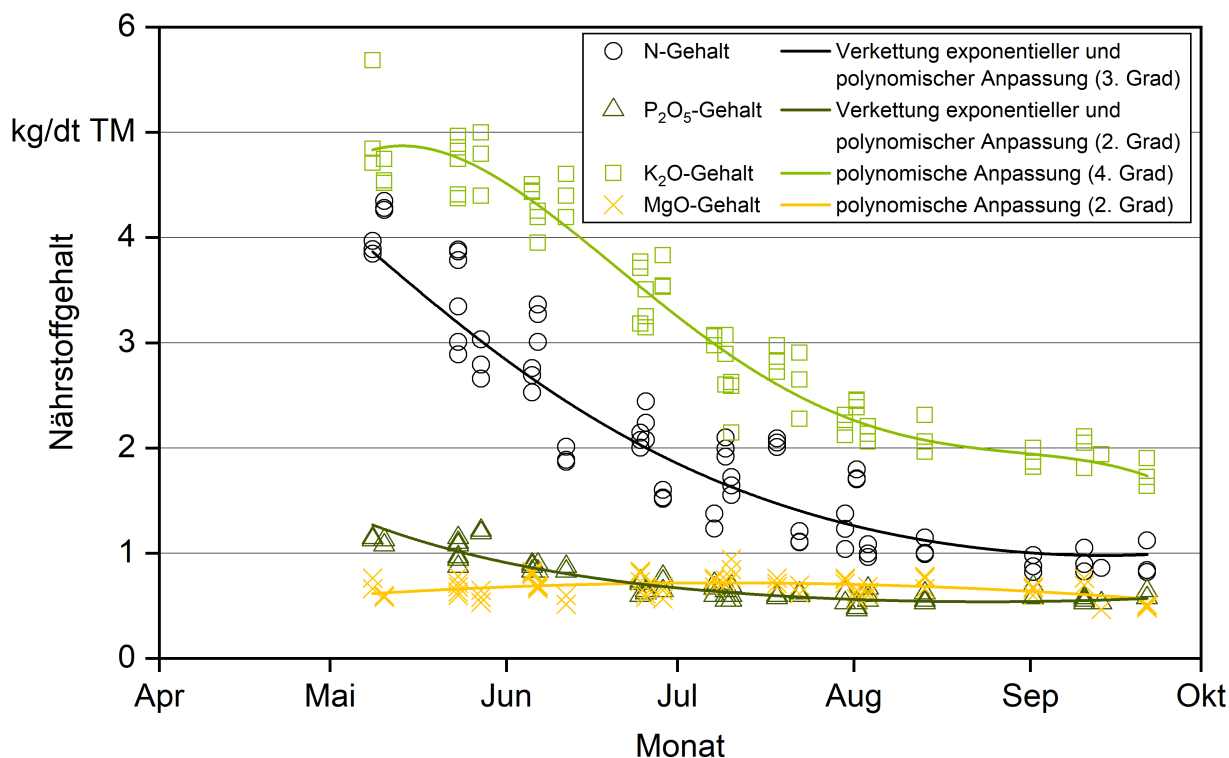


Abbildung 42: Entwicklung der N-, P_2O_5 -, K_2O - und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Pseudo- R^2 der Regressionen, $n = 70$: N-Gehalt $R^2 = 95,2\%$, P_2O_5 -Gehalt $R^2 = 91,0\%$, K_2O -Gehalt $R^2 = 94,9\%$, MgO-Gehalt $R^2 = 28,7\%$

Im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Untersuchungen lagen die Gehalte der untersuchten Nährstoffe zum Erntetermin bis auf die etwas niedrigen Kaliumgehalte auf einem ähnlichen Niveau (siehe 2.3). Ein Mangel an den untersuchten Nährelementen, der die Entwicklung der entsprechenden Gehalte im zeitlichen Verlauf hätte beeinflussen können, ist unwahrscheinlich. Ein Vergleich mit den Werten Mitte August zeigt, dass auch eine etwas frühere Ernte zu kaum höheren Nährstoffgehalten und einer höheren Nährstoffabfuhr geführt hätte. Dies gilt insbesondere für Stickstoff, Phosphor und Magnesium. Hierbei wäre zusätzlich auch ein Vergleich mit den Nährstoffgehalten der auf natürliche Weise vollständig abgereiften und abgestorbenen oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie interessant, denn aktuell wird diskutiert, dass eine Ernte mehrjähriger Energiepflanzen im grünen Zustand wegen hoher Nährstoffabfuhr eigentlich den sonstigen ökologischen Vorteilen dieser Kulturen widerspricht. In einer entsprechenden Studie konnte bei komplett abgestorbenen Pflanzen für Phosphor und Kalium eine hohe Nährstoffrückverlagerung beobachtet werden [24]. Bei einer Ernte im Januar wurden Gehalte von 0,17 kg P_2O_5 /dt TM bzw. 0,11 kg K_2O /dt TM beobachtet. Die N-Gehalte lagen dagegen mit 1,5 bis 1,6 kg N/dt TM weiterhin auf einem hohen Niveau, so dass hierfür offenbar keine nahezu vollständige Nährstoffrückverlagerung zu erwarten ist. Der Verlauf der N-

Gehalte im vorliegenden Projekt ähnelte darüber hinaus den Ergebnissen von PICHARD (2012) [100] (Rohprotein/6,25). Allerdings wurde in dieser Untersuchung ein geringeres Niveau in früheren Entwicklungsstadien nachgewiesen. Außerdem wurde festgestellt, dass die N-Gehalte in den Blättern auch zum Erntetermin noch sehr hoch waren, während die Konzentration in den Stängeln mit der Abreife zurückging. Folglich hat der Blattanteil zur Ernte auch einen Einfluss auf den N-Gehalt des Ernteguts. Auch SOKOLOV und GRITSAK (1972) [123] erwähnen, dass der gesamte Proteingehalt der Pflanze am höchsten in frühen Entwicklungsstadien ist. Darüber hinaus wurden ebenfalls deutlich höhere Proteingehalte in den Blättern nachgewiesen, wobei sich der Blattanteil von Beginn des Wiederaustriebs bis zum Knospenstadium von 70 % auf 50 % verringerte. Die Erhöhung des Stängelanteils an der oberirdischen Biomasse und dessen geringere und abnehmende N-Gehalte sind somit entscheidend für den Rückgang der N-Gehalte der gesamten oberirdischen Biomasse. Insgesamt ist die Abnahme von Nährstoffgehalten in der oberirdischen Biomasse von Pflanzen während deren Abreife insbesondere für Stickstoff typisch, vor allem wenn sich die oberirdische Biomasse wie bei Durchwachsener Silphie hauptsächlich aus vegetativer Biomasse zusammensetzt und es sich um einen ausdauernden Pflanzentyp handelt. Aufgrund der ausdauernden Lebensweise der Durchwachsenen Silphie spielt neben dem Verdünnungseffekt durch den Biomassezuwachs auch eine Rückverlagerung in das Wurzelsystem gegen Ende der Wachstumsphase für eine Regeneration im Folgejahr eine Rolle.

Aus den N-Gehalten der einzelnen Beprobungstermine wurde zusammen mit den Trockenmasseerträgen die N-Aufnahme der oberirdischen Biomasse berechnet. Wie bei der Auswertung der Trockenmasseerträge wurde bei der Regressionsanalyse der N-Aufnahme und auch der sonstigen Nährstoffaufnahmen ein Ausreißer aus dem Jahr 2019 entfernt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 43 dargestellt. Des Weiteren sind die im Boden zu den jeweiligen Schnittterminen und zur Ernte enthaltenen Mengen mineralischen Stickstoffs abgebildet. Zusätzlich wurde auch dessen Verlauf seit Vegetationsbeginn abgeschätzt (rote Quadrate und gestrichelte Linie). Ausgehend von einem N_{\min} -Vorrat zu Vegetationsbeginn von durchschnittlich 24 kg N/ha wurden die beiden Düngergaben von zusammen ca. 140 kg N/ha im Mittel der drei Versuchsjahre aufsummiert. Ungeachtet der bis zum Zeitpunkt der zweiten Düngergabe bereits erfolgten Pflanzenaufnahme, N-Verluste, Immobilisation und N-Nachlieferung stand den Pflanzen Mitte April folglich etwa eine N-Menge von 164 kg N/ha im Boden zur Verfügung. Bis zum Termin der ersten Probenahme Anfang Mai war dieser Vorrat bereits auf knapp 70 kg N/ha reduziert. Die zu diesem Zeitpunkt aus dem Regressionsmodell abgeleitete N-Aufnahme von ca. 77 kg N/ha lag zusammen mit der im Boden noch verbliebenen N_{\min} -Menge fast auf dem Niveau der N-Menge, die den Pflanzen theoretisch zu Wachstumsbeginn zu Verfügung stand. Wegen der in allen drei Projektjahren vorherrschenden Trockenheit im April war der Stickstoff aus der mineralischen N-Düngung wahrscheinlich noch nahe der Bodenoberfläche konzentriert und über die N_{\min} -Probenahmen nur schwierig gleichmäßig zu erfassen. Deshalb wurde die zu diesem Zeitpunkt im Boden noch vorliegende N_{\min} -Menge vermutlich unterschätzt, da sicherlich auch ein Teil der N-Aufnahme bis zu Beginn des Schossens aus den Reserven des Wurzelsystems bereitgestellt wurde.

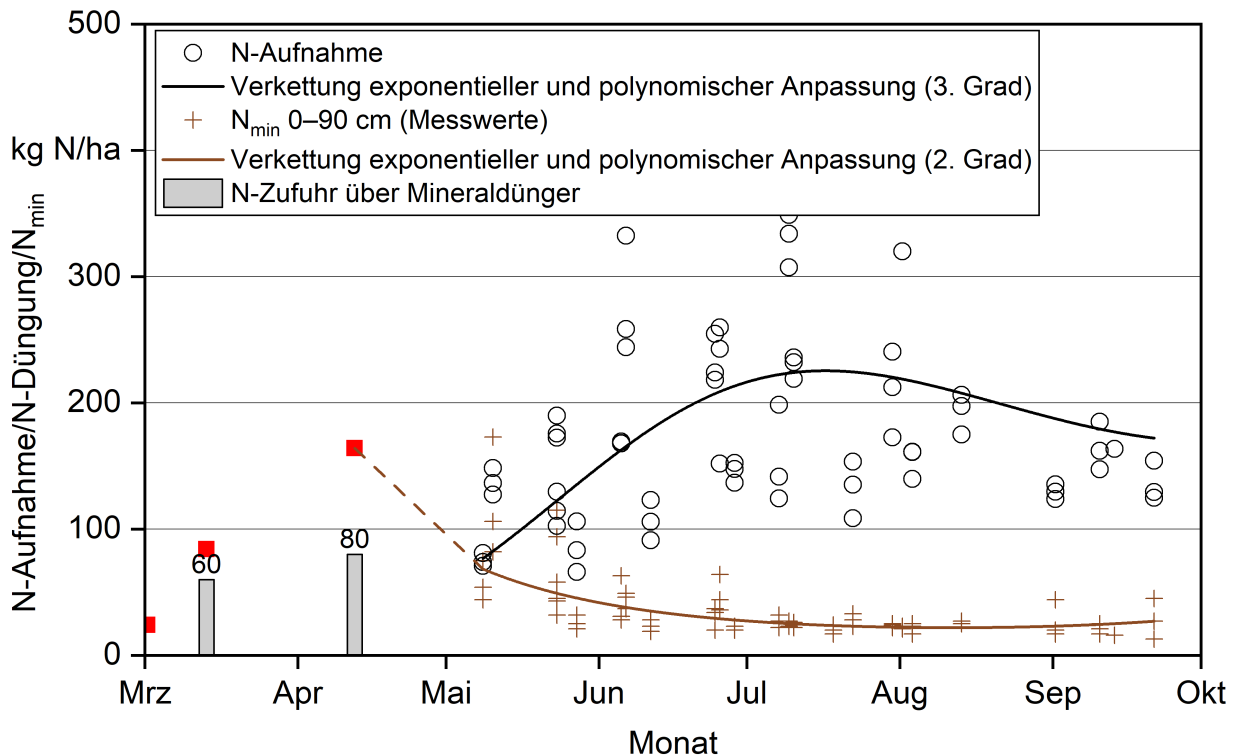


Abbildung 43: Verlauf der Stickstoffaufnahme sowie der im Boden in 0 bis 90 cm Tiefe vorhandenen N_{min} -Menge im Mittel der drei Versuchsjahre; die roten Quadrate stellen den N_{min} -Vorrat im Boden dar, der unter Berücksichtigung der beiden Düngemaßnahmen den Pflanzen theoretisch zur Verfügung stand, Pseudo- R^2 der Regressionen: N-Aufnahme $R^2 = 81,4 \%$, $n = 69$, N_{min} $R^2 = 50,0 \%$, $n = 70$

Im weiteren Verlauf des Wachstums nahm die N-Aufnahme deutlich zu, wobei die maximale Aufnahmerate von Beginn der Probenahmen zu Schossbeginn bis Anfang Juni gegeben war. Verglichen mit dem Biomassezuwachs eilte die N-Aufnahme somit etwas voraus. Von Beginn der Beprobungen bis Anfang Juni stieg die N-Aufnahme um etwa 90 kg N/ha an. Der gemessene Rückgang der Menge mineralischen Stickstoffs im Boden war dagegen mit ca. 30 kg N/ha deutlich geringer, wobei der N_{min} -Vorrat im Boden relativ langsam abnahm. Bis Mitte Juli ging der N_{min} -Vorrat in allen Versuchsjahren auf Werte um 23 kg N/ha zurück und erreichte damit das Niveau zu Vegetationsbeginn. Bis zur Ernte verblieb die N_{min} -Menge im Boden auf diesem sehr niedrigen Niveau. Die maximale N-Aufnahme war im Mittel der Versuchsjahre mit ca. 230 kg N/ha etwa Mitte Juli zur Blüte der Haupttriebe (BBCH 65) erreicht. Im Versuchsjahr 2019 wurde ein extrem hohes Niveau der N-Aufnahme von teilweise über 400 kg N/ha ermittelt, was verhältnismäßig hoch erscheint. Neben hohen Erträgen waren diese Werte allerdings auch auf relativ hohe N-Gehalte zurückzuführen, so dass unklar ist, in welchem Maß diese beide Faktoren überschätzt wurden. Ab Anfang August nahm die N-Aufnahme relativ gleichmäßig bis zur Ernte auf ein Niveau von 155 kg N/ha ab (Mittelwert der Probenahmen zum Erntetermin).

Die Tatsache, dass die N-Aufnahme von einem Maximum zur Blüte bis zur Ernte wieder abnimmt, ist auch bei anderen Kulturen zu beobachten. Zudem war Anfang bis Mitte Au-

gust bereits das Niveau des endgültigen Trockenmasseertrags erreicht und die N-Gehalte nahmen gleichzeitig bis zur Ernte weiter ab. Dies könnte insgesamt auf eine Nährstoffrückverlagerung ins Wurzelsystem zur Reservestoffspeicherung für einen Wiederaustrieb im Folgejahr hindeuten, da nur ein geringer Samenertrag erreicht wird. Darüber hinaus werden auch durch das Absterben der unteren Blätter bei gleichzeitigem Längenwachstum der Blattanteil und demzufolge die Stickstoffkonzentration verringert [100].

Neben Stickstoff wurde außerdem die Nährstoffaufnahme der Nährelemente Phosphor, Kalium und Magnesium untersucht. Der Verlauf der Aufnahme dieser Nährstoffe in die oberirdische Biomasse Durchwachsener Silphie ist in Abbildung 44 dargestellt. Die Kaliumaufnahme wies einen ähnlichen Verlauf wie die N-Aufnahme auf. Im Gegensatz dazu wurde bei Phosphor und Magnesium das Aufnahmemaximum später, Mitte bis Ende August, erreicht. Dementsprechend fiel der anschließende Rückgang bis zur Ernte deutlich geringer aus.

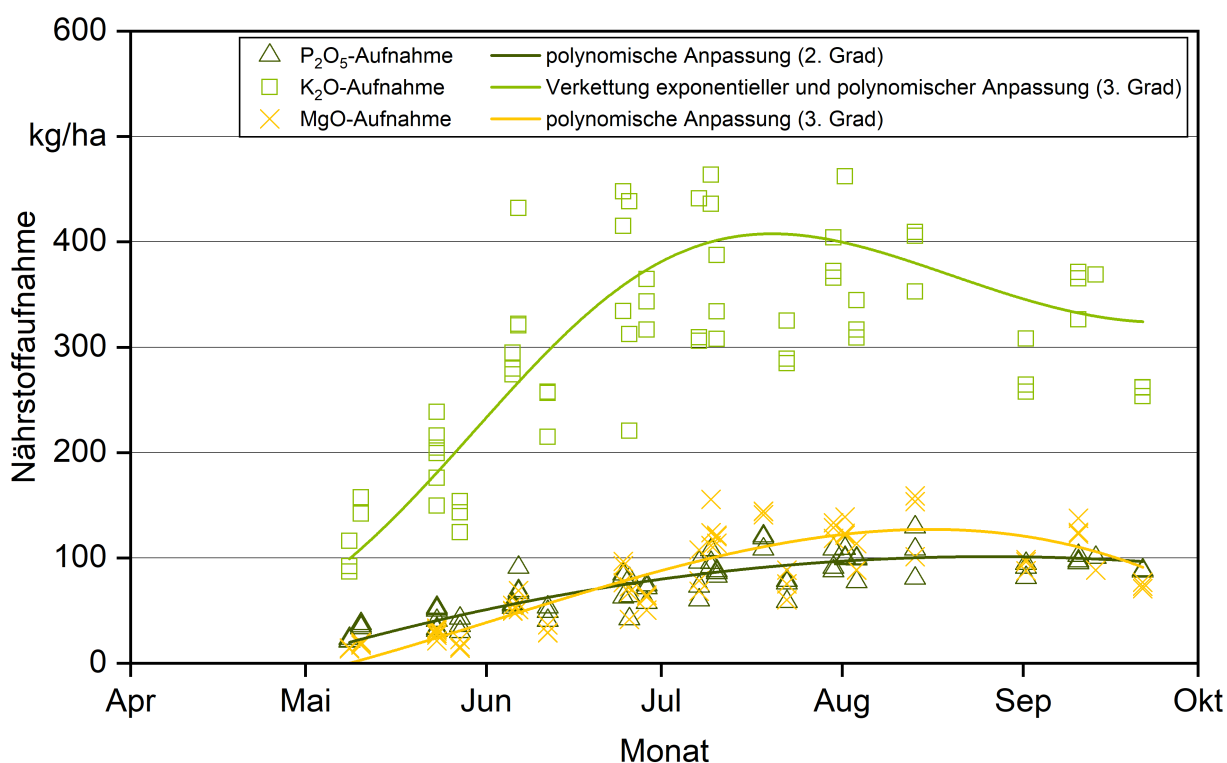


Abbildung 44: Verlauf der P_2O_5 -, K_2O - und MgO -Aufnahme von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Pseudo- R^2 der Regressionen, $n = 69$: P_2O_5 -Aufnahme $R^2 = 87,8 \%$, K_2O -Aufnahme $R^2 = 91,8 \%$, MgO -Aufnahme $R^2 = 89,2 \%$

Der Ernteertrag lag mit durchschnittlich 172 dt TM/ha auf einem standorttypischen Niveau [69] [50]. Das hohe Ertragsniveau des ersten Versuchsjahrs von 190 dt TM/ha konnte allerdings in den beiden Folgejahren nicht mehr erreicht werden. Das niedrigste Ertragsniveau war im Jahr 2021 mit 137 dt TM/ha gegeben, neben der ungünstigeren Witterung auch durch einen starken Konkurrenzdruck durch Gräser im Frühjahr bedingt. In allen Jah-

ren war im April eine ausgeprägte Frühjahrstrockenheit gegeben. Im Jahr 2019 wurde diese jedoch durch einen kühlen und nassen Mai deutlich früher entschärft als im Jahr 2020. Die längere Wachstumszeit unter Trockenbedingungen vor der Blüte kostete vermutlich im Jahr 2020 Ertrag.

Bei einer mittleren jährlichen N-Düngung von ca. 140 kg N/ha ergab sich eine negative N-Bilanz von etwa -15 kg N/ha. Eine geringfügig höhere N-Düngung wäre noch angemessen gewesen und hätte vermutlich von den Pflanzen verwertet werden können und nicht zu erhöhten N_{\min} -Resten nach der Ernte geführt. Nach aktueller Düngebedarfsermittlung hätten bei gegebenem Ertragsniveau im Mittel der Jahre ca. 170 kg N/ha gedüngt werden dürfen.

Im Hinblick auf eine Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie können aus den bisherigen Ergebnissen noch keine endgültigen Schlussfolgerungen gezogen werden. Es zeigt sich jedoch, dass der Erntetermin bis etwa Mitte September maßgeblich den N-Gehalt des Ernteguts und somit die N-Abfuhr beeinflusst. Die N_{\min} -Menge im Boden befand sich dagegen ab Mitte Juli durchgehend auf einem sehr niedrigen Niveau. Bei zeitiger Ernte bis spätestens Anfang September erscheint somit der bei der aktuell gültigen Düngebedarfsermittlung nach der Methode des mehrjährigen Feldfutterbaus unterstellte N-Gehalt durchaus passend. Bei späterer Ernte gehen die N-Gehalte der oberirdischen Biomasse weiter zurück und mehr Stickstoff verbleibt durch Rückverlagerung in die Wurzeln auf der Fläche. Die maximale N-Aufnahme des Bestands, die etwa zu Beginn der Blühphase zu erwarten ist, lässt darauf schließen, dass N-Gaben auf dem aktuellen Niveau der Düngeverordnung von den Pflanzen aufgenommen werden. Entsprechend dem Verlauf der N_{\min} -Menge im Boden ist anzunehmen, dass vor Anfang Mai bereits eine intensive N-Aufnahme aus dem Boden stattfand. Da dadurch die Menge pflanzenverfügbaren Stickstoffs im Boden rasch reduziert wurde, ist die Gefahr einer möglichen Nitratauswaschung auch bei einer einmaligen Düngung zu Vegetationsbeginn unter normalen Bedingungen gering. Sollte Durchwachsene Silphie ausschließlich mineralisch gedüngt werden, kann bei Düngemengen über 130 kg N/ha der Einsatz stabilisierter N-Dünger dennoch sinnvoll sein, um bei einem extrem feuchten Frühjahr Auswaschungsverluste und Lachgasemissionen zu vermeiden. Auf leichten Standorten wäre in diesem Fall eine Aufteilung auf zwei Teilgaben, wie im vorliegenden Projekt untersucht, zu empfehlen.

5.1.8 Zusammenfassende Diskussion

Das mittlere Ertragsniveau betrug 116, 140 bzw. 155 dt TM/ha bei einem N-Bedarfswert (N-Düngung inklusive N_{\min}) von 100, 150 bzw. 200 kg N/ha. Es lag damit meist etwas unterhalb des Niveaus anderer Untersuchungen. GRUNWALD et al. (2020) [61] ermittelten bei einer mineralischen N-Düngung von 170 kg N/ha Trockenmasseerträge von 14,9 bis 18,2 dt/ha. KÖHLER und BIERTÜMPFEL (2018) [79] konnten in verschiedenen Düngevarianten mit Mineraldünger und Gärresten bei einem N-Bedarfswert von 150 kg N/ha ein Ertragsniveau von 185 bis 200 dt TM/ha beobachten. Auch PICHARD (2012) [100] berichtete bei einem N-Düngeniveau von 100 kg N/ha bereits von deutlich höheren Erträgen von 16,9 dt TM/ha. In einer Studie aus Baden-Württemberg war dagegen im Mittel zweier

Standorte bei einer N-Düngung von 160 bzw. 200 kg N/ha mit 14,7 bzw. 15,6 dt TM/ha ein ähnliches Ertragsniveau gegeben. Im Vergleich zum bayernweiten Mittel (sechs Standorte, fünf Jahre [69] [50]) von 148 dt TM/ha wurden bei entsprechender N-Düngung ähnlich hohe Erträge erreicht. Das Ertragsniveau des in diesen Untersuchungen enthaltenen Gäubodenstandorts war jedoch mit 187 dt TM/ha deutlich höher. Im Jahr 2019 konnte dieses standorttypische Niveau bei maximaler mineralischer N-Düngung noch erreicht werden, während in den Jahren 2020 und 2021 die Erträge deutlich niedriger lagen. Dieser Ertragsrückgang war vermutlich witterungsbedingt, so dass nicht beurteilt werden kann, ob der Bestand im Jahr 2019, im zweiten Erntejahr, bereits seine maximale Ertragsfähigkeit erreicht hat.

Hinsichtlich des Vergleichs der Düngevarianten waren bei Gärrestdüngung sowohl signifikant niedrigere Erträge als auch N-Gehalte wie bei entsprechender rein mineralischer N-Düngung festzustellen. Demzufolge wurde bei einer Gärrestdüngung die unterstellte Düngewirkung nicht erreicht und es lag eine schlechtere N-Verwertung als bei einer rein mineralischen N-Düngung vor. Bei der letzten Ernte der im Herbst 2019 umgebrochenen Silphieparzellen waren dagegen keine signifikanten Ertragsunterschiede zwischen Gärrestdüngung und rein mineralischer Düngung vorhanden. Im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie nahm außerdem mit zunehmender N-Zufuhr der daraus resultierende Ertragszuwachs ab. Signifikante Ertragsunterschiede waren nur zwischen einem N-Bedarfswert von 100 und 150 kg N/ha vorhanden. Da keine ungedüngte Kontrolle im Versuch enthalten war, lässt sich allerdings nicht sagen, ob die N-Effizienz je ausgebrachtem Kilogramm Stickstoff bei 100 oder 150 kg N/ha besser ausfiel. Entsprechend den Ergebnissen anderer Untersuchungen [100] [133] ist davon auszugehen, dass auf der ersten N-Stufe die höchste Ertragswirkung gegeben war.

Neben dem für den Standort unterdurchschnittlichen Ertragsniveau lagen auch die N-Gehalte deutlich unterhalb des aktuell für Bayern gültigen Standardwerts von 1,0 kg N/dt TM, der auch in einer Vielzahl anderer Untersuchungen nachgewiesen wurde (siehe 2.3). Wie bei PICHARD (2012) [100] und STOLZENBURG et al. (2016) [133] konnte zwar eine (teilweise signifikante) Zunahme der N-Gehalte mit steigender N-Zufuhr festgestellt werden, selbst bei mineralischer N-Düngung und einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha wurden aber maximal nur 0,88 kg N/dt TM erreicht. In den beiden angesprochenen Studien waren bezüglich der N-Gehalte jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Standorten gegeben, wobei einzelne Standorte auch N-Gehalte auf dem Niveau dieses Projekts aufwiesen. Darüber hinaus war im Rahmen der Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie festzustellen, dass die N-Gehalte der oberirdischen Biomasse mit zunehmender Abreife der Pflanzen deutlich zurückgehen. Dies ist ebenso wie der leichte Ertragsrückgang bis zur Ernte auf Blattverluste [120], eine Nährstoffrückverlagerung in die Wurzeln und Verringerung des Blattanteils [123] zurückzuführen. Folglich besteht eine Abhängigkeit der N-Gehalte vom Erntetermin [100]. BURY et al. (2020) [24] konnten allerdings bei einer Ernte abgestorbener Silphietriebe im Frühjahr mit 1,5 bis 1,6 kg N/dt TM weiterhin sehr hohe N-Gehalte feststellen, während bei anderen Nährelementen eine ausgeprägte Rückverlagerung gegeben war. Im vorliegenden Projekt trug der späte Erntetermin wahrscheinlich dennoch zumindest teilweise zu den geringen N-Gehalten bei. Eine spä-

tere Ernte hat den Vorteil, dass das Pollen- und Nektarangebot für Blütenbesucher länger erhalten bleibt [92] [91]. Wegen der niedrigen N-Gehalte zum Erntetermin lag folglich die N-Abfuhr in allen Jahren im Vergleich zu anderen Untersuchungen auf einem niedrigen Niveau [79] [61].

Wegen der insgesamt höheren Stickstoffzufuhr bei Gärrestdüngung lagen dort entsprechend negative N-Bilanzen vor. Im Gegensatz zu anderen Versuchen [61] [79] waren auch bei rein mineralischer N-Düngung nur bei einem Bedarfswert von 100 kg N/ha ausgeglichene N-Bilanzen vorhanden. Hohe N-Bilanzüberschüsse stellen ein Potenzial für N-Verluste dar und sind langfristig nicht tolerierbar. Dennoch war das Niveau der N_{\min} -Mengen nach der Ernte und zu Vegetationsende auch bei einem N-Bedarfswert von 200 kg N/ha sehr niedrig. STOLZENBURG et al. (2016) [133] beobachteten ebenfalls eine N-Abfuhr deutlich unter dem Niveau der N-Düngung, erhöhte N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte waren nicht vorhanden. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Durchwachsene Silphie wegen ihres ausdauernden Wuchstyps einen Teil des zuvor aufgenommenen Stickstoffs gegen Ende der Wachstumsphase für eine Regeneration im Folgejahr in unterirdische Pflanzenteile zurückverlagerte. Ob eine spätere Ernte wegen einer besseren Nährstoffrückverlagerung in die Wurzeln Vorteile für den Wiederaustrieb und die Nutzungsdauer hat, ist noch unklar. Die geringere N-Abfuhr über die oberirdische Biomasse bei Gärrestdüngung kann anhand dieser Hypothese jedoch nicht erklärt werden, da eine ähnliche Menge auch in den mineralisch gedüngten Varianten zur Wurzelbildung hätte verwendet werden müssen. Eine Nährstoffverlagerung in die Samen während der Abreife und ein Verbleib dieser Nährstoffe auf der Fläche durch einen Ausfall der Samen bei der Ernte fallen nicht ins Gewicht, da der Samenertrag bei Silphie sehr gering ist [123] und diese somit keine ausgeprägte Senke für Nährstoffe und Assimilate [117] darstellen. Da unter Silphiebeständen ein Humusaufbau zu erwarten ist [112], wäre es außerdem denkbar, dass ein Teil der N-Zufuhr zum Humusaufbau verwendet wurde.

Bei den Gärrestvarianten wird darüber hinaus ein Großteil des organisch gebundenen Düngerstickstoffs zu den N-Überschüssen beigetragen haben. Bis zu einer Mineralisation verbleibt dieser organisch gebundene Stickstoff weiterhin im oberen Bodenbereich. Die organische Düngung auf den Versuchspartellen begann im Jahr 2018, so dass die daraus resultierende Nachlieferung wahrscheinlich jedoch noch nicht das langfristig zu erwartende Niveau erreichte. Solange Durchwachsene Silphie auf einer Fläche wächst, ist nicht mit einer nennenswerten Nitratauswaschung zu rechnen, da die N_{\min} -Mengen zu Vegetationsende und nach der Ernte durchwegs ein sehr niedriges Niveau aufwiesen. Liegt infolge langjähriger organischer Düngung ein erhöhtes Mineralisationspotenzial für Stickstoff vor, so ist davon auszugehen, dass auch eine zusätzliche N-Nachlieferung nach der Ernte von den Pflanzen aufgenommen wird. Dieser zusätzliche Stickstoff wird allerdings, wie bei einer Herbsdüngung weniger effektiv in Ertrag umgesetzt werden als ein im Frühjahr zur Verfügung stehendes N-Angebot. Eine organische Düngung während des Silphieanbaus könnte zudem das Potenzial für N-Verluste nach dem Umbruch erhöhen, da zusätzlich organische Substanz zugeführt und akkumuliert wird.

Des Weiteren ging ein Teil des über die Gärreste zugeführten NH_4 -N nach der Ausbringung über Ammoniakvolatilisation verloren. Da in Beständen mit Durchwachsener Silphie

keine Einarbeitung nach der Ausbringung erfolgen kann, sind die Witterungsbedingungen im Anschluss an die Ausbringung und eine bodennahe Ablage bzw. direktes Einbringen in den Boden von besonderer Bedeutung für die Reduktion von Ammoniakverlusten [126]. Im Anschluss an die Gärrestausrückführung im Projekt infiltrierten die Gärreste teilweise nur langsam in den Boden. Dadurch wurden vermutlich die gasförmigen N-Verluste erhöht [124] und die N-Düngewirkung der Gärreste konnte das angestrebte Niveau nicht erreichen. Eine eingeschränkte Infiltration bei Gärrestdüngung in Durchwachsener Silphie kann dadurch bedingt sein, dass der Boden bei der Ernte unter feuchten Bedingungen zumindest oberflächlich festgefahren wird und keine Bodenbearbeitung erfolgt. Zugleich ist bei einer Frühjahrsdüngung zu Vegetationsbeginn noch kein Pflanzenbewuchs vorhanden, was zu erhöhten Verlusten führen kann [127] [124]. Bei Parzellenversuchen können sich zudem Ammoniakverluste verstärken, da die windüberströmte gedüngte Fläche geringer ist [125]. Darüber hinaus wurde die Beerntung mit geringer Arbeitsbreite durchgeführt, so dass die Parzellen zu mindestens 70 % überfahren wurden, was den Effekt eventuell verstärkte. Dies gilt insbesondere für die erste Gärrestdüngung im Frühjahr, denn etwa eine Woche nach der ersten N-Gabe wurde durch eine mechanische Unkrautbekämpfung mit einer Reihenfräse der Zwischenreihenbereich flach bearbeitet. Die zweite Gärrestgabe konnte dadurch bereits besser in den Boden infiltrieren. Höhere Temperaturen zum zweiten Düngetermin im Frühjahr hoben diesen Vorteil jedoch vermutlich wieder auf. Vor allem nach einer Ernte unter feuchten Bodenverhältnissen kann es deshalb sinnvoll sein, den Boden vor oder nach einer Gärrestdüngung im Frühjahr im Rahmen einer mechanischen Unkrautbekämpfung flach zu lockern bzw. die Gärreste über diese Maßnahme einzuarbeiten.

Da es sich bei Gärresten grundsätzlich um Mehrnährstoffdünger handelt, dürfen beim Einsatz hoher Gärrestmengen in Durchwachsener Silphie auch die weiteren Nährelemente nicht unberücksichtigt bleiben. Die mittlere Phosphorabfuhr von Durchwachsener Silphie liegt bei 70 bis 80 kg P_2O_5 /ha. Folglich können bei einer am N-Bedarf orientierten Gärrestdüngung und mittleren Ausnutzungsgraden insbesondere bei phosphorreichen Gärresten Überschüsse in der Phosphorbilanz gegeben sein. Kalium, Magnesium und Calcium betreffend ist hingegen bei Gärrestdüngung eine Überschreitung der Abfuhr unwahrscheinlich [138]. Dies gilt insbesondere für Calcium und Kalium, deren Abfuhr bei mittleren Erträgen 250 bis 350 kg K_2O /ha bzw. 350 bis 450 kg CaO /ha beträgt. Deshalb ist auch bei Deckung des N-Bedarfs ausschließlich über Gärreste auf einen ausreichenden Ausgleich der Abfuhr achten, um die Bodengehalte in optimaler Versorgungsstufe zu halten. Der hohe Calciumbedarf erfordert eine regelmäßige Kalkung. Eine positive Wirkung einer Kalkung auf den Ertrag von Durchwachsener Silphie ist vor allem bei niedrigen pH-Werten gegeben [122]. Die Nährstoffabfuhr bei Durchwachsener Silphie bei einer Ernte im grünen Zustand zur Biogasnutzung liegt somit auf oder teilweise über dem Niveau vergleichbarer einjähriger Kulturen wie Silomais [138] [113]. Bei dieser aktuell üblichen Nutzungsrichtung von Durchwachsener Silphie ergibt sich eine deutlich höhere Nährstoffabfuhr als im abgestorbenen Zustand [24], so dass Dauerkulturen nicht generell als Low-Input-Kulturen betrachtet werden dürfen [113].

Eine Aufteilung der Frühjahrsdüngung brachte keine signifikanten Vorteile hinsichtlich des Ertrags oder der N-Verwertung. Während bei einer mineralischen N-Düngung tendenziell höhere Erträge bei geteilter Frühjahrsdüngung beobachtet wurden, wirkte sich bei der Düngung mit Gärresten eine Aufteilung der Frühjahrsdüngung tendenziell eher negativ aus. Pflanzenschäden, die durch eine zusätzliche Überfahrt im Rahmen einer geteilten Ausbringung entstehen [97], waren im Versuch nicht enthalten, da für die Gärrestausrückführung Pflegewege zwischen den Parzellen verwendet wurden. Zur Vermeidung von Pflanzenschäden durch die Überfahrt sollte eine Gärrestdüngung im Frühjahr folglich an einem Termin zu Vegetationsbeginn erfolgen. In diesem Zusammenhang müsste im Fall einer Gärrestdüngung weiter untersucht werden, bis wann diese ausgebracht werden muss, um die Ertragsleistung nicht zu beeinträchtigen. Bei einem größeren Zeitfenster für eine optimale Ertragswirkung könnten Landwirte mit der Ausbringung eventuell bis zum Vorliegen günstiger Witterungsbedingungen für eine emissionsarme Ausbringung warten und somit die N-Verwertung einer Gärrestdüngung verbessern.

Die Ausbringung eines Teils des gesamten Düngebedarfs im Herbst über Gärreste (maximal $60 \text{ kg N}_{\text{ges}}/\text{ha}$ bzw. $30 \text{ kg NH}_4\text{-N}/\text{ha}$) wies im Mittel der Versuchsjahre eine etwas schlechtere N-Verwertung gegenüber einer ausschließlichen Frühjahrsdüngung mit Gärresten auf. Die N-Düngewirkung des im Herbst ausgebrachten Stickstoffs war dabei ungefähr halb so hoch wie bei einer Düngung im Frühjahr. Signifikant erhöhte N_{min} -Mengen im Boden zu Vegetationsende oder Vegetationsbeginn waren allerdings nicht zu beobachten. Unter Inkaufnahme einer etwas schlechteren Düngewirkung kann zur Entlastung des Gärrestlagers eine Teilgabe bereits im Herbst ausgebracht werden. Ein zusätzlicher Vorteil wäre eventuell, dass auf Standorten mit schlechter Befahrbarkeit im Frühjahr die Dringlichkeit einer möglichst frühzeitigen Düngung etwas entschärft wird. Der Einfluss des Düngezeitpunkts im Herbst auf die Verwertung ist bisher allerdings noch unklar. Eine möglichst frühe Ausbringung deutlich vor der gesetzlichen Frist und zeitnah nach der Ernte ist anzuraten, um aktives Pflanzenwachstum und eine gute Befahrbarkeit auszunutzen. Primär sollte dennoch auch eine günstige Witterung zur Vermeidung von Ammoniakverlusten abgewartet werden. Eine Herbstdüngung mit organischen Düngern kann aufgrund der Entzerrung von Arbeitsspitzen und der Lagerproblematik somit durchaus sinnvoll sein. Von einer Herbstdüngung mit Mineraldünger ist dagegen abzuraten, da kein direkter Ertragsvorteil ausgenutzt werden kann.

Grundsätzlich gilt, dass Durchwachsene Silphie zur Schließung von Stoffkreisläufen mit Gärresten gedüngt werden sollte. Im Rahmen dieses Projekts konnten hohe Erträge jedoch nur bei hohen N-Bilanzüberschüssen erzielt werden, insbesondere wenn ausschließlich organische Dünger eingesetzt wurden. Eine sehr gute N-Verwertung von Gärresten mit negativen N-Salden und Mineraldüngeräquivalenten bezogen auf den N_{ges} von teilweise über 100 %, wie von BIERTÜMPFEL und CONRAD (2013) [13] sowie KÖHLER und BIERTÜMPFEL (2018) [79] beobachtet, war im vorliegenden Projekt nicht ansatzweise vorhanden. Auch die aktuelle Mindestwirksamkeit nach Düngeverordnung wurde meist nicht erreicht. Eine Deckung des N-Bedarfs von Durchwachsener Silphie ausschließlich mit Gärresten erscheint deshalb wenig sinnvoll. Aus gesetzlicher Sicht ist ohnehin nur eine Gärrestdüngung bis maximal $170 \text{ kg N}_{\text{ges}}/\text{ha}$ erlaubt und wegen der damit verbundenen Um-

lagerung von Nährstoffen und organischer Substanz auch nicht sinnvoll. Die Gärrestzufuhr sollte deshalb den der Biomasse- und Nährstoffabfuhr der Durchwachsenen Silphie entsprechenden Gärrestanfall nicht überschreiten. Sind im Betrieb ausreichend Flächen für eine Gärrestausrückführung vorhanden, sollte für eine optimale Verwertung des Stickstoffs aus organischer Düngung auch bei Durchwachsener Silphie die über Gärreste zugeführte Menge an Gesamtstickstoff auf 120 kg N/ha [62] bzw. 60 bis 70 % [105] des gesamten N-Düngebedarfs beschränkt werden. Der verbleibende N-Düngebedarf ist über Mineraldünger abzudecken, die je nach Befahrbarkeit zeitlich deutlich früher eingesetzt werden können. Eine kombinierte mineralisch-organische Düngung könnte zudem zu höheren Erträgen führen, da zugleich die Ansprüche der Pflanzen an die N-Versorgung bedient werden und der bodenverbessernde Effekt der zugeführten organischen Substanz zum Tragen kommt [5] [80]. In diesem Zusammenhang konnten KÖHLER und BIERTÜMPFEL (2018) [79] bei einer Kombination aus Gärrestdüngung und mineralischer N-Düngung tendenziell ein höheres Ertragsniveau von Durchwachsener Silphie als bei rein mineralischer oder rein organischer Düngung feststellen.

Im Hinblick auf die Düngebedarfsermittlung von Durchwachsener Silphie scheint der aktuelle N-Bedarfswert von 1,0 kg N/ha je dt TM/ha Ertragserwartung unter Berücksichtigung der im Versuch erreichten Düngewirkung angemessen, auch wenn eine entsprechend hohe N-Abfuhr nicht erreicht wurde. Dies zeigt, dass Durchwachsene Silphie im Vergleich zu Mais eher über eine schlechtere N-Nutzungseffizienz verfügt. Zudem muss berücksichtigt werden, dass am vorliegenden Versuchsstandort optimale Bodenverhältnisse vorzufinden waren. Um den N-Bedarf von Durchwachsener Silphie auch bei Gärrestdüngung und an kühleren Standorten ausreichend zu decken, sollte das Niveau des N-Bedarfswerts beibehalten oder eventuell auf 0,9 kg N/dt TM abgesenkt werden. Auf günstigen Standorten und bei einem hohen Anteil mineralischer N-Düngung sind wegen der besseren N-Verwertung Abschläge von bis zu 25 % von der nach Düngeverordnung aktuell maximal möglichen N-Düngung sinnvoll. Dieser eingesparte Stickstoff kann unter Berücksichtigung der gesamtbetrieblichen Bilanz auf andere Kulturen umverteilt werden. In „roten Gebieten“ ist deshalb bei einer um 20 % reduzierten N-Düngung nicht mit gravierenden Mindererträgen zu rechnen. Eventuell wäre es sinnvoll, den N-Düngebedarf auf ein Maximum von 180 kg N/ha zu beschränken, da entsprechend hohe Erträge ohnehin kaum erreicht werden. Aus anderen Versuchen ist zudem bekannt, dass ab einer N-Düngung von 200 kg N/ha kaum mehr Ertragszuwächse zu verzeichnen sind [133] [100]. Darüber hinaus war im vorliegenden Projekt bei einer N-Düngung von ca. 185 kg N/ha deutliches Lager vorhanden. Mit zunehmender N-Düngung nahm zwar der Stängeldurchmesser zu, aber auch die Wuchshöhe und die Anzahl der Blüten, wodurch sich der Schwerpunkt der Pflanzen nach oben verlagerte und die Triebe in Schräglage gerieten oder ganz umknickten. In lagernden Beständen kann die Ernte erheblich erschwert sein, vor allem wenn kein Direktschneidwerk mit Seitenmessern zur Verfügung steht.

Um die N-Düngewirkung von Gärresten zu verbessern und die vorgeschriebene Mindestwirksamkeit von Gärresten im Anwendungsjahr einhalten zu können, sollten Maßnahmen zur Reduzierung von Ammoniakverlusten konsequent umgesetzt werden. Hierzu zählt die streifenförmige und bodennahe Ausbringung mit Schleppschlauch- oder Schleppschuh-

verteilern, die ab 2025 ohnehin verpflichtend sein wird. Bei Durchwachsener Silphie ist im Gegensatz zu Mais ohne Weiteres keine Einarbeitung von Gärresten nach der Ausbringung möglich. Dadurch können auch bei Verwendung der mittlerweile üblichen Schleppschlauchtechnik hohe Ammoniakverluste auftreten, was vermutlich zu der eher schlechten N-Verwertung im vorliegenden Versuch führte. Deshalb ist es umso wichtiger, dass die Gärrestdüngung auch zu Durchwachsener Silphie wenn möglich nur bei günstiger Witterung erfolgt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Gärreste nach der Ausbringung im Rahmen einer mechanischen Unkrautregulierungsmaßnahme zwischen den Reihen flach in den Boden einzuarbeiten. Der Einsatz von Schlitzscheibenverteilern für ein direktes Einbringen der Dünger in den Boden bei der Ausbringung wäre sicherlich die optimale Variante. Allerdings wurde bislang noch nicht untersucht, ob bei der Verwendung der in Getreide üblichen Schlitzscheibentechnik Schäden an den Silphietrieben bzw. -wurzeln entstehen. In einem Folgeprojekt werden deshalb die Wirkung auf die N-Verwertung sowie mögliche Pflanzenschäden genauer betrachtet.

5.2 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen

5.2.1 Umbruch von Durchwachsener Silphie

5.2.1.1 Charakterisierung der letzten Ernte von Durchwachsener Silphie

Die letztmalige Ernte der für den Umbruch vorgesehenen Versuchsanlage mit Durchwachsener Silphie erfolgte am 6. September 2019. Entsprechend der ehemaligen Versuchsfrage wurden die Parzellen seit drei Jahren streifenweise mit Gärresten bzw. rein mineralisch gedüngt. Die Pflanzen wiesen zum Erntetermin im Jahr 2019 verbreitet eine leichte Schräglage auf und hingen teilweise in unterschiedlichen Richtungen ineinander, was die Ernte deutlich erschwerte. Niedergedrückte und mitgezogene Pflanzen konnten dabei nicht mehr vom Häcksler erfasst werden und blieben auf der Bodenoberfläche liegen (siehe auch Abbildung 45).

Bei mineralischer N-Düngung wurde im Mittel ein Ertrag von 178,4 dt TM/ha erreicht. Bei den seit 2017 mit Gärresten gedüngten Varianten war ein durchschnittlicher Ertrag von 181,54 dt TM/ha gegeben. Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten waren nicht vorhanden. Damit überstieg der Ertrag im Versuchsjahr 2019 den des Vorjahrs von ca. 110 dt TM/ha bei vergleichbarer N-Düngung deutlich und bewegte sich oberhalb des bayerischen Durchschnitts von etwa 148 dt TM/ha (fünf Jahre, sechs Standorte) [69] [50]. Dennoch wurde in dieser Studie am nahegelegenen Standort Wolferkofen im Jahr 2019 und auch im Mittel der letzten vier Jahre ein etwas höherer Ertrag erreicht. Die Untersuchung der im Boden nach der Ernte vorhandenen Menge mineralischen Stickstoffs zeigte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen mineralischer und organischer Düngung. Bei mineralischer N-Düngung waren 10,0 kg N/ha und bei organischer Düngung 13,8 kg N/ha vorhanden, so dass sich die Werte auf einem für Durchwachsene Silphie typischen niedrigen Niveau bewegten (siehe auch 5.1.5).

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der Nährstoffgehaltsuntersuchungen des Ernteguts und die entsprechenden Nährstoffabfuhr aufgelistet. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Düngestrategien waren bezüglich des Phosphorgehalts und der Phosphorabfuhr gegeben, wobei die mit Gärresten gedüngte Variante signifikant höhere Gehalte aufwies. Dies ist erstaunlich, da die mineralisch gedüngte Variante im Frühjahr eine mineralische P-Ausgleichsdüngung über einen aufgeschlossenen P-Dünger in Höhe von 146 kg P₂O₅/ha erhielt und über Gärreste nur 55 kg P₂O₅/ha zugeführt wurden. Eventuell wurde ein Großteil der P-Aufnahme der oberirdischen Biomasse aus den Nährstoffreserven der Wurzelstöcke bereitgestellt, so dass das P-Angebot des Vorjahrs entscheidender war. Des Weiteren waren die N-Gehalte in beiden Varianten verglichen mit den Werten aus anderen Untersuchungen (siehe 2.3) und auch dem Silphiedüngungsversuch dieses Projekts (siehe 5.1) sehr niedrig. Eine sehr späte Ernte lag nicht vor, da diese am 6. September durchgeführt wurde und sich die TS-Gehalte mit 24,1 % bei abgetrocknetem Bestand noch eher im niedrigen Bereich befanden. Folglich kann nicht davon ausgegangen werden, dass durch eine stark fortgeschrittene Rückverlagerung von N-Verbindungen in die überdauernden Wurzelbereiche und Knospen die N-Gehalte im Spross bereits mehr als normal reduziert wurden. Neben einem allgemeinen Jahreseinfluss sind außerdem N-Verluste aus dem Probenmaterial während der Trocknung denkbar. Diese wurde nach gleichem Schema wie im Vorprojekt durchgeführt, wobei dort auf der gleichen Versuchsfäche N-Gehalte von ebenfalls nur 0,55 kg/dt TM ermittelt wurden. Andererseits könnte diese Beobachtung auch zu der Vermutung von HARTMANN et al. (2017) [69] passen, die nach einem Rückgang der N-Gehalte im zweiten Erntejahr weiter rückläufige N-Gehalte bei zunehmender Standdauer von Durchwachsener Silphie erwarteten. Die übrigen Nährstoffgehalte bewegten sich auf dem Niveau anderer Untersuchungen (siehe 2.3).

Tabelle 17: Nährstoffgehalte und -abfuhr des Ernteguts von Durchwachsener Silphie bei rein mineralischer Düngung oder Düngung mit Gärresten im für den Umbruch vorgesehenen Silphieversuch im letzten Erntejahr; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen

N-Düngung	N-	P ₂ O ₅ -	K ₂ O-	MgO-	N-	P ₂ O ₅ -	K ₂ O-	MgO-
	Gehalt	Gehalt	Gehalt	Gehalt	Abfuhr	Abfuhr	Abfuhr	Abfuhr
Einheit	kg/dt TM				kg/ha			
Gärrest	0,50	0,61 b	2,59	0,46	91,0	111,3 b	470,2	83,5
mineralisch	0,50	0,44 a	2,24	0,48	87,3	77,2 a	400,0	83,9

5.2.1.2 Umbruchverfahren

Der Umbruch der Versuchsanlage mit Durchwachsener Silphie erfolgte am 30. September 2019, 24 Tage nach der Ernte. Aufgrund des trockenen Sommers und der trockenen Witterung in den Wochen vor dem Umbruch war der Boden sowohl oberflächlich als auch in tieferen Bereichen stark ausgetrocknet. Dies wurde durch die nach der Ernte durchgeführte N_{min}-Beprobung bestätigt. Zum Umbruchtermin trieb ein Großteil der Silphiepflanzen

bereits wieder aus (Abbildung 45) und hatte je nach Beginn des Austriebs bereits zwei bis drei Blattpaare ausgebildet (BBCH 12–13). Zusätzlich war auch eine Vielzahl junger Silphiepflanzen aufgelaufen, die aus ausgefallenen Samen stammten. Die teilweise ziemlich langen und häufig in kleineren Haufen angeordneten Stängel, die bei der Ernte nicht erfasst worden waren, waren drei Wochen nach der Ernte bereits leicht angerottet und relativ brüchig. Diese Ernterückstände führten folglich bei keiner der drei eingesetzten Gerätevarianten zu Verstopfungen oder Beeinträchtigungen.



Abbildung 45: Wiederaustrieb und Keimung von Silphiepflanzen zum Zeitpunkt des Umbruchs Ende September mit auf der Bodenoberfläche verbliebenen Pflanzenresten, die bei der Ernte nicht erfasst wurden

Pflug

Die Bearbeitung mit dem Pflug erfolgte auf einer Arbeitstiefe von ca. 27 cm bei einer Fahrgeschwindigkeit von 4 bis 5 km/h (Abbildung 46). Das Pflügen der seit 2015 mit Durchwachsener Silphie bewachsenen Fläche war grundsätzlich problemlos möglich. Die Wurzelballen wurden meist pflugtypisch um ca. 135 ° gewendet und das Arbeitsbild war ordentlich. Wegen der sehr trockenen Bodenverhältnisse war stellenweise allerdings kein vollständiger Tiefeneinzug des Pflugs gegeben und die mechanische Steinsicherung führte zu einem Auslenken der Pflugkörper nach oben. In den betroffenen Bereichen wurde der Erdbalken nicht sauber gewendet und die Oberfläche war nach dem Pflügen relativ uneben. Des Weiteren waren auch kein vollständiges Drehen der Wurzelstöcke und sauberes Unterpflügen der oberen Bodenschicht gegeben (Abbildung 47).



Abbildung 46: Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Pflug am 30. September 2019



Abbildung 47: Teilweise nicht vollständig gewendete bzw. eingemischte Wurzelstöcke in der Pflugvariante aufgrund eines mangelnden Tiefeneinzugs des Pflugs

Grubber

Die Bearbeitung in der Grubbervariante erfolgte auf ca. 20 bis 25 cm Tiefe (Abbildung 48). Die Arbeitsgeschwindigkeit war durch die relativ kurze Bearbeitungslänge auf ca. 7 km/h begrenzt. Ähnlich dem Pflug wurden die Wurzelballen durch den Grubber nicht zerkleinert. Wegen der trockenen Bodenverhältnisse war ein guter Misch- und Lockerungseffekt gegeben. Die Wurzeln wurden dabei teilweise umgedreht und eingemischt. Dennoch verblieb ein Großteil der Ernte- und Wurzelrückstände auf der Bodenoberfläche und die Wurzeln wurden nur teilweise für ein weiteres Vertrocknen enterdet. Dies könnte durch eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit oder eine zweite Überfahrt eventuell weiter gesteigert werden. Die Bodenoberfläche war bedingt durch die nachlaufenden Einebnungsscheiben und die Walze relativ eben. Die oberflächlich abgelegten Wurzelballen beeinträchtigten die nachfolgende Saatbettbereitung nicht. Die Aussaat der Triticale wurde jedoch stellenweise gestört (Abbildung 49).



Abbildung 48: Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber am 30. September 2019



Abbildung 49: Bodenoberfläche nach Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber auf ca. 20 bis 25 cm Arbeitstiefe

Fräse

Die trockenen Bodenbedingungen zum Zeitpunkt des Umbruchs der Silphiefläche im Versuchsjahr 2019 waren ideal für den Einsatz einer Fräse. Dadurch war eine sehr gute Zerkleinerung der Wurzeln möglich und es kam zu keiner Schmierschichtbildung. Mit der Fräse wurde bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 2 km/h und einer Zapfwelldrehzahl von 1000 U/min eine Arbeitstiefe von 7 bis 8 cm erreicht (Abbildung 50). Eine größere Arbeitstiefe war mit der verwendeten Fräse unter anderem wegen des trockenen Bodens nicht möglich. Wegen der geringen Vorfahrtsgeschwindigkeit wurden die Wurzelmasse sowie Ernterückstände auf Bearbeitungstiefe intensiv zerkleinert und eingemischt (Abbildung 51). Die an der Bodenoberfläche angelegten und teilweise seit der Ernte bereits wieder ausgetriebenen Knospen wurden dadurch allerdings nicht vollständig zerstört (Abbildung 52). Die sehr intensive, flache und nahezu ganzflächige Bearbeitung der Fräse hinterließ im Bearbeitungshorizont einen sehr feinen und lockeren Boden sowie eine relativ ebene Bodenoberfläche ohne größere Wurzelteile.



Abbildung 50: Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse am 30. September 2019



Abbildung 51: Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse auf ca. 7 bis 8 cm Arbeitstiefe



Abbildung 52: Mit der Fräse zerkleinerter Übergangsbereich von Wurzel zum Spross von Durchwachsener Silphie mit Knospenansätzen und intaktem Wiederaustrieb nach der Ernte

5.2.1.3 Durchwuchs und Entwicklung der Folgekulturen

5.2.1.3.1 Wintertriticale im Jahr 2020

Aussaat und Durchwuchs im Frühjahr

Saatbettbereitung und Aussaat der Wintertriticale im Versuchsjahr 2019 erfolgten einen Tag nach dem Umbruch am 1. Oktober. Die Saatbettbereitung wurde für eine optimale Einebnung in Bearbeitungsrichtung der Umbruchvarianten und somit quer zur späteren Saatrichtung durchgeführt. Aus diesem Grund musste die Fläche jedoch über die gesamte Breite bearbeitet werden, so dass auch auf den späteren Maisparzellen bereits eine Saatbettbereitung erfolgte. Die Fräsvariante hinterließ nach der Saatbettbereitung ein sehr feinkrümeliges und infolge der geringen Bodenfeuchte zu feines Saatbett. Die Ernterückstände und Wurzelreste waren durch das Fräsen gut zerkleinert und eingemischt, so dass die Triticale anschließend problemlos gesät werden konnte. Auch in der Pflugvariante waren nur wenige störende Wurzelstöcke vorhanden, da diese meist sauber gewendet und mit ausreichend Erde bedeckt waren. Die meisten großen Ernte- und Wurzelreste an der Bodenoberfläche zeigten sich in der Grubbervariante. Durch die Saatbettbereitung wurden diese meist enterdet und oberflächlich abgelegt, so dass bei nachfolgend trockener Witterung ein Vertrocknen durchaus gefördert werden könnte. Der starke Besatz mit großen, weitgehend intakten Wurzelstöcken an der Oberfläche in der Grubbervariante behinderte

jedoch die nachfolgende Aussaat deutlich und die angestrebte Saattiefe von 2 bis 3 cm konnte nicht gleichmäßig eingehalten werden, da die Scheibenschare der Sämaschine durch die Pflanzenreste immer wieder aus dem Boden gehoben wurden (Abbildung 53). In der Pflugvariante waren hingegen deutlich weniger Wurzelballen an der Oberfläche vorhanden, so dass dieses Problem dort kaum auftrat.



Abbildung 53: Behinderung des Sävorgangs durch an der Bodenoberfläche vorhandene Wurzelballen von Durchwachsener Silphie nach dem Umbruch mit einem Grubber

Kurz nach der Saat fielen etwa 7 mm Niederschlag, wodurch es insbesondere in der Pflugvariante zu einer relativ starken Verschlammung der Oberfläche kam. Die Aggregatstabilität im oberen Bereich der Krume war durch eine erhöhte biologische Aktivität in den anderen Varianten vermutlich deutlich höher. In der Fräsvariante war deshalb trotz der intensivsten Bearbeitung und des feinsten Saatbetts die geringste Verschlammung zu beobachten. Nichtsdestotrotz wurde in allen Parzellen am 14. Oktober ein gleichmäßiger Feldaufgang bonitiert. Sieben Tage nach dem Umbruch waren an der Bodenoberfläche bereits wieder zahlreiche Regenwurmrohren erkennbar, was auf einen hohen Regenwurmbesatz unter Durchwachsener Silphie hindeutet. Eine höhere Regenwurmanzahl bei Dauerkulturnutzung [43] und im speziellen auch Durchwachsene Silphie [22] wurde bereits in anderen Untersuchungen bestätigt. Die größte Anzahl an Regenwurmrohren nach dem Umbruch war auf den mit einer Fräse umgebrochenen Teilflächen vorzufinden (Abbildung 54). Durch die geringere Arbeitstiefe wurden vermutlich insbesondere die vertikalen Röh-

ren der tiefgrabenden Arten nicht so stark geschädigt. Darüber hinaus war im Gegensatz zur Pflugvariante durch zerkleinerte Ernte- und Wurzelreste ein besseres Nahrungsangebot an der Bodenoberfläche vorhanden.



Abbildung 54: Zahlreiche Regenwurmröhren an der Bodenoberfläche sieben Tage nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse

In der Grubbervariante waren bereits nach der Saatbettbereitung noch intakte Knospen an den oberflächlich eingearbeiteten Wurzelteilen sichtbar, da weder eine wirkliche Zerkleinerung noch ein deutliches Vergraben der Wurzelstöcke erfolgte. Ende Oktober waren in der Fräsvariante bereits frisch gekeimte Silphiepflanzen zu erkennen. Bis Ende November liefen insbesondere dort und teilweise auch in der Grubbervariante weitere Silphiepflanzen auf (Abbildung 55). In der Pflugvariante waren hingegen nur vereinzelt gekeimte Silphiepflanzen sichtbar. Dies ist auf die wendende Arbeitsweise des Pflugs und die Tatsache, dass Silphiesamen ausschließlich auf der Bodenoberfläche vorhanden waren, zurückzuführen. Auch der Anteil der wiederausgetriebenen Silphiepflanzen, deren Triebe noch eine Blattbildung zeigten, nahm bis Vegetationsende zu. Dabei war der höchste Besatz mit wiederausgetriebenen Pflanzen in der Grubbervariante gegeben (Abbildung 56). Daneben zeigten auch die mit der Fräse bearbeiteten Parzellen vereinzelt einen Wiederaustrieb. Insgesamt war der Besatz mit Silphietrieben allerdings auch in der Grubbervariante noch sehr niedrig (ca. 2 Triebe/m²), so dass die Konkurrenz trotz der bereits relativ großen Blätter im Herbst für die Triticale gering war.



Abbildung 55: *Im Herbst aufgelaufene Silphiepflanzen und geschädigte Triticalepflanzen mit verzögerter Entwicklung und kleineren, teilweise rosa bis violett gefärbten Blättern nach dem Silphieumbruch mit einer Fräse*



Abbildung 56: *Entwicklung der nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber im Jahr 2019 gesäten Triticale zu Vegetationsende am 28. November*

Die Vielzahl oberflächennah vorhandener Knospen und weitgehend intakter Wurzelstöcke der Altpflanzen in der Grubbervariante führten dazu, dass in dieser Variante im Frühjahr ein zahlreicher und rascher Wiederaustrieb erfolgte (Abbildung 57, Abbildung 58). In den gefrästen Parzellen erschienen bis Mitte März ebenfalls zahlreiche Triebe aus den zerkleinerten Wurzelteilen, die jedoch schwächer ausgebildet waren. Zusätzlich waren noch einige bereits im Herbst gekeimte Pflanzen vorhanden, die ebenfalls schwache Triebe ausbildeten. Dies führte dazu, dass zur ersten Durchwuchsbonitur am 18. März zu Beginn der Bestockung der Triticale (BBCH 21–22) ein signifikanter Einfluss der Umbruchmethode auf die gezählten Durchwuchstriebe bestand ($p < 0,0001$). Bei dieser ersten Triebzählung wurden alle Silphietriebe erfasst, die bis zu diesem Termin erschienen waren. In den gepflügten Triticaleparzellen war der Besatz mit Durchwuchstrieben signifikant niedriger als nach dem Einsatz des Grubbers und der Fräse. Wie sich nachfolgend zeigte, waren in der gepflügten Variante die Knospen aufgrund der wendenden Arbeitsweise deutlich tiefer vergraben, so dass die Triebe länger benötigten, bis sie die Oberfläche erreichten, und somit zu diesem Boniturtermin noch nicht erfasst wurden.



Abbildung 57: Kräftiger Silphiedurchwuchs nach dem Umbruch mit einem Grubber in nachfolgend gesäeter Wintertriticale am 6. April 2020

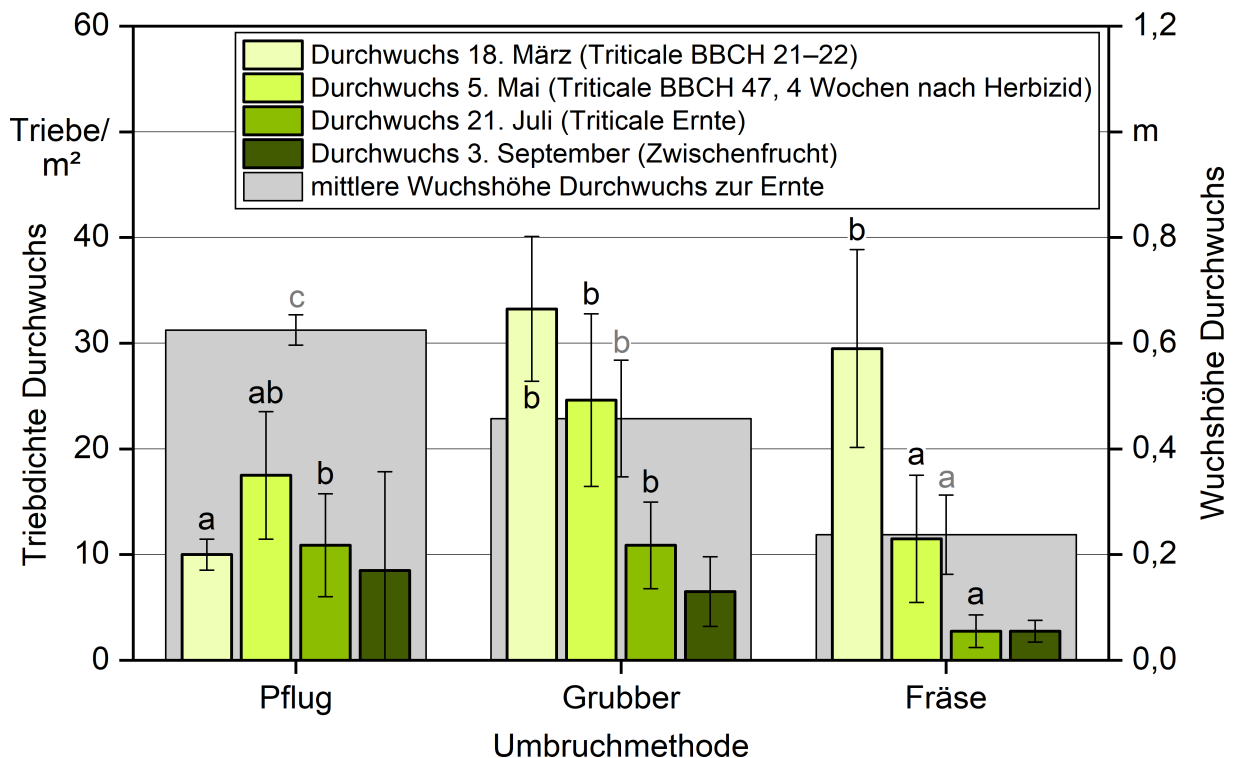


Abbildung 58: Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im ersten Jahr nach dem Umbruch in nachfolgend gesäeter Wintertriticale in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Herbizideinsatz

Im Herbst des Umbruchjahrs erfolgte zur Bekämpfung der Silphie und anderer Unkräuter/-gräser in den Triticaleparzellen kein Herbizideinsatz mehr, da Anfang November eine kühlere Witterungsphase mit vereinzelt Nachtfrost einsetzte. Zuvor verhinderte Niederschlag ein Befahren der Parzellen. Die Bekämpfung bzw. eine Schädigung der Silphietriebe durch ein bodenaktives Herbizid im Herbst würde vermutlich kaum funktionieren, da die Silphietriebe auch aus tieferliegenden Knospen entsprungen oder noch über ein ausgeprägtes Wurzelsystem verfügten. Ein weiteres Problem bestand darin, dass ab Anfang November die Triticale auf den mit der Fräse umgebrochenen Parzellen eine rosa bis violette Färbung der Blätter bis hin zu Verbräunungen zeigte (Abbildung 55). Um zusätzlichen Stress für die Pflanzen zu vermeiden, wurde der Herbizideinsatz in das Frühjahr verschoben. Des Weiteren waren die Pflanzen nach dem Umbruch mit der Fräse gegenüber den anderen beiden Umbruchmethoden deutlich in der Entwicklung zurück. Dieses Entwicklungsdefizit und eine geringere Bestandsdichte zeigten sich auch im Jahr 2020 bis zur Ernte (Abbildung 59). Eine rosa bis violette Färbung der Blattspitzen war auch an einigen Stellen der Triticaleparzellen in der Grubber- bzw. Pflugvariante des Silphieumbruchs zu beobachten, während nach dem Sidaumbruch bei der gleichen Sorte keinerlei Blattverfärbungen sichtbar waren.

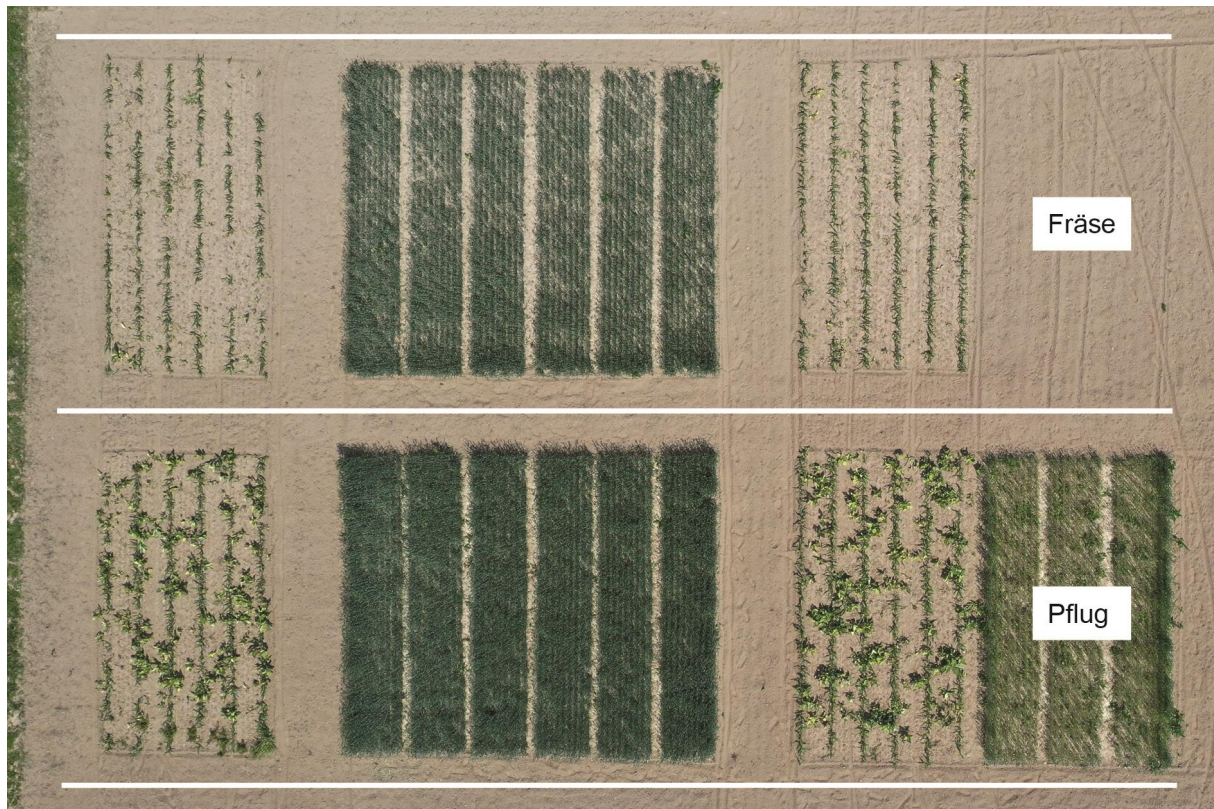


Abbildung 59: Blick auf einen Teilbereich des Silphieumbruchversuchs mit den Umbruchvarianten Fräse (obere Reihe) und Pflug (untere Reihe)

Da der negative Einfluss auf das Wachstum der Triticalepflanzen fast ausschließlich in der Fräsvariante vorhanden war und unmittelbar nach dem Feldaufgang noch keinerlei negative Einflüsse sichtbar waren, wird vermutet, dass Verbindungen mit einer schädlichen Wirkung auf das Pflanzenwachstum aus den zerkleinerten und teilweise bereits Abbauprozessen unterliegenden Wurzelteilen freigesetzt bzw. anschließend im Boden gebildet und von den Triticalepflanzen aufgenommen wurden. Die starke Zerkleinerung der Ernte- und Wurzelreste in der Fräsvariante hatte dabei offensichtlich einen entscheidenden Einfluss auf die Freisetzung oder Bildung der entsprechenden Stoffe.

Die Herbizidanwendung in Triticale zur Bekämpfung der allgemeinen Verunkrautung und des Silphiedurchwuchses erfolgte am 9. April. Die Triticalepflanzen hatten zu diesem Zeitpunkt drei bis vier Bestockungstriebe ausgebildet. Der Herbizideinsatz im Frühjahr in Getreide basiert überwiegend auf Blattherbiziden, wobei Vertreter der Acetolactat-Synthase-Hemmer (ALS-Hemmer), meist Sulfonylharnstoffe, dominieren. Aus diesem Grund wurde eine Mischung zweier Produkte dieser Gruppe gewählt. Für den Einsatz der überwiegend blattaktiven Mittel musste gewartet werden, bis die meisten Silphietriebe genügend Blattfläche für eine ausreichende Wirkstoffaufnahme ausgebildet hatten. Die erste sichtbare Schädigung der Silphietriebe durch die Herbizide war etwa zwei Wochen nach der Applikation festzustellen, wobei die Blätter eine ungleichmäßig grüne Färbung zeigten und sich teilweise die Blattränder aufrollten (Abbildung 60). Das Wachstum der Triebe kam jedoch bereits deutlich früher fast vollständig zum Erliegen. Die Hemmung des Triebwachstums

könnte zusätzlich durch die zunehmende Beschattung durch die schossenden Triticalepflanzen verstärkt worden sein. Durch die Frühjahrstrockenheit waren Wuchshöhe und Bestandsdichte der Triticale allerdings nur unterdurchschnittlich. Dennoch waren die Silphietriebe in den Triticaleparzellen Anfang Mai schwächer entwickelt als die in den Maisparzellen nach der Saat bis zu diesem Zeitpunkt erschienenen Triebe. Im Gegensatz zu den üblichen Ackerunkräutern starben jedoch nur wenige, überwiegend kleine Silphietriebe in den Triticaleparzellen als Folge der Herbizidbehandlung ab. Eine deutlich stärkere Schädigung war an den im Frühjahr und im Herbst gekeimten Silphiepflanzen zu beobachten. Eher schwache Triebe und nur schlecht etablierte im Herbst gekeimte Pflanzen waren überwiegend in der Fräs- und in geringerem Umfang auch in der Grubbervariante vorzufinden, so dass dort der Herbizideinsatz zu einer deutlichen Reduktion der Triebzahlen im Vergleich zur Bonitur Mitte März führte (Abbildung 58). In der Pflugvariante nahmen dagegen die Triebzahlen eher zu, da durch das Unterpflügen einige Triebe erst später die Oberfläche erreichten. Diese wurden somit teilweise nicht bei der Herbizidapplikation erfasst. Hierzu gehörten vermutlich insbesondere die Triebe, die ab Mitte Mai ein deutliches Schossen zeigten, während von der Herbizidanwendung geschädigte Triebe weiterhin kaum Zuwachs und so gut wie kein Längenwachstum aufwiesen. Einzelne kräftige Triebe waren auch in den anderen beiden Umbruchvarianten zu beobachten. Ein vollständiges Abtöten kräftiger Silphietriebe, die aus den Knospen der Altpflanzen entsprangen, konnte in keiner Umbruchvariante erreicht werden. Sulfonylharnstoffe erscheinen somit weniger gut für eine Bekämpfung von Silphiedurchwuchs geeignet.



Abbildung 60: *Silphietriebe in Triticale mit leichten Herbizidschäden am 21. April 2020, etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation im Frühjahr*

Im weiteren Verlauf bis zu Beginn der Abreife der Triticale Ende Juni zeigten die Durchwuchstriebe ein sehr verhaltenes Wachstum (Abbildung 61). Bis auf einzelne kräftige Triebe war das Wachstum deutlich geringer im Vergleich zum Durchwuchs in den Maisparzellen bis zur dortigen Herbizidbehandlung. Einzelne kräftige Triebe waren bei den gefrästen Parzellen fast nur in einer Wiederholung enthalten, was darauf hindeuten könnte, dass dort durch eine zu geringe Arbeitstiefe einige Wurzelstöcke nicht ausreichend tief zerkleinert wurden. Im Juli nahm das Wachstum der Triebe wahrscheinlich durch den zunehmenden Lichteinfall im Zuge der Abreife der Triticale wieder deutlich zu.



Abbildung 61: Unterdrückung des Silphiedurchwuchses durch Beschattung während der Schossphase der Triticale im Mai

Bei der Bonitur des Durchwuchses zur Ernte wurden nur die kräftigeren Triebe erfasst (Abbildung 58). Sehr kleine Triebe mit nur ein bis maximal zwei Blattpaaren, die kaum Konkurrenz zum Getreide darstellten, wurden nicht berücksichtigt. Diese waren überwiegend in der gefrästen und gegrubberten Variante vorhanden und stammten somit vermutlich von im Herbst oder Frühjahr gekeimten Samen. Die Umbruchmethode zeigte zur Ernte der Triticale einen signifikanten Einfluss auf die Triebdichte des Silphiedurchwuchses ($p < 0,0001$). In den gepflügten und gegrubberten Parzellen war mit etwa 11 Trieben/m² ein signifikant höherer Besatz als in den gefrästen Parzellen mit lediglich 3 Trieben/m² vorzufinden. Auch die mittlere Wuchshöhe dieser Triebe zum Erntetermin wurde signifikant durch die Umbruchmethode beeinflusst ($p < 0,0001$). Die Wuchshöhe in der Fräsvariante lag mit etwa 24 cm signifikant unter derjenigen der anderen beiden Umbruchmetho-

den. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Wuchshöhe des Durchwuchses bestanden auch zwischen Pflug- und Grubbervariante. Nach dem Umbruch mit dem Pflug wiesen die Silphietriebe mit 63 cm die größte mittlere Wuchshöhe auf. Die mittlere Wuchshöhe je Parzelle wurde dabei durch Messung mehrerer Einzeltriebe ermittelt und ist mit einer relativ großen Unsicherheit verbunden. Insgesamt zeigte sich dennoch deutlich, dass in der Pflugvariante der Durchwuchs das kräftigste Wachstum aufwies und im ersten Jahr nach dem Umbruch zur Ernte der Triticale häufig den Getreidebestand überragte (Abbildung 62). Außerdem war dort eine hohe Besatzdichte mit Durchwuchstrieben gegeben, so dass diese Variante im Hinblick auf den Durchwuchsbesatz beim Anbau von Triticale bzw. Getreide als Folgekultur am wenigsten geeignet scheint.



Abbildung 62: Silphiedurchwuchs nach dem Umbruch mit dem Pflug in nachfolgend gesäeter Triticale kurz vor deren Ernte am 14. Juli 2020

Ernte

Die Ernte der Triticaleparzellen im Versuchsjahr 2020 wurde am 30. Juli mit einem Parzellenmähdrescher durchgeführt. Die teilweise deutlich den Getreidebestand überragenden Silphietriebe verursachten keine Probleme beim Dreschen. Wicklungen oder Verstopfungen am Schneidwerk oder der Dreschtrommel traten nicht auf. Wegen der sehr trockenen Aprilwitterung war das Wachstum der Triticale nicht optimal. Insgesamt konnte deshalb in den gedüngten Varianten nur ein Kornertrag von 53,6 dt/ha (86 % TS) erreicht werden. Signifikante Unterschiede im Hinblick auf die Umbruchverfahren und die unterschiedliche Vorgeschichte der Düngung waren nicht gegeben. Der Strohertrag lag im Durchschnitt

aller gedüngten Varianten bei 34,5 dt/ha (86 % TS) und wies ebenfalls eine hohe Variabilität auf, so dass wiederum kein signifikanter Einfluss der Umbruchmethode nachzuweisen war. Die Erträge bewegten sich deutlich unterhalb des Niveaus, das an diesem sehr guten Ackerbaustandort möglich wäre. In den ungedüngten Varianten wurde im Mittel ein Ertrag von 22,6 dt/ha erreicht ($n = 4$). Einzelne Umbruchmethoden wiesen dabei nur eine Beobachtung auf, weshalb eine varianzanalytische Auswertung nicht möglich war. Dennoch zeigte sich tendenziell die gleiche Abstufung der Erträge wie in den gedüngten Varianten, wobei erneut nach dem Einsatz der Fräse der Korn-ertrag am niedrigsten war. Gleiches gilt entsprechend für die Stroherträge in den ungedüngten Triticaleparzellen. Im Mittel wurde dort ein Strohertrag von 23,2 dt/ha erzielt, so dass ein relativ enges Korn-Stroh-Verhältnis von 1 : 0,93 gegeben war. Das Korn-Stroh-Verhältnis in den gedüngten Varianten lag durchschnittlich bei 1 : 0,67 und somit im normalen Bereich. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Umbruchverfahren bestanden nicht.

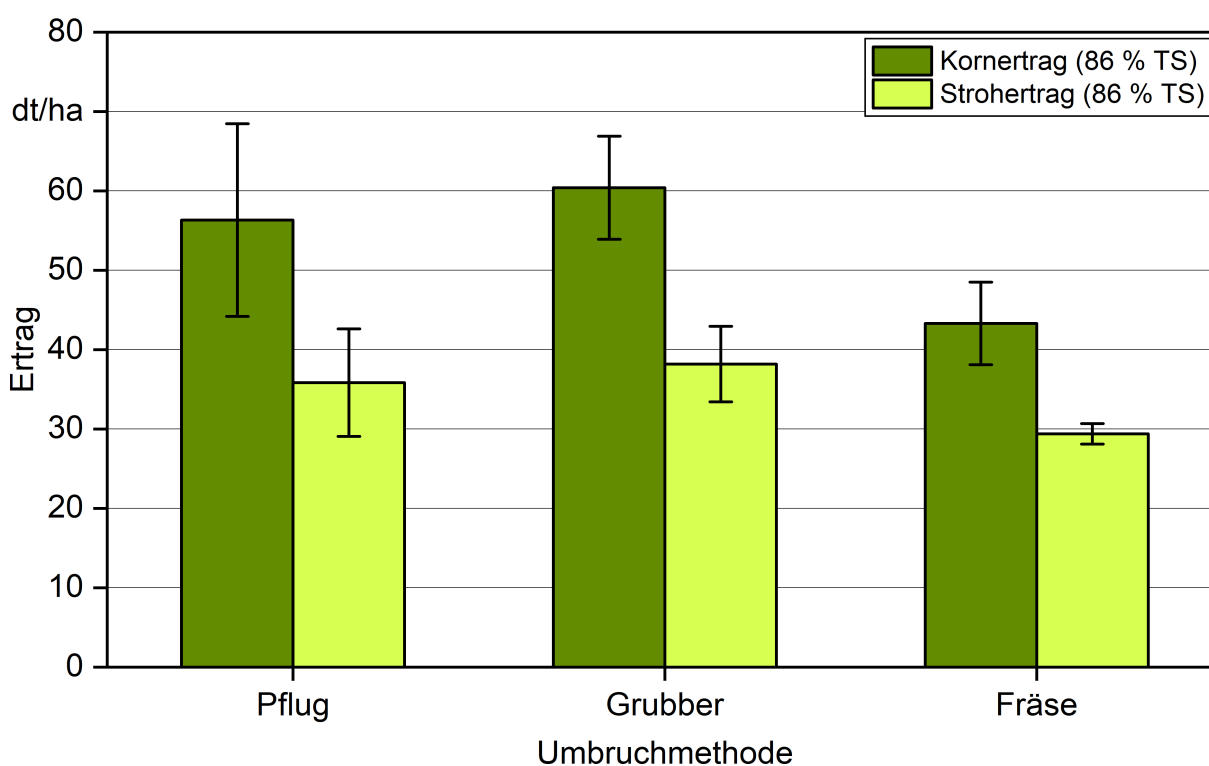


Abbildung 63: Korn- und Stroherträge von Triticale (86 % TS) nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Das niedrige Ertragsniveau der Triticale im Versuchsjahr 2020 ist einerseits auf die starke Frühjahrstrockenheit zurückzuführen. Dadurch kam die erste mineralische N-Düngung erst deutlich später zur Wirkung, was zu einer reduzierten Bestandsdichte führte (Tabelle 18). In den die mit der Fräse umgebrochenen Parzellen wurde das Wachstum der Triticalepflanzen aus bisher ungeklärter Ursache zusätzlich gehemmt. Diese Wuchsdepression machte sich auch in einer tendenziell niedrigeren Bestandsdichte und gegenüber der Pflugvariante signifikant niedrigeren Wuchshöhe bemerkbar. Dennoch war das Ertragsni-

veau auch bei den anderen Umbruchverfahren deutlich niedriger als das eines nahegelegenen Winterweizenversuchs, in dem bei etwas höherer mineralischer N-Düngung ein Ertrag von 73,8 dt/ha erreicht wurde. Das Ertragsdefizit im Versuch zum Umbruch von Durchwachsener Silphie könnte somit auf eine Wasser- und Nährstoffkonkurrenz der Silphietriebe zurückzuführen sein. Diese wurde durch die witterungsbedingt schlechte Bestockung und somit geringere Konkurrenzkraft der Triticale verstärkt. Anscheinend wurden durch die intakt gebliebenen Silphiewurzelreste weiterhin Nährstoffe aufgenommen oder bei der Umsetzung von abgestorbenen Wurzeln und Ernterückständen festgelegt.

Tabelle 18: Bestandsdichte, Wuchshöhe und Tausendkornmasse (TKM) von Triticale mit und ohne Stickstoffdüngung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey

Umbruchverfahren	Bestandsdichte	Wuchshöhe Blüte	TKM
Einheit	Ähren/m ²	m	g
mit N-Düngung			
Pflug	390	0,72 b	48,8
Grubber	392	0,69 ab	47,8
Fräse	353	0,65 a	47,3
ohne N-Düngung (Mittelwert)			
	374	0,65	43,2

5.2.1.3.2 Mais im Jahr 2020

Aussaat und Durchwuchs im Frühjahr

Die Aussaat der Folgekultur Mais im ersten Jahr nach dem Umbruch erfolgte am 16. April 2020. Die bereits im Herbst nach dem Umbruch saarfertig bearbeiteten Parzellen wurden am 26. März und unmittelbar vor der Aussaat noch einmal flach mit einer Kreiselegge bearbeitet, um den bis dahin erschienenen Dauerkulturdurchwuchs und Unkräuter zu beseitigen. Die flache Bearbeitung mit der Kreiselegge erwies sich dabei allerdings in der gegrubberten und gepflügten Variante nicht als ausreichend, um den bis zu diesem Zeitpunkt erschienenen Durchwuchs vollständig zu bekämpfen. Wie in Abbildung 64 erkennbar ist, war bereits zu Vegetationsbeginn vor diesen Arbeitsgängen ein signifikanter Einfluss der Umbruchmethode auf den Besatz mit Durchwuchstrieben gegeben ($p < 0,0001$). Es ist zu beachten, dass die in dieser Abbildung aufgeführten Triebdichten nur Triebe und keine frisch gekeimten Pflanzen beinhalten. Darüber hinaus wurden zum Erntetermin nur die größeren Triebe mit mindestens zwei Blattpaaren berücksichtigt.

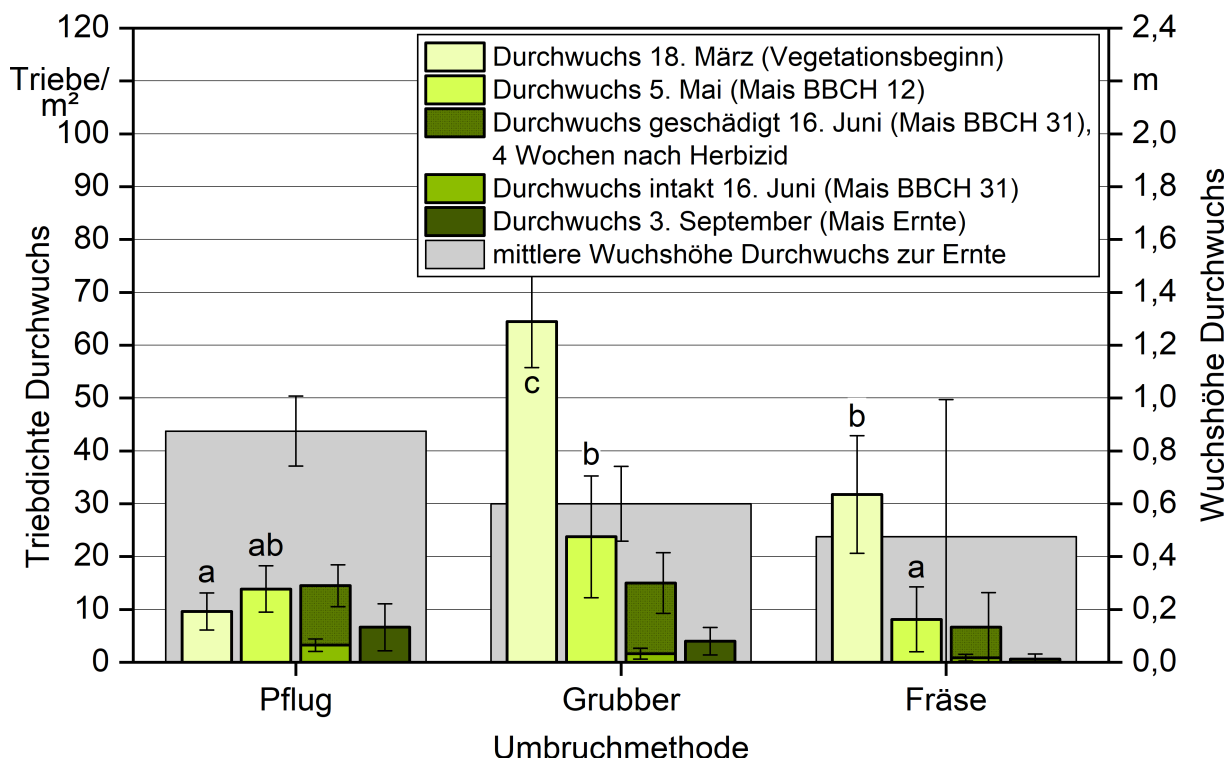


Abbildung 64: Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im ersten Jahr nach dem Umbruch in nachfolgend gesättem Mais in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Die höchste Triebdichte war Mitte März in den mit dem Grubber umgebrochenen Varianten vorzufinden, die zweithöchste in den gefrästen Parzellen. Dies ist wie bei den Triticaleparzellen vermutlich darauf zurückzuführen, dass in diesen beiden Varianten eine Vielzahl an Pflanzen im Herbst des Vorjahrs gekeimt war. Nach dem Wiederaustrieb konnten diese nicht eindeutig von Trieben, die aus Knospen der Altpflanzen entstammten, unterschieden werden und wurden deshalb miterfasst.

Etwa zwei Wochen nach der zweiten Saatbettbereitung und Aussaat des Mais war die Triebdichte in den gegrubberten und gefrästen Varianten bereits deutlich reduziert, da die im Herbst gekeimten Silphiepflanzen durch diese Bearbeitungsmaßnahmen fast vollständig entfernt worden waren. Der Bekämpfungserfolg beruhte dabei überwiegend auf einem Vertrocknen der herausgerissenen Pflanzen, die noch kein umfangreiches Wurzelsystem ausgebildet hatten. Außerdem wurden wegen der sehr trockenen Witterung im April in den gefrästen Parzellen auch einige Triebe, die aus zerkleinerten Wurzelteilen entsprungen waren, beseitigt. Kräftige Triebe hingegen wurden meist wieder regeneriert oder trieben erneut aus. Außerdem erschienen insbesondere in den gepflügten Parzellen weitere Triebe, was darauf zurückzuführen war, dass die Triebe der tiefer untergepflügten Knospen die Bodenoberfläche erst verzögert erreichten. Dadurch lässt sich der Anstieg in den Triebzahlen in den gepflügten Varianten zwischen den Boniturterminen Mitte März und Anfang Mai erklären. Anfang Mai hatte die Umbruchmethode weiterhin einen signifikanten

Einfluss auf die Triebdichte ($p = 0,0037$), wobei nach dem Umbruch mit dem Grubber weiterhin signifikant mehr Silphietriebe im Vergleich zu den gefrästen Parzellen festzustellen waren. In der gegrubberten und gefrästen Variante liefen außerdem im April weitere Silphiesamen auf, die bei den Bonituren allerdings nicht miterfasst wurden. Der größte Anteil an kräftigen Trieben war Anfang Mai in den gegrubberten und gepflügten Parzellen vorzufinden. Die größeren Reserven in den weitgehend intakten Wurzelstöcken der Altpflanzen in diesen beiden Varianten führten somit vermutlich dazu, dass dort kräftigere Triebe ausgebildet werden konnten (Abbildung 65). Diese erreichten in der gepflügten Variante aus über 20 cm Tiefe die Oberfläche, was zu einem verzögerten Erscheinen führte (Abbildung 66).



Abbildung 65: *Kräftiger und zahlreicher Silphiedurchwuchs nach dem Auflaufen des Mais (BBCH 12) am 5. Mai 2020 in den gegrubberten (oben rechts) und gepflügten (unten links) Parzellen im Vergleich zum Umbruch mit einer Fräse (oben links und unten rechts)*



Abbildung 66: Kräftiger Silphiedurchwuchstrieb aus tief eingearbeiteten Knospen in der gepflügten Variante (links) und weniger kräftige Triebe aus zerkleinerten, flach eingemischten Wurzelteilen nach dem Umbruch mit der Fräse (rechts) am 7. Mai 2020

Herbizideinsatz

Anfang Mai zeigten die Silphietriebe in den Maisparzellen ein rasches Wachstum, so dass ein Herbizideinsatz zunehmend erforderlich wurde, um eine Konkurrenz gegenüber dem Mais zu vermeiden. Die Applikation überwiegend blattaktiver Herbizide erfolgte am 20. Mai und damit später als ursprünglich geplant. Eine ausreichende Blattfläche für eine gute Wirkstoffaufnahme wäre bereits etwa zehn Tage vorher vorhanden gewesen. Die Silphietriebe hatten zum Zeitpunkt der Ausbringung bereits etwa BBCH 32 und eine Wuchshöhe von ca. 30 cm in den gegrubberten und gepflügten Varianten und ca. 15 cm in den gefrästen Varianten erreicht und stellten teilweise bereits eine deutliche Konkurrenz für die Maispflanzen dar. Eine Woche nach der Herbizidanwendung waren an den Silphietrieben deutliche Blattschäden sichtbar. Aufgrund der verwendeten Fotosynthese- und Carotinoidbiosyntheseinhibitoren (Wirkstoffgruppe: Triketone) waren meist Nekrosen der unteren Blätter sowie eine Chlorotisierung bis hin zu einer fast vollständigen Weißfärbung der oberen Blätter und des Vegetationskegels festzustellen (Abbildung 67).



Abbildung 67: Durch Herbizideinsatz in Mais geschädigte kräftige Silphietriebe in einer mit dem Pflug umgebrochenen ehemaligen Silphieparzelle am 3. Juni 2020 etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation

Bei größeren Silphietrieben, die zum Zeitpunkt der Herbizidausbringung bereits mehrere Blätter ausgebildet hatten, waren die Symptome meist auf die oberen Blätter beschränkt. Die unteren Blätter wurden vermutlich durch Beschattung der darüberliegenden nicht ausreichend benetzt. Darüber hinaus waren in den mit dem Pflug oder Grubber umgebrochenen Varianten teilweise auch Triebe vorhanden, die keinerlei Schädigung zeigten (Abbildung 68). Diese Triebe erreichten trotz des späten Termins vermutlich erst nach der Herbizidapplikation die Bodenoberfläche und wurden nicht erfasst. Eine Schädigung der Silphietriebe durch die enthaltene Bodenherbizidkomponente war aufgrund der meist tief liegenden Wurzeln nicht zu erwarten. Einzelne ungeschädigte Triebe waren allerdings bereits relativ weit entwickelt, so dass ein späteres Erscheinen an der Bodenoberfläche eher unwahrscheinlich ist und vielmehr von einer ungenügenden Benetzung und somit Wirkstoffaufnahme oder verringerten Sensitivität ausgegangen werden muss (Abbildung 69).



Abbildung 68: Nach dem Herbizideinsatz an der Bodenoberfläche erschienene Silphietriebe ohne Herbizidschädigung am 3. Juni 2020 in einer mit dem Pflug umgebrochenen Silphieparzelle



Abbildung 69: Weitgehend intakter und kräftiger Silphietrieb neben stark geschädigten und teilweise fast vollständig abgestorbenen Trieben am 3. Juni 2020, etwa zwei Wochen nach dem Herbizideinsatz in den Maisparzellen

Bis Mitte Juni wiesen die sichtbar durch die Herbizide geschädigten Triebe einen Wachstumsstillstand auf. Allerdings regenerierten sich zu diesem Zeitpunkt die obersten Blätter und der Vegetationskegel vor allem bei kräftigen Trieben bereits wieder (Abbildung 70). Nur einzelne Triebe waren bis dahin vollständig abgestorben und abgeknickt, so dass zu diesem Termin die Auszählung der Triebzahlen nach dem Herbizideinsatz durchgeführt wurde. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden konnten nicht nachgewiesen werden, wenn auch bei den intakten Trieben ein signifikanter Einfluss dieses Versuchsfaktors gegeben war ($p = 0,0238$). In den gepflügten Parzellen waren allerdings tendenziell mehr intakte Triebe vorhanden als nach dem Umbruch mit der Fräse. Die gesamte Anzahl an Durchwuchstrieben (geschädigt und intakt) blieb im Vergleich vor dem Herbizideinsatz in den gepflügten Varianten weitgehend unverändert oder nahm sogar weiter leicht zu. Folglich wurden dort kaum Silphietriebe durch die Herbizide vollständig abgetötet oder sie wurden durch neue ersetzt. Anders in den gegrubberten Parzellen, wo die zum Boniturtermin noch vorhandenen Triebe tendenziell niedriger als bei der Auszählung nach dem Feldaufgang waren. In der gefrästen Variante wurden die ohnehin bereits niedrigen Triebdichten kaum weiter reduziert. Die Umbruchmethoden Grubber und Pflug lagen damit bezüglich des Durchwuchsbesatzes in etwa auf gleichem Niveau und etwa doppelt so hoch wie in den gefrästen Parzellen.



Abbildung 70: Beginnende Regeneration der durch den Herbizideinsatz in Mais geschädigten Silphietriebe am 16. Juni 2020, etwa vier Wochen nach der Herbizidanwendung

Gegen Ende Juni erreichte der Mais die Phase seines stärksten Längenwachstums und überwuchs die Silphietriebe deutlich. Diese wiederum regenerierten sich langsam von der Herbizidschädigung und zeigten weiterhin kaum Wachstum, wobei die unteren Blätter meist abstarben (Abbildung 71). In einer Parzelle wurde bei der Herbizidbehandlung eine Arbeitsbreite von 1,5 m versehentlich ausgelassen. In diesem Bereich wird im Vergleich zu den restlichen Parzellen der Effekt der Herbizidbehandlung deutlich und dessen Notwendigkeit sichtbar. Durch die Herbizidmaßnahme wurde das Wachstum der Triebe stark reduziert, so dass sich die Maispflanzen weitgehend ungestört entwickeln konnten und den Trieben schließlich davonwuchsen. Optimal wäre allerdings wahrscheinlich ein auf zwei Termine aufgeteilter Herbizideinsatz gewesen. Die erste Applikation hätte dabei möglichst frühzeitig erfolgen müssen, sobald bei den meisten Trieben bereits ein Blattpaar vollständig ausgebildet war. Die Folgebehandlung hätte bei normaler Applikationstechnik bis zum Vier-Blatt-Stadium des Maises erfolgen können. Über die Anwendung von Unterblattspritzverfahren wären darüber hinaus, je nach Zulassung der verwendeten Herbizide, auch spätere Einsatztermine denkbar.



Abbildung 71: Langsame Regeneration der durch den Herbizideinsatz geschädigten Silphietriebe, überwachsen von den Maispflanzen, gegen Ende Juni im ersten Jahr nach dem Umbruch

Die Maispflanzen überwachsen im weiteren Verlauf bis zur Abreife die Silphietriebe weiter. Diese wiederum konnten sich vor allem in den gepflügten und gegrubberten Parzellen regenerieren. Nach dem Umbruch mit der Fräse stellte sich dagegen meist keine vollstän-

dige Regeneration der Triebe ein. Wie in den entsprechenden Triticaleparzellen traten auch bei Mais vereinzelt sehr kräftige Triebe auf, die vermutlich aus unvollständig erfassten Wurzelstöcken der Altpflanzen entsprangen.

Bis zum Erntetermin Anfang September nahm die Anzahl konkurrenzwürdiger Durchwuchstriebe in allen Varianten weiter ab und betrug zum Erntetermin ca. 6,6 Triebe in den gepflügten, 4,0 Triebe in den gegrubberten und 0,6 Triebe in den gefrästen Parzellen je Quadratmeter. Bei den kräftigen und zudem zeitlich versetzt erschienen Silphietrieben in den gepflügten Parzellen wurde demzufolge nur ein Bekämpfungserfolg von ca. 50 % erreicht. Nach dem Umbruch mit dem Grubber war ein Bekämpfungserfolg von 84 % und bei der Fräse von über 90 % gegeben. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden waren nicht nachzuweisen. Die weitere Abnahme bzw. Verkümmern einzelner Silphietriebe ist vermutlich auf die zunehmende Beschattung und Wasserkonkurrenz durch den Mais zurückzuführen. Durch die Sommertrockenheit zeigten einige Triebe deutliche Welkeerscheinungen, da diese offenbar noch kein ausreichendes Wurzelsystem ausgebildet hatten. An den Maispflanzen waren hingegen keine Trockenstresssymptome erkennbar, so dass wegen des hohen Wasserspeichervermögens des Bodens am Versuchsstandort die Wasserkonkurrenz durch die Durchwuchstriebe offenbar nicht bedeutend war. Die kräftigsten Triebe waren in den gepflügten Parzellen vorzufinden. Dort war mit ca. 88 cm tendenziell auch die größte durchschnittliche Wuchshöhe der Silphietriebe zum Erntezeitpunkt gegeben. In den gefrästen Parzellen lagen dagegen überwiegend schwächere Triebe vor, die sich bereits nach dem Herbizideinsatz schlechter regenerieren konnten und bis zur Maisernte abstarben oder verkümmerten. Folglich war in dieser Variante zum Erntetermin kaum noch Durchwuchsbesatz vorhanden. Die mittlere Wuchshöhe der wenigen noch vorhandenen kräftigen Triebe war zudem mit ca. 48 cm deutlich niedriger.

Wie in den Parzellen mit Maisansaat zeigte sich auch in den Parzellen, die für eine regelmäßige N_{\min} -Untersuchung ohne Bewuchs gehalten werden sollten, ein starker Silphiedurchwuchs, wenn der Umbruch mit dem Pflug oder Grubber erfolgt war. Die unbewachsenen Parzellen wurden im Frühjahr zusammen mit den Maisparzellen zweimal flach mit einer Kreiselegge bearbeitet und waren somit direkt mit den Maisparzellen vergleichbar. In der gepflügten Variante erreichten Triebe ebenfalls aus bis über 20 cm Tiefe die Oberfläche. Dies war auch möglich, selbst wenn die Wurzelballen durch das Pflügen gewendet wurden. Nach dem Einsatz des Grubbers waren die Wurzelstöcke der Silphiepflanzen weniger tief vergraben, so dass die Durchwuchstriebe eine geringere Strecke bis zur Bodenoberfläche zurücklegen mussten. Der zeitliche Abstand zwischen der letzten Bearbeitung und dem Erscheinen des Durchwuchses war somit etwas kürzer. Die Durchwuchstriebe in der gegrubberten Variante waren aber ähnlich kräftig wie in der Pflugvariante. Die meist weitgehend intakten oberen Wurzelstrukturen hatten in beiden Varianten ausreichend Reservestoffe für den Wiederaustrieb bereitstellen können. In den gefrästen Parzellen boten die zerkleinerten Wurzelstücke vermutlich deutlich weniger Reservestoffe für die Triebausbildung, so dass diese wie auch in den Maisparzellen einen geringeren Stängeldurchmesser und kleinere Blätter aufwiesen (Abbildung 66).

Ein ähnliches Bild konnte beim Umbruch eines weiteren Dauerkulturversuchs des TFZ beobachtet werden. In diesem Versuch war auch eine Variante mit Durchwachsener Silphie enthalten, die im Jahr 2015 etabliert wurde. Der Umbruch dieser Fläche erfolgte am 9. April 2020 mit einer krumentief arbeitenden Fräse, die den Boden bis auf 30 cm Tiefe bearbeitete und durchmischte. Wegen der großen Arbeitstiefe war hierfür ein entsprechend hoher Energieverbrauch gegeben. Durch das tiefe Fräsen wurden die Wurzeln von Durchwachsener Silphie ebenfalls zerkleinert. Die daraus resultierenden Wurzelstücke fielen bei der tiefen Bearbeitung jedoch etwas größer aus. Dafür wurden die Pflanzenreste bis auf die Bearbeitungstiefe von 30 cm eingemischt. Wie nach dem Einsatz des Pflugs konnten intakte Knospen auch in dieser Tiefe Triebe ausbilden, die die Bodenoberfläche erreichten (Abbildung 72). Diese Triebe waren etwas kräftiger als in den flach gefrästen Varianten des hier behandelten Versuchs, was eventuell auch am Zeitpunkt des Umbruchs gelegen haben könnte.



Abbildung 72: Silphiedurchwuchs aus zerkleinerten Wurzelteilen mit unterschiedlich langen unterirdischen Sprossabschnitten am 3. Juni 2020, nach dem Umbruch mit einer krumentief arbeitenden Fräse Anfang April 2020

Ein sehr tiefes Fräsen brachte somit hinsichtlich Anzahl und Wuchskraft der Durchwuchstriebe keinen entscheidenden Vorteil gegenüber einer flachen Bearbeitung. Zur Ernte der nachfolgend gesäten Mais-Sorghum-Mischung waren eher mehr, aber ausschließlich kleine Triebe ohne ausgeprägte Blattbildung und stärkeres Höhenwachstum vorhanden. Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass bei einer flachen Bearbeitung mit einer Fräse auf

die konstante Einhaltung einer ausreichenden Arbeitstiefe geachtet werden muss, damit keine intakten Wurzelstrukturen mit Erneuerungsknospen zurückbleiben. Entscheidend für ein optimales Ergebnis des Fräseinsatzes im Frühjahr vor der Saat war, dass der Boden wegen der trockenen Aprilwitterung eine optimale Bodenfeuchte für die Bearbeitung aufwies. Nach dem Fräsen war der Boden im Bearbeitungshorizont allerdings stark überlockert, ohne jegliche Struktur und somit stark erosionsgefährdet. Bis zur nachfolgenden Ansaat musste gewartet werden, bis sich der Boden durch Niederschläge gesetzt hatte. Eine gute Befahrbarkeit war dennoch auch bei der Ernte noch nicht gegeben. Eine tiefe Bearbeitung mit der Fräse ist deshalb auch bei sehr trockenen Bedingungen problematisch und bei feuchten Bedingungen ohnehin nicht zu empfehlen.



Abbildung 73: Schwach entwickelter Silphiedurchwuchs am 8. Oktober 2020 nach der Ernte einer Mais-Sorghum-Mischung und dem vorausgegangenem Umbruch mit einer krumentief arbeitenden Fräse im Frühjahr

Ernte

Im Durchschnitt der gedüngten Parzellen wurde ein Maisertrag von 225,0 dt TM/ha erreicht (Abbildung 74). In den ungedüngten Parzellen lag der Ertrag im Mittel bei 178,7 dt TM/ha, wobei beachtet werden muss, dass dort ebenfalls eine N-Zufuhr über die Unterfußdüngung zur Saat erfolgte. Auf der angrenzenden Praxisfläche hätte ebenfalls keine N-Düngung durchgeführt werden sollen. Neben der Unterfußdüngung zur Saat wurde dort zusätzlich eine mineralische N-Düngung ausgebracht, so dass ein mittleres Ertragsniveau von 233,8 dt TM/ha erzielt wurde. Trotz höherer N-Düngung in den gedüng-

ten Maisparzellen der Umbruchfläche waren dort die Maiserträge tendenziell niedriger als in den Praxisparzellen. Dies deutet erneut darauf hin, dass dort die N-Nettomineralisation höher war. Sowohl auf der ehemaligen Silphiefläche als auch auf den Praxisparzellen befanden sich die Maiserträge im Bereich des standorttypischen Niveaus und waren vergleichbar mit denen der Maisreferenz des nahegelegenen Sorghumsorten-Screenings des TFZ. Die Ernte wurde etwas verspätet durchgeführt und infolge der trocken-warmen Witterung stiegen die TS-Gehalte auf Werte deutlich über 40 % an.

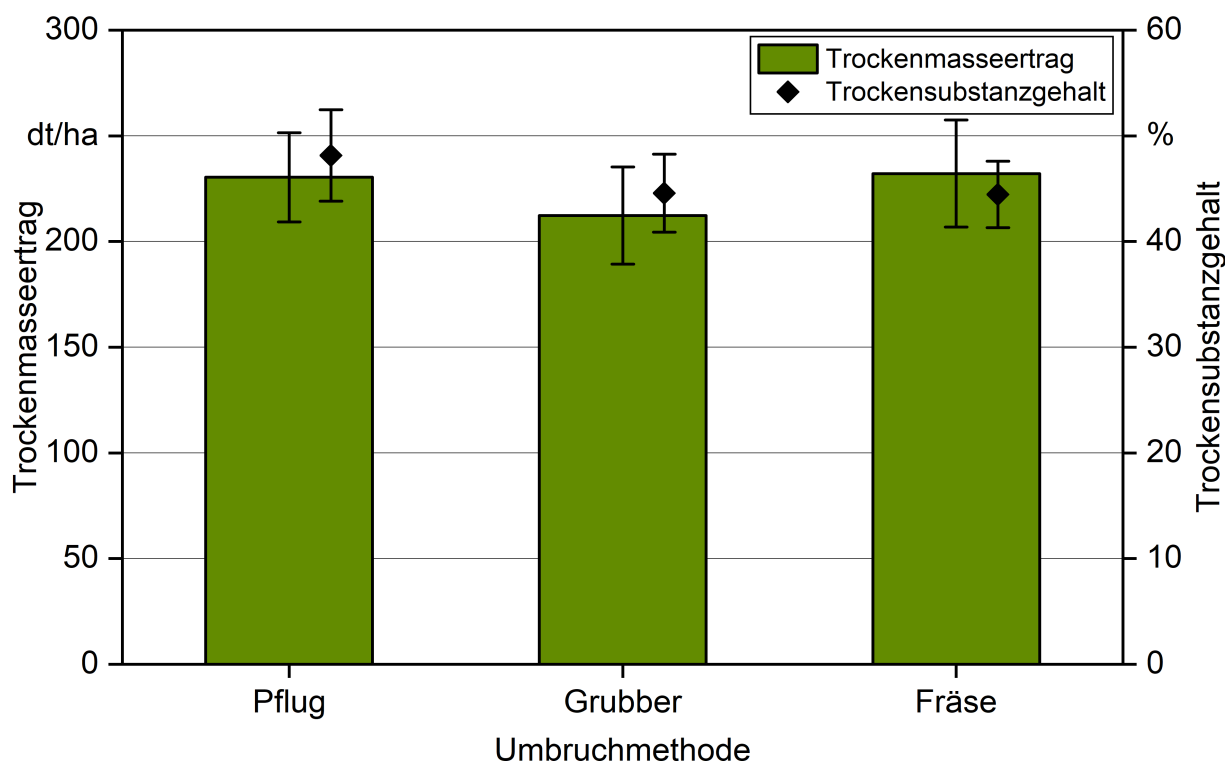


Abbildung 74: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Im Hinblick auf die verschiedenen Umbruchmethoden zeigte sich ein signifikanter Einfluss auf den Trockenmasseertrag ($p = 0,0419$, Abbildung 74). Signifikante Mittelwertdifferenzen (Tukey) waren allerdings nicht vorhanden. Bei einem Umbruch mit dem Pflug und der Fräse wurden tendenziell höhere Erträge im Vergleich zur Grubbervariante erreicht. Ein signifikanter Einfluss auf den TS-Gehalt war hingegen nicht vorhanden, obwohl dieser in den gepflügten Parzellen tendenziell höher war. Die ertraglichen Unterschiede hingegen könnten darauf zurückzuführen sein, dass in den gepflügten Parzellen durch die intensive Lockerung eine höhere N-Mineralisation gegeben war, wie sich tendenziell auch bei der Betrachtung der Mengen mineralischen Stickstoffs im Boden zeigte. Zugleich war ein deutlich höherer Besatz mit Silphietrieben vorzufinden (Abbildung 75), während in den gefrästen Varianten zur Ernte bis auf einzelne kräftige Triebe kaum Durchwuchs vorhanden war (Abbildung 76). Die Nettomineralisation war dort vermutlich geringer, was die Vorteile der geringeren Nährstoffkonkurrenz durch den Durchwuchs eventuell wieder ausglich.



Abbildung 75: Silphiedurchwuchs in Silomais Anfang September 2020, nach dem Umbruch der Dauerkultur mit einem Pflug im Herbst des Vorjahrs



Abbildung 76: Bis auf einzelne kräftige Silphietriebe weitgehend durchwuchsfreie Silomaisparzelle Anfang September 2020, nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse im Herbst des Vorjahrs

5.2.1.3.3 Mais im Jahr 2021

Aussaat und Durchwuchs im Frühjahr

Die Aussaat des Mais im Jahr 2021 auf den ehemaligen Triticaleparzellen erfolgte am 27. April. Vier Tage zuvor wurden die Reste der nach der Triticaleernte gesäten Zwischenfrucht mit einem Flachgrubber ca. 7 cm tief bearbeitet. Dadurch sollten bereits erschienene Silphietriebe, vorhandenes Ausfallgetreide und Unkräuter flächig abgeschnitten werden und vertrockneten (Abbildung 77).



Abbildung 77: Durch Flachgrubberbearbeitung am 23. April 2021 abgeschnittener Wurzelballen von Durchwachsener Silphie nach ursprünglichem Umbruch mit einem Grubber

Eine Woche nach der Saat waren in den mit dem Pflug umgebrochenen Parzellen bereits wieder erste Silphietriebe sichtbar, so dass durch das flache Abschneiden der Triebe vor der Saat der Durchwuchs nicht nachhaltig bekämpft werden konnte (siehe auch Anhang Tabelle 53). In den Varianten Grubber und Fräse war der Bekämpfungserfolg besser und teilweise vertrockneten Wurzelstücke an der Oberfläche. Dort stieg auch im weiteren Verlauf bis zur Herbizidanwendung Anfang Juni der Durchwuchsbesatz weniger stark an und lag signifikant unter dem der mit dem Pflug umgebrochenen Parzellen (Abbildung 78). Die gefrästen Parzellen wiesen außerdem einen signifikant niedrigeren Durchwuchsbesatz gegenüber der Grubbervariante auf. Darüber hinaus waren in der Fräsvariante sehr viel kleinere und schwächere Triebe als in den gepflügten Parzellen vorzufinden. Die Grubber-

variante konnte sich im Vergleich zum Durchwuchsbesatz in der Triticale des Vorjahrs deutlich verbessern, im Vergleich zur Fräse waren aber immer noch kräftigere Triebe vorhanden. Da seit dem Umbruch in dieser Kulturfolge keine wendende Bodenbearbeitung mehr erfolgte, könnte beim Umbruch mit dem Grubber und der Fräse eventuell eine schnellere und stärkere Verwitterung der Wurzeln durch die lange Verweildauer an der Bodenoberfläche den Durchwuchsbesatz zusätzlich reduziert haben. Dagegen waren die eingepflügten Wurzelballen offenbar besser geschützt und im Vergleich zur Fräsvariante zudem kaum zerkleinert bzw. beschädigt, so dass diese besser überdauern konnten. Die Reste der Silphiewurzelstöcke, die in den mit der Fräse und insbesondere mit dem Grubber umgebrochenen Parzellen noch an der Bodenoberfläche vorhanden waren, waren im August im zweiten Jahr nach dem Umbruch bereits stark verwittert bzw. verrottet und begannen allmählich zu zerfallen. Spätestens im nächsten Jahr ist zu erwarten, dass in diesen Varianten von den Silphiewurzelresten kaum mehr sichtbare Strukturen vorhanden sind.

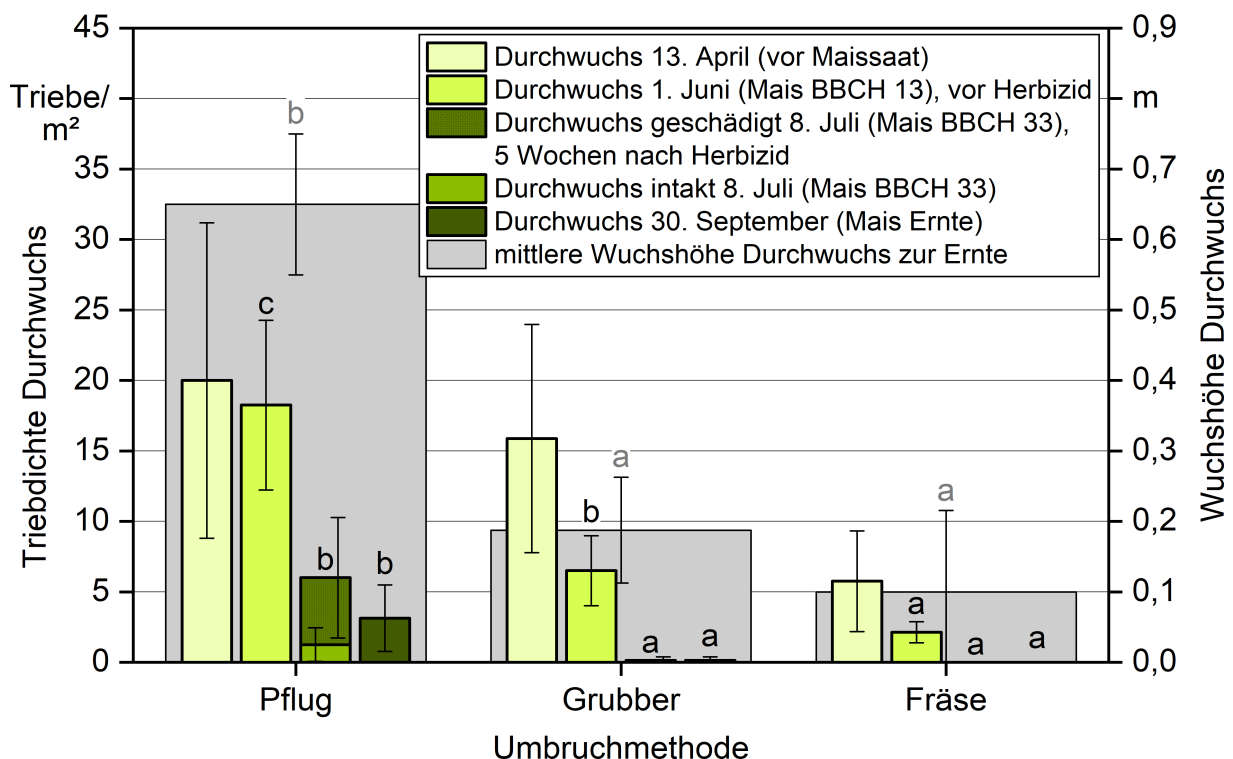


Abbildung 78: Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im zweiten Jahr nach dem Umbruch in Mais (Vorfrucht: Wintertriticale) in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Herbizideinsatz

Der Herbizideinsatz im Mais im zweiten Jahr nach dem Umbruch wurde am 4. Juni im Drei- bis Vier-Blatt-Stadium des Mais durchgeführt. Die kräftigen Silphiedurchwuchstriebte in der Pflugvariante hatten zu diesem Zeitpunkt bereits eine Wuchshöhe von ca.

30 cm erreicht. Die gefrästen Parzellen wiesen wiederum vor allem kleinere Triebe auf (Abbildung 79). Wie die Durchwuchsbonituren im Anschluss an die Herbizidapplikation zeigten, hatte die Herbizidkombination im Jahr 2021 eine anhaltendere Wirkung auf den Silphiedurchwuchs als die im Vorjahr in Mais ausgebrachte Mischung. Die Mischung aus Sulfonylharnstoff, Wuchsstoffherbizid und Triketon war somit deutlich besser zur Bekämpfung von Silphiedurchwuchs geeignet als die Mischung aus Triketon und dem ohnehin nicht mehr zugelassenen Bromoxynil. Zusätzlich wurde wie im ersten Jahr nach dem Umbruch mit „Spektrum“ ein Bodenherbizid zur Vermeidung normaler Spätverunkrautung ausgebracht. Da dieses aber auch bei der Etablierung von Silphie eingesetzt werden kann, ist dadurch keine schädigende Wirkung zu erwarten.



Abbildung 79: Durchwuchsbesatz am 1. Juni 2021, drei Tage vor der Herbizidapplikation in Mais im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug (links) bzw. Fräse (rechts)

Die effektive Wirkung der ausgebrachten Mischung gegenüber Durchwachsener Silphie ist vermutlich der Wuchsstoffkomponente (Dicamba) zuzuschreiben. Die Mischung 2021 bewirkte bei den Trieben zunächst ein undeterminiertes Wachstum (Abbildung 80). Die meisten Triebe starben anschließend vollständig ab oder wiesen eine starke Verkrümmung des Vegetationskegels und kein weiteres Wachstum auf, wobei auch sehr große Triebe das Wachstum einstellten (Abbildung 81). Nur vereinzelt wuchsen Triebe mit eingeschränkter Wachstumsleistung weiter. 2020 führte die Mischung zwar zu starken Blattnekrosen, von denen sich kräftige Triebe allerdings wieder erholten und weiterwuchsen.



Abbildung 80: Undeterminiertes Wachstum von Silphiedurchwuchstrieben infolge der Herbizidapplikation in Mais im Jahr 2021, etwa eine Woche nach der Ausbringung



Abbildung 81: Aufrollen der Blätter und Absterben der meisten Silphietriebe am 17. Juni 2021, etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation in Mais

Durch die Herbizidmaßnahme im Jahr 2021 wurde der Besatz mit Silphietrieben in den Varianten Grubber und Fräse innerhalb von gut zwei Wochen mehr als halbiert. Wegen der kräftigeren Triebe in den gepflügten Parzellen trat dort die Wirkung weniger rasch ein. Mit ca. 11 Trieben/m² war dort zu diesem Boniturtermin weiterhin signifikant mehr Silphiedurchwuchs vorhanden als in den anderen beiden Varianten. Im weiteren Verlauf bis zum 8. Juli ging die Triebzahl in der Pflugvariante auf 6 Triebe/m² zurück, wovon etwa 80 % eine Herbizidschädigung aufwiesen. Daneben waren auch intakte Triebe ohne abgestorbene Blätter vorhanden. Diese stammten vermutlich aus tieferliegenden Knospen der untergepflügten Wurzelstöcke und waren wie im Vorjahr vermutlich erst nach dem Herbizideinsatz erschienen. Die mit der Fräse umgebrochenen Parzellen waren am 8. Juli fast ohne Silphiedurchwuchs. Gleiches gilt für die Grubbervariante, in der tendenziell ein geringfügig höherer Besatz vorhanden war. In beiden Varianten belief sich der Besatz mit Silphietrieben auf einzelne kräftige Triebe, die vermutlich ebenfalls erst nach der Herbizidmaßnahme erschienen waren und zudem kein Schossen zeigten. Wie bei den Boniturterminen zuvor war der Durchwuchsbesatz bei Grubber und Fräse bis zur Ernte signifikant niedriger als nach dem Umbruch mit dem Pflug. Die varianzanalytische Auswertung der Durchwuchsbonitur vom 8. Juli und kurz vor der Ernte musste über einen nicht parametrischen Friedman-Test erfolgen, da für ein generalisiertes lineares Modell die Voraussetzungen nicht gegeben waren. Eine weitere Nachbehandlung mit einem Wuchsstoffherbizid erfolgte nicht und wäre, wenn überhaupt nur in den gepflügten Parzellen sinnvoll gewesen.

Bei der Bonitur zum Erntetermin wurden nur Triebe mit mindestens zwei Blattpaaren erfasst, wobei diese allerdings auch sehr klein waren. Bis zur Maisernte Ende September ging die Zahl an Durchwuchstrieben auch in den gepflügten Parzellen auf ca. 3 Triebe/m² zurück, da einige der geschädigten Triebe noch abstarben. Die Beschattung durch die Maispflanzen trug vermutlich zusätzlich dazu bei. Die kräftigeren Triebe in den gepflügten Parzellen führten dazu, dass dort die mittlere Wuchshöhe der Triebe zum Zeitpunkt der Maisernte mit 65 cm signifikant höher als nach dem Umbruch mit Grubber (19 cm) oder Fräse (10 cm) war. Interessanterweise zeigte auch in den Pflugvarianten nur etwa die Hälfte der Triebe ein Längenwachstum, während der Rest im Rosettenstadium verblieb. Dieses Phänomen wurde auch bereits im ersten Jahr nach dem Umbruch beobachtet und ist vermutlich auf den fehlenden Lichtreiz der Triebe zum Übergang in die Schossphase zurückzuführen. In den anderen beiden Varianten war weiterhin so gut wie kein Besatz mit Silphietrieben vorhanden. Hinsichtlich der Konkurrenz gegenüber den Maispflanzen war nur die Pflugvariante problematisch, in der nach der Aussaat eine hohe Zahl an Durchwuchstrieben erschien.

Ernte

Silphiedurchwuchs in Mais stellt bei der Ernte von Silomais keine Behinderung dar. Gleiches gilt für die weitere Verwendung, wenn die daraus erstellte Silage für die Biogasgewinnung verwendet wird. Problematisch wäre nur, wenn der Silphiedurchwuchs überhandnimmt und zu reduzierten Mais- bzw. Gesamterträgen führt. Dies war auch bei dem im zweiten Jahr nach dem Umbruch gesäten Mais nicht der Fall. Ein stärkerer Durchwuchs-

besatz ähnlich dem Mais des Vorjahrs war ohnehin nur noch in den mit dem Pflug umgebrochenen Parzellen vorhanden. Im Durchschnitt der gedüngten Parzellen lag der Maisertrag bei 287,5 dt TM/ha. Im Vergleich zum Mais im ersten Jahr nach dem Umbruch entsprach die N-Düngung im zweiten Jahr der nach Düngeverordnung zulässigen Menge, eine zusätzlich N-Nachlieferung wurde nicht berücksichtigt. In den Parzellen ohne N-Düngung wurde im Mittel ein Ertrag von 155,4 dt TM/ha erreicht. Grundsätzlich waren die Wachstumsbedingungen im Jahr 2021 für Mais wegen der feuchtwarmen Witterung im Juni sehr günstig. Die Erträge waren dennoch wegen der relativ kleinen Parzellen ohne Stirnrand vermutlich etwas überschätzt, da in einem benachbarten Parzellenversuch mit derselben Sorte und ähnlicher N-Düngung im Durchschnitt 240 dt TM/ha erreicht wurden. Wie im ersten Jahr nach dem Umbruch wurde die Maisernte etwas verspätet durchgeführt, so dass TS-Gehalte von durchschnittlich 41,0 % gegeben waren. Die ehemals organisch gedüngten Parzellen wiesen tendenziell ein höheres Ertragsniveau auf.



Abbildung 82: Silomais fast ohne Silphiedurchwuchs kurz vor der Ernte Ende September im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse



Abbildung 83: Silomais mit geringem Silphiedurchwuchs (meist ohne Schossen) kurz vor der Ernte Ende September im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Grubber



Abbildung 84: Silomais mit deutlichem Silphiedurchwuchs (meist ohne Schossen) kurz vor der Ernte Ende September im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einem Pflug

Die Umbruchmethode zeigte wie bereits bei der Vorkultur Triticale keinen signifikanten Einfluss auf die Ertragshöhe (Abbildung 85). Dennoch waren wie im Jahr zuvor die tendenziell höchsten Erträge bei einem Umbruch mit dem Grubber gegeben. Pflug und Fräse lagen auf einem ähnlichen Niveau. Gleiches gilt für die TS-Gehalte, die ebenfalls nicht signifikant durch die Umbruchmethode beeinflusst wurden. Verglichen mit den tendenziellen Ertragsunterschieden zwischen Umbruchvarianten im ersten Jahr nach dem Umbruch verhielten sich die Maiserträge im zweiten Folgejahr eher gegensätzlich. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass die Umbruchmethode keinen Einfluss auf die Mais- bzw. Gesamttrockenmasseerträge hatte, da der Durchwuchs bei der Ernte miterfasst wurde. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil an der Trockenmasse war vermutlich jedoch nur beim Mais im Jahr 2020 in den Pflug- und Grubbervarianten gegeben.

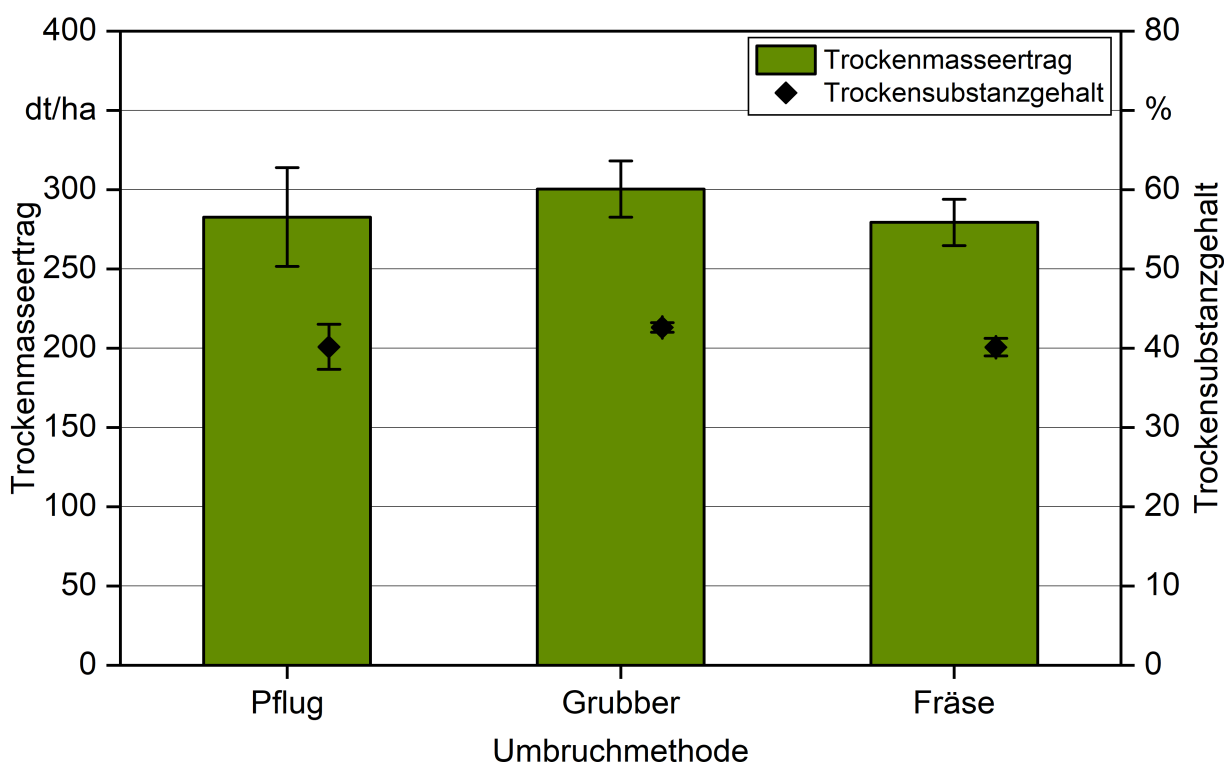


Abbildung 85: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

5.2.1.3.4 Winterweizen im Jahr 2021

Aussaat und Durchwuchs im Frühjahr

Für das auf den Silomais im Jahr 2020 folgende Wintergetreide wurde Winterweizen gewählt, da sich die Aussaat witterungsbedingt verzögerte. Die Aussaat erfolgte am 10. November, zuvor wurden alle ehemaligen Maisparzellen gepflügt. In der Pflugvariante wieder hochgepflügte Wurzelstöcke behinderten die Aussaat kaum. Ab Ende März 2021 erschienen in den Weizenparzellen erste Silphietriebe (Abbildung 86). Der Durchwuchsbesatz nahm bis zur ersten Bonitur am 13. April insbesondere in den mit dem Pflug umgebroche-

nen Parzellen weiter zu. Allerdings wurde auch dort bis zur Herbizidanwendung Ende April ein Besatz von 10 Trieben/m², der im Vorjahr bis zu Beginn der Maissaat vorlag, nicht erreicht (Abbildung 87). Die Varianzanalysen der einzelnen Boniturtermine ergaben zu allen Terminen vor der Ernte einen signifikanten Einfluss der Umbruchmethode auf den Durchwuchsbesatz. Für die Termine am 13. April, 18. Mai und zur Ernte musste die Auswertung über einen nicht parametrischen Friedman-Test erfolgen. Am 13. April lag in den Fräsvarianten gegenüber dem Pflug ein signifikant geringerer Besatz mit Silphietrieben vor. Auch in den mit dem Grubber umgebrochenen Parzellen war der Besatz gegenüber dem Pflug tendenziell niedriger und nahm bis zur Herbizidanwendung nicht weiter zu. Es scheint somit, dass eine nicht wendende Bearbeitung im Umbruchjahr und anschließendes Pflügen effektiver zur Durchwuchsbekämpfung beitragen als direktes Pflügen zum Umbruch.



Abbildung 86: Erster Silphiedurchwuchs in Winterweizen Ende März 2021 im zweiten Jahr nach dem Umbruch

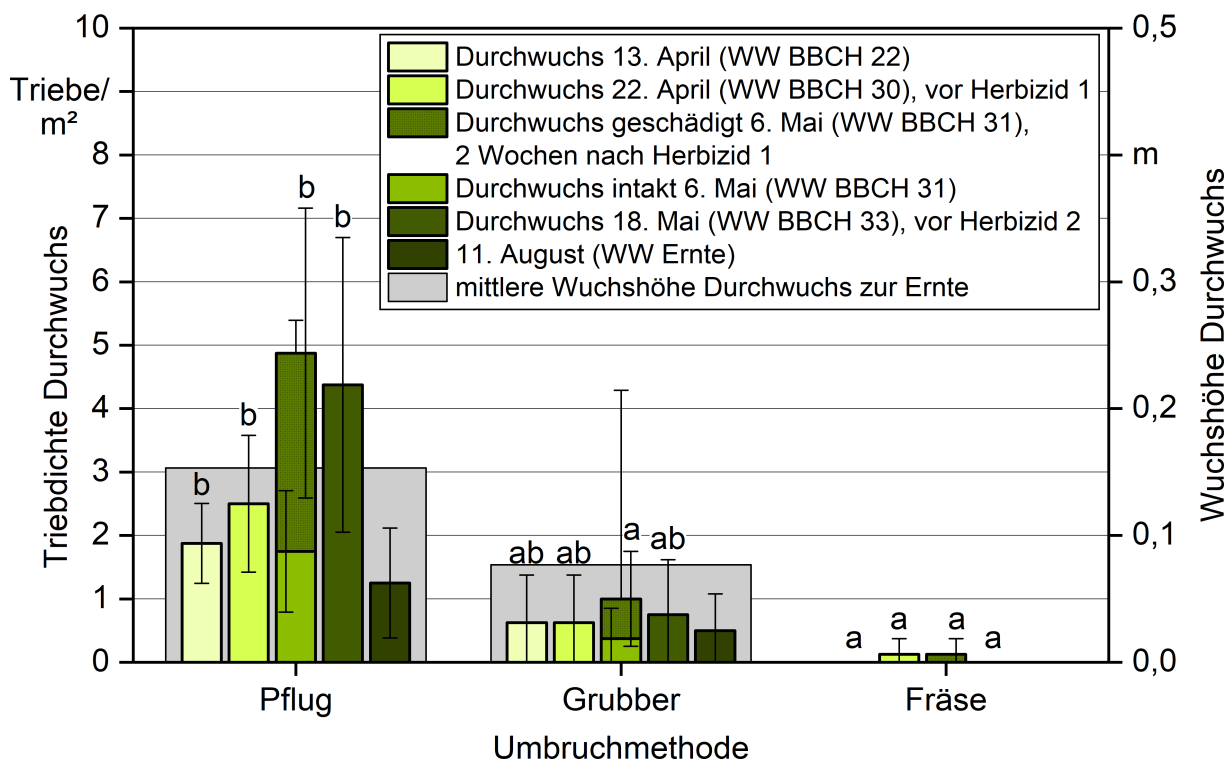


Abbildung 87: Durchwuchs von Durchwachsener Silphie im zweiten Jahr nach dem Umbruch in Winterweizen (Vorfrucht: Mais) in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Herbizideinsatz

Die erste Herbizidapplikation in Winterweizen im Jahr 2021 wurde am 23. April gegen Ende der Bestockung des Getreides durchgeführt. Kräftige Silphietriebe hatten zu diesem Zeitpunkt bereits mindestens zwei Blattpaare ausgebildet, wodurch eine hohe Wirkstoffaufnahme garantiert war. Auch wenn nur in den gepflügten Parzellen ein stärkerer Besatz von ca. 2 Trieben/m² vorhanden war, würde dieser ohne Behandlung zu einer deutlichen Beschattung der Getreidepflanzen führen. Wie im Vorjahr wurde als Herbizid ein Sulfonylharnstoffpräparat ausgebracht, ergänzt um eine Gräserkomponente (Acetyl Coenzym A Carboxylase-Inhibitor), die jedoch gegen die dikotyle Silphie ohne Wirkung ist. Ähnlich wie im Vorjahr zeigten die Silphietriebe drei Wochen nach der Behandlung eine Aufhellung der Blätter, wobei die Bereiche um die Blattadern dunkelgrün blieben (Abbildung 88). Nekrosen oder ein vollständiges Absterben der Triebe war im Jahr zuvor in den Triticaleparzellen nur vereinzelt zu beobachten. Die Triebe wurden zwar wie im Vorjahr im Wachstum gehemmt, aber vor allem größere Triebe wuchsen Mitte Mai bereits wieder langsam weiter und erreichen teilweise bereits die Wuchshöhe des Getreides von etwa 40 cm. Kleinere und schwächere Triebe zeigten dagegen eine stärkere Schädigung, wie ein Aufrollen der Blätter am Rand und Blattrandnekrosen. Obwohl es sich bei dem im Jahr 2021 ausgebrachten Sulfonylharnstoff-Herbizid um einen anderen Wirkstoff als im Jahr 2020 handelte, zeigte auch dieser keine besonders effektive Wirkung gegen Durchwachsene

Silphie. In den gepflügten und auch in geringerem Maße in den gegrubberten Parzellen nahm der Durchwuchsbesatz seit der Herbizidapplikation durch später erscheinene Triebe sogar zu. Nur die mit der Fräse umgebrochenen Parzellen waren weiterhin fast frei von Silphiedurchwuchs, so dass sich beim Vergleich der drei Umbruchverfahren ein ähnliches Bild wie zur Ernte des vorausgegangenen Maises zeigte.



Abbildung 88: Silphiedurchwuchs in Winterweizen mit Herbizidschädigung durch Sulfonylharnstoffpräparat etwa zwei Wochen nach der Herbizidapplikation im Jahr 2021

Um noch vorhandene Triebe zu bekämpfen oder zumindest weiter im Wachstum zu hemmen, wurde am 21. Mai in BBCH 37 des Weizens ein weiteres Herbizid ausgebracht. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus Herbizidwirkstoffen mit Wuchsstoffwirkung (Clopypalid, Fluroxypyr) und dem gleichen Sulfonylharnstoff-Wirkstoff wie in der Frühjahrsapplikation. Zum Zeitpunkt der zweiten Herbizidapplikation war in den Pflugvarianten mit etwa 4 Trieben/m² ein signifikant höherer Besatz als in den anderen beiden Varianten vorhanden. Die Wirkung der zweiten Herbizidanwendung war vermutlich wegen der Wuchsstoffkomponenten deutlich besser. Alle Silphietriebe wurden durch das Herbizid stark geschädigt und wiesen bereits eine Woche nach der Ausbringung eine vollständige Blattaufhellung auf. Zudem waren Welkeerscheinungen und Blattepinastien, die sich in einem unkontrollierten Wachstum der Triebe äußerten, zu beobachten (Abbildung 89). Zugleich bildete der Winterweizen einen dichten Bestand, was zu einer guten Beschattung führte.



Abbildung 89: Starke Schädigung eines Silphiedurchwuchstrieb am Rand einer Weizenparzelle am 1. Juni 2021, elf Tage nach der zweiten Herbizidmaßnahme

Mitte Juni war ein Großteil der Silphietriebe durch die zweite Herbizidapplikation und die intensive Beschattung weitestgehend abgestorben, dies gilt auch für kräftigere Triebe in den Pflugvarianten. Anfang Juli war dadurch in dem im zweiten Jahr nach dem Umbruch mit der Fräse gesäten Winterweizen kein Silphiedurchwuchs mehr vorhanden. In den anderen beiden Varianten zeigten sich noch einzelne stark verkümmerte bis zu 20 cm hohe Triebe. Diese blieben bis zur Ernte erhalten, insgesamt war der Besatz aber auch in der Pflug- und Grubbervariante zum Erntetermin sehr niedrig. Bei Umbruch mit dem Pflug war jedoch weiterhin mit durchschnittlich 1,25 Trieben/m² tendenziell ein stärkerer Durchwuchs vorhanden als in der Grubbervariante mit 0,5 Trieben/m². Auf der gesamten Versuchsfläche war in den Winterweizenparzellen im Jahr 2021 Anfang August nur ein einziger kräftiger Silphiedurchwuchstrieb in einer gepflügten Parzelle vorhanden. Dieser war vermutlich erst später erschienen und erreichte eine Wuchshöhe von 95 cm. Ansonsten nahm die Wuchshöhe der noch vorhandenen Triebe kaum mehr zu und blieb im Mittel in den Grubber- sowie auch Pflugvarianten deutlich unter 20 cm. Ein geringfügiges Schossen der Triebe sowie eine Regeneration zur Abreife des Getreides waren nur vereinzelt vorhanden (Abbildung 90).



Abbildung 90: Verkümmerte Silphietriebe mit leichter Regeneration unter Winterweizen kurz vor der Ernte im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsender Silphie

Ernte

Die Winterweizenparzellen wurden am 11. August geerntet. Im Vergleich zur Triticale im ersten Jahr nach dem Umbruch, die wegen Frühjahrstrockenheit nur eine geringe Bestandsdichte ausbilden konnte, entwickelte sich der Winterweizen im Jahr 2021 gut. In den gedüngten Parzellen wurden im Mittel 82,9 dt/ha (86 % TS) und somit ein durchschnittliches Ertragsniveau erreicht. Wie bei der Triticale im Vorjahr war kein signifikanter Einfluss der Umbruchverfahren auf den Trockenmasseertrag nachzuweisen (Abbildung 91). Die tendenziell höchsten Erträge wurden allerdings nach dem Umbruch mit der Fräse ermittelt. Eine negative Auswirkung dieser Umbruchmethode auf das Getreidewachstum wie im Jahr zuvor bei Triticale war im zweiten Jahr nach dem Umbruch nicht mehr festzustellen. Hinsichtlich der Stroherträge, die im Mittel bei 57,7 dt/ha lagen, war ein signifikanter Einfluss der Umbruchmethode vorhanden ($p = 0,0024$). Entsprechend den Tendenzen der Kornerträge wiesen die Varianten Grubber und Fräse signifikant höhere Stroherträge gegenüber der Pflugvariante auf. Eine mögliche Erklärung lautet, dass der Umbruch mit dem Pflug bereits im ersten Jahr nach dem Umbruch zu einer erhöhten Mineralisation der während des Silphieanbaus angehäuften Humusvorräte führte. Bei den Varianten mit weniger intensiver Bodenbearbeitung im ersten Jahr nach dem Umbruch und einem Pflugeinsatz erst nach dem vorausgegangenen Mais war die Mineralisation eher in der Folgekultur höher.

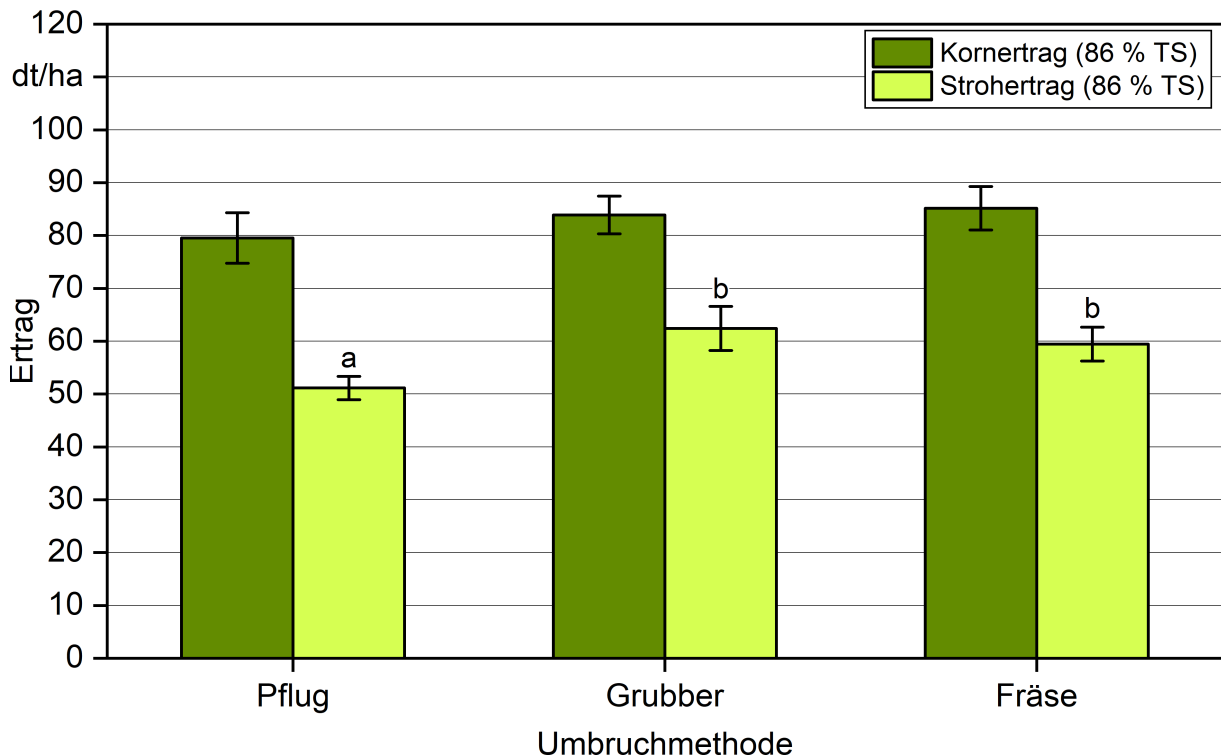


Abbildung 91: Korn- und Stroherträge von Winterweizen (86 % TS) im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie mit Pflug, Grubber oder Fräse; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Dadurch war in den gegrubberten Parzellen auch ein signifikant höheres Haupternteprodukt-Nebenprodukt-Verhältnis (HNV) gegeben. Im Mittel aller Varianten lag dies bei 1 : 0,70. Die deutlich höheren Stroherträge als im Vorjahr sind in erster Linie durch eine höhere Bestandsdichte bedingt (Tabelle 19). Dadurch war auch eine stärkere Beschattung der Silphietriebe ab Beginn des Schossens vorhanden. Signifikante Unterschiede in Bestandsdichte, Wuchshöhe und Tausendkornmasse waren zwischen den verschiedenen Umbruchmethoden nicht vorhanden. Der Einfluss des Pflanzenbestands auf die Silphiedurchwuchstriebe war somit in allen Varianten ähnlich, so dass Unterschiede im Durchwuchsbesatz direkt auf die unterschiedliche Umbruchmethode zurückzuführen sind. Die unterschiedliche Düngung während des Silphieanbaus zeigte keinen signifikanten Einfluss auf den Ertrag, tendenziell lieferten jedoch wie zu erwarten die ehemals organisch gedüngten Parzellen einen geringfügig höheren Ertrag. Diese Tendenz war auf den ungedüngten Weizenparzellen aber nicht zu beobachten. Jedoch konnte in beiden Fällen der Effekt der Vorgeschichte nicht eindeutig von dem der Umbruchmethode getrennt werden.

Tabelle 19: Bestandsdichte, Wuchshöhe zur Blüte und Tausendkornmasse (TKM) von Winterweizen nach dem Umbruch mit Pflug, Grubber oder Fräse und durchgeführter Stickstoffdüngung sowie im Mittel der ungedüngten Parzellen

Umbruchverfahren	Bestandsdichte	Wuchshöhe Blüte	TKM
Einheit	Ähren/m ²	m	g
mit N-Düngung			
Pflug	638	0,80	43,6
Grubber	638	0,79	43,3
Fräse	624	0,79	42,8
ohne N-Düngung (Mittelwert)			
	402	0,67	45,8

In den ungedüngten Winterweizenparzellen wurde im zweiten Jahr nach dem Silphieumbruch im Mittel ein Kornertrag von 50,8 dt/ha (86 % TS) erzielt. Zu beachten ist, dass diese Parzellen, auf denen eigentlich keine N-Düngung ausgebracht werden sollte, fälschlicherweise bei der ersten N-Gabe der restlichen Weizenparzellen mitgedüngt wurden. Gleiches gilt für die ungedüngten Parzellen der benachbarten Praxisfläche. Dort war ein Ertragsniveau von 60,4 dt/ha gegeben. Dies lässt vermuten, dass nach dem Silphieumbruch auch im zweiten Jahr nach dem Umbruch nicht mit einer erhöhten N-Nachlieferung zu rechnen ist. Die Stroherträge in den ungedüngten Parzellen beliefen sich auf 33,7 dt/ha bzw. 42,0 dt/ha (86 % TS) nach dem Silphieumbruch bzw. auf der ehemaligen Praxisfläche. Daraus ergab sich ein HNV von 1 : 0,66 bzw. 1 : 0,69.

5.2.1.4 Nährstoffabfuhr und -gehalte in den Folgekulturen

Neben der Ertragserfassung wurde die geerntete Biomasse der Folgekulturen auch auf ihren Gehalt an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium untersucht. In Kombination mit den Trockenmasseerträgen wurden daraus Nährstoffabfuhr berechnet. Bei Triticale bzw. Winterweizen wurde neben den Körnern auch das Stroh untersucht.

5.2.1.4.1 Erstes Jahr nach dem Umbruch (2020)

Bei den mit Stickstoff gedüngten Parzellen waren keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der N-Gehalte und der N-Abfuhr zwischen den Umbruchverfahren weder bei Triticale noch bei Mais festzustellen (Abbildung 92, Tabelle 20). Dies ist im Falle der Nährstoffabfuhr bei Mais unter anderem auf eine starke Variabilität der Werte zurückzuführen, die aus den großen Ertragsschwankungen resultierte. Im Mittel der gedüngten Parzellen lag die N-Abfuhr bei Mais bei 235 kg N/ha und bei Triticale bei 111,5 kg N/ha für die Körner und 15,4 kg N/ha für das Stroh. Entsprechend den Erträgen war die N-Abfuhr bei Mais in den gegrubberten und bei Triticale in den gefrästen Varianten tendenziell niedriger. Im Vergleich zu den Standardwerten der bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft [10] lagen außerdem die N-Gehalte von Silomais im Versuch deutlich niedriger. Die N-

Gehalte der Triticalekörner waren dagegen deutlich höher, vermutlich bedingt durch das niedrige Ertragsniveau, das die Ertragserwartung der Düngebedarfsermittlung deutlich unterschritt, so dass den Pflanzen mehr als ausreichend Stickstoff zur Verfügung stand. Dadurch waren außerdem sehr hohe Rohproteingehalten der Körner von durchschnittlich 15,2 % vorzufinden. Die N-Gehalte des Strohs lagen dennoch im Bereich des Standardwerts.

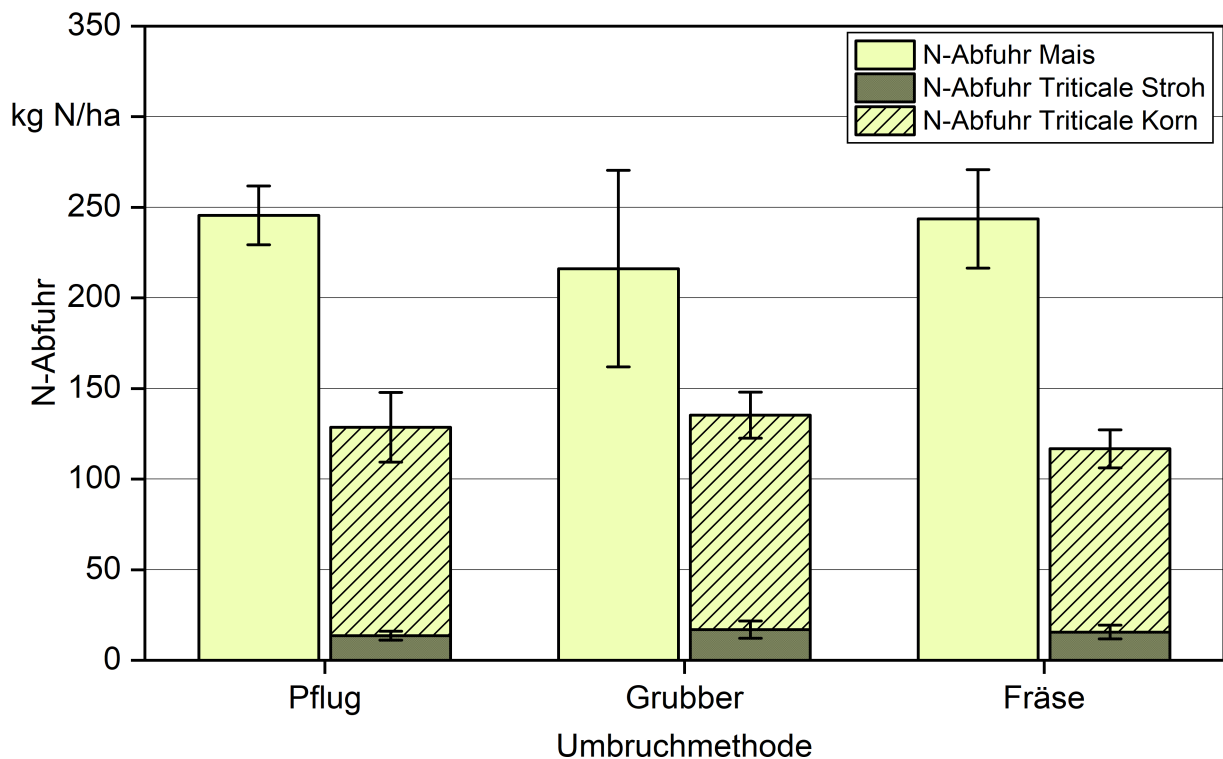


Abbildung 92: Stickstoffabfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) im Jahr 2020 nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Bei der Auswertung hinsichtlich der unterschiedlichen Düngung der Vorjahre konnte weder für Triticale noch für Mais ein signifikanter Einfluss auf die N-Abfuhr nachgewiesen werden. Die zu erwartende höhere Nachlieferung nach organischer Düngung wurde somit über die Abschläge bei der Düngebedarfsermittlung angemessen berücksichtigt. Da bei Mais die N-Abfuhr nach organischer Düngung tendenziell unter derjenigen nach mineralischer N-Düngung lag, wurde die Nachlieferung vermutlich sogar eher überschätzt. Die ehemals organisch gedüngten Maisparzellen ohne N-Düngung im Jahr nach dem Umbruch wiesen dagegen im Vergleich zu den ehemals mineralisch gedüngten Parzellen eine tendenziell höhere N-Aufnahme auf (Differenz zu mineralisch 13 kg N/ha). Bei einer mittleren N-Düngung bei Triticale von 154 kg N/ha und Mais von 173 kg N/ha ergibt sich für Triticale unter Berücksichtigung der N-Aufnahme des Strohs eine leicht positive N-Bilanz von 26 kg N/ha. Bei Silomais dagegen zeigte sich ein N-Defizit von 62 kg N/ha, das überwiegend aus der N-Nachlieferung bereitgestellt werden musste.

Tabelle 20: Nährstoffgehalte und -abfuhr von Triticale und Mais im ersten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie bei leicht reduzierter mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey

Erntegut	Umbruchmethode	Nährstoffgehalt				Nährstoffabfuhr			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Nährelement	Einheit	kg/dt TM				kg/ha			
Triticale Korn	Pflug	2,36	1,01	0,58	0,25	115,0	49,5	28,2	12,1
Triticale Korn	Grubber	2,46	1,02	0,59	0,26	118,4	49,0	28,4	12,5
Triticale Korn	Fräse	2,47	1,05	0,58	0,26	101,2	43,2	23,6	10,5
Triticale Stroh	Pflug	0,46	0,30 a	1,70	0,16	13,6	9,0	51,9	5,0
Triticale Stroh	Grubber	0,51	0,30 a	1,74	0,18	16,9	10,1	57,4	5,9
Triticale Stroh	Fräse	0,61	0,44 b	1,82	0,18	15,6	11,1	46,2	4,5
Mais	Pflug	1,07	0,44	1,02	0,20	245,6	99,8	235,2	45,8
Mais	Grubber	1,02	0,46	1,10	0,19	216,2	97,5	233,7	40,3
Mais	Fräse	1,06	0,37	0,83	0,17	243,6	86,9	194,7	40,0

Die Gehalte der übrigen Nährelemente lagen bei Triticale sowohl für die Körner als auch das Stroh im Bereich der bayerischen Standardwerte [10] (Tabelle 20). Bei Silomais hingegen waren insbesondere die Kalium- und Magnesiumgehalte deutlich niedriger als zu erwarten. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchverfahren waren bei mineralischer N-Düngung nur bei den P-Gehalten des Triticalestrohs festzustellen. In den mit der Fräse umgebrochenen Parzellen waren dabei signifikant höhere Phosphorgehalte vorzufinden. Mögliche Ursachen hierfür sind unklar. Nährstoffgehalte und -abfuhr in den Parzellen ohne N-Düngung sind im Anhang in Tabelle 57 aufgeführt.

5.2.1.4.2 Zweites Jahr nach dem Umbruch (2021)

Wie im ersten Jahr nach dem Umbruch hatte auch im zweiten Folgejahr die Umbruchmethode keinen signifikanten Einfluss auf die Erträge und Nährstoffabfuhr der Kulturen (Abbildung 93, Tabelle 21). Auch bezüglich der untersuchten Nährstoffgehalte konnte kein signifikanter Effekt der Umbruchmethode nachgewiesen werden. Bei den Mg-Gehalten und der P-Aufnahme der Weizenkörner musste die varianzanalytische Auswertung über einen nicht parametrischen Friedman-Test erfolgen. Die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse des Winterweizens lag im Mittel bei 193,8 kg N/ha, wobei hiervon 158,4 kg N/ha durch die Körner abgefahren wurden. Damit war die N-Aufnahme des Getreides deutlich höher als im ersten Jahr nach dem Umbruch, in dem nur unterdurchschnittliche Triticaleerträge erreicht worden waren. Ohne N-Düngung war eine N-Aufnahme von 69,1 kg N/ha in den Körnern und 12,7 kg N/ha im Stroh gegeben. Auf der angrenzenden Praxisfläche wurde in den Winterweizenparzellen eine N-Aufnahme von 90,1 kg N/ha

durch die Körner und 16,8 kg N/ha durch das Stroh erreicht. Zu beachten ist, dass diese Parzellen zu Vegetationsbeginn unbeabsichtigt eine N-Düngung von 50 kg N/ha erhielten.

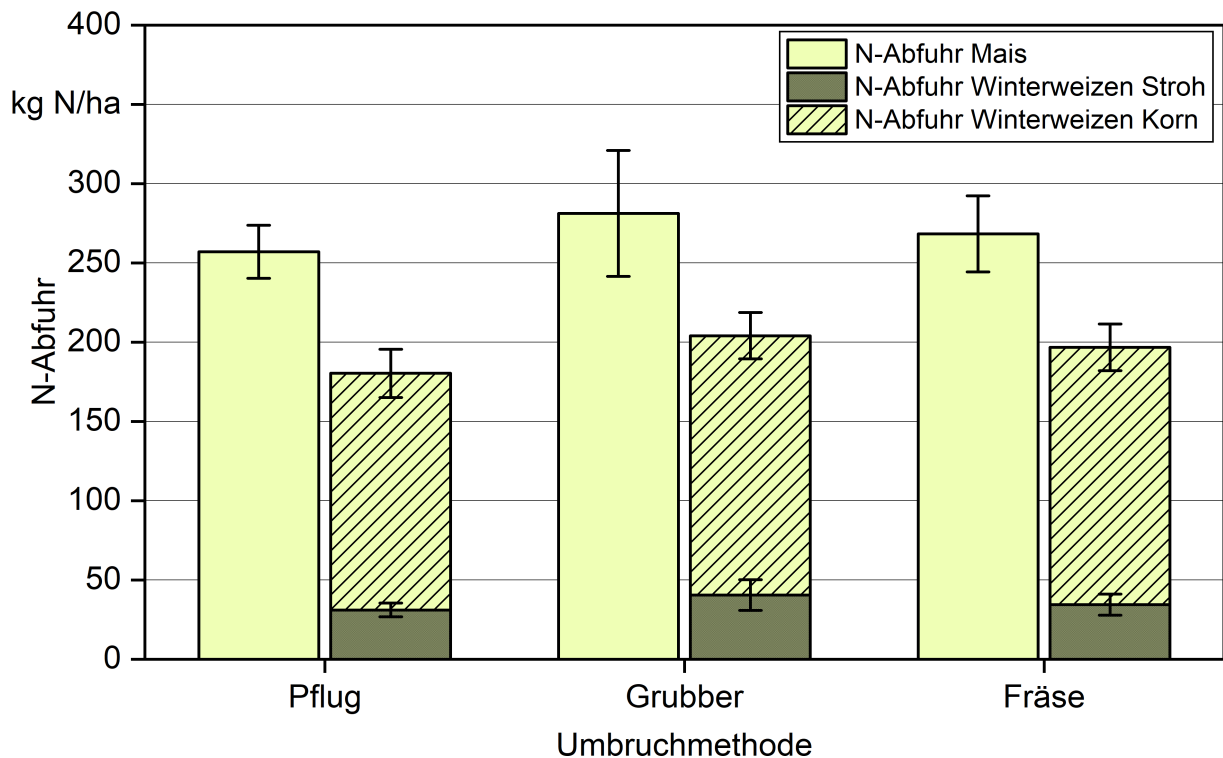


Abbildung 93: Stickstoffabfuhr von Silomais und Winterweizen (Korn und Stroh) im Jahr 2021 nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Die N-Gehalte der Weizenkörner lagen im Vergleich zu den Standardwerten [10] auf einem etwas niedrigeren Niveau. Dies gilt auch für die Kaliumgehalte, während die Phosphor- und Magnesiumgehalte den Standardwerten entsprachen. Die P-, K- und Mg-Gehalte des Weizenstrohs waren ebenfalls relativ niedrig, während die N-Gehalte des Strohs überdurchschnittlich ausfielen. Dies könnte eventuell durch die krankheitsbedingt beschleunigte Abreife des Weizens verursacht worden sein, wodurch auch die Stickstoffumlagerung in die Körner unterbrochen wurde.

Tabelle 21: Nährstoffgehalte und -abfuhr von Winterweizen und Mais im zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie bei praxisüblicher N-Düngung in Abhängigkeit von der Umbruchmethode

Erntegut	Umbruch- methode	Nährstoffgehalt				Nährstoffabfuhr			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Nährelement	Einheit	kg/dt TM				kg/ha			
Weizen Korn	Pflug	2,18	0,96	0,47	0,20	149,3	65,5	32,1	13,9
Weizen Korn	Grubber	2,26	0,95	0,49	0,20	163,5	68,2	35,2	14,4
Weizen Korn	Fräse	2,21	0,95	0,50	0,20	162,3	69,6	36,5	14,6
Weizen Stroh	Pflug	0,71	0,19	1,25	0,09	31,1	8,6	54,8	4,0
Weizen Stroh	Grubber	0,75	0,21	1,33	0,10	40,5	11,1	71,8	5,1
Weizen Stroh	Fräse	0,67	0,20	1,15	0,09	34,4	10,3	59,1	4,7
Mais	Pflug	0,92	0,36	0,81	0,18	257,1	100,6	229,2	51,5
Mais	Grubber	0,94	0,40	0,77	0,19	281,2	118,5	231,5	57,3
Mais	Fräse	0,96	0,34	0,76	0,18	268,4	96,0	212,1	49,8

Bei den Maisparzellen wurde durch die Ernte eine N-Menge von durchschnittlich 268,9 kg N/ha abgefahren. Die Nährstoffgehalte des Ernteguts waren bei allen untersuchten Nährelementen deutlich niedriger als die Standardwerte. Dies könnte mit dem sehr hohen Ertragsniveau dieses Jahrs zusammenhängen. Beim Vergleich der unterschiedlichen Düngungsvorgeschichten der Parzellen zeigte sich sowohl bei den Weizen- als auch Maisparzellen mit N-Düngung eine tendenziell höhere N-Abfuhr bei ehemals organischer Düngung. Darüber hinaus waren in den Maisparzellen, die in den ehemaligen Gärrestdüngungsstreifen lagen, auch tendenziell höhere N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte vorhanden. Dies deutet auf eine höhere N-Nachlieferung bei ehemals organischer Düngung hin, allerdings kann wegen der eingeschränkten Randomisation der Effekt der Vorgeschichte nicht eindeutig von der Umbruchmethode getrennt werden. Die tendenziell höhere N-Abfuhr nach dem Umbruch mit dem Grubber und der Fräse sowohl bei Winterweizen als auch Mais könnte mit dem stärkeren Durchwuchsbesatz in den Pflugvarianten zusammenhängen, der eventuell zu einer zusätzlichen Nährstoffkonkurrenz führte.

5.2.1.5 Mineralisationsdynamik nach dem Umbruch

5.2.1.5.1 Abschätzung der Stickstoffnachlieferung

Für die Untersuchung der N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie wurden zahlreiche N_{\min} -Untersuchungen durchgeführt. Neben den Parzellen der umgebrochenen Silphiefläche wurde zum Vergleich auch eine angrenzende Praxisfläche beprobt. Um den Verlauf der N-Nachlieferung nach dem Umbruch beobachten zu können, wurden auf unbewachsenen Parzellen an sechs (2020) bzw. fünf (2021) Terminen N_{\min} -

Proben entnommen. Darüber hinaus wurde im Jahr 2020 auch die N-Aufnahme in den ungedüngten Triticale- und Maisparzellen für die Abschätzung der N-Nachlieferung herangezogen. Da bei den ungedüngten Parzellen mit und ohne Bewuchs nicht alle Faktorstufenkombinationen vorhanden waren, wurde von einer Varianzanalyse abgesehen und lediglich Gesamtmittelwerte berechnet. Auch eine Unterscheidung nach der Umbruchmethode erfolgte nicht, da die Randomisation hierfür zu stark eingeschränkt war und zudem als zweiter Einflussfaktor die unterschiedliche Düngung der Vorjahre bestand. Die verschiedenen Umbruchmethoden waren jedoch mit je zwei Wiederholungen der Varianten Pflug und Fräse und drei gegrubberten Parzellen einigermaßen gleichmäßig vertreten.

Die zu den laufenden Probenahmen ermittelten N_{\min} -Mengen sind in Abbildung 94 dargestellt. Zusätzlich ist als Ausgangsniveau die N_{\min} -Menge nach der Silphieernte und zu Vegetationsende des Umbruchjahrs enthalten. Zur Beprobung Ende November war dort mit durchschnittlich 18 kg N/ha ein sehr niedriges Niveau der N_{\min} -Vorräte im Boden gegeben, das außerdem nur geringfügig über dem der Triticaleparzellen lag. Zehn Wochen zuvor wurden bei der N_{\min} -Untersuchung im Anschluss an die Ernte der Durchwachsenen Silphie in den mehrjährig mit Gärresten gedüngten Streifen ca. 14 kg N/ha und bei rein mineralischer N-Düngung etwa 10 kg N/ha mineralischer Stickstoff im Boden festgestellt. Folglich stiegen die N_{\min} -Mengen im Boden nach dem Umbruch Ende September bis Vegetationsende nur geringfügig an. Milde Temperaturen im Oktober und zeitnahe Niederschläge nach dem Umbruch hätten durchaus eine Mineralisation ermöglichen können.

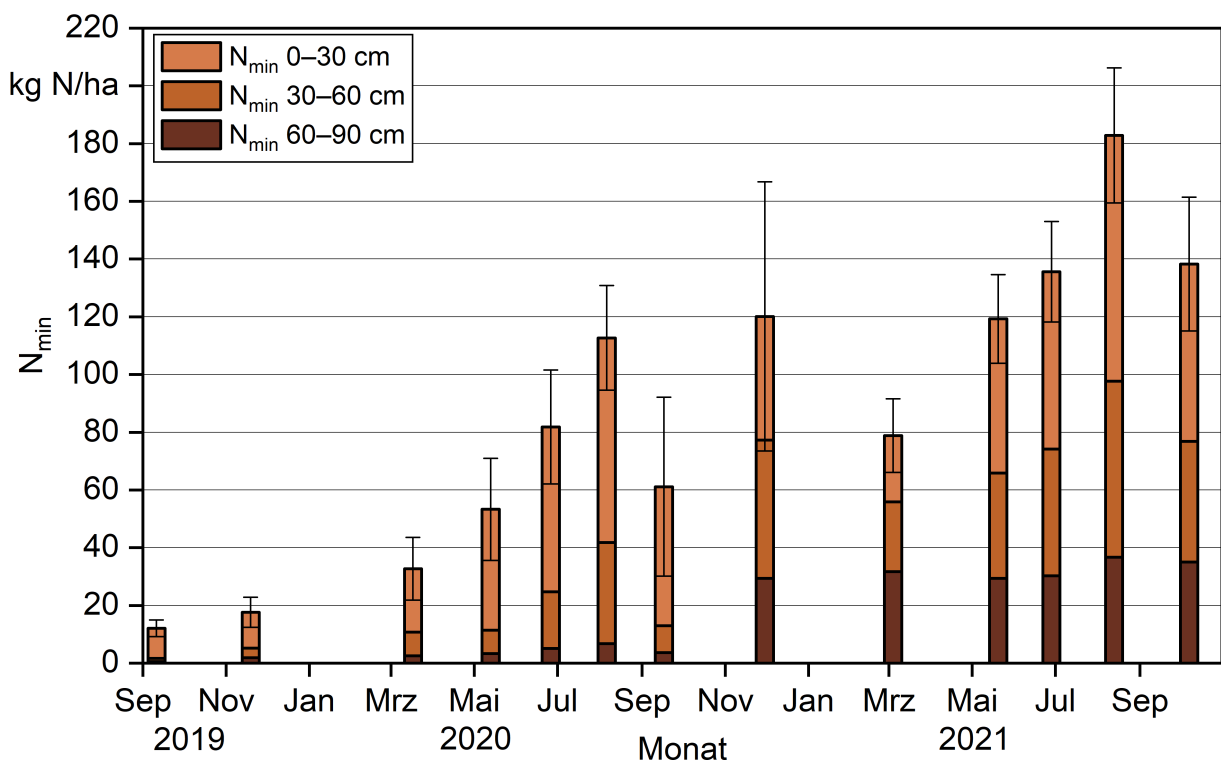


Abbildung 94: Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs (N_{\min}) im Boden nach der letzten Ernte von Durchwachsener Silphie im September 2019 und dem anschließenden Umbruch Ende September; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Zu Vegetationsbeginn im Jahr 2020 ergab die Beprobung der unbewachsenen Parzellen eine N_{\min} -Menge von etwa 33 kg N/ha. Über die Wintermonate wurde somit in geringem Umfang Stickstoff mineralisiert. Förderlich für Umsetzungsprozesse wirkten die sehr milden Temperaturen im Februar. Von stärkeren Auswaschungsverlusten ist aufgrund eher geringer Winterniederschläge nicht auszugehen. Zudem war über die drei Beprobungshorizonte keine Tiefenverlagerung mineralischen Stickstoffs zu erkennen. SCHITTENHELM et al. (2021) [115] stellten nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie Mitte Dezember im darauffolgenden Frühjahr eine N_{\min} -Menge im Boden von 18 kg N/ha fest, die auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie bei Mais als Vorfrucht lag. Die etwas höheren N_{\min} -Mengen im vorliegenden Projekt beruhten dennoch vermutlich nicht darauf, dass der Umbruch im Gegensatz zu der angesprochenen Studie noch vor Vegetationsende erfolgte, da bis Vegetationsende die Nachlieferung nur minimal war.

Mit den steigenden Temperaturen im Frühjahr und Sommer nahm die Mineralisation erwartungsgemäß zu und die N_{\min} -Menge im Boden stieg bis auf etwa 113 kg N/ha Anfang August deutlich an. Nachfolgend bis Anfang September gingen die Gehalte wieder etwas zurück. Dies ist vermutlich in erster Linie darauf zurückzuführen, dass die Beprobungsparzellen nicht dauerhaft bewuchsfrei gehalten werden konnten. Hierbei war insbesondere der Silphiedurchwuchs problematisch, der wie bereits erwähnt am stärksten in der gepflügten Variante auftrat. Insbesondere im August bis zur erneuten Bearbeitung Anfang September waren die unbestellten Parzellen stark bewachsen, da die Zeitspanne seit der vorausgegangenen Bearbeitung Anfang Juli zu groß war. Zur N_{\min} -Beprobung Anfang August war hingegen noch kein größerer Bewuchs vorhanden. Da die nächste mechanische Bearbeitung relativ kurz vor der nächsten N_{\min} -Beprobung erfolgte, konnte die zwischenzeitlich gebildete Pflanzenmasse für eine erneute N-Freisetzung nur zu einem kleinen Teil wieder umgesetzt werden. Der Rückgang der N_{\min} -Mengen im Boden war am stärksten in den gepflügten Parzellen, die einen deutlich höheren Besatz mit Silphietrieben aufwiesen als die gefrästen Parzellen. In der gegrubberten Variante waren die Wurzelballen mit den Knospen nicht so tief eingearbeitet wie nach dem Einsatz des Pflugs, so dass das wiederholte Fräsen zur Aufwuchsbeseitigung vermutlich zu einer weiteren Zerkleinerung der Wurzeln und stärkeren Schädigung der Knospen führte.

Wird davon ausgegangen, dass im August und September die N-Nachlieferung in etwa auf dem Niveau der Vormonate lag, hätte die N_{\min} -Menge im Boden Mitte September in etwa 140 kg N/ha betragen müssen. Somit wäre seit Vegetationsbeginn eine N-Menge von ca. 110 kg N/ha durch Mineralisation nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie nachgeliefert worden. Darauf deutet auch die Beprobung zu Vegetationsende hin, bis zu der die Menge mineralischen Stickstoffs im Boden im Durchschnitt der ungedüngten Parzellen wieder auf ca. 120 kg N/ha anstieg. Zusätzlich wurde offenbar ein Teil des zuvor aufgenommenen Stickstoffs bereits wieder freigesetzt. Die Verteilung auf die drei Beprobungsschichten zu Vegetationsende weist bereits auf eine deutliche Tiefenverlagerung des überwiegend in Form von Nitrat vorliegenden Stickstoffs hin. Hierzu trugen hohe Niederschlagsmengen Ende September und im Oktober bei. Bei Annahme einer ähnlichen N-Mineralisation im Herbst wie in den abgeernteten Silomaisparzellen hätte im Zeitraum von Mitte September bis Ende November in den unbewachsenen Parzellen ebenfalls noch

einmal eine N-Menge von mindestens 20 kg N/ha mobilisiert werden müssen. Insgesamt würde das eine N-Nachlieferung während der Vegetation von ca. 130 kg N/ha im ersten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie bedeuten.

Zu Vegetationsbeginn Anfang März im Folgejahr waren noch ca. 80 kg N/ha mineralischer Stickstoff im Boden vorhanden, so dass über den Winter offensichtlich ca. 40 kg N/ha aus dem Beprobungsbereich ausgewaschen wurden. Der Rückgang der N_{\min} -Mengen in den oberen beiden Beprobungsschichten lässt ebenfalls darauf schließen. Auch wenn die Winterniederschläge mit knapp 150 mm niedrig ausfielen, war der Boden doch durch die hohen Herbstniederschläge bereits zu Vegetationsende gut durchfeuchtet. Hinzu kommt, dass auf den Beprobungsparzellen während der Vegetation fast kein Pflanzenbewuchs vorhanden war, der zu einem Wasserrückgang in tieferen Bodenschichten geführt hätte. Im weiteren Verlauf stiegen die N_{\min} -Mengen im Boden wie im ersten Jahr nach dem Umbruch relativ gleichmäßig bis Anfang August an. Zu diesem Termin konnte im Boden eine N_{\min} -Menge von ca. 180 kg N/ha nachgewiesen werden, was einer N-Nachlieferung seit Vegetationsbeginn von etwa 100 kg N/ha entspricht. Diese war somit etwas höher als im gleichen Zeitraum des ersten Jahrs nach dem Umbruch. Wie im Jahr 2020 führte im Anschluss ein stärkerer Bewuchs der Parzellen mit Beikräutern dazu, dass die Menge mineralischen Stickstoffs im Boden bis Anfang Oktober um ca. 40 kg N/ha zurückging. Silphiedurchwuchs war allerdings auch in den mit dem Pflug umgebrochenen und anschließend unbewachsenen Parzellen kaum mehr zu beobachten. Eine Probenahme zu Vegetationsende wurde im Jahr 2021 nicht mehr durchgeführt. Insgesamt ergab somit die Untersuchung der N_{\min} -Mengen in den unbewachsenen Parzellen bis Mitte August eine um ca. 20 kg N/ha höhere N-Nachlieferung im zweiten Jahr nach dem Umbruch. Aufgrund der relativen großen Unsicherheit der Messungen sind derartige Unterschiede jedoch vernachlässigbar. Die N-Mineralisation wird außerdem auch von der Jahreswitterung beeinflusst, so dass in etwa eine gleich hohe N-Nachlieferung in den ersten beiden Jahren nach dem Silphieumbruch angenommen werden kann. Abgeleitet aus dem Verlauf der N_{\min} -Mengen im Boden betrug diese am vorliegenden Standort während der Vegetationsperiode ca. 130 kg N/ha. Die Mineralisationsrate war dabei zwischen Juli und August schätzungsweise am höchsten, aber über die gesamte Vegetation relativ konstant. Zusätzlich wurden über den Winter nach dem Umbruch im Herbst 2019 weitere 15 kg N/ha mineralisiert, die nicht ausgewaschen wurden.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Umbruchmethoden im Hinblick auf die N-Nachlieferung zeigt sich, dass im ersten Jahr nach dem Umbruch in den Pflugvarianten zu Vegetationsbeginn tendenziell die höchsten und in den Fräsvarianten tendenziell die niedrigsten N_{\min} -Werte vorlagen. Bis Anfang Mai waren die N_{\min} -Mengen in den gepflügten Parzellen weiterhin höher als in den mit der Fräse umgebrochenen Parzellen. Die gegrubberte Variante befand sich dazwischen. Ab Ende Juni haben sich die N_{\min} -Mengen in allen drei Umbruchvarianten ausgeglichen. Die stärkere Bodenlockerung und -bewegung beim Einsatz des Pflugs führte somit offenbar zu einer höheren N-Mineralisation im Frühjahr. Mit der Fräse wurde hingegen nur flach bearbeitet, dafür jedoch die Silphiewurzeln und Erntereste stärker zerkleinert und vermutlich deren Abbau beschleunigt. Da dort die N_{\min} -Menge im Boden tendenziell niedriger war, ist aus dem Abbau der Ernte- und Wurzelrückstände zu-

nächst nicht mit einer hohen Netto-N-Freisetzung, sondern eher einer N-Immobilisation zu rechnen. Eine entsprechende Tendenz war im zweiten Jahr nach dem Umbruch nicht mehr zu beobachten. Dort wiesen die ehemals mit dem Grubber umgebrochenen Parzellen die niedrigsten N_{\min} -Mengen auf. Eventuell hatte das mehrmalige Fräsen zur Unkraut- und Durchwuchseseitigung auf die flach eingearbeiteten Wurzelreste beim Grubberumbruch einen ähnlichen Effekt. Wegen des stärkeren Durchwuchsbesatzes und dessen zu später Beseitigung gingen die N_{\min} -Mengen bis Mitte September in den mit dem Pflug umgebrochenen Parzellen im ersten Jahr nach dem Umbruch am stärksten zurück. Zu Vegetationsende wiesen deshalb die gefrästen Parzellen tendenziell die höchsten N_{\min} -Mengen auf. Nach Umbruch mit dem Pflug waren diese deutlich niedriger, was auf eine noch nicht vollständige N-Freisetzung aus der gebildeten Durchwuchs- bzw. Unkrautbiomasse oder weiterhin stattfindende N-Aufnahme noch lebender Wurzelstöcke hindeutet.

Vermutlich wirkt sich die Humusanreicherung unter Dauerkulturen wie Durchwachsener Silphie stärker auf die Mineralisation nach deren Umbruch aus als der Abbau der hinterlassenen Ernte- und Wurzelrückstände. Zu dieser Schlussfolgerung kamen auch SCHITTENHELM et al. (2021) [115]. In ihrer Studie gingen sie zudem davon aus, dass die intensive Bodenbearbeitung für den Umbruch zu positiven Priming-Effekten führte. Für die beim Umbruch zerkleinerten Wurzelstockfragmente wurde ein C/N-Verhältnis von 53 : 1 nachgewiesen, das ebenfalls eine N-Immobilisation bei deren Abbau erwarten lässt. Die im Rahmen dieses Projekts ermittelten N-Gehalte der Silphiewurzeln würden eher sogar auf ein noch weiteres C/N-Verhältnis hinweisen.

Darüber hinaus kann die N-Nachlieferung nach dem Silphieumbruch auch anhand der N-Abfuhr in den ungedüngten Parzellen abgeschätzt werden. Die N-Abfuhr bei unterlassener N-Düngung belief sich im ersten Jahr nach dem Umbruch bei Mais auf 159,6 kg N/ha (Abbildung 95, Abbildung 96). Bei Triticale war eine N-Abfuhr durch die Körner von nur 34,4 kg N/ha gegeben, die N-Aufnahme des Strohsträngs betrug 3,9 kg N/ha. Hierbei muss beachtet werden, dass die Maisparzellen unbeabsichtigt eine Unterfußdüngung in Höhe von 30 kg N/ha erhielten.

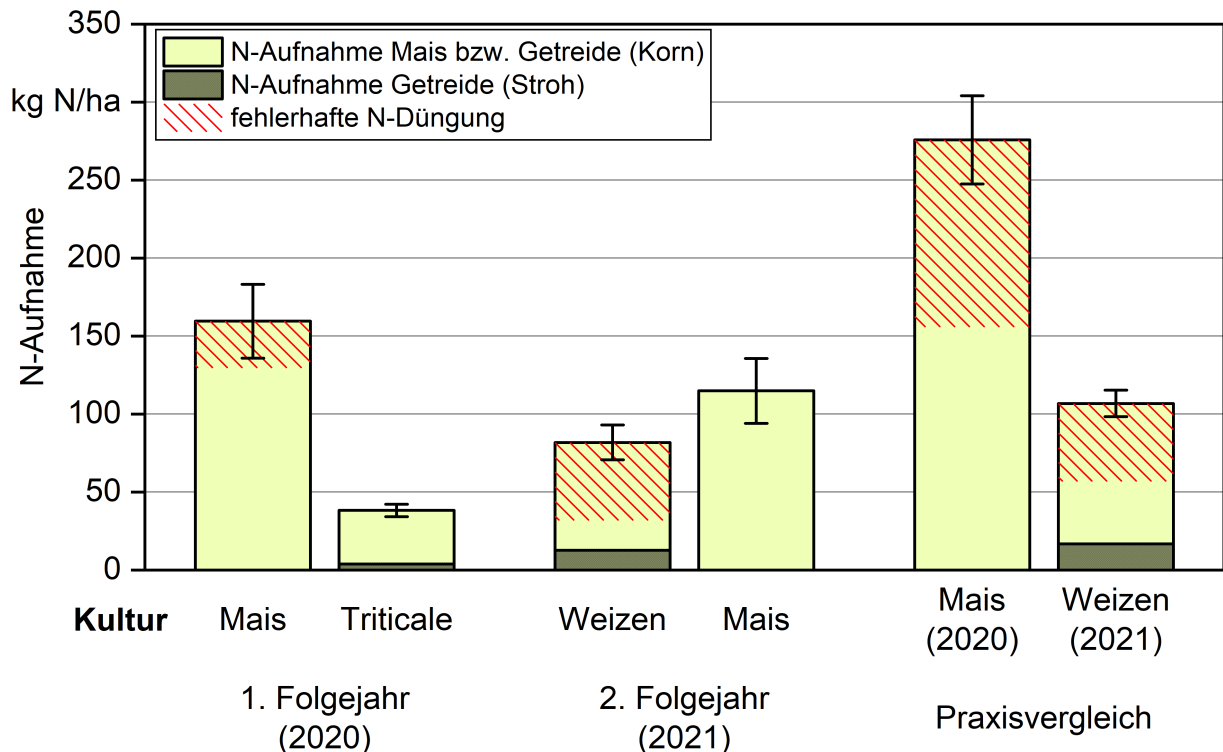


Abbildung 95: N-Abfuhr im ersten und zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsender Silphie und auf angrenzender Praxisfläche in den Parzellen, in denen eigentlich keine N-Düngung ausgebracht werden sollte (Praxis: $n = 3$, Mais 2020 bzw. Weizen 2021 $n = 7$, Triticale 2020 bzw. Mais 2021 $n = 4$); Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Unter Berücksichtigung der Unterfußdüngung und der Differenz der N_{\min} -Mengen im Boden zu Vegetationsbeginn und nach der Maisernte lässt sich daraus eine N-Nachlieferung während der Wachstumsphase des Mais von ca. 121 kg N/ha ableiten. Dieser Wert stimmt in etwa mit der N-Nachlieferung überein, die über die N_{\min} -Untersuchung der unbewachsenen Parzellen für den gleichen Zeitraum ermittelt wurde. Bis Vegetationsende und Feldaufgang des nachfolgend gesäten Winterweizens kam noch einmal eine Nachlieferung von ca. 38 kg N/ha hinzu, so dass insgesamt eine N-Mobilisation von 160 kg N/ha gegeben war. Anhand der N-Abfuhr der ungedüngten Triticaleparzellen würde sich eine N-Mobilisation von 52 kg N/ha bis zur Ernte der Triticale Ende Juli ergeben. Aus dem Verlauf der N_{\min} -Mengen in den unbewachsenen Parzellen lässt sich für den gleichen Zeitraum eine N-Mineralisation von 49 kg N/ha abschätzen, so dass beide Verfahren ähnliche Werte lieferten. Es muss allerdings beachtet werden, dass die N-Aufnahme in den Ernte- und Wurzelrückständen bei der Abschätzung anhand der N-Aufnahme nicht enthalten ist. Die deutlich geringere N-Aufnahme der ungedüngten Triticaleparzellen im Vergleich zu Silomais zeigt, dass die N-Mineralisation im ersten Jahr nach dem Umbruch relativ spät einsetzte. Zu Beginn der Vegetationsperiode könnte eine erhöhte N-Immobilisation durch den Abbau von Wurzelresten nur zu einer geringfügigen Nettomineralisation geführt haben. Wegen seiner längeren Wachstumsphase konnte der Mais besser von der erst später einsetzenden Mineralisation profitieren. Die im Anschluss an die Triticale gesäte Zwi-

schenfrucht konnte die weitere N-Nachlieferung zusammen mit dem Strohabbau weitgehend verwerten, wie der leichte Rückgang der N_{\min} -Mengen zu Vegetationsende zeigt.

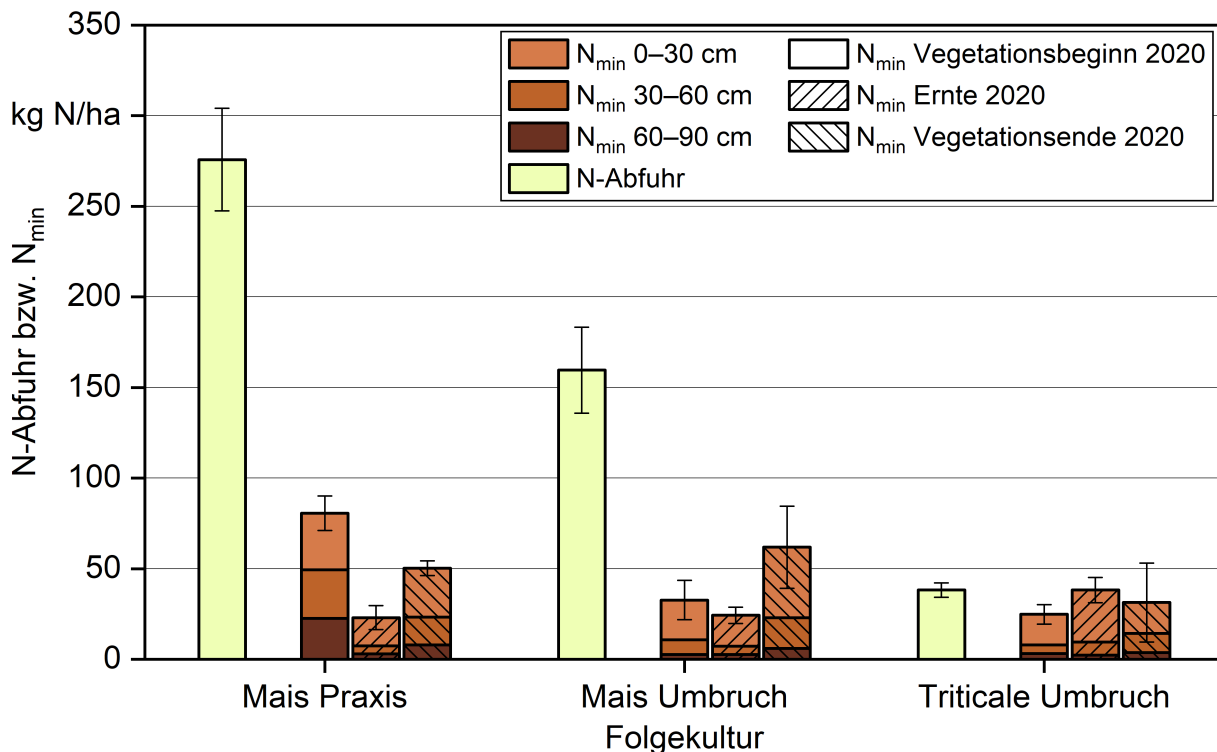


Abbildung 96: N-Abfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) und N_{\min} -Mengen im Boden zu Vegetationsbeginn, nach der Ernte der Folgekultur und zu Vegetationsende im ersten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in den Parzellen ohne N-Düngung und auf angrenzender Praxisfläche (Mais Praxis: $n = 3$, Mais Umbruch: $n = 7$, Triticale Umbruch: $n = 4$); Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen der N-Abfuhr bzw. N_{\min} -Mengen für die gesamte Beprobungstiefe

Im zweiten Jahr nach dem Umbruch wurden in den ungedüngten Parzellen mit Mais bzw. Winterweizen keine N_{\min} -Untersuchungen mehr durchgeführt. Bei Silomais ohne N-Düngung war im zweiten Jahr nach dem Umbruch eine N-Aufnahme von 114,9 kg N/ha gegeben. Unter der Annahme, dass die N_{\min} -Mengen im Boden vor und nach der Maisernte in etwa identisch waren, würde dies der N-Nachlieferung bis zur Maisernte entsprechen. In den ungedüngten Winterweizenparzellen wurde im Jahr 2021 eine N-Aufnahme in Korn und Stroh von 81,8 kg N/ha erreicht. Allerdings wurde auf diesen Parzellen versehentlich eine N-Düngung von 50 kg N/ha ausgebracht. Folglich würden für die N-Nachlieferung bis Anfang August 31,8 kg N/ha verbleiben. Aus den N_{\min} -Ergebnissen dagegen leitet sich für den gleichen Zeitraum ähnlich wie im Vorjahr eine N-Nachlieferung von 58 kg N/ha ab, was realistischer erscheint.

Für die Einordnung der N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im vorliegenden Versuch wurden N_{\min} -Untersuchungen in einer angrenzenden Praxisfläche durchgeführt. Durch den Vergleich zur Mineralisation einer normalen Ackerfläche am

Standort sollte abgeleitet werden können, ob nach dem Umbruch von Silphie mit einer erhöhten N-Nachlieferung zu rechnen ist. Der für die Untersuchung zur Verfügung gestellte Praxis teil wurde jedoch im Frühjahr versehentlich vom Landwirt mineralisch mit 90 kg N/ha gedüngt. Der Verlauf der N-Nachlieferung im Bereich der benachbarten Praxisfläche ist nachfolgend in Abbildung 97 dargestellt. Auffallend ist, dass bereits zu Vegetationsende im Jahr 2019 mit etwa 90 kg N/ha eine sehr hohe Menge mineralischen Stickstoffs im Boden vorlag. Nach dem Anbau einer Zwischenfrucht sollte die im Boden zu Vegetationsende vorhandene N_{\min} -Menge deutlich niedriger ausfallen, selbst wenn die Zwischenfrucht vor Winter und vor der Probenahme untergepflügt wurde.

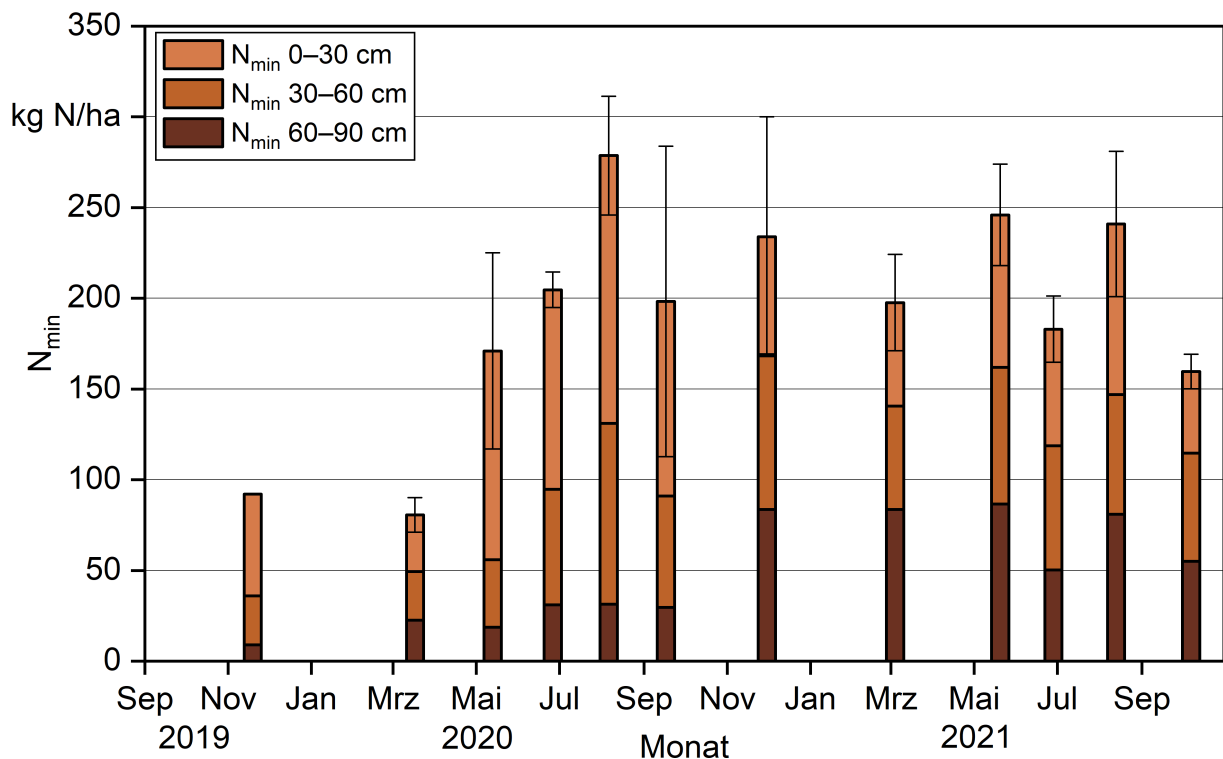


Abbildung 97: Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs (N_{\min}) im Boden auf einer an den Silphieumbruchversuch angrenzenden Praxisfläche; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Wie in den Parzellen des Umbruchversuchs so blieb auch auf den Praxisparzellen die N_{\min} -Menge über die Wintermonate bis zum Frühjahr 2020 weitgehend gleich. Eine gewisse Tiefenverlagerung von Stickstoff ist allerdings anhand der Verteilung auf die Beprobungsschichten zu erkennen. Unter Berücksichtigung der Düngergabe Anfang März ist der nachfolgende Verlauf während der Vegetation zunächst relativ flach und steigt dann ab Juli deutlich an. Die maximale N_{\min} -Menge im Boden war Anfang August festzustellen. Der Verlauf ist allerdings durch die zusätzliche, nicht unerhebliche mineralische N-Düngung beeinflusst, da diese insbesondere bei den Beprobungen im Mai und Juli vermutlich noch nicht vollständig miterfasst wurde. Der Rückgang der N_{\min} -Werte zur Probenahme Mitte September war ebenfalls einem stärkeren Bewuchs auf den Probenahmeparzellen

geschuldet. Dieser bestand im Falle der Praxisparzellen überwiegend aus den standorttypischen Sommerunkräutern/-gräsern Weißer Gänsefuß und Hühnerhirse. Bis Vegetationsende stiegen die Werte zwar entsprechend den Parzellen des Umbruchversuchs wieder an, erreichten jedoch nicht mehr das Maximum von Anfang August. Im Hinblick auf die Mengenverteilung im Beprobungsbereich war wie bei den Parzellen des Umbruchversuchs eine allmähliche Tiefenverlagerung des mineralischen Stickstoffs festzustellen. Eine Verringerung der gemessenen N_{\min} -Vorräte durch Verlagerung außerhalb des beprobten Bereichs kann somit nicht ausgeschlossen werden.

Die Unsicherheit der N_{\min} -Werte der Praxisfläche war meist höher als bei den beprobten unbewachsenen Parzellen der umgebrochenen Silphiefläche, wie ein Vergleich der Standardabweichungen zeigt. Wird ähnlich wie zuvor angenommen, dass von Anfang August bis Mitte September weitere 30 kg N/ha mineralisiert wurden, so würde dies einer N-Nachlieferung seit Vegetationsbeginn von 140 kg N/ha entsprechen.

Die N-Abfuhr des eigentlich ungedüngten Maises auf der benachbarten Praxisfläche lag mit 275,8 kg N/ha deutlich über dem Niveau der ungedüngten Parzellen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie. Darüber hinaus wurde auch die N-Abfuhr der gedüngten Varianten überschritten. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass der Praxisstreifen zu Vegetationsbeginn versehentlich mit 90 kg N/ha gedüngt wurde, eine Unterfußdüngung durchgeführt wurde und die N_{\min} -Menge zu diesem Zeitpunkt mit 81 kg N/ha auch bereits auf einem sehr hohen Niveau lag. Zusammen stand den Pflanzen somit ungeachtet der N-Mineralisation während der Vegetation ein N-Angebot von mindestens 201 kg N/ha zur Verfügung. Anhand des Vergleichs der N_{\min} -Mengen im Boden zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte würde sich eine N-Nachlieferung auf der Praxisfläche bis zur Maisernte von 98 kg N/ha bzw. bis Vegetationsende von 125 kg N/ha ergeben.

Im zweiten Jahr nach dem Umbruch schwankten die N_{\min} -Mengen im Boden in den unbewachsenen Parzellen zwischen den einzelnen Beprobungsterminen sehr stark, obwohl eigentlich nur gegen Anfang September eine stärkere Verunkrautung gegeben war. Der Rückgang der Werte von Dezember 2020 bis März 2021 kann entsprechend dem Silphieumbruchversuch durch Auswaschungsverluste erklärt werden. Anschließend stiegen die N_{\min} -Mengen erwartungsgemäß an, fielen dann aber bereits Anfang Juli unter das Niveau zu Vegetationsbeginn zurück. Dies und auch der Rückgang bis Anfang Oktober könnte durch Auswaschungsverluste infolge des feuchten Sommers verursacht worden sein, da die unbewachsenen Parzellen insgesamt weniger Wasser verdunsteten. Darauf deutet auch der Rückgang und erneute Anstieg der N_{\min} -Mengen in der untersten Beprobungsschicht hin, so dass keine Aussagen über die N-Nachlieferung während der Vegetation abgeleitet werden können. Der Anstieg der N_{\min} -Mengen im Boden zwischen Anfang März und Mitte Mai war allerdings identisch mit dem Anstieg in den entsprechenden Parzellen auf der ehemaligen Silphiefläche. Deshalb deutet sich auch für das zweite Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie an, dass am vorliegenden Standort die N-Mineralisation nicht erhöht war. Darauf weist auch die N-Aufnahme des Winterweizens ohne N-Düngung auf dem angrenzenden Praxisschlag hin. Im Mittel betrug diese 106,8 kg N/ha und war somit um 25 kg höher als in den entsprechenden Weizenparzellen des Silphieumbruchversuchs.

5.2.1.5.2 Mineralischer Stickstoff im Boden unter den Folgekulturen

Für das Versuchsjahr 2020 wurde bezüglich der N_{\min} -Mengen zu Vegetationsbeginn bei Triticale bzw. vor der Saat des Mais zur Ernte beider Kulturen und jeweils zu Vegetationsende eine varianzanalytische Auswertung durchgeführt. Gleiches gilt für die N_{\min} -Beprobung nach der Ernte im Jahr 2021. Dadurch sollte der Einfluss der Versuchsfaktoren auf die N-Nachlieferung überprüft werden. Darüber hinaus wurde überprüft, ob die Kulturen bei zusätzlicher N-Düngung in der Lage sind, die N-Nachlieferung nach dem Umbruch zu verwerten. Für die Auswertung der Daten zur Mais- bzw. Triticaleernte im Jahr 2020 und aller Messungen im Jahr 2021 war eine logarithmische Datentransformation erforderlich, um eine Normalverteilung und Varianzhomogenität der Residuen zu erreichen. Zusätzlich musste bei der Beprobung nach der Maisernte im Jahr 2021 ein Ausreißer entfernt werden. Die Triticaleparzellen wiesen im ersten Jahr nach dem Umbruch nur für die N_{\min} -Mengen zu Vegetationsende signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden auf ($p = 0,0009$). Zu Vegetationsbeginn lagen die N_{\min} -Mengen in den Triticaleparzellen mit nachfolgender N-Düngung mit ca. 25 kg N/ha auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie bei den zum gleichen Termin beprobten unbewachsenen Parzellen (Abbildung 98). Darüber hinaus war nach der Ernte mit 28 bis 38 kg N/ha trotz des relativ niedrigen Ertragsniveaus und der praxisüblichen N-Düngung nur ein geringer N_{\min} -Rest vorhanden.

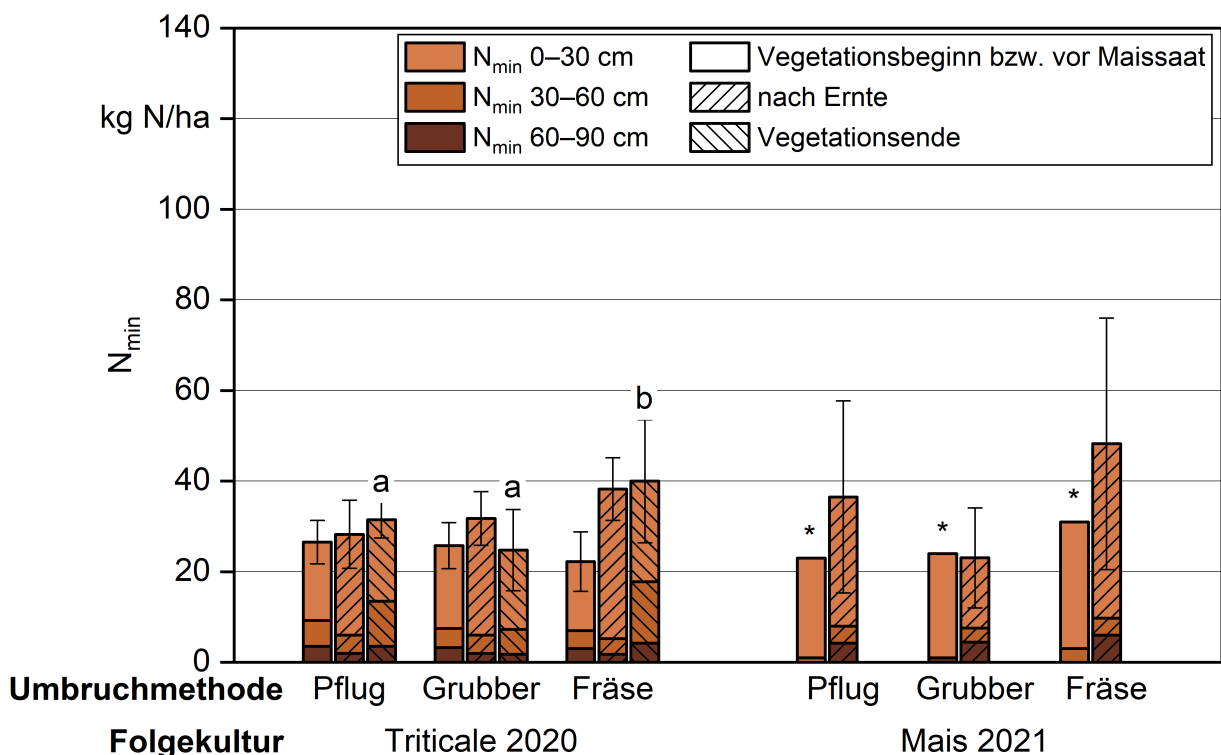


Abbildung 98: Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}) nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in den Folgekulturen Triticale (1. Jahr) und Mais (2. Jahr) zu Vegetationsbeginn, nach der Ernte und zu Vegetationsende; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey jeweils innerhalb eines Probenahmetermins, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungtiefe

Nach der Ernte war allerdings in der Fräsvariante tendenziell eine etwas höhere N_{\min} -Menge gegeben, was im Zusammenhang mit den niedrigeren Erträgen stehen könnte. Im Rahmen der N_{\min} -Untersuchung zu Vegetationsende wurde in den gefrästen Parzellen signifikant höhere N_{\min} -Mengen im Vergleich zu den anderen beiden Umbruchmethoden festgestellt. Insgesamt veränderte sich das Niveau gegenüber der Probenahme nach der Ernte kaum. Wegen der nach Triticale angebaute Zwischenfrucht wäre durchaus ein Rückgang der N_{\min} -Mengen zu erwarten gewesen. Mit durchschnittlich 32 kg N/ha lag dennoch zu Vegetationsende ein deutlich und signifikant niedrigeres Niveau im Vergleich zu den zum gleichen Termin beprobten benachbarten Maisparzellen vor ($p < 0,0001$). Folglich zeigte der Zwischenfruchtanbau durchaus eine positive Wirkung, wenn die Entwicklung auch in den Triticaleparzellen mit N-Düngung nicht besonders üppig war (Abbildung 99). Darüber hinaus war viel Ausfallgetreide enthalten. Die signifikant niedrigeren N_{\min} -Mengen in den gegrubberten und gepflügten Varianten könnten auch durch den dort vorhandenen stärkeren Durchwuchsbesatz bedingt sein.



Abbildung 99: Schwache Entwicklung der nach Triticale gesäten Zwischenfrucht mit Dauerkulturdurchwuchs Ende November 2020

Im zweiten Jahr nach dem Umbruch war in den Winterweizenparzellen mit ca. 45 kg N/ha eine deutlich höhere N_{\min} -Menge zu Vegetationsbeginn vorhanden (Abbildung 100), wobei bereits zu Vegetationsende im Vorjahr nach der Saat eine N_{\min} -Menge von 67 kg N/ha vorgelegen hatte. Das Defizit von ca. 12 kg N/ha und die erhöhten Mengen in der untersten Beprobungsschicht weisen, wie bereits bei den ungedüngten Parzellen festgestellt, auf

eine N-Auswaschung über den Winter hin. Eine bedeutende N-Aufnahme durch den Bestand ist wegen der späten Saat unwahrscheinlich. Nach der Ernte war mit durchschnittlich 50 kg N/ha ein ähnliches Niveau gegeben. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass auch die etwas überhöhte N-Düngung von ca. 210 kg N/ha vollständig verwertet wurde. Anhand der N-Abfuhr würde die N-Bereitstellung 198 kg N/ha betragen. Dies würde wie bei der Triticale im Jahr 2020 bedeuten, dass die N-Mineralisation die Verluste nicht überstieg, wobei vermutlich ein Großteil des mineralischen Stickstoffs durch N-Immobilisation entzogen wurde.

Ein ähnliches Bild zeigte sich auch in den gedüngten Maisparzellen. Vor der Maissaat im ersten Jahr nach dem Umbruch konnte im Mittel eine N_{min} -Menge von 26 kg N/ha nachgewiesen werden (Abbildung 100). Hierbei waren jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden vorhanden ($p = 0,0118$). Nach dem Umbruch mit Pflug und Grubber war eine signifikante höhere N_{min} -Menge im Boden im Vergleich zur Fräsvariante vorzufinden. Wie bereits erwähnt könnte diese Tatsache neben der geringeren Bodenlockerung auch auf das Vorliegen einer N-Immobilisation wegen der starken Zerkleinerung der Wurzelrückstände hindeuten. Außerdem lagen die N_{min} -Werte in der Grubber- und Pflugvariante in etwa auf dem Niveau, das zum entsprechenden Zeitpunkt auch anhand der N_{min} -Untersuchung der unbewachsenen Parzellen zu erwarten gewesen wäre.

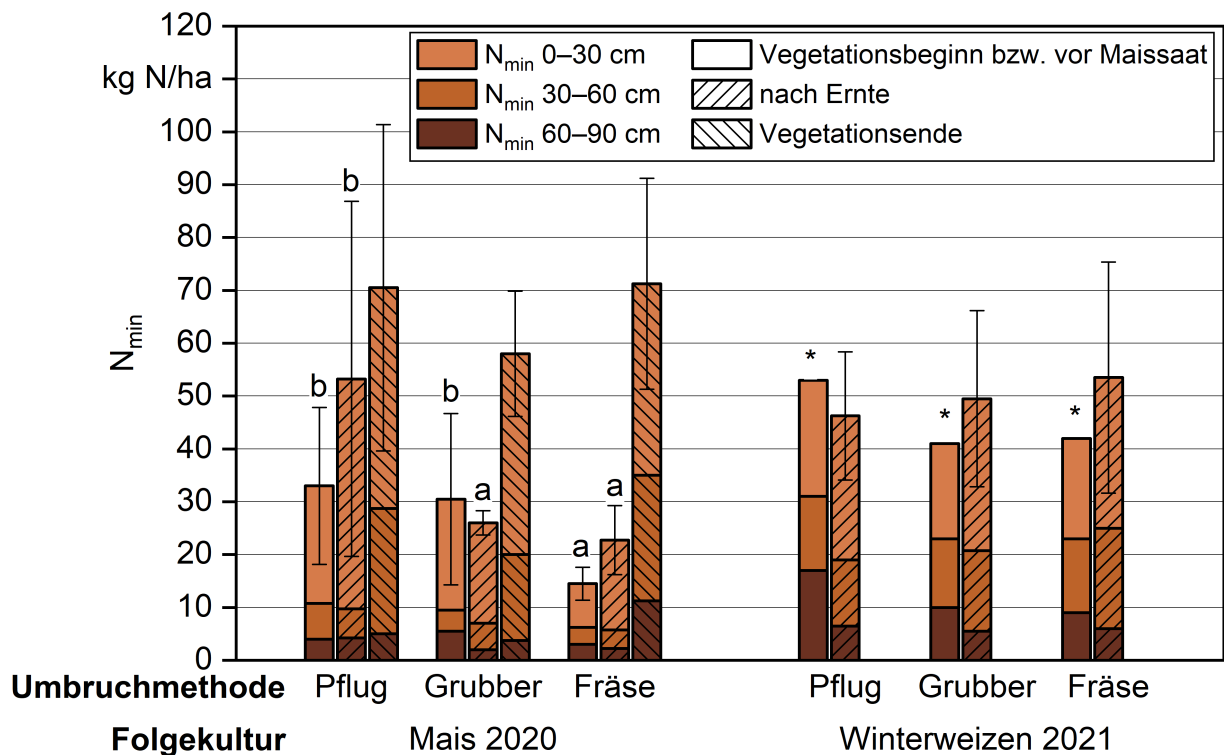


Abbildung 100: Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{min}) nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in den Folgekulturen Mais (1. Jahr) und Winterweizen (2. Jahr) zu Vegetationsbeginn, nach der Ernte und zu Vegetationsende; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey jeweils innerhalb eines Probenahmeterrains, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Mit durchschnittlich 34 kg N/ha waren auch nach der Maisernte die N_{\min} -Mengen im Boden auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Nur in der gepflügten Variante war mit ca. 53 kg N/ha ein etwas höherer N_{\min} -Rest im Boden vorhanden, der zudem signifikant über den Werten der anderen beiden Umbruchmethoden lag. Wie bei den Unterschieden vor der Saat könnte die Ursachen hierfür eine erhöhte Mineralisation der organischen Bodensubstanz als Folge der stärkeren Durchlüftung gewesen sein. Gleichzeitig waren vermutlich der Abbau der Wurzelrückstände des Silphiebestands aufgrund der fehlenden Zerkleinerung und somit die daraus resultierende Immobilisation geringer. Ein ähnliches Phänomen hätte allerdings auch in der gegrubberten Variante beobachtet werden müssen. Darüber hinaus ist unklar, ob der deutlich höhere Durchwuchsbesatz in diesen beiden Varianten zu einer zusätzlichen Reduktion der N_{\min} -Werte nach der Ernte führte. In den ungedüngten Maisparzellen war im Mittel eine N_{\min} -Menge von 24 kg N/ha nach der Ernte vorzufinden. Deutliche Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden waren nicht festzustellen. Zusammen mit dem hohen Ertragsniveau in den gedüngten Maisparzellen lässt sich daraus folgern, dass für das Wachstum der Maispflanzen ausreichend Stickstoff zur Verfügung stand. Der Mais konnte von der vermutlich erst später ab Mitte Juni einsetzenden stärkeren Mineralisation besser profitieren als das Getreide. Die mineralische N-Düngung zur Saat konnte zu Wachstumsbeginn genügend Stickstoff bereitstellen, der fast vollständig verwertet wurde, wie der Vergleich zwischen den gedüngten und ungedüngten Parzellen zeigt. Die N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse bis zur Ernte und die Veränderung der N_{\min} -Mengen zwischen Saat und Ernte lassen erwarten, dass durch N-Nachlieferung und N-Düngung mindestens 243 kg N/ha bereitgestellt wurden. Bei einer N-Düngung von durchschnittlich 172 kg N/ha würde dies eine N-Nettomineralisation von 71 kg N/ha bedeuten. Das Niveau der anhand der ungedüngten bzw. unbewachsenen Parzellen abgeleiteten N-Nachlieferung wurde nicht erreicht.

Bis Vegetationsende stiegen die N_{\min} -Mengen vor allem bei den Umbruchmethoden Grubber und Fräse deutlich an und lagen im Durchschnitt bei 67 kg N/ha. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden waren nicht mehr vorhanden. Insbesondere in der gefrästen Variante wurde somit seit der Ernte nochmal eine N-Menge von fast 50 kg N/ha nachgeliefert. Im Mittel betrug die N-Nachlieferung seit der Ernte 33 kg N/ha, was insgesamt eine N-Mineralisation von 104 kg N/ha ergeben würde. Gegenüber dem Anbau von Triticale mit nachfolgender Zwischenfrucht war somit wegen der signifikant höheren N_{\min} -Reste vor Winter aus ökologischer Sicht ein Nachteil gegeben. In den ungedüngten Maisparzellen stiegen die N_{\min} -Mengen bis Vegetationsende ähnlich stark an, so dass die N-Düngung in den gedüngten Parzellen nicht zu hoch angesetzt war. Auch wenn Silomais wegen seiner langen Wachstumsphase und des hohen N-Aufnahmevermögens einen Großteil der N-Nachlieferung während der Vegetation verwerten kann, ist der starke Anstieg der N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte bedenklich.

Im zweiten Jahr nach dem Umbruch zeigte sich vor der Maissaat mit durchschnittlich 26 kg N/ha erneut ein sehr niedriges Niveau der N_{\min} -Mengen im Boden. Der hohe Anteil winterharten Ausfallgetreides in der vorausgegangenen Zwischenfrucht könnte hierzu beigetragen haben. Wie im ersten Jahr nach dem Umbruch waren auch im Jahr 2021 die N_{\min} -Reste im Boden nach der Maisernte mit ca. 36 kg N/ha ähnlich niedrig. In einem be-

nachbarten Düngungsversuch war nach der Maisernte bei einem ähnlichen Ertragsniveau in den Parzellen mit langjährig rein mineralischer N-Düngung eine deutlich höhere N_{\min} -Menge von 73 kg N/ha vorhanden. Ungeachtet des insgesamt niedrigeren Niveaus schwankten im vorliegenden Umbruchversuch dennoch die N_{\min} -Mengen teilweise sehr stark. Ausgehend von den N_{\min} -Mengen vor der Saat und nach der Ernte würde sich zusammen mit der N-Aufnahme der oberirdischen Biomasse zum Erntetermin und einer N-Düngung von 205 kg N/ha eine N-Nachlieferung bis zur Maisernte von 74 kg N/ha ergeben. Verluste und sonstige N-Einträge wurden dabei nicht berücksichtigt. Dies entspricht in etwa dem für das erste Jahr nach dem Umbruch auf diese Weise abgeleiteten Wert, so dass die Mineralisation zwar die nicht erfassten Verluste überstieg, die ungedüngten Parzellen aber eine höhere N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie erwarten lassen.

5.2.1.5.3 Schlussfolgerung Stickstoffnachlieferung

Basierend auf den Messungen der N_{\min} -Mengen im Boden und N-Aufnahmen war insgesamt keine erhöhte N-Nachlieferung im ersten und zweiten Jahr nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie festzustellen. Je nach Methode der Herleitung lag auf der Praxisfläche im ersten Jahr nach dem Umbruch eine N-Nachlieferung bis Mitte September von ca. 100 bis 140 kg N/ha vor. Die N-Nachlieferung nach dem Umbruch des fünfjährigen Silphiebestands erreichte im gleichen Zeitraum ebenfalls ca. 110 bis 120 kg N/ha. Unter Vorbehalt der relativ großen Unsicherheit der Werte auf der Praxisfläche ist unter den Versuchsbedingungen eine erhöhte N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im ersten Folgejahr eher unwahrscheinlich. Demgegenüber konnten SCHITTENHELM et al. (2021) [115] beim Anbau von Mais nach dem Umbruch eines acht Jahre alten Silphiebestands bis zur Maisernte eine N-Nachlieferung von 222 kg N/ha nachweisen. Diese war um ca. 100 kg N/ha höher als die N-Nachlieferung unter einer Mais-Selbstfolge, die etwa dem Niveau der im vorliegenden Projekt erfassten N-Nachlieferung sowohl nach dem Silphieumbruch als auch auf der Praxisfläche entsprach. Auch nach dem Umbruch von Dauergrünland ist mit einer sehr hohen N-Nachlieferung von 200 bis 300 kg N/ha zu rechnen [141] [71]. Es ist zu erwarten, dass mit zunehmender Standdauer die Humusanreicherung beim Anbau von Dauerkulturen zunimmt [47], woraus wiederum eine erhöhte N-Nachlieferung nach deren Umbruch resultiert. Neben einer erhöhten N-Nachlieferung wurden von SCHITTENHELM et al. (2021) [115] mit 123 kg N/ha auch sehr viel höhere N_{\min} -Reste nach der Ernte von Mais als Folgekultur des Silphieumbruchs gemessen. Demgegenüber lagen im vorliegenden Projekt die N_{\min} -Werte in den gedüngten Maisparzellen nach der Ernte mit 34 bzw. 36 kg N/ha im ersten bzw. zweiten Jahr nach dem Umbruch auf einem sehr niedrigen Niveau. Im ersten Jahr nach dem Umbruch wurde die N-Düngung um 20 kg N/ha reduziert, im zweiten Jahr die maximal nach Düngeverordnung mögliche Menge ausgebracht. Eine gewisse Einsparung von N-Dünger nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie, wie von SCHITTENHELM et al. (2021) [115] vorgeschlagen, erscheint deshalb bei Mais als Folgekultur durchaus angebracht. Die Einsparung sollte mit zunehmendem Alter des umgebrochenen Bestands zunehmen.

Hinsichtlich der Dynamik der Mineralisation nach dem Umbruch deuten die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass zunächst eine N-Immobilisierung aus dem Abbau der Ernte- und Wurzelrückstände zu erwarten ist. Diese trug vermutlich unter anderem zu den unterdurchschnittlichen Triticaleerträgen im ersten Jahr nach dem Umbruch bei. Die N-Immobilisation geht dabei wahrscheinlich in erster Linie von dem Abbau der Wurzelreste aus, die laut SCHITTENHELM et al. (2021) [115] ein relativ weites C/N-Verhältnis von 53 : 1 aufweisen. Bei diesem C/N-Verhältnissen ist in der Regel von einer N-Immobilisation auszugehen, verlässliche Aussagen sind jedoch ohne Kenntnis der Abbaubarkeit nicht möglich [25]. Die relativ niedrigen N-Gehalte, die im vorliegenden Projekt bei der Untersuchung der Wurzelproben aus dem Silphiedüngungsversuch nachgewiesen wurden, deuten ebenfalls in diese Richtung. Eine erhöhte N-Mineralisation nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie müsste deshalb aus dem erneuten Abbau der während der Standdauer angereicherten organischen Bodensubstanz stammen. Für eine mögliche Humusanreicherung und daraus resultierende N-Freisetzung bei erneuter Bewirtschaftungsänderung war die Standdauer des umgebrochenen Bestands mit knapp fünf Jahren jedoch vermutlich zu kurz. Auch FÖRSTER et al. (2020) konnten nach fünf Jahren Standdauer von Durchwachsener Silphie sowie bei anderen Dauerkulturen wie Riesenweizengras und Miscanthus keine signifikant höheren C_{org} -Vorräte im Vergleich zu Mais feststellen. Als Ursache für das Ausbleiben eines Effekts wurde die kurze Standdauer der Kulturen vermutet. In einer anderen Studie konnte eine relative Veränderung der Bodenkohlenstoffgehalte nach fünf Jahren Silphienutzung von -9 bis +8 % gegenüber einer Fruchtfolge aus Mais und Grünroggen beobachtet werden [44]. Signifikante Unterschiede oder eine eindeutige Wirkung des Silphieanbaus auf die C_{org} -Gehalte waren somit nicht gegeben. Bei anderen Untersuchungen mit ähnlichem Zeitrahmen wurden ebenfalls meist keine signifikant höheren C_{org} -Vorräte unter Dauerkulturnutzung gegenüber einjährigen Kulturen nachgewiesen [48] [114]. Dennoch zeigten sich bei RUF et al. (2018) [114] zumindest tendenziell höhere C_{org} -Gehalte bei Dauerkulturen, wobei bei Durchwachsener Silphie tendenziell höhere C/N-Verhältnisse im Boden im Vergleich zu anderen Dauerkulturen beobachtet wurden. Signifikante Unterschiede im C_{org} -Vorrat waren meist erst bei längerer Beobachtungsdauer von über 15 Jahren festzustellen [47]. Es ist folglich davon auszugehen, dass Dauerkulturen bei längerer Standdauer zu einer Erhöhung der C_{org} -Gehalte bzw. -Vorräte im Boden führen. Mit einer erhöhten N-Nachlieferung aus dem erneuten Abbau des während einer Dauerkulturnutzung gesteigerten Humusvorrats ist somit erst bei längerer Standdauer zu rechnen, wobei SCHITTENHELM et al. (2021) [115] beim Umbruch eines achtjährigen Silphiebestands bereits eine deutlich erhöhte N-Nachlieferung feststellen konnten. In einer anderen Studie wurde bei Dauerkulturen nach fünf Jahren Standdauer vor allem in den schwer abbaubaren Humusfraktionen eine Steigerung gegenüber einjährigen Kulturen beobachtet [112]. Dies deutet einerseits darauf hin, dass nach diesem Zeitraum der Humusaufbau noch nicht abgeschlossen war. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass bei Dauerkultur-Anbausystemen größere Mengen stabilisierter organischer Substanz gespeichert werden können. Nach Umbruch werden diese stabilisierten Pools nicht so leicht mineralisiert und erhalten somit die Bodenqualität [112]. Dies könnte zusammen mit der relativ kurzen Standdauer von fünf Jahren erklären, warum im vorliegenden Versuch nach dem Umbruch nur eine N-Nachlieferung auf standorttypischem Niveau nachgewiesen wurde.

5.2.1.6 Zusammenfassende Diskussion

Die Gefahr für einen möglichen Besatz mit Durchwachsener Silphie in der Folgekultur geht einerseits von einem direkten Wiederaustrieb aus den unmittelbar an bzw. leicht unter der ursprünglichen Bodenoberfläche angelegten Knospen aus (Abbildung 101). Diese Erneuerungsknospen werden an den Stängelansätzen der Vorjahrestriebe angelegt und sind insbesondere an größeren Wurzelstöcken zahlreich vorhanden. Andererseits können auch während der Abreife und der Ernte ausgefallene Samen keimen. Die Samen von Durchwachsener Silphie zeigen jedoch eine ausgeprägte Dormanz, was eine ungleichmäßige und verzögerte Keimung zur Folge hat [143] [54]. Für eine Keimung werden außerdem ausgeprägte Wechseltemperaturen benötigt [136]. Darüber hinaus wirkt auch eine vorausgehende Kältephase durch eine Stratifikation förderlich auf die Keimung [143] [136] [54]. Demzufolge keimt meist nur ein Teil der jährlich gebildeten Samen, so dass aus dieser Quelle mit einem längeren Auftreten von Durchwachsener Silphie auf der Fläche gerechnet werden muss. Nach der Keimung zeigt die Silphie eine langsame Jugendentwicklung [78] und kein Längenwachstum im ersten Jahr, so dass die aus Samen gekeimten Pflanzen von den meisten Kulturen überwachsen und zurückgedrängt werden sollten. Der Austrieb aus den Erneuerungsknospen ist hingegen problematischer zu bewerten, da bei weitgehend intakten Wurzelballen genug Reservestoffe für die Ausbildung kräftiger Triebe, ähnlich einem normalen Wuchsjahr, zur Verfügung stehen.



Abbildung 101: Aufsicht auf einen Wurzelstock von Durchwachsener Silphie mit zahlreichen rosa gefärbten Knospen zum Zeitpunkt des beginnenden Austriebs der Pflanze im Frühjahr

Im Hinblick auf den Besatz mit Durchwuchstrieben in der Folgekultur erscheint es nach bisherigen Ergebnissen am sinnvollsten, den ersten Bodenbearbeitungsschritt beim Umbruch von Silphiebeständen mit einer Fräse durchzuführen. Der oft empfohlene Einsatz des Pflugs für den Umbruch von Durchwachsener Silphie [14] [57] hatte im Versuch hingegen den stärksten und am schwierigsten bekämpfbaren Durchwuchs zur Folge. SCHITTENHELM et al. (2021) [115] brachen in ihrer Studie in Braunschweig einen Silphiebestand durch Fräsen nach Vegetationsende gefolgt von einer weiteren Bearbeitung mit der Fräse und anschließendem Pflügen im Frühjahr um. Die Bearbeitung mit der Fräse erfolgte ähnlich wie im vorliegenden Versuch mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 2–3 km/h, wodurch die Silphiewurzelstöcke in Fragmente von durchschnittlich 16 g Frischmasse zerkleinert wurden. Diese Maßnahmenkombination führte im nachfolgend gesäten Mais vor der ersten Herbizidmaßnahme zu einem Durchwuchsbesatz von ca. acht Silphietrieben je m². Im vorliegenden Projekt war nahezu ein identischer Durchwuchsbesatz festzustellen, so dass der erste Bearbeitungsgang mit der Fräse offenbar die entscheidende Zerkleinerungs- und Schädigungswirkung mit sich bringt. Hinsichtlich der Durchwuchsvermeidung wäre somit eine einmalige Bearbeitung mit der Fräse ausreichend. Die Aussaat wurde dabei nicht durch Wurzelreste beeinträchtigt, wie von dem Versuchsteam in Braunschweig befürchtet. Ein zusätzliches Pflügen erscheint somit überflüssig. Wenn keine Schadverdichtungen als Folge einer nassen Ernte vorliegen, ist eine tiefere Lockerung beim Umbruch von Durchwachsener Silphie normalerweise nicht erforderlich. Eine tiefe Bearbeitung wäre eventuell sogar eher kontraproduktiv, da die Durchwachsene Silphie durch ihre tiefreichenden Wurzeln (siehe 6.2, [119]) den Boden umfassend erschließt. Dadurch und wegen des höheren Besatzes mit tiefgrabenden Regenwürmern [50] stehen vertikale Poren zur Verfügung, die bereits eine optimale Durchwurzelung und einen besseren Zugang zu den Ressourcen des Unterbodens ermöglichen [115].

Die Ursache für die beobachteten Unterschiede zwischen den getesteten Umbruchmethoden im Hinblick auf den Durchwuchsbesatz in den Folgejahren liegt vermutlich darin, dass die zerkleinerten Wurzelteile nach dem Umbruch mit einer Fräse stark beschädigt sind und für den Austrieb der dort ansetzenden Knospen weniger Reservestoffe bereitstellen. Zudem verfügten die Wurzelstockfragmente nur noch über wenige intakte Wurzeln für eine rasche Nährstoffaufnahme. Folglich kam es in dieser Variante zu kleineren und schwächeren Trieben, die kaum Längenwachstum aufwiesen (Schossen). Die Konkurrenzkraft des Durchwuchses und auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber den Herbiziden war dadurch in der Fräsvariante relativ gering. Anders in den mit dem Pflug umgebrochenen Parzellen, in denen die Wurzelstöcke und Wurzeln bis auf Krumentiefe größtenteils intakt blieben und den Knospen somit mehr Reservestoffe zur Verfügung standen. Die Folge waren deutlich kräftigere Triebe, die sich auch nach einer Herbizidbehandlung besser regenerierten, so dass diese dort einen geringeren Wirkungsgrad zeigten.

Die Arbeitstiefe der Fräse muss dabei nicht bis auf Krumentiefe reichen, da sich Knospen nur bis zu einer Tiefe von maximal 10 cm an den Triebansätzen des Vorjahrs befinden (Abbildung 102). Diese stellen die kräftigeren Strukturen der Wurzelstöcke dar. Für eine ausreichende Schädigung sollte deshalb eine Arbeitstiefe von mindestens 7–8 cm eingehalten werden. Wichtig ist eine gute Zerkleinerung der Wurzelstöcke, um durch eine Re-

duktion der zum Wiederaustrieb zur Verfügung stehenden Reservestoffe die Wachstumsleistung zu verringern. Da die Durchwachsene Silphie keine richtigen Rhizome, also unterirdisch verlaufende Sprosse ausbildet, ist eine Vermehrung der Pflanze bei deren Zerkleinerung nicht zu befürchten. Für eine gute Wirkung der Fräse ist allerdings wie auch bei SCHITTENHELM et al. (2021) [115] eine geringe Fahrgeschwindigkeit erforderlich. Unter Umständen können bei einer zu flachen Bearbeitung mit der Fräse einzelne tiefer sitzende Knospenansätze nicht erfasst werden, weshalb auf die Einhaltung einer entsprechenden Arbeitstiefe zu achten ist. Gegenüber einer krumentiefen Bearbeitung mit der Fräse ist die Kraftstoff- und Kosteneinsparung bei flacherer Bearbeitung jedoch enorm. Außerdem wird bei trockenen Bedingungen kein krumentief überlockertes Boden hinterlassen. Unter feuchten Bedingungen kann eine tiefe Bearbeitung ebenfalls mit einer Schädigung der Bodenstruktur verbunden sein. Entscheidend für den erfolgreichen und bodenschonenden Einsatz der Fräse sind deshalb trockene Bodenbedingungen. In dieser Hinsicht wäre ein Umbruch nach der Ernte im Spätsommer bzw. Frühherbst optimal, wenn häufig trockene Bodenverhältnisse gegeben sind. Es muss beachtet werden, dass der vorliegende Versuch auf Wirkungen des ersten Bodenbearbeitungsgangs fokussiert war. Grundsätzlich wäre jedoch auch die Kombination verschiedener Bodenbearbeitungsschritte möglich, wobei für eine optimale Wirkung zuerst mit der Fräse bearbeitet werden sollte. Zusätzlich wären auch mehrere flache Bearbeitungsgänge mit einem Grubber denkbar, wenn keine Fräse zur Verfügung steht. Durch eine oberflächliche Ablage der Wurzelstücke könnte deren Austrocknung erreicht werden, was voraussichtlich im Rahmen des Folgeprojekts untersucht werden soll.



Abbildung 102: Vertikale Ausdehnung der Knospen bildenden Strukturen der Wurzelstücke von Durchwachsener Silphie

Problematisch ist ein zeitnaher Umbruch nach der letzten Ernte jedoch aus Sicht der N-Nachlieferung, wenn nach dem Umbruch eine Sommerung wie z. B. Mais gesät werden soll. Um das Auswaschungsrisiko für mineralischen Stickstoff über die Wintermonate zu reduzieren, führten SCHITTENHELM et al. (2021) [115] den Umbruch in ihrer Studie erst nach Vegetationsende durch. Dies setzt vor allem bei einem Einsatz der Fräse trockene Bodenverhältnisse voraus, die unter bayerischen Verhältnissen nur in den seltensten Fällen vorhanden sein dürften. Nach dem Umbruch im Herbst und bis Vegetationsbeginn konnte im vorliegenden Versuch jedoch keine nennenswerte N-Mineralisation festgestellt werden. Auch bei SCHITTENHELM et al. (2021) [115] war im Frühjahr zu Vegetationsbeginn nur eine geringe N_{\min} -Menge im Boden vorhanden. Während der Vegetation wurde allerdings eine sehr hohe N-Nettomineralisation von 222 kg N/ha ermittelt, die ca. 100 kg N/ha über der N-Nettomineralisation unter Maisselbstfolge lag. Der Vergleich der N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im vorliegenden Projekt mit der benachbarten Praxisfläche ließ hingegen keine erhöhte N-Nachlieferung in den ersten beiden Jahren nach dem Umbruch erkennen. Das Niveau der Praxisfläche war allerdings vermutlich etwas überschätzt, da die Beprobungsparzellen, die nahe des Schlagrands platziert waren, nicht ganz repräsentativ waren. Gegenüber der N-Mineralisation der Praxisfläche neben dem Sidaumbruchversuch in Wolferkofen waren jedoch ebenfalls kaum Unterschiede vorhanden.

Wie bereits angesprochen ist davon auszugehen, dass eine erhöhte N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie auf einen erneuten Abbau der während der Silphienutzung angereicherten organischen Bodensubstanz zurückzuführen ist. Aus dem Abbau der Ernte- und Wurzelrückstände ist hingegen wegen des relativ weiten C/N-Verhältnisses [115] zunächst eher eine erhöhte N-Immobilisation zu erwarten. Eine derartige Immobilisation wurde eventuell durch eine Zerkleinerung der Wurzelstöcke mit der Fräse beschleunigt und führte zu einem eingeschränkten Wachstum der Wintertriticale im vorliegenden Projekt. Darüber hinaus war der umgebrochene Silphiebestand mit einer Standdauer von fünf Jahren im Verhältnis zur erwarteten Nutzungsdauer noch nicht besonders alt. Der unter einer Dauerkulturnutzung zu erwartende Humusaufbau war dementsprechend wahrscheinlich nur gering [112], so dass nach dem Umbruch keine nennenswert erhöhte N-Nachlieferung nachgewiesen werden konnte. Zusätzlich wurde diese eventuell zumindest im ersten Jahr nach dem Umbruch durch eine erhöhte Immobilisation oder eine zusätzliche N-Aufnahme durch den kräftigen Durchwuchs in den gepflügten Parzellen überlagert. Die von SCHITTENHELM et al. (2021) [115] umgebrochenen acht Jahre alten Silphiebestände wiesen hingegen bereits eine deutlich erhöhte N-Nachlieferung auf dem Niveau der gleichaltrigen Feldgrasparzellen auf. Die sehr intensive Bodenbearbeitung in dieser Studie könnte die Mineralisation zusätzlich gesteigert haben. In einer anderen Untersuchung zum Umbruch von Grünland wurde dagegen keine erhöhte N_{\min} -Menge nach einem mechanischen Umbruch mit einem Pflug im Gegensatz zu einem rein chemischen Umbruch festgestellt [71]. Auch die Ergebnisse des vorliegenden Projekts deuten darauf hin, dass die Intensität der Bodenbearbeitung beim Umbruch keinen Einfluss auf die Höhe der N-Nachlieferung im weiteren Verlauf hatte. Unabhängig vom Standorteinfluss kann somit angenommen werden, dass mit zunehmender Standdauer die N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Silphiebeständen zunehmen wird.

Bei älteren Beständen kann es deshalb je nach Standort durchaus problematisch sein, das hohe N-Angebot aus der Mineralisation durch die nachfolgenden Kulturen zu nutzen. Bei jüngeren Beständen, wie im vorliegenden Projekt, erscheinen selbst nach dem Umbruch im Herbst besondere Maßnahmen für eine zeitnahe N-Verwertung nicht unbedingt erforderlich. Die gewählten Abschläge vom N-Düngebedarf der Folgekulturen im ersten Jahr nach dem Umbruch in Höhe von 10 kg N/ha bei Triticale bzw. 20 kg N/ha bei Mais erwiesen sich als passend, da sowohl bei Triticale als auch bei Mais keine stark positiven N-Salden und nach der Ernte keine erhöhten N_{\min} -Mengen nachzuweisen waren. Zugleich muss beachtet werden, dass die sehr niedrigen N_{\min} -Mengen im Boden vor der Saat auch einen überdurchschnittlich hohen N-Düngebedarf zur Folge hatten. Vor dem Hintergrund einer potenziell hohen N-Nachlieferung bietet sich bei der Wahl einer Sommerung als Folgekultur auch ein Umbruch erst im Frühjahr an. Wegen des zeitigen Austriebs der Silphiebestände müsste dieser erfolgen, sobald der Boden ausreichend abgetrocknet ist. Genauere Untersuchungen hierzu sind für das Folgeprojekt geplant. Als weitere Möglichkeit zur Vermeidung von N-Verlusten bei einem Umbruch nach der Ernte bietet sich die möglichst zeitnahe Etablierung einer wuchsfreudigen Zwischenfrucht mit guter Unkrautunterdrückung an. Durch die zusätzliche Konkurrenz könnte ein möglicher Wiederaustrieb bis zum Vegetationsende effektiv unterdrückt werden. Hierbei sollten abfrierende Arten ausreichend sein, da auch bei Durchwachsener Silphie über Winter kein Wachstum stattfindet und bis Vegetationsende gebildete oberirdische Biomasse abstirbt.

Als Folgekultur nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie hat sich im Versuch sowohl Getreide als auch Mais als geeignet erwiesen, wenn auch Mais ab dem Schossen eine bessere Durchwuchsunterdrückung und zur Ernte einen geringeren Durchwuchsbesatz zeigte. Bei einem Umbruch mit Pflug oder Grubber ist allerdings in beiden Kulturen im ersten Jahr nach dem Umbruch mit erhöhtem Durchwuchs zu rechnen. Hierdurch kann ein erhöhter Herbizidaufwand entstehen oder zusätzliche mechanische Unkrautregulierungsmaßnahmen erforderlich werden, da mit einer einmaligen chemischen Maßnahme wie im vorliegenden Versuchsvorhaben eine ausreichende Bekämpfung des Durchwuchses nicht möglich ist. Im Falle des Pflugs gilt dies auch für das zweite Jahr nach dem Umbruch, da weiterhin ein Durchwuchs mit gegenüber dem ersten Jahr nur leicht verminderter Besatzdichte und Wuchsstärke auftrat. Bei Getreide als erster Folgekultur wäre auch bei einem Umbruch mit der Fräse eine zweite Herbizidmaßnahme notwendig gewesen. Darüber hinaus kann bei Mais als Folgekultur für spätere Herbizidanwendungen eine spezielle Applikationstechnik, wie z. B. *Dropleg*-Düsen, erforderlich sein. Die beste Herbizidwirkung gegenüber dem Silphiedurchwuchs konnte im Versuch mit dem Wuchsstoffherbiziden „Arrat“ in Mais und „Ariane C“ in Getreide erreicht werden. In diesen Herbiziden sind als Wuchsstoffkomponenten die Wirkstoffe Dicamba und Clopyralid enthalten. Mit den praxisüblichen Herbizidtypen wie Triketone in Mais und Sulfonylharnstoffe in Getreide konnte im ersten Jahr nach dem Umbruch in den Varianten Pflug und Grubber keine ausreichende Wirkung erreicht werden. Die Wirkungsgrade betragen 50 bis 85 % (Mais) bzw. ca. 40 bis 55 % (Getreide). Bei den schwächeren Trieben in den gefrästen Parzellen konnte zwar in Mais mit über 90 % Wirkungsgrad eine ausreichende Wirkung erzielt werden, in Getreide war die Wirkung allerdings mit ca. 75 % ebenfalls ungenügend. Im zweiten Jahr nach dem Umbruch wurden durch die Herbizidkombination mit dem Wuchsstoff-

herbizid in Mais bei einmaliger Anwendung auch in den Pflugvarianten Wirkungsgrade von knapp 85 % erreicht. Auch das in Winterweizen gegen Ende des Schossens als zusätzliche Herbizidmaßnahme ausgebrachte Wuchsstoffherbizid verbesserte trotz geringen Ausgangsbesatzes die Gesamtwirkung deutlich.

SCHITTENHELM et al. (2021) [115] erreichten durch eine zweimalige Behandlung mit einem Clopyralid-haltigen Herbizid eine gute Kontrolle der Durchwuchstriebe nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in der Folgekultur Mais, wobei die zweite Behandlung mit „Lontrel 720 SG“ bei halber Aufwandmenge Mitte Juni erfolgte. Es wurden 75 % der Triebe abgetötet und 10 % blieben ohne Schädigung, da trotz zweifacher Überfahrt auch nach der zweiten Behandlung weitere Triebe erschienen. Somit wirkte sich vermutlich das Pflügen vor der Saat nachteilig auf die Bekämpfbarkeit des Durchwuchses aus, da im vorliegenden Projekt im ersten Jahr nach dem Umbruch mit der Fräse ein ähnlicher Durchwuchsbesatz im Mais fast vollständig beseitigt werden konnte. Wie sich im Winterweizen im Jahr 2021 gezeigt hat, ist mit Clopyralid eine effektive Bekämpfung von Silphiedurchwuchs möglich [115], wobei auch größere Triebe zu späten Einsatzterminen gut erfasst werden. Neben dem Besatz mit Durchwuchstrieben berichteten SCHITTENHELM et al. (2021) [115] auch von einer stärkeren allgemeinen Verunkrautung nach dem Umbruch Durchwachsener Silphie im Vergleich zu Mais bzw. Feldgras als Vorkultur. Darüber hinaus war die Artenzusammensetzung der Unkrautflora unterschiedlich, da die Vorkulturen eine unterschiedliche Unkrautunterdrückung aufwiesen, wobei bei Durchwachsener Silphie die Unterdrückung in erster Linie durch Lichtkonkurrenz erfolgt. Als Unkrautarten waren nach Silphie vor allem Vogelmiere und gemeines Kreuzkraut anzutreffen, da diese Arten ihre Fruchtentwicklung vor der vollständigen Bodenbedeckung der Dauerkultur abschließen konnten.

Das grundlegende Problem beim Herbizideinsatz nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie in beiden Folgekulturen war, dass das zeitlich verzögerte Erscheinen der Triebe die optimale Terminierung einer Herbizidapplikation erschwerte. Dies gilt insbesondere für den Umbruch mit dem Pflug, da durch das Unterpflügen die Triebe die Bodenoberfläche unterschiedlich schnell und auch nach dem optimalen Bekämpfungstermin der sonstigen Unkräuter erreichten. Demzufolge müssen zumindest im ersten Jahr nach dem Umbruch je nach Verwertungsziel der Kultur immer mindestens zwei Behandlungen mit blattaktiven Herbiziden eingeplant werden. Bei einer einmaligen Behandlung müsste wahrscheinlich zu lange gewartet werden, bis ausreichend Triebe erschienen sind, so dass bis dahin die ersten Triebe und Unkräuter für eine Bekämpfung bereits zu groß wären und eine zu starke Konkurrenz gegenüber der Kulturpflanze entstünde. Ein Umbruch mit dem Pflug ohne sonstige Zerkleinerung der Wurzelstöcke ist somit sehr kontraproduktiv, da Wurzeln intakt vergraben werden und dadurch kräftigere Triebe vorliegen, die zudem zeitlich verzögert hervortreten. Des Weiteren sind die Knospenansätze der Witterung und weiteren Bodenbearbeitungsschritten weniger ausgesetzt, was vermutlich dazu führte, dass der Durchwuchsbesatz nach dem Umbruch mit dem Grubber in der Kombination Triticale–Mais im zweiten Jahr nach dem Umbruch deutlich abnahm.

Wird Mais als Silomais in einer Biogasanlage und nicht zur Verfütterung verwertet, ist ein geringer Silphiebesatz in der Regel tolerierbar, da dieser auch vergärbare Material dar-

stellt und die Ernte nicht behindert. Wichtig ist, dass die Maispflanzen in der empfindlichen Phase der Jugendentwicklung weitgehend frei von Konkurrenz durch andere Pflanzen sind. Als Bekämpfungsmaßnahme für den Durchwuchs zwischen den Reihen ist auch ein Hackeinsatz denkbar. Trotz einmaliger Herbizidanwendung wurden später erschienene Triebe oder von der Herbizidmaßnahme erholte Pflanzen durch den Mais meist noch ausreichend unterdrückt und stellten nur vereinzelt eine Konkurrenz dar. Dies gilt insbesondere für das zweite Jahr nach dem Umbruch. In diesem Zusammenhang muss auch beachtet werden, dass wegen der kleinen Parzellen im Versuch bei hochwachsenden Kulturen wie Mais keine mit einem flächigen Bestand vergleichbare Beschattung vorlag.

Getreide kann bei einmaliger Herbizidanwendung im Frühjahr wie im vorliegenden Versuch etwa bis zur Blüte von starker Konkurrenz durch Silphiedurchwuchs freigehalten werden. Zur Abreife war in Triticale insbesondere nach dem Einsatz des Pflugs und Grubbers ein deutlich sichtbarer Durchwuchs gegeben. Eine Konkurrenz zum Getreide trat dabei insbesondere ab dessen Blüte auf, die sich wegen des zusätzlichen Wasser- und Nährstoffverbrauchs vermutlich auch negativ auf die Erträge auswirkte. In der Fräsvariante war bis auf einige kräftige Triebe kaum Durchwuchs vorhanden. Diese einzelnen kräftigen Triebe traten auch in Mais auf und sind vermutlich auf eine stellenweise nicht ausreichend tiefe Bearbeitung oder eine ungenügende Überlappung zwischen den Fahrten mit der Fräse und somit einige nicht ausreichend zerkleinerte Wurzelstöcke zurückzuführen. Aus bisher noch nicht geklärter Ursache war jedoch bei der unmittelbar nach dem Umbruch mit der Fräse im Herbst gesäten Triticale eine Wuchsdepression festzustellen. Diese war im Frühjahr weiterhin sichtbar und führte zu tendenziell niedrigeren Erträgen. Der Umbruch von Durchwachsener Silphie durch flaches Fräsen bietet zwar aus Sicht des Durchwuchsbesatzes Vorteile, nach bisherigen Ergebnissen ist danach allerdings von der Ansaat eines Getreides abzuraten. Ob die beobachtete Wuchsminderung nur bei zeitnah nach dem Umbruch gesätem Wintergetreide oder auch bei Sommergetreide im Folgejahr auftritt, kann nicht gesagt werden.

Durch Fräsen war insgesamt die beste Reduktion von Durchwuchs nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie zu erreichen, so dass wenn möglich diese Bearbeitungsmaßnahme gewählt werden sollte. (Winter-)Getreide benötigt für eine gute Beschattung eine ausreichende Bestandsdichte, die im vorliegenden Projekt im ersten Jahr nach dem Umbruch wegen ungünstiger Witterung und eventuell zu geringer Startdüngung nicht erreicht wurde. Darüber hinaus besteht offenbar eine negative Wachstumsbeeinflussung nach dieser Umbruchmethode, was die gewünschte Wirkung erschwert. Folglich ist nach aktuellem Stand Mais als erste Folgekultur besser geeignet. Durch die effektivere Durchwuchsunterdrückung auch spät erscheinender Silphietriebe [115] war im vorliegenden Projekt der Durchwuchsbesatz im Folgejahr deutlich niedriger als nach Triticale. Im Folgeprojekt wird dennoch versucht werden, den Anbau von Wintergetreide nach Silphie anhand der bisherigen Erkenntnisse zu verbessern. Darüber hinaus bietet Getreide die Möglichkeit, durch Stoppelbearbeitung oder eine Herbizidapplikation auf die Stoppel zeitnah weitere Bekämpfungsmaßnahmen durchzuführen.

Mais ist wegen seiner hohen N-Aufnahmekapazität auch im Hinblick auf die Verwertung einer erhöhten N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie als

Folgefrucht gut geeignet [115]. Die N-Nachlieferung während der Vegetation wird zwar gut verwertet, wie die hohen N-Abfuhrer beider Jahre zeigen, nach der Ernte stiegen N_{\min} -Mengen im Boden bis Vegetationsende jedoch deutlich an. Bei SCHITTENHELM et al. (2021) [115] war bereits nach der Ernte mit 123 kg N/ha ein hoher N_{\min} -Rest im Boden vorhanden. Bei Mais besteht allerdings das Problem, dass es keine Möglichkeit gibt, diesen N-Überschuss zu verwerten. Auch wenn Silomais wegen seiner langen Wachstumsphase und des hohen N-Aufnahmevermögens einen Großteil der N-Nachlieferung während der Vegetation verwerten kann, ist der Anstieg nach der Ernte ökologisch bedenklich. In den ungedüngten Maisparzellen stiegen die N_{\min} -Mengen bis Vegetationsende ähnlich stark an, so dass die N-Düngung in den gedüngten Parzellen nicht zu hoch angesetzt war. Bei SCHITTENHELM et al. (2021) [115] zeigten sich außerdem 13,6 % höhere Maiserträge nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie gegenüber Mais als Vorkultur. Auch gegenüber Feldgras wurden etwas höhere Erträge beobachtet. Der positive Vorfruchteffekt von Silphie wurde nicht nur auf eine höhere N-Nachlieferung, sondern auch auf andere Effekte, wie eine bessere Bodenstruktur zurückgeführt. Wie bereits angesprochen sollte deshalb nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie die standorttypische Maisdüngung um mindestens 20 kg N/ha reduziert werden. Da aber die Mineralisation normalerweise später einsetzt, ist eine N-Startdüngung für eine rasche Jugendentwicklung sinnvoll.

5.2.2 Umbruch von Sida

5.2.2.1 Charakterisierung der letzten Ernte von Sida

Der für den Umbruch vorgesehene Sidaversuch in Wolferkofen wurde wie der Silphiever such in Straubing von 2017 bis 2019 streifenweise rein mineralisch oder mit Gärresten gedüngt. Die Ernte des Sidaversuchs im Jahr 2019 wurde wegen des anstehenden Umbruchs frühzeitig am 11. September durchgeführt. Der Trockenmasseertrag bei rein mineralischer N-Düngung betrug 122,4 dt/ha und bei Düngung mit Gärresten 102,2 dt/ha. Ein signifikanter Unterschied war nicht gegeben. In einem bayernweiten Dauerkulturversuch des Technologie- und Förderzentrums Straubing konnten im fünfjährigen Durchschnitt im Mittel der sechs Standorte Erträge bei Sida von etwa 81 dt TM/ha festgestellt werden [69] [50]. Der zum aktuellen Umbruchversuch benachbarte Versuchsstandort im Gäuboden lieferte im Mittel mit 128 dt TM/ha etwas höhere Erträge.

Im Hinblick auf die im Boden nach der Ernte vorhandene N_{\min} -Menge war kein signifikanter Einfluss einer mineralischen bzw. organischen Düngung gegeben. Die N_{\min} -Menge nach der Ernte von Sida belief sich auf 26,8 bzw. 26,0 kg N/ha bei Düngung mit Gärresten bzw. rein mineralischer Düngung. Die Ergebnisse der Inhaltsstoffuntersuchungen und die über die Trockenmasseerträge berechneten Nährstoffabfuhrer sind in Tabelle 22 dargestellt. Das Niveau der N-Gehalte lag deutlich unterhalb des Niveaus des Jahrs 2018 von 1,13 kg/dt TM. Dieser Unterschied war vermutlich durch das niedrige Ertragsniveau im Jahr 2018 von nur knapp 30 dt TM/ha bedingt. In den mineralisch gedüngten Varianten wurden im Jahr 2019 gegenüber der Düngung mit Gärresten um ca. 20 dt TM/ha höhere Erträge, jedoch gleichzeitig auch signifikant niedrigere N-Gehalte erreicht. Weitere signifikante Unterschiede waren bezüglich der Mg-Gehalte vorhanden.

Tabelle 22: Nährstoffgehalte und Nährstoffabfuhr des Ernteguts von Sida bei rein mineralischer Düngung oder Düngung mit Gärresten im für den Umbruch vorgesehenen Sidaversuch im letzten Erntejahr

N-Düngung	N-Gehalt	P ₂ O ₅ -Gehalt	K ₂ O-Gehalt	MgO-Gehalt	N-Abfuhr	P ₂ O ₅ -Abfuhr	K ₂ O-Abfuhr	MgO-Abfuhr
	Einheit	kg/dt TM			kg/ha			
Gärrest	0,47 a	0,51	1,48	0,30 a	49,3	52,5	151,9	30,5
mineralisch	0,33 b	0,52	1,76	0,25 b	40,7	61,6	210,5	30,1

5.2.2.2 Umbruchverfahren

Die Sidaversuchsfläche in Wolferkofen wurde am 26. September 2019 umgebrochen. Der Boden war entsprechend dem Silphieversuch in Straubing aufgrund der trockenen Witterung der vergangenen Monate ziemlich trocken. Wegen des höheren Tongehalts war er dennoch an einzelnen Stellen teilweise etwas feuchter. Im Gegensatz zur Durchwachsenden Silphie zeigte die Sida zum Umbruchtermin trotz einer ähnlichen Zeitspanne seit der Ernte noch keinen sichtbaren Wiederaustrieb. Eine Keimung von Sidapflanzen aus Ausfallsamen war nicht zu beobachten. Die Versuchspartellen waren jedoch stellenweise stark mit Gras verunkrautet. Bis auf einzelne umgeknickte Stängel waren neben den 10 bis 20 cm hohen Stoppeln keine oberirdischen Erntereste vorhanden. Verstopfungsprobleme beim Umbruch der Sidafläche gab es bei keiner der drei eingesetzten Gerätevarianten, die identisch mit denen des Silphieumbruchs waren.

Die zweite Sidafläche im Schaugarten des TFZ wurde am 21. April 2021 umgebrochen. Wie bei der ersten Umbruchfläche war auch hier der Sidabestand stark verungrast. Die Sida war bereits ausgetrieben und die Triebe hatten vier bis fünf Blätter (BBCH 14–15) ausgebildet. Wegen des starken Grasbewuchses war die Bodenfeuchte bereits deutlich reduziert und befand sich im optimalen Bereich für eine Bodenbearbeitung. In diesem Versuch wurde ein Umbruch mit Pflug und Fräse verglichen.

Pflug

Die Arbeitsgeschwindigkeit in der Pflugvariante betrug in beiden Umbruchversuchen 4 bis 5 km/h bei einer Arbeitstiefe von ca. 27 cm. Sowohl die seit fünf Jahren mit Sida bewachsene Fläche (Wolferkofen) als auch der zehn Jahre alte Bestand (Schaugarten) konnten problemlos gepflügt werden, eine Einhaltung der Arbeitstiefe war meistens gegeben und der Erdbalken samt Wurzelballen konnte sauber gewendet werden. Die Wurzeln von Sida waren mit einem maximalen Durchmesser von etwa 3 cm deutlich dicker als die Silphie-wurzeln und zeigten zudem ein stärker ausgeprägtes horizontales Wachstum (Abbildung 103). Darüber hinaus waren die Wurzelstöcke größer und stärker vernetzt. Aus diesen Gründen wurde auch beim Pflügen kein vollständiges Vergraben der Wurzelballen erreicht und nach dem Pflügen war eine Vielzahl dicker Einzelwurzeln und Wurzelballen auf der Bodenoberfläche sichtbar (Abbildung 104, Abbildung 105).



Abbildung 103: Wurzelballen von Sida mit relativ dicken Seitenwurzeln und hell gefärbten Erneuerungsknospen an der Basis der Triebe



Abbildung 104: Fünf Jahre alter Sidabestand in Wolferkofen nach dem Umbruch mit einem Pflug am 26. September 2019



Abbildung 105: Zehn Jahre alter Sidabestand im TFZ-Schaugarten nach dem Umbruch mit einem Pflug am 21. April 2021

Grubber

In der Grubbervariante in Wolferkofen wurde eine Arbeitsgeschwindigkeit von 7 km/h bei einer Arbeitstiefe von ca. 20 bis 25 cm erreicht. Wie bei Durchwachsener Silphie hinterließ der Grubber die größte Menge an Ernte- und Wurzelresten an der Bodenoberfläche (Abbildung 106). Ein gewisser Mischeffekt war dennoch gegeben und die Wurzelstöcke wurden teilweise gewendet (Abbildung 107). Zusätzlich verblieb auch ein Großteil der Reste des Ungrasbesatzes auf der Oberfläche. Für ein Vertrocknen der Wurzeln wurden diese wegen der geringen Bodenfeuchte zwar meist ausreichend enterdet, jedoch teilweise schon wieder zu sehr in den Boden eingemischt. Ohne weitere Bearbeitungsgänge wäre ein Vertrocknen somit eher unwahrscheinlich. Hierfür hätten der Umbruch und die Ernte allerdings in den August vorgezogen werden müssen. Mit einem vollständigen Vertrocknen der Wurzeln bei gegebenem Umbruchtermin kurz vor der Saat der Triticale war hingegen nicht mehr zu rechnen, da die Verdunstung der Jahreszeit entsprechend bereits eingeschränkt war. Bei frühzeitigem Umbruch in den Sommermonaten könnte durch ein Austrocknen der Wurzeln durchaus der Wiederaustrieb verringert werden. Des Weiteren würde neben einer mehrmaligen Bearbeitung mit dem Grubber vermutlich auch eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit eine Enterdung und ein Vertrocknen der Wurzeln fördern.



Abbildung 106: Sidabestand nach dem Umbruch mit einem Grubber am 26. September 2019



Abbildung 107: Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Sida mit einem Grubber am 26. September 2019

Fräse

Im Gegensatz zum Silphieumbruch war der Boden der im Herbst 2019 umgebrochenen Sidafläche einerseits tonreicher und andererseits auch an einzelnen Stellen deutlich feuchter, so dass der Einsatz der Fräse dort bereits grenzwertig war. Beim Umbruch im Frühjahr lag wegen der vorausgegangenen niederschlagsarmen Phase eine optimale Bodenfeuchte vor. Dies verdeutlicht, dass der Umbruch mit einer Fräse vor allem auf schwereren Böden nur unter trockenen Bedingungen möglich ist, da ansonsten Bodenschäden zu befürchten sind. Ist ein Umbruch mit einer Fräse geplant, sollten dieser und somit auch die Ernte sicherheitshalber in trockenere Spätsommerphasen oder das späte Frühjahr verlegt werden. Das Arbeitsbild der Fräse war ordentlich, da im Vergleich zu den anderen beiden Gerätevarianten eine deutliche Zerkleinerung der oberflächlich vorhandenen Wurzeln und Stoppelreste erreicht wurde (Abbildung 108). Bearbeitung und Zerkleinerung wurden ganzflächig vorgenommen, beschränkten sich beim Umbruch im Herbst 2019 aber auf eine eher geringe Arbeitstiefe von ca. 6–7 cm. Beim Umbruch in Wolferkofen konnte die Arbeitstiefe trotz einer Zapfwellendrehzahl von 1000 U/min und lediglich 2 km/h Arbeitsgeschwindigkeit nicht weiter gesteigert werden. Am Standort des im Frühjahr 2021 umgebrochenen Sidabestands wies der Boden offenbar einen geringeren Tongehalt auf oder war aus anderen Gründen besser zu bearbeiten, so dass mit der Fräse die gewünschte Arbeitstiefe von 8–10 cm erreicht werden konnte.



Abbildung 108: Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Sida mit einer Fräse am 26. September 2019

5.2.2.3 Durchwuchs und Entwicklung der Folgekulturen

5.2.2.3.1 Wintertriticale im Jahr 2020 (Anlagejahr 2019)

Aussaat und Durchwuchs im Frühjahr

Die Saatbettbereitung und Aussaat der Wintertriticale wurde fünf Tage nach dem Umbruch von Sida am 1. Oktober durchgeführt. Die Saatbettbereitung erfolgte in Bearbeitungsrichtung des vorausgegangenen Umbruchs, senkrecht zur späteren Saattrichtung. Die Arbeitstiefe der Kreiselegge betrug ca. 7 cm, wodurch eine gute Einebnung erreicht werden konnte. Ein ausreichend feines Saatbett war in allen Bearbeitungsvarianten gegeben. Die Fräsvariante wies eine große Menge zerkleinerter und ca. 5 bis 10 cm langer Ernte- und Wurzelrückstände auf, die gleichmäßig eigemischt wurden und den nachfolgenden Sävorgang kaum behinderten (Abbildung 109). In der Grubbervariante wurden die unzerkleinerten und teilweise eingemischten bzw. enterdeten Wurzelstöcke durch die Kreiselegge weiter enterdet und meist oberflächlich abgelegt (Abbildung 110). Eine Zerkleinerung erfolgte allerdings kaum. Da sich in den gegrubberten Parzellen somit eine Vielzahl störender und teilweise recht großer Wurzelreste auf der Oberfläche befand, erfolgte eine zweite Überfahrt mit der Kreiselegge. Dadurch wurde jedoch kaum eine weitere Zerkleinerung erreicht und die oberflächliche Ablage wurde eher verstärkt. Am wenigsten Wurzelreste im Bereich des Saathorizonts zeigte die Pflugvariante (Abbildung 111). Einzelne größere Wurzelstöcke, die nicht vollständig und tief genug eingearbeitet worden waren, wurden von der Krei-

selegge zwar erfasst, aber ebenfalls kaum zerkleinert. Wie bereits erwähnt sind die Wurzeln von Sida deutlich dicker als die Wurzeln von Durchwachsener Silphie und die Wurzelballen somit auch sperriger (Abbildung 103). Waren sie nicht ausreichend zerkleinert worden, behinderten sie folglich den Sävorgang und eine gleichmäßige Tiefenablage bei der Aussaat der Triticale noch stärker. Eine Störung des Sävorgangs trat insbesondere in der Grubber- und vereinzelt auch in der Pflugvariante auf. Die Zerkleinerung in der Fräsvariante war hingegen meist ausreichend, so dass trotz der großen Menge an Ernte- und vor allem Wurzelresten die Aussaat überwiegend problemlos möglich war. Da es direkt im Anschluss an die Aussaat regnete, wirkte sich die teilweise oberflächliche Saatgutablage in der Grubbervariante kaum negativ auf den Feldaufgang aus. Bei weiterer Trockenheit wäre allerdings kein gleichmäßiger Feldaufgang zustande gekommen, da keine ausreichende Bodenbedeckung und Anschluss an das Bodenwasser vorhanden gewesen wären.



Abbildung 109: Saatbett nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einer Fräse und nachfolgender Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge



Abbildung 110: Saatbett nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einem Grubber und nachfolgender Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge



Abbildung 111: Saatbett nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einem Pflug und nachfolgender Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge

Wie bei Durchwachsener Silphie geht die Gefahr für einen konkurrenzfähigen Durchwuchs von den Erneuerungsknospen aus, die an den Trieben des aktuellen Jahrs an der Bodenoberfläche angelegt wurden (Abbildung 112). Im Gegensatz zur Durchwachsenen Silphie bildet Sida auch an oberflächennah verlaufenden Wurzeln entsprechende Knospen aus. Über derartige Strukturen ist in etablierten Beständen somit auch eine eingeschränkte horizontale Ausbreitung möglich. Die Samen von Sida verfügen über eine ausgeprägte Keimruhe [69], so dass über einen längeren Zeitraum nach Umbruch eine Keimung auftreten kann. Die Keimung von Sidasamen erfolgt im frühen Frühjahr [129]. Aufgrund der langsamen Jugendentwicklung ist jedoch keine Konkurrenz durch keimende Ausfallsamen zu erwarten. Darüber hinaus hat sich Sida in der Etablierungsphase in anderen Versuchen bisher als relativ empfindlich gegenüber verschiedenen Herbizidwirkstoffen erwiesen [69].



Abbildung 112: Blick auf einen Wurzelballen von Sida mit weißlichen Erneuerungsknospen am Triebansatz zum Umbruchzeitpunkt Ende September

Nach dem Umbruch von Sida war Anfang November in den mit der Fräse umgebrochenen Bereichen keine Schädigung und Wachstumsbeeinträchtigung der Triticalepflanzen wie nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie zu beobachten. Im Gegensatz zum Umbruchversuch von Durchwachsener Silphie am Standort Straubing war jedoch auf der Fläche in Wolferkofen der allgemeine Unkrautbesatz deutlich höher. Auf eine Herbizidanwendung in den mit Triticale bewachsenen Parzellen im Herbst des Umbruchjahrs wurde dennoch aus Witterungsgründen verzichtet. Darüber hinaus war bei Sida kein Wiederaustrieb im Herbst des Umbruchjahrs mehr gegeben. Der stärkste Unkrautbesatz zeigte sich in der

Grubber- und Fräsvariante, was darauf zurückzuführen ist, dass während der fünfjährigen Nutzung mit Sida keine Bodenbearbeitung erfolgte und sich neu gebildete Unkrautsamen auf bzw. an der Bodenoberfläche akkumulierten.

Analog zum Silphieumbruch waren auch bei Sida nach dem Einsatz der Fräse deutlich mehr Regenwurmgänge an der Bodenoberfläche vorzufinden als nach dem Einsatz des Grubbers oder Pflugs. Bis zum 28. November hatten die Triticalepflanzen ein bis zwei Bestockungstriebe ausgebildet (BBCH 21–22). Die gepflügten Parzellen wiesen auch zwei Monate nach dem Umbruch noch die geringste Zahl an Regenwurmröhren an der Oberfläche auf. Zu Vegetationsende war in allen Varianten des Sidaumbruchs kein Wiederaustrieb weder aus vergrabenen noch aus oberflächlich nur teilweise von Boden bedeckten Wurzelstrukturen sichtbar. Es waren dennoch meist intakte Knospen auch bei den oberflächlich aufliegenden Wurzelteilen bzw. -stöcken vorhanden, sofern ein Teil der Wurzeln in den Boden reichte (Abbildung 113). Im Vergleich zum Zeitpunkt des Umbruchs war aber zu Vegetationsende die Anzahl der intakten Knospen an den teilweise oder vollständig auf der Bodenoberfläche abgelegten Wurzelteilen sichtbar reduziert. Für die Dauerkultur Sida ist es grundsätzlich nicht ungewöhnlich, dass bei späterer Ernte kein Wiederaustrieb im Herbst mehr erfolgt. Eine Keimung von Sidapflanzen aus Ausfallsamen wurde nicht beobachtet.



Abbildung 113: Intakte Knospen bei oberflächlich eingearbeiteten Wurzelstöcken von Sida zu Vegetationsende im Versuchsjahr 2019 nach dem Ende September erfolgten Umbruch

Herbizideinsatz

Im darauffolgenden Frühjahr dauerte es deutlich länger als bei Durchwachsener Silphie, bis der erste Sidadurchwuchs auf der Versuchsfläche erschien. Zur ersten Durchwuchsbonitur Mitte März zu Beginn der Bestockung der Triticale war in allen Umbruchvarianten noch kein Sidadurchwuchs vorhanden (Abbildung 114). Dies ist nicht ungewöhnlich, da Sidabestände im Frühjahr ohnehin etwas später als Silphiebestände austreiben. Anfang April wurde schließlich der erste Sidadurchwuchs beobachtet. Problematischer war zu diesem Zeitpunkt jedoch die starke Verunkrautung insbesondere in den mit Fräse bzw. Grubber umgebrochenen Parzellen. Aus diesem Grund und wegen des fortgeschrittenen Wachstums der Triticale konnte mit dem Herbizideinsatz nicht länger gewartet werden. Die Herbizidapplikation erfolgte deshalb wie im Silphieumbruchversuch am 9. April, die Triticalepflanzen hatten zu diesem Zeitpunkt drei bis vier Bestockungstriebe ausgebildet. Im Vergleich zum Umbruch von Durchwachsener Silphie entwickelten sich auf der ehemaligen Sidafläche die Triticaleparzellen gleichmäßiger. Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden waren dennoch zu erkennen, wobei erneut die mit Pflug und Grubber bearbeiteten Parzellen ein kräftigeres Wachstum zeigten. Der Unterschied war jedoch geringer als nach dem Silphieumbruch. Zur zweiten Durchwuchsbonitur am 5. Mai war bis auf die gefrästen Parzellen an den Boniturstellen geringfügiger Sidadurchwuchs nachzuweisen (Abbildung 115). Mit durchschnittlich weniger als einem Trieb je Quadratmeter war der Besatz aber immer noch sehr niedrig.

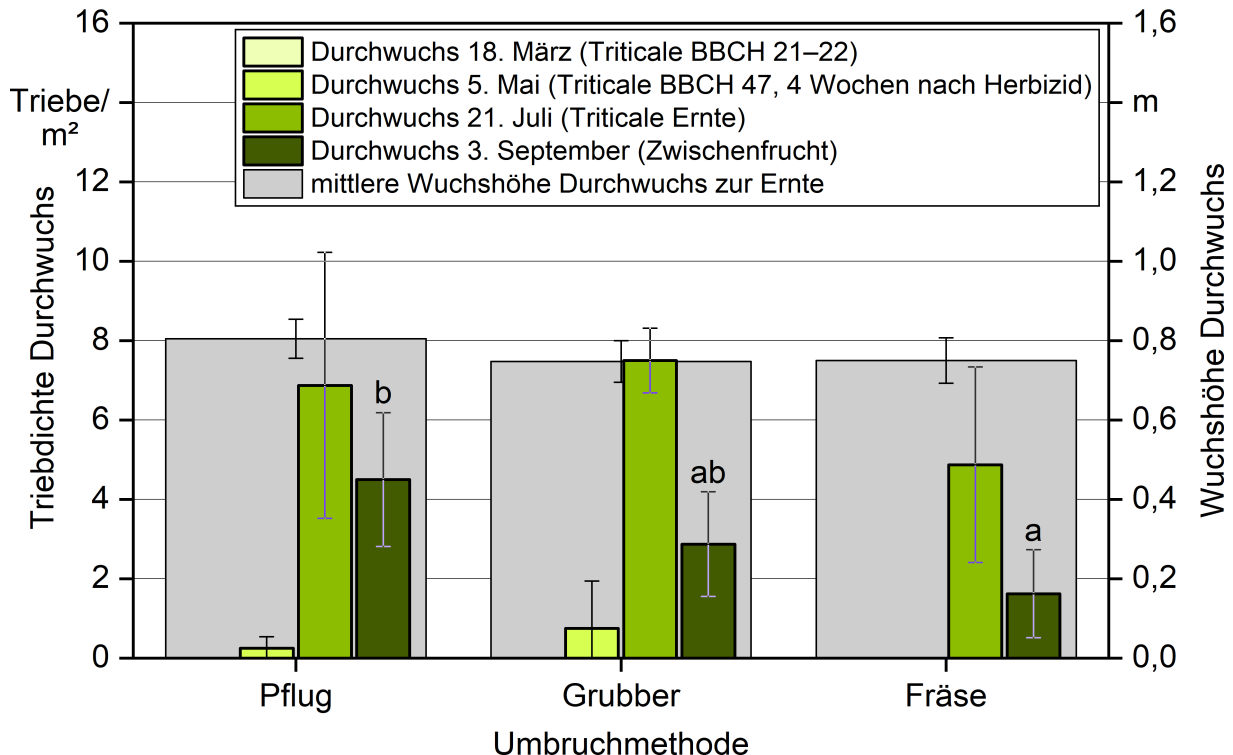


Abbildung 114: Durchwuchs von Sida nach einem Umbruch im Herbst 2019 in nachfolgend gesäter Wintertriticale in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen



Abbildung 115: Sidadurchwuchs nach dem Umbruch mit einem Grubber im Herbst 2019 in nachfolgend gesäeter Triticale zu Beginn des Schossens am 21. April 2020

Da diese Sidatriebe zum Zeitpunkt der Herbizidausbringung meist noch nicht erschienen waren oder Blattfläche gebildet hatten, war eine Herbizidwirkung kaum sichtbar. Im weiteren Verlauf bis zur Ernte erschienen in allen Varianten laufend weitere Sidatriebe, die meist ein kontinuierliches und rasches Längenwachstum aufwiesen. Der Austrieb in den mit dem Pflug umgebrochenen Parzellen erfolgte auch aus über 20 cm tief untergepflügten Knospen. Das Wenden der Wurzelballen und die daraus resultierende Ausrichtung der Knospen schräg nach unten bereitete den Trieben keine Probleme, wieder an die Bodenoberfläche zu gelangen. Nach dem Umbruch mit Pflug und Grubber wurden auch an längeren Seitenwurzeln Triebe ausgebildet (Abbildung 116). In den gefrästen Varianten erfolgte der Wiederaustrieb aus größeren Wurzelteilen. Optisch war der Durchwuchsbesatz in dieser Variante geringer, vermutlich da bereits ein Großteil der zerkleinerten und oberflächlich abgelegten Wurzelteile nach der Bearbeitung wegen der trockenen Herbstwitterung vertrocknete. Die ersten kräftigen Sidatriebe erreichten bereits gegen Ende Mai die Wuchshöhe der Triticalepflanzen. Zur Abreife der Triticale Ende Juni lag eine Vielzahl der Sidatriebe auf bzw. über der Bestandshöhe der Triticale, so dass in keiner Variante eine wirksame Unterdrückung der Triebe durch Beschattung gegeben war. Wegen des trockenen Frühjahrs im Jahr 2020 war jedoch auch nach dem Umbruch von Sida die Bestandsdichte der Triticale unterdurchschnittlich. In dichten Beständen wäre durch eine frühzeitige und stärkere Beschattung der Sidatriebe eventuelle eine bessere Unterdrückung möglich gewesen.



Abbildung 116: Ausbildung von Sidatrieben an ehemaligen Seitenwurzeln Anfang Mai 2020 nach dem Umbruch von Sida mit einem Grubber im Herbst 2019

Ernte

Zum Erntetermin waren ebenfalls keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Besatzes mit Sidatrieben festzustellen. Zudem zeigten auch die zum Zeitpunkt der letzten Ernte vorhandenen Triebdichten der Sidapartzen keinen Einfluss auf den Durchwuchs im Folgejahr, obwohl diese relativ große Unterschiede zwischen Partzen aufwiesen (Mittelwert: 17 Triebe/m², Standardabweichung: 8 Triebe/m²). In den gegrubberten und gepflügten Partzen war zur Ernte der Triticale dennoch tendenziell mehr Sidadurchwuchs vorhanden als nach dem Umbruch mit Fräse. Kleine und schwach entwickelte Triebe mit einer Wuchshöhe von weniger als 10 cm wurden bei der Auszählung nicht erfasst. Wie bereits angesprochen hängt dies vermutlich damit zusammen, dass in diesen Varianten die Wurzelballen bis auf größere Seitenwurzeln weitgehend intakt blieben. In den gefrästen Partzen erfolgte dagegen wie beim Umbruch von Durchwachsener Silphie eine deutliche Zerkleinerung. Unterschiede in der Wuchsleistung der Triebe konnten dennoch nicht beobachtet werden. Die mittlere Wuchshöhe zum Erntetermin der Triticale zeigte folglich keine signifikanten Unterschiede. Im Gesamtdurchschnitt lag diese bei 77 cm, so dass die Sidatriebe die Triticalepflanzen meist überragten (Abbildung 117). Einzelne Sidatriebe begannen bereits zu blühen, die meisten befanden sich noch im Knospentadium (BBCH 55). Die maximale Wuchshöhe der Triebe lag ca. bei 150 cm. Trotz dieses kräftigen Wachstums war in einer Randpartze, die wegen eines Säfehlers eine Lücke aufwies, zu erkennen, dass der Bewuchs mit Triticale durchaus eine unterdrückende Wirkung auf

Triebzahl und Wuchsleistung hatte. Dies war ebenfalls anhand des Durchwuchses in den unbewachsenen Parzellen zu beobachten, der durch die wiederholten Bearbeitungsgänge während der Vegetation kaum zurückgedrängt werden konnte.



Abbildung 117: Sidadurchwuchs überragt Triticale deutlich gegen Ende der Abreife der Triticale am 14. Juli 2020

In der am 20. August nach der Triticale gesäten Zwischenfruchtmischung zeigten sich bereits Anfang September erneut einige Sidatriebe, die aus intakten Knospen der Wurzelreste entstammten. Gegenüber dem Besatz zur Ernte waren die Triebzahlen in der Zwischenfrucht deutlich geringer. Darüber hinaus war nur ein geringer Zuwachs der Triebe zu beobachten. Im Gegensatz zum Erntetermin war ein signifikanter Einfluss der Umbruchmethode vorhanden ($p = 0,0385$). Die gepflügten Parzellen wiesen gegenüber dem Umbruch mit Fräse einen signifikant höheren Durchwuchsbesatz auf. In der Grubbervariante war der Durchwuchsbesatz ebenfalls tendenziell niedriger als nach dem Umbruch mit Pflug. Gegen Ende Oktober führte erster Bodenfrost zu einem Absterben der Triebe.

Der Besatz mit Sidatrieben zum Erntetermin betrug ca. fünf bis acht Triebe je Quadratmeter. Die Triebe waren im Mittel etwas höher als der Triticalebestand, so dass eine nicht unerhebliche grüne Pflanzenmasse den Mähdrescher passieren musste. Dennoch war die Ernte mit dem Parzellenmähdrescher ohne technische Probleme möglich, wobei sich die hohen Temperaturen zur Ernte sicherlich positiv auswirkten. Obwohl sich dies vermutlich auch auf einen normalen Mähdrescher übertragen lässt, dürfen die sperrigen Sidastängel

hinsichtlich der Gefahr von Verstopfungen nicht unterschätzt werden. Der hohe Sida-Anteil führte außerdem wahrscheinlich zu niedrigeren Trockensubstanzgehalten im Stroh.

Mit einem durchschnittlichen Kornertrag (86 % TS) von 57,3 dt/ha in den gedüngten Parzellen lag das Ertragsniveau zwar etwas über dem der Triticale des Silphieumbruchs, aber immer noch unterhalb des standorttypischen Niveaus. Die Umbruchmethode zeigte einen signifikanten Einfluss auf den Kornertrag ($p = 0,0191$, Abbildung 118). In den gepflügten Parzellen war gegenüber den anderen beiden Varianten mit einem Ertragsunterschied von ca. 10 dt/ha ein signifikant höherer Kornertrag gegeben. Da nach dem Umbruch mit Pflug und auch mit Grubber zur Ernte tendenziell eher ein höherer Durchwuchsbesatz vorlag, war die aus den Sidatrieben resultierende Konkurrenz anscheinend nicht entscheidend für die Ertragsbildung. Ursache hierfür und für das allgemein niedrige Ertragsniveau war wahrscheinlich eine schlechte Stickstoffversorgung der Triticalepflanzen während des trockenen Frühjahrs, die zur Reduktion von Trieben und Ertragsorganen führte. Der N-Mangel könnte durch eine N-Immobilisierung im Zuge des Abbaus der Ernte- und Wurzelrückstände von Sida verstärkt worden sein. In den gepflügten Parzellen wurde wahrscheinlich durch die stärkere Lockerung mehr Stickstoff nachgeliefert und die Wurzeln eher vergraben, so dass deren Abbau verlangsamt wurde. Dagegen erfolgten durch die Fräse und auch nach dem Einsatz des Grubbers durch die Saatbettbereitung eine Zerkleinerung und überwiegend oberflächennahe Ablage der Wurzelteile.

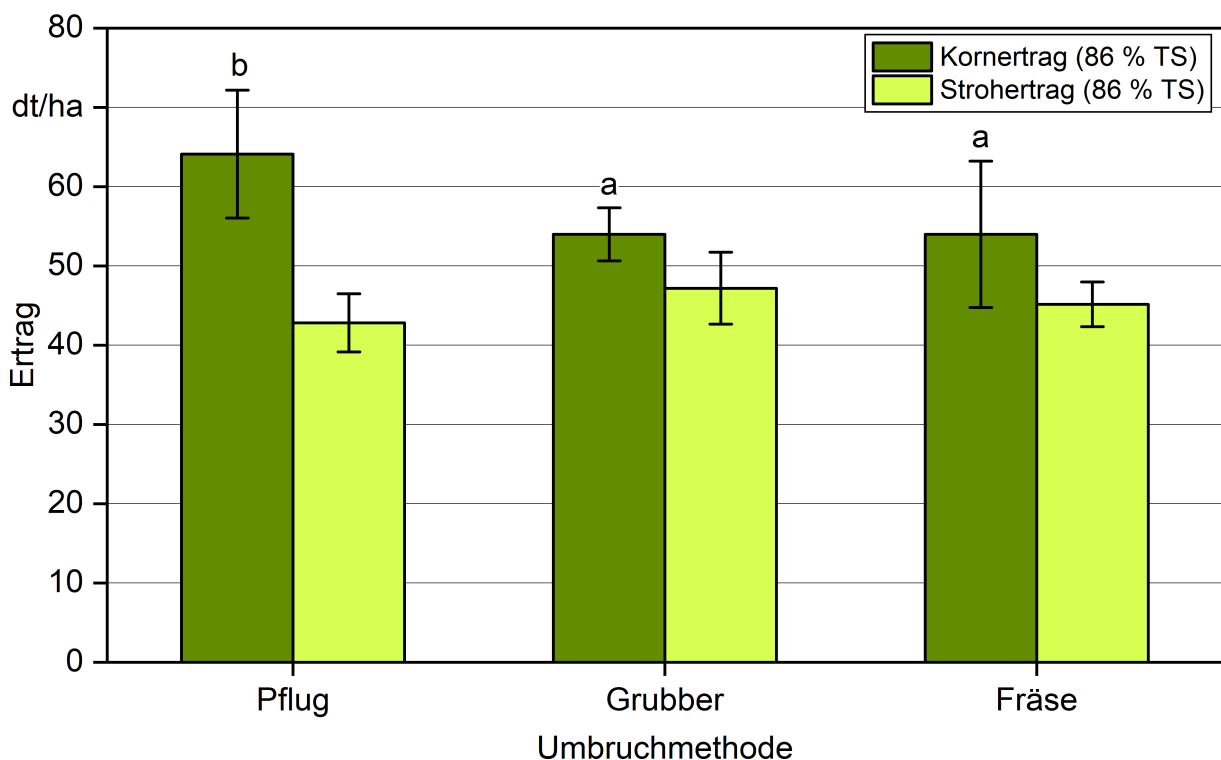


Abbildung 118: Korn- und Stroherträge von Triticale (86 % TS) nach dem Umbruch von Sida mit Pflug, Grubber oder Fräse im Herbst 2019; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Der Strohertrag zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Umbruchverfahren, war jedoch nach dem Umbruch mit Fräse und Grubber tendenziell höher als in den gepflügten Parzellen. Dadurch ergaben sich auch tendenzielle Unterschiede im Korn-Stroh-Verhältnis, das bei Verwendung des Pflugs eher niedriger ausfiel und mit 1 : 0,67 im normalen Bereich lag. In den anderen beiden Varianten war mit 1 : 0,86 bzw. 1 : 0,87 der Strohannteil am Gesamtertrag relativ hoch. Die Vermutung, dass in den gepflügten Varianten mehr Stickstoff für die Ertragsbildung zur Verfügung stand, zeigte sich auch anhand der erhöhten Bestandsdichte, Wuchshöhe und Tausendkornmasse (Tabelle 23). Signifikante Unterschiede waren nur bezüglich der Wuchshöhe vorhanden. Die unterschiedliche organische und mineralische Düngung des Sidaversuchs in den Jahren vor dem Umbruch wies keinen signifikanten Einfluss auf den Korn- und Strohertrag von Triticale auf. Deshalb wurde dieser Faktor auch nicht im Modell für die Ertragsauswertung berücksichtigt.

Tabelle 23: Bestandsdichte, Wuchshöhe und Tausendkornmasse (TKM) von Triticale mit und ohne Stickstoffdüngung nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit einem Pflug, Grubber oder einer Fräse; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey

Variante	Bestandsdichte	Wuchshöhe Blüte	TKM
	Einheit Ähren/m ²	m	g
mit N-Düngung			
Pflug	435,7	0,788 b	48,6
Grubber	416,5	0,733 a	47,0
Fräse	409,8	0,705 a	46,4
ohne N-Düngung (Mittelwert)			
	342,9	0,698	42,9

In den ungedüngten Triticaleparzellen wurde im Durchschnitt ein Kornertrag (86 % TS) von 23,5 dt/ha erreicht. Somit war ein sehr großer Ertragseffekt durch die Düngung gegeben. Die Bestandsdichte und die Wuchshöhe waren hingegen nur etwas niedriger als in den gedüngten Varianten. Die gepflügten Parzellen wiesen dabei erneut tendenziell die höchsten Werte auf.

5.2.2.3.2 Mais im Jahr 2020 (Anlagejahr 2019)

Aussaat und Durchwuchs im Frühjahr

Mitte März war in den zum damaligen Zeitpunkt seit dem Umbruch nicht mehr bearbeiteten Maisparzellen wie in den Triticaleparzellen noch kein Sidadurchwuchs festzustellen. Wegen der Trockenheit im April war der Boden nach der zweimaligen Saatbettbereitung zur Maisaussaat am 16. April oberflächennah bereits stark ausgetrocknet, so dass der Mais ungleichmäßig aufstieg und ein Teil erst nach den späteren Niederschlägen Ende April keimte. Wie in den Triticaleparzellen erschienen ab etwa Ende April kontinuierlich neue Sidatriebe. Aus Samen gekeimte Sidapflanzen waren ebenfalls nicht zu beobachten, so dass angenommen werden muss, dass diese eventuell bis zum Erntetermin für eine Biogasnutzung keine ausreichende Samenreife erreichen. Trotz zweimaliger Saatbettbereitung mit der Kreiselegge war Anfang Mai in den Maisparzellen tendenziell ein höherer Besatz mit Sidadurchwuchs festzustellen als zum gleichen Termin in den Triticaleparzellen (Abbildung 119, Abbildung 120). Folglich könnte entweder die Herbizidanwendung oder die Beschattung durch die Triticalepflanzen eine gewisse unterdrückende Wirkung auf den Durchwuchs gehabt haben.

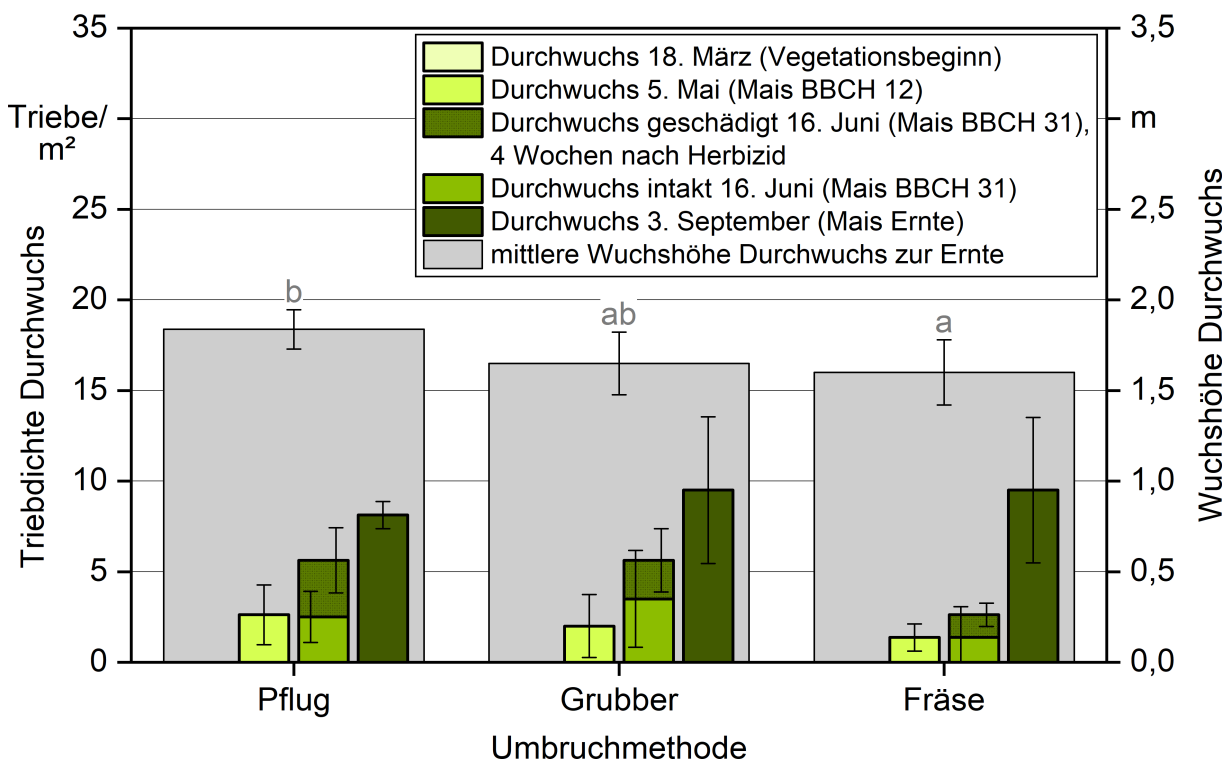


Abbildung 119: Durchwuchs von Sida nach einem Umbruch im Herbst 2019 in der Folgekultur Mais in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen



Abbildung 120: Kräftiger Sidadurchwuchs in Mais am 5. Mai 2020 nach dem Umbruch im Herbst des Vorjahrs

In den Parzellen, die ohne Bewuchs bleiben sollten, war Anfang Mai ein ähnlicher Durchwuchs wie in den Maisparzellen zu beobachten. Entsprechend den Triticaleparzellen erreichten in den gepflügten Parzellen Sidatriebe aus über 20 cm Tiefe die Bodenoberfläche. Eher kräftige Triebe waren dabei vor allem nach dem Umbruch mit dem Pflug zu beobachten. In den gefrästen und auch gegrubberten Parzellen erfolgte der Austrieb vor allem aus größeren Wurzelteilen (Abbildung 121, links). Diese waren, auch wenn sie sich nahezu an der Oberfläche befanden, in der Lage, Triebe auszubilden. Auf der angrenzenden ehemaligen Versuchsfläche eines Dauerkulturversuchs, die zum Umbruch krumentief im Frühjahr 2020 mit einer Fräse bearbeitet worden war, zeigte sich ein ähnliches Bild (Abbildung 121, rechts). Dort erfolgte ein vergleichbar intensiver Austrieb aus den Knospen der zerkleinerten Wurzelteile. Wie in den gepflügten Parzellen erreichten die Triebe auch die Oberfläche, wenn die Wurzelstücke durch die Fräse tiefer in den Boden eingearbeitet worden waren.

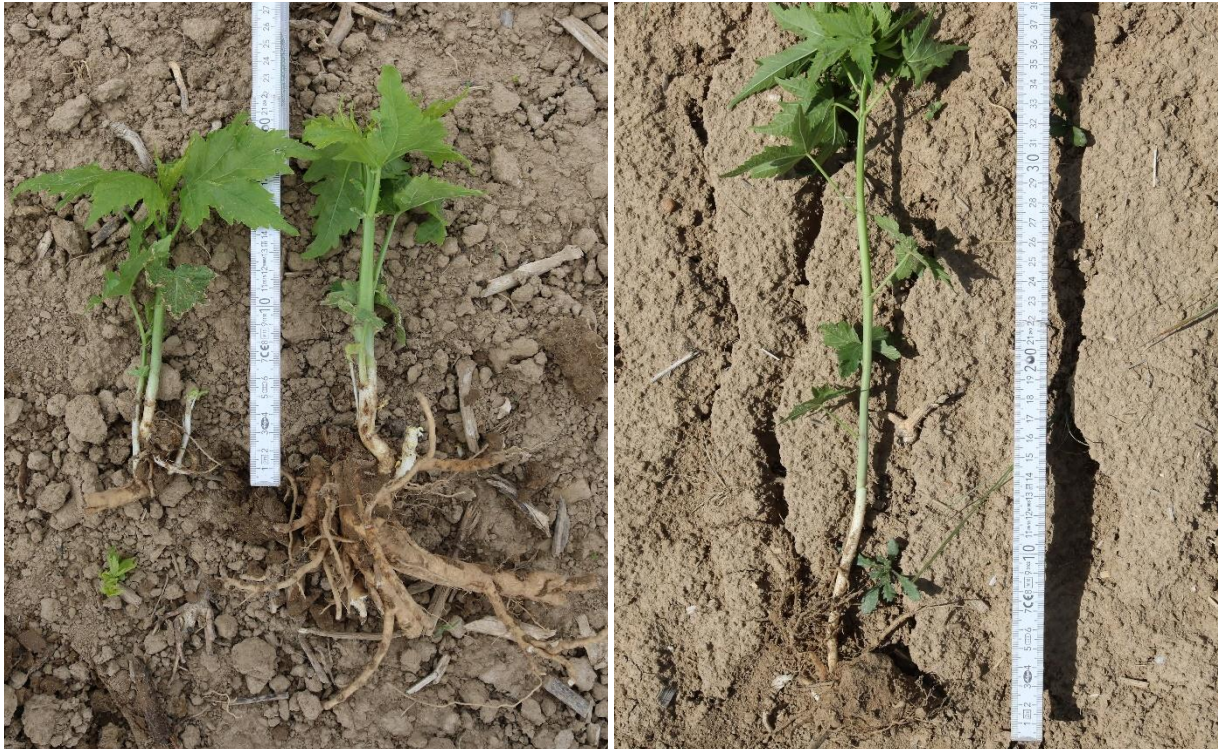


Abbildung 121: Wiederaustrieb von Sida aus zerkleinerten Wurzelteilen nach dem Umbruch mit einem Grubber (links, 13. Mai 2020) oder einer krumentiefen Bearbeitung mit einer Fräse (rechts, 3. Juni 2020)

Herbizideinsatz

Die Herbizidanwendung wurde wie im Silphieumbruchversuch am 20. Mai mit identischen Herbiziden durchgeführt. Entsprechend zeigten sich nach einer Woche an den Sidatrieben ähnliche Schadsymptome mit einer Nekrotisierung und Chlorotisierung der Blätter bis hin zur Weißfärbung (Abbildung 122). Meist waren alle Blätter einer Pflanze betroffen und starben auch ab. Von den blattaktiven Wirkstoffen wurden jedoch wiederum nur die Pflanzen erfasst, die zum Zeitpunkt der Ausbringung bereits Blätter ausgebildet hatten. Dies wird in Abbildung 119 deutlich, da die Anzahl der zum Boniturtermin Mitte Juni durch die Herbizidanwendung geschädigten Triebe in etwa der Menge der Anfang Mai bereits erschienenen Triebe entsprach. Da der Sidadurchwuchs im Vergleich zu Durchwachsener Silphie eher später und zudem kontinuierlich erschien, war der Anteil der von der Herbizidanwendung nicht geschädigten Triebe höher. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchvarianten waren nicht vorhanden. In den mit der Fräse umgebrochenen Parzellen war jedoch der Gesamtbesatz an Sidatrieben Mitte Juni tendenziell niedriger. Die geschädigten Triebe waren zu diesem Zeitpunkt vereinzelt vollständig abgestorben, meist jedoch nur im oberen Stängelbereich, der dann häufig abknickte (Abbildung 123). Die meisten Pflanzen zeigten außerdem bereits eine Regeneration von der Herbizidschädigung, wobei im unteren, noch intakten Bereich der Triebe ein erneuter Austrieb aus Blattachselknospen erfolgte. Geschädigte Blätter regenerierten sich hingegen kaum und starben meist ab. Insgesamt hatten sich geschädigte Sidatriebe nach dem Herbizideinsatz schneller regeneriert als die Silphietriebe und setzten ihr Wachstum über die Seitentriebe fort.



Abbildung 122: Durch den Herbizideinsatz in Mais geschädigte Sidatriebe am 28. Mai 2020, etwa eine Woche nach der Herbizidapplikation



Abbildung 123: Durch Herbizidmaßnahme geschädigter Sidatrieb mit beginnendem Wiederaustrieb im unteren Stängelbereich am 16. Juni 2020, etwa vier Wochen nach der Herbizidapplikation in Mais

Der Mais konnte sich am Standort Wolferkofen nur sehr ungleichmäßig entwickeln, da bereits der Feldaufgang wegen der Trockenheit verzögert war. Darüber hinaus wurde ein Teil der Keimlinge durch Krähen gefressen und insbesondere die Randreihen zu Beginn des Schossen intensiv durch Wild verbissen. Bei später Keimung und starkem Verbiss war stellenweise Ende Juni noch kein Reihenschluss der Maispflanzen erreicht, so dass dort auch nur eine geringe Beschattung der Triebe zwischen den Reihen vorzufinden war. In den Parzellen, in denen der Mais normal gekeimt war, war Anfang Juli eine gute Entwicklung des Mais gegeben und die Sidatriebe wurden einigermaßen unterdrückt. Sidatriebe entwickelten sich in diesem Fall meist nur zwischen den Reihen. In den meisten Parzellen mit eher ungleichmäßiger Maisentwicklung wiesen die Sidatriebe ein kräftigeres Wachstum auf. Sie erreichten etwa eine Wuchshöhe von zwei Drittel des Mais, so dass die Lichtkonkurrenz zum Mais Anfang Juli noch eher gering war. Bis Ende Juli hatten sich alle geschädigten Triebe von der Herbizidanwendung erholt. Des Weiteren erschienen bis zur Ernte in allen Varianten neue Sidatriebe, die allerdings nicht mehr konkurrenzfähig gegenüber dem Mais waren und kaum Zuwachs zeigten. Diese Triebe wurden bei der Erfassung des Durchwuchsbesatzes zur Ernte nicht miterfasst. Im Vergleich zur Bonitur Mitte Juni nahm die Anzahl der Triebe bis Anfang September in allen Varianten deutlich zu. Die größte Zunahme war in den gefrästen Parzellen zu verzeichnen, so dass zur Silomaisreife der Durchwuchsbesatz in allen Varianten auf ähnlichem Niveau lag und keine signifikanten Unterschiede nachzuweisen waren. In der Fräs- und Grubbervariante waren jedoch auch große Schwankungen zwischen den Parzellen gegeben.

Ernte

Im Mittel über die Parzellen mit N-Düngung wurde bei der Folgekultur Silomais nach dem Sidaumbruch im Herbst 2019 ein Trockenmasseertrag von 217,1 dt/ha erzielt (Abbildung 124). Hierbei handelt es sich um den Gesamtertrag je Parzelle, der aus zwei Maisreihen und dem Sidadurchwuchs zwischen den beiden Reihen bestand. Somit wurde trotz des verzögerten Feldaufgangs ein ähnliches Ertragsniveau wie im Silphieumbruchversuch erreicht. Die Erträge wiesen allerdings starke Schwankungen zwischen den Parzellen auf, signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchvarianten konnten nicht nachgewiesen werden. Der höchste Trockenmasseertrag war tendenziell nach dem Umbruch mit dem Grubber gegeben. Der Trockensubstanzgehalt erreichte mit 43,4 % ein ähnliches Niveau wie im Silphieumbruchversuch in Straubing. Eine varianzanalytische Auswertung mit der Düngungsvorgeschichte als zusätzlichem Faktor konnte bezüglich der Trockenmasseerträge keinen signifikanten Einfluss dieses Faktors feststellen.

Die mittlere Wuchshöhe des Sidadurchwuchses zur Ernte betrug ca. 1,7 m (Abbildung 125), wobei signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden gegeben waren ($p = 0,0353$, Abbildung 119). Die Sidatriebe erreichten in der Pflugvariante eine signifikant höhere mittlere Wuchshöhe als in den mit der Fräse umgebrochenen Parzellen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass durch das Unterpflügen der Wurzelballen diese am wenigsten beschädigt wurden und somit den Trieben mehr Reservestoffe zur Verfügung standen.

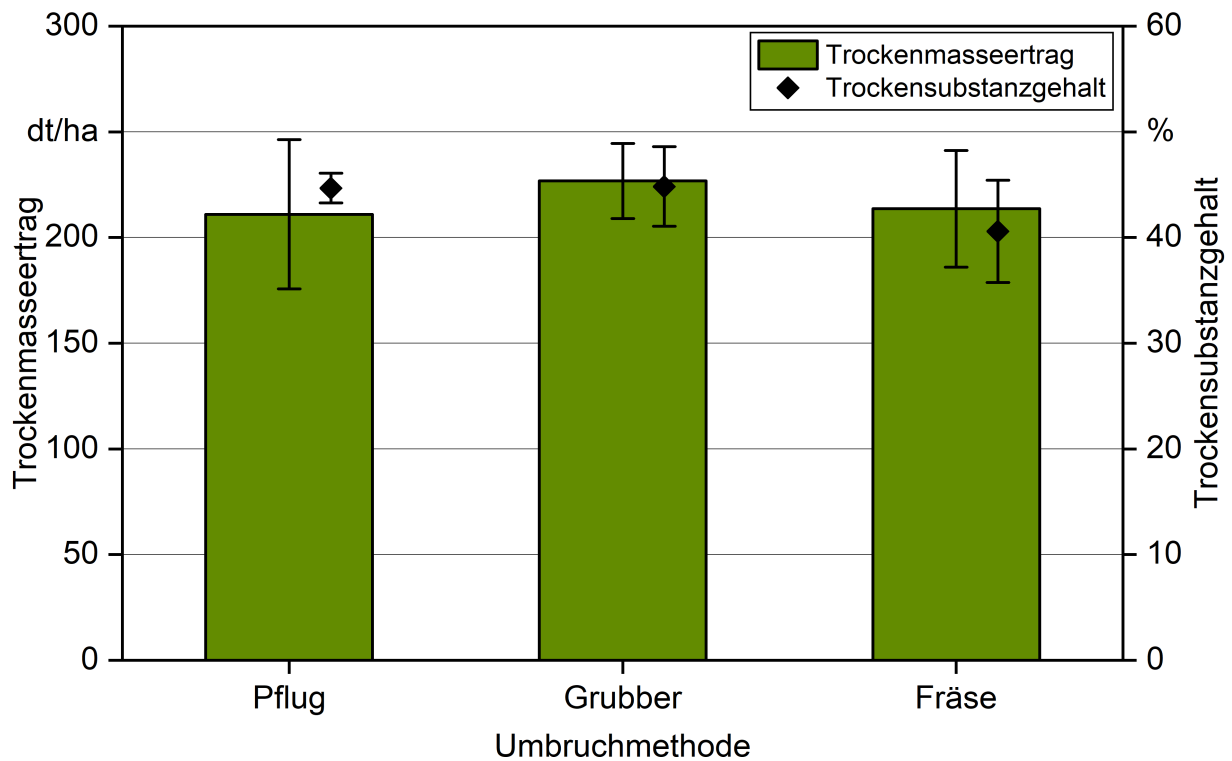


Abbildung 124: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Sida mit Pflug, Grubber oder Fräse im Herbst 2019; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen



Abbildung 125: Sidadurchwuchs nach dem Umbruch im Herbst 2019 in nachfolgendem Silomais zum Erntetermin am 15. September 2020 in der Grubbervariante

5.2.2.3.3 Mais im Jahr 2021 (Anlagejahr 2021)

Aussaat und Durchwuchs im Frühjahr

Ist nach dem Umbruch einer Dauerkultur der Anbau einer Sommerung geplant, so ist ein Umbruch im Frühjahr zur Vermeidung von N-Verlusten über den Winter unter Umständen vorteilhafter. Darüber hinaus zeigte keine der im anderen Umbruchversuch untersuchten Umbruchmethoden bei einem Umbruch im Herbst und bei der Ansaat von Mais im Folgejahr eine effektive Verringerung des Durchwuchspotenzials, so dass im Jahr 2021 ein Umbruch im Frühjahr vor der Maissaat untersucht wurde. Der Sidabestand des zweiten Sidaumbruchversuchs wurde am 21. April mit einem Pflug oder einer Fräse umgebrochen und die Saatbettbereitung war am 22. April abgeschlossen. Wegen der großen Wurzelstöcke von Sida waren auch in der Pflugvariante teilweise große Wurzelreste an der Bodenoberfläche vorhanden (Abbildung 126). Die Aussaat des Maises erfolgte am 27. April. Etwa zwei Wochen nach der Saatbettbereitung waren in den gepflügten Parzellen bereits erste Sidatriebe erkennbar (Abbildung 127). Bis Mitte Mai trat allerdings auch dort nur vereinzelt Sidadurchwuchs auf.



Abbildung 126: Bodenoberfläche nach dem Umbruch von Sida im Frühjahr 2021 mit einer Fräse (links) bzw. einem Pflug (rechts) und nachfolgender Saatbettbereitung nach der Maissaat



Abbildung 127: Erster Sidadurchwuchs am 6. Mai 2021 nach dem Umbruch des Sidabestands am 21. April in nachfolgend gesättem Mais

Anfang Juni, zum Zeitpunkt der Herbizidapplikation, war in der Pflugvariante deutlich mehr Sidadurchwuchs vorhanden. Dieser war mit durchschnittlich 5 Trieben/m² tendenziell höher als bei einem Umbruch mit der Fräse, wo bei der Bonitur im Mittel 1,75 Triebe/m² erfasst wurden (Abbildung 128). Die Sidatriebe in den gepflügten Parzellen zeigten darüber hinaus ein deutlich kräftigeres Wachstum und erreichten bereits eine Wuchshöhe von bis zu 45 cm (Abbildung 129). Dies gilt insbesondere für Triebe, die aus eher flach eingearbeiteten Knospen stammten. In den gefrästen Parzellen erscheinene Triebe waren dagegen zum Herbizidtermin deutlich kleiner und wiesen eine maximale Wuchshöhe von ca. 15 cm auf. Durch starken Krähenfraß wurde die Bestandsdichte des Maises stellenweise stark reduziert (Abbildung 130). Die Fraßschäden waren dabei in den gefrästen Parzellen deutlich stärker als nach dem Umbruch mit dem Pflug, wobei stellenweise nur noch 2–3 Maispflanzen/m² vorhanden waren. Die stärkere Schädigung nach dem Umbruch mit der Fräse ist eventuell auf eine flachere Saatgutablage gegenüber den gepflügten Parzellen mit tieferer Lockerung zurückzuführen.

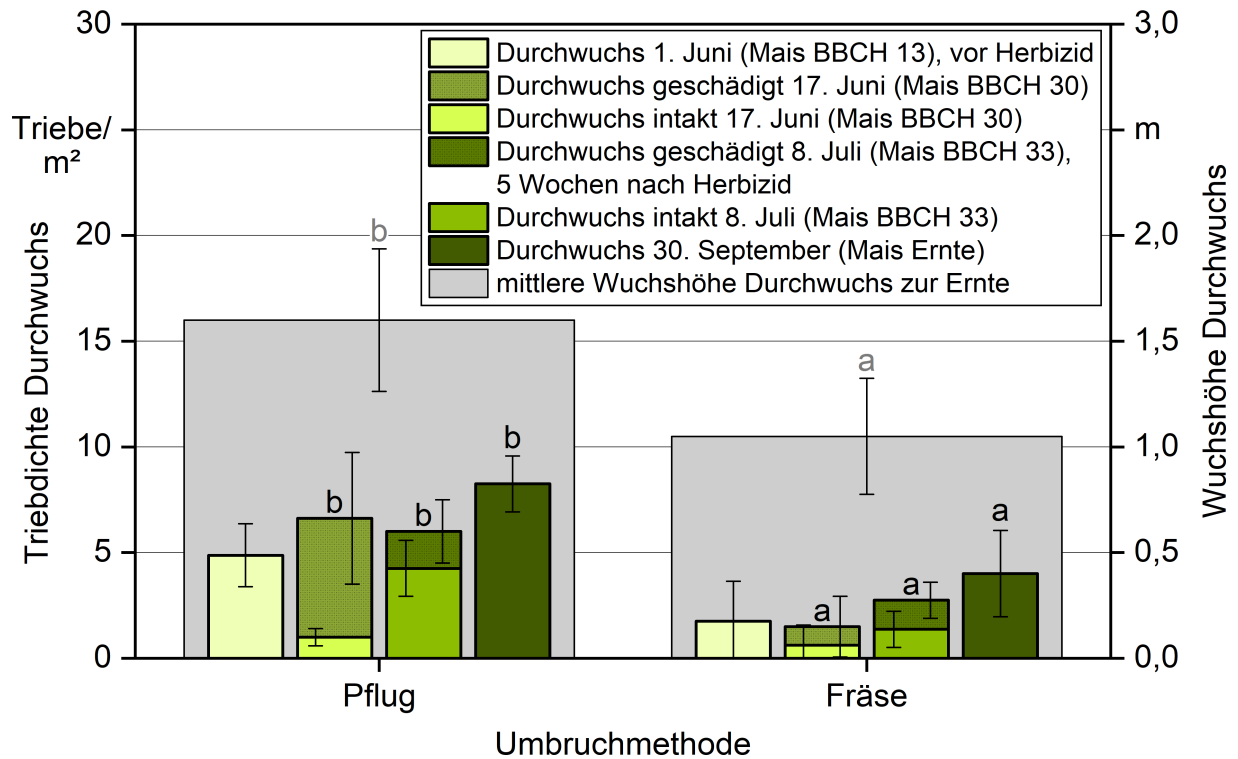


Abbildung 128: Durchwuchs von Sida nach einem Umbruch im Frühjahr 2021 in der Folgekultur Mais in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen jeweils für einen Boniturtermin, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen



Abbildung 129: Sidadurchwuchs nach dem Umbruch im Frühjahr 2021 mit einem Pflug in nachfolgend gesättem Mais am 1. Juni, kurz vor der Herbizidapplikation



Abbildung 130: Durch Krähenfraß während des Feldaufgangs stark ausgedünnte Maisparzellen der Versuchsanlage zur Untersuchung des Sidaumbruchs im TFZ-Schaugarten am 9. August 2021

Herbizideinsatz

Wie bereits angesprochen besteht bei einem Umbruch mit dem Pflug das grundlegende Problem, dass nachfolgend der Wiederaustrieb stark zeitlich verzögert erscheint. Anfang Juni waren deshalb vor allem in den gepflügten Parzellen Durchwuchstriebe unterschiedlicher Größe vorhanden, zudem traten bereits wieder neue Triebe aus der Bodenoberfläche hervor. Somit war es unmöglich, bei einer Herbizidanwendung den gesamten bekämpfungsrelevanten Durchwuchs zu erfassen, zumal bei Dauerkulturdurchwuchs aus Wurzelteilen des Altbestands keine Wirkung durch Bodenherbizide zu erwarten ist. Im Sidaumbruchversuch im Jahr 2021 wurde im Mais am 4. Juni die gleiche Herbizidmischung wie in den entsprechenden Parzellen des Silphieumbruchversuchs ausgebracht. Zwei Wochen nach der Herbizidausbringung war bereits eine starke Schädigung an einem Großteil der Sidatriebe zu beobachten, wie auch die Durchwuchsbonitur Mitte Juni ergab (Abbildung 128, Abbildung 131). Die geschädigten Triebe wiesen eine starke Nekrotisierung der Blätter, Verkrümmung des Stängels und ein Aufrollen der Blätter auf. Wie beim Sidaumbruchversuch in Wolferkofen zeigte ein Teil der Durchwuchstriebe in beiden Umbruchvarianten keinerlei Schädigung durch den Herbizideinsatz (Abbildung 132). Diese Triebe waren vermutlich erst nach der Herbizidausbringung erschienen und kamen nicht mit dem Wirkstoff in Kontakt.



Abbildung 131: Starke Schädigung der Sidatriebe am 17. Juni 2021, zwei Wochen nach dem Herbizideinsatz in dem nach dem Umbruch im Frühjahr gesäten Mais



Abbildung 132: Später erschienene Sidatriebe ohne Herbizidschäden neben stark geschädigten Trieben am 17. Juni 2021 zwei Wochen nach der Herbizidapplikation

Da die Bestandsdichte des Maises in den gefrästen Parzellen durch den Krähenfraß sehr viel stärker ausgedünnt wurde als nach dem Umbruch mit Pflug, entstanden im weiteren Verlauf für den Sidadurchwuchs unterschiedliche Umweltverhältnisse. In allen Pflugvarianten war eine sehr viel stärkere Beschattung der Durchwuchstriebe durch die Maispflanzen gegeben, da diese neben einer höheren Bestandsdichte bis zur Ernte auch eine größere Wuchshöhe aufwiesen. Trotz der ungleichen Verhältnisse waren Anfang Juli in den gepflügten Parzellen mehr als doppelt so viele und somit signifikant mehr Durchwuchstriebe als in den Fräsvarianten vorzufinden. Darüber hinaus waren die Triebe in der Pflugvariante mit bis zu 80 cm Wuchshöhe deutlich größer und kräftiger. In beiden Varianten waren nur wenige Triebe infolge der Herbizidanwendung bereits vollständig abgestorben. Viele zeigten allerdings noch eine starke Schädigung, wobei der Anteil der geschädigten Triebe an den vorhandenen in den Fräsvarianten größer war (Abbildung 128). In den gepflügten Parzellen lagen dabei überwiegend intakte Sidatriebe vor, die erst nach der Herbizidapplikation erschienen waren. Im weiteren Verlauf bis zur Ernte nahm der Durchwuchsbesatz in beiden Varianten um ca. 2 Triebe/m² zu. Auch aus Wurzelbereichen, aus denen mit Herbizid behandelte Triebe entsprangen, trieben neue intakte Triebe ohne Schädigung aus. Die Wirkstoffe wurden somit offensichtlich nicht in die Wurzeln verlagert und die Triebkraft der Wurzelstrukturen wurde nicht nachhaltig geschädigt. Die oberirdische Biomasse der Sidapflanzen wurde dagegen stark geschädigt und es erfolgte anders als bei den Herbiziden im ersten Sidaumbruchversuch kein Wiederaustrieb der geschädigten Triebe aus den unteren Blattachselknospen. Insgesamt zeigte auch bei der Bekämpfung von Sidadurchwuchs eine Herbizidkombination mit einer Wuchsstoffkomponente eine deutlich bessere Wirkung.

Gegenüber der Durchwuchsbonitur vom 8. Juli stieg der Durchwuchsbesatz bis zur Ernte in beiden Varianten wieder an, was den unabhängig von der Umbruchmethode kontinuierlichen Austrieb der Triebe von Sida verdeutlicht. Trotz der deutlich schlechteren Beschattung infolge der stark lückigen Maisbestände in den gefrästen Parzellen lag dort zum Erntetermin des Maises Anfang Oktober mit 4 Trieben/m² gegenüber der Pflugvariante ein signifikant niedrigerer Durchwuchsbesatz vor (Abbildung 133). Nach dem Umbruch mit dem Pflug war ein Besatz von 8,25 Trieben/m² vorzufinden, die zudem mit durchschnittlich 1,6 m eine signifikant größere Wuchshöhe aufwiesen (Abbildung 134). In der Fräsvariante erreichten die Sidatriebe eine mittlere Wuchshöhe von etwa 1,05 m. Trotz der Herbizidanwendung und des in der Pflugvariante sehr dichten und hohen Maisbestands erreichten einige Sidatriebe bis zu 75 % der Wuchshöhe des Maises und konnten fast mit dem Maiswachstum mithalten. Obwohl in den Pflugvarianten mehr kräftige Triebe vorlagen, waren auch dort viele schwächere Triebe mit weniger als 50 cm Wuchshöhe vorhanden. Vermutlich hatten der Zeitpunkt des Erscheinens der Triebe und das entsprechende Lichtangebot einen Einfluss auf die Stärke der Triebe.



Abbildung 133: Sidadurchwuchs in Mais Ende September vor der Ernte nach dem Umbruch mit einer Fräse im Frühjahr

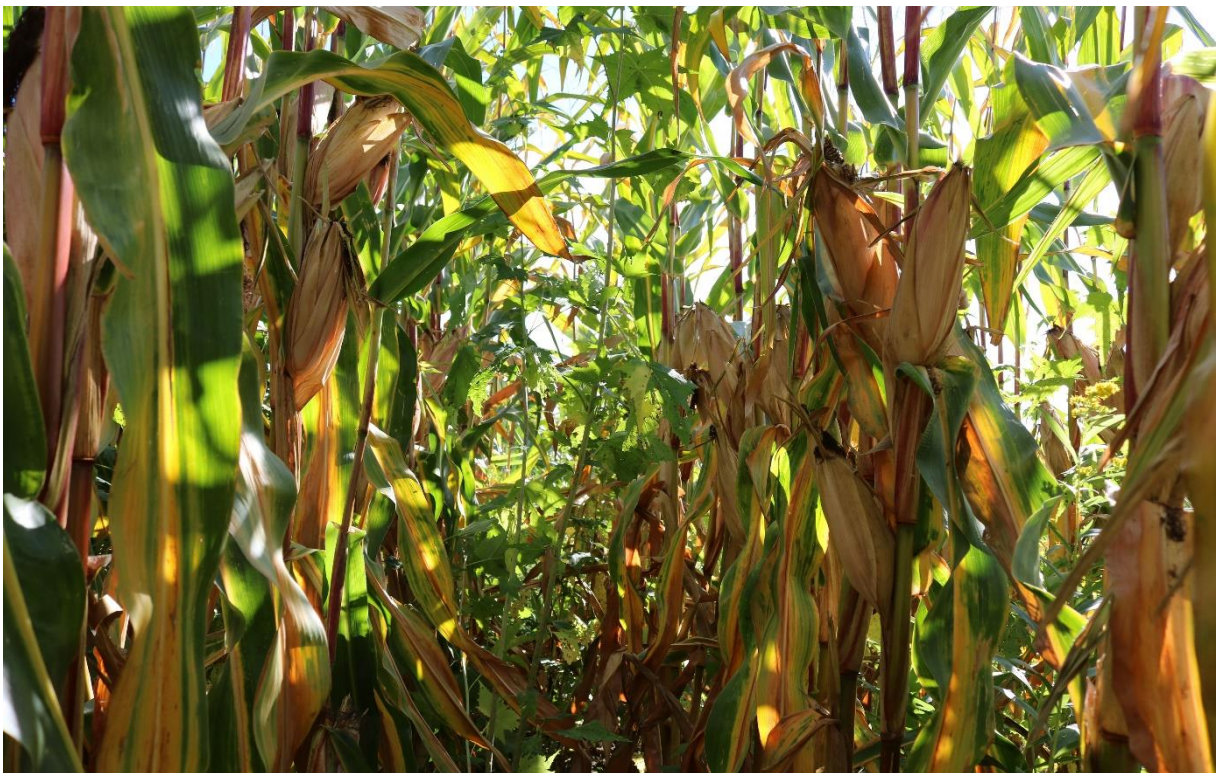


Abbildung 134: Sidadurchwuchs in Mais Ende September vor der Ernte nach dem Umbruch mit einem Pflug im Frühjahr

Der Sidadurchwuchs erfolgte in den gefrästen Parzellen vor allem aus größeren Wurzelstücken, wobei die Triebe offensichtlich umso kräftiger erschienen, je größer die Wurzelstücke waren. Nur eine Fräspazelle wies einen relativ geschlossenen Maisbestand auf. Dort waren deutlich weniger und auch schwächere Durchwuchstriebe als in den anderen gefrästen Parzellen vorhanden. Dies bestätigt, dass auch die Kultur durch ihre Beschattung zu einer Reduktion und Schwächung des Durchwuchses beitragen kann. Die Ergebnisse dieses Umbruchversuchs sind somit zwar durch die unterschiedlich gut entwickelten Maisbestände verzerrt, dennoch wurde nachgewiesen, dass durch die Zerkleinerung der Wurzelstöcke mit der Fräse eine deutliche Reduktion des Durchwuchsbesatzes und der Triebkraft erreicht werden kann. Insgesamt bestätigt dies die Ergebnisse des ersten Sidaumbruchversuchs und zeigt, dass Sidadurchwuchs deutlich schwieriger zu bekämpfen ist als der Durchwuchs nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie.

Ernte

Die Umbruchmethode im Sidaumbruchversuch im Jahr 2021 zeigte einen signifikanten Einfluss auf den Trockenmasseertrag des Silomais ($p = 0,0365$), wobei in den mit dem Pflug umgebrochenen Parzellen mit 323 dt/ha ein deutlich höherer Ertrag als in den gefrästen Parzellen erreicht wurde (Abbildung 135).

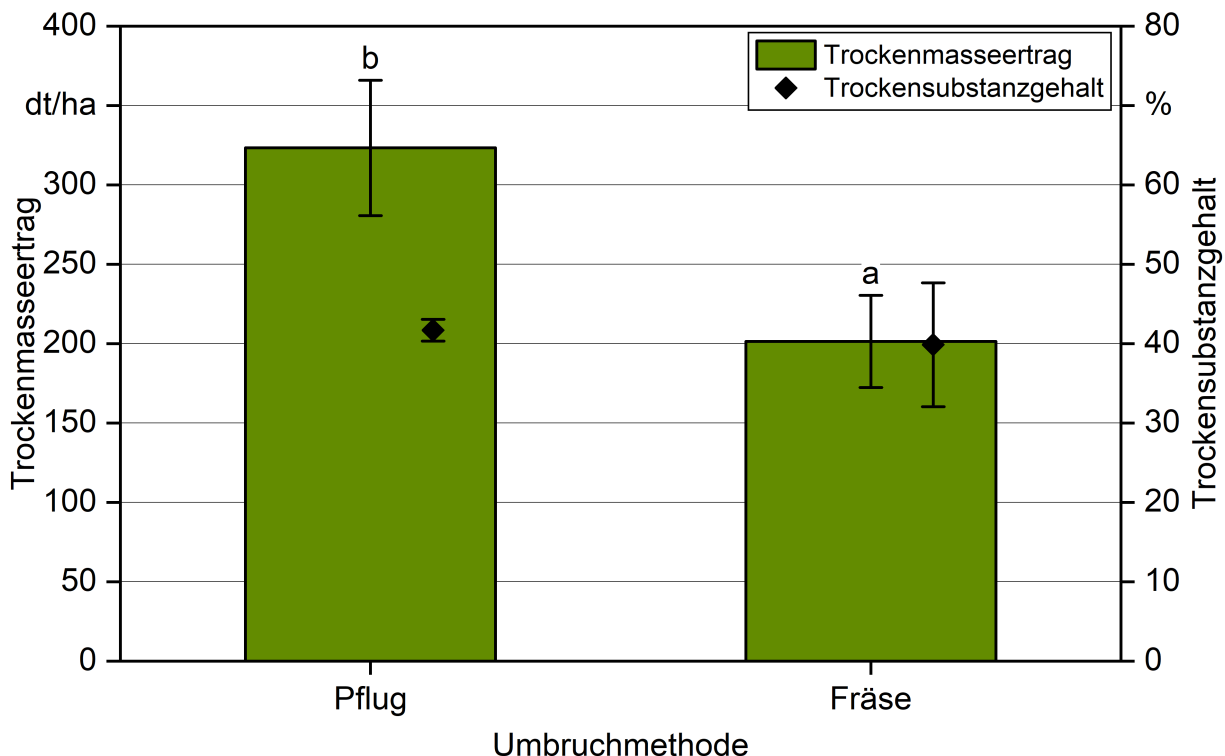


Abbildung 135: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt von Silomais nach dem Umbruch von Sida mit Pflug oder Fräse im Frühjahr 2021; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Dieser große Ertragsunterschied ist in erster Linie auf den unterschiedlich starken Krähenfraß zurückzuführen, der sich fast ausschließlich auf die Fräsvariante beschränkte. Es kann deshalb nicht gefolgert werden, dass der Pflug eine positive Ertragswirkung auf den anschließend gesäten Mais hatte. Trotz der lückigen Bestände in den Fräsvarianten erreichten diese einen Ertrag von 201 dt TM/ha. Im Vergleich zu Praxisflächen waren die Maiserträge dieses Versuchs wegen starker Randeffekte der kleinen Parzellen ohne Stirnränder deutlich überschätzt. Dennoch wurden wegen der günstigen Witterung im Jahr 2021 in der Pflugvariante überdurchschnittlich hohe Maiserträge erzielt, worauf auch die Wuchshöhe von durchschnittlich 3,75 m schließen lässt.

Nach der Maisernte wurde die Versuchsfläche erneut gepflügt. Dabei wurden in den Pflugvarianten des Sidaumbbruchversuchs größere Sidawurzeln wieder an die Oberfläche gepflügt. Diese waren überwiegend vital und es waren die Ansätze der diesjährigen Triebe erkennbar, die teilweise völlig entgegengesetzt der ursprünglichen Wuchsrichtung zur Bodenoberfläche wuchsen. Wie in Abbildung 136 (rechts) erkennbar war dies auch bei tieferer Einarbeitung möglich. In den gefrästen Varianten waren dagegen nach der Maisernte nur wenige größere noch lebende Wurzelstücke zu finden. Die Wurzelabschnitte, die sich unterhalb der Arbeitstiefe der Fräse von ca. 8 cm befunden hatten und nach der Ernte nach oben gepflügt worden waren, waren meist abgestorben und bereits teilweise verrottet (Abbildung 137). Der Wiederaustrieb in den Fräsvarianten erfolgte offenbar aus größeren Stücken der durch die Fräse zerkleinerten oberflächennahen Wurzelstrukturen und nicht aus tieferreichenden Abschnitten der Wurzelstöcke. Folglich wurden durch das Fräsen wie bei Durchwachsener Silphie nicht nur die Triebzahl, sondern auch die für den Wiederaustrieb zur Verfügung stehenden Reservestoffe und somit die Wuchsleistung der Dauerkulturtriebe reduziert.



Abbildung 136: Intakte Sidawurzeln im Oktober 2021 nach der Maisernte in den mit dem Pflug im Frühjahr 2021 umgebrochenen Parzellen mit Resten der Sidadurchwuchsstriebe (grünlich)



Abbildung 137: Abgestorbene und teilweise verrottete Sidawurzeln im Oktober 2021 nach der Maisernte, entnommen aus den mit Fräse im Frühjahr 2021 umgebrochenen Parzellen

5.2.2.4 Nährstoffabfuhr und -gehalte in den Folgekulturen

5.2.2.4.1 Sidaumbruch Anlagejahr 2019

Im Versuch zum Umbruch von Sida wurde ebenfalls das Erntegut von Mais und Triticale auf seinen Gehalt an Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium untersucht. Die daraus berechnete N-Abfuhr über das Erntegut bei Silomais lag bei 200,1 kg N/ha und somit deutlich unterhalb des nach dem Silphieumbruch erreichten Niveaus (Abbildung 138). Die N-Abfuhr über die Triticalekörner betrug 107,4 kg N/ha, die N-Aufnahme ins Stroh 18,1 kg N/ha, so dass die gesamte N-Aufnahme der oberirdischen Biomasse ähnliche Werte wie bei der Triticale des Silphieumbruchversuchs erreichte. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchverfahren waren nicht vorhanden. Der Trockenmasseertrag des Silomais war nach dem Umbruch von Sida im Jahr 2020 nur geringfügig niedriger als im Silphieumbruchversuch, so dass das geringere Niveau der N-Abfuhr vor allem durch die niedrigeren N-Gehalte verursacht wurde. Diese lagen im Silomais-Erntegut des Sidaumbruchversuchs unter den bayerischen Standardwerten [10]. Die N-Gehalte von Triticale waren dagegen im Bereich der Standardwerte angesiedelt. Des Weiteren hatte die Umbruchmethode bei beiden Folgekulturen nach dem Sidaumbruch keinen signifikanten Einfluss auf die N-Gehalte.

Über mineralische N-Dünger wurde bei Silomais im Mittel der ehemals organisch und mineralisch gedüngten Parzellen eine N-Menge von 182 kg N/ha und bei Triticale von 154 kg N/ha zugeführt. Daraus errechnet sich eine N-Bilanz von etwa -18 kg N/ha bei Silomais und 28 kg N/ha bei Triticale mit bzw. 47 kg N/ha ohne Strohabfuhr. Wie nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie war bei Triticale aufgrund des unterdurchschnittlichen Ertragsniveaus ein Stickstoffüberhang aus der Düngung gegeben. Erhöhte N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte waren dennoch nicht nachzuweisen. Bei Silomais lag eine negative N-Bilanz vor, so dass ein Teil der N-Aufnahme des Maises aus der N-Mineralisation bereitgestellt werden musste.

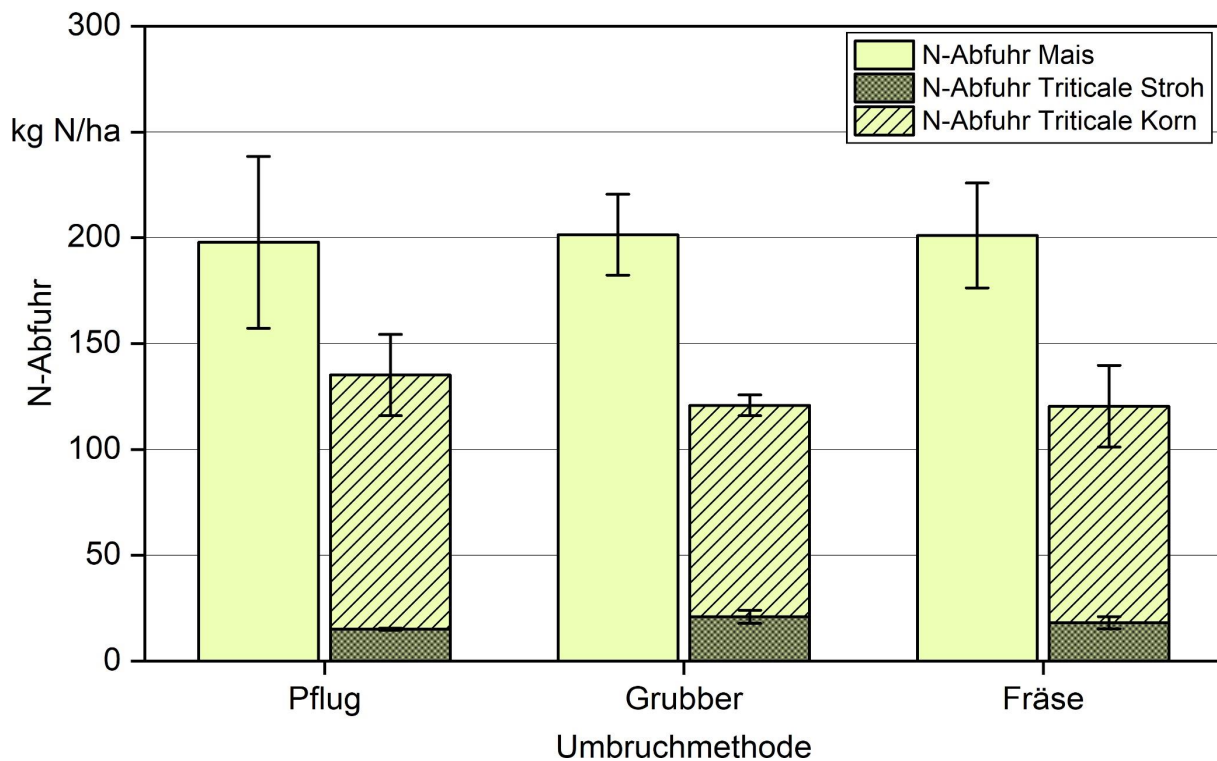


Abbildung 138: Stickstoffabfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) im Jahr 2020 nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 mit Pflug, Grubber oder Fräse; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen

Die Gehalte der übrigen untersuchten Nährelemente lagen bei der Triticale mit N-Düngung in etwa auf dem Niveau der bayerischen Standardwerte, bei Silomais darunter [10] (Tabelle 24). Des Weiteren war ein signifikanter Einfluss des Umbruchverfahrens auf die Magnesiumabfuhr der Triticalekörner und die Phosphoraufnahme ins Triticalestroh nachzuweisen. Die Phosphor-, Kalium- und Magnesium-Gehalte in den ungedüngten Parzellen wiesen ein ähnliches Niveau wie in den mit Stickstoff gedüngten Varianten auf, der N-Gehalt war erwartungsgemäß niedriger (siehe Anhang Tabelle 59).

Tabelle 24: Nährstoffgehalte und -abfuhr von Triticale und Mais nach dem Umbruch von Sida bei leicht reduzierter mineralischer N-Düngung in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey

Erntegut	Umbruch- methode	Nährstoffgehalt				Nährstoffabfuhr			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
		kg/dt TM				kg/ha			
Nährelement	Einheit								
Triticale Korn	Pflug	2,17	0,93	0,57	0,23	120,0	51,2	31,6	12,6 b
Triticale Korn	Grubber	2,15	0,97	0,59	0,23	99,9	45,2	27,5	10,8 ab
Triticale Korn	Fräse	2,20	0,96	0,58	0,23	102,2	44,4	26,9	10,5 a
Triticale Stroh	Pflug	0,41	0,27	1,60	0,15	15,1 a	9,9 a	58,8	5,3
Triticale Stroh	Grubber	0,53	0,32	1,53	0,15	21,0 b	12,7 b	62,0	6,2
Triticale Stroh	Fräse	0,47	0,31	1,57	0,13	18,2 ab	12,0 ab	61,0	5,2
Mais	Pflug	0,94	0,37	1,42	0,23	197,9	77,7	298,7	48,7
Mais	Grubber	0,89	0,37	1,38	0,22	201,5	84,5	311,6	49,6
Mais	Fräse	0,94	0,37	1,30	0,22	201,1	78,3	279,7	47,6

5.2.2.4.2 Sidaumbruch Anlagejahr 2021

In dem im Jahr 2021 angelegten Sidaumbruchversuch wurde der nach dem Umbruch mit der Fräse gesäte Mais sehr viel stärker durch Krähenfraß ausgedünnt als in den gepflügten Parzellen. Dies führte zu entsprechenden Ertragsunterschieden und wirkte sich auch auf Nährstoffabfuhr und -gehalte des Maises aus. In den gepflügten Parzellen lag die N-Abfuhr bei 300,2 kg N/ha, wohingegen nach dem Umbruch mit der Fräse eine signifikant niedrigere N-Abfuhr von 203,2 kg N/ha gegeben war ($p = 0,0158$, Abbildung 139). Die N-Gehalte verhielten sich umgekehrt und erreichten mit 1,02 kg N/dt TM in den gefrästen Parzellen tendenziell ein höheres Niveau (Tabelle 25). Gleiches gilt für die Kaliumgehalte, während die Phosphorgehalte in den gefrästen Parzellen signifikant höher waren. Insgesamt waren die N-Gehalte sowie auch die Kalium- und Magnesiumgehalte eher unterdurchschnittlich, während die Phosphorgehalte den Standardwerten entsprachen [10]. Entsprechend den Ertragsunterschieden wiesen die gepflügten Parzellen neben der N-Abfuhr auch eine signifikant höhere Kaliumabfuhr auf ($p = 0,0406$). Die Abfuhr der weiteren untersuchten Mengenelemente fiel tendenziell höher aus.

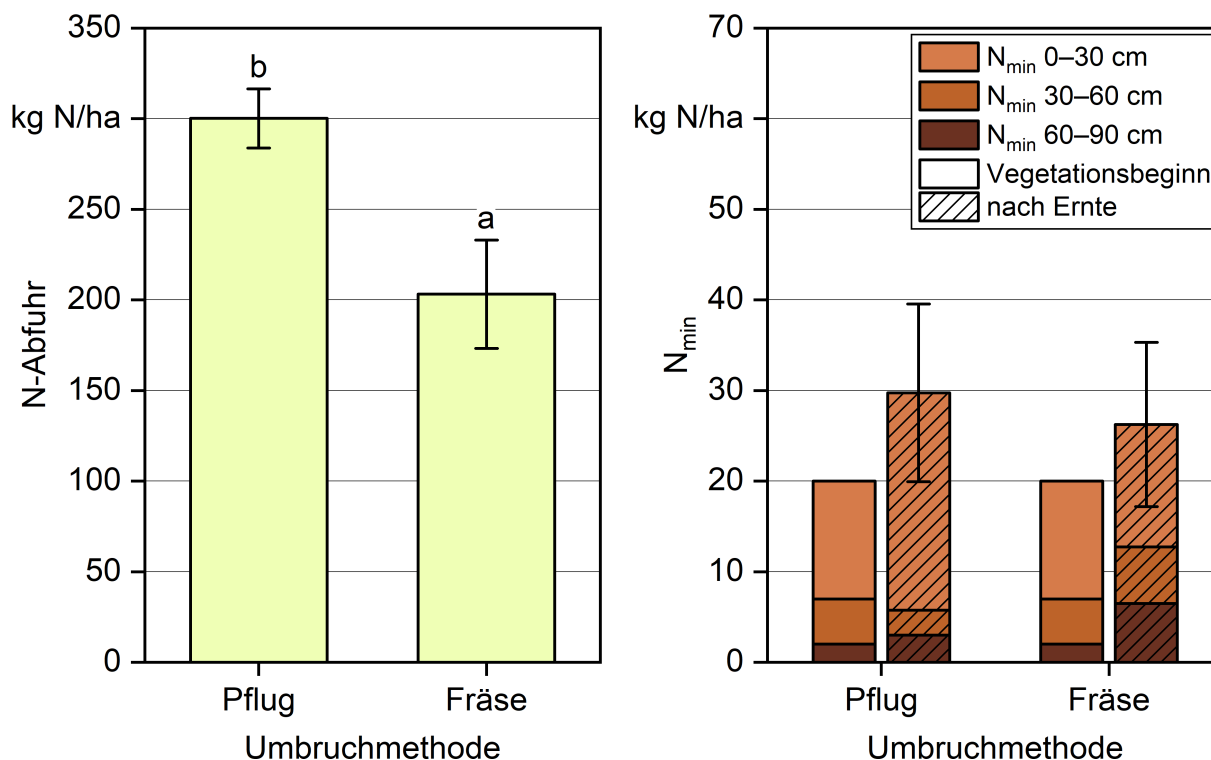


Abbildung 139: N-Abfuhr von Mais nach dem Umbruch von Sida mit Pflug oder Fräse im Frühjahr (links) und N_{min}-Mengen vor dem Umbruch zu Vegetationsbeginn und nach der Maisernte (rechts)

Tabelle 25: Nährstoffgehalte und -abfuhr von Mais nach dem Umbruch von Sida im Frühjahr 2021 in Abhängigkeit von der Umbruchmethode; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey

Erntegut	Umbruchmethode	Nährstoffgehalt				Nährstoffabfuhr			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
		kg/dt TM				kg/ha			
Mais	Pflug	0,93	0,51 a	0,84	0,16	300,2 b	164,8	270,1 b	52,4
Mais	Fräse	1,02	0,59 b	0,91	0,16	203,2 a	118,7	182,2 a	31,8

5.2.2.5 Mineralisationsdynamik nach dem Umbruch

5.2.2.5.1 Abschätzung der Stickstoffnachlieferung

Die Untersuchung der N-Nachlieferung nach dem Umbruch der Dauerkultur Sida erfolgte auf der Versuchsfläche in Wolferkofen ebenfalls auf der Basis zahlreicher N_{\min} -Beprobungen. Im Versuchsjahr 2019 wurde nach dem Umbruch ein Teil der Parzellen zu Vegetationsende (25. November) auf den Gehalt mineralischen Stickstoffs untersucht, um die seit der Ernte bzw. dem Umbruch bis zur Vegetationsruhe mineralisierte N-Menge zu erfassen. Darüber hinaus erfolgten im Jahr 2020 analog zum Silphieumbruchversuch wiederholte N_{\min} -Untersuchungen der unbewachsenen Parzellen. Eine N_{\min} -Probenahme zu Vegetationsende im Jahr 2020 konnte allerdings im Sidaversuch wegen Abgabe der Versuchsfläche nicht mehr durchgeführt werden.

Die Entwicklung der N_{\min} -Mengen im Boden nach dem Umbruch bis zur Ernte des Silomais in den Parzellen ohne Bewuchs ist in Abbildung 140 dargestellt. Mit etwa 24 kg N/ha lag Mitte November 2019 nach dem vorausgegangenen Umbruch der Sidapartellen eine sehr geringe Menge mineralischen Stickstoffs im Boden vor. Die N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte von Sida betragen im Mittel 26,5 kg N/ha. Unterschiede zwischen mineralischer Düngung und Gärrestdüngung waren zu diesem Beprobungstermin kaum vorhanden. In Bezug auf diesen Ausgangswert vom 12. September im Anschluss an die Sidaernte nahmen die N_{\min} -Mengen bis Vegetationsende sogar leicht ab.

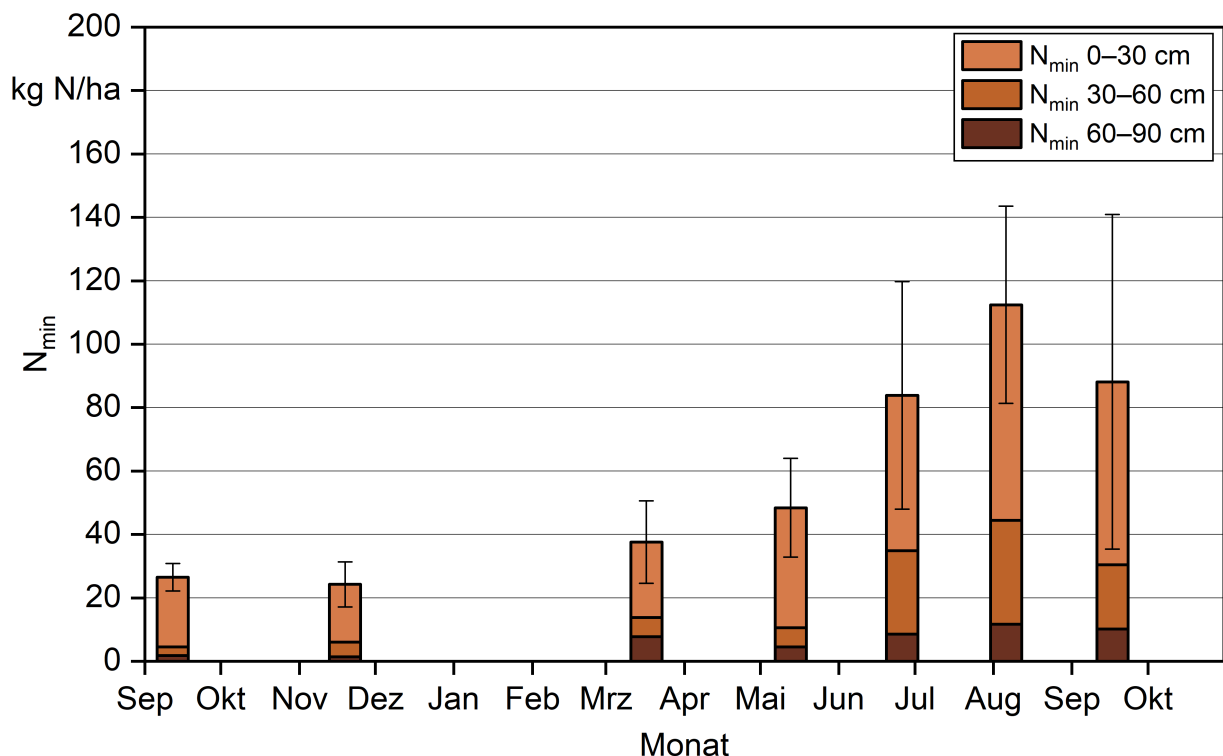


Abbildung 140: Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{\min}) nach der letzten Ernte von Sida im September 2019 und deren Umbruch Ende September; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Die Pflugvariante wies zum Probenahmetermin zu Vegetationsende im Umbruchjahr tendenziell die höchsten N_{\min} -Mengen im Boden auf, während die Fräsvariante in der Tendenz die niedrigsten Werte zeigte. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Ernte- und Wurzelrückstände von Sida bei deren Abbau zunächst eher zu einer Nettoimmobilisation von Stickstoff führen, da in der Fräsvariante durch die intensivere Zerkleinerung der Wurzelreste seit dem Umbruch vermutlich die stärkste Umsetzung stattgefunden hatte. In der Pflugvariante wurden wie beim Silphieumbruch die Wurzeln kaum beschädigt und fast nicht zerkleinert. Darüber hinaus waren Bodenlockerung und -bewegung am intensivsten, was zu einer höheren N-Freisetzung aus dem Abbau organischer Bodensubstanz geführt haben könnte. Insgesamt lagen die N_{\min} -Mengen auf einem niedrigen Niveau, das keine erhöhten N-Verluste bis Vegetationsbeginn erwarten lässt.

Über die Wintermonate bis Mitte März stieg die N_{\min} -Menge im Boden leicht auf etwa 38 kg N/ha an. Folglich fand wahrscheinlich auch während des milden Winters 2019/2020 eine geringfügige Mineralisation statt. Wie bei den Ergebnissen des Silphieumbruchversuchs deutet die leicht erhöhte Menge im untersten Beprobungshorizont auf eine geringfügige N-Verlagerung hin. Von einer größeren N-Auswaschung ist wegen der insgesamt eher geringen Winterniederschläge und der Tatsache, dass 2019 das zweite Trockenjahr in Folge war, allerdings nicht auszugehen. Bis Anfang Mai stiegen die N_{\min} -Werte nur geringfügig auf ca. 48 kg N/ha an. Wegen der ab Mai deutlich höheren Temperaturen und der einsetzenden Niederschläge wurde die Mineralisation gefördert und die N_{\min} -Mengen im Boden zeigten einen deutlichen Anstieg. Anfang August erreichten sie mit 112 kg N/ha das Maximum der durchgeführten Probenahmen, das ähnlich hoch wie nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie ausfiel. Im Anschluss gingen die Werte wieder leicht zurück, so dass der Verlauf insgesamt dem des Silphieumbruchversuchs sehr ähnelt. Der Rückgang bis zur Beprobung Anfang September ist vermutlich ebenfalls auf eine N-Aufnahme durch unerwünschten Bewuchs auf den Beprobungsparzellen zurückzuführen. Die entsprechenden Parzellen des Sidaumbruchversuchs waren Anfang September ähnlich stark mit Durchwuchstrieben bewachsen. Im Vergleich zum Silphieumbruchversuch gingen die N_{\min} -Mengen im Boden allerdings nicht so stark zurück.

Aus dem Verlauf der N-Nachlieferung bis Anfang August lässt sich ableiten, dass bis Mitte September noch einmal eine N-Nachlieferung von ca. 30 kg N/ha zu erwarten gewesen wäre. Insgesamt hätte somit die N_{\min} -Menge im Boden zur Beprobung Mitte September ca. 140 kg N/ha betragen müssen. Die N-Nachlieferung seit Mitte März müsste sich folglich auf ca. 105 kg N/ha belaufen und war damit fast identisch mit der nach dem Silphieumbruch. Bis Mitte August war dabei in den gepflügten Varianten tendenziell eine höhere N-Mobilisierung als in den anderen beiden Varianten zu beobachten. Die möglichen Ursachen hierfür wurden bereits zu Beginn dieses Kapitels aufgeführt. Insgesamt konnten außerdem keine eindeutigen Unterschiede zwischen den ehemals mineralisch und organisch gedüngten Parzellen ausgemacht werden.

Darüber hinaus wurde auch versucht, die N-Nachlieferung nach dem Sidaumbruch anhand der N-Abfuhr in den ungedüngten Mais- und Triticaleparzellen abzuschätzen. Die N-Abfuhr in den ungedüngten Maisparzellen belief sich im ersten Jahr nach dem Umbruch auf 97,0 kg N/ha (Abbildung 141). Bei Triticale waren eine N-Abfuhr durch die Körner von

29,7 kg N/ha und eine N-Aufnahme in das Stroh von 4,6 kg N/ha gegeben. Wird daraus entsprechend dem Vorgehen wie beim Umbruch von Durchwachsener Silphie die N-Nachlieferung abgeleitet, ergibt sich für Silomais von Vegetationsbeginn bis zur Ernte eine N-Nachlieferung von ca. 56 kg N/ha. Bei Triticale würde die N-Nachlieferung bis zur Ernte demnach etwa 37 kg N/ha betragen. Auch wenn hierbei große Unsicherheiten durch unberücksichtigte Eintrags- und Verlustpfade bestehen, lag das Niveau deutlich unter dem der Silphieumbruchfläche und der Abschätzung anhand der N_{min} -Mengen. Dennoch zeigt sich ebenfalls, dass die N-Nachlieferung überwiegend erst nach der Ernte der Triticale einsetzte. Eine N-Freisetzung aus dem Abbau der Ernte- und Wurzelreste von Sida zusätzlich zur normalen N-Mineralisation aus der organischen Bodensubstanz erscheint zudem eher unwahrscheinlich. Vielmehr deuten die Ergebnisse darauf hin, dass zumindest im Frühjahr ebenfalls eine N-Immobilisation beim Abbau der Rückstände oder eine N-Aufnahme noch lebender Wurzelteile stattfand.

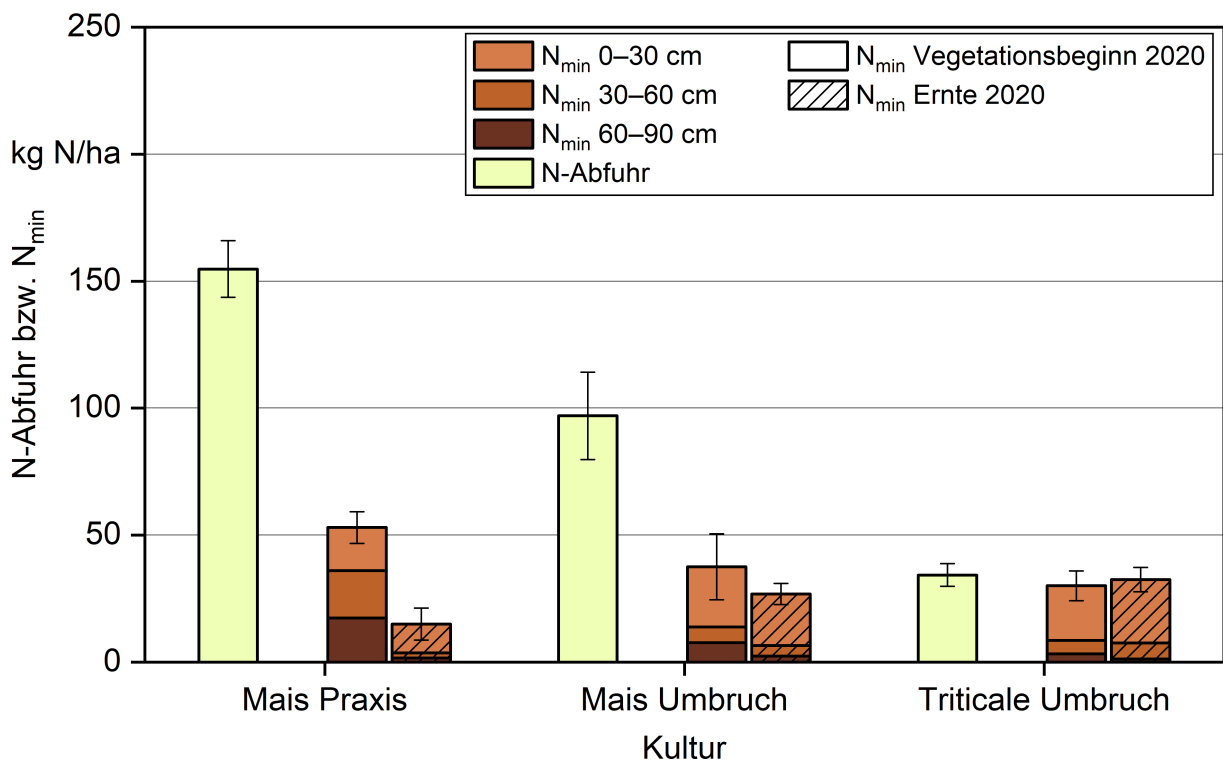


Abbildung 141: N-Abfuhr von Silomais und Triticale (Korn und Stroh) und N_{min} -Mengen im Boden zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte der Folgekultur nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in den Parzellen ohne N-Düngung und auf einer angrenzenden Praxisfläche (Mais Praxis: $n = 3$, Mais Umbruch: $n = 7$, Triticale Umbruch: $n = 4$); Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen der N-Abfuhr bzw. N_{min} -Mengen für die gesamte Beprobungstiefe

Um die N-Nachlieferung nach dem Sidaubruch besser einordnen zu können, wurde ebenfalls eine angrenzende Praxisfläche beprobt. Auf dieser Fläche stand im Jahr 2019 Winterweizen, nachfolgend wurde als Zwischenfrucht Weißer Senf (*Sinapis alba* L.) gesät. Die Einarbeitung der Zwischenfrucht erfolgte kurz vor der Entnahme der Bodenproben zu Vegetationsende. Die Untersuchung wurde wie beim Umbruchversuch mit Durchwachsener Silphie im Jahr 2019 nur einfach wiederholt durchgeführt. Im Jahr 2020 wurden drei unbewachsenen Parzellen Proben entnommen. Der Verlauf der N-Mineralisation auf dem benachbarten Praxisschlag zeigte insgesamt ein ähnliches Bild wie auf der umgebrochenen Sidafläche. Zu Vegetationsende nach dem Umbruch lag auf der Praxisfläche mit etwa 55 kg N/ha jedoch eine größere N_{\min} -Menge im Boden vor (Abbildung 142). Während der Vegetationsperiode des Folgejahrs verringerte sich dieser Unterschied zunehmend. Das Maximum hinsichtlich der N_{\min} -Menge im Boden auf der Praxisfläche wurde ebenfalls zur Beprobung Mitte August erreicht und lag mit 127 kg N/ha etwas über dem Niveau der Umbruchfläche. Anschließend war vermutlich wegen starken Unkrautbewuchses auf den Beprobungsparzellen ein leichter Rückgang festzustellen. Insgesamt ist bei den Ergebnissen der Praxisfläche auffällig, dass die Anteile der unteren beiden Beprobungshorizonte an der gesamten N_{\min} -Menge relativ hoch waren. Der Anstieg der N_{\min} -Mengen von Mitte März bis Anfang August auf der Praxisfläche betrug 74 kg N/ha und war somit identisch mit der Nettomineralisation, die im gleichen Zeitraum auf der Umbruchfläche beobachtet wurde.

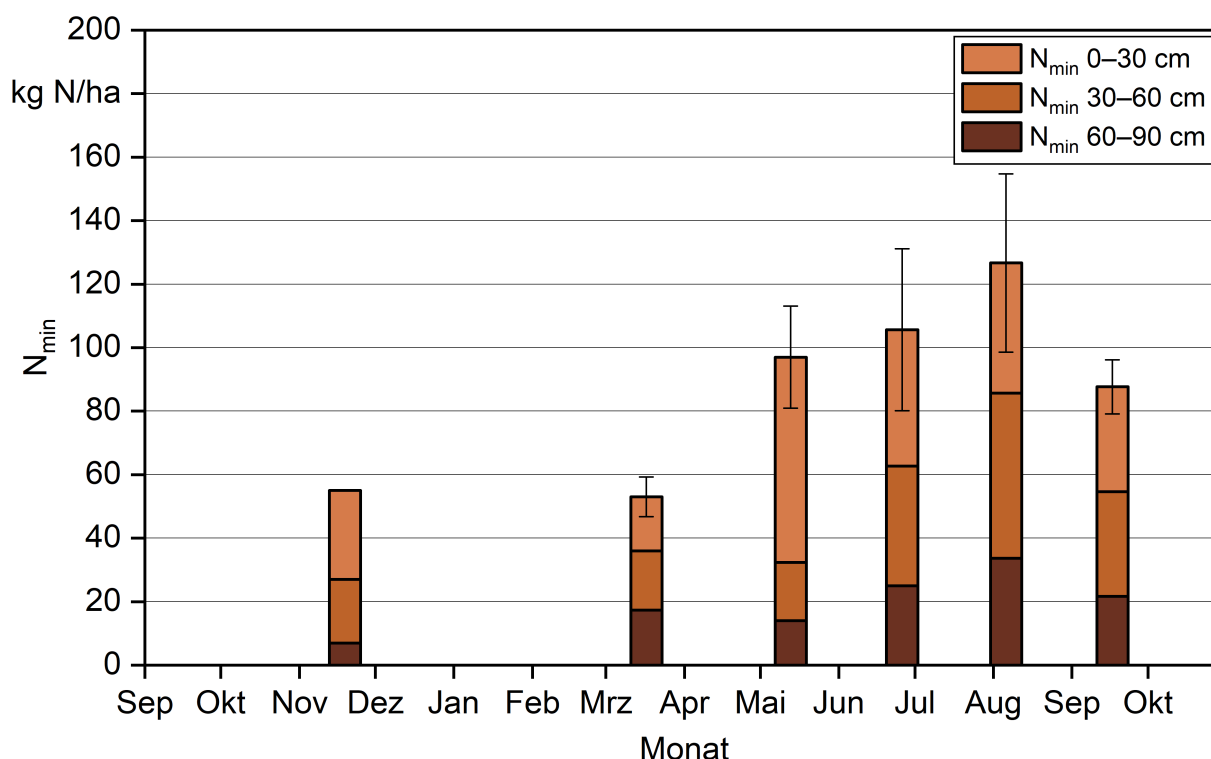


Abbildung 142: Entwicklung der Menge mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{\min}) auf einer zum Sidaubruchversuch in Wolferkofen angrenzenden Praxisfläche von Ende November 2019 bis Ende November 2020; Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Im Vergleich dazu wurde über die N-Abfuhr des Silomaises auf der Praxisfläche von 154,8 kg N/ha eine N-Nachlieferung von 87 kg N/ha bis zur Maisernte berechnet (Abbildung 141). Wird davon ausgegangen, dass die N_{\min} -Mengen in den unbewachsenen Parzellen bis Mitte September wahrscheinlich weiter angestiegen wären, so würde die N-Nachlieferung des Praxisschlags ca. 100 kg N/ha betragen. Dies würde gut mit der anhand der N-Aufnahme abgeleiteten N-Mineralisation übereinstimmen, wenn beachtet wird, dass dort nur die N-Aufnahme in der geernteten Biomasse erfasst wurde.

5.2.2.5.2 Mineralischer Stickstoff im Boden unter den Folgekulturen

Neben den unbewachsenen Parzellen wurden im Sidaumbruchversuch von 2019 zu Vegetationsbeginn bzw. vor der Saat und zur Ernte auch die Triticale- und Maisparzellen auf ihren Gehalt mineralischen Stickstoffs untersucht (Abbildung 143, Abbildung 144). Gleiches gilt für die Maisparzellen des im Frühjahr 2021 angelegten Umbruchversuchs. Um die Voraussetzungen für eine varianzanalytische Auswertung zu erfüllen, war im Versuch von 2019 bei der Probenahme zu Vegetationsbeginn in Triticale sowie zur Ernte von Triticale und Mais eine logarithmische Transformation der Werte erforderlich. Auch der Umbruchversuch von 2021 erforderte für die Auswertung der N_{\min} -Werte nach der Ernte eine logarithmische Datentransformation.

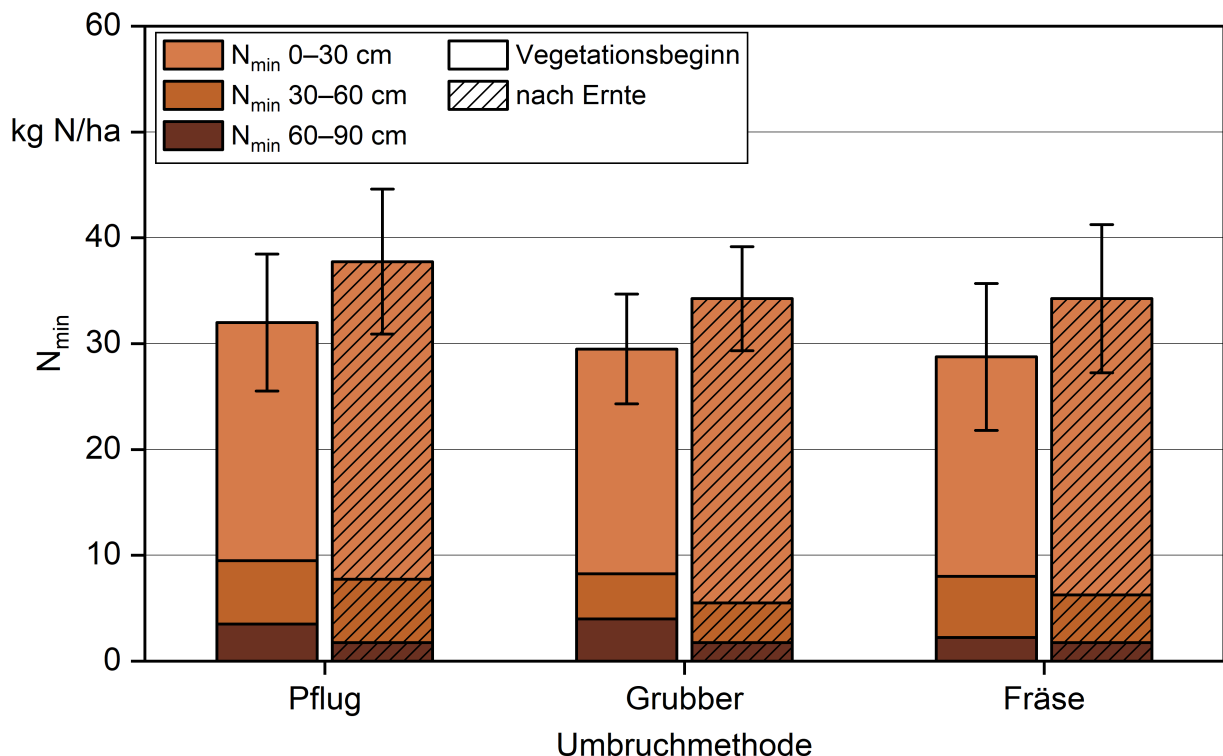


Abbildung 143: Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}) nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesäeter Wintertriticale (mit N-Düngung) zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Die N_{\min} -Mengen zu Vegetationsbeginn (Beprobung Mitte März) in den gedüngten Triticaleparzellen lagen im Mittel bei 30 kg N/ha (Abbildung 143). Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchverfahren waren nicht vorhanden, die Pflugvariante wies jedoch wie bei den meisten anderen N_{\min} -Untersuchungen der Umbruchversuche tendenziell höhere N_{\min} -Vorräte auf. Das Niveau lag insgesamt etwas unterhalb dem der zum gleichen Termin beprobten unbewachsenen Parzellen. Die im Boden nach der Ernte verbliebene N_{\min} -Menge lag mit ca. 35 kg N/ha auf ähnlichem Niveau, so dass von einer vollständigen Verwertung der N-Nachlieferung und N-Düngung ausgegangen werden kann. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchverfahren waren nicht vorhanden. Auch in den ungedüngten Triticaleparzellen waren mit 33 kg N/ha ähnlich niedrige N_{\min} -Reste nach der Ernte vorzufinden (Abbildung 141), wobei nach dem Umbruch mit dem Pflug in beiden Fällen tendenziell höhere N_{\min} -Mengen gegeben waren. Zusammen mit der N-Abfuhr der gedüngten Triticaleparzellen würde sich daraus ein N-Angebot aus N-Nachlieferung von Düngung bis zur Triticaleernte von ca. 130 kg N/ha ergeben. Verluste und sonstige Einträge sind nicht berücksichtigt. Bei einer mineralischen N-Düngung von 155 kg N/ha würde dies ähnlich wie im Silphieumbruchversuch bis zur Triticaleernte eher auf eine N-Immobilisation als eine Netto-Mineralisation hindeuten, wie auch das niedrige Niveau der N_{\min} -Mengen nach der Ernte trotz positiver N-Bilanz zeigt.

Die Menge mineralischen Stickstoffs im Boden lag nach dem Sidaumbruch im Herbst 2019 im April des Folgejahrs vor der Maissaat mit durchschnittlich 22 kg N/ha unter dem in den unbewachsenen Parzellen zu Vegetationsbeginn festgestellten Niveau (Abbildung 144). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten lagen nicht vor. Im Anschluss an die Ernte war mit durchschnittlich 34 kg N/ha ein ähnlich niedriges Niveau wie bei Triticale vorhanden. Der Mais konnte somit ebenfalls den über N-Düngung und Mineralisation bereitgestellten Stickstoff nahezu vollständig verwerten. Dies verdeutlichen auch die N_{\min} -Mengen in den ungedüngten Maisparzellen, die nach der Ernte mit durchschnittlich 27 kg N/ha nur geringfügig niedriger waren. In den Maisparzellen mit N-Düngung variierten die N_{\min} -Werte nach der Ernte in der Fräsvariante stark zwischen den einzelnen Wiederholungen. Dennoch konnte ein signifikanter Einfluss der Umbruchmethode festgestellt werden ($p = 0,0244$), wobei der Umbruch mit der Fräse im Vergleich zum Grubber zu signifikant höheren N_{\min} -Mengen im Boden führte. Aus der Differenz der N_{\min} -Mengen im Boden, der N-Abfuhr und der N-Düngung würde sich eine N-Nachlieferung von ca. 30 kg N/ha von der Maissaat bis zur Ernte ableiten. Wie bei Durchwachsener Silphie lag die auf diese Weise abgeleitete N-Nachlieferung deutlich unterhalb der auf der N-Aufnahme der ungedüngten Parzellen bzw. N_{\min} -Mengen in den unbewachsenen Parzellen basierten Schätzung.

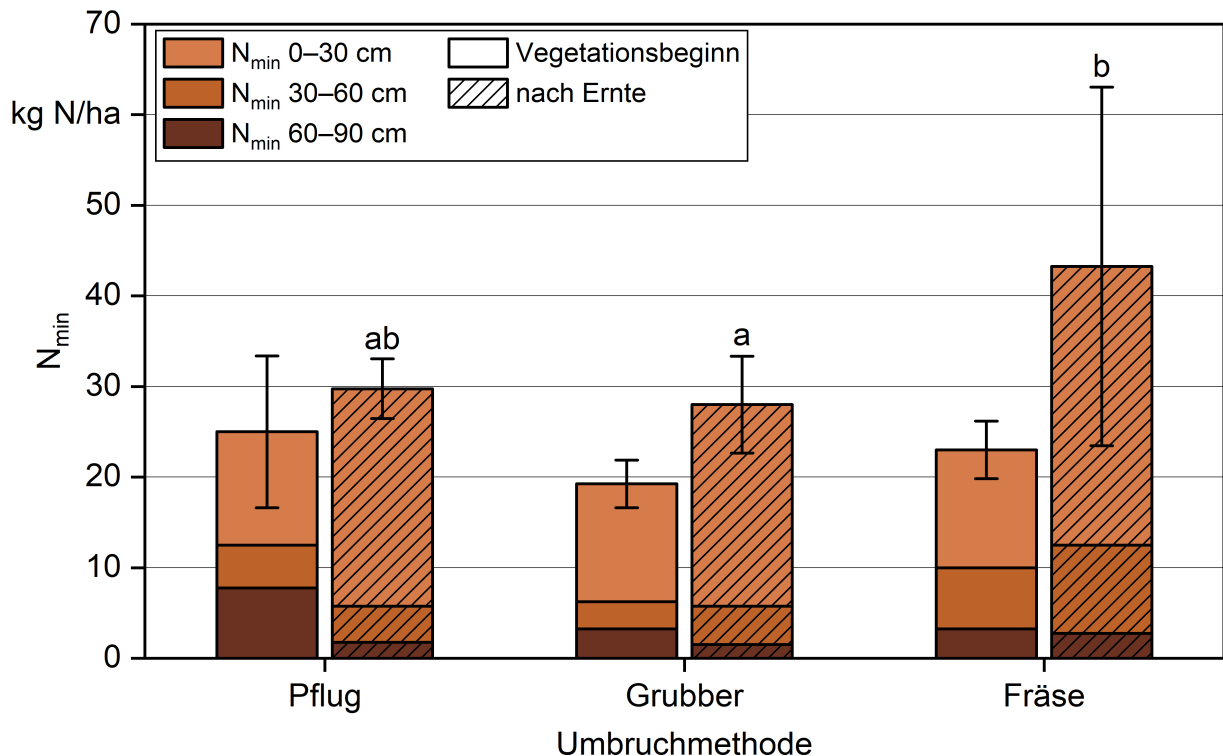


Abbildung 144: Mineralischer Stickstoff im Boden (N_{\min}) nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesättem Silomais (mit N-Düngung) zu Vegetationsbeginn und nach der Ernte; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Mittelwertdifferenzen nach Tukey, Fehlerbalken repräsentieren Standardabweichungen jeweils für die gesamte Beprobungstiefe

Der im Frühjahr 2021 umgebrochene Sidaversuch wies im Frühjahr vor dem Umbruch mit 20 kg N/ha wie zu erwarten nur eine sehr geringe N_{\min} -Menge im Boden auf (Abbildung 139). Im Vergleich dazu war die N_{\min} -Menge im Frühjahr nach einem Sidaumbruch bereits im Herbst mit 30 kg N/ha bei Triticale bzw. 22 kg N/ha vor der Maissaat nur minimal höher. Nach der Maisernte war mit durchschnittlich 28 kg N/ha wie beim Sidaumbruchversuch mit Umbruch im Herbst eine sehr niedrige N_{\min} -Menge im Boden vorhanden. Signifikante Unterschiede zwischen den Umbruchmethoden waren nicht zu erkennen. Trotz der durch den Krähenfraß stark lückigen Maisbestände war in den gefrästen Parzellen bei identischer N-Düngung der N_{\min} -Rest nach der Ernte auf gleichem Niveau wie in den gepflügten Parzellen, in denen ein signifikant höheres Ertragsniveau zu verzeichnen war. Bei einer N-Düngung von 203 kg N/ha würde sich in den gepflügten Parzellen eine N-Nachlieferung von 106 und bei einem Umbruch mit der Fräse von 6 kg N/ha ergeben. Wegen der nicht repräsentativen Bestandsdichte in den gefrästen Parzellen ist dieser Wert jedoch nicht aussagekräftig. Die N-Mineralisation in den gepflügten Parzellen stimmt dennoch relativ gut mit der anhand der laufenden N_{\min} -Untersuchungen im ersten Sidaumbruchversuch abgeleiteten Nachlieferung überein. Der im Jahr 2021 umgebrochene Sidabestand war jedoch mit einer Standdauer von zehn Jahren deutlich älter.

5.2.2.5.3 Schlussfolgerung Stickstoffnachlieferung

Insgesamt zeigte sich bisher, dass nach dem Umbruch von Sida eine ähnlich hohe N-Nachlieferung wie beim Umbruch des gleichaltrigen Silphiebestands vorlag. Der im Frühjahr 2021 umgebrochene, mit zehn Jahren Nutzungsdauer deutlich ältere Sidabestand wies ebenfalls eine N-Nachlieferung auf ähnlichem Niveau auf. Diese konnte aber nur anhand der N-Aufnahme bei zusätzlicher N-Düngung bestimmt werden. Über diese Abschätzung wurde bei den anderen Umbruchversuchen immer eine niedrigere N-Nachlieferung als über die ungedüngten Parzellen abgeleitet, so dass die N-Nachlieferung wegen des älteren Bestands wie zu erwarten durchaus auch höher gelegen haben könnte. Des Weiteren ist unklar, welchen Einfluss der Umbruchtermin im Frühjahr hatte. Bei einem Umbruch im Herbst zeigte die Umbruchmethode keinen Einfluss auf die Höhe der N-Nachlieferung und das Pflanzenwachstum im Folgejahr. In dem im Frühjahr umgebrochenen Versuch war wegen der einseitigen Fraßschäden in den gefrästen Parzellen hierzu keine Aussage möglich. Entsprechend den Beobachtungen des Silphieumbruchversuchs zeigte sich auch nach dem Umbruch von Sida zunächst eher eine verhaltene N-Mineralisation. Deshalb ist durch den Abbau der Ernte- und Wurzelrückstände von Sida ebenfalls zunächst eine N-Immobilisation zu erwarten. Die Standdauer des ersten Sidaversuchs betrug erst fünf Jahre, so dass dort vermutlich, wie im Silphieumbruchversuch, noch keine bedeutende Humusanreicherung im Boden vorhanden war [50]. Die N-Nachlieferung nach dem Umbruch von Sida war somit sehr ähnlich wie nach Durchwachsener Silphie und es gelten die bereits aufgeführten Schlussfolgerungen sowie die daraus resultierenden Konsequenzen für eine bestmögliche Ausnutzung der N-Freisetzung (siehe 5.2.1.5.3).

5.2.2.6 Zusammenfassende Diskussion

Im Gegensatz zum Umbruch von Durchwachsener Silphie waren hinsichtlich des Durchwuchsbesatzes nach dem Umbruch von Sida im Herbst keine deutlichen Unterschiede zwischen den getesteten Umbruchverfahren festzustellen. In der nachfolgend gesäten Triticale zeigte jedoch auch der Umbruch mit der Fräse tendenziell den niedrigsten Durchwuchsbesatz. Der Durchwuchsbesatz lag zur Ernte sowohl von Triticale als auch von Mais in allen Varianten zwischen 5 und 10 Trieben/m² und somit auf einem ähnlichen Niveau wie bei Durchwachsener Silphie. Auch bei einem Umbruch im Frühjahr war im nachfolgenden Mais ein ähnlicher Durchwuchsbesatz gegeben. In diesem Versuch führte allerdings ein Umbruch mit der Fräse im Gegensatz zum Umbruch im Herbst zu signifikant weniger Sidatrieben in nachfolgend gesättem Mais. Eine Erklärung für diese Unterschiede könnte sein, dass beim ersten Umbruchversuch im Herbst 2019 mit der Fräse keine ausreichende Arbeitstiefe erreicht wurde. Eine ausreichende Arbeitstiefe der Fräse von ca. 10 cm ist entsprechend dem Umbruch von Durchwachsener Silphie erforderlich, um die knospenbildenden Strukturen zu erfassen und vollständig zu zerkleinern. Wird dies erreicht, so ist beim Umbruch mit einer Fräse ebenfalls eine deutliche Durchwuchsreduktion zu erwarten, wie der Umbruch im Frühjahr zeigt. Ein entscheidender Einfluss des Umbruchzeitpunkts auf den Durchwuchsbesatz in der nachfolgenden Kultur ist dabei eher unwahrscheinlich.

Anders als bei Durchwachsener Silphie wirkte sich der Umbruch von Sida mit einer Fräse nicht negativ auf das Wachstum der darauffolgend gesäten Wintertriticale aus. Die Pflugvariante zeigte jedoch vermutlich aufgrund einer etwas höheren N-Mobilisierung ebenfalls ein besseres Wachstum und tendenziell höhere Erträge. Die Zerkleinerung der Wurzelteile mit der Fräse führte, wie bereits bei Durchwachsener Silphie vermutet, wahrscheinlich zu einer erhöhten N-Immobilisation im Frühjahr. Kräftiger Durchwuchs war bei Triticale in allen Varianten zu beobachten, so dass im ersten Jahr nach dem Umbruch von Sida der Anbau eines Getreides mit Kornnutzung weniger geeignet scheint. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Triticaleparzellen aufgrund der trockenen Frühjahrswitterung eine relativ geringe Bestandsdichte aufwiesen. Eine unterdrückende Wirkung auf das Wachstums der Sidatriebe durch Beschattung war somit nur eingeschränkt gegeben. Bei einer Verwertung als GPS-Getreide für die Biogasvergärung ist hingegen ein gewisser Sidabesatz weniger problematisch. Auch bei Mais als Folgekultur waren sowohl beim Umbruch im Herbst als auch im Frühjahr kräftige Sidatriebe vorhanden, die den Raum zwischen Maisreihen beanspruchten. Die Sidapflanzen erreichten bis zur Ernte des Mais nicht ganz dessen Wuchshöhe. Eine nachhaltige Unterdrückung durch Beschattung war im Vergleich zum deutlich niedrigeren Getreide auch nicht möglich. Wie bereits angesprochen hatte hier eventuell der zusätzliche Lichteinfall aufgrund der geringen Parzellengröße einen Einfluss. Der geringste Sidabesatz war trotz der lückigen Maisbestände nach dem etwas tieferen Umbruch mit der Fräse gegeben. Auch im Jahr 2020 wurde die Maisentwicklung durch einen ungleichmäßigen Feldaufgang und Wildverbiss stellenweisen verzögert. Ein gleichmäßiges Wachstum war nur in einzelnen Parzellen gegeben. Dort war die unterdrückende Wirkung auf die Sidatriebe deutlich besser als in den restlichen Parzellen, in denen die Beschattung durch die Maispflanzen erst später eintrat. Dennoch reichte in den gut entwickelten Maisparzellen die Lichtkonkurrenz nicht aus, um die Sidatriebe vollständig zu unterdrücken. Wird nach Sida gesäter Mais als Silomais über eine Biogasanlage verwertet, stellen die Durchwuchstriebe kein Problem dar, da dennoch ein hohes Ertragsniveau erzielt wurde. Der Sida-Anteil am Gesamtertrag war trotz der Wuchshöhe des Sidadurchwuchses eher als gering einzustufen.

Auch nach dem Umbruch eines ehemaligen Dauerkulturversuchs des TFZ mit einer krumentief arbeitenden Fräse im Frühjahr 2020 war in der nachfolgend gesäten Mais-Sorghum-Mischung nur ein schwach entwickelter Sidadurchwuchs vorhanden. Tieferes Fräsen scheint somit für die Beseitigung von Sida besser geeignet als sehr flaches Fräsen oder tief arbeitende Geräte ohne Zerkleinerungswirkung wie Pflug und Grubber. Ein krumentiefes Fräsen ist dennoch wegen zahlreicher Nachteile und sehr hoher Kosten nicht zu empfehlen und wahrscheinlich auch nicht erforderlich.

Problematisch für die Bekämpfung von Sidadurchwuchs mit Herbiziden war, dass die Sidatriebe im Frühjahr relativ spät und laufend bis zur Ernte erschienen. Dies war im Gegensatz zu Durchwachsener Silphie unabhängig von der Umbruchmethode und somit auch nach dem Umbruch mit der Fräse zu beobachten. Demzufolge war eine Erfassung der bekämpfungsrelevanten Triebe zum Termin einer normalen Frühjahrsherbizidanwendung in Getreide sowie bei Mais unmöglich. In der Folgekultur ist deshalb auf jeden Fall eine zusätzliche Behandlung mit einem Wuchsstoffherbizid, beispielsweise im Rahmen

einer Distelbekämpfung, erforderlich. Die im Rahmen der normalen Frühjahrsbehandlung eingesetzten Sulfonylharnstoffe zeigten gegenüber Sida nur eine verhaltene Wirkung. Wuchsstoffherbizide in Getreide wurden im vorliegenden Projekt zur Sidabekämpfung zwar nicht getestet, aber das im Jahr 2021 in Mais eingesetzte Herbizid „Arrat“ mit der Wuchsstoffkomponente Dicamba hatte gegenüber Sidadurchwuchs eine bessere Wirkung als die Mischung aus Triketon-Herbizid und Fotosynthesehemmer im Vorjahr. Nach dem Umbruch von Sida sollte deshalb ähnlich wie bei Durchwachsener Silphie eine zweimalige Behandlung mit einem Wuchsstoffherbizid eingeplant werden. Ob sich hierbei der Wirkstoff Clopyralid, der eine gute Wirkung gegen Korbblütler aufweist, ebenfalls gut eignet, wurde im Versuch nicht überprüft.

Wie im vorherigen Kapitel herausgearbeitet, wurden nach dem Umbruch von Sida im Versuchsjahr 2019 kein Anstieg der N_{\min} -Mengen im Boden zwischen Umbruch und Vegetationsende und somit keine N-Nettomineralisation beobachtet. Eine Verschiebung des Umbruchtermins, andere Folgekulturen oder sonstige Maßnahmen erscheinen in dieser Hinsicht nach aktuellem Stand der Untersuchungen zumindest bei jüngeren Beständen nicht erforderlich. Die laufenden N_{\min} -Untersuchungen im Jahr 2020 lassen außerdem darauf schließen, dass nach dem Umbruch von Sida mit keiner erhöhten N-Nachlieferung im ersten Folgejahr zu rechnen ist. Die N-Mineralisation lag dabei in etwa auf dem Niveau des Silphieumbruchs. Beide Dauerkulturen wiesen allerdings nur eine Standdauer von fünf Jahren auf. Bei einem Alter der Bestände von über 15 Jahren ist ein stärkerer Anstieg der Humusgehalte zu erwarten [47], der zu einer deutlich erhöhten N-Mineralisation nach dem Umbruch führen könnte. Die niedrigen N_{\min} -Mengen im Boden nach der Ernte der Triticale und des Mais zeigen, dass der vorgenommene Abschlag vom N-Düngebedarf von 10 kg N/ha bei Getreide und 20 kg N/ha bei Mais ausreichend war. Dies gilt auch für den Umbruch des älteren Bestands im Frühjahr.

Beide im Rahmen dieses Projekts umgebrochenen Sidabestände waren wegen der Ernte für eine Biogasnutzung im grünen Zustand teilweise stark verunkrautet und die Wachstumsleistung der Sidapflanzen war geringer als bei einer Nutzung als Festbrennstoff im Frühjahr. Dennoch verfügte die Sida über eine beachtliche Triebkraft und erwies sich gegenüber Herbiziden widerstandsfähiger als Durchwachsene Silphie. Nach aktuellem Stand scheint es so, dass die nachhaltigste Schädigung ebenfalls durch mindestens 8 cm tiefes Fräsen erreicht wird. Diese Arbeitstiefe sollte bei Sida mindestens eingehalten werden, da ansonsten die Knospen bildenden Bereiche und Wurzeln nicht ausreichend geschädigt und zerkleinert werden. Als Folgekultur weist Mais mehrere Vorteile auf. Mais ist wegen seiner Wuchshöhe eher in der Lage, den hochwachsenden Sidadurchwuchs durch Beschattung zu unterdrücken, auch wenn diesbezüglich keine eindeutigen Effekte beobachtet werden konnten. Darüber hinaus beginnt Sida im Frühjahr erst relativ spät mit dem Austrieb und bildet dann aber kontinuierlich mehrere Triebe aus, so dass Mais wegen seiner späteren Saat ein günstigeres Zeitfenster für notwendige Herbizidmaßnahmen bietet.

6 Wissenstransfer

6.1 Wissenstransfer im Projektzeitraum

Die Beratungsarbeit per Telefon und E-Mail sowie die Demonstration der Ergebnisse war ein wichtiger Bestandteil des Projekts. Es wurden regelmäßig im Frühjahr vor Beginn der Düngesaison Informationen zur Düngung von Durchwachsener Silphie über das „Erzeugerringfax“ des Landeskuratoriums für pflanzliche Erzeugung in Bayern e. V. veröffentlicht und somit direkt den Landwirten zur Verfügung gestellt. Hierbei wurde auch über die aktuellen Regelungen zu Durchwachsener Silphie bezüglich der Düngeverordnung informiert. Auf dem TFZ-Feldtag am 28. August 2019 wurde das nachfolgend beschriebene Bodenprofil zusammen mit dem darin sichtbaren Wurzelsystem von Durchwachsener Silphie interessierten Besuchern und Landwirten vorgestellt (Abbildung 145, Abbildung 146). Zusätzlich wurden die Erkenntnisse daraus in einem Video aufbereitet, das auf der TFZ-Homepage veröffentlicht wurde. Aufgrund der Einschränkungen durch die Coronapandemie konnte im Jahr 2020 kein Feldtag mit einer anschaulichen Präsentation der bisherigen Forschungsergebnisse für die Öffentlichkeit durchgeführt werden.



Abbildung 145: Besuchergruppe bei der Feldführung am TFZ-Feldtag, 28. August 2019 in Straubing, vor einer Versuchsfläche mit Durchwachsener Silphie



Abbildung 146: Erläuterungen zum Bodenprofil und zum Wurzelsystem der Durchwachsenen Silphie am TFZ-Feldtag, 28. August 2019 in Straubing, durch Wissenschaftler Sebastian Parzefall

Im Jahr 2021 wurden die Feldversuche des Projekts im Rahmen der Aktion „Tage der offenen Versuche“ wieder der Öffentlichkeit präsentiert. Hierzu wurden im Vorfeld kurze Infovideos zu den Versuchen zur Düngung und zum Umbruch von Durchwachsener Silphie erstellt und vorab veröffentlicht. Im Zeitraum vom 24. August bis 5. September konnten Besucher die Versuchsanlagen zur Düngung und zum Umbruch von Durchwachsener Silphie selbst erkunden. Eine Beschilderung informierte kurz über Zielsetzung und Aufbau der Versuche. Zusätzlich wurden vom 24. bis 26. August gesonderte Führungen in Kleingruppen angeboten, die vom zuständigen Wissenschaftler durchgeführt wurden. Die bisherigen Ergebnisse der Versuche wurden den Teilnehmern anschaulich erläutert und anschließend darüber diskutiert sowie Fragen beantwortet. Darüber hinaus wurde im Jahr 2021 im Rahmen dieses Forschungsprojekts die Bachelorarbeit „Drohnenbasierte Messung der Pflanzenhöhe am Beispiel von Durchwachsener Silphie“ durch eine Studierende des TUM Campus Straubing erstellt.



Abbildung 147: Vorstellung der Versuche durch zuständigen Wissenschaftler und Diskussion mit Teilnehmerinnen der Expertenführung im Rahmen der offenen Feldversuche am TFZ am 26. August 2021

6.2 Wurzelbild von Durchwachsener Silphie im Bodenprofil

Vor der Ernte der für den späteren Umbruch verwendeten Versuchsanlage mit Durchwachsener Silphie wurde angrenzend an den Silphiebestand ein Bodenprofil ausgegraben (Abbildung 148). Die Horizontabfolge des Bodens wurde anhand charakteristischer Merkmale als Ap/Al/Bt/C bestimmt. Der tonverarmte Al-Horizont reichte bis auf eine Tiefe von etwa 60 cm herab. Im Anschluss daran war eine deutliche Tonanreicherung zu erkennen (Bt-Horizont), wobei Aggregatoberflächen mit einem dunkelbraunen Tonhäutchen überzogen waren. Die Zone der Tonanreicherung umfasste ungefähr den Bereich von 60 bis 100 cm Tiefe. Im Anschluss daran war Löss als Ausgangsmaterial der Bodenbildung vorzufinden (C-Horizont). Teilweise streckte sich der Tonüberzug an den Aggregatoberflächen in Rissen bis in den C-Horizont fort. Ein Test mit 10%iger Salzsäure ergab zudem, dass das Ausgangsmaterial der Bodenbildung noch reich an freiem Kalk und folglich eher wenig verwittert war. Die Entkalkung im Profil war dabei in etwa bis zur Hälfte des Bt-Horizonts fortgeschritten. Im C-Horizont wurden unter anderem auch häufig rundliche Kalkkonkretionen („Lösskindel“) gefunden. Der Boden der Versuchsfläche des Umbruchversuchs am Versuchsstandort Straubing ist somit aufgrund der charakteristischen Horizontabfolge als Parabraunerde aus Löss zu bezeichnen.



Abbildung 148: Bodenprofil angrenzend an eine Silphiefläche mit freigelegtem Wurzelsystem und teilweise bis über 200 cm tief reichenden Wurzeln (insbesondere im oberen Profilbereich bereits relativ stark ausgetrocknet)

Nach dem Freilegen des Wurzelsystems war im oberen Profilbereich die für die Durchwachsene Silphie charakteristische Büschelwurzel sichtbar [27]. Hierbei handelt es sich um ein allorhizes Wurzelsystem, das dadurch charakterisiert ist, dass die Seitenwurzeln in etwa die Länge und Dicke der Hauptwurzel erreichen. Die jährlich neu angelegten Triebe bilden außerdem Beiwurzeln (sprossbürtige Wurzeln) aus, die radial oder nach unten wachsen [132], wie auch im Profil zu erkennen war. Mit zunehmendem Alter der Pflanzen entfernen sich die aktiven Knospen und Triebe dabei immer weiter vom ursprünglichen Zentrum der Pflanze und der Hauptwurzel, bis diese abstirbt [132]. Die im Bodenprofil sichtbaren Silphiewurzeln erreichten eine Tiefe von über 2,5 m (Abbildung 149), so dass die in anderen Untersuchungen festgestellte maximale Durchwurzelungstiefe von 2,4 m überschritten wurde [119]. Die maximale Tiefe der Durchwurzelung wurde allerdings nicht weiter ermittelt.



Abbildung 149: Detailaufnahme einer bis auf über 2,5 m Tiefe reichenden Silphiewurzel im Bereich von 60 bis 80 cm Bodentiefe

Darüber hinaus bestätigte sich, dass sich der Großteil der Wurzelbiomasse in den oberen 30 cm befindet [119]. Zudem waren die Wurzeln relativ dick bei einem gleichzeitig geringen Feinwurzelanteil, was laut der Untersuchung von SCHOO et al. (2017) [119] zu einer im Vergleich zu Silomais deutlich niedrigeren spezifischen Wurzellänge führt. Im vorliegenden Projekt waren allerdings keine Maiswurzeln für einen direkten Vergleich verfügbar. In Bezug auf die Tiefgründigkeit wird das Wurzelsystem von Durchwachsener Silphie mit durchschnittlich 1,7 m als tiefer reichend als das von Silomais mit 1,3 m angesehen [119].

Aufgrund der geringen Wurzellängendichte insbesondere in tieferen Bodenbereichen ist das Wasseraneignungsvermögen aus dem Unterboden jedoch eingeschränkt. Demzufolge wird angenommen, dass trotz der tiefreichenden Wurzeln der effektive Wurzelraum gegenüber Mais nur geringfügig erweitert ist [27]. Da zusätzlich die Wassernutzungseffizienz von Durchwachsener Silphie nicht auf dem Niveau von C4-Pflanzen wie Silomais liegt [120], ist von keiner ausgeprägten Trockentoleranz auszugehen. Für wirtschaftliche Erträge von Durchwachsener Silphie auf dem Niveau von Silomais sind folglich ausreichende Niederschläge die Voraussetzung [70] [117].

7 Schlussfolgerungen für die Praxis

7.1 Stickstoffdüngung von Durchwachsener Silphie

Grundsätzlich gilt, dass Durchwachsene Silphie zur Schließung von Stoffkreisläufen mit Gärresten gedüngt werden sollte, wobei die Gärrestzufuhr den der Biomasse- und Nährstoffabfuhr der Durchwachsenen Silphie entsprechenden Gärrestanfall nicht überschreiten sollte. Eine Deckung des gesamten N-Bedarfs von Durchwachsener Silphie ausschließlich mit Gärresten erscheint unter diesen Vorgaben allerdings anhand der bisherigen Versuchsergebnisse kaum möglich und zudem wenig sinnvoll. Eine Gärrestzufuhr von 170 kg N_{ges}/ha sollte auch auf Einzelschlägen nicht überschritten werden. Sind im Betrieb ausreichend Flächen für eine Gärrestausbringung vorhanden, sollte auch bei Durchwachsener Silphie die über Gärreste zugeführte Menge auf 120 kg N_{ges}/ha bzw. 60 bis 70 % des gesamten N-Düngebedarfs beschränkt werden. Dadurch wird eine optimale Verwertung des Stickstoffs aus organischer Düngung ermöglicht. Der verbleibende N-Düngebedarf ist über Mineraldünger abzudecken, die je nach Befahrbarkeit zeitlich deutlich früher als Gärreste eingesetzt werden können. Von sehr späten Mineraldüngergaben ab Beginn des Schossens ist wegen der erhöhten Verätzungsgefahr abzusehen. Die Aufteilung einer mineralischen N-Düngung oder Gärrestdüngung ist nicht erforderlich. Bei einer Gärrestdüngung führt eine zusätzliche Überfahrt nur zu zusätzlichen Pflanzenschäden, so dass eine Gärrestdüngung in einer Gabe zu Vegetationsbeginn ausgebracht werden sollte.

Im Hinblick auf die Düngebedarfsermittlung von Durchwachsener Silphie scheint der aktuelle N-Bedarfswert von 1,0 kg N/ha je dt TM/ha Ertragserwartung angemessen (Düngebedarfsermittlung wie mehrjähriger Feldfutterbau ohne N_{min}), um auch unter weniger günstigen Bedingungen ein angemessenes Ertragsniveau erreichen zu können. Insbesondere auf günstigen Standorten und bei hoher N-Nachlieferung sind jedoch Abschläge von bis zu 25 % von der nach Düngeverordnung maximal möglichen N-Düngung sinnvoll. Der eingesparte Stickstoff kann unter Berücksichtigung der gesamtbetrieblichen Bilanz auf andere Kulturen umverteilt werden. Eine extreme Reduzierung der N-Düngung ist dagegen nicht zu empfehlen, da die N-Produktionsfunktion von Durchwachsener Silphie nach bisherigen Einschätzungen nicht ganz so flach wie die von Mais verläuft. Die Durchwachsene Silphie verfügt deshalb auch über eine schlechtere N-Nutzungseffizienz als Mais. Es muss dennoch bedacht werden, dass mit zunehmendem N-Angebot die Lagergefahr zunimmt. Sehr hohe Düngergaben entsprechen deshalb bei Durchwachsener Silphie normalerweise nicht mehr der guten fachlichen Praxis. In lagernden Beständen kann die Ernte erheblich erschwert sein, vor allem wenn am Häcksler kein Direktschneidwerk mit Seitenmessern zur Verfügung steht.

Um eine bestmögliche N-Wirkung von Gärresten zu erreichen, sollten Maßnahmen zur Reduzierung von Ammoniakverlusten konsequent umgesetzt werden. Hierzu zählt die streifenförmige und bodennahe Ausbringung mit Schleppschlauch- oder Schleppschuhverteiltern. Trotz Einsatzes dieser Technik sollte eine Gärrestdüngung zu Durchwachsener Silphie wenn möglich nur bei günstiger Witterung erfolgen. Wegen der ausbleibenden Bodenbearbeitung werden Verdichtungen der Oberfläche nicht gelockert,

wodurch die Infiltration der Gärreste reduziert sein kann. Unter diesen Bedingungen kann es im Frühjahr sinnvoll sein, den Boden im Rahmen einer mechanischen Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen flach zu lockern bzw. die Gärreste über diese Maßnahme einzuarbeiten. Stehen Schlitzscheibenverteiler für ein direktes Einbringen der Dünger in den Boden zur Verfügung, lohnt sich sicherlich ein erster probeweiser Einsatz in Durchwachsener Silphie, um zu überprüfen, ob mit Pflanzenschäden zu rechnen ist.

Bei Durchwachsener Silphie ist außerdem eine Gärrestdüngung im Herbst von bis zu 60 kg N_{ges}/ha bzw. 30 kg NH₄-N/ha erlaubt. Bei einer Gärrestdüngung im Herbst ist gegenüber einer Frühjahrsdüngung mit einer etwa halb so hohen N-Düngewirkung zu rechnen. Die Herbstdüngung muss vollständig auf den Düngebedarf im Folgejahr (gleiches Düngejahr) angerechnet werden. Bei einer Gärrestdüngung im Herbst und einer insgesamt knappen N-Versorgung kann folglich nicht das Ertragsniveau einer reinen Frühjahrsdüngung erreicht werden. Unter Inkaufnahme einer etwas schlechteren N-Verwertung kann zur Entlastung des Gärrestlagers eine Teilgabe aber bereits im Herbst ausgebracht werden. Ein zusätzlicher Vorteil wäre eventuell, dass auf Standorten mit schlechter Befahrbarkeit im Frühjahr die Dringlichkeit einer frühzeitigen Startdüngung entschärft wird. Derzeit kann noch nicht abgeschätzt werden, welchen Einfluss der Düngezeitpunkt im Herbst auf die Verwertung hat. Eine möglichst frühe Ausbringung deutlich vor der gesetzlichen Frist und zeitnah nach der Ernte ist anzuraten, um aktives Pflanzenwachstum und eine gute Befahrbarkeit auszunutzen. Primär sollte dennoch auch eine günstige Witterung zur Vermeidung von Ammoniakverlusten abgewartet werden. Von einer Herbstdüngung mit Mineraldünger ist dagegen abzuraten, da kein Ertragsvorteil zu erwarten ist.

7.2 Umbruch von Durchwachsener Silphie

Die bisherigen Versuchsergebnisse zeigen, dass der Umbruch von Durchwachsener Silphie mit einer Fräse zum geringsten Durchwuchs in den Folgekulturen führt. Darüber hinaus verbleiben im Gegensatz zum Umbruch mit dem Grubber keine größeren Wurzelteile an der Bodenoberfläche, die die nachfolgende Aussaat behindern könnten. Der Umbruch von Durchwachsener Silphie sollte deshalb nach Möglichkeit mit einer Fräse durchgeführt werden. Die Arbeitstiefe der Fräse muss dabei nicht bis auf Krumentiefe reichen, da sich Knospen nur bis zu einer Bodentiefe von maximal 10 cm an den älteren Triebansätzen befinden. Wichtig ist eine geringe Fahrgeschwindigkeit für eine ausreichende Zerkleinerung der Wurzelstöcke, um die Knospen zu schädigen und durch eine Reduktion der zum Wiederaustrieb zur Verfügung stehenden Reservestoffe die Triebkraft zu verringern. Die Konkurrenzkraft des Durchwuchses und auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber den Herbiziden waren deshalb nach dem Umbruch mit der Fräse am geringsten. Eine tiefere Lockerung ist normalerweise nicht erforderlich. Ist zur Beseitigung von Verdichtungen dennoch eine tiefere Bearbeitung geplant, so sollte für eine optimale Zerkleinerung der Wurzelstöcke zuerst gefräst werden. Pflügen im Anschluss an die Bearbeitung mit der Fräse ist allerdings nicht zu empfehlen, da durch das Unterpflügen die Silphietriebe die Bodenoberfläche unterschiedlich schnell erreichen und nicht optimal im Rahmen von Herbizidmaßnahmen erfasst werden können. Ein Umbruch mit dem Pflug ohne sonstige Be-

arbeitung der Wurzelstöcke ist somit besonders unvorteilhaft, da Wurzeln und Knospenansätze intakt vergraben werden. Dadurch liegen kräftigere Triebe vor, die zudem zeitlich verzögert hervortreten. Des Weiteren sind die Knospenansätze der Witterung und weiteren Bodenbearbeitungsschritten weniger ausgesetzt, was im Versuch zum höchsten Durchwuchsbesatz in den Folgejahren führte.

Nach aktuellem Stand ist Mais als Folgekultur nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie besser geeignet, da dieser wegen seiner Wuchshöhe eine gute Durchwuchsunterdrückung bietet. Darüber hinaus kann durch das hohe N-Aufnahmevermögen die N-Nachlieferung während der Vegetation gut verwertet werden. Prinzipiell wäre auch Wintergetreide geeignet und würde eine zeitnahe Ansaat nach der Silphieernte ermöglichen. Jedoch zeigte bei einem Umbruch mit der Fräse das nachfolgende Getreide ein deutlich schlechteres Wachstum, was zu einer geringeren Bestandsdichte und niedrigeren Erträge als nach dem Umbruch mit Pflug oder Grubber führte. Die genauen Ursachen hierfür wurden noch nicht geklärt. Dennoch bietet Getreide die Möglichkeit, dass durch eine frühere Ernte ein stärkerer Durchwuchsbesatz auch früher entfernt wird, bei extremem Besatz als GPS-Getreide. Im Anschluss können durch Stoppelbearbeitung oder eine Herbizidapplikation auf die Stoppel zeitnah weitere Bekämpfungsmaßnahmen durchgeführt werden. Außerdem könnte eine Zwischenfrucht zur Bodenbedeckung und N-Verwertung gesät werden. In Kombination mit einem Umbruch mit einer Fräse zeigte Mais keine Beeinträchtigung des Wachstums, so dass für eine effektive und einfache Reduktion des Durchwuchspotenzials Mais nach einem Umbruch mit der Fräse gewählt werden sollte.

Das grundlegende Problem beim Herbizideinsatz nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie ist, dass durch das zeitlich verzögerte Erscheinen der Triebe die optimale Terminierung einer Herbizidapplikation erschwert ist. Ein Teil der Triebe war zum optimalen Bekämpfungstermin der normalen Verunkrautung noch nicht erschienen. Dies gilt insbesondere nach einem Umbruch mit dem Pflug, so dass zusätzliche chemische oder mechanische Unkrautregulierungsmaßnahmen erforderlich werden können. Wird keine Fräse eingesetzt, müssen zumindest im ersten Jahr nach dem Umbruch je nach Verwertungsziel der Kultur mindestens zwei Behandlungen mit blattaktiven Herbiziden eingeplant werden. Beim Umbruch mit der Fräse und Mais als Folgekultur kann eine gut platzierte Anwendung ausreichend sein. Zu beachten ist, dass bei Mais für spätere Herbizidanwendungen eine spezielle Applikationstechnik wie z. B. *Dropleg*-Düsen für eine optimale Wirkung und Kulturverträglichkeit erforderlich sein können. Die beste Herbizidwirkung gegenüber Silphiedurchwuchs konnte im Versuch mit den Wuchsstoffherbiziden „Arrat“ in Mais und „Ariane C“ in Getreide erreicht werden. In diesen Herbiziden sind als Wuchsstoffkomponenten die Wirkstoffe Dicamba und Clopyralid enthalten, weshalb Herbizide mit diesen Wirkstoffen zur Silphiebekämpfung eingesetzt werden sollten. Mit den häufig verwendeten blattaktiven Herbizidtypen, wie Triketone in Mais (z. B. Callisto) und Sulfonylharnstoffe in Getreide, war im ersten Jahr nach dem Umbruch keine ausreichende Wirkung möglich. Zu beachten ist, dass keine Herbizide zur Bekämpfung von Silphiedurchwuchs zugelassen sind und die zum Einsatz der Herbizide erforderliche Indikation vorliegen muss. Alternativ muss eine Ausnahmegenehmigung beantragt werden.

Da während des Silphieanbaus mit einer Humusanreicherung zu rechnen ist, ist nach dem Umbruch von Beständen mit einer längeren Standdauer eine erhöhte N-Nachlieferung zu erwarten. Darüber hinaus liegt wegen der intensiven Durchwurzelung und des gesteigerten Regenwurmbesatzes eine optimale Bodenstruktur vor, so dass vor allem bei Mais die standorttypische Düngung um mindestens 20 kg N/ha reduziert werden sollte. Die N-Nachlieferung setzt allerdings normalerweise erst später ein, weshalb eine N-Startdüngung bei Mais für rasche Jugendentwicklung sinnvoll ist. Bisher liegen nur Erfahrungen zu einem Umbruch nach der Ernte im Herbst vor. Vor dem Hintergrund einer potenziell hohen N-Nachlieferung bietet sich bei einer Sommerung als Folgekultur auch ein Umbruch erst im Frühjahr an, um Auswaschungsverluste über den Winter zu vermeiden. Dieser könnte erfolgen, sobald der Boden ausreichend abgetrocknet ist. Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von N-Verlusten bei einem Umbruch nach der Ernte wäre die zeitnahe Etablierung einer wuchsfreudigen Zwischenfrucht mit guter Unkrautunterdrückung.

Insgesamt zeigten die ersten Versuchsergebnisse, dass ein Umbruch von Durchwachsener Silphie unter Wahl geeigneter Bodenbearbeitungsmaßnahmen, Folgekulturen und deren Herbizidmanagement auch ohne den Einsatz von Totalherbiziden vor dem Umbruch erfolgreich durchgeführt werden kann. Die aus den Ergebnissen des Projekts abgeleiteten ersten Empfehlungen basieren allerdings nur auf einem Versuch und sind noch nicht endgültig abgesichert. Wenn eine Fräse als erste Bearbeitungsmaßnahme eingesetzt wird, sollte dennoch ein geringer Durchwuchsbesatz einfach zu erreichen sein. Zusätzliche Kosten entstehen für deren Einsatz und die zweimalige Ausbringung eines gegen Korbblütler wirksamen Wuchsstoffherbizids. Unter diesen Umständen ist insbesondere bei Mais als Folgekultur ein nahezu durchwuchsfreier Bestand möglich. Beim Umbruch langjähriger Silphiebestände können im Gegenzug wegen einer erhöhten N-Nachlieferung außerdem N-Dünger eingespart werden. Zusätzlich ist wegen der besseren Bodenstruktur mit höheren Erträgen zu rechnen, die die Umbruchkosten in etwa ausgleichen sollten [115].

7.3 Umbruch von Sida

Grundsätzlich gelten alle Aussagen zum Umbruch von Durchwachsener Silphie auch für den Umbruch von Sida. Im Vergleich zu Durchwachsener Silphie verfügt Sida jedoch über größere Wurzelstöcke mit deutlich dickeren Wurzeln sowie eine höhere Triebkraft. Außerdem erwies sie sich gegenüber Herbiziden widerstandsfähiger. Nach aktuellem Stand scheint es so, dass die nachhaltigste Schädigung ebenfalls durch ein mindestens 8 cm tiefes Fräsen erreicht wird. Diese Arbeitstiefe sollte bei Sida mindestens eingehalten werden, da ansonsten die Knospen bildenden Bereiche nicht ausreichend geschädigt werden. Noch mehr als bei Durchwachsener Silphie sollte nach dem Umbruch von Sida als Folgekultur Mais gewählt werden, da er wegen seiner Wuchshöhe eher in der Lage ist, den hochwachsenden Sidadurchwuchs durch Beschattung zu unterdrücken. Darüber hinaus treibt Sida im Frühjahr ohnehin erst relativ spät und kontinuierlich aus, so dass Mais wegen seiner späteren Saat ein günstigeres Zeitfenster für notwendige Herbizidmaßnahmen bietet. Das Mais-Herbizid „Arrat“ zeigte ebenfalls eine relativ gute Wirkung gegen Sidadurchwuchs. Der Umbruch mit der Fräse im Frühjahr vor der Saat sollte bevorzugt werden, da

keine Nachteile gegenüber einem Umbruch nach der Ernte im Herbst festgestellt werden konnten. Nicht zuletzt stellt ein gewisser Sidaurchwuchs in Mais kein Problem dar, wenn dieser als Silomais in einer Biogasanlage verwertet wird. Bei einem Einsatz in der Tierfütterung kann ein zu großer Besatz allerdings wie bei Silphie den Futterwert reduzieren.

Neben der Bekämpfung des Dauerkulturdurchwuchses erwiesen sich insbesondere bei den beiden Sidaumbruchversuchen die starke Verunkrautung der Dauerkultur und demzufolge das starke Unkrautauftreten nach dem Umbruch als problematisch. Nimmt bei Dauerkulturen gegen Ende der Nutzungsdauer die Wuchsleistung ab und die Verunkrautung zu, sollten diese Bestände möglichst zeitnah umgebrochen werden. Ansonsten kann die erneute Verringerung des Unkrautdrucks auf der Fläche mit größerem Aufwand als der eigentliche Umbruch der Dauerkultur und deren Durchwuchsbeseitigung verbunden sein.

Quellenverzeichnis

- [1] ABUBAKER, J. (2012): Effects of Fertilisation with Biogas Residues on Crop Yield, Soil Microbiology and Greenhouse Gas Emissions. Recycling of Plant Nutrients from Bioenergy Production. Doctoral Thesis. Acta Universitatis agriculturae Sueciae, Nr. 46. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 79 Seiten, ISBN 978-91-576-7682-5
- [2] ALBURQUERQUE, J. A.; FUENTE, C. D. L.; BERNAL, M. P. (2012): Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 160, Oktober, S. 15–22
- [3] AMON, T.; DÖHLER, H.; GREBE, S.; KLAGES, S.; ROTH, U.; WILKEN, D.; WULF, S. (2016): Qualität und Verwertung des Gärrückstandes. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): *Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung*. 7. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), S. 184–202, ISBN 3-00-014333-5
- [4] APARICIO, N.; VILLEGAS, D.; CASADESUS, J.; ARAUS, J. L.; ROYO, C. (2000): Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, Bd. 92, S. 83–91
- [5] ASMUS, F. (1992): Einfluß organischer Dünger auf Ertrag, Humusgehalt des Bodens und Humusreproduktion. In: BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (BMELF) (Hrsg.): *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Band 4: Humushaushalt. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft, Neue Folge, Nr. 206*. Hamburg, Berlin: Paul Parey, S. 127–139
- [6] ASSEFA, T.; WU, J.; ALBRECHT, K. A.; JOHNSON, P. J.; BOE, A. (2015): Genetic Variation for Biomass and Related Morphological Traits in Cup Plant (*Silphium perfoliatum* L.). *American Journal of Plant Sciences*, Bd. 06, Nr. 08, S. 1098–1108
- [7] BARKER, A. V.; BRYSON, G. M.: Nitrogen. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Hrsg.): *Handbook of Plant Nutrition. Books in soils, plants, and the environment*, Bd. 117. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, S. 21–50, ISBN 0-8247-5904-4
- [8] BARNES, E. M.; CLARKE, T. R.; RICHARDS, S. E.; COLAIZZI, P. D.; HABERLAND, J.; KOSTRZEWSK, M.; WALLER, P.; CHOI, C.; RILEY, E.; THOMPSON, T.; LASCANO, R. J.; LI, H.; MORAN, M. S. (2000): Coincident detection of crop and water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: ROBERT, P. C.; RUST, R. H.; LARSON, W. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*. Bloomington, Minnesota, USA, 16.–19. July. Madison, Minnesota: American Society of Agronomy, S. 1–15
- [9] BAUBÖCK, R.; KARPENSTEIN-MACHAN, M.; KAPPAS, M. (2014): Computing the biomass potentials for maize and two alternative energy crops, triticale and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.), with the crop model BioSTAR in the region of Hannover (Germany). *Environmental Sciences Europe*, Bd. 19, Nr. 26, S. 1–12

- [10] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL) (2021): Basisdaten. für die Umsetzung der Düngeverordnung, für die Beratung und Planung, zur Berechnung des Düngebedarfs, der 170 kg Grenze N_{gesamt} , des Lagerraums für organische Dünger, der Stoffstrombilanz. Stand: März 2021. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 67 Seiten
- [11] BECKER, C.; DÖHLER, H.; ECKEL, H.; FRÖBA, N.; GEORGIEVA, T.; GRUBE, J.; HARTMANN, S.; HAUPTMANN, A.; JÄGER, P.; KLAGES, S.; KRÖTZSCH, S.; SAUER, N.; NAKAZI, S.; NIEMANN, A.; ROTH, U.; WIRTH, B.; WULF, S.; XIN, Y. (2007): Faustzahlen Biogas. KTBL-Datensammlung. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), 181 Seiten, ISBN 978-3-939371-46-5
- [12] BIERTÜMPFEL, A.; CONRAD, M. (2012): Durchwachsene Silphie/Silphium perfoliatum L. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): Energiepflanzen für Biogasanlagen. Bayern. Stand: August 2012. 1. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), S. 36–39
- [13] BIERTÜMPFEL, A.; CONRAD, M. (2013): Verbundvorhaben: Erhöhung des Leistungspotenzials und der Konkurrenzfähigkeit der Durchwachsenen Silphie als Energiepflanze durch Züchtung und Optimierung des Anbauverfahrens. Teilvorhaben 2: „Optimierung des Anbauverfahrens und Bereitstellung von Selektionsmaterial“. Projekt-Nr.: 99.05. FKZ-Nr.: 22012809. Abschlussbericht. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 78 Seiten
- [14] BIERTÜMPFEL, A.; KÖHLER, J.; REINHOLD, G.; GÖTZ, R.; ZORN, W. (2018): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Durchwachsener Silphie. 2., geändert. Aufl. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) (Hrsg.), 23 Seiten
- [15] BORKOWSKA, H.; MOLAS, R. (2013): Yield comparison of four lignocellulosic perennial energy crop species. Biomass and Bioenergy, Bd. 51, April, S. 145–153
- [16] BORKOWSKA, H.; STYK, B.; MOLAS, R. (2006): Energiepflanze mit hohem Potenzial. Erneuerbare Energien, Bd. 16, Nr. 7, S. 76–77
- [17] BORRA-SERRANO, I.; SWAEF, T. D.; MUYLLE, H.; NUYTTENS, D.; VANGHEYTE, J.; MERTENS, K.; SAEYS, W.; SOMERS, B.; ROLDÁN-RUIZ, I.; LOOTENS, P. (2019): Canopy height measurements and non - destructive biomass estimation of Lolium perenne swards using UAV imagery. Grass and Forage Science, Bd. 74, Nr. 3, S. 356–369
- [18] BRODMANN, R. (2020): Donau-Silphie Infogrill. Feldtag in Wildenberg, 12. August 2020. Mündliche Präsentation
- [19] BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST E. V. (BGK) (2006): Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. Grundwerk (Lo-seblattsammlung). 5., erw. Aufl. Köln-Gremberghoven: Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., 300 Seiten, ISBN 978-3-939790-00-6
- [20] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMEL) (2017): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I, S. 1305), die zuletzt durch Artikel 97 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/D%C3%BCV.pdf, 46 Seiten (Stand: 25.01.2022)

- [21] BURMEISTER, J.; PARZEFALL, S.; WIESMEIER, M.; EBERTSEDER, F.; HENKELMANN, G.; WALTER, R.; FRITZ, M. (2020): Gärrestversuch Bayern. Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL. Berichte aus dem TFZ, Nr. 67, Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.), 240 Seiten, ISSN 1614-1008
- [22] BURMEISTER, J.; WALTER, R. (2016): Untersuchungen zur ökologischen Wirkung der Durchwachsenen Silphie aus Bayern. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig. Journal für Kulturpflanzen, Bd. 68, Nr. 12, S. 407–411
- [23] BURMEISTER, J.; WALTER, R.; FRITZ, M. (2015): Auswirkung der Düngung mit Biogasgärresten auf die Bodentiere. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. (ALB Bayern e. V.) (Hrsg.). Freising. Biogas Forum Bayern, Nr. I -27/2015, 17 Seiten
- [24] BURY, M.; MOZDZER, E.; KITCZAK, T.; SIWEK, H.; WŁODARCZYK, M. (2020): Yields, Calorific Value and Chemical Properties of Cup Plant *Silphium perfoliatum* L. Biomass, Depending on the Method of Establishing the Plantation. Agronomy, Bd. 10, Nr. 6, S. 851
- [25] CABRERA, M. L.; KISSEL, D. E.; VIGIL, M. F. (2005): Nitrogen Mineralization from Organic Residues: Research Opportunities. Journal of Environmental Quality, Bd. 34, Nr. 1, S. 75–79
- [26] DATT, B. (1999): A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves. Journal of Plant Physiology, Bd. 184, Nr. 1, S. 30–36
- [27] DAUBER, J.; MÜLLER, A. L.; SCHITTENHELM, S.; SCHOO, B.; SCHORPP, Q.; SCHRADER, S.; SCHROETTER, S. (2015): Agrarökologische Bewertung der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) als eine Biomassepflanze der Zukunft. Teilvorhaben 1: Ober- und unterirdische Biodiversität in Beständen der Durchwachsenen Silphie Teilvorhaben 2: Wasserhaushalt und Ökophysiologie der Durchwachsenen Silphie. Schlussbericht zum Vorhaben. Stand: 10/2015. Braunschweig, Quedlinburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Julius Kühn-Institut, 138 Seiten
- [28] DEDERER, M. (2006): Pflanzenbauliche Verwertung von Gärresten. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (Hrsg.): Verwertung von Wirtschaftsdüngern in der Landwirtschaft. Nutzen und Risiken; KTBL-Vortragstagung vom 19. bis 20. April 2006 in Osnabrück. KTBL-Schrift, Nr. 444. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), S.191–198, ISBN 978-3-939371-05-2
- [29] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2021): Niederschlag: vieljährige Mittelwerte 1961–1990. Aktueller Standort. URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadaten/deutschland/mittelwerte/nieder_6190_akt_html.html;jsessionid=4DA122F6E496DA01A4BD47A801796EFC.live11051?view=nasPublication&nn=16102 (Stand: 31.08.2021)

- [30] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2021): Sonnenscheindauer: vieljährige Mittelwerte 1961–1990. Aktueller Standort. URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/sonne_6190_akt_html.html;jsessionid=4DA122F6E496DA01A4BD47A801796EFC.live11051?view=nasPublication&nn=16102 (Stand: 31.08.2021)
- [31] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2021): Temperatur: vieljährige Mittelwerte 1961–1990. Aktueller Standort. URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/temp_6190_akt_html.html;jsessionid=4DA122F6E496DA01A4BD47A801796EFC.live11051?view=nasPublication&nn=16102 (Stand: 31.08.2021)
- [32] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) Climate Data Center (CDC) (2021): Tagesmittel der Stationsmessungen der mittleren Windgeschwindigkeit in ca. 10 m Höhe in m/s für Deutschland. Datenbank, Version v21.3. (Stand: 06.12.2020)
- [33] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) Climate Data Center (CDC) (2021): Tägliche Stationsmessungen der mittleren Lufttemperatur auf 2 m Höhe in °C für Deutschland. Datenbank, Version v21.3. (Stand: 06.12.2020)
- [34] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) Climate Data Center (CDC) (2021): Tägliche Stationsmessungen der Sonnenscheindauer in Stunden für Deutschland. Datenbank, Version v21.3. (Stand: 06.12.2020)
- [35] DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) Climate Data Center (CDC) (2021): Tägliche Stationsmessungen Niederschlagshöhe in mm für Deutschland. Datenbank, Version v21.3. (Stand: 06.12.2020)
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1998): DIN EN 12176: Charakterisierung von Schlamm – Bestimmung des pH-Wertes. Deutsche Fassung EN 12176:1998. Juni 1998. Berlin: Beuth, 12 Seiten
- [37] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2003): DIN EN 13657: Charakterisierung von Abfällen – Aufschluß zur anschließenden Bestimmung des in Königswasser löslichen Anteils an Elementen in Abfällen. Deutsche Fassung EN 13657:2002. Januar 2003. Berlin: Beuth, 32 Seiten
- [38] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2009): DIN EN ISO 11885: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007). Deutsche Fassung EN ISO 11885:2009. September 2009. Berlin: Beuth, 37 Seiten
- [39] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2012): DIN EN 13039: Bodenverbesserungsmittel und Kultursubstrate – Bestimmung des Gehaltes an organischer Substanz und Asche. Deutsche Fassung EN 13039:2011. Januar 2012. Berlin: Beuth, 11 Seiten
- [40] DOUGLAS, J. A.; FOLLETT, J. M.; HALLIDAY, I. R.; HUGHES J.W.; PARR, C. R. (1987): Silphium: Preliminary Research on a possible new forage crop for New Zealand. *Proceedings Agronomy Society of New Zealand*, Bd. 17, S. 51–53
- [41] EBERTSEDER, T.; ENGELS, C.; HEYN, J.; REINHOLD, J.; BROCK, C.; FÜRSTENFELD, F.; HÜLSBERGEN, K.-J.; ISERMANN, K.; KOLBE, H.; LEITHOLD, G.; SCHMID, H.; SCHWEITZER, K.; WILLMS, M.; ZIMMER, J. (2014): Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Speyer: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (Hrsg.), 21 Seiten

- [42] EL-SAYED FOUDA, S. (2011): Nitrogen availability of biogas residues. Dissertation. Freising: Technische Universität München, 113 Seiten
- [43] EMMERLING, C. (2014): Impact of land-use change towards perennial energy crops on earthworm population. *Applied Soil Ecology*, Bd. 84, S. 12–15
- [44] EMMERLING, C. (2016): Bodenqualität beim Anbau von Dauerkulturen für die Biomasseproduktion am Beispiel der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) – ein innovatives Agrarsystem der Zukunft. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12. Stuttgart: Eugen Ulmer, S. 399–406
- [45] ENGELS, C. (2015): Humuswirkung, Humusreproduktionskoeffizienten und Gärrückstände. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen, Berlin, 10.–11. März. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzower Fachgespräche, Nr. 51, S. 160–173
- [46] ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. (2011): Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research*, Bd. 124, Nr. 1, S. 74–84
- [47] FELTEN, D.; EMMERLING, C. (2012): Accumulation of Miscanthus-derived carbon in soils in relation to soil depth and duration of land use under commercial farming conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Bd. 175, Nr. 5, S. 661–670
- [48] FERCHAUD, F.; VITTE, G.; MARY, B. (2016): Changes in soil carbon stocks under perennial and annual bioenergy crops. *GCB Bioenergy*, Bd. 8, Nr. 2, S. 290–306
- [49] FORMOWITZ, B. (2014): Großer Gärrestversuch. Kap. 6.2. In: THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (TLL) (Hrsg.): Entwicklung und Optimierung von standortangepassten Anbausystemen für Energiepflanzen im Fruchtfolgeregime. Abschlussbericht zum Teilprojekt 1, Projekt-Nr.: 99.16, FKZ 22013008. Stand: März 2014. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), S. 84–89
- [50] FÖRSTER, L.; BURMEISTER, J.; ROSWITHA, W.; EBERTSEDER, F.; WIESMEIER, M.; SOLBACH, J.; PARZEFALL, S.; HARTMANN, A.; FRITZ, M. (2020): Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II. Berichte aus dem TFZ, Nr. 71. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.), 308 Seiten, ISSN 1614-1008
- [51] FRANZARING, J.; HOLZ, I.; KAUF, Z.; FANGMEIER, A. (2015): Reaktionen der Energiepflanzen Sida und Silphie auf erhöhte Temperaturen, reduzierte Niederschläge und den CO₂-Düngeeffekt. Abschlussbericht. September 2014. Gülzow; Hohenheim: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Universität Hohenheim, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie (Hrsg.), 88 Seiten
- [52] FRANZARING, J.; SCHMID, I.; BÄUERLE, L.; GENSHEIMER, G.; FANGMEIER, A. (2014): Investigations on plant functional traits, epidermal structures and the ecophysiology of the novel bioenergy species *Sida hermaphrodita* Rusby and *Silphium perfoliatum* L. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, Nr. 87, S. 36–45

- [53] GANSBERGER, M.; MONTGOMERY, L. F. R.; LIEBHARD, P. (2015): Botanical characteristics, crop management and potential of *Silphium perfoliatum* L. as a renewable resource for biogas production: A review. *Industrial Crops and Products*, Bd. 63, Nr. 1, S. 362–372
- [54] GANSBERGER, M.; STÜGER, H.-P., WEINHAPPEL, M.; MODER, K.; LIEBHARD, P.; GEHREN, P. VON; MAYR, J.; RATZENBÖCK, A. (2017): Germination characteristic of *Silphium perfoliatum* L. seeds. *Journal of Land Management, Food and Environment*, Bd. 68, Nr. 2, S. 73–79
- [55] GAUDER, M.; BILLEN, N.; ZIKELI, S.; LAUB, M.; CLAUPEIN, W. (2013): Mittelfristige Corg-Veränderungen im Oberboden durch Energiepflanzen-Anbausysteme - Ergebnisse eines Feldversuchs. In: PEKRUN, C.; FRANCKE-WELTMANN, M. (Hrsg.): Nachhaltige Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen. Kurzfassung der Vorträge und Poster. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. mit der Technischen Universität München, der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft und dem Technologie- und Förderzentrum Straubing. Weihenstephan, 4.–6. September. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Nr. 25. Göttingen: Liddy Halm, S. 68–69, ISSN 0934-5116
- [56] GERSTBERGER, P.; ASEN, F.; HARTMANN, C. (2016): Zur Ökonomie und Ökologie der Becherpflanze (*Silphium perfoliatum* L.) im Vergleich zum Silomais. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 372–377
- [57] GERSTBERGER, P.; OTT, J. (2020): becherpflanze.de. URL: <http://www.becherpflanze.de/>. Bayreuth: Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Pflanzenökologie (Stand: 08.06.2020)
- [58] GLEMNITZ, M.; WILLMS, M.; PLATEN, R.; SPECKA, X.; PRESCHER, A.; BUTTLAR, C. VON; KRÄHLING, B. (2014): Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands (EVA II). Endbericht zu Teilprojekt II. Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus. Münchenberg: Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. (Hrsg.), 284 Seiten
- [59] GRUNWALD, D.; PANTEN, K.; BISCHOFF W.-A.; SCHITTENHELM, S. (2017): Vergleich verschiedener Energiepflanzen hinsichtlich des Boden- und Wasserschutzes. In: KAGE, H.; SIELING, K.; FRANCKE-WELTMANN, M.; GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN E. V. (GFP) (Hrsg.): Anforderungen an den Pflanzenbau in einer sich urbanisierenden Welt. Kurzfassung der Vorträge und Poster. 60. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. Gießen, 26.–28. September. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Nr. 29. Göttingen: Liddy Halm, S. 235–236
- [60] GRUNWALD, D.; PANTEN, K.; BISCHOFF W.-A.; SCHITTENHELM, S. (2018): Auswirkungen eines mehrjährigen Energiepflanzenanbaus auf den Boden- und Wasserschutz. In: STÜTZEL, H.; FRICKE, A.; FRANCKE-WELTMANN, L.; GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN E. V. (GFP) (Hrsg.): From Big Data to Smart Farming. Kurzfassungen der Vorträge und Poster. 61. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. Kiel, 25.–27. September. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Nr. 30. Göttingen: Liddy Halm, S. 27–28

- [61] GRUNWALD, D.; PANTEN, K.; SCHWARZ, A.; BISCHOFF, W.; SCHITTENHELM, S. (2020): Comparison of maize, permanent cup plant and a perennial grass mixture with regard to soil and water protection. *GCB Bioenergy*, Bd. 12, Nr. 9, S. 694–705
- [62] GUTSER, R.; EBERTSEDER, T. (2006): Die Nährstoffe in Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern – ein unterschätztes Potential im Stoffkreislauf landwirtschaftlicher Betriebe. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (Hrsg.): Verwertung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern in der Landwirtschaft. Nutzen und Risiken. KTBL-Vortragstagung. Osnabrück, 19. bis 20. April 2006. KTBL-Schrift, Nr. 444. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), S. 7–22, ISBN 978-3-939371-05-2
- [63] GUTSER, R.; EBERTSEDER, T.; SCHRAML, M.; TUCHER, S. v.; SCHMIDHALTER, U. (2010): Stickstoffeffiziente und umweltschonende organische Düngung. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (Hrsg.): Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden. KTBL-/VTI-Tagung. Bildungszentrum Kloster Banz in Bad Staffelstein, 8. bis 10. Dezember. KTBL-Schrift, Nr. 483. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), S. 31–50, ISBN 978-3-941583-45-0
- [64] GUTSER, R.; EBERTSEDER, T.; WEBER, A.; SCHRAML, M.; SCHMIDHALTER, U. (2005): Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Bd. 168, Nr. 4, S. 439–446
- [65] HAAG, N. L.; NÄGELE, H.-J.; REISS, K.; BIERTÜMPFEL, A.; OECHSNER, H. (2015): Methane formation potential of cup plant (*Silphium perfoliatum*). *Biomass and Bioenergy*, Bd. 75, April, S. 126–133
- [66] HABER, N.; KLUGE, R.; WAGNER, W.; MOKRY, M.; DEDERER, M.; MESSNER, J. (2008): Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Augustenberg: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) (Hrsg.), 164 Seiten
- [67] HALLER, J.; FRITZ, M. (2015): Bioenergie Dauerkulturen. Auswahl ökologischer Alternativen. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.). TFZ Wissen, Nr. 3, 59 Seiten
- [68] HAN, X.; THOMASSON, J. A.; BAGNALL, G. C.; PUGH, N. A.; HORNE, D. W.; ROONEY, W. L.; JUNG, J.; CHANG, A.; MALAMBO, L.; POPESCU, S. C.; GATES, I. T.; COPE, D. A. (2018): Measurement and Calibration of Plant-Height from Fixed-Wing UAV Images. *Sensors*, Bd. 18, Nr. 12, S. 4092
- [69] HARTMANN, A.; BURMEISTER, J.; FRITZ, M.; WALTER, R. (2017): Dauerkulturen. Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung. Berichte aus dem TFZ, Nr. 54. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.), 229 Seiten, ISSN 1614-1008
- [70] HARTMANN, A.; LUNENBERG, T. (2016): Ertragspotenzial der Durchwachsenen Silphie unter bayerischen Anbaubedingungen. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 385–388

- [71] HELFRICH, M.; NICOLAY, G.; WELL, R.; BUCHEN-TSCHISKALE, C.; DECHOW, R.; FUß, R.; GENSIOR, A.; PAULSEN, H. M.; BERENDONK, C.; FLESSA, H. (2020): Effect of chemical and mechanical grassland conversion to cropland on soil mineral N dynamics and N₂O emission. *Agriculture Ecosystems and Environment*, Bd. 298, S. 106975, S. 1–13
- [72] HERRMANN, A.; SIELING, K.; WIENFORTH, B.; TAUBE, F.; KAGE, H. (2013): Short-term effects of biogas residue application on yield performance and N balance parameters of maize in different cropping systems. *Journal of Agricultural Science*, Bd. 151, Nr. 4, S. 449–462
- [73] HUETE, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, Bd. 25, Nr. 3, S. 295–309
- [74] JABLONOWSKI, N. D.; KOLLMANN, T.; NABEL, M.; DAMM, T.; KLOSE, H.; MÜLLER, M.; BLÄSING, M.; SEEBOLD, S.; KRAFFT, S.; KUPERJANS, I.; DAHMEN, M.; SCHURR, U. (2016): Valorization of Sida (*Sida hermaphrodita*) biomass for multiple energy purposes. *GCB Bioenergy*, Bd. 9, Nr. 1, S. 1–13
- [75] JASINSKAS, A.; SIMONAVIČIŪTĖ, R. ŠIAUDINIS, G.; LIAUDANSKIENĖ, I.; ANTANAITIS, Š.; ARAK, M.; OLT, J. (2014): The assessment of common mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) productivity and technological preparation for solid biofuel. *Žemdirbystė-Agriculture*, Bd. 101, Nr. 1, S. 19–26
- [76] JUCSOR, N.; SUMALAN, R. (2018): Researches concerning the potential of biomass accumulation in cup plant (*Silphium perfoliatum* L.). *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, Bd. 22, Nr. 2, S. 34–39
- [77] KARPENSTEIN-MACHAN, M. (2005): *Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber*. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 192 Seiten, ISBN 3-7690-0651-8
- [78] KÖHLER, J.; BIERTÜMPFEL, A. (2016): Wie die Saat, so die Ernte – Erfolgreiche Etablierung Durchwachsener Silphie durch Aussaat. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): *Durchwachsene Silphie*. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 356–362
- [79] KÖHLER, J.; BIERTÜMPFEL, A. (2018): Durchwachsene Silphie - Perspektiven für den Gewässerschutz. Kapitel 4.9. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): *Gewässerschutz mit nachwachsenden Rohstoffen*. Steigerung der Gewässerschutzleistung. 1. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), S. 55–58
- [80] KÖRSCHENS, M.; WEIGEL, A.; SCHULZ, E. (1998): Turnover of Soil Organic Matter (SOM) and Long-Term Balances - Tools for Evaluating Sustainable Productivity of Soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Bd. 161, Nr. 4, S. 409–424
- [81] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2006): *Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus*. KTBL-Datensammlung mit Internetangebot, Darmstadt: KTBL, 372 Seiten, ISBN 3-939371-21-1

- [82] LICHTI, F.; WENDLAND, M.; SCHMIDHALTER, U.; OFFENBERGER, K. (2012): Die Nährstoffwirkung von Biogasgärresten. In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL) (Hrsg.): Düngung mit Biogasgärresten – effektiv – umweltfreundlich – bodenschonend. 10. Kulturlandschaftstag. Weichering, 15.11. Tagungsband. LfL-Schriftenreihe, Nr. 11/2012. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, S. 17–20, ISSN 1611-4159
- [83] LICHTI, F.; WENDLAND, M.; SCHMIDHALTER, U.; OFFENBERGER, K. (2013): Biogasgärreste effizient und nachhaltig einsetzen. In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL) (Hrsg.): Agrarforschung hat Zukunft – Wissenschaftstagung der LfL, 4. Juli. Tagungsband. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Nr. 4/2013. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 123–132, ISSN 1611-4159
- [84] LUNENBERG, T.; HARTMANN, A. (2016): Nährstoffentzüge von Durchwachsener Silphie in Bayern. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig. Journal für Kulturpflanzen, Bd. 68, Nr. 12, S. 389–391
- [85] MAST, B.; GRAEFF-HÖNNINGER, S.; REINHARDT-HANISCH, A.; LEMMER, A.; OECHSNER, H.; CLAUPEIN, W. (2013): Mehrjährige Biogaskulturen Einfluss des Erntezeitpunktes auf Ertrag, TS-Gehalt und Methanausbeute. In: PEKRUN, C.; FRANCKE-WELTMANN, M. (Hrsg.): Nachhaltige Erzeugung von Nachwachsenden Rohstoffen. Kurzfassung der Vorträge und Poster. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. mit der Technischen Universität München, der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft und dem Technologie- und Förderzentrum Straubing. Weißenstephan, 4.–6. September. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Nr. 25. Göttingen: Liddy Halm, S. 148–149
- [86] MEIER, U. (2018): BBCH Monografie. Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. Quedlinburg: Julius Kühn-Institut (JKI), 204 Seiten, ISBN 978-3-95547-070-8
- [87] MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. (2010): Tractor-based quadrilateral spectral reflectance measurements to detect biomass and total aerial nitrogen in winter wheat. *Agronomy Journal*, Bd. 102, Nr. 2, S. 499–506
- [88] MÖLLER, K. (2015): Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Bd. 35, Nr. 3, S. 1021–1041
- [89] MÖLLER, K.; MÜLLER, T. (2012): Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth. A review. *Engineering in Life Sciences*, Bd. 12, Nr. 3, S. 242–257
- [90] MÖLLER, K.; SCHULTHEISS, U.; WULF, S.; SCHIMMELPFENNIG, S. (2019): Düngung mit Gärresten. Eigenschaften – Ausbringung – Kosten. KTBL-Heft, Nr. 126. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), 64 Seiten
- [91] MÜLLER, A. L.; BERGER, C. A.; SCHITTENHELM, S.; STEVER-SCHOO, B.; DAUBER, J. (2020): Water availability affects nectar sugar production and insect visitation of the cup plant *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae). *Journal of Agronomy and Crop Science*, Bd. 206, Nr. 5, S. 529–537

- [92] MÜLLER, A. L.; BIERTÜMPFEL, A.; FRIEDRITZ, L.; POWER, E. F.; WRIGHT, G. A.; DAUBER, J. (2020): Floral resources provided by the new energy crop, *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae). *Journal of Apicultural Research*, Bd. 59, Nr. 2, S. 232–245
- [93] MUNZERT, M. (2015): Landwirtschaftliche und gartenbauliche Versuche mit SAS. Mit 50 Programmen, 169 Tabellen und 18 Abbildungen. Berlin; Heidelberg: Springer Spektrum, 449 Seiten, ISBN 978-3-642-54505-4
- [94] NIELSEN, K.; HOFFMANN, M.; HÜBNER, A.; MUSKOLUS, A.; ELLMER, F. (2018): Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit beim Einsatz von Gärprodukten aus Biogasanlagen. Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP) (Hrsg.), 144 Seiten
- [95] NIU, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, H.; HAN, W.; PENG, X. (2019): Estimating above-ground biomass of maize using features derived from UAV-based RGB imagery. *Remote Sensing*, Bd. 11, Nr. 11, S. 1261
- [96] OLESZEK, M.; MATYKA M.; LALAK, J.; TYS, J.; PAPROTA, E. (2013): Characterization of *Sida hermaphrodita* as a feedstock for anaerobic digestion process. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, Bd. 11, Nr. 3 & 4, S. 1839–1841
- [97] PARZEFALL, S.; FRITZ, M. (2018): Düngung mit Gärresten in Dauerkulturen: Optimierung der Düngetermine. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 130 Seiten
- [98] PEARSON, R. L.; MILLER, L. D. (1972): Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of the Productivity of the Shortgrass Prairie. In: ENVIRONMENTAL RESEARCH INSTITUTE OF MICHIGAN (Hrsg.): Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 2.–6. Oktober. Michigan: Ann Arbor, S. 1355–1380
- [99] PERETZKI, F.; MÜLLER, C.; DITTMANN, T. (2005): Düngerfabrik Biogasanlage. Wochenblatt-Serie „Biogas“, Teil 9: Düngen mit Gärrückständen. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, Bd. 199, Nr. 7, S. 42–44
- [100] PICHARD, G. (2012): Management, production, and nutritional characteristics of cupplant (*Silphium perfoliatum*) in temperate climates of southern Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, Bd. 39, Nr. 1, S. 61–77
- [101] QUAKERNACK, R.; PACHOLSKI, A.; TECHOW, A.; HERRMANN, A.; TAUBE, F.; KAGE, H. (2012): Ammonia volatilization and yield response of energy crops after fertilization with biogas residues in a coastal marsh of Northern Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 160, October, S. 66–74
- [102] REINHOLD, G.; KLIMANEK, E.-M.; BREITSCHUH, G. (1991): Zum Einfluss der Biogaserzeugung auf Veränderungen in der Kohlenstoffdynamik von Gülle. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde*, Bd. 35, S. 129–137
- [103] REINHOLD, G.; ZORN, W. (2008): Eigenschaften und Humuswirkung von Biogasgülle. In: VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA) (Hrsg.): Kongressband 2008 Jena. Vorträge zum Generalthema: Erhöhte Biomassenachfrage – eine neue Herausforderung für die Landwirtschaft. 120. VDLUFA-Kongress. Jena, 16.–19. September. VDLUFA-Schriftenreihe, Nr. 64. Darmstadt: VDLUFA-Verlag, S. 404–409, ISBN 978-3-941273-05-4

- [104] REINHOLD, G.; ZORN, W. (2015): Eigenschaften von Gärresten und deren Wirkung auf Ertrag und Bodeneigenschaften. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): Pflanzenbauliche Verwertung von Gärresten aus Biogasanlagen. Berlin, 10.–11. März. Gülzower Fachgespräche, Nr. 51. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), S. 73–86
- [105] REINHOLD, G.; ZORN, W. (2015): Wirtschaftsdünger und Gärprodukte – Eigenschaften im Kontext der Biogaserzeugung und Düngung. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (Hrsg.): Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress. Potsdam, 22.–23. September. KTBL-Schrift, Nr. 508. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), S. 298–306, ISBN 978-3-945088-07-4
- [106] REINHOLD, J. (2006): Eine Möglichkeit der Ableitung der Stickstoffwirksamkeit organischer Dünger aus stofflicher Zusammensetzung und Humusreproduktionsleistung einschließlich Auswirkungen auf die betriebliche Stickstoffbilanz. In: VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA) (Hrsg.): Kongressband 2005 Bonn. Kreislaufwirtschaft mit der Landwirtschaft – quo vadis. Bonn, 27.–29. September. VDLUFA-Schriftenreihe, Nr. 61. Speyer: VDLUFA-Verlag, S. 342–349
- [107] REINHOLD, J. (2015): Mobilität von Stickstoff aus Gärresten. In: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (Hrsg.): Pflanzenbauliche Verwertung von Gärresten aus Biogasanlagen. Gülzower Fachgespräche, Nr. 51. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), S. 99–111
- [108] REITZ, P.; KUTZBACH H. D. (1998): Ammoniakemissionen nach der Flüssigmistausbringung. Einfluss verschiedener Flüssigmistvorbehandlungen. Landtechnik, Bd. 53, Nr. 6, S. 368–369
- [109] RICHTER, C.; PIEPHO, H.-P.; THÖNI, H. (2009): Das „Lateinische Rechteck“ – seine Planung, Randomisation und Auswertung verbunden mit einer Begriffsrevision. Pflanzenbauwissenschaften, Bd. 13, Nr. 1, S. 1–14
- [110] ROßBERG, D.; MICHEL, V.; GRAF, R.; NEUKAMPF, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt für den deutschen Pflanzenschutzdienst, Bd. 59, Nr. 7, S. 155–161
- [111] ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. (1973): Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: FREDEN, S. C.; MERCANTI, E. P.; BECKER, M. A. (Hrsg.): Volume 1: Technical Presentations, section A. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington DC, 10.–14. Dezember, S. 309–317
- [112] RUF, T.; EMMERLING, C. (2020): Soil organic carbon allocation and dynamics under perennial energy crops and their feedbacks with soil microbial biomass and activity. Soil Use and Management, Bd. 36, S. 646–657
- [113] RUF, T.; EMMERLING, C. (2021): Different life-form strategies of perennial energy crops and related nutrient exports require a differentiating view specifically concerning a sustainable cultivation on marginal land. GCB Bioenergy, Bd. 13, Nr. 6, S. 893–904
- [114] RUF, T.; MAKSELON, J.; UDELHOVEN, T.; EMMERLING, C. (2018): Soil quality indicator response to land-use change from annual to perennial bioenergy cropping systems in Germany. GCB Bioenergy, Bd. 10, Nr. 7, S. 444–459

- [115] SCHITTENHELM, S.; PANTEN, K.; GABRIEL, D. (2021): Converting perennial energy crops cup plant and field grass to arable cropping affects weed infestation, soil nitrogen mineralization and subsequent silage maize yield. *Global Change Biology Bioenergy*, Bd. 13, Nr. 8, S. 1232–1246
- [116] SCHITTENHELM, S.; SCHOO, B.; SCHROETTER, S. (2016): Ertragsphysiologie von Biogaspflanzen: Vergleich von Durchwachsener Silphie, Mais und Luzernegrass. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): *Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig*. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 378–384
- [117] SCHOO, B.; KAGE, H.; SCHITTENHELM, S. (2017): Radiation use efficiency, chemical composition, and methane yield of biogas crops under rainfed and irrigated conditions. *European Journal of Agronomy*, Bd. 87, July, S. 8–18
- [118] SCHOO, B.; SCHITTENHELM, S.; KAGE, H. (2017): Durchwachsene Silphie – Eine Energiepflanze der Zukunft? In: KAGE, H.; SIELING, K.; FRANCKE-WELTMANN, M.; GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN E. V. (GFP) (Hrsg.): *Anforderungen an den Pflanzenbau in einer sich urbanisierenden Welt. Kurzfassung der Vorträge und Poster. 60. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. Gießen, 26.–28. September. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Nr. 29*. Göttingen: Liddy Halm, S. 136–139
- [119] SCHOO, B.; SCHROETTER, S.; KAGE, H.; SCHITTENHELM, S. (2017): Root traits of cup plant, maize and lucerne grass grown under different soil and soil moisture conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, Bd. 203, Nr. 5, S. 345–359
- [120] SCHOO, B.; WITTICH, K. P.; BÖTTCHER, U.; KAGE, H.; SCHITTENHELM, S. (2016): Drought Tolerance and Water-Use Efficiency of Biogas Crops. A Comparison of Cup Plant, Maize and Lucerne-Grass. *Journal of Agronomy and Crop Science*, Bd. 203, Nr. 2, S. 117–130
- [121] SCHORPP, Q.; MÜLLER, A. L.; SCHRADER, S.; DAUBER, J. (2016): Agrarökologisches Potential der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) aus Sicht biologischer Vielfalt. In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): *Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig*. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 412–422
- [122] ŠIAUDINIS, G.; JASINSKAS, A.; ŠARAUSKIS, E.; STEPONAVIČIUS, D.; KARČAUSKIENĖ, D.; LIAUDANSKIENĖ, I. (2015): The assessment of Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* Rusby) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) productivity, physico-mechanical properties and energy expenses. *Energy*, Bd. 93, Part 1, S. 606–612
- [123] SOKOLOV, V. S.; GRITSAK, Z. I. (1972): SILPHIUM – a valuable fodder and nectariferous crop. *World Crops*, Bd. 24, Nr. 6, S. 299–301
- [124] SOMMER, S. G.; ERSBØLL, A. K. (1994): Soil Tillage Effects on Ammonia Volatilization from Surface Applied or Injected Animal Slurry. *Journal of Environmental Quality*, Bd. 23, Nr. 3, S. 493–498
- [125] SOMMER, S. G.; GÉNERMONT, S.; CELLIER, P.; HUTCHINGS, N. J.; OLESEN, J. E.; MORVAN, T. (2003): Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field. *European Journal of Agronomy*, Bd. 19, Nr. 4, S. 465–486

- [126] SOMMER, S. G.; HUTCHINGS, N. J. (2001): Ammonia emission from field applied manure and its reduction – invited paper. *European Journal of Agronomy*, Bd. 15, Nr. 1, S. 1–15
- [127] SOMMER, S. G.; SCHJOERRING, J. K.; DENMEAD, O. T. (2004): Ammonia emission from mineral fertilizer and fertilized crops. *Advances in Agronomy*, Bd. 82, December, S. 557–622
- [128] SPERGER, C.; WENDLAND, M.; OFFENBERGER, K. (2019): Vorgaben der DüV in der Praxis immer umsetzbar? Versuchsergebnisse. In: Landesarbeitskreis Düngung (LAD); Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.): Düngetagung, Weichering, 20.11., Freising-Weißenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 1–34
- [129] SPOONER, D. M.; CUSICK, A. W.; HALL, G. F.; BASKIN, J. M. (1985): Observations on the distribution and ecology of *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby (Malvaceae). *Sida – Contributions to Botany*, Bd. 11, Nr. 2, S. 215–225
- [130] STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (StMELF); ANGLSPERGER, J. (2015): INVEKOS Daten Bayern 2015. E-Mail an Empfängerin: M. Fritz, 09.09.2015
- [131] STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (StMELF); ANGLSPERGER, J. (2020): INVEKOS Daten Bayern 2020. E-Mail an Empfänger: M. Grieb, 12.01.2021
- [132] STANFORD, G. (1992): *Silphium perfoliatum* (cup plant) as a new forage. In: SMITH, D. D.; JACOBS C. A. (Hrsg.): Recapturing a vanishing heritage – Proceedings of the 12th North American Prairie Conference, held 5–9 August 1990, Cedar Falls, Iowa. Cedar Falls, Iowa: University of Northern Iowa, S. 33–38
- [133] STOLZENBURG, K.; BRUNS, H.; MONKOS, A.; OTT, J.; SCHICKLER, J. (2016): Produktion von Kosubstraten für die Biogasanlage. Ergebnisse der Versuche mit Durchwachsener Silphie (*Silphium perfoliatum*) in Baden-Württemberg. Augustenberg: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) (Hrsg.), 100 Seiten
- [134] SÜß, H. (2009): Gülle bodennah ausbringen. Aktionstag in Bayreuth zeigte Bandbreite der Ausbringtechnik. *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt*, Bd. 199, Nr. 18, S. 49–51
- [135] TAKEBE, M.; YONEYAMA, T.; INADA, K.; MURAKAMI, T. (1990): Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status. *Soil and Plant*, Bd. 122, S. 295–297
- [136] TRÖLENBERG, S. D.; KRUSE, M.; JONITZ, A. (2012): Verbesserung der Saatgutqualität bei der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). In: VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA) (Hrsg.): Nachhaltigkeitsindikatoren für die Landwirtschaft: Bestimmung und Eignung. Kongressband 2012 Passau – Vorträge zum Generalthema. 124. VDLUFA-Kongress. Passau, 18.–21. September. VDLUFA-Schriftenreihe, Nr. 68. Speyer: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA), S. 926–933

- [137] USTAK, S. (2008): Anbau und Verwertungsmöglichkeiten von *Sida hermaphrodita* in der Tschechischen Republik. Praxisempfehlungen. Prag: Forschungsinstitut für Ackerbau, Wissenschaftliche Forschungsinstitution (Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i.) (Hrsg.), 29 Seiten
- [138] USTAK, S.; MUNOZ, J. (2018): Cup-plant potential for biogas production compared to reference maize in relation to the balance needs of nutrients and some microelements for their cultivation. *Journal of Environmental Management*, Bd. 228, December, S. 260–266
- [139] VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA) (1976): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. 3. Auflage einschließlich Ergänzungslieferungen, 1.–8. Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (Methodenbuch), Band III: VDLUFA-Verlag, 2190 Seiten, ISBN 978-3-941273-14-6
- [140] VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA) (1991): Die Untersuchung von Böden. 4. Auflage einschließlich Ergänzungslieferungen, 1.–7. Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (Methodenbuch), Band I: VDLUFA-Verlag, 1655 Seiten, ISBN 978-3-941273-13-9
- [141] VERTÈS, F.; HATCH, D. J.; VELTHOF, G. L.; TAUBE, F.; LAURENT, F.; LOISEAU P.; RECOUS S. (2007): Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. In: VLIEGHER, A. D.; CARLIER, L. (Hrsg.): Permanent and Temporary Grassland Plant, Environment and Economy. 14th Symposium of the European Grassland Federation. Ghent, Belgium, 3–5 September. *Grassland Science in Europe*, Nr. 12. Merlebeke: Belgian Society for Grassland and Forage Crops, S. 227–246, ISBN 9789081100731
- [142] VESTE, M.; HALKE, C.; GARBE, D.; FREESE, D. (2016): Einfluss von Stickstoffdüngung und Kompost auf Photosynthese und Wachstum der Virginiamalve (*Sida hermaphrodita* Rusby). In: SCHITTENHELM, S.; DAUBER, J.; SCHRADER, S. (Hrsg.): Durchwachsene Silphie. Themenheft. Vorträge und Poster der Fachtagung „Durchwachsene Silphie“ am 9. und 10. Mai 2016 im Forum des Thünen-Instituts in Braunschweig. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 423–428
- [143] VETTER, A.; CONRAD, M.; BIERTÜMPFEL, A. (2010): Optimierung des Anbauverfahrens für Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*) als Kofermentpflanze in Biogasanlagen sowie Überführung in die landwirtschaftliche Praxis. FKZ: 22004307, Themenblatt-Nr. 42.32.430, Laufzeit: 01.05.2007 bis 18.04.2010, Projekt „Effiziente und umweltgerechte Erzeugung von Bioenergie“; Abschlussbericht. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 48 Seiten
- [144] VOLPATO, L.; PINTO, F.; GONZÁLEZ-PÉREZ, L.; THOMPSON, I. G.; BORÉM, A.; REYNOLDS, M.; GÉRARD, B.; MOLERO, G.; RODRIGUES, F. A. (2021): High Throughput Field Phenotyping for Plant Height Using UAV-Based RGB Imagery in Wheat Breeding Lines: Feasibility and Validation. *Frontiers in Plant Science*, Bd. 12, S. 591587, S. 1–19
- [145] WALTER, R.; BURMEISTER, J.; WOLFRUM, S.; BRANDHUBER, R. (2017): Leistungen der Regenwürmer trotz Klimawandel erhalten. In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.): Landwirtschaft im Klimawandel – Lösungen, die Geld sparen. 15. Kulturlandschaftstag, 14. November. LfL-Schriftenreihe, Nr. 5. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 31–43

- [146] WEISENBURGER, S.; JILG, A.; WURTH, W. (2017): Dauerkulturen als Alternative zu Energiemais. In: KAGE, H.; SIELING, K.; FRANCKE-WELTMANN, M.; GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN E. V. (GFP) (Hrsg.): Anforderungen an den Pflanzenbau in einer sich urbanisierenden Welt. Kurzfassung der Vorträge und Poster. 60. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. Gießen, 26.–28. September. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Nr. 29. Göttingen: Liddy Halm, S. 60–61
- [147] WENDLAND, M.; DIEPOLDER, M.; OFFENBERGER, K.; RASCHBACHER, S. (2018): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Stand: Januar 2018. 14. Aufl. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.). Freising-Weihenstephan: Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz. LfL-Information; Gelbes Heft, 98 Seiten
- [148] WENDLAND, M.; LICHTI, F. (2012): Biogasgärreste. Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. (ALB Bayern e. V.) (Hrsg.), 15 Seiten
- [149] WEVER, C.; HÖLLER, M.; BECKER, L.; BIERTÜMPFEL, A.; KÖHLER, J.; INGHELANDT, D. VON; WESTHOFF, P.; PUDE, R.; PESTSOVA, E. (2019): Towards high-biomass yielding bioenergy crop *Silphium perfoliatum* L. Phenotypic and genotypic evaluation of five cultivated populations. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 124, Nr. 5 (May), S. 102–113
- [150] WRAGGE, V. (2013): Gärprodukte aus Biogasanlagen im pflanzenbaulichen Stoffkreislauf. Dissertation. Berlin: Humboldt-Universität, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, 153 Seiten
- [151] WULF, S.; MAETING, M.; CLEMENS, J. (2002): Application Technique and Slurry Co-Fermentation Effects on Ammonia, Nitrous Oxide, and Methane Emissions after Spreading. I. Ammonia Volatilization. *Journal of Environmental Quality*, Bd. 31, Nr. 6, S. 1789–1794
- [152] ZARCO-TEJADA, P. J.; BERJÓN, A. J.; LOPEZ-LOZANO, R.; MILLER, J. R.; MARTÍN, P.; CACHORRO, V. E.; GONZÁLEZ, M. R.; FRUTOS, A. DE (2005): Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, Bd. 99, Nr. 3, S. 271–287
- [153] ZIRKLER, D. (2015): Biogas residues: Elemental composition, effects on organic matter mineralisation and P dynamics in soil. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 138 Seiten

Anhang

Tabelle 26: Probenahmezeitpunkte für die Erfassung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2019

Schnitt	Datum	BBCH-Entwicklungsstadium [86]
1	10.05.2019	32–33
2	23.05.2019	33–34
3	06.06.2019	35–37
4	25.06.2019	51
5	09.07.2019	61
6	18.07.2019	65
7	01.08.2019	73
Ernte	13.09.2019	89

Tabelle 27: Probenahmezeitpunkte für die Erfassung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2020

Schnitt	Datum	BBCH-Entwicklungsstadium [86]
1	07.05.2020	32–33
2	22.05.2020	34
3	04.06.2020	35
4	23.06.2020	51
5	09.07.2020	53–61
6	29.07.2020	73
7	12.08.2020	79
Ernte	09.09.2020	89

Tabelle 28: *Probenahmezeitpunkte für die Erfassung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2021*

Schnitt	Datum	BBCH-Entwicklungsstadium [86]
1	27.05.2021	33–34
2	11.06.2021	34–35
3	28.06.2021	37–39
4	07.07.2021	55
5	22.07.2021	61–65
6	03.08.2021	71
7	01.09.2021	87
Ernte	21.09.2021	89

Tabelle 29: *Beprobungsschärfe der N_{min} -Untersuchungen im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie*

Probenahmezeitpunkt	Beprobungsschärfe	Beprobte Varianten
4. März 2019	variantenscharf	alle Varianten
17. September 2019	parzellenscharf	alle Varianten
22. November 2019	parzellenscharf	Faktor 1: alle Stufen Faktor 2: einmalige Frühjahrsdüngung Faktor 3: N-Bedarfswert 200 kg N/ha
16. März 2020	parzellenscharf	Faktor 1: alle Stufen Faktor 2: einmalige Frühjahrsdüngung Faktor 3: N-Bedarfswert 200 kg N/ha
10. September 2020	parzellenscharf	Faktor 1: alle Stufen Faktor 2: alle Stufen Faktor 3: N-Bedarfswert 200 kg N/ha
25. November 2020	parzellenscharf	alle Varianten
1. März 2021	parzellenscharf	Faktor 1: alle Stufen Faktor 2: einmalige Frühjahrsdüngung Faktor 3: N-Bedarfswert 200 kg N/ha
6. Oktober 2021	parzellenscharf	Faktor 1: alle Stufen Faktor 2: alle Stufen Faktor 3: N-Bedarfswert 200 kg N/ha

Tabelle 30: *Düngebedarfsermittlung der Folgekulturen Silomais und Triticale nach Umbruch von Durchwachsener Silphie (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2020*

Kultur	Einheit	Triticale	Triticale	Mais	Mais
		organisch	minera- lisch	organisch	minera- lisch
		Korn	Korn	GPS	GPS
	Düngung Vorjahre				
	Nutzungsrichtung				
Ertragserwartung	dt/ha	80	80	600	600
Trockensubstanzgehalt	%	86	86	32	32
N-Bedarfswert	kg N/ha	200	200	230	230
N _{min} -Wert	kg N/ha	-25	-25	-26	-26
Nachlieferung org. Düngung Vorj.	kg N/ha	-22	0	-22	0
Abschlag N-Nachlieferung Vorfrucht*	kg N/ha	-10	-10	-20	-20
N-Düngebedarf	kg N/ha	143	165	162	185
Aufteilung Gaben					
Veg.-Beginn/Unterfußdüngung	kg N/ha	60	60	30	30
2. Gabe	kg N/ha	85	105	130	155

* Abschlag für N-Nachlieferung aus Ernte-/Wurzelresten und Humusanreicherung der Dauerkulturen

Tabelle 31: *Düngebedarfsermittlung der Folgekulturen Silomais und Triticale nach Umbruch von Sida (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2020*

Kultur	Einheit	Triticale	Triticale	Mais	Mais
		organisch	minera- lisch	organisch	minera- lisch
		Korn	Korn	GPS	GPS
	Düngung Vorjahre				
	Nutzungsrichtung				
Ertragserwartung	dt/ha	80	80	600	600
Trockensubstanzgehalt	%	86	86	32	32
N-Bedarfswert	kg N/ha	200	200	230	230
N _{min} -Wert	kg N/ha	-30	-30	-22	-22
Nachlieferung org. Düngung Vorj.	kg N/ha	-12	0	-12	0
Abschlag N-Nachlieferung Vorfrucht*	kg N/ha	-10	-10	-20	-20
N-Düngebedarf	kg N/ha	148	160	176	188
Aufteilung Gaben					
Veg.-Beginn/Unterfußdüngung	kg N/ha	60	60	30	30
2. Gabe	kg N/ha	90	100	145	160

* Abschlag für N-Nachlieferung aus Ernte-/Wurzelresten und Humusanreicherung der Dauerkulturen

Tabelle 32: Düngebedarfsermittlung von Winterweizen nach Umbruch von Durchwachsener Silphie (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2021

Umbruchmethode	Einheit	Pflug	Grubber	Fräse
Ertragserwartung	dt/ha	90	90	90
Trockensubstanzgehalt	%	86	86	86
N-Bedarfswert	kg N/ha	240	240	240
N _{min} -Wert	kg N/ha	-53	-41	-42
Nachlieferung org. Düngung Vorj.	kg N/ha	0	0	0
Abschlag N-Nachlieferung Vorfrucht	kg N/ha	0	0	0
N-Düngebedarf	kg N/ha	187	199	198
Aufteilung Gaben				
Veg.-Beginn/Unterfußdüngung	kg N/ha	50	50	50
2. Gabe (inkl. N-Zufuhr über P-/K-Düngung)	kg N/ha	83	93	93
3. Gabe	kg N/ha	60	60	60

Tabelle 33: Düngebedarfsermittlung von Silomais nach Umbruch von Durchwachsener Silphie (Herbst 2019) im Versuchsjahr 2021

Umbruchmethode	Einheit	Pflug	Grubber	Fräse
Ertragserwartung	dt/ha	600	600	600
Trockensubstanzgehalt	%	32	32	32
N-Bedarfswert	kg N/ha	230	230	230
N _{min} -Wert	kg N/ha	-23	-24	-31
Nachlieferung org. Düngung Vorj.	kg N/ha	0	0	0
Abschlag N-Nachlieferung Vorfrucht	kg N/ha	0	0	0
N-Düngebedarf	kg N/ha	207	206	199
Aufteilung Gaben				
Veg.-Beginn/Unterfußdüngung	kg N/ha	30	30	30
2. Gabe (inkl. N-Zufuhr über P-/K-Düngung)	kg N/ha	176	176	171

Tabelle 34: Durch mineralische P-/K-Düngung im Versuch zum Umbruch von Durchwachsener Silphie am 29. März 2021 ausgebrachte Nährstoffmengen

Variante		P ₂ O ₅	K ₂ O	N	S
	Einheit	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
Mais ohne N-Düngung		60	180	11	18
Mais mit N-Düngung		33	100	6	10
Winterweizen ohne N-Düngung		120	360	23	36
Winterweizen mit N-Düngung		83	250	16	25

Tabelle 35: Ausgebrachte N-Mengen für das Erntejahr 2019 im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie

Aufteilung	N-Bedarfs-	Zeitpunkt Düngung	N _{ges}	NH ₄ -N	min. N
Frühjahrsdüngung	wert		kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
	Einheit kg N/ha				
Gärrest nur Frühjahr					
früh	100	01.04.2019	145	77	–
früh	150	01.04.2019	220	117	–
früh	200	01.04.2019	297	158	–
früh + spät	100	01.04. + 08.05.2019	147	79	–
früh + spät	150	01.04. + 08.05.2019	218	117	–
früh + spät	200	01.04. + 08.05.2019	299	161	–
Gärrest Herbst und Frühjahr					
Herbstdüngung (in allen folgenden Varianten gleich)		25.09.2018	49	23	–
früh	100	01.04.2019	105	56	–
früh	150	01.04.2019	179	95	–
früh	200	01.04.2019	256	136	–
früh + spät	100	01.04. + 08.05.2019	104	56	–
früh + spät	150	01.04. + 08.05.2019	182	98	–
früh + spät	200	01.04. + 08.05.2019	262	141	–
mineralisch Frühjahr					
früh	100	05.04.2019	–	–	84
früh	150	05.04.2019	–	–	134
früh	200	05.04.2019	–	–	184
früh + spät	100	05.04. + 07.05.2019	–	–	84
früh + spät	150	05.04. + 07.05.2019	–	–	134
früh + spät	200	05.04. + 07.05.2019	–	–	184

Tabelle 36: Ausgebrachte N-Mengen für das Erntejahr 2020 im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie

Aufteilung Frühjahrsdüngung	N-Bedarfs- wert Einheit kg N/ha	Zeitpunkt Düngung	N _{ges} kg N/ha	NH ₄ -N kg N/ha	min. N kg N/ha
Gärrest nur Frühjahr					
früh	100	24.03.2020	90	57	–
früh	150	24.03.2020	163	103	–
früh	200	24.03.2020	230	146	–
früh + spät	100	24.03. + 07.05.2020	104	64	–
früh + spät	150	24.03. + 07.05.2020	185	114	–
früh + spät	200	24.03. + 07.05.2020	266	164	–
Gärrest Herbst und Frühjahr					
Herbstdüngung (in allen folgenden Varianten gleich)		07.10.2019	60	36	–
früh	100	24.03.2020	39	25	–
früh	150	24.03.2020	107	68	–
früh	200	24.03.2020	180	114	–
früh + spät	100	24.03. + 07.05.2020	52	32	–
früh + spät	150	24.03. + 07.05.2020	127	78	–
früh + spät	200	24.03. + 07.05.2020	202	125	–
mineralisch Frühjahr					
früh	100	26.03.2020	–	–	70
früh	150	26.03.2020	–	–	120
früh	200	26.03.2020	–	–	170
früh + spät	100	26.03. + 07.05.2020	–	–	70
früh + spät	150	26.03. + 07.05.2020	–	–	120
früh + spät	200	26.03. + 07.05.2020	–	–	170

Tabelle 37: Ausgebrachte N-Mengen für das Erntejahr 2021 im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie

Aufteilung Frühjahrsdüngung	N-Bedarfs- wert Einheit kg N/ha	Zeitpunkt Düngung	N _{ges} kg N/ha	NH ₄ -N kg N/ha	min. N* kg N/ha
Gärrest nur Frühjahr					
früh	100	25.03.2021	109	78	16
früh	150	25.03.2021	176	126	10
früh	200	25.03.2021	242	174	5
früh + spät	100	25.03.2021 + 11.05.2021	113	76	16
früh + spät	150	25.03.2021 + 11.05.2021	179	120	10
früh + spät	200	25.03.2021 + 11.05.2021	246	164	5
Gärrest Herbst und Frühjahr					
Herbstdüngung (in allen folgenden Varianten gleich)		24.09.2020	50	36	–
früh	100	25.03.2021	59	42	16
früh	150	25.03.2021	121	87	11
früh	200	25.03.2021	187	134	6
früh + spät	100	25.03.2021 + 11.05.2021	68	46	16
früh + spät	150	25.03.2021 + 11.05.2021	129	86	11
früh + spät	200	25.03.2021 + 11.05.2021	191	127	6
mineralisch Frühjahr					
früh	100	23.03.2021	–	–	106
früh	150	23.03.2021	–	–	156
früh	200	23.03.2021	–	–	206
früh + spät	100	23.03.2021 + 11.05.2021	–	–	106
früh + spät	150	23.03.2021 + 11.05.2021	–	–	156
früh + spät	200	23.03.2021 + 11.05.2021	–	–	206

* inkl. N-Zufuhr aus P-/K-Düngung in Form von NH₄-N

Tabelle 38: Mittelwerte und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha) von Durchwachsener Silphie und N_{min} -Mengen im Boden in 0 bis 90 cm Tiefe zur Ernte (N_{min} E) und zu Vegetationsende (N_{min} VE) im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre (N_{min} VE nur zwei Jahre); Gär F = Gärrest nur Frühjahr, Gär H+F = Gärrest Herbst und Frühjahr, min = mineralisch, 1 T = 1 Termin, 2 T = 2 Termine, 3 Jahre: n = 12, 2 Jahre: n = 8 (Ausnahmen: ¹¹: n = 11, ¹⁰: n = 10, ⁹: n = 9, ⁸: n = 8)

Faktorstufen			Mittelwert			Standardabweichung		
Düngerart	Termin Frühjahr	N-Bedarfswert	TM/ha	N_{min} E	N_{min} VE	TM/ha	N_{min} E	N_{min} VE
	Einheit	kg N/ha	dt/ha	kg N/ha	kg N/ha	dt/ha	kg N/ha	kg N/ha
Gär F	1 T	100	110,0	–	–	14,0	–	–
Gär F	1 T	150	141,4	–	–	13,0	–	–
Gär F	1 T	200	153,0 ⁹	19,4	12,6 ⁷	17,4	4,5	4,0
Gär F	2 T	100	114,1	–	–	10,5	–	–
Gär F	2 T	150	143,1 ¹¹	–	–	21,6	–	–
Gär F	2 T	200	151,5 ¹¹	19,9	–	19,7	5,9	–
Gär H+F	1 T	100	109,4	–	–	15,0	–	–
Gär H+F	1 T	150	133,2	–	–	13,9	–	–
Gär H+F	1 T	200	151,8 ¹¹	15,2	14,1	19,2	4,1	7,1
Gär H+F	2 T	100	103,4	–	–	12,1	–	–
Gär H+F	2 T	150	126,6	–	–	12,7	–	–
Gär H+F	2 T	200	148,2 ¹¹	18,7	–	17,6	3,3	–
min	1 T	100	127,8 ¹⁰	–	–	22,5	–	–
min	1 T	150	145,8 ¹¹	–	–	13,2	–	–
min	1 T	200	158,2	17,7	9,7 ⁷	16,1	3,6	2,7
min	2 T	100	128,6 ¹¹	–	–	22,7	–	–
min	2 T	150	147,9 ¹¹	–	–	24,4	–	–
min	2 T	200	164,4 ¹¹	17,3	–	20,3	3,9	–

Tabelle 39: Mittelwerte ($n = 12$) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P_2O_5 -Gehalte (P_2O_5), K_2O -Gehalte (K_2O) und MgO-Gehalte des Ernteguts von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Optimierung der N-Düngung von Durchwachsener Silphie im Mittel der drei Versuchsjahre; Gär F = Gärrest nur Frühjahr, Gär H+F = Gärrest Herbst und Frühjahr, min = mineralisch, 1 T = 1 Termin, 2 T = 2 Termine (*: $n = 11$)

Faktorstufen			Mittelwert				Standardabweichung			
Dünger- art	Termin Frühjahr	N-Be- darfswert	N	P_2O_5	K_2O	MgO	N	P_2O_5	K_2O	MgO
Einheit		kg N/ha	kg/dt TM				kg/dt TM			
Gär F	1 T	100	0,67	0,48	1,95	0,63	0,07	0,10	0,18	0,07
Gär F	1 T	150	0,70	0,45	2,07	0,62	0,12	0,09	0,19	0,05
Gär F	1 T	200	0,71	0,38	2,10	0,61	0,14	0,09	0,26	0,06
Gär F	2 T	100	0,65	0,48	1,96	0,61	0,10	0,09	0,21	0,04
Gär F	2 T	150	0,74	0,43	2,08	0,64	0,12	0,07	0,27	0,09
Gär F	2 T	200	0,71	0,41	2,11	0,65	0,14	0,07	0,25	0,08
Gär H+F	1 T	100	0,66	0,49	1,86	0,64	0,10	0,09	0,16	0,07
Gär H+F	1 T	150	0,71	0,43	1,95	0,64	0,11	0,09	0,21	0,08
Gär H+F	1 T	200	0,65	0,39	1,95	0,64	0,13	0,09	0,18	0,08
Gär H+F	2 T	100	0,70	0,50	1,95	0,64	0,11	0,11	0,22	0,06
Gär H+F	2 T	150	0,69	0,45	2,00	0,63	0,10	0,09	0,20	0,07
Gär H+F	2 T	200	0,75	0,41	2,06	0,66	0,12	0,08	0,22	0,06
min	1 T	100	0,71	0,43	1,99	0,66	0,10	0,08	0,29	0,12
min	1 T	150	0,76	0,37	1,94	0,71	0,13	0,09	0,26	0,11
min	1 T	200	0,86	0,32	1,90	0,81*	0,13	0,04	0,29	0,15
min	2 T	100	0,72	0,41	1,99	0,64	0,11	0,09	0,28	0,08
min	2 T	150	0,80	0,39	2,00	0,74	0,20	0,08	0,34	0,13
min	2 T	200	0,90	0,33	1,86	0,80	0,17	0,04	0,22	0,15

Tabelle 40: Korrelation nach Pearson zwischen verschiedenen Vegetationsindizes und dem Trockenmasseertrag zur Ernte in den Jahren 2019 ($n = 62$), 2020 ($n = 61$) und 2021 ($n = 70$)

Vegetationsindex	25.04. 2019	04.06. 2019	28.04. 2020	13.05. 2020	26.05. 2020	26.06. 2020	15.06. 2021	13.07. 2021
NDVI	0,51	0,63	0,50	0,57	0,74	0,66	0,57	0,43
SAVI	0,54	0,73	0,51	0,62	0,74	0,83	0,64	0,55
NDRE	0,51	0,85	0,46	0,56	0,81	0,77	0,70	0,69
LCI	0,51	0,83	0,47	0,57	0,81	0,78	0,70	0,70
IR/R	0,57	0,78	0,50	0,61	0,77	0,69	0,56	0,53
IR/G	0,53	0,83	0,43	0,57	0,80	0,69	0,65	0,62
G/R	0,55	0,44	0,59	0,63	0,63	-0,03	0,13	-0,41

Tabelle 41: Mittlere Abweichung berechnet als RMSE (cm) zwischen den aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Koordinaten der Höhenreferenzen und den tatsächlichen Koordinaten

Messtermin	Flughöhe	RSME x	RSME y	RSME z
08.06.2021	25 m	1,1	2,2	3,1
08.06.2021	35 m	0,7	0,6	1,6
29.06.2021	25 m	1,1	0,9	2,4
29.06.2021	35 m	1,0	1,1	2,5
20.07.2021	25 m	0,9	0,8	3,8
20.07.2021	35 m	0,9	1,5	3,4
09.08.2021	25 m	1,4	1,1	9,8
09.08.2021	35 m	0,4	0,8	9,9
Mittelwert		1,0	1,2	5,5

Tabelle 42: *Mittlere Abweichung berechnet als RMSE (m) zwischen den händisch gemessenen Pflanzenhöhen der Silphieparzellen und den anhand verschiedener Quantilbereiche aus dem Wuchshöhenmodell abgeleiteten Pflanzenhöhen*

Messtermin	Flughöhe	RMSE	RMSE	RMSE
		70–80 %	80–90 %	90–99 %
Quantilbereich				
08.06.2021	25 m	0,13	0,12	0,12
08.06.2021	35 m	0,07	0,05	0,04
29.06.2021	25 m	0,07	0,06	0,09
29.06.2021	35 m	0,07	0,06	0,09
20.07.2021	25 m	0,07	0,08	0,12
20.07.2021	35 m	0,07	0,09	0,14
09.08.2021	25 m	0,29	0,23	0,16
09.08.2021	35 m	0,28	0,21	0,12
	Mittelwert 25 m	0,14	0,12	0,12
	Mittelwert 35 m	0,12	0,10	0,10

Tabelle 43: *Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen (R^2) der händisch gemessenen Pflanzenhöhen der Silphieparzellen und der anhand verschiedener Quantilbereiche aus dem Wuchshöhenmodell abgeleiteten Pflanzenhöhen*

Messtermin	Flughöhe	RMSE	RMSE	RMSE
		70–80 %	80–90 %	90–99 %
Quantilbereich				
08.06.2021	25 m	0,56	0,55	0,53
08.06.2021	35 m	0,96	0,96	0,95
29.06.2021	25 m	0,93	0,93	0,92
29.06.2021	35 m	0,94	0,93	0,93
20.07.2021	25 m	0,94	0,94	0,94
20.07.2021	35 m	0,94	0,94	0,94
09.08.2021	25 m	0,55	0,57	0,57
09.08.2021	35 m	0,78	0,80	0,79

Tabelle 44: Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha), Trockensubstanzgehalte (TS) und N_{\min} -Mengen (N_{\min}) im Boden im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2019; *: $n = 1$

Schnitttermin	Mittelwert			Standardabweichung		
	TM/ha	TS	N_{\min}	TM/ha	TS	N_{\min}
Einheit	dt/ha	%	kg N/ha	dt/ha	%	kg N/ha
10.05.2019	32,0	12,2	120,3	2,4	0,3	47,2
23.05.2019	46,6	10,8	84,0	2,2	0,1	37,0
06.06.2019	86,5	10,8	44,0	13,2	0,5	6,2
25.06.2019	97,4	14,2	48,0	28,7	0,4	14,4
09.07.2019	164,7	16,5	25,7	3,8	0,1	2,3
18.07.2019	199,5	18,4	20,3	9,6	0,3	3,5
01.08.2019	211,0	19,5*	22,0	20,2	–	1,0
13.09.2019	190,1*	24,7*	16,0*	–	–	–

Tabelle 45: Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P_2O_5 -Gehalte (P_2O_5), K_2O -Gehalte (K_2O) und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2019

Schnitttermin	Mittelwert				Standardabweichung			
	N	P_2O_5	K_2O	MgO	N	P_2O_5	K_2O	MgO
Einheit	kg/dt TM				kg/dt TM			
10.05.2019	4,30	1,11	4,60	0,59	0,04	0,03	0,13	0,01
23.05.2019	3,85	1,11	4,67	0,67	0,05	0,04	0,23	0,04
06.06.2019	3,21	0,87	4,13	0,68	0,18	0,04	0,16	0,02
25.06.2019	2,25	0,63	3,30	0,62	0,18	0,01	0,19	0,05
09.07.2019	2,00	0,60	2,85	0,79	0,09	0,05	0,24	0,12
18.07.2019	2,05	0,58	2,84	0,72	0,04	0,01	0,13	0,04
01.08.2019	1,74	0,49	2,43	0,61	0,05	0,04	0,04	0,04
13.09.2019	0,86	0,53	1,94	0,46	–	–	–	–

Tabelle 46: Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha), Trockensubstanzgehalte (TS) und N_{min} -Mengen (N_{min}) im Boden im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2020

Schnitttermin	Mittelwert			Standardabweichung		
	TM/ha	TS	N_{min}	TM/ha	TS	N_{min}
Einheit	dt/ha	%	kg N/ha	dt/ha	%	kg N/ha
07.05.2020	19,3	13,6	57,7	1,0	0,9	15,8
22.05.2020	37,6	11,5	45,0	4,8	0,4	13,0
04.06.2020	63,4	12,0	40,7	2,9	0,4	19,4
23.06.2020	111,9	11,8	30,3	6,8	0,3	9,1
09.07.2020	140,1	15,9	24,0	11,6	0,4	2,0
29.07.2020	171,1	18,9	23,7	4,5	0,8	1,5
12.08.2020	185,9	22,3	26,3	29,5	1,8	1,2
09.09.2020	178,3	26,8	21,0	2,2	0,8	4,0

Tabelle 47: Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P_2O_5 -Gehalte (P_2O_5), K_2O -Gehalte (K_2O) und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2020

Schnitttermin	Mittelwert				Standardabweichung			
	N	P_2O_5	K_2O	MgO	N	P_2O_5	K_2O	MgO
Einheit	kg/dt TM				kg/dt TM			
07.05.2020	3,90	1,13	5,08	0,73	0,06	0,01	0,53	0,06
22.05.2020	3,08	0,92	4,69	0,70	0,24	0,05	0,30	0,09
04.06.2020	2,66	0,86	4,46	0,81	0,12	0,04	0,04	0,02
23.06.2020	2,07	0,68	3,55	0,79	0,07	0,07	0,32	0,05
09.07.2020	1,64	0,61	2,45	0,85	0,08	0,07	0,27	0,09
29.07.2020	1,22	0,56	2,22	0,74	0,17	0,05	0,10	0,03
12.08.2020	1,05	0,57	2,11	0,74	0,09	0,05	0,18	0,06
09.09.2020	0,92	0,55	1,99	0,72	0,11	0,02	0,16	0,04

Tabelle 48: Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der Trockenmasseerträge (TM/ha), Trockensubstanzgehalte (TS) und N_{\min} -Mengen (N_{\min}) im Boden im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2021

Schnitttermin	Mittelwert			Standardabweichung		
	TM/ha	TS	N_{\min}	TM/ha	TS	N_{\min}
Einheit	dt/ha	%	kg N/ha	dt/ha	%	kg N/ha
27.05.2021	29,9	9,8	26,0	5,0	0,1	5,6
11.06.2021	55,3	10,3	23,3	6,2	0,6	4,5
28.06.2021	94,0	13,7	21,0	4,1	0,5	1,7
07.07.2021	115,9	16,2	27,0	24,5	0,3	5,0
22.07.2021	115,9	16,8	28,0	15,6	0,3	5,0
03.08.2021	152,0	18,2	21,7	13,9	0,4	4,2
01.09.2021	146,3	19,7	27,0	16,9	0,6	14,8
21.09.2021	148,0	23,8	28,3	9,2	0,5	16,0

Tabelle 49: Mittelwerte ($n = 3$) und Standardabweichungen der N-Gehalte (N), P_2O_5 -Gehalte (P_2O_5), K_2O -Gehalte (K_2O) und MgO-Gehalte der oberirdischen Biomasse von Durchwachsener Silphie im Versuch zur Untersuchung des Wachstumsverlaufs von Durchwachsener Silphie im Versuchsjahr 2021

Schnitttermin	Mittelwert				Standardabweichung			
	N	P_2O_5	K_2O	MgO	N	P_2O_5	K_2O	MgO
Einheit	kg/dt TM				kg/dt TM			
27.05.2021	2,83	1,20	4,73	0,59	0,19	0,01	0,31	0,06
11.06.2021	1,92	0,86	4,40	0,57	0,08	0,03	0,20	0,05
28.06.2021	1,55	0,72	3,63	0,63	0,05	0,07	0,17	0,06
07.07.2021	1,33	0,66	3,04	0,73	0,08	0,06	0,05	0,04
22.07.2021	1,14	0,61	2,61	0,64	0,06	0,01	0,32	0,05
03.08.2021	1,02	0,60	2,13	0,64	0,06	0,06	0,07	0,04
01.09.2021	0,89	0,61	1,90	0,65	0,08	0,07	0,09	0,04
21.09.2021	0,93	0,60	1,75	0,50	0,17	0,04	0,14	0,02

Tabelle 50: Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der ersten Folgekultur Wintertriticale an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020

Boniturtermin Umbruchmethode	Mittelwert			Standardabweichung		
	Pflug	Grubber	Fräse	Pflug	Grubber	Fräse
18. März	10,0	33,3	29,5	1,5	6,8	9,4
5. Mai	17,5	24,6	11,5	6,0	8,2	6,0
21. Juli	10,9	10,9	2,8	4,9	4,1	1,6
3. September	8,5	6,5	2,8	9,4	3,3	1,0

Tabelle 51: Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der ersten Folgekultur Silomais an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020

Boniturtermin Umbruchmethode	Mittelwert			Standardabweichung		
	Pflug	Grubber	Fräse	Pflug	Grubber	Fräse
18. März	9,6	64,5	31,8	3,5	8,8	11,1
5. Mai	13,9	23,8	8,1	4,4	11,5	6,2
16. Juni (Triebe mit Herbizidschaden)	11,3	13,4	5,8	3,9	5,7	6,6
16. Juni (Triebe ohne Herbizidschaden)	3,3	1,6	0,9	1,2	1,0	0,6
3. September	6,6	4,0	0,6	4,4	2,6	0,9

Tabelle 52: Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der zweiten Folgekultur Winterweizen an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2021

Boniturtermin Umbruchmethode	Mittelwert			Standardabweichung		
	Pflug	Grubber	Fräse	Pflug	Grubber	Fräse
13. April	1,9	0,6	0,0	0,6	0,8	0,0
22. April	2,5	0,6	0,1	1,1	0,8	0,3
6. Mai (Triebe mit Herbizidschaden)	3,1	0,6	0,1	2,3	0,8	0,3
6. Mai (Triebe ohne Herbizidschaden)	1,8	0,4	0,0	1,0	0,5	0,0
18. Mai	4,4	0,8	0,0	2,3	0,9	0,0
11. August	1,3	0,5	0,0	0,9	0,6	0,0

Tabelle 53: Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in der zweiten Folgekultur Silomais an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2021

Boniturtermin Umbruchmethode	Mittelwert			Standardabweichung		
	Pflug	Grubber	Fräse	Pflug	Grubber	Fräse
23. März	3,6	2,0	0,0	2,4	2,3	0,0
30. März	12,8	8,5	2,0	9,5	7,1	2,3
13. April	20,0	15,9	5,8	11,2	8,1	3,6
18. Mai	8,0	1,3	0,8	3,1	1,2	0,6
1. Juni	18,3	6,5	2,1	6,0	2,5	0,8
17. Juni	11,3	2,0	0,3	4,3	1,8	0,5
8. Juli (Triebe mit Herbizidschaden)	4,8	0,1	0,0	4,3	0,3	0,0
8. Juli (Triebe ohne Herbizidschaden)	1,3	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0
30. September	3,1	0,1	0,0	2,4	0,3	0,0

Tabelle 54: Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesäeter Wintertriticale an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020

Boniturtermin	Mittelwert			Standardabweichung			
	Umbruchmethode	Pflug	Grubber	Fräse	Pflug	Grubber	Fräse
18. März		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5. Mai		0,3	0,8	0,0	0,3	1,2	0,0
21. Juli		6,9	7,5	4,9	3,4	0,8	2,5
3. September		4,5	2,9	1,6	1,7	1,3	1,1

Tabelle 55: Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in nachfolgend gesättem Silomais an verschiedenen Boniturterminen im Versuchsjahr 2020

Boniturtermin	Mittelwert			Standardabweichung			
	Umbruchmethode	Pflug	Grubber	Fräse	Pflug	Grubber	Fräse
18. März		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5. Mai		2,6	2,0	1,4	1,7	1,7	0,8
16. Juni (Triebe mit Herbizidschaden)		3,1	2,1	1,3	1,8	1,8	0,6
16. Juni (Triebe ohne Herbizidschaden)		2,5	3,5	1,4	1,4	2,7	1,7
3. September		8,1	9,5	9,5	0,8	4,0	4,0

Tabelle 56: Mittelwerte ($n = 4$) und Standardabweichungen der Durchwuchstriebe je Quadratmeter nach dem Umbruch von Sida im Frühjahr 2021 in nachfolgend gesättem Silomais an verschiedenen Boniturterminen

Boniturtermin Umbruchmethode	Mittelwert		Standardabweichung	
	Pflug	Fräse	Pflug	Fräse
1. Juni	4,9	1,8	1,5	1,9
17. Juni (Triebe mit Herbizidschaden)	5,6	0,9	3,1	1,4
17. Juni (Triebe ohne Herbizidschaden)	1,0	0,6	0,4	0,9
8. Juli (Triebe mit Herbizidschaden)	1,8	1,4	1,5	0,9
8. Juli (Triebe ohne Herbizidschaden)	4,3	1,4	1,3	0,9
30. September	8,3	4,0	1,3	2,0

Tabelle 57: Nährstoffgehalte der Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsener Silphie im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche

Erntegut	Jahr	Mittelwert				Standardabweichung			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Einheit		kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt
Umbruch									
Triticale Korn	2020	1,63	0,97	0,59	0,24	0,17	0,05	0,01	0,01
Triticale Stroh	2020	0,21	0,42	0,98	0,20	0,05	0,07	0,09	0,03
Mais	2020	0,90	0,50	1,14	0,19	0,07	0,08	0,17	0,03
Weizen Korn	2021	1,58	0,91	0,55	0,20	0,06	0,02	0,01	0,01
Weizen Stroh	2021	0,44	0,18	0,83	0,12	0,03	0,02	0,09	0,01
Mais	2021	0,74	0,46	0,90	0,18	0,08	0,10	0,18	0,04
Praxisfläche									
Mais	2020	1,18	0,35	0,90	0,17	0,11	0,13	0,24	0,04
Weizen Korn	2021	1,73	0,91	0,55	0,19	0,03	0,01	0,01	0,01
Weizen Stroh	2021	0,46	0,15	0,94	0,09	0,04	0,01	0,14	0,01

Tabelle 58: Nährstoffabfuhr der Folgekulturen nach dem Umbruch von Durchwachsender Silphie im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche

Erntegut	Jahr	Mittelwert				Standardabweichung			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Einheit		kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt
Umbruch									
Triticale Korn	2020	34,4	20,6	12,5	5,2	4,1	3,0	2,1	0,8
Triticale Stroh	2020	3,9	8,0	18,9	3,9	0,4	1,5	4,6	1,3
Mais	2020	159,6	87,7	201,2	33,4	23,7	13,6	33,8	4,4
Weizen Korn	2021	69,1	39,8	23,9	8,8	9,2	4,7	2,8	1,0
Weizen Stroh	2021	12,7	5,2	24,2	3,4	2,2	1,1	5,9	0,6
Mais	2021	114,9	72,4	138,2	27,7	20,8	20,8	26,3	27,7
Praxisfläche									
Mais	2020	275,8	83,5	212,1	39,2	28,3	20,2	64,3	12,7
Weizen Korn	2021	90,1	47,2	28,4	10,1	5,5	2,9	1,3	0,9
Weizen Stroh	2021	16,8	5,3	34,1	3,4	3,1	1,0	8,2	0,5

Tabelle 59: Nährstoffgehalte von Triticale und Mais nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche

Erntegut	Jahr	Mittelwert				Standardabweichung			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Einheit		kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
Umbruch									
Triticale Korn	2020	1,47	0,91	0,65	0,21	0,05	0,03	0,04	0,01
Triticale Stroh	2020	0,24	0,37	0,89	0,19	0,04	0,05	0,07	0,01
Mais	2020	0,73	0,50	1,44	0,24	0,06	0,05	0,20	0,02
Praxisfläche									
Mais	2020	0,80	0,28	1,17	0,22	0,02	0,01	0,13	0,02

Tabelle 60: Nährstoffabfuhr von Triticale und Mais nach dem Umbruch von Sida im Herbst 2019 in den ungedüngten Parzellen des Umbruchversuchs und auf benachbarter Praxisfläche

Erntegut	Jahr	Mittelwert				Standardabweichung			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Einheit		kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/dt	kg/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha
Umbruch									
Triticale Korn	2020	29,7	18,3	13,1	4,3	3,9	2,5	1,9	0,7
Triticale Stroh	2020	4,6	6,9	16,8	3,6	1,2	1,5	3,9	0,9
Mais	2020	97,0	67,1	189,2	31,7	17,2	13,2	32,5	6,5
Praxisfläche									
Mais	2020	154,8	54,9	226,6	41,7	11,2	5,4	12,0	1,0

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

- 1 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
- 2 Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
- 3 Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
- 4 Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
- 5 Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
- 6 Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
- 7 Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
- 8 Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
- 9 Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
- 10 Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
- 11 Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
- 12 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
- 13 Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
- 14 Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors
- 15 Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
- 16 Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
- 17 Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
- 18 Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
- 19 Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis

- 20 Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
- 21 Kleine Biomassefeuerungen – Marktbetrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
- 22 Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
- 23 Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
- 24 Charakterisierung von Holzbriketts
- 25 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
- 26 Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
- 27 Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
- 28 Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
- 29 Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
- 30 Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
- 31 Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
- 32 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstanduntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- 33 Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
- 34 Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
- 35 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstanduntersuchungen
- 36 Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
- 37 Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
- 38 Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
- 39 Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
- 40 Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 41 Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605

- 42 Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
- 43 Brennstoffqualität von Holzpellets
- 44 Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
- 45 ExpResBio – Methoden
- 46 Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
- 47 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
- 48 Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayerische Anbaubedingungen
- 49 Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
- 50 Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
- 51 Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor
- 52 Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
- 53 Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
- 54 Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
- 55 Lagerung von Holzhackschnitzeln
- 56 Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
- 57 Optimierungspotenziale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
- 58 Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
- 59 Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapsverarbeitung in Bayern
- 60 Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV
- 61 Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen
- 62 Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)
- 63 Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
- 64 Amaranth als Biogassubstrat – Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amaranthlinien für bayerische Standorte
- 65 Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung
- 66 Einflussfaktoren auf die NO_x-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

- 67 Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL
- 68 Hanf zur stofflichen Nutzung – Stand und Entwicklungen
- 69 Grundlagenorientierte Untersuchungen zum Zünd- und Verbrennungsverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf ein Motorsystem der Abgasstufe V (EVOLUM)
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II
- 72 Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie
- 73 Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen
- 74 Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln
- 75 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie

