

71

Berichte aus dem TFZ

Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehnjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II

Projektpartner:



Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II



Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehnjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II

Lena Förster
Johannes Burmeister
Roswitha Walter
Florian Ebertseder
Dr. Martin Wiesmeier
Jan Solbach
Sebastian Parzefall
Dr. Anja Hartmann
Dr. Maendy Fritz

Projektpartner:



Berichte aus dem TFZ 71

Straubing, April 2021

Titel: Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II

Autoren: Lena Förster (TFZ) Johannes Burmeister (LfL)
Jan Solbach (TFZ) Roswitha Walter (LfL)
Sebastian Parzefall (TFZ) Florian Ebertseder (LfL)
Dr. Anja Hartmann (TFZ) Dr. Martin Wiesmeier (LfL)
Dr. Maendy Fritz (TFZ)

Projektleiter: Allgemeine Projektleitung: Dr. Maendy Fritz (TFZ)
Projektleitung LfL: Roswitha Walter

Mitarbeiter: Franz Heimler (TFZ) Josefa Weinfurter (LfL)
Josef Wittmann (TFZ) Franziska Heine (LfL)
Heide Lummer (TFZ) Sabine Topor (LfL)
Martina Lehner (TFZ) Michael Weber (LfL)
Daniel Leidl (TFZ) Jürgen Kler (LfL)
Veronika Ilmberger (LfL)
Dr. Fabian Lichti (LfL) Monika Dirscherl (LfL)
Vasilis Dandikas (LfL) Heidi Scherzer-Gois (LfL)
Sebastian Wolfrum (LfL) Sandra Schwarzmaier (LfL)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen N/16/08 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2021

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: Förster, Burmeister, Walter, Ebertseder, Wiesmeier, Solbach, Parzefall, Hartmann, Fritz, Grundner

Verlag: Eigenverlag

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2021

Gestaltung: Förster

Fotonachweis: Hartmann (28, 29, 31, 33, 36, 52, 56, 88, 89, 91, 92, 107, 121, 124, 125, 127, 128, 129, 133, 134, 136, 137, 138); Förster (31 links oben, 94, 95, 131, 132); Ebertseder (67); Walter (70, 71, 80); Burmeister (72, 73, 74, 76, 77, 79); Heine (77); Weber (179)

Abstract (deutsch)

Die Vorteile mehrjähriger Energiepflanzen sind bekannt: Sie benötigen keine jährliche Bodenbearbeitung, bieten weitgehende Bodenbedeckung und nach der Etablierungsphase werden meist keine chemischen Pflanzenschutzmittel angewendet. Hinsichtlich Biomasseertrag und Wirtschaftlichkeit können sie an gängige Energiepflanzen leider oft nicht heranreichen. An sechs bayerischen Standorten (Wolferkofen, Aholting, Rosenau, Hötzelshausen, Parsberg und Gelchsheim) wurde die Anbaueignung verschiedener mehrjähriger Energiepflanzen im Vergleich zur Fruchtfolge mit den Kulturarten Mais, Ganzpflanzen-Roggen (GPS) und Weizen untersucht. Die Parzellenversuche umfassten jeweils zwölf Varianten in vier Wiederholungen und 100 m² großen Teilstücken. Sie wurden 2014 bzw. 2015 angelegt und bis Herbst 2019 (Parsberg und Gelchsheim) bzw. Frühjahr 2020 (alle anderen Orte) bewirtschaftet. Ziele waren die Substratqualität des Ernteguts zu unterschiedlichen Erntezeitpunkten, die Fortführung und Ausweitung der ökologischen Bewertung der mehrjährigen Kulturen und Fruchtfolge bezüglich Bodenfauna, Blütenbesucher, Humus, N_{min} und Stickstoff-Bilanz, die mögliche Etablierung von Sida unter verschiedenen Deckfrüchten sowie der Wissenstransfer in die Praxis.

Riesenweizengras der Sorte GreenStar war mit mittleren 136 dt TM/ha und 4354 m³_N Methan/ha die ertragreichste mehrjährige Biogaskultur, dicht gefolgt von Silphie mit 149,1 dt TM/ha, aber nur knapp 3323 m³_N Methan/ha. Das zweischnittige Switchgras erzielte mit 131 dt TM/ha bzw. 3805 m³_N Methan/ha ähnlich hohe Erträge, war dabei aber ausgesprochen ertragsstabil, auch auf schlechteren Standorten und in trockenen Jahren. Silomais hatte mit durchschnittlich 187,5 dt TM/ha und knapp 6493 m³_N Methan/ha die höchsten Erträge, während GPS-Roggen mit den mehrjährigen Kulturen gleichauf lag. Zur Festbrennstoffnutzung war Miscanthus eindeutig ertragsstärker als Switchgras und Sida, das macht die geringere Brennstoffqualität wett. Sida konnte weder als Biogaskultur noch zur thermischen Nutzung überzeugen und ließ sich mit keiner Methode zu einem Pflanzenbestand mit mindestens vier Pflanzen/m² und guter Beikrautunterdrückung etablieren. Diese Art ist nicht praxisreif und ihr Anbau wird nicht empfohlen.

Die Untersuchungen zur Fauna wiesen etwa fünf Jahre nach der Etablierung der Dauerkulturen nach, dass der Regenwurmbestand im Vergleich zu einer Fruchtfolge mit annualen Kulturen und Zwischenfrüchten gefördert wird. Unter allen mehrjährigen Kulturen lag die Siedlungsdichte der Regenwürmer auch nach dem trockenen Jahr 2018 signifikant höher als in der dreigliedrigen Fruchtfolge, die deutliche Einbußen verzeichnete. Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Arthropoden- und Insektenfauna sind die gewonnenen Ergebnisse nicht so eindeutig. Bei den Laufkäfern profitierten samenfressende Arten von der Beikrautflora besonders in der Sida, kleine regulatorische wirksame Laufkäfer finden in der Silphie zum Teil geeignete Winterlager. Das Riesenweizengras kann im Herbst Refugien für pflanzensaugende und andere Insekten bieten.

Aus ökologischer Sicht besitzen die mehrjährigen Energiepflanzen sehr viele Vorteile, so dass die Ergänzung oder teilweise Substitution annualer Kulturen durch mehrjährige Dauerkulturen klar befürwortet wird.

Abstract (englisch)

The advantages of perennial energy crops are well known: they do not require annual tillage, offer extensive soil coverage and after establishment, pesticides are rarely applied. Considering biomass yield and economy, they unfortunately often do not achieve the same level as conventional energy crops. At six Bavarian locations (Wolferkofen, Aholting, Rosenau, Hötzelndorf, Parsberg and Gelchsheim) the suitability for cultivation of various perennial energy crops in comparison to the conventional crop rotation maize, biomass-rye and wheat was evaluated. The experimental design included twelve variants with four replicates each in 100 m² plots. They were established in 2014 and 2015 and cultivated until autumn 2019 (Parsberg and Gelchsheim) and spring 2020 for all other locations. The objectives were to investigate the substrate quality on different harvest dates, to continue and extend the ecological evaluation of the perennial crops as well as the control crop rotation regarding soil fauna, flower visiting species, humus, N_{min}, and nitrogen-balance, the possibility of establishing sida under different cover crops as well as knowledge transfer.

Tall wheat grass, variety GreenStar, was the highest yielding perennial biogas crop with an average of 136.0 dt DM/ha and 4354 m³_N methane/ha. Followed closely by silphium with the highest biomass yield of 149.1 dt DM/ha but only 3323 m³_N methane/ha. Switchgrass, cut twice a year, achieved similarly high yields of 131.0 dt DM/ha and 3805 m³_N methane/ha. Switchgrass turned out to produce stable yields also on poorer soils and in dry years. Silage maize was the highest yielding control crop with an average of 187.5 dt DM/ha and 6493 m³_N/ha methane/ha, whereas biomass-rye was on the same level as the perennial crops. Of the crops investigated as solid fuel, miscanthus yielded clearly higher than sida and switchgrass, thereby compensating the low combustion quality. Sida could not convince neither as a crop for biogas use nor for combustion. By any means it was not possible to establish a plant population of four plants/m² and good weed suppression. This species is not ready for agricultural practice, a recommendation for its cultivation cannot be given.

About five years after the establishment of the perennial crops, investigations of the fauna showed that they enhance the earthworm population in comparison to a crop rotation including annual and catch crops. For all perennial crops the population density of earthworms was significantly higher than in the tripartite crop rotation. Even in the dry year 2018, in which a notable decrease was registered. Regarding the impact on arthropod and insect fauna the findings are less conclusive. Seed eating ground beetles benefitted of the weeds especially in sida, whereas small beneficial ground beetles found suitable hibernation sites in silphium to some extent. Tall wheat grass can offer refuges in autumn for pantsucking and other insects.

From an ecological point of view perennial energy crops have various advantages, the supplementation or partially substitution of annual crops by perennial crops is clearly advocated.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	5
Abstract (englisch)	6
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	19
1 Einleitung	25
2 Stand des Wissens	27
2.1 Kulturen	27
2.1.1 Silphie	27
2.1.2 Sida.....	28
2.1.3 Riesenweizengras	30
2.1.4 Switchgras	32
2.1.5 Miscanthus.....	34
2.2 Ökologie	36
2.2.1 Ergebnisse aus der ersten Projektphase	36
2.2.2 Literaturübersicht zur Fauna mehrjähriger Energiepflanzen	37
2.2.2.1 Silphie	37
2.2.2.2 Miscanthus.....	39
2.2.2.3 Sonstige Kulturen	44
3 Problemstellung und Zielsetzung	47
4 Material und Methoden	49
4.1 Feldversuche (TFZ)	49
4.1.1 Standortbedingungen der Feldversuche	49
4.1.2 Feldversuch Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen	53
4.1.3 Feldversuch Etablierung von Sida.....	58
4.2 Substratqualität (TFZ)	61
4.2.1 Analyse der Methanausbeute.....	62
4.2.2 Analyse der Inhaltsstoffe	63
4.2.3 Brennstoffanalyse	63
4.3 Bestimmung des mineralischen Stickstoffs im Boden	64
4.4 Grundbodenuntersuchung	65
4.5 Auswirkungen von Dauerkulturen auf Umweltparameter (LfL)	65
4.5.1 Humusgehalte und -vorräte	65
4.5.2 Untersuchung bodenphysikalischer Parameter wie Textur, Lagerungsdichte und Porenverteilung	66
4.5.3 Regenwurmfauna	69
4.5.4 Laufkäferfauna (Bodenfallen)	71

4.5.5	Fauna von Riesenweizengras und GPS-Roggen nach der Ernte – Erfassung mit Minibarberfallen.....	75
4.5.6	Arthropodenerfassung mit Laubsaugern (LfL)	77
4.5.7	Insektenfauna von Praxisflächen im Vergleich – Silphie versus Mais	79
4.6	Witterung in den Versuchsjahren (TFZ).....	81
5	Ergebnisse und Diskussion	87
5.1	Feldversuche (TFZ)	87
5.1.1	Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen für eine Verwertung in der Biogasanlage	87
5.1.1.1	Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt.....	87
5.1.1.2	Standort- und Kulturvergleich	100
5.1.1.3	Pflanzenhöhe und Lageranfälligkeit.....	104
5.1.1.4	Entwicklung von Trockensubstanzgehalt und BBCH-Stadium im Erntezeitraum	108
5.1.2	Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen zur thermischen Verwertung ..	111
5.1.2.1	Trockenmasseertrag, Trockensubstanzgehalt und Erntebonituren	111
5.1.2.2	Standort- und Kulturenvergleich	115
5.1.2.3	Pflanzenhöhe und Lageranfälligkeit.....	118
5.1.2.4	Etablierung und Standdauer	121
5.1.3	Etablierung von Sida als Untersaat.....	123
5.1.4	Etablierung von Silphie als Untersaat unter der Deckfrucht Silomais.....	132
5.2	Substratqualität (TFZ).....	138
5.2.1	Entwicklung der Methanausbeute im Erntezeitraum	138
5.2.2	Methanertrag.....	141
5.2.3	Entwicklung der Inhaltsstoffe im Erntezeitraum	145
5.2.4	Nährstoffentzug über das Erntegut der Pflanzen für eine Biogasnutzung.....	149
5.2.5	Brennstoffqualität und Nährstoffentzug thermisch genutzter Energiepflanzen	150
5.3	Bodenstickstoff und -nitrat zum Vegetationsende (TFZ).....	156
5.4	Ökologie (LfL).....	161
5.4.1	Humusgehalte und -Vorräte	161
5.4.2	Textur, Lagerungsdichte und Porenverteilung	167
5.4.3	Regenwurmfauna.....	175
5.4.3.1	Regenwurmfauna von Kulturen für die Biogas-Verwertung.....	176
5.4.3.2	Regenwurmfauna thermisch genutzter Kulturen.....	182
5.4.3.3	Zusammenfassende Bewertung der Wirkung der Dauerkulturen auf Regenwürmer.....	188
5.4.4	Laufkäfer (Bodenfallen).....	190
5.4.5	Fauna von Riesenweizengras und GPS-Roggen nach der Ernte – Erfassung mit Minibarberfallen.....	198
5.4.6	Arthropodenerfassung mit Laubsaugern.....	203
5.4.7	Insektenfauna von Praxisflächen im Vergleich – Silphie versus Mais	208
6	Schlussfolgerung für die Praxis	215
6.1	Pflanzenbau	215
6.2	Boden	218
6.3	Fauna und Biodiversität	219

Quellenverzeichnis 223

Anhang 241

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Silphie: Pflanzen im ersten Jahr (oben links), Bestand im Winter (oben rechts), Blütenbesucher (unten links), Bestand in Blüte (unten rechts) ..28
Abbildung 2:	Sida: Wiederaufwuchs im Frühjahr (oben links), Bestand im Sommer (oben rechts), Blütenbesucher (unten links), abtrocknender Bestand im Winter (unten rechts)29
Abbildung 3:	Riesenweizengras: Wurzeln (oben links), Bestand zur Blüte (oben rechts), Bestand im Herbst im Etablierungsjahr (unten).....31
Abbildung 4:	Switchgras: blühender Bestand im Sommer (links), abtrocknender Bestand im Winter (rechts)33
Abbildung 5:	Miscanthus: Bestand im Sommer (links), abtrocknender Bestand im Winter (rechts)36
Abbildung 6:	Versuchsstandorte (Datenquelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende; © Geo Basis-DE/BKG)51
Abbildung 7:	Versuchsstandort Wolferkofen im Gäuboden (Foto: 25.09.2018)52
Abbildung 8:	Silphie etabliert als Untersaat unter Silomais (Wolferkofen, Foto: 17.08.2017).....56
Abbildung 9:	Probenahme mit Stechzylindern zur Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter; je Beprobungstiefe sechs Stechzylinder als Wiederholung horizontal nebeneinander (links); Durchführung der Probenahme mit Einschlagen der Stechzylinder und anschließendem sorgfältigen Ausgraben (rechts).....67
Abbildung 10:	Regenwurmprobenahme, Aufgießen der Austreibungslösung (links), Einsammeln der an der Bodenoberfläche erschienenen Regenwürmer (Mitte) und anschließende Handauslese ausgegrabenen Bodenmaterials (rechts).....70
Abbildung 11:	Bodenfallen in Riesenweizengras (links) und in Silphie (rechts).....72
Abbildung 12:	Bodenfallen im Winter (09.02.2017) in Rosenau, links Silphie, rechts Riesenweizengras73
Abbildung 13:	Ökologische Gruppen der Laufkäfer (links: Bembidion lampros, Mitte: Amara aenea, links: Carabus granulatus)74
Abbildung 14:	Larven verschiedener Laufkäferarten74
Abbildung 15:	Riesenweizengras (links) und GPS-Roggen (rechts) nach der Ernte in Aholfing am 02.07.2015.....76
Abbildung 16:	Fotos von Minibarberfallen im geernteten Riesenweizengras (links, rechts) und GPS-Roggen (Mitte)76
Abbildung 17:	Mit Laubsaugern beprobte Parzellen in Aholfing am 20.09.2017, von links Mais, Silphie, Sida, Riesenweizengras.....77
Abbildung 18:	Probenahme mit Laubsaugern im Feld (links) und Probeaufbereitung unter dem Binokular im Labor (rechts)77

Abbildung 19:	Lage der Standorte des Silphie- und Mais-Praxisflächen-Vergleichs in Bayern (links; Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung (www.geodaten.bayern.de)) sowie Malaisefalle in Silphie (rechts).....	79
Abbildung 20:	Bestimmung des Insekten-Abtropfgewichts der Malaisefallenfänge.....	80
Abbildung 21:	Witterungsdaten des Versuchsstandorts Aholfing, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)	83
Abbildung 22:	Witterungsdaten des Versuchsstandorts Gelchsheim, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)	83
Abbildung 23:	Witterungsdaten des Versuchsstandorts Hötzelsdorf, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)	84
Abbildung 24:	Witterungsdaten des Versuchsstandorts Parsberg, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)	84
Abbildung 25:	Witterungsdaten des Versuchsstandorts Rosenau, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)	85
Abbildung 26:	Witterungsdaten des Versuchsstandorts Wolferkofen, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)	85
Abbildung 27:	Silphiebestände am Standort Wolferkofen (links, Foto: 02.08.2018) und Gelchsheim (rechts, Foto: 08.08.2018).....	88
Abbildung 28:	Silphiebestände am Standort Aholfing (links, Foto: 02.08.2018) und Parsberg (rechts, Foto: 08.08.2018)	88
Abbildung 29:	Silphieparzelle in Hötzelsdorf (Foto: 23.08.2019)	89
Abbildung 30:	Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Silphie in den Jahren 2017 bis 2019.....	90
Abbildung 31:	Verunkrauteter Sidabestand in Aholfing, Versuchsjahr 2017	91
Abbildung 32:	Verunkrauteter Sida-Bestand am Standort Rosenau, rechter Bildrand Sida zur thermischen Nutzung (Foto: 05.06.2018)	92
Abbildung 33:	Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Sida in den Jahren 2017 bis 2019 (* keine verwertbaren Daten)	92
Abbildung 34:	Riesenweizengras in Rosenau, links die Sorte Alkar, rechts die Sorte GreenStar (Foto: 26.06.2019).....	94
Abbildung 35:	Riesenweizengras in Wolferkofen, vorne die Sorte Alkar, rechts dahinter die Sorte GreenStar (Foto: 26.06.2019).....	94
Abbildung 36:	Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Riesenweizengras, Sorte GreenStar in den Jahren 2017 bis 2019.....	95
Abbildung 37:	Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Riesenweizengras, Sorte Alkar in den Jahren 2017 bis 2019	96
Abbildung 38:	Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Switchgras in den Jahren 2017 bis 2019.....	97

Abbildung 39: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Silomais in den Jahren 2017 bis 2019	98
Abbildung 40: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von GPS-Roggen in den Jahren 2017 bis 2019	99
Abbildung 41: Trockenmasseerträge der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung über die Versuchsjahre und Standorte in den Jahren 2017 bis 2019, (Silphie n = 70, Sida n = 60, Switchgras n = 57, RWG GreenStar n = 68, RWG Alkar n = 72, Mais n = 71, GPS-Roggen n = 68)	102
Abbildung 42: Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung, je Variante und Schnitt über die Versuchsjahre 2017 bis 2019.....	105
Abbildung 43: Lager in der Silphie auf dem Standort Rosenau (Foto: 20.08.2018).....	107
Abbildung 44: Entwicklung des Trockensubstanzgehalts von Riesenweizengras, Silphie, Sida und Switchgras für die Versuchsjahre am Standort Wolferkofen im Erntezeitraum der Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019; rot markiert der Zielwert von mindestens 28 % Trockensubstanzgehalt	110
Abbildung 45: Entwicklung des Trockensubstanzgehalts und des BBCH-Stadiums von Riesenweizengras, Silphie, Sida und Switchgras am Standort Wolferkofen im Erntezeitraum der Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019; rot markiert der Zielwert von mindestens 28 % Trockensubstanzgehalt	111
Abbildung 46: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Miscanthus in den Jahren 2017 bis 2019 bzw. 2020	112
Abbildung 47: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte der Sida in den Jahren 2017 bis 2019 bzw. 2020 (* keine verwertbaren Daten)	114
Abbildung 48: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Switchgras in den Jahren 2017 bis 2019 bzw. 2020	115
Abbildung 49: Trockenmasseerträge der Kulturen zur thermischen Nutzung für die Versuchsjahre 2017 bis 2020 (Miscanthus n = 22, Sida n = 21, Switchgras n = 19)	117
Abbildung 50: Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung, je Variante über die Versuchsjahre 2017 bis 2020	119
Abbildung 51: Lagernder Switchgrasbestand in Aholting; Foto vom 21.03.2017	121
Abbildung 52: Trockenmasseertrag der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung im Mittel der Standorte (2015–2019)	122
Abbildung 53: Trockenmasseertrag der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung im Mittel der Standorte (2016–2020)	122
Abbildung 54: Etablierung von Sida als Untersaat: verunkrautete Kontrolle (links oben); Winterweizen als Deckfrucht (rechts oben); Buchweizen als Deckfrucht (links unten); abgetötetes Ackergras als Deckfrucht (rechts unten) (Foto: 30.06.2017).....	124

Abbildung 55: Etablierung von Sida als Untersaat: Kontrolle (links oben); Winterweizen als Deckfrucht (rechts oben); abgeernteter Buchweizen als Deckfrucht (links unten); Ackergras als Deckfrucht (rechts unten) (Foto: 18.08.2017)	125
Abbildung 56: Kein Feldaufgang in der Normalsaatvariante bedingt durch das trockene Frühjahr (Aussaat Sida in Reinsaat am 02.05.2018, Foto: 23.05.2018)	127
Abbildung 57: Schnell wachsende Deckfrucht Buchweizen (Aussaat Sida und Buchweizen am 02.05.2018, Foto: 23.05.2018)	127
Abbildung 58: Deckfrucht Winterweizen (Aussaat Sida und Winterweizen am 02.05.2018, Foto: 23.05.2018).....	128
Abbildung 59: Guter Feldaufgang der Sida bei früher Saat (Aussaat Sida am 09.04.2018, Foto: 23.05.2018).....	128
Abbildung 60: Akzeptabler Feldaufgang der Herbstsaat trotz schlechter Saatbedingungen (Aussaat Sida am 20.10.2017, Foto: 23.05.2018)...	129
Abbildung 61: Verschlämmung der Herbstsaat (Aussaat Sida am 15.11.2018, Foto: 29.03.2019)	131
Abbildung 62: Gewalzte verschlammte Herbstsaat (Aussaat Sida am 15.11.2018, Foto: 16.04.2019)	131
Abbildung 63: Schlechter und unregelmäßiger Aufgang der Saat im zeitigen Frühjahr (Aussaat Sida am 28.03.2019, Foto: 13.05.2019)	132
Abbildung 64: Lückige Saatreihe der Silphieuntersaat in Wolferkofen (links), Doppelbelegung bei Einzelkornsaat in Aholfing (rechts) (Foto: September 2017)	133
Abbildung 65: Silphieuntersaat unter Silomais am Standort Wolferkofen (Saat: 18.05.2017) (Foto: 12.10.2017)	134
Abbildung 66: Silphie etabliert in Reinsaat am Standort Straubing (Saat: 23.05.2017) (Foto: 18.10.2017).....	134
Abbildung 67: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Mais und Silphie im Untersaatversuch	136
Abbildung 68: Silphie, etabliert in Untersaat unter Silomais am Standort Wolferkofen (Saat: 18.05.2017) (Foto: 19.07.2018).....	136
Abbildung 69: Silphie etabliert in Reinsaat am Standort Straubing (Saat: 23.05.2017), nicht Bestandteil des Projekts (Foto: 19.07.2018)	137
Abbildung 70: Verunkrauteter Silphie-Bestand etabliert in Untersaat unter Silomais am Standort Aholfing (Saat: 22.05.2017) (Foto: 18.07.2018).....	137
Abbildung 71: Verunkrauteter Silphie-Bestand etabliert in Untersaat unter Silomais am Standort Aholfing (Saat: 22.05.2017) (Foto: 19.07.2019).....	138
Abbildung 72: Entwicklung der Methanausbeute der Biogaskulturen im Erntezeitraum des Versuchsjahrs 2017.....	140

Abbildung 73: Entwicklung der Methanausbeute der Biogaskulturen im Erntezeitraum des Versuchsjahrs 2018	140
Abbildung 74: Methanertrag der mehrjährigen Energiepflanzen und der Referenzkulturen zum Haupterntetermin der Versuchsjahre 2017 und 2018 am Standort Wolferkofen	143
Abbildung 75: Ascheerweichungstemperatur der mehrjährigen Energiepflanzen im Erntejahr 2017 und 2018	153
Abbildung 76: Boden-N _{min} -Gehalte im Herbst 2017 (* fehlerhafter NH ₄ -Wert wurde entfernt; US = Untersaat; rot gestrichelte Linie = vergleichbarer Praxisacker in direkter Nachbarschaft).....	158
Abbildung 77: Boden-N _{min} -Gehalte im Herbst 2018 (US = Untersaat; rot gestrichelte Linie = vergleichbarer Praxisacker in direkter Nachbarschaft)	159
Abbildung 78: Boden-N _{min} -Gehalte im Herbst 2019 (US = Untersaat; rot gestrichelte Linie = vergleichbarer Praxisacker in direkter Nachbarschaft)	160
Abbildung 79: Tiefenprofil der Gehalte organischen Kohlenstoffs (C _{org}) an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen).....	162
Abbildung 80: Tiefenprofil der Gesamtstickstoff-Gehalte (N _t) an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen).....	162
Abbildung 81: Tiefenprofil der pH-Werte an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen).	164
Abbildung 82: Masse der Grobwurzeln/Rhizome (> 2 mm) an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen und gestapelt über die erfassten Tiefenstufen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen).....	165
Abbildung 83: Vorrat organischen Kohlenstoffs an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen und gestapelt über die erfassten Tiefenstufen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen)	166
Abbildung 84: Bodenartendreieck mit der Textur an den untersuchten Standorten für den Oberboden (10–15 cm).....	168
Abbildung 85: Gesamtporenvolumen des Bodens in 10–15 cm sowie in 30–35 cm Tiefe im Herbst 2019; links und Mitte: Mittelwert der Varianten je Versuchsstandort; rechts: Mittelwert der beiden Tiefen aller Versuchsstandorte über die Varianten, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen.....	169
Abbildung 86: Trockenrohichte des Bodens in 10–15 cm sowie in 30–35 cm Tiefe im Herbst 2019; links und Mitte: Mittelwert der Varianten je Versuchsstandort; rechts: Mittelwert der beiden Tiefen aller Versuchsstandorte über die Varianten, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen.....	170
Abbildung 87: Porenverteilung an den Versuchsstandorten im Mittel der Varianten, Probenahme Herbst 2019.....	171

- Abbildung 88: Porenverteilung in den Versuchsvarianten an den Versuchsstandorten, Probenahme Herbst 2019 in der Tiefe 10–15 cm 172
- Abbildung 89: Porenverteilung in den Versuchsvarianten an den Versuchsstandorten, Probenahme Herbst 2019 in der Tiefe 30–35 cm 172
- Abbildung 90: Bodenfeuchte der thermischen Kulturen und der Referenz mit Winterweizen im Frühjahr 2019 an sechs Versuchsstandorten (Mittelwerte und Standardabweichung aus n = 20) (* in Parsberg kein Switchgras)..... 174
- Abbildung 91: Winderosion auf einem an den Versuchsstandort Rosenau angrenzenden, bereits abgeernteten Maisfeld (Beobachtung während der Regenwurmprobenahme im Oktober 2018)..... 179
- Abbildung 92: Abundanz der Regenwürmer im Boden als Biogassubstrat genutzter Kulturen je Versuchsstandort vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, n = 4, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen, Beprobung im Herbst 2018, Ausnahme Gelchsheim im Frühjahr 2019)..... 180
- Abbildung 93: Biomasse der Regenwürmer im Boden als Biogassubstrat genutzter Kulturen je Versuchsstandort vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, n = 4, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen, Beprobung im Herbst 2018, Ausnahme Gelchsheim im Frühjahr 2019)..... 181
- Abbildung 94: Änderung der Abundanz (links) und Biomasse (rechts) der Regenwürmer vom Herbst 2015 bis zum Herbst 2018 im Boden als Biogassubstrat genutzter Dauerkulturen im Vergleich zur Referenz (dreigliedrige Fruchtfolge) für vier Versuchsstandorte (Mittelwerte, n = 4; schwarzer Punkt ist das Mittel über die vier Versuchsstandorte)..... 182
- Abbildung 95: Artenakkumulationskurven der Regenwürmer basierend auf Standorten (links) und Proben (rechts) für die Kulturarten über den gesamten Untersuchungszeitraum seit 2015 und einschließlich des Versuchsstandorts Thürnthening (nur in der ersten Projektphase beprobt [85])..... 185
- Abbildung 96: Abundanz der Regenwürmer im Boden thermisch genutzter Kulturen je Versuchsstandort im Frühjahr 2019, vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, n = 4; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen) 186
- Abbildung 97: Biomasse der Regenwürmer im Boden thermisch genutzter Kulturen je Versuchsstandort im Frühjahr 2019, vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, n = 4; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen) 187
- Abbildung 98: Änderung der Abundanz (links) und Biomasse (rechts) der Regenwürmer vom Frühjahr 2016 zum Frühjahr 2019 im Boden der thermisch genutzten Dauerkulturen im Vergleich zur Referenz (dreigliedrige Fruchtfolge) für vier Versuchsstandorte (Mittelwerte, n = 4; schwarzer Punkt ist das Mittel über die vier Versuchsstandorte)..... 188
- Abbildung 99: Zeitlicher Verlauf der Aktivitätsdichte der Laufkäfer im Frühjahr 2017 an den vier untersuchten Standorten (Kurven wurden geglättet [piecewise

polynomial adjustment], Punkte repräsentieren die Aktivitätsdichte in der Mitte des Leerungsintervalls, vertikale Linien stellen die Leerungsintervalle dar)	192
Abbildung 100: Artenakkumulationskurven der Laufkäfer basierend auf Standorten (links) und Proben (rechts) für die vier Kulturarten im Frühjahr 2017	194
Abbildung 101: Ordination (DCA) der Laufkäfer für einzelne Bodenfallen im Frühjahr 2017 für die untersuchten Kulturen auf den vier Versuchsstandorten (Eigenvalues der Achsen DCA1: 0,40, DCA2: 0,24)	195
Abbildung 102: Zeitlicher Verlauf der Aktivitätsdichte von Laufkäferlarven am Standort Rosenau vom Herbst 2016 bis zum Frühjahr 2017 (Kurven wurden geglättet [piecewise polynomial adjustment], Punkte repräsentieren die festgestellte Aktivitätsdichte in der Mitte des Leerungsintervalls, vertikale Linien stellen die Leerungsintervalle dar)	197
Abbildung 103: Aktivitätsdichten der Bodenmesofauna in Individuen je Minibarberfalle in 48 h für die Standorte Aholting (oben) und Rosenau (unten), für die Kulturen Riesenweizengras (RWG) und GPS-Roggen nach der Ernte; links: Mesofauna gesamt (Springschwänze + Milben), Mitte: Springschwänze, rechts Milben; * markiert signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), • Tendenzen ($p < 0,1$).....	199
Abbildung 104: Summe der am Standort Rosenau über fünf Untersuchungsjahre von 2015 bis 2019 jeweils über zwei Fangtage im Juli nach der Ernte der Kulturen mit Minibarberfallen gefangenen Laufkäferindividuen nach ökologischen Gruppen	202
Abbildung 105: Abundanz der mit Laubsaugern im September 2017 erfassten Arthropoden für die Kulturen und die Position an den Standorten, Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts aus $n = 4$	204
Abbildung 106: Zusammensetzung der mit Laubsaugern im September 2017 erfassten Arthropoden als Abundanz für die untersuchten Kulturen (links), die Position der Probenahme (Mitte) und die beprobten Standorte (rechts)	205
Abbildung 107: Venn-Plot mit den Schnittmengen der für die Kulturen mittels Metabarcodings aus Saugproben im September 2017 nachgewiesenen Arthropoden-Arten	206
Abbildung 108: Insekten-Biomasse als Abtropfgewicht pro Tag in Mais- und Silphiefeldern für die sechs im Juli 2018 über einen Zeitraum von jeweils zwei Wochen beprobten Praxisflächen	209
Abbildung 109: Individuenzahlen in Malaisefallen gefangener Arthropoden nach ökologischen Gruppen in Mais- und Silphiepraxisflächen im Juli 2018 (Fangperioden: Froschbach & Lappersdorf 13 Tage, Markt Indersdorf & Petersdorf 14 Tage, Münchberg & Rehau 15 Tage)	210
Abbildung 110: Individuenzahlen in Malaisefallen gefangener Arthropoden ohne Zweiflügler nach ökologischen Gruppen in Mais- und Silphiepraxisflächen im Juli 2018 (Fangperioden: Froschbach & Lappersdorf 13 Tage, Markt Indersdorf & Petersdorf 14 Tage, Münchberg & Rehau 15 Tage).....	211

Abbildung 111: Artenakkumulationskurven der Laufkäfer basierend auf jeweils sechs Standorten von Mais- und Silphiefeldern unter Praxisbedingungen über einen Fangzeitraum von etwa zwei Wochen im Juli 2018 213

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Langjährige mittlere Monatstemperatur und mittlerer Monatsniederschlag (1981–2010, DWD-Station in Klammern)	52
Tabelle 2:	Beschreibung der Versuchsstandorte.....	53
Tabelle 3:	Versuchsplan – „Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen“	54
Tabelle 4:	Pflanz- und Saattermine der mehrjährigen Energiepflanzen.....	55
Tabelle 5:	Referenzfruchtfolge (Hauptfrucht/Herbstaat).....	57
Tabelle 6:	Versuchsplan – „Etablierung von Sida unter Deckfrucht“	60
Tabelle 7:	Saattermine von Anlage B	61
Tabelle 8:	Versuchsplan – „Substratqualität“	62
Tabelle 9:	Methoden der Inhaltsstoffanalyse von den als Biogassubstrat genutzten Kulturen.....	63
Tabelle 10:	Methoden zur Bestimmung der Brennstoffzusammensetzung der thermisch genutzten Kulturen	64
Tabelle 11:	Methoden der Stickstoff-Bodenuntersuchungen	64
Tabelle 12:	Methodik der Grundbodenuntersuchungen	65
Tabelle 13:	Termine der Erhebung der Regenwurmfauna	69
Tabelle 14:	Ökologische Gruppen, Lebensformen der Regenwürmer	71
Tabelle 15:	Leerungs- und Erntetermine sowie Daten zur Witterung für die Minibarberfallen an den Standorten Aholfing und Rosenau	76
Tabelle 16:	Standorteigenschaften und Alter der untersuchten Silphie-Praxisfelder .	81
Tabelle 17:	Trockenmasseertrag nach Standort für die Versuchsjahre; abnehmender Ertrag von links nach rechts sortiert; Mittelwerte aus den Jahren 2016 bis 2019; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen.....	104
Tabelle 18:	Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung, im Mittel über die Standorte und Versuchsjahre 2017 bis 2019.....	106
Tabelle 19:	Lagerbonitur der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung, Häufigkeit der Notenvergabe je Variante und Schnitt über die Versuchsjahre 2017 bis 2019	108
Tabelle 20:	Trockenmasseertrag nach Standort, Mittelwert für die Versuchsjahre 2017 bis 2020; abnehmender Ertrag von links nach rechts sortiert; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen	117
Tabelle 21:	Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung im Mittel je Standort für die Versuchsjahre 2017 bis 2019.....	119
Tabelle 22:	Lagerbonitur der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung, Häufigkeit der Notenvergabe, über alle Versuchsstandorte für die Versuchsjahre 2017 bis 2020	120

Tabelle 23:	Anzahl an Sidapflanzen und Trockenmasseerträge pro Variante (Zählung: 11.06.2018, Ernte: 05.10.2018)	126
Tabelle 24:	Trockenmasse- und Methanerträge im Kulturartenvergleich, alle Standorte einbezogen, Erträge aus Versuchsjahren 2016 bis 2019 (ohne Etablierungsjahre 2014 und 2015)	144
Tabelle 25:	Trockenmasse- und Methanerträge im Kulturartenvergleich mit Berücksichtigung der Standorteignung von Riesenweizengras und Silphie, Erträge aus Versuchsjahren 2016 bis 2019 (ohne Etablierungsjahre 2014 und 2015)	144
Tabelle 26:	Entwicklung der Inhaltsstoffe im Erntezeitraum 2017	147
Tabelle 27:	Entwicklung der Inhaltsstoffe im Erntezeitraum 2018, Mittelwerte mit Standardabweichung (n = 4, außer Switchgras-Termine 2 bis 6, da nur n = 3, und Sida-Termin 1, da Mischprobe).....	148
Tabelle 28:	Mineralstoffentzug mit dem Erntegut der mehrjährigen Energiepflanzen, Versuchsjahre 2017 und 2018, Standort Wolferkofen	149
Tabelle 29:	Verbrennungstechnische Kenndaten und Inhaltsstoffe der mehrjährigen Energiepflanzen je Kultur und Standort; Erntejahr 2017; Vergleichswert für Nadelholz [53]	152
Tabelle 30:	Verbrennungstechnische Kenndaten und Inhaltsstoffe der mehrjährigen Energiepflanzen je Kultur am Standort Wolferkofen; Erntejahr 2018; Vergleichswert für Nadelholz [53]	153
Tabelle 31:	Schüttdichte des Häckselguts; Erntejahr 2017 und 2018; n = 6	154
Tabelle 32:	Nährstoffabfuhr pro Jahr durch das Erntegut; Erntejahr 2017	155
Tabelle 33:	Nährstoffabfuhr pro Jahr durch das Erntegut; Erntejahr 2018; n = 4	155
Tabelle 34:	Anzahl der von den Regenwurmarten besiedelten Versuchsstandorte (n = 7, inklusive des nur in der ersten Projektphase beprobten Standorts Thürnthening [85], für die Kulturen über den gesamten Untersuchungszeitraum (Projektphasen I und II von 2015 bis 2019) ...	175
Tabelle 35:	Abundanz, Biomasse und Artenvielfalt der Regenwürmer im Boden als Biogassubstrat genutzter Kulturen im Mittel über sechs Versuchsstandorte vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Beprobung im Herbst 2018, Ausnahme Gelchsheim im Frühjahr 2019; Lumbricus spec.: streubewohnende, tiefgrabende Arten; sonstige Arten: v. a. Mineralbodenformen)	177
Tabelle 36:	Abundanz und Biomasse der Regenwürmer im Boden thermisch genutzter Kulturen im Frühjahr 2019 im Mittel über alle sechs Versuchsstandorte vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen; Lumbricus spec. (adulte streubewohnende und tiefgrabende Arten), sonstige Arten (v. a. adulte Mineralbodenformen, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)	184
Tabelle 37:	Ergebnisse zur Laufkäferfauna im Frühjahr 2017 über die vier untersuchten Standorte Rosenau, Wolferkofen, Aholfing und Hötzelsdorf (Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)	193

Tabelle 38:	Ergebnisse der Untersuchung der Laufkäferfauna in der verlängerten Fangperiode über den Winter (17.10.2016–02.03.2017) in Rosenau (Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen).....	196
Tabelle 39:	Ergebnisse zur Untersuchung der Laufkäferfauna mit Minibarberfallen am Standort Rosenau in den Jahren 2015, 2016, 2017, 2018 und 2019 für jeweils zwei Fangtage im Juli unmittelbar nach der Ernte der Kulturen (Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen).....	201
Tabelle 40:	Erfasste Arten aus Saugfang im September 2017, die nach der Indikator-Arten-Analyse eine Bindung an eine spezifische Kulturart aufwiesen (Daten aus Metabarcoding)	207
Tabelle 41:	Ergebnisse der Laufkäferfauna für Mais- und Silphiefelder unter Praxisbedingungen im Juli 2018 auf jeweils sechs Standorten in Bayern	212
Tabelle 42:	Mittlere Monatstemperatur im Versuchsjahr 2017 (Wetterstation in Klammern)	241
Tabelle 43:	Mittlere Niederschlagssumme im Versuchsjahr 2017 (Wetterstation in Klammern)	241
Tabelle 44:	Mittlere Monatstemperatur im Versuchsjahr 2018 (Wetterstation in Klammern)	242
Tabelle 45:	Mittlere Niederschlagssumme im Versuchsjahr 2018 (Wetterstation in Klammern)	243
Tabelle 46:	Mittlere Monatstemperatur im Versuchsjahr 2019 (Wetterstation in Klammern)	243
Tabelle 47:	Mittlere Niederschlagssumme im Versuchsjahr 2019 (Wetterstation in Klammern)	244
Tabelle 48:	Bodennährstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2017	245
Tabelle 49:	Bodennährstoffgehalt zu Vegetationsende 2019.....	247
Tabelle 50:	Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2017	249
Tabelle 51:	Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2018	250
Tabelle 52:	Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2019	250
Tabelle 53:	Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsende 2017	251
Tabelle 54:	Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsende 2018.....	252
Tabelle 55:	Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsende 2019.....	253
Tabelle 56:	Erntetermine der mehrjährigen Kulturen für die Biogasnutzung in 2017	253
Tabelle 57:	Erntetermine der mehrjährigen Kulturen für die Biogasnutzung in 2018	254
Tabelle 58:	Erntetermine der mehrjährigen Kulturen für die Biogasnutzung in 2019	254

Tabelle 59:	Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2017	255
Tabelle 60:	Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2018	255
Tabelle 61:	Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2019	255
Tabelle 62:	Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2020	255
Tabelle 63:	Saattermine der einjährigen Referenz-Kulturen (2016/17)	255
Tabelle 64:	Saattermine der einjährigen Referenz-Kulturen (2017/18)	256
Tabelle 65:	Saattermine der einjährigen Referenz-Kulturen (2018/19)	256
Tabelle 66:	Stickstoffdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2017	256
Tabelle 67:	Stickstoffdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2018	257
Tabelle 68:	Stickstoffdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2019	257
Tabelle 69:	Calciumdüngung im Versuchsjahr 2017	258
Tabelle 70:	Phosphordüngung je Hektar im Versuchsjahr 2017	258
Tabelle 71:	Phosphordüngung je Hektar im Versuchsjahr 2018	259
Tabelle 72:	Phosphordüngung je Hektar im Versuchsjahr 2019	259
Tabelle 73:	Kaliumdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2017	260
Tabelle 74:	Kaliumdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2018	260
Tabelle 75:	Kaliumdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2019	261
Tabelle 76:	Einsatz chemischer Pflanzenschutz- und Halmverkürzungsmittel im Versuchsjahr 2017	261
Tabelle 77:	Einsatz chemischer Pflanzenschutz- und Halmverkürzungsmittel im Versuchsjahr 2018	262
Tabelle 78:	Einsatz chemischer Pflanzenschutz- und Halmverkürzungsmittel im Versuchsjahr 2019	263
Tabelle 79:	Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2017 (Mittelwerte) ..	264
Tabelle 80:	Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2018 (Mittelwerte) ..	266
Tabelle 81:	Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2019 (Mittelwerte) ..	269
Tabelle 82:	Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2020 (Mittelwerte) ..	271
Tabelle 83:	Boniturwerte der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2017 (Mittelwerte n = 4 und Standardabweichung)	272

Tabelle 84:	Boniturwerte der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2018 (Mittelwerte n = 4 und Standardabweichung).....	274
Tabelle 85:	Boniturwerte der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2019 (Mittelwerte n = 4 und Standardabweichung).....	277
Tabelle 86:	Nährstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras, Versuchsjahr 2017; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung	279
Tabelle 87:	Nährstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras, Versuchsjahr 2018; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung	281
Tabelle 88:	Mineralstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras, Versuchsjahr 2017; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung	283
Tabelle 89:	Mineralstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras in g/kg TM, Versuchsjahr 2018; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung	284
Tabelle 90:	Methanausbeute der Energiepflanzen zur Biogasnutzung, im Batchversuch ermittelt 2017	285
Tabelle 91:	Methanausbeute der Energiepflanzen zur Biogasnutzung, im Batchversuch ermittelt (2018).....	286
Tabelle 92:	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen (Rammkernsonde) im Oktober 2019 als Mittelwert aus vier Wiederholungen	287
Tabelle 93:	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen (Stechzylinderproben) im Oktober 2019 als Mittelwert aus vier Wiederholungen, für TRD, GPV, Totwasser, FK, nFK mit je sechs Einzelproben je Wiederholung	289
Tabelle 94:	Artenliste der Laufkäfer an den vier untersuchten Standorten für den Zeitraum 02.03.2017 bis 16.05.2017	290
Tabelle 95:	Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Aholting für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	292
Tabelle 96:	Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Gelchsheim für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4)	293
Tabelle 97:	Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Hötzeldorf für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4)	294
Tabelle 98:	Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Parsberg für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	295
Tabelle 99:	Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Rosenau für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	296
Tabelle 100:	Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Wolferkofen für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4)	297
Tabelle 101:	Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Aholting für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	298
Tabelle 102:	Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Gelchsheim für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4)	299

Tabelle 103:	Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Hötzelndorf für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	300
Tabelle 104:	Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Parsberg für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	301
Tabelle 105:	Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Rosenau für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	302
Tabelle 106:	Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Wolferkofen für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte n = 4).....	303
Tabelle 107:	Aktivitätsdichte der mit Minibarberfallen in 48 Stunden erfassten Tiergruppen	304

1 Einleitung

Die Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen hat stark zugenommen, vor allem Silomais spielt dabei im Biogassektor eine große Rolle. Aufgrund der Forderung nach umweltschonenden Anbaumethoden sollen jedoch weitere Kulturen hinsichtlich ihrer Anbaueignung geprüft werden. Besonders der Energiepflanzenanbau und der Mais als Rohstoff für die Biogasproduktion werden in der Öffentlichkeit oft kritisch diskutiert. Enge Fruchtfolgen, ein intensiver Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln sowie die Struktur- und Artenarmut der Agrarlandschaft sind einige der Kritikpunkte. Während im Biogasbereich sowohl durch die öffentliche Debatte als auch durch die Einführung des Maisdeckels alternative Substrate ohnehin dringend gesucht werden, ist die thermische Verwertung nicht holziger Rohstoffe derzeit noch ein Nischengeschäft ohne größere Flächenbedeutung. Zunehmende Verwertungsmöglichkeiten energetischer und stofflicher Art können jedoch auch hier in Zukunft einen steigenden Bedarf erzeugen. Eine nachhaltige landwirtschaftliche Produktion wird in Zukunft nicht um die vorausschauende Berücksichtigung von Aspekten des Schutzes von Boden, Wasser, Luft und Biodiversität herumkommen. Über diese Aspekte im Zusammenhang mit den produktiven Leistungen Kenntnisse zu gewinnen und mögliche Synergien zu fördern, ist eine wichtige Aufgabe aktueller angewandter agrarökologischer Forschung. Aufgrund der Gunststellung der Landwirtschaft unter mitteleuropäischen Standortbedingungen ist hierbei insbesondere der Bereich der hochproduktiven, aber deutlich umweltverträglicheren Landnutzungsoptionen zu prüfen.

Mehrjährige Kulturen, wie z. B. Miscanthus, Durchwachsene Silphie oder Riesenweizen-gras, haben zumindest im Energiepflanzenbereich das Potenzial, Ökosystemleistungen der Agrarlandschaft zu fördern und zur Erhaltung der für diesen Raum typischen biologischen Vielfalt beizutragen. Sie sorgen für mehr Vielfalt an Kulturen und Habitaten und können das Deckungs- und Lebensraumangebot für die Agrarfauna erweitern. Abhängig von der Fruchtart liefern ihre Blüten Nahrung für Insekten in einer Zeit, in der eine wenig strukturierte Agrarlandschaft nur ein geringes Nahrungsangebot bereitstellt. Mehrjährige Energiepflanzen bieten zudem eine nahezu ganzjährige Bodenbedeckung. Nach dem Etablierungsjahr kann auf die jährliche Bodenbearbeitung verzichtet werden, wodurch Zeit, Kosten und Ressourcen eingespart werden. Der kontinuierliche Bewuchs in Verbindung mit einer meist intensiven Durchwurzelung reduziert das Risiko für Bodenerosion und Nährstoffauswaschung. Zudem ermöglicht die Mehrjährigkeit der Kulturen die Entwicklung eines tiefreichenden Wurzelsystems, das bei extremer Trockenheit von Vorteil sein kann. Dieser Aspekt wird gerade im Hinblick auf den Klimawandel und die erwartete Häufung von Extremwetter zur Risikoabsicherung wichtiger. Die lange Bodenruhe und die intensive Durchwurzelung können sich möglicherweise positiv auf den Humusaufbau im Boden auswirken.

In einer ersten Projektphase wurden auf sechs Standorten erfolgreich Versuchspartzen mit Miscanthus, Durchwachsener Silphie, Riesenweizen-gras, Sida und Switchgras etabliert. Erste Ertragsergebnisse und Erfahrungen mit dem Anbau und der Kulturführung liegen bereits vor [85]. Die Ertragsstabilität über mehrere Jahre ist insbesondere für mehrjährige Kulturen, die meist im ersten Jahr hohe Etablierungskosten verursachen,

wesentlich. Die aktuell dargestellte zweite Projektphase soll zeigen, wie sich die Erträge auf den unterschiedlichen Standorten über mehrere Jahre entwickeln.

Hinsichtlich der Etablierung hat sich in der ersten Projektphase besonders die Kultur Sida als problematisch erwiesen. Diese Pflanze schließt die Reihen nur sehr langsam und ist im Etablierungsjahr sehr konkurrenzschwach gegenüber Unkraut. Herbizide werden so gut wie gar nicht vertragen [85]. Daher soll in der aktuellen Projektphase ein produktions-technischer Versuch die Möglichkeiten der Etablierung als Untersaat prüfen.

Eine Bewertung der Umwelteffekte des Anbaus mehrjähriger Energiepflanzen erfolgt gemeinsam mit dem Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Es werden ökologische Parameter, wie Veränderungen des Bodenlebens, Aktivität und Artenvielfalt der Fauna auf der Bodenoberfläche sowie Attraktivität der Pflanzen für Blütenbesucher erforscht. Dies soll wichtige Erkenntnisse zur Einschätzung des agrarökologischen Potenzials mehrjähriger Energiepflanzen liefern.

In der zweiten Projektphase „Etablierung, Ertragsstabilität und Langzeit-Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen“ wird die Untersuchung des Einflusses mehrjähriger Energiepflanzen auf die Fauna an unterschiedlichen Standorten in Bayern in den nun etablierten Kulturen fortgeführt. Durch vielfältige Methoden und Indikatororganismen (Regenwürmer, Laufkäfer, Bodenmesofauna, flugfähige Insekten) wird ein breites Spektrum faunistischer Aspekte mehrjähriger Energiepflanzen abgebildet. Die Beurteilung der Biodiversität als Gesamtheit ist durch die sehr aufwendige und unvollständige Erfassbarkeit sowie die starke Abhängigkeit vom räumlichen Kontext grundsätzlich schwierig. Umso wichtiger ist es, die Wirkung landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsoptionen auf einzelne Bestandteile der Biodiversität zu kennen, besonders wenn diese – wie beispielsweise die Regenwürmer – wichtige funktionale Leistungen für die Landwirtschaft erbringen. Auch hinsichtlich der Auswirkungen mehrjähriger Energiepflanzen auf die Bodenstruktur und den Bodenkohlenstoffhaushalt fehlen Ergebnisse für bayerische Standortverhältnisse. Diese sind für die Beurteilung der Auswirkungen dieser Kulturen auf Bodenfruchtbarkeit und Kohlenstoffbilanz wichtig.

2 Stand des Wissens

2.1 Kulturen

2.1.1 Silphie

Die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L., im folgenden Silphie, Abbildung 1) ist ein mehrjähriger Korbblütler aus dem Osten Nordamerikas [172]. Sie wurde ursprünglich als Futterpflanze eingeführt, konnte sich aber aufgrund geringer Akzeptanz bei Wiederkäuern nicht durchsetzen. In Deutschland wird sie meistens zur Produktion von Biogassubstrat angebaut. Ihre Nutzungsdauer wird mit 15 [172] bis zu 20 Jahren angegeben [51] [139].

Im Ansaatjahr bildet die Silphie nur eine bodenbürtige Rosette aus, ab dem zweiten Standjahr wächst sie bis zu 3 m in die Höhe. Dabei wachsen aus jeder Staude drei bis zehn vierkantige Stängel [108]. Die Blätter sind kreuzgegenständig angeordnet und an der Basis zu einer Art Becher verwachsen, weshalb die Silphie auch Becherpflanze genannt wird [138]. Die Silphie beginnt im Juli zu blühen und bildet bis in den September hinein neue Blüten, sowohl die Blüte als auch die Reife erstreckt sich über einen relativ langen Zeitraum [108]. Die Silphie hat einen eher kompakten Wurzelstock und bildet ein großes Wurzelwerk aus [73]. Nach Mittsommer bilden sich mehrere Knospen unterirdisch an der Basis und sind bis zum ersten Frost voll ausgebildet. Nach dem ersten Frost sterben Blätter und Stängel ab [172].

Die Silphie stellt keine besonderen Ansprüche an die Vorfrucht. Raps, Sonnenblumen und Buschbohnen sollten aber nicht zuvor zum Anbau kommen [135]. Es kann zu Befall mit *Sclerotinia* kommen, bei stärkerem Befall sollte schnellstmöglich geerntet werden, um die Bildung von Dauerkörpern einzuschränken. Da sich die Silphie im ersten Jahr relativ langsam entwickelt, ist eine Unkrautkontrolle notwendig. Ab dem zweiten Jahr schließt sie die Bestände und eine Unkrautbekämpfung ist meist nicht mehr nötig [108]. Die Silphie hat keine besonderen Ansprüche an den Boden, auf humosen Standorten mit guter Wasserführung wächst sie am besten. Staunasse Standorte sind für den Anbau nicht geeignet [189]. Sie gehört zu den C₃-Pflanzen und ist winterfest, sie kann Temperaturen bis zu -30 °C überstehen [172].

Anfangs wurde die Silphie zur Etablierung häufig gepflanzt, mittlerweile wird sie meist als Direktsaat, häufig auch als Untersaat unter Mais, etabliert. Silphiesamen haben eine hohe Keimruhe und sind zur direkten Aussaat nicht geeignet. Geeignete Vorbehandlungstechniken erhöhen die Keimfähigkeit auf 80 bis 90 % [135]. Eine Auswahl verschiedener Silphie-Sorten ist derzeit nicht geboten, unterschieden wird nur nach der ursprünglichen Herkunft des Pflanzenmaterials. In Versuchen am TFZ in Straubing wurden eine thüringische, norddeutsche, amerikanische und eine russische Herkunft geprüft. Dabei schnitten die thüringische und die norddeutsche Herkunft hinsichtlich des Ertrags am besten ab [175].

Die Aussaat erfolgt im Frühjahr auf eine möglichst unkrautfreie Fläche. Im ersten Jahr sollte eine mechanische oder chemische Unkrautkontrolle erfolgen [85]. Die Ernte erfolgt meist gegen September.



Abbildung 1: Silphie: Pflanzen im ersten Jahr (oben links), Bestand im Winter (oben rechts), Blütenbesucher (unten links), Bestand in Blüte (unten rechts)

2.1.2 Sida

Zu den mehrjährigen Energiepflanzen, die sowohl in der Biogasanlage als auch thermisch genutzt werden können, gehört die Sida (*Sida hermaphrodita* L. Rusby, Abbildung 2), ein Malvengewächs aus dem südlichen Nordamerika. Die Nutzungsdauer wird mit zehn [19] bis 20 Jahren angegeben [20].

Im ersten Anbaujahr steckt die C₃-Pflanze die meiste Kraft in die Ausbildung ihres Wurzelsystems. Die Jugendentwicklung ist deshalb langsam und der oberirdische Aufwuchs bleibt im ersten Jahr für eine Nutzung noch zu gering. Ab dem zweiten Jahr beginnt die Staude in die Höhe zu wachsen und bildet einen robusten Strauch aus [1]. Jedes Frühjahr entstehen aus den vorhandenen Wurzelknospen 20 bis 40 Triebe. Diese erreichen jährlich eine Höhe von drei bis vier Metern [20].

Sida soll tolerant gegenüber der Bodenqualität sein [19], als Ausschlusskriterium gelten lediglich Staunässe und sehr trockene Böden [105]. Ertragsbestimmender Faktor ist eine genügende Wasserversorgung des Bodens [19]. Auf leichten und sandigen Böden muss

mit niedrigen Erträgen gerechnet werden [20]. Je wärmer das Klima und je besser der Boden, umso besser ist das Wachstum [105]. Kälte und Trockenzeit während des Frühjahrs können Keimung und Austrieb verzögern. Pflanzen mit starkem Wurzelsystem können jedoch zeitweilige Trockenheit und polnische Winterkälte von bis zu -35°C problemlos überstehen [20].



Abbildung 2: Sida: Wiederaufwuchs im Frühjahr (oben links), Bestand im Sommer (oben rechts), Blütenbesucher (unten links), abtrocknender Bestand im Winter (unten rechts)

Sida kann gepflanzt oder gesät werden [21]. Die Pflanzung ist mit deutlich höheren Kosten und Arbeitsaufwand verbunden [105]. Die Samen haben eine hohe Dormanz, die aber durch Heißwasserbehandlung gesteigert werden kann [109]. Sie läuft teilweise unregelmäßig und über einen langen Zeitraum auf [73]. Eine mechanische Beikrautregulierung ist zwingend notwendig für die anfänglich nur wenig durchsetzungsfähige Pflanze [105]. Herbizide werden nicht oder nur schlecht vertragen [85].

Gegen Krankheiten und Schädlingsbefall sind die Pflanzen nur wenig anfällig [20], gegenüber dem Schaderreger *Sclerotinia sclerotiorum* anfällige Kulturen sind jedoch nicht als Vorfrucht geeignet [105].

Der Erntetermin richtet sich nach der vorgesehenen Verwendung. Für die Verarbeitung zu Biogas können die Pflanzen entweder zweimal während der Vegetationsperiode oder

einmal im frühen Herbst geerntet werden [20]. Für die thermische Verwertung wird der abgestorbene Bestand in den Wintermonaten Januar bis März geerntet, wenn die Pflanze einen lagerfähigen Trockensubstanzgehalt von 80 bis 85 % aufweist [105].

2.1.3 Riesenweizengras

Das Riesenweizengras (*Agropyron eolongatum* oder *Elymus elongatus* [41], Abbildung 3) gehört zur Familie der Süßgräser und stammt ursprünglich aus Vorderasien/Russland. Das Riesenweizengras gehört zur Gattung der Quecke (*Elymus*) und wird umgangssprachlich auch als „Stumpfbblütige Quecke“ bezeichnet [162]. Zugelassene Pflanzenschutzmittel findet man unter der Bezeichnung „Langährige Quecke“ [29]. Es hat jedoch kein invasives Potenzial, da es keine unterirdischen Ausläufer wie die Quecke bildet [162]. Das Horst bildende Gras wird bis zu 3 m groß, mit aufrechten, kahlen Halmen und endständiger Ähre.

Als C₃-Gras hat Riesenweizengras eher geringere Ansprüche an die Temperatur. Es gehört zu den sogenannten *Cool-Season*-Gräsern, deren Hauptentwicklung zur kühleren Jahreszeit im Frühjahr und Herbst stattfindet [41] und die im Sommer eine Wachstumpause einlegen. Zur Nutzung als Biogassubstrat wird das Gras zweimal pro Jahr, im Frühsommer und im Spätherbst, geschnitten. Zur Erhaltung des Bestands sollte eine Schnitthöhe von zehn Zentimetern nicht unterschritten werden [92]. Es kann von einer Nutzungsdauer von fünf bis acht Jahren ausgegangen werden [48], wobei die Verunkrautung, bedingt durch die Wachstumpause des Grases im Sommer, über die Jahre problematisch werden kann.

Riesenweizengras hat in der Regel einen guten Feldaufgang und keimt zügig, sofern genügend Feuchtigkeit im Boden vorhanden ist. Die Aussaat kann von März bis September erfolgen. Sommertrockenheit kann ein Problem darstellen, auf feuchte Bedingungen zur Saat ist zu achten. Bei einer Aussaat im März bietet sich auch eine Aussaat als Untersaat in einem Sommergetreide an, das im Juni zur GPS-Nutzung geerntet wird [85]. Die Entwicklung im ersten Jahr geht langsam vonstatten, das Gras steckt die meiste Energie in die Ausbildung des Wurzelsystems. Dieses ist fein verzweigt und kann bis zu 3,5 m tief reichen [41]. Im Etablierungsjahr bleibt der Aufwuchs des Grases eher gering, ein Schnitt dient mehr der Pflege und einer Anregung der Bestockung als der Ernte von Biomasse.

Das Gras stellt keine besonderen Ansprüche an Boden oder Klima [152]. Es kann als trockentolerant betrachtet werden, da es besser an die immer häufiger auftretenden Frühsommertrockenheiten angepasst ist als übliche Sommerungen, und es könnte weniger trockentolerante Gräser für die Biogasproduktion ersetzen [50]. Riesenweizengras kann auf alkalischen Böden mit einem pH-Wert von 6,5 bis 10 wachsen, optimal sind pH-Werte von 7,5 bis 9. Wenn die Kultur gut entwickelt ist, nach zwei bis drei Jahren, ist die Überflutungstoleranz relativ gut, im Etablierungsjahr hingegen vertragen die jungen Pflanzen keine permanente Wasserbedeckung. Hohe Salzkonzentrationen verträgt das Gras nur in feuchten Habitaten [41].



Abbildung 3: Riesenweizengras: Wurzeln (oben links), Bestand zur Blüte (oben rechts), Bestand im Herbst im Etablierungsjahr (unten)

Aufgrund der langsamen Jugendentwicklung sind häufig vor allem in den ersten beiden Anbaujahren Pflanzenschutzmaßnahmen erforderlich. Im Herbst des Etablierungsjahrs sollte ein Pflege- oder Schröpfschnitt durchgeführt werden, um Unkrautkonkurrenz zu vermeiden und die Bestockung anzuregen [48].

2.1.4 Switchgras

Switchgras (*Panicum virgatum*, Abbildung 4) ist ein perennierendes *Warm-Season-C₄*-Gras [116] und hat den meisten Aufwuchs im Juni, Juli und August [202]. Switchgras gehört zur Familie der *Poaceae*, Unterfamilie *Panicoideae*. Es stammt aus Nordamerika, wo es vom 55. Breitengrad bis Zentralmexiko natürlich vorkommt. Es ist ein wichtiger Bestandteil nordamerikanischer Grasland-Ökosysteme [116]. Switchgras kann sowohl in der Biogasanlage als auch thermisch genutzt werden. Die zu erwartende Standdauer beträgt zehn Jahre oder mehr [116].

In südlichen Teilen der USA kann Switchgras mehr als 3 m groß werden und entwickelt Wurzeln bis zu einer Tiefe von mehr als 3,5 m [197]. Es hat kurze Rhizome [116] und die Wurzeln sind wenig verzweigt [197]. Die meisten Triebe bilden bei ausreichender Feuchtigkeit eine Blüte aus. Die Infloreszenz ist eine 15–55 cm lange lockere Rispe [116].

Switchgras zeigt mehrere wünschenswerte Attribute, darunter eine hohe Produktivität über eine weite geografische Spannweite, eine hohe Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz und positive Umweltwirkungen. Dies sind Effekte auf Bodenqualität und Stabilität und relativ niedriger Input von Energie, Wasser und Agrochemikalien pro Einheit produzierte Energie [128]. Anbauerfahrungen und genetische Variabilität aus den USA können genutzt werden [116]. Weiterhin bietet es Erosionsschutz und Wildtieren Nistplätze und Unterschlupf [202].

Sowohl MCLAUGHLIN *et al.* (1999) als auch LEWANDOWSKI *et al.* (2003) betonen die Wichtigkeit der Sortenwahl. Sorten, die zum Hochlandtyp gehören, werden eher für nördliche Gebiete der USA empfohlen, Sorten, die zum Tieflandtyp gehören, für südlichere Gebiete [116] [129]. Switchgras hat die Fähigkeit, auch auf relativ schlechten Standorten, auf denen die Wasser- und Nährstoffversorgung den erfolgreichen Anbau konventioneller Kulturen einschränkt, hohe Erträge zu liefern, da es sehr trockentolerant ist [116] [202]. Der Boden-pH-Wert sollte fünf oder höher betragen [202].

Das Gras kann per Saat etabliert werden [116]. Es sollte auf Saatgut mit einer hohen Keimfähigkeit geachtet werden, da Switchgrassamen bei Ernte häufig einen hohen Anteil dormanter Samen haben. Die Dormanz kann durch zwei bis vier Jahre Lagerung oder durch Stratifikation unter kühl-feuchten Bedingungen gebrochen werden [202]. Als Feinsämerei ist es empfindlich gegenüber der richtigen Saattiefe (etwa 0,6–1,2 cm) und braucht ein rückverfestigtes Saatbett und Unkrautkontrolle im ersten Jahr. Dies ist besonders wichtig, wenn es gesät wird, bevor ihm warme Temperaturen ermöglichen, mit kaltkeimenden Unkräutern zu konkurrieren [129], da es bei Temperaturen unter 15,5 °C sehr langsam keimt. Unkräuter können ein größeres Problem in der Switchgrasetablierung werden, insbesondere einjährige Sommerunkräuter. Sie können durch eine geeignete Vorfrucht reduziert werden [202].

In etablierten Beständen gibt es laut WOLF und FISKE (2009) meistens wenig Krankheitsprobleme und keine Schadinsekten [202]. Es kann aber von mehreren Krankheiten befallen werden, wie dem *Panicum mosaic virus* oder Rost (*Puccinia spp.*) [116].

Für die Biogasnutzung wird Switchgras ein- bis zweimal während der Vegetationsperiode geschnitten, für die thermische Nutzung trocknet es über Winter ab und wird dann im zeitigen Frühjahr geerntet. Wenn Switchgras vor der Ernte abtrocknet, werden die Nährstoffe ins Rhizom zurückverlagert. Eine Ernte entzieht dann weniger Nährstoffe [116].

Untersuchungen von Wurzelverteilungen deuten darauf hin, dass die lebende Wurzelbiomasse in den ersten 30 cm annähernd bei zwei Drittel der jährlichen Ernte an überirdischer Biomasse lag. Da Switchgras so viel Energie in die Wurzelbildung verlagert, werden Bestände im ersten Jahr meist nicht geerntet, das volle Ertragspotenzial wird im dritten Jahr erreicht. Auch die Etablierung einer aktiven Mykorrhiza und die damit assoziierte Mikrobengemeinschaft können Zeit brauchen, um sich zu entwickeln, hohe Stickstoffgaben können dabei inhibierend wirken. Die Ausbildung eines weitreichenden Wurzelsystems ist ein extrem wichtiger Aspekt der ökologischen Anpassungsfähigkeit, des Ertragspotenzials auf Grenzstandorten und der bodenbewahrenden Eigenschaften von Switchgras [129].



Abbildung 4: Switchgras: blühender Bestand im Sommer (links), abtrocknender Bestand im Winter (rechts)

2.1.5 Miscanthus

Miscanthus (auch Chinaschilf genannt, Abbildung 5) ist im südostasiatischen Raum von Sibirien bis zum Kaspischen Meer beheimatet und in China, Japan und Korea am weitesten verbreitet [177]. 1935 wurde er von Japan nach Europa eingeführt [117]. Miscanthus ist eine mehrjährige Kultur, die meist für die thermische Nutzung angebaut wird, aber auch als Einstreu, Dämmstoff oder zur Papierherstellung genutzt werden kann. Es ist eine C₄-Pflanze und gehört zur Familie der *Poaceae*, der Süßgräser. Hauptsächlich wird der Hybrid *Miscanthus x giganteus* angebaut. Dieser ist in Japan durch eine zufällig stattgefundenen Kreuzung zwischen *Miscanthus sacchariflorus* und *Miscanthus sinensis* entstanden [177]. Da *Miscanthus x giganteus* steril ist, muss er vegetativ vermehrt werden, entweder durch Teilen von Rhizomen oder durch In-vitro-Kulturen [40]. Dadurch hat *Miscanthus x giganteus* (im Weiteren vereinfacht Miscanthus) eine enge genetische Basis [116]. Einen einzigen Klon zu nutzen, beinhaltet daher ein beachtliches Risiko für Schädlinge und Krankheiten [40]. Weiterhin verursacht die Notwendigkeit, Miscanthus vegetativ zu vermehren, hohe Etablierungskosten [116].

Die Rhizome werden im Frühjahr mit einer Pflanze pro m² gepflanzt [95]. Miscanthus kann bis zu 4 m hoch werden [116]. In klimatisch begünstigten Lagen bildet Miscanthus an offenen fächerförmigen Rispen Blüten aus, es fehlt der Pflanze jedoch die Fähigkeit zur Entwicklung keimfähiger Samen [177].

Miscanthus ist im Pflanzjahr konkurrenzschwach und bedarf intensiver Pflege. Insbesondere spät auflaufende Wurzelunkräuter wie Quecke, Ackerkratzdistel sowie verschiedene Hirsearten stellen ein ernsthaftes Problem dar. [177]. Ist Miscanthus erfolgreich etabliert, kann er durch sein extensives Wurzelsystem, das im Winter dormant ist, im Frühjahr zum Wachstumsbeginn schnell auf den Bedarf der Pflanze auf Nährstoffe reagieren. Ende April bis Anfang Mai bilden sich neue Triebe aus den Rhizomen. Nährstoffe und Kohlenhydrate, die über Winter im Rhizom gespeichert waren, werden mobilisiert, in die Triebe verlagert und ermöglichen zügiges Wachstum [95]. Eine Unkrautkontrolle ist dann meist nicht mehr nötig. Als Vorfrucht eignet sich jede Kulturart. Auch als Nachfrucht kann nahezu jede Kulturart angebaut werden, jedoch aufgrund der Ernterückstände möglichst keine Feinsämereien [108].

Normalerweise wird Miscanthus im Februar bis März geerntet, wenn der höchste Trockenstoffgehalt erreicht ist [95]. Prinzipiell eignet sich Miscanthus auch als Biogassubstrat [108], der Erntezeitpunkt muss aber spät im Herbst erfolgen, um eine hohe Nährstoffrückverlagerung zu gewährleisten [122]. Ein früher Schnitt im Juli und August führt zu starker Ertragsdepression im Folgejahr, eine Ernte im Oktober wird von Miscanthus ohne Probleme ertragen [101].

Generell hat Miscanthus ein hohes Biomasse-Ertragspotenzial, eine hohe Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz und eine lange Standdauer [116]. Darüber hinaus wird ein Großteil der gebildeten Assimilate und aufgenommenen Nährstoffe im Herbst in die Rhizome verlagert, sodass sie der Pflanze zu Beginn der neuen Vegetationsperiode zur Verfügung stehen. Über die abfallenden Blätter wird ein großer Teil an Mineralstoffen

rückgeführt. Die Mulchdecke optimiert den Wasserhaushalt und trägt zur Verbesserung von Humifizierung und Nährstoffbereitstellung bei [177].

Um das Leistungsvermögen auszuschöpfen, sind tiefgründige, gut durchwurzelbare humose Lehmböden mit guter Wasserführung und gutem Nährstoffspeichervermögen optimal [108]. Leichte, sandige bis sandig-lehmige Böden eignen sich nur dann für eine hohe Biomasseproduktion, wenn die Wasserversorgung in der Hauptwachstumszeit zwischen Juni und September nicht zum begrenzenden Faktor wird [177]. Gänzlich ungeeignet sind schwere, zur Verdichtung neigende sowie staunasse Böden. Standorte mit häufigen Spätfrösten, Frühfrostgebiete, kältestauende Tallagen und Nordhänge sowie Lagen über 700 m Höhe sind als problematisch anzusehen. Exponierte Lagen ohne Schutz vor Wind- und Schneeeinfall erhöhen die Gefahr von Lager im Winter und von Ernteverlusten [108]. Voraussetzung für eine optimale Überwinterung ist eine zügige und gleichmäßige Abreife im Herbst, die eine ausreichende Einlagerung von Reservestoffen in die Rhizome ermöglicht [177].

Miscanthus kann nach heutigen Erkenntnissen 20 Jahre und mehr als Dauerkultur bewirtschaftet werden. Danach kann der Anbau aufgrund sinkender Erträge unwirtschaftlich werden [108]. Eine Rückführung der Fläche ist mit erhöhtem Aufwand verbunden. Für den Umbruch eignet sich der Einsatz glyphosathaltiger Totalherbizide im grünen Bestand bei einer Wuchshöhe von 30 bis 40 cm oder mehrmaliges Abmähen ab Juli und Herausgrubbern der Rhizome vor dem Winter. Ein Durchwuchs in der Folgekultur lässt sich mit selektiv wirkenden Herbiziden bekämpfen [108].



Abbildung 5: *Miscanthus*: Bestand im Sommer (links), abtrocknender Bestand im Winter (rechts)

2.2 Ökologie

2.2.1 Ergebnisse aus der ersten Projektphase

Die Untersuchungen zur Fauna mehrjähriger Energiepflanzen wurden bereits in der ersten Projektphase (2014–2016) begonnen [85]. Hinsichtlich der Effekte des Anbaus mehrjähriger Energiepflanzen auf die Regenwurmfauna waren eineinhalb bis zwei Jahre nach ihrer Etablierung noch keine eindeutigen Auswirkungen im Vergleich zur Referenz mit einer dreigliedrigen Fruchtfolge feststellbar. Lediglich die beiden Energiegräser Riesenweizen gras und Switchgras wiesen einen eher geringeren Regenwurmbestand auf. Bereits positiv wirkte sich der Anbau mehrjähriger Energiepflanzen jedoch für die Regenwurmfauna auf dem Niedermoorstandort Rosenau aus. Auf den ergänzend untersuchten, mindestens fünf Jahre bestehenden Praxisflächen mit mehrjährigen Energiepflanzen profitierte die Regenwurmfauna der Silphie im Vergleich mit regelmäßig gepflügten Ackerflächen deutlich [85]. Auch das Riesenweizengras und der Miscanthus ließen auf Praxisflächen günstige Auswirkungen auf Abundanz und Biomasse der Regenwürmer im Boden erkennen. Zählungen von Blütenbesuchern an Silphie und Sida ergaben, dass neben Honigbienen auch zahlreiche andere Tierarten, besonders Hummeln und Schwebfliegen, die Blüten aufsuchten. Die Silphie war hierbei für diese Tiere etwas attraktiver.

2.2.2 Literaturübersicht zur Fauna mehrjähriger Energiepflanzen

Die bereits im Rahmen der ersten Projektphase begonnene Sammlung von Literaturquellen zur Fauna mehrjähriger Energiepflanzen aus Europa wurde in der zweiten Projektphase um neu erschienene Quellen ergänzt. Die Literaturübersicht zeigt, dass unter den mehrjährigen Energiepflanzen in Europa v. a. der Miscanthus und die Silphie und in den USA das Switchgras hinsichtlich ihrer Fauna gut untersucht sind. Die zahlreichen zur Fauna von Miscanthus bekannten Studien sind jedoch hinsichtlich ihrer Ergebnisse keinesfalls einheitlich für alle Tiergruppen [201] und Regionen [99]. Kenntnislücken bestehen insbesondere für die Interaktion der Artengemeinschaften der mehrjährigen Energiepflanzen mit unterschiedlichen Standortverhältnissen und der Umgebung. Einige Studien haben gezeigt, dass positive Effekte mehrjähriger Energiepflanzen besonders durch Lückigkeit und verstärktes Auftreten von Unkräutern verursacht sind [45] [167].

2.2.2.1 Silphie

Fliegende und oberflächlich aktive Arthropoden

Die Bedeutung der Silphie für Bestäuber wurde in dem Projekt „Agrarökologische Bewertung der Durchwachsenen Silphie“ im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. am Johann Heinrich von Thünen-Institut umfangreich untersucht [46] [133] [132] [134] [159]. Es stellte sich heraus, dass Honigbienen häufige Besucher der Silphie sind und diese große Mengen an Pollen und Nektar bereitstellt. An einigen Standorten der Untersuchung und zu bestimmten Zeiten stellten die Pollen des Silphie-Typus eine bedeutende Nahrungsquelle dar, wie Untersuchungen mit Pollenfallen zeigten [134] [159]. Allerdings stellte sich auch heraus, dass besonders im August und Anfang September die Bienen andere Massentrachten in der Umgebung bevorzugten [159]. Die Ergebnisse mit Farbschalen an fünfzehn Standorten zeigten ein deutlich stärkeres Auftreten von Honigbienen und Hummeln in den Silphie-Beständen im Vergleich zu Maisfeldern und linearen Habitaten (Gewässer, Waldrand). Die häufigsten Hummelarten in der Silphie waren Erd- und Steinhummeln (*Bombus-terrestris*-Komplex, *Bombus lapidarius*). Solitäre Wildbienen wurden eher selten auf den Silphie-Feldern gefangen und im Mittel weniger häufig als in Maisflächen und linearen Habitaten (Gewässer, Waldrand) [46]. Schwebfliegen mit zoophagen Larvenstadien waren in der Silphie ebenfalls weniger stark vertreten. Besonders gegen Ende der Blühperiode nahm allerdings die Zahl der Schwebfliegen mit saprophagen Larvenstadien insgesamt in der Silphie zu [133]. Untersuchungen zur Pollenaufnahme von Schwebfliegen zeigten, dass Pollen der Asteraceae für Mistbienen (*Eristalis arbustorum*) den dominanten Anteil stellen, die Silphie allerdings anscheinend nicht den attraktivsten Pollen bereitstellt [46]. Beim Vergleich der Wildbienenfauna von Silphie-Feldern mit Mais und Wildpflanzenmischungen (Erfassung mit Farbschalen) in Brandenburg konnten Hinweise darauf gefunden werden, dass Silphie-Flächen besonders dann interessant für Hummeln sind, wenn alternative Trachten fehlen. Hinsichtlich der übrigen Wildbienen wurde festgestellt, dass deren Vorkommen besonders davon abhängig ist, welche Art am Standort nistet, aktiv ist und welches Blütenangebot die Wildpflanzenmischung zum entsprechenden Zeitpunkt bietet. Insgesamt wurden jedoch mehr Wildbienenarten in den Wildpflanzenmischungen nachgewiesen als in der Silphie [46]. Das Angebot an Pollen und

Nektar der Silphie im Jahresverlauf untersuchten MÜLLER *et al.* (2020) [132]. Ein früher Schnitt führt zu verringertem Pollen- und Nektarangebot und die Kombination der Silphie mit anderen Bienträchtpflanzen ist für eine ausgewogene Ernährung zu empfehlen.

CHMELIKOVA & WOLFRUM (2019) [37] konnten auf einem Feldversuch in Bayern mit Farbschalen einen leicht positiven Einfluss der Silphie im Vergleich zu Mais auf die Diversität von Arthropoden und besonders auf Parasitoide und Bestäuber, wie Wildbienen feststellen. Ein Ersatz von Mais durch Silphie von 7 % würde diesen Ergebnissen zufolge den Ertrag um etwa 4 % senken und gleichzeitig die Arthropoden Vielfalt um 2,5 % erhöhen.

Ein Vergleich der Laufkäfer- und Spinnenfauna von Silphie, Mais, Riesenweizengras (Szarvasi) und einer Wildpflanzenmischung als Biogassubstrat an zwei Standorten in Brandenburg [141] ergab für die Silphie 23 und 36 (in den beiden Untersuchungsgebieten) mehr Laufkäfer- und Spinnenarten als in den Maisfeldern. Allerdings wiesen die höchsten Diversitätsindizes und Artenzahlen die Wildpflanzenmischung und das Riesenweizengras auf, was auf die dort komplexere Vegetationsstruktur zurückgeführt wurde. Prinzipiell wurde die Diversität unter den mehrjährigen Energiepflanzen nicht nur durch Arten mit geringen Ansprüchen bereichert, sondern auch durch Nahrungs- und Habitatspezialisten. Die Ergebnisse waren jedoch erheblich vom untersuchten Standort beeinflusst.

Bodenfauna

Das Thüneninstitut führte auch umfangreiche Untersuchungen zur Regenwurm-, Springschwanz- und Nematodenfauna durch [160] [159] [46] [161]. Auf zwölf Silphie- und sechs Maisfeldern in Thüringen und Niedersachsen wurde dabei die Regenwurmfauna erhoben [160]. Die Abundanz anezischer und endogäischer Regenwürmer nahm deutlich mit dem Anbaualter der Silphie zu (ein bis neun Jahre alt). Auch eine Zunahme der Artenvielfalt konnte festgestellt werden. Es traten epigäische Arten auf, die in den Maisfeldern fehlten. Maisfelder hatten eine geringere Regenwurmabundanz, -biomasse und -artenzahl sowie weniger Losung an der Bodenoberfläche und eine geringere funktionale Diversität. Die Springschwanzfauna auf den Silphie-Feldern umfasste zwölf Familien. Ältere Silphie-Bestände wiesen deutlich höhere Individuendichten auf als jüngere und als Maisflächen [159]. Besonders war ein positiver Effekt auf euedaphische (im Bodenkörper lebende) Arten durch die Silphie festzustellen. SCHORPP *et al.* 2016 [159] weisen zudem auf die Bedeutung des kleinporigen Bodenraums und den Zusammenhang der Anreicherung organischen Materials und der biologischen Aktivität in diesem Kompartiment hin. Für die Nematodenfauna konnte weiterhin festgestellt werden, dass in Silphie-Beständen gegenüber Maisflächen bacterivore (bakterienfressende) Arten in der Dominanz zurückgingen und herbivore, fungivore sowie carnivore Arten leicht zunahmen [161] [159]. Die Abundanz der Nematoden war in frisch angelegten Silphie-Feldern und Maisäckern geringer als in mindestens drei Jahre alten Silphie-Flächen. Schädliche Nematoden der *Pratylenchidae* traten ausschließlich im Mais auf [159].

Die Untersuchungen von EMMERLING (2014) [62] in Trier zur Regenwurmfauna der mehrjährigen Energiepflanzen Riesenweizengras, Switchgras, Sida, Silphie, Igniscum und einer Wildpflanzenmischung im Vergleich zu Mais ergaben für alle mehrjährigen Kulturen eine Zunahme der Abundanz und Biomasse der Regenwürmer vier Jahre nach Anlage

des Versuchs. In der Silphie war die Vielfalt mit insgesamt fünf nachgewiesenen Regenwurmarten größer als auf Switchgras und Maisvergleichsflächen (4), aber geringer als in Sida (6), Riesenweizengras (7) und der Wildpflanzenmischung (8 Arten).

Bodenmeso- und makrofauna wurden auf einem Feldversuch in Tschechien mit den Kulturen Weide, Rohrglanzgras, Silphie, Topinambur und Staudenknöterich aus Bodenproben ausgetrieben und nach Großgruppen eingeteilt [91]. Die nicht heimischen Kulturen, also auch Silphie, Topinambur und Staudenknöterich, wiesen eine geringerer Abundanz an Bodentieren auf als die heimischen Pflanzenarten Rohrglanzgras und Weide. Die Zusammensetzung der Fauna unterschied sich ebenfalls zwischen den heimischen und eingeführten Kulturen.

2.2.2.2 Miscanthus

Bodenfauna

Die Bodenfauna von Miscanthus-Flächen ist bereits häufiger untersucht worden. FELTEN und EMMERLING (2012) [68] untersuchten auf jeweils zehn Flächen die Regenwurmfauna der Kulturen Miscanthus, Raps, Mais, Getreide, Grünland und Brachen. Die Artenzahl der Miscanthus-Flächen nahm dabei eine Mittelstellung zwischen den annuellen Kulturen Getreide, Raps, Mais und den mehrjährigen Brachen und Grünlandflächen ein. Für die Abundanz war der Effekt weniger deutlich. Es zeigte sich, dass die Bewirtschaftungsintensität der wichtigste Parameter zur Erklärung der Artenzahl und Abundanz der Regenwürmer war.

Eine weitere Untersuchung aus Deutschland zur Regenwurmfauna von Miscanthus, Kurzumtriebsplantagen, Grünland und Ackerflächen [183] stellte eine höhere Artenzahl, Artendiversität und Regenwurmbiomasse auf Miscanthus- gegenüber Ackerflächen fest. Im Vergleich zu Grünland und Kurzumtriebsplantagen (KUP) lagen diese Werte in den Miscanthus-Feldern allerdings niedriger.

Bei der Untersuchung der Regenwurmfauna von zwei Untersuchungsräumen und an zwei Terminen auf Einzelflächen [52] konnten in Nordrhein-Westfalen im Miscanthus im Vergleich zu GPS-Getreide, Mais, Raps und Zuckerrübe eine höhere Siedlungsdichte und eine höhere Biomasse der Regenwürmer festgestellt werden. Am besten schnitt hier eine mehrjährige Blümmischung ab. In Baden-Württemberg waren die Unterschiede weniger deutlich und Raps, Zuckerrübe, Getreide-GPS und die Blümmischung wiesen ähnlich hohe oder Regenwurmbestandswerte auf wie im Boden unter Miscanthus oder der Blümmischung. Lediglich auf den Maisflächen waren die Siedlungsdichte und die Artenzahl der Regenwürmer in beiden Untersuchungsräumen geringer.

Eine Untersuchung zur Regenwurmbesiedelung von Fruchtfolgen und Energiepflanzen aus Polen [67] ergab für Miscanthus eine signifikant geringere Artenzahl, Siedlungsdichte und Biomasse als in einer ökologischen Fruchtfolge mit organischer Düngung. Besonders die Biomasse der Regenwürmer war auch deutlich geringer als im konventionellen und integrierten System mit annuellen Kulturen. Als Ursache wird die geringe Nahrungsqualität von Miscanthus angeführt.

Eine Studie zur Bodenfauna eines Feldversuchs von Miscanthus, Switchgras, Weide (KUP) und Mais stammt von SCHRAMA *et al.* (2016) [164] aus Belgien. Die Abundanz von Regenwürmern im Miscanthus war hier deutlich höher als in den Maisflächen, jedoch bestanden keine Unterschiede zu den übrigen Kulturen. Hinsichtlich der Diversität und Abundanz von Bodenarthropoden (Austreibung aus Bodenproben) zeigte der Miscanthus signifikant geringere Werte als Weide (KUP) und keine statistisch abzusichernden Unterschiede zum Mais. Für die Anzahl von Nematodenfamilien und die Abundanz von Nematoden konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kulturen nachgewiesen werden.

ERNST *et al.* (2009) [64] fütterten Regenwürmer in Mesokosmen mit unterschiedlichen Ernteresten. Die Streuzersetzung durch Regenwürmer war für Miscanthus am geringsten und für Mais, Hafer und Raps deutlich höher, was auf den geringeren Stickstoffgehalt der Miscanthusstreu zurückgeführt werden kann.

In der Schweiz untersuchten KOHLI *et al.* (1999) [104] die Nutzung abgestorbener Miscanthus-Blätter und abgestorbener Wildpflanzen durch den Tauwurm (*Lumbricus terrestris*). Die meisten Wildpflanzen wurden in größerem Umfang eingezogen und gefressen. Untersuchungen im Freiland ergaben eine Verringerung der Tauwürmer pro Quadratmeter bei der Umwandlung einer Wiese in ein Miscanthus-Feld, aber eine Zunahme bei der Umwandlung einer Ackerfläche mit Mais in einen Wildblumenstreifen. Analog verhielt sich die Artenzahl der Regenwürmer.

HEDDE *et al.* (2013) [89] [90] untersuchten in Frankreich die Bodenfauna von jeweils drei Miscanthus- und Weizenfeldern auf mit Spurenmetallen kontaminierten Böden und stellten nach drei Jahren eine höhere Diversität und Siedlungsdichte bodenbewohnender Arthropoden unter Miscanthus fest, während dies für an der Oberfläche aktivere Tiere nicht nachzuweisen war. Eine ähnliche Studie aus Frankreich [34] erforschte die Springschwanzfauna ebenfalls mit problematischen Metallen belasteter Felder im Boden unter Miscanthus und Switchgras im Vergleich zu Weizenfeldern. Dabei wurden eine signifikant höhere Abundanz und ein höherer Artenreichtum unter den perennierenden Kulturen Miscanthus und Switchgras gegenüber den Weizenfeldern gefunden.

Fliegende und oberflächlich aktive Arthropoden

Auch Studien zu an der Bodenoberfläche aktiven oder fliegenden Wirbellosen sind bereits bekannt. In Bayern konnten JODL *et al.* (1998) [98] in Miscanthus mit verschiedenen Erhebungsmethoden im Vergleich zu Mais und Schilf die höchste Artenzahl des untersuchten Arthropodenspektrums und die meisten Differenzialarten nachweisen.

DIETERICH *et al.* (2016) [52] untersuchten in Deutschland Energiepflanzen (Raps, Mais, Zuckerrübe, GPS-Getreide, Miscanthus und Blümmischungen) hinsichtlich einer Vielzahl von Tiergruppen (Blattkäfer, Wildbienen, Spinnen, Laufkäfer, Regenwürmer, Vögel) in zwei Untersuchungsgebieten. Die Miscanthus-Felder nahmen hierbei eine Sonderstellung ein und zeigten die geringste Ähnlichkeit mit den anderen Kulturen. Während für Blattkäfer, Bienen und Spinnen Miscanthus keine besondere Wertigkeit aufwies bzw.

verhältnismäßig geringe Aktivitätsdichten und Artenzahlen nachgewiesen wurden, konnten bei den Laufkäfern einige störungsempfindliche und daher wertgebende Arten erfasst werden.

Eine umfangreiche Untersuchung zur Fauna von *Miscanthus*-Beständen stammt von LOEFFEL und NENTWIG (1997) [119] aus der Schweiz und Deutschland, allerdings ohne Vergleich mit anderen Kulturen. Die Autoren stellten in sechsjährigen *Miscanthus*-Flächen mehr streubesiedelnde Arthropoden fest als in dreijährigen. Schädlinge, also phytophage Käfer, Blattläuse und Fächerflügler, traten nur in geringem Umfang auf.

Eine weitere Studie aus der Schweiz von LIPS *et al.* (1999) [118] untersuchte verschiedene landwirtschaftliche Kulturen mit einem Schwerpunkt auf Energiepflanzen (Raps, Hanf, Kenaf, Winterweizen, Mais und Wiesen) hinsichtlich ihrer Laufkäfer- und Spinnenfauna und konnte im *Miscanthus* eine deutlich abweichende Artenzusammensetzung mit dem Vorkommen einiger eher für Hecken, Waldränder und Gehölze typischen Arten feststellen.

Häufig werden die Untersuchungen von SEMERE und SLATER (2007) [167] zitiert. Sie verglichen mit verschiedenen Methoden maximal drei Jahre alte *Miscanthus*-Flächen in England mit Rohrglanzgras-Beständen hinsichtlich ihrer Laufkäfer- und Schmetterlingsfauna sowie der Fauna auf den Pflanzen lebender (*arborealer*) Arthropoden. Für die Laufkäfer und Schmetterlinge waren die Beikräuter (Disteln für Schmetterlinge) von großer Bedeutung und diese waren häufiger im *Miscanthus* zu finden. Generell wurde festgestellt, dass die Flächen als Überwinterungsquartiere genutzt werden.

HAUGHTON *et al.* (2009) [88] verglichen Feldränder von *Miscanthus*, Weide (KUP) und Äckern und stellten eine höhere Abundanz von Tagfaltern in Nachbarschaft der beiden mehrjährigen Kulturen fest. Dies traf für *Miscanthus* außer für die *Pieridae* und *Lycanidae* für alle Familien zu, wobei der Unterschied am größten bei den *Satyrinae* war.

In Irland untersuchten DAUBER *et al.* (2015) [45] die Laufkäfer- und Spinnenfauna von vierzehn *Miscanthus*-Feldern, die auf Grünland oder Acker angelegt worden waren, und kamen zu dem Schluss, dass die Vorbewirtschaftung, die Lückigkeit, die Beikrautbestände sowie die Erträge Einfluss auf die Fauna haben. Die Artenvielfalt der Laufkäfer und die Aktivitätsdichte der Spinnen folgten der Deckung an Beikräutern. Die Effekte sind jedoch auch abhängig von der betrachteten Artengruppe.

Eine weitere Untersuchung aus Irland befasste sich mit Bestäubern. So untersuchten STANLEY (2013) [173], STANLEY und STOUT (2013) [174] insgesamt 50 Flächen (jeweils zehn *Miscanthus*-Felder angelegt auf Acker, *Miscanthus*-Felder angelegt auf Grünland, Winterraps, Winterweizen, Grünland) hinsichtlich ihrer Diversität und Häufigkeit von staatenbildenden Bienen, Solitärbiene, Schwebfliegen und Schmetterlingen. Bei der Untersuchung mit Farbschalen zeigte sich, dass sowohl in Rapsfeldern als auch in *Miscanthus*-Beständen Solitärbiene häufiger und artenreicher auftraten als in Weizenfeldern. Schwebfliegen zeigten jedoch in den Rapsfeldern höhere Abundanz und Artenreichtum. Anhand von Transektbegehungen wurden mehr Hummeln im Raps gefunden als in *Miscanthus*- und Weizenfeldern. Für Schmetterlinge und die Beobachtung nestsuchender Hummeln ergaben sich keine Unterschiede zwischen diesen Kulturen. Allerdings war die

Anzahl von Bienen und Wespen in aufgestellten künstlichen Nistgelegenheiten für *Miscanthus* höher. Ebenfalls keine deutlichen Unterschiede ergaben sich für den Vergleich von Grünlandflächen zu den auf Grünland angelegten *Miscanthus*-Feldern. Am deutlichsten war der Unterschied zwischen den für jede Fläche untersuchten Feldrändern im Vergleich zur Feldmitte. Alle Bestäubergruppen waren auf den Feldränder deutlich häufiger und artenreicher. BOURKE *et al.* (2014) [23] berichten in einer parallelen Veröffentlichung mit den gleichen Kulturen und Flächen über den Einfluss des Landschaftskontexts auf die Bestäuber und Laufkäferfauna. Die Diversität der Laufkäferfauna zeigte keine Unterschiede zwischen den Kulturen, jedoch waren Diversität und Artenzahl in den perennierenden Kulturen (Grünland, *Miscanthus*) geringer. Insgesamt kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Biodiversität in den Energiepflanzen *Miscanthus* und Raps nicht schlechter oder etwas besser ist als in den Äckern mit Winterweizen und im Grünland. Ein Einfluss der Landschaftsumgebung auf diese Effekte besteht nur in geringem Umfang. Allerdings verhalten sich nicht alle taxonomischen Gruppen einheitlich.

WILLIAMS & FEST (2019) [201] untersuchten die Laufkäfer- und Spinnenfauna eines *Miscanthus*feld und jeweils eines benachbarten Ackers und einer Wiese. Artenvielfalt, Biomasse und Abundanz waren im *Miscanthus*feld von Spinnen und Laufkäfern niedriger als auf der Ackerfläche. Dies war durch die geringe Beteiligung anderer Beikräuter in dem älteren Feldstück und das Fehlen von Insekten, die sich von *Miscanthus* ernähren, zu erklären.

Vögel und Säuger

Im Fokus vieler Forschungsvorhaben steht die Wirkung von *Miscanthus*-Flächen auf die Wirbeltierfauna, insbesondere auf Vögel. Eine Untersuchung zum Nahrungsangebot von Vögeln aus England von BELLAMY *et al.* (2009) [11] verglich die Vogelwelt (Winter-/Sommerbegehung/Brut), die Regenwurmfauna sowie Bodenarthropoden (Bodenfallen) und in der Vegetation lebende Arthropoden (Kescherränge) in sechs Regionen mit Winterweizenfeldern. Im Winter waren signifikant mehr Vogelarten im *Miscanthus*, aber nicht mehr Individuen zu finden. Federwild, Schnepfen und Sperlingsvögel waren im Winter in höheren Dichten im *Miscanthus* zu finden. Nur die Feldlerche war häufiger auf den Weizenfeldern. Im Sommer fanden sich mehr Vögel und Brutpaare im *Miscanthus*. Für die Anzahl an Nahrungstieren, die in Bodenfallen gefangen worden waren, ergaben sich in der Summe aller Invertebraten keine signifikanten Unterschiede zwischen *Miscanthus* und Winterweizen – weder im Winter noch im Sommer. Im Sommer zeigten jedoch *Chilopoden* und *Collembolen* eine höhere Aktivitätsdichte im *Miscanthus* als im Weizen und im Winter wurden in Bodenfallen signifikant mehr Regenwürmer im Winterweizen als im *Miscanthus* gefangen. Mit Kescherrängen im Sommer wurden signifikant mehr Invertebraten im Weizen als im *Miscanthus* erfasst, jedoch wurden die höchsten Werte auf den Beikräutern im *Miscanthus* festgestellt. Es wird geschlussfolgert, dass *Miscanthus*-Felder innerhalb der ersten fünf Jahre nach Etablierung eine Kultur mit möglicherweise hohem Wert für Vögel in intensiv bewirtschafteten Agrarlandschaften darstellen.

Eine umfangreiche Studie zu Kleinsäugetieren, Vögeln und Invertebraten in *Miscanthus* und Rohrglanzgras-Beständen im Vergleich mit den potenziell ersetzten Flächen (Grünland, Brachen, Mais, Johannisbeer-Plantagen) an vier Standorten in Wales [38] [39] konnte

mehr Vögel und Kleinsäuger in den Bioenergiekulturen nachweisen. Kleinsäuger waren im Rohrglanzgras jedoch artenreicher vertreten. Die Avifauna, die hier im Vergleich zu anderen Studien zusätzlich zu Beobachtungen auch mit Netzen erfasst wurde, zeigte im Miscanthus eine zahl- und artenreichere Vogelwelt. Jedoch wurden mehr Rote-Liste Arten in den Vergleichsflächen gefunden und die Biomasse-Kulturen beheimateten eher Waldarten als typische Arten der Agrarlandschaft. Eingehende Untersuchungen zur Zwergmaus zeigten eine besondere Vorliebe dieser Art für die Rohrglanzgras-Bestände. Die Bestandsstruktur dieser Kultur ist besonders geeignet zur Anlage von Nestern. Aber auch im Miscanthus konnte die Art im Gegensatz zu Grünland und Ackerflächen nachgewiesen werden. Auf den Flächen mit Rohrglanzgras und den Vergleichsflächen war die mit verschiedenen Methoden erfasste Gesamtabundanz der Invertebraten höher als im Miscanthus.

Für Tiere wie Reh, Hase und Wachtel stellten JODL *et al.* (1998) [98] fest, dass Miscanthus ähnliche Funktionen wie Hecken erfüllen kann. Die erfolgreiche Brut von Teichrohrsänger und Hänfling zeigt, dass Miscanthus-Felder als Bruthabitate akzeptiert werden. Betont werden der Nischenreichtum der Kultur und der Vergleich mit der „natürlichen Monokultur“, dem Schilf.

BAUSCHMANN (2011) [5] stellte im Rahmen eines Projekts der Nachhaltigkeitsstrategie für Hessen fest, dass Miscanthus als schilfähnliche Pflanze von einer Vielzahl von Vogelarten genutzt wird, darunter auch Röhricht und Hochstaudenfluren bewohnende sowie gefährdete Arten (Blaukehlchen, Schwarzkehlchen, Rohrammer, Sumpfrohrsänger, Feldschwirl, Dorngrasmücke). Das von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. geförderte Projekt „ELKE III“ [190] konnte in Miscanthus-Feldern Baumpieper, Zilpzalp und Goldammer als Brutvögel bestätigen und weist auch auf die Bedeutung für Nahrung suchende Vögel (vor allem Finkenvögel) hin.

SEMERE und SLATER (2007) [166] untersuchten auch die Flora, Kleinsäuger- und Vogelfauna von Miscanthus und Rohrglanzgras. Die Miscanthus-Felder waren deutlich reicher an Begleitvegetation und auch an offenen Bodenstellen. Allerdings wurden in den untersuchten Flächen bereits vor der vollständigen Etablierung Rhizome geerntet. Dadurch zeigten sich überraschend positive Ergebnisse für Feldlerche, Wiesenpieper und Kiebitz, die bei reifen, voll entwickelten Beständen nicht unbedingt zu erwarten sind. Für Kleinsäuger konnte kein Unterschied zwischen Rohrglanzgras und Miscanthus gefunden werden. Für beide Tiergruppen waren jedoch die Feldränder von großer Bedeutung.

Eine weitere Untersuchung aus England zur Vogelfauna von Miscanthus (gut etabliert), KUP, Grünland und Ackerflächen über zwei Winter und einen Sommer [150] ergab höhere Individuen- und Artenzahlen in KUPs als im Miscanthus. Die über den Winter nicht geernteten Miscanthus-Flächen enthielten mehr für Busch- und Waldland typische Arten, wie Amseln, Meisen, Rohrammern und Waldschnepfen. In den offenen Habitaten traten mehr Feldlerchen und Rabenvögel auf. Offene Stellen im Miscanthus wirkten sich positiv auf Finken und Watvögel aus. Insgesamt wird für Miscanthus im Südwesten Englands ein mehr oder weniger neutraler Effekt für die Vogelfauna erwartet. Spezialisten der offenen Agrarlandschaft könnten negativ betroffen sein. Ebenfalls in England untersuchten BRIGHT

et al. (2013) [24] die Vogelwelt von über 50 Miscanthusflächen im Vergleich mit Winterweizenfeldern und Grünland. Der Artenreichtum von Miscanthus in der Etablierungsphase war ähnlich hoch wie von Weizenfeldern und Grünland. Im Spätsommer waren hohe Dichten von Rohrhammern und Amseln im Miscanthus zu beobachten.

KACZMAREK *et al.* (2019) [99] untersuchte die Vogelfauna auf 28 Beobachtungsflächen mit unterschiedlichen Anteilen von Miscanthus an der Fläche über das ganze Jahr in Polen. Von den 80 nachgewiesenen Vogelarten wurden 32 in Miscanthusflächen gesichtet. Insgesamt wurde ein leicht negativer Einfluss der Miscanthusfläche auf die Artenvielfalt festgestellt. Besonders Arten der Agrarlandschaft wie Grauammer, Feldsperling, Star und Goldammer wurden seltener in Miscanthusflächen beobachtet, während einige Arten wie Sumpfrohrsänger, Rohrhammer und Braunkelchen häufiger in Miscanthus als in anderen Landnutzungstypen gefunden wurden.

2.2.2.3 Sonstige Kulturen

Zu anderen im Rahmen des Projekts bearbeiteten Kulturen finden sich Ergebnisse zur Regenwurmfauna bei EMMERLING (2014) [62]. Biomasse und Abundanz der Regenwürmer erhöhten sich im Vergleich mit Mais neben der Silphie auch im Riesenweizengras, Igniscum und in der Sida. Im Boden unter Switchgras lag nur die Abundanz der Regenwürmer, allerdings nicht ihre Biomasse höher als unter Mais. Die Anzahl nachgewiesener Regenwurmarten war am höchsten in einer Wildpflanzenmischung (8), gefolgt von Riesenweizengras (7), Sida (6), Silphie (5), Igniscum (5), Switchgras (4) und Mais (4 Arten).

Aktuellere Untersuchungen zur Regenwurmfauna von Sida liegen aus Polen im Vergleich mit langjährigen Versuchen mit ökologischen, konventionellen und integrierten Fruchtfolgen, Miscanthus und Weidenplantagen vor [67]. Die Sida zeigte hierbei nach der ökologisch bewirtschafteten Fruchtfolge die zweithöchste Artenvielfalt und für die Siedlungsdichte und Biomasse mittlere Werte. Unter den geprüften Energiepflanzen (Sida, Miscanthus, Weide) zeigte die Sida, wahrscheinlich aufgrund des hohen Angebots organischer Bestandsabfälle, den besten Regenwurmbestand. Vor allem die tiefgrabende Art *Lumbricus terrestris* profitierte von Sida.

In Brandenburg wurde die Laufkäfer- und Spinnenfauna von Riesenweizengras im Vergleich mit Mais, Silphie und einer Wildpflanzenmischung untersucht [141]. Das Riesenweizengras zeigte hierbei 23 und 29 (für die beiden Untersuchungsgebiete) mehr Laufkäfer- und Spinnenarten als Mais. Im Vergleich mit der Silphie wurden gleichviele bzw. sieben Arten weniger als im Riesenweizengras nachgewiesen.

Umfangreiche Untersuchungen zur Fauna von Switchgras wurden in den USA durchgeführt [200]. Die Übertragbarkeit auf mitteleuropäische Verhältnisse ist jedoch nicht immer gegeben, zum Beispiel weil das Switchgras in Teilen der USA zur natürlichen Vegetation der dortigen Graslandschaften (Prärie) zählt. WERLING *et al.* (2014) [200] stellten dort in umfangreichen Bestandserhebungen zur Biodiversität (Pflanzen, herbivore Arthropoden, räuberische Arthropoden, Wildbienen, Brutvögel) und zu assoziierten Ökosystemfunktionen (Bestäubung, Regulation von Schadorganismen, Vogelbeobachtung) fest, dass

sowohl Switchgras als auch eine Anpflanzung artenreicher Prärie die Diversität im Vergleich zu Mais erhöhte und Ökosystemfunktionen verbesserte.

3 Problemstellung und Zielsetzung

Die Vorteile mehrjähriger Energiepflanzen sind bekannt: Sie kommen ohne jährliche Bodenbearbeitung aus, bieten eine weitgehende Bodenbedeckung über das ganze Jahr und benötigen nach der Etablierung meist auch keine Herbizidanwendungen. Hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Ertrag können solche bisher nur in geringem Umfang angebauten Kulturen mit gängigen Energiepflanzenarten aber oft nicht mithalten. Im Projekt „Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung“ hatte sich jedoch bereits im ersten Versuchsjahr gezeigt, dass unter extremen Bedingungen, wie z. B. im Jahr 2015, einige der mehrjährigen Kulturen, die als Ganzpflanzensilage (GPS) in der Biogasanlage genutzt werden, in Bezug auf den Ertrag recht nahe an Referenzkulturen wie Mais oder GPS-Getreide herankommen. Standortunterschiede in Ertrag und Entwicklung gaben erste Hinweise auf die unterschiedliche Eignung der Kulturen für variierende bodenklimatische Verhältnisse. Es hat sich allerdings auch herausgestellt, dass einige der Kulturen eine längere Etablierungsphase brauchen und im ersten Erntejahr noch unzureichende Erträge liefern. Ebenso traten kulturartsspezifische Probleme, z. B. bei Etablierung oder Ernte, zutage.

Eine Fortführung des Projekts bzw. der bereits etablierten Versuchsfelder um drei weitere Erntejahre soll eine langjährige Betrachtung (mindestens fünf Erntejahre) ermöglichen und zeigen, wie sich Ertrag, Qualität des Ernteguts und ökologisch relevante Faktoren über mehrere Jahre auf den verschiedenen Standorten entwickeln. Nur langjährig stabile Erträge können die anfänglich hohen Kosten für die Etablierung mehrjähriger Energiepflanzen ausgleichen. Für die Untersuchungen zu ökologischen Parametern wie Humus oder Regenwurmbesatz sind ebenfalls langjährige Ergebnisse notwendig, um die Umwelteffekte des Anbaus mehrjähriger Energiepflanzen beurteilen zu können. Eine kurzfristige Beeinflussung dieser Parameter kann in der Regel nur schwierig detektiert werden. Bedingt durch die bisher nur geringen Anbauerfahrungen auf dem Gebiet der mehrjährigen Energiepflanzen zur energetischen Nutzung in Bayern sind noch viele Fragen zu Etablierung, Anbautechnik und ökologischen Wirkungen unbeantwortet.

Die wesentlichen Arbeitspakete der ersten Projektphase (2014-2016) sollen fortgeführt und um wichtige Fragestellungen zur Bestandsdichte und Etablierung ergänzt werden:

- Fortführung des Feldversuchs zur Anbaueignung verschiedener mehrjähriger Energiepflanzen auf sechs unterschiedlichen Standorten in Bayern,
- Vervollständigung der Untersuchungen zur Substratqualität des Ernteguts und Erweiterung um Analysen zu unterschiedlichen Erntezeitpunkten,
- Fortführung und Ausweitung der ökologischen Bewertung der mehrjährigen Kulturen (Bodenfauna, Insekten, Humus, N_{\min} und N-Bilanz),
- Neuanlage eines Feldversuchs zur Etablierung von Sida unter verschiedenen Deckfrüchten,
- Fortführung des Wissenstransfers zu alternativen mehrjährigen Energiepflanzen unter Einbeziehung der Hemmnisse in der Praxis.

4 Material und Methoden

4.1 Feldversuche (TFZ)

4.1.1 Standortbedingungen der Feldversuche

Die Feldversuche zur Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen befanden sich auf sechs Standorten in unterschiedlichen Regionen in Bayern: in Wolferkofen, Aholting, Rosenau, Hötzelndorf, Parsberg und Gelchsheim (siehe Abbildung 6). Der Standort Thürntenning wurde im Frühjahr 2017 aufgegeben, es wurden noch Untersuchungen zur Regenwurmfauna durchgeführt. Der Versuch zur Etablierung von *Sida* befand sich am Standort Straubing. Die Standorte decken ein breites Spektrum an Bodenverhältnissen und Klimabedingungen ab.

Die langjährigen mittleren Monatstemperaturen und Monatsniederschläge sowie das Jahresmittel der Standorte sind Tabelle 1 zu entnehmen. Angaben zu Bodengüte, Vorfrucht und Wasserspeicherfähigkeit des Bodens sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Versuchsstandorte Straubing und Wolferkofen befinden sich im fruchtbaren Gäuboden, einem flachen und intensiv landwirtschaftlich geprägten Gebiet im Schwemmland der Donau. In der von ROßBERG *et al.* (2007) [149] erarbeiteten Gebietsgliederung nach Boden-Klima-Räumen (BKR) wird die Region als „Gäu, Donau- und Inntal“ ausgewiesen. Die beiden Standorte sind geprägt durch sehr fruchtbare, lehmige Böden mit einer guten Wasserspeicherfähigkeit. Das Klima ist im Vergleich zu den anderen Versuchsstandorten gemäßigt, mit ausreichenden Niederschlägen. Wolferkofen und Straubing repräsentieren eine Hohertragslage. Hier werden vor allem Kartoffeln, Zuckerrüben, Getreide, aber auch Gemüse angebaut [85].

Auch der Standort Aholting fällt unter die Gebietsgliederung „Gäu, Donau- und Inntal“, unterscheidet sich jedoch deutlich von einem typischen Gäuboden. Der Boden dort hat einen höheren Sandanteil und der Untergrund besteht aus Kies und Schotter, was zu einer geringen Wasserspeicherfähigkeit führt. In der Region werden häufig Bewässerungsanlagen betrieben. Die mittlere Jahrestemperatur und der mittlere Jahresniederschlag gleichen denen von Straubing, jedoch fällt in Aholting tendenziell weniger Niederschlag als in Straubing. Auch die Temperaturen im Sommer fallen dort teilweise etwas höher aus. Insgesamt ist der Standort als eher trocken einzustufen. Die Nähe zur Donau kann bei mehrjährigen Kulturen mit tiefgründigem Wurzelwerk den Vorteil bringen, da das Grundwasser für diese Kulturen erreichbar ist [85].

Der ganz in der Nähe, aber im Isartal gelegene Standort Rosenau (BRK: „Gäu, Donau- und Inntal“) ist ein degradiertes Niedermoor mit hohem Humusgehalt. Das Wasser wird dadurch bedingt gut gespeichert. Bei reichlichen Niederschlägen im Herbst erschwert dies jedoch die Bodenbearbeitung. Im Frühjahr hat der dunkel gefärbte Boden den Vorteil, sich schnell zu erwärmen. Das Klima am Standort ist mild, die Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter sind allerdings größer als auf den meisten anderen Standorten.

Es fallen ausreichend Niederschläge. Auch die Nähe zur Isar bringt hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen einen Vorteil [85].

Deutlich kühleres Klima und mehr Niederschläge gibt es am Standort Parsberg. Der Standort gehört laut Gebietsgliederung zum BKR „Albflächen und Ostbayerisches Hügelland“, geologisch gesehen liegt er im Oberpfälzer Jura. Der Untergrund ist Kalk-Schotter. Der lehmig-tonige Boden vermag das Wasser eigentlich gut zu speichern, es fehlt allerdings an Tiefgründigkeit. In der Region werden viel Getreide, Silomais, aber auch Klee-/Luzernegrasgemenge angebaut [85].

Als Standort mit extremeren Witterungsbedingungen ist Hötzelndorf einzuordnen. Er zählt nach BRK zu den „Verwitterungsböden in den Höhenlagen (östliches Bayern)“. Hier fallen reichliche Niederschläge und aufgrund der kühlen Temperaturen ist die Vegetationszeit kürzer als auf den anderen Standorten. Bedingt durch den etwas leichteren, sandigen Boden und das Klima sind die Ertragserwartungen eher gering. Traditionell gibt es hier viel Grünland, aber auch Silomais und Wintergetreide werden angebaut. Die niedrigen Temperaturen und der lange Winter geben Aufschluss darüber, wie winterhart die geprüften Kulturen sind [85].

Als wärmster und trockenster Standort ist Gelchsheim einzustufen (BKR: „Nordwestbayern-Franken, Ochsenfurter Gäu“). Die mittleren Temperaturen im Sommer sind nicht unbedingt höher als in Straubing, aber im Winter bleibt es wärmer und besonders im Sommer fallen deutlich weniger Niederschläge. Der tiefgründige, tonige Lehm kann das Wasser gut speichern. Die ungeschützte Lage auf leichter Anhöhe und der fast stetig wehende Wind sorgen zusätzlich für Verdunstung. Die Bodengüte ist als sehr gut einzuordnen, sodass bei ausreichenden Winterniederschlägen hohe Erträge zu erwarten sind. Angebaut werden in der Region viel Getreide und auch Zuckerrüben [85].

Thürnthening repräsentiert als Standort das Tertiäre Hügelland, das im Süden durch das Isartal abgegrenzt wird, gehört aber noch in den Boden-Klima-Raum „Gäu, Donau- und Inntal“. In dieser sehr hügeligen Landschaft treten sehr unterschiedlich fruchtbare Böden auf. Auch die Versuchsfläche ist in sich heterogen. Der an sich fruchtbare, sandige Lehm wird teilweise von Kiesadern durchzogen. Die Wasserspeicherfähigkeit ist dadurch gering. Die leichte Hanglage führt ohne Bewuchs schnell zu Erosion. Das Klima ist eher mild mit ausreichenden Niederschlägen. Bedingt durch die schlechte Wasserspeicherfähigkeit kann es im Sommer zu Problemen mit Trockenheit kommen, da das Grundwasser für die Pflanzen nicht erreichbar ist [85].



Abbildung 6: Versuchsstandorte (Datenquelle: © OpenStreetMap-Mitwirkende; © Geo Basis-DE/BKG)

Tabelle 1: Langjährige mittlere Monatstemperatur und mittlerer Monatsniederschlag (1981–2010, DWD-Station in Klammern)

Standort	Wolferkofen/ Straubing/Aholfing (Straubing)		Rosenau (Gottfrieding)		Hötzelndorf (Prackenbach)		Parsberg (Eglwang)		Gelchsheim (Gollhofen)	
Einheit	°C	mm	°C	mm	°C	mm	°C	mm	°C	mm
Jan.	-1,6	53	-1,3	51	-2,7	52	-1,8	69	0,1	46
Feb.	-0,4	46	0,0	45	-1,9	45	-0,6	61	0,8	44
März	4,2	57	4,4	57	1,7	57	3,4	67	4,7	52
April	8,8	43	8,9	46	6,2	52	8,0	49	8,7	45
Mai	13,8	72	14,0	74	11,4	82	12,8	74	13,4	67
Juni	16,5	83	16,7	87	14,3	94	15,6	82	16,2	71
Juli	18,4	88	18,6	95	16,1	112	17,6	95	18,4	73
Aug.	17,9	78	18,0	86	15,6	103	17,2	81	17,9	57
Sep.	13,6	64	13,7	64	11,5	74	12,7	65	13,7	58
Okt.	8,7	54	8,9	53	7,0	63	8,0	61	9,2	58
Nov.	3,4	57	3,5	56	1,9	57	2,6	67	4,2	51
Dez.	-0,2	62	0,0	62	-1,3	62	-0,7	78	0,9	56
Langj. Mittel	8,6	757	8,8	776	6,7	852	7,9	848	9,0	678



Abbildung 7: Versuchsstandort Wolferkofen im Gäuboden (Foto: 25.09.2018)

Tabelle 2: Beschreibung der Versuchsstandorte

Standort	Beschreibung	Wasserspeicherfähigkeit	Höhe in m über NN	Bodenart	AZ	Vorfrucht vor Versuchsbeginn
Straubing	sehr guter Boden, Gäulage, mild	gut	339	L	76	Körnermais
Wolferkofen	sehr guter Boden, Gäulage, mild	gut	337	uL	76	Zuckerrüben
Aholfing	leichter Boden, mild Schotterstandort	gering	324	IS	45	Kartoffeln/ Hybrid-Roggen
Rosenau	humoser Boden, mild, degradiertes Niedermoor	gut	346	huL	58	Silomais/ Winterrüben
Hötzelsdorf	Hochlage bzw. Mittelgebirgslage, kalt	gering	648	IS	35–45	Wintertriticale/ Alexandrinerklee
Parsberg	lehmiger, steiniger Boden, kühl, Jurastandort	mittel	466	tL	32–59	Klee gras und Luzerne
Gelchsheim	sehr guter Boden, warm, Gäulage, trocken	gut	309	tL	72–76	Wintergerste/ Winterweizen

4.1.2 Feldversuch Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen

Die Feldersuche zur Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen wurden größtenteils bereits im Jahr 2014, zum Start der ersten Projektphase, angelegt. Lediglich ein Standort (Wolferkofen) konnte erst 2015 etabliert werden. Im Feldversuch wuchsen die mehrjährigen Kulturen Silphie, Sida, Riesenweizengras, Switchgras und Miscanthus. Die einjährigen Kulturen der Referenzfruchtfolge Mais, Winterweizen und GPS-Roggen standen im Wechsel. Nähere Angaben zum Versuchsaufbau sind dem Versuchsplan in Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Etablierung der mehrjährigen Kulturen erfolgte zu den in Tabelle 4 angegebenen Terminen mittels Pflanzung oder Drillsaat. Die Parzellengröße betrug jeweils 100 m², die Größe der Erntefläche etwa 60 m². Die Versuche waren an jedem Standort als randomisierte, vollständige Blockanlage mit jeweils vier Wiederholungen angelegt.

Die Silphie wurde zu Versuchsbeginn mit einer Gemüsepflanzmaschine mit vier Pflanzen/m² gepflanzt. Die Kultur Sida wurde auf den Standorten Gelchsheim, Rosenau, Hötzelndorf und Aholfing mit einer Saatstärke von etwa 1 kg/ha gesät. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass sich gesäte Bestände im Etablierungsjahr sehr langsam entwickeln. Das Unkraut ist kaum kontrollierbar, da chemische Mittel nicht zugelassen und auch keine verträglichen Mittel verfügbar sind. In Wolferkofen und Parsberg wurde deshalb entschieden, den Bestand zu pflanzen (6–8 Pflanzen/m²), um der Kultur einen Vorsprung vor der Entwicklung der Unkräuter zu geben. Riesenweizengras (RWG) und Switchgras (SG) wurden

mit 25 bzw. 10 kg/ha gedrillt. Die Etablierung des Miscanthus erfolgte mit ca. 1 Rhizom/m² mit einer TFZ-eigenen Legemaschine.

Tabelle 3: Versuchsplan – „Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen“

Versuchsjahr	Ertragserfassung (2017–2020)
Versuchsdesign	4 Wiederholungen
Standorte	Wolferkofen, Aholting, Rosenau, Hötzelsdorf, Gelchsheim, Parsberg
Varianten	<p>Verwertung als Biogassubstrat, Ernte im Sommer/Herbst</p> <p>V1: Silphie: Pflanzung, Herkunftsmischung</p> <p>V2: Sida: Saat, Sorte Sida East</p> <p>V4: Riesenweizengras: Saat, Sorte GreenStar</p> <p>V5: Riesenweizengras: Saat, Sorte Alkar</p> <p>V6: Switchgras: Saat, Sorte Shawnee</p> <p>V8: Silphie, etabliert als Untersaat unter Silomais</p> <p>Thermische Verwertung, Ernte im Frühjahr</p> <p>V3: Sida: Saat, Sorte Sida East</p> <p>V7: Switchgras: Saat, Sorte Cave in Rock</p> <p>V9: Miscanthus: Pflanzung, <i>Miscanthus x giganteus</i></p> <p>Referenzkulturen</p> <p>V10–12: Referenzfruchtfolge: Mais, Winterweizen (als Füllfrucht ohne Ertragserfassung), GPS-Winterroggen</p>
Zielgrößen	zur Ernte: Frischmasseertrag, Trockenmasseertrag, Trockensubstanzgehalt, BBCH, Wuchshöhe, Lager, Mängel, Qualität

In Parsberg mussten beide Versuchsvarianten Switchgras („Shawnee“ und „Cave in Rock“) in 2017 aufgegeben werden. Das Switchgras war mehrmalig nachgesät worden, wurde jedoch immer wieder vom Unkraut und Ungras überwachsen. Stattdessen wuchs dort eine mehrjährige Bienenweide („Natur Plus BW 900“), die jedoch kein Bestandteil des Versuchs ist.

Am Standort Rosenau wurde die Variante Sida für die Verwertung als Biogassubstrat im Frühjahr 2019 aufgegeben, da Verunkrautung und -ungrasung derart zugenommen hatten, dass die Sidapflanzen unterdrückt wurden und kaum noch Triebe der Sida auf den Parzellen zu finden waren.

Die Versuchsvariante „Waldstaudenroggen“ (Variante 8) der ersten Projektphase hatte sich als nicht praxistauglich erwiesen und wurde deshalb umgebrochen. Den frei gewordenen Platz nahm ein Anbau- bzw. Etablierungsversuch mit Silphie als Untersaat unter Silomais ein. Auf den Standorten Wolferkofen, Aholfing, Rosenau und Hötzelsdorf wurden im Frühjahr 2017 Mais (6 Körner/m²) und Silphie (25 Körner/m²) in alternierenden Reihen mittels Parzellen-Einzelkorntechnik gesät (Abstand innerhalb der jeweiligen Kultur 75 cm). Als Maissorte wurde die Cycloxydim-resistente Sorte „GEOXX DUO“ verwendet. 2018 konnte dann der Silphiebestand erstmalig beerntet werden. In Gelchsheim stand 2017 nur Silomais in dieser Variante, da die notwendige Technik für eine Silphieaussaat mittels Einzelkornsämaschine dort nicht verfügbar war. Seit 2018 wuchs dort eine Blümmischung.

In Parsberg wurde als Variante 8 im Herbst 2017 GPS-Roggen gesät, da auf der für den Roggen vorgesehen Fläche (Variante 11) eine Saat nicht durchführbar war. Das nach der Füllfrucht Winterweizen verbliebene Stroh verhinderte die Saat und ein Unterpflügen war dort aufgrund der im Vergleich zur Praxis geringen Größe der Parzellen bzw. mangels geeigneter Technik nicht möglich. Im Frühjahr 2018 erfolgte dann die Einsaat von Sommerroggen auf den Parzellen der Variante 11, um den Ablauf der Fruchtfolge einzuhalten. In 2019 wurde als Variante 8 eine Blümmischung eingesät.

Tabelle 4: Pflanz- und Saattermine der mehrjährigen Energiepflanzen

Standort	Pflanzung Miscanthus	Pflanzung Silphie	Saat/Pflanzung Sida	Saat Riesenweizengras	Saat Switchgras	Silphie/Mais Untersaat
Wolferkofen	30.04.2015	12.05.2015	13.05.2015	13.05.2015	13.05.2015	18.05.2017
Aholfing	29.04.2014	05.06.2014	23.07.2014	23.07.2014	23.07.2014	22.05.2017
Rosenau	23.04.2014	13.06.2014	18.07.2014	18.07.2014	18.07.2014	19.05.2017
Hötzelsdorf	28.04.2014	26.05.2014	07.07.2014	07.07.2014	07.07.2014	22.05.2017
Parsberg	24.04.2014	04.06.2014	07.06.2016	19.08.2014	18.07.2016	–
Gelchsheim	21.04.2015	03.06.2014	17.07.2014	17.07.2014	17.07.2014	–



Abbildung 8: *Silphie etabliert als Untersaat unter Silomais (Wolferkofen, Foto: 17.08.2017)*

Angaben zur Referenzfruchtfolge sind Tabelle 5 zu entnehmen. Als Winterweizensorte stand „Patras“ und als GPS-Roggen die Sorte „Brassetto“ auf den Flächen. Als Maisreferenz wurden die Sorten „Atletas“ (S280) und „Fernandez“ (S250, nur Hötzelendorf) angebaut. Die Saattermine der Referenzen sind Tabelle 63, Tabelle 64 und Tabelle 65 zu entnehmen. Der Winterweizen wurde im Versuchsjahr 2017 gedroschen und das Stroh auf der Fläche belassen und eingearbeitet. Im Frühjahr 2017 musste in Hötzelendorf der GPS-Roggen aufgrund schlechten Feldaufgangs und wegen Auswinterungsschäden umgebrochen werden. Stattdessen wurde Ende März die Sommertriticale „Somtri“ zur GPS-Nutzung angebaut. 2018 und 2019 wurde der Winterweizen gemeinsam mit dem Roggen als GPS-Getreide geerntet, da das verbleibende Stroh nach einem Winterweizendrusch in den Vorjahren Probleme verursacht hatte. Wie oben beschrieben wurde 2018 in Parsberg sowohl Winter- als auch Sommerroggen gesät. Vor Saat der einjährigen Kulturen findet jeweils eine konservierende Bodenbearbeitung mit Grubber und Kreiselegge statt.

Die Stickstoffdüngung wurde mit einem Parzellendüngerstreuer durchgeführt. Die N-Düngemenge wurde anhand der N-Entzugswerte auf Basis der Erntemenge und der Angaben des Leitfadens für die Düngung von Acker- und Grünland [8] berechnet. Die durch eine Bodenuntersuchung zu Vegetationsbeginn variantenscharf ermittelten Boden-N_{min}-Werte (Tabelle 50, Tabelle 51 und Tabelle 52) wurden bei der Berechnung berücksichtigt. Die

Stickstoffdüngung wurde mit Kalkammonsalpeter (KAS) durchgeführt (Tabelle 66, Tabelle 67 und Tabelle 68). Bei Roggen, Winterweizen und Switchgras wurde der Stickstoff in zwei, bei Riesenweizengras in drei Gaben appliziert. Die Maisvariante erhielt eine Unterfußdüngung von 30 kg N/ha.

Tabelle 5: Referenzfruchtfolge (Hauptfrucht/Herbstsaat)

Jahr	Variante 10	Variante 11	Variante 12
2017	GPS-Roggen/Ramtillkraut	Weizen/GPS-Roggen*	Mais/Weizen
2018	Mais/Weizen	GPS-Roggen/Ramtillkraut	Weizen/GPS-Roggen
2019	Weizen/Ramtillkraut	Mais/Ramtillkraut	GPS-Roggen/Ramtillkraut

* abweichend dazu 2017/18 in Parsberg: Variante 8 = GPS-Roggen, Variante 11 = Senf/Sommergetreide

Eine Kali-, Phosphor- und Kalzdüngung erfolgte entweder mit dem Parzellendüngerstreuer, von Hand oder auch mit einem Praxisdüngerstreuer. Die Düngemengen sind in Tabelle 70 bis Tabelle 75 im Anhang dargestellt. Der Entzug an K, P, Ca und Mg wurde ebenfalls auf Basis der Erntemenge und der Inhaltsstoffgehalte (nach LfL-Basisdaten [7] oder eigenen Untersuchungen) berechnet. Bodenanalysen im Frühjahr 2017 gaben Aufschluss über die Versorgungsstufe und damit über die zu applizierende Düngemenge (siehe Tabelle 48).

Im Getreide kamen in der Regel Halmverkürzer zum Einsatz. Eine Herbizidmaßnahme im Roggen war normalerweise bereits im Herbst notwendig. In der Referenzkultur Mais gehörte ebenfalls der Herbizideinsatz zu den Standardmaßnahmen. In Silphie ist eine Herbizidbehandlung hauptsächlich zur Bestandsetablierung notwendig. Die bereits etablierten Silphiebestände benötigten keine chemische Unkrautkontrolle. In der in Untersaat etablierten Silphie wurde eine mechanische Unkrautkontrolle durchgeführt. Die Kultur Sida verträgt keinerlei Herbizide gegen zweikeimblättrige Unkräuter, es können lediglich Gräser chemisch bekämpft werden. Bei Riesenweizengras und Switchgras war 2017, 2018 und 2019 standortabhängig im Frühjahr und nach dem ersten Schnitt der Einsatz von Herbiziden erforderlich. Eine Übersicht über die eingesetzten Halmverkürzungsmittel sowie Herbizide geben Tabelle 76, Tabelle 77 und Tabelle 78 im Anhang. Die Beerntung der Versuche erfolgte mit einem reihenunabhängigen Parzellenhäcksler. Sowohl die Kulturen für eine Nutzung als Biogassubstrat als auch die Kulturen für eine thermische Verwertung wurden mit dieser Technik geerntet. Das Erntegut wurde auf ca. 1 cm zerkleinert und auf dem Feld im Probenehmer verworfen. Für die Ernte des zweiten Aufwuchses (Gräser) kam ein Parzellengrünguternter zum Einsatz. Dieser ist für geringe Erntemengen und wasserhaltige Grünschnitte besser geeignet und ermöglicht einen tieferen und gleichmäßigeren Schnitt. Aus der Erntemasse, bezogen auf die Parzellengröße, wurden die Frischmasseerträge je Hektar berechnet. Aus dem Erntegut wurde zweimal ca. 1 kg Probematerial entnommen. Eine Probe wurde bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und diente zur Bestimmung der Inhaltsstoffe/Biogasausbeute. Die zweite Probe wurde bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet zur Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes (TS-

Gehalt). Die TS-Bestimmung wurde parzellenweise durchgeführt und zur Berechnung des Trockenmasseertrags (TM-Ertrag) herangezogen.

Für die statistische Auswertung wurde die Software SAS Version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) verwendet. Die Ertragsdaten wurden aus den vier Wiederholungen je Jahr und Standort um Ausreißer zu $\alpha = 0,1\%$ gesäubert. Die Varianzanalysen wurden mittels *GLIMMIX Procedure* mit anschließendem Tukey-Mittelwertvergleich mit $\alpha = 5\%$ durchgeführt, die Jahre dabei als zufälliger Faktor angesehen. Die *least square means* wurden als Mittelwerte für die Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte genutzt. Für Lagerbonitur und Pflanzenhöhe wurden die Mittelwerte mit MS Excel berechnet, da hier keine Normalverteilung vorlag. Die Grafiken wurden mit Origin 2019 (OriginLab, Northampton, MA, USA) erstellt.

4.1.3 Feldversuch Etablierung von Sida

Ein Feldversuch zur Etablierung von Sida sollte zeigen, ob durch den Anbau unter einer Deckfrucht der Unkrautdruck verringert werden kann, da eine chemische Unkrautkontrolle in dieser Kultur nicht möglich ist. Dazu wurden zwei Anlagen am Standort Straubing angelegt (2017: Anlage A und 2018: Anlage B). Die Varianten sowie weitere Parameter sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Buchweizen verspricht eine gute Unkrautunterdrückung und sollte einen erntewürdigen Bestand liefern, um den Ertragsausfall des ersten Jahrs zumindest teilweise zu überbrücken. Die Variante Winterweizen mit Saattermin im Frühjahr diene ausschließlich der Unkrautunterdrückung. Da der Kältereiz des Winters fehlt, geht der Winterweizen nicht ins Schossen und bedeckt nach der Bestockung zwar den Boden, läuft aber nicht Gefahr die Sida zu überwachsen. Das Ackergras bildet im Frühjahr, bedingt durch die Saat im Herbst, schon einen bodenbedeckenden Bestand. Auch besteht hier die Möglichkeit, vor Aussaat der Sida nochmals eine chemische Unkrautbekämpfung gegen zweikeimblättrige Unkräuter durchzuführen. Es findet dann im Frühjahr auch keine Bodenbearbeitung mehr statt, was den Unkrautdruck ebenfalls vermindern sollte. Als Kontrolle diene eine Reinsaatvariante.

Da sich die Ackergrasvariante nach dem ersten Versuchsjahr als nicht erfolgversprechend herausgestellt und die Sida auch in Reinsaat einen schlechten Feldaufgang hatte, wurde Anlage A im Herbst 2017 umgebrochen und nicht wie geplant bis zur Ernte fortgeführt. Die Versuchsvarianten für Anlage B wurden angepasst. Im veränderten Versuchsdesign sollte eine Herbstsaat klären, ob durch den Kältereiz über Winter und die höhere Bodenfeuchte der Feldaufgang im Frühjahr verbessert werden kann. Eine Aussaat im zeitigen Frühjahr sollte ebenfalls durch eine höhere Bodenfeuchte den Feldaufgang verbessern. Ein früheres Auflaufen könnte Vorteile hinsichtlich der Konkurrenzkraft gegenüber Unkräutern bringen.

Anlage A wurde am 30.05.2017 gesät. Lediglich die Saat der Deckfrucht Ackergras (Bastardweidelgras Sorte „Pirol“) war bereits am 27.09.2016 erfolgt. Die Saatstärke des Grases

lag bei 25 kg/ha. Die Saatstärke des Buchweizens betrug 50 kg/ha, der Winterweizen wurde mit 250 keimfähigen Körnern pro m² gesät. Die Untersaat der Sida bzw. das Einschlitzen in den Ackergrasbestand erfolgte mit Einzelkorntechnik. Da von einer schlechten Keimfähigkeit bzw. einem schlechten Feldaufgang der Sida auszugehen war (ca. 20 %), wurde diese mit 50 Körnern/m² abgelegt, was einer Saatstärke von 2,2 kg/ha entspricht. Als Zielbestandsdichte werden in der Regel 6 bis 8 Pflanzen/m² veranschlagt. In die Deckfrüchte Buchweizen und Winterweizen wurde die Sida in alternierenden Reihen gesät. Die Kontrollvariante in Reinsaat wurde mit einem Reihenabstand von 50 cm gesät. Das Ackergras wurde am 20.06.2017 mit einem Gräsermittel abgetötet und der Buchweizen am 20.07.2017 geerntet, um den Sidapflanzen im Sommer genügend Licht und Wasser für ihre Entwicklung zu geben.

Für Anlage B wurde die Saatstärke der Sida von 2,2 kg/ha (Anlage A) auf 4,9 kg/ha erhöht. Die Saatstärke des Buchweizens betrug 50 kg/ha, der Winterweizen wurde mit 250 keimfähigen Körnern pro m² gesät. In Anlage B wurde die Aussaat mit Deckfrucht nicht in alternierenden Reihen, sondern neunreihig (14 cm Reihenabstand, Deckfrucht) und vierreihig (37,5 cm Reihenabstand, Sida) in zwei Arbeitsgängen leicht versetzt durchgeführt. Bei dieser Technik ist die Übertragbarkeit in die Praxis besser gegeben. Die genauen Saattermine befinden sich in Tabelle 7. In den Varianten 1, 4 und 5 wurden mehrere mechanische Unkrautbehandlungen durchgeführt.

Die Varianten Herbstsaat und Aussaat im zeitigen Frühjahr wurden im Versuchsjahr 2019 nochmals angelegt und ersetzen die Varianten 2 und 3.

Tabelle 6: Versuchsplan – „Etablierung von Sida unter Deckfrucht“

Versuchsjahr	Anlage A: (2016) 2017 – Abbruch im Herbst 2017 Anlage B: (2017) 2018 – Abbruch im Frühjahr 2019
Versuchsdesign	4 Wiederholungen
Standort	Straubing
Varianten	<p>Anlage A</p> <p>V1: Kontrolle ohne Deckfrucht</p> <p>V2: Misanbau Buchweizen + Sida</p> <p>V3: Sida-Einsaat in Winterweizen (Saat beider Kulturen im Frühjahr)</p> <p>V4: Sida-Einsaat in Ackergras</p> <p>Anlage B 2018</p> <p>V1: Kontrolle ohne Deckfrucht</p> <p>V2: Misanbau Buchweizen + Sida</p> <p>V3: Sida-Einsaat in Winterweizen (Saat beider Kulturen im Frühjahr)</p> <p>V4: Sida-Herbstaussaat (Saat 2017)</p> <p>V5: Sida-Frühjahrsaussaat</p> <p>Anlage B 2019</p> <p>V1: Kontrolle ohne Deckfrucht</p> <p>V2: Sida-Herbstaussaat (Saat 2018)</p> <p>V3: Sida-Frühjahrsaussaat</p> <p>V4: Sida-Herbstaussaat (Saat 2017)</p> <p>V5: Sida-Frühjahrsaussaat</p>
Zielgrößen	laufend: Beurteilung von Mängeln zur Ernte: Frischmasseertrag, Trockenmasseertrag, Trockensubstanzgehalt

Tabelle 7: Saattermine von Anlage B

Variante	Saattermin
Aussaat für die Vegetationsperiode 2018	
V1: Kontrolle ohne Deckfrucht	02.05.2018
V2: Misanbau Buchweizen + Sida	02.05.2018
V3: Sida-Einsaat in Winterweizen (Saat beider Kulturen im Frühjahr)	02.05.2018
V4: Sida-Herbstaussaat	20.10.2017
V5: Sida, frühzeitige Aussaat	09.04.2018
Aussaat für die Vegetationsperiode 2019	
V2: Sida-Herbstaussaat	15.11.2018
V3: Sida, frühzeitige Aussaat	28.03.2019

4.2 Substratqualität (TFZ)

Eine Qualitätsuntersuchung zu unterschiedlichen Schnittzeitpunkten sollte helfen, die Entwicklung von Qualitätsparametern in einem Zeitraum von vier bis sechs Wochen zu bestimmen und ein geeignetes Erntefenster mit einer günstigen inhaltsstofflichen Zusammensetzung zur Maximierung der Methanausbeute abzuleiten. Hierzu wurden zu fünf Terminen aus den Randreihen der in Tabelle 8 genannten Kulturen per Hand ganze Pflanzen entnommen. Die Proben wurden durch Häckseln, Mischen und Trocknen aufbereitet und zur Analyse an ein geeignetes Labor sowie den Projektpartner LfL-ILT zur Untersuchung verschickt.

Die Ertragsbestimmung fand nur zur Haupternte statt. Für zweischnittige Kulturen erfolgten, um den ersten Schnitttermin, ebenfalls fünf Probenahmen sowie Analysen. Der zweite Schnitt findet in der Regel sehr spät, Mitte Oktober, statt. Es bleibt kaum Spielraum für eine Optimierung des Erntetermins, da die Witterung den Hauptfaktor zu dessen Festlegung darstellt. Hier wurde nur zu einem Termin, nämlich zur eigentlichen Ernte, eine Probe für die Analyse entnommen. Im Jahr 2019 wurde die Probennahme in den Biogaskulturen wie in den Jahren zuvor durchgeführt, aber nur der Trockensubstanzgehalt bestimmt.

Für die thermisch genutzten Kulturen wurde keine zeitlich gestaffelte Ernte vorgesehen, da im Frühjahr nicht mehr von großen Veränderungen der Inhaltstoffe im abgetrockneten Material auszugehen ist und der Erntezeitpunkt vornehmlich durch den Trockensubstanzgehalt und die Erntebedingungen (Befahrbarkeit) bestimmt wird.

Tabelle 8: Versuchsplan – „Substratqualität“

Versuchsjahr	2017, 2018
Standorte	Versuch zur Anbaueignung in Wolferkofen
Varianten	<p>Biogasnutzung:</p> <p>Silphie, Sida, Switchgras, Riesenweizengras (GreenStar), GPS-Roggen (nur Haupternte), Silomais (nur Haupternte)</p> <p>Thermische Nutzung:</p> <p>Miscanthus, Switchgras, Sida</p>
Probenahme	<p>Biogasnutzung:</p> <p>Fünf Termine jeweils im Abstand von einer Woche um den geschätzten Haupterntetermin des 1. Schnitts sowie zum Erntetermin des 2. Schnitts</p> <p>Thermische Nutzung:</p> <p>zur Haupternte</p>
Analysen	<p>Biogasnutzung:</p> <p>TS, Methanausbeute, Weender + Van Soest, Zucker, Stärke, Mineralstoffe (P, K, Mg, Ca, S)</p> <p>Thermische Nutzung:</p> <p>TS, Heizwert, Aschegehalt, Ascheschmelzpunkt, Elementaranalyse</p>

4.2.1 Analyse der Methanausbeute

Die Untersuchung der Methanausbeute des Pflanzenmaterials wurde von dem Projektpartner, dem Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL-ILT), vorgenommen. Die gehäckselten Ernteproben wurden dazu bei 60 °C getrocknet und anschließend auf 10 mm vermahlen. Für die Analyse standen Mischproben aus den vier Wiederholungen der jeweiligen Variante zur Verfügung. Die Bestimmung des Methanbildungspotenzials des Ernteguts wird in Batchversuchen [44] in Anlehnung an die Methoden nach VDI 4630 [187] und der VDLUFA [188] mit Dreifachbestimmung und kontinuierlicher Gasmessung durchgeführt.

4.2.2 Analyse der Inhaltsstoffe

Die Bestimmung der Inhaltsstoffe des Pflanzenmaterials wurde in zertifizierten Laboren nach den in Tabelle 9 dargestellten VDLUFA-Methoden durchgeführt. Die Analyse erfolgte prüfgliedweise an einer getrockneten Mischprobe aus den vier Versuchswiederholungen. In 2017 wurde eine Mischprobe aus den vier Wiederholungen der Ernteparzellen für die Analysen verwendet. Aufgrund z. T. nicht erklärbarer Schwankungen wurde für 2018 der Probenumfang erhöht und eine getrennte Analyse der vier Wiederholungspartellen vorgenommen (nur für die Weender Analyse, nicht für Untersuchung der Methanausbeute). Für jede Variante und jeden Schnitzeitpunkt ergeben sich daher vier Analyseergebnisse.

Tabelle 9: Methoden der Inhaltsstoffanalyse von den als Biogassubstrat genutzten Kulturen

Parameter	Methode
Trockenmasse	VDLUFA, MB Bd. 3, Unterkapitel 3.1
Rohasche	VDLUFA, MB Bd. 3, Unterkapitel 8.1
Rohprotein (Dumas)	VDLUFA MB Bd. 3, Abschnitt 4.1.2
Rohfett	VDLUFA, MB Bd. 3, Abschnitt 5.1.
Rohfaser	VDLUFA, MB Bd. 3, Abschnitt 6.1.2
Summe der Gerüstsubstanzen: NDF (Van Soest), <i>neutral detergent fiber</i>	VDLUFA, MB Bd. 3, Abschnitt 6.5.1
Gehalte an Cellulose und Lignin: ADF (Van Soest), <i>acid detergent fiber</i>	VDLUFA, MB Bd. 3, Abschnitt 6.5.2
Gehalt an Lignin: ADL (Van Soest), <i>acid detergent lignin</i>	VDLUFA, MB Bd. 3, Abschnitt 6.5.3
Mineralstoffe (P, K, Mg, S, Ca)	VDLUFA MB Bd. 3, Abschnitt 2.2.2.6

4.2.3 Brennstoffanalyse

Zur Einschätzung der Brennstoffqualität der thermisch genutzten Kulturen wurde eine Bestimmung der nachfolgenden Parameter nach den Methoden in Tabelle 10 an einer Mischprobe aus vier Wiederholungen vorgenommen.

Tabelle 10: Methoden zur Bestimmung der Brennstoffzusammensetzung der thermisch genutzten Kulturen

Parameter	Methode nach Norm
Heizwert Hu	DIN EN ISO 18125 (Entwurf von 2015)
Aschegehalt	DIN EN ISO 18122
Wasser	DIN EN ISO 18134-3
C	DIN EN ISO 16948
H	DIN EN ISO 16948
N	DIN EN ISO 16948
S	DIN EN ISO 16994
Cl	DIN EN ISO 16994
Mg	DIN EN ISO 17294-2
Na	DIN EN ISO 17294-2
P	DIN EN ISO 17294-2
Ca	DIN EN ISO 17294-2
K	DIN EN ISO 17294-2
Si	DIN EN ISO 17294-2
Ascheschmelzverhalten	CEN/TS 15370-1

4.3 Bestimmung des mineralischen Stickstoffs im Boden

Die Durchführung der Bodenanalysen im Feldversuch zur Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen wurde prüfgliedweise an einer Mischprobe aus den vier Wiederholungen der jeweiligen Variante in zertifizierten Laboren durchgeführt. Die verwendeten Methoden sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Probenahme erfolgte in den drei Tiefen 0–30, 30–60 und 60–90 cm. Die Bodenproben wurden jährlich im Frühjahr und im Herbst gezogen.

Tabelle 11: Methoden der Stickstoff-Bodenuntersuchungen

Parameter	Methode
Mineralischer Stickstoff (N_{\min})	VDLUFAs, MB Bd. 1, Abschnitt 6.1.4.1

4.4 Grundbodenuntersuchung

Zur Einschätzung des Düngebedarfs an Kalzium, Phosphor, Kalium und Magnesium und des pH-Werts auf den Versuchsflächen wurden Bodenproben (0–30 cm) prüfgliedweise nach den Methoden gemäß Tabelle 12 von einem zertifizierten Labor untersucht.

Tabelle 12: *Methodik der Grundbodenuntersuchungen*

Parameter	Methode
pH-Wert	VDLUFA, MB. Bd. 1, Abschnitt 5.1.1
Phosphor	VDLUFA, MB. Bd. 1, Abschnitt 6.2.1.1
Kalium	VDLUFA, MB. Bd. 1, Abschnitt 6.2.1.12
Magnesium	VDLUFA, MB. Bd. 1, Abschnitt 6.2.4.1

4.5 Auswirkungen von Dauerkulturen auf Umweltparameter (LfL)

4.5.1 Humusgehalte und -vorräte

An den Standorten Aholting, Gelchsheim und Wolferkofen wurde im Oktober 2019 jeweils in den Varianten Silphie, Riesenweizengras, Miscanthus und Mais (Referenz) ein Bodenkern pro Parzelle bis 1 m Tiefe gezogen, um Erkenntnisse hinsichtlich der Effekte der untersuchten Dauerkulturen auf die Speicherung organischen Bodenkohlenstoffs (C_{org}) und des Gesamtstickstoffs (N_t) sowie auf die Lagerungsdichte (LD), Steingehalte und die pH-Werte zu gewinnen. Die Probennahme erfolgte mit einer Rammkernsonde mit einem Innendurchmesser von 6 cm. Die entnommenen Bodenkerne wurden vor Ort in die Tiefenstufen 0–15, 15–30, 30–50, 50–70 und 70–100 cm unterteilt. Bei auftretenden Stauchungen bzw. Streckungen der Bodenkerne (± 15 cm) erfolgte eine lineare Verteilung der Differenz auf die Tiefenstufen 30–50, 50–70 und 70–100 cm unter der Annahme, dass Stauchungen bzw. Streckungen vorwiegend im Unterboden (30–100 cm) erfolgen [194].

Die Bodenproben wurden in leicht feuchtem Zustand auf 2 mm gesiebt, wobei Wurzeln/Rhizome und Steine > 2 mm getrennt erfasst und gewogen wurden. Der gesiebte Feinboden wurde bei 40 °C für ein bis zwei Tage getrocknet und anschließend auf 0,5 mm gemahlen. Für die Bestimmung der LD wurde eine Subprobe (ca. 40 g) des bei 40 °C getrockneten Feinbodens bei 105 °C für ein bis zwei Tage getrocknet und gewogen. Aus der daraus ermittelten Trockenmasse der Tiefenstufen und dem jeweiligen Volumen wurden die Lagerungsdichten des Feinbodens berechnet, wobei das Volumen von Steinen unter der Annahme einer mittleren Dichte von 2,65 g/cm³ berücksichtigt wurde. Gehalte an Gesamt-C (C_t) und N_t wurden mit einem CN-Analysator (Vario-EL Cube, Elementar, Deutschland) nach trockener Verbrennung bei 1000 °C bestimmt. Die Carbonat-C-Bestimmung erfolgte gasvolumetrisch mit dem Scheibler-Verfahren. Durch das Bilden der Differenz von C_t und Carbonat-C wurde der C_{org} -Gehalt ermittelt. C_{org} -Vorräte wurden für alle Tiefenstufen mittels Formel (4.1) berechnet:

$$C_{org}\text{-Vorrat} = C_{org} \times LD \times Tiefe \times (1 - \text{Steingehalt}) \times 0,01 \quad (4.1)$$

C_{org} -Vorrat Organischer Kohlenstoffvorrat in kg/m^2

C_{org} Organischer Kohlenstoffgehalt in mg/g

LD Lagerungsdichte in g/cm^3

Steingehalt Volumenanteil der Steine

Der pH-Wert des Bodens wurde in 0,01 M CaCl_2 -Lösung in einem Boden-Lösungsverhältnis von 1 : 25 (g/ml) gemessen.

Die statistische Auswertung erfolgte für die Parameter C_{org} , N_t , pH, Lagerungsdichte und das C/N-Verhältnis mit gemischten linearen Modellen mit einem zufälligen Modellteil für die untersuchten Standorte, Versuchswiederholungen und Parzellen und einem festen Teil mit der Tiefenstufe und der Kultur sowie deren Wechselwirkungen. Die räumliche Abhängigkeit der einzelnen Tiefenstufen wurde hierbei vernachlässigt. Zusätzlich wurde die oberste Tiefenstufe alleine untersucht. Der Kohlenstoffvorrat wurde für über die Tiefe aufsummierte Werte über alle Standorte und für jeden Standort getrennt analysiert. Warren inhomogene Varianzen für die Standorte festzustellen, wurden diese mit einer wichtenden Varianzfunktionsstruktur berücksichtigt. Ob Kultur, Tiefenstufe oder deren Wechselwirkungen einen signifikanten Anteil der Varianz erklären, wurde mithilfe von Likelihood-Ratio-Tests für ein Signifikanzniveau von 0,05 geprüft. Die Voraussetzungen für die Modelle wurden grafisch überprüft. Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturarten wurden durch den Vergleich der geschätzten Werte (*estimated marginal means*, *Tukey-HSD*) durchgeführt.

4.5.2 Untersuchung bodenphysikalischer Parameter wie Textur, Lagerungsdichte und Porenverteilung

Korngrößenzusammensetzung (Texturanalyse)

Die Korngrößenzusammensetzung wurde im Jahr 2019 an den Standorten Aholfing, Gelchsheim und Wolferkofen für die Parzellen mit Wiederholungen der Kulturen Silphie, Riesenweizengras (GreenStar), Miscanthus und auf der Referenzparzelle mit Maisstoppeln in einer Tiefe von 10 bis 15 cm untersucht. Dazu wurden Bodenmischproben der Parzellen auf 2 mm gesiebt, die enthaltene organische Substanz zerstört (30 Gew.-% Wasserstoffperoxid), lösliche Salze und Gips entfernt, die Probe dispergiert (Natriumpyrophosphat) und mit Nasssiebung und Sedimentationsmethode nach DIN ISO 11277 in die Korngrößenfraktionen aufgetrennt.

Im Herbst 2019 wurden an den Standorten Aholfing, Gelchsheim und Wolferkofen (Aholfing: 20.11.2019, Gelchsheim: 22.10.2019, Wolferkofen: 23.10.2019) auf den Parzellen mit Silphie, Riesenweizengras (GreenStar), Miscanthus und der Referenz mit

Maisstoppeln sechs Stechzylinder (\varnothing 8 cm, Höhe 5 cm, Volumen 250 cm³) aus 10–15 cm sowie 30–35 cm Tiefe entnommen und bodenphysikalische Kennwerte ermittelt (Abbildung 9), die erste Tiefe, um die Auswirkungen der Varianten auf die bodenphysikalischen Eigenschaften im Bearbeitungsbereich sowie durch die zweite Tiefe unterhalb des Pflughorizonts zu erfassen. In Aholting wurden nur die Versuchswiederholungen 3 und 4 untersucht, da die beiden übrigen Wiederholungen einen zu hohen Steingehalt aufwiesen, um aussagekräftige Messungen vornehmen zu können.



Abbildung 9: *Probenahme mit Stechzylindern zur Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter; je Beprobungstiefe sechs Stechzylinder als Wiederholung horizontal nebeneinander (links); Durchführung der Probenahme mit Einschlagen der Stechzylinder und anschließendem sorgfältigen Ausgraben (rechts)*

Für jede Probe wurde die Trockenrohdichte (TRD) nach Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C bestimmt. An einer gestörten, auf 2 mm gesiebten und bei 105 °C getrockneten Bodenprobe aus der gleichen Tiefe der Parzelle wurde die Substanzdichte (FSD) ermittelt (Accu Pyc 1330, Micromeritics Instrument Corp., Unterschleißheim, Deutschland). Hieraus wurde das Gesamtporenvolumen (GPV) berechnet (Formel (4.2)). Die Feldkapazität wurde bei einer pF-Stufe von 1,8 ermittelt (DIN 11274). Der Totwasser-gehalt (TW) ergibt sich aus dem Verhältnis einer gestörten Bodenprobe (je Parzelle) bei einer angelegten Bodenwasserspannung (pF-Stufe) von 4,2 zur Bodenprobe nach vollständiger Trocknung bei definiertem Volumen (vierfache Messwiederholung). Dabei wird der Zustand des Bodenwassers bei pF 4,2 als permanenter Welkepunkt bezeichnet. Aus diesen Parametern sind die nutzbare Feldkapazität (Formel (4.3)) und die Luftkapazität (Formel (4.4)) zu berechnen. Die Luftkapazität stellt ein Maß für die Versorgung der

Pflanzenwurzeln mit Sauerstoff dar, wobei die Größe der Poren ausschlaggebend für die Luft und/oder Wassersättigung ist. Dadurch stellt die Luftkapazität einen wichtigen Parameter dar, um für die Vegetation entscheidende Standorteigenschaften zu beurteilen.

$$GPV = 1 - \frac{TRD}{FSD} \times 100 \quad (4.2)$$

GPV Gesamtporenvolumen

TRD Trockenrohddichte

FSD Substanzdichte

$$nFK = FK - TW \quad (4.3)$$

nFK nutzbare Feldkapazität

FK Feldkapazität

TW Totwasser

$$LK = GPV - FK \quad (4.4)$$

LK Luftkapazität

GPV Gesamtporenvolumen

FK Feldkapazität

Aufgrund der großen Unterschiede insbesondere zwischen dem Standort mit leichtem Boden in Aholting und den Lößböden in Gelchsheim und Wolferkofen wurde die statistische Auswertung für jeden Standort und jede Tiefenstufe separat durchgeführt. Hierbei wurden mit einer Varianzanalyse die Parameter Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen auf Unterschiede zwischen den Kulturen geprüft. Die Voraussetzungen wurden grafisch überprüft. Als Signifikanzniveau wurde 0,05 angenommen und zum Vergleich der Kulturen der Tukey-Test angewendet.

Im Frühjahr 2019 wurde für die thermisch genutzten Kulturen zudem die aktuelle Bodenfeuchte unter Miscanthus, Sida (thermisch genutzt) und Switchgras (thermisch genutzt) an den Standorten Aholting (08.04.2019), Hötzelsdorf (29.04.2019), Parsberg (25.04.2019), Rosenau (11.04.2019) und Wolferkofen (29.04.2019) bestimmt. Als Referenz für die Fruchtfolge aus annuellen Kulturen dienten die Parzellen mit Winterweizen. In jeder Parzelle wurden fünf Messungen mit einem einfachen Bodenfeuchtemessgerät (PCE SMM-

1) in einer Tiefe von etwa 10 bis 15 cm durchgeführt. Unterschiede zwischen den Kulturen wurden mit gemischten linearen Modellen für alle Messungen zusammen untersucht. Zufällige Effekte waren hierbei ineinander geschachtelt der Standort, die Versuchswiederholung und die einzelne Parzelle. Da die leichteren Böden in Aholting und Hötzelsdorf eine höhere Variation in den Daten aufwiesen, wurde eine gewichtende Varianzfunktionsstruktur im Modell berücksichtigt. Ob die Kulturart einen signifikanten Anteil der Varianz erklärt, wurde mithilfe von Likelihood-Ratio-Tests für ein Signifikanzniveau von 0,05 geprüft. Die Voraussetzungen für die Modelle wurden grafisch überprüft. Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturarten wurden durch den Vergleich der geschätzten Werte (*estimated marginal means*, *Tukey-HSD*) durchgeführt.

4.5.3 Regenwurmfauna

Die abschließende Erhebung der Regenwurmfauna fand vier bis fünf Jahre nach Etablierung der mehrjährigen Biogaskulturen Silphie, Sida, RWG an den Standorten Aholting, Hötzelsdorf, Parsberg, Rosenau und Wolferkofen im Herbst 2018 statt. Als Referenz diente eine dreigliedrige Fruchtfolge (Mais, Winterweizen, GPS-Roggen) mit jährlicher Bodenbearbeitung. Im Herbst 2018 wurden die Parzellen mit Ramtillkraut als Zwischenfrucht nach GPS-Roggen beprobt. Die thermisch genutzten Kulturen Miscanthus, Sida und Swit-chgras wurden im Frühjahr 2019 untersucht. Die Referenzkultur war hierbei Winterweizen mit Mais als Vorfrucht. Die Termine sind Tabelle 13 zu entnehmen. Der Standort Gelchsheim konnte aufgrund der starken Sommertrockenheit/Dürre 2018 nicht beprobt werden. Hier wurde die Untersuchung gemeinsam mit der Erhebung des Regenwurmbestands der thermisch genutzten Kulturen im Frühjahr 2019 durchgeführt.

Tabelle 13: Termine der Erhebung der Regenwurmfauna

Ort	Biogaskulturen	thermisch genutzte Kulturen
Aholting	30.10.2018	08.04.2019
Gelchsheim	02./03.04.2019	02./03.04.2019
Hötzelsdorf	17.10.2018	29.04.2019
Parsberg	31.10.2018	25.04.2019
Rosenau	24.10.2018	11.04.2019
Wolferkofen	25.10.2018	24.04.2019

Um eine gute Bestandserfassung der Regenwürmer zu erreichen, wurde eine Methodenkombination bestehend aus einer Austreibungsmethode und Handauslese angewendet (EHRMANN & BABEL 1991 [61], FRÜND & JORDAN 2003 [76], PELOSI *et al.* 2009 [137]). Dazu wurde zuerst eine stark verdünnte Formaldehydlösung (0,2 %) verteilt auf zwei Gaben (insgesamt 40 l/m²) auf einer 0,5 m² großen Probestelle aufgegossen und nach jeder Gabe die an die Bodenoberfläche kriechenden Regenwürmer über eine Zeitspanne von

15 Minuten aufgesammelt. Anschließend wurde ein Teil der Probestelle (0,1 m²) etwa 30 cm tief bis zur Pflugsohle ausgegraben und das Bodenmaterial von Hand durchsucht (Abbildung 10). Je Parzelle wurden zwei Stichproben entnommen. Die gesammelten und in 96%igem Ethanol konservierten Tiere wurden im Labor sortiert, auf ihre Art bestimmt (nur Adulte) und zur Ermittlung ihrer Biomasse gewogen.



Abbildung 10: Regenwurmprobenahme, Aufgießen der Austreibungslösung (links), Einsammeln der an der Bodenoberfläche erschienenen Regenwürmer (Mitte) und anschließende Handauslese ausgegrabenen Bodenmaterials (rechts)

Unterschiede im Regenwurmbestand zwischen den Kulturen wurden mit gemischten linearen Modellen geprüft. Für jeden einzelnen Standort wurde deren Siedlungsdichte (Poissonverteilung) und Biomasse (Gaußsche Verteilung) über die Versuchswiederholungen als zufällige Effekte und für die Kulturart als zu prüfender Faktor modelliert. Für die standortübergreifende Auswertung wurden als zufällige Effekte ineinander geschachtelt der Standort, die Versuchswiederholung und die Parzelle verwendet, da hierbei auch die einzelnen Stichproben berücksichtigt wurden. Die standortübergreifende Auswertung erfolgte für die Artenzahlen, Siedlungsdichte (Abundanz) und Biomasse der Regenwürmer insgesamt sowie jeweils auch für die Gruppe der tiefgrabenden und streubewohnenden Arten (hier Gattung *Lumbricus*) sowie die sonstigen Arten (vorwiegend Mineralschichtbewohner, Tabelle 14). Die Daten wurden vor der Analyse wurzeltransformiert. Die Artenzahl je Parzelle wurde lediglich standortübergreifend untersucht (Poissonverteilung). Ob die Kulturart einen signifikanten Anteil der Varianz erklärt, wurde mithilfe von Likelihood-Ratio-Tests für ein Signifikanzniveau von 0,05 geprüft. Die Voraussetzungen für die Modelle wurden grafisch überprüft und auf Überdispersion (Poisson-Modelle) getestet. Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturarten wurden durch den Vergleich der geschätzten Werte (*estimated marginal means*, *Tukey-HSD*) durchgeführt.

Tabelle 14: Ökologische Gruppen, Lebensformen der Regenwürmer

Ökologische Gruppen der Regenwürmer mit Beispielarten		
		
<i>Lumbricus castaneus</i>	<i>Aporrectodea caliginosa</i>	<i>Lumbricus terrestris</i>
Streubewohner	Flachgräber bzw. Mineral-schichtbewohner	Tiefgräber
epigäische Arten	endogäische Arten	anezische Arten
leben oberflächennah in der Streu und Humusauf-lage bilden keine oder nur tem-poräre Röhren	leben im Mineralboden bis ca. 60 cm Tiefe und gra-ben ständig neue, auch horizontale Röhren tragen zur Feindurchmi-schung organischer Sub-stanz mit dem Mineralbo-den bei	legen nahezu senkrechte, tief in den Unterboden reichende stabile Röhren an sammeln organisches Material an der Oberfläche ein, das sie in ihre Röhren ziehen

4.5.4 Laufkäferfauna (Bodenfallen)

An den Versuchsstandorten Rosenau, Wolferkofen, Ahofing und Hötzelsdorf wurden im Frühjahr 2017 in den Varianten Silphie, Sida (Biogas), Riesenweizengras (Sorte Green-Star) und der Referenz Winterweizen je Parzelle zwei Bodenfallen zur Erfassung der an der Bodenoberfläche aktiven Fauna aufgestellt. Winterweizen wurde als Referenzkultur aus der dreigliedrigen Fruchtfolge ausgewählt, da er auch die Auswirkungen des im Vorjahr angebauten Biogasmaises abbildet und die Fallen ungestört von Bewirtschaftungsmaßnahmen im Boden verbleiben konnten. Als Bodenfallen wurden Trinkgläser mit einer Öffnungsweite von 6,5 cm und einer Tiefe von 12,5 cm mit der Bodenoberfläche bündig abschließend eingegraben. Ein Dach aus Plexiglas schützte vor Regen (Abbildung 11). Als Fangflüssigkeit diente angesäuerte 5 %-ige Natriumbenzoatlösung versetzt mit einigen Tropfen Spülmittel als Detergens, mit der das Glas etwa zu zwei Dritteln gefüllt wurde. Im Zeitraum vom 02.03.2017 bis 16.05.2017 waren die Fallen fängig und wurden fünfmal geleert (20.03., 03.04., 18.04., 02.05., 16.05.2017). Der frühe Start der Aufnahmen wurde gewählt, um die Durchmischung der Arthropodengemeinschaften im Feldversuch gering zu halten. Es wird angenommen, dass zu Beginn der Aktivität im Frühjahr höhere Aktivitätsdichten in den Überwinterungshabitaten beobachtet werden können [196] [144]. Um die Besiedelung der mehrjährigen Energiepflanzen für im Winter aktive Laufkäfer (inkl. Larven, vgl. Abbildung 14) zu untersuchen, wurden am Standort Rosenau zusätzlich

Untersuchungen vom 17.10.2016 bis zum 02.03.2017 mit vier Leerungen (14.11., 16.12., 09.02., 02.03.) durchgeführt (Abbildung 12). Die gefangenen Tiere wurden in 70%igem Ethanol konserviert, nach taxonomischen Ordnungen sortiert und die Laufkäfer nach FREUDE et al. (2004) [74] bestimmt. Die Bestimmung der gefangenen Laufkäferlarven erfolgte mit KLAUSNITZER (1991) [103].



Abbildung 11: Bodenfallen in Riesenweizengras (links) und in Silphie (rechts)

Die Aktivitätsdichte wurde auf Individuen pro Tag und Falle standardisiert und kann als grober Schätzwert für die Anwesenheit von Laufkäfern in einem bestimmten Zeitintervall herangezogen werden. Für die faunistische Diversität der Kulturen wurden zwei Indikatoren verwendet: die Artenzahl (Gesamtsumme der nachgewiesenen Arten auf den verschiedenen Kulturen, mittlere Artenzahl je Standort und je Versuchswiederholung für die Kulturen) und der inverse Simpson-Index, der eine gegenüber Schwankungen der Aktivitätsdichte robuste Schätzung der Diversität auch bei kleinen Stichprobenzahlen gewährleistet und in geringerem Maß von der Artenzahl beeinflusst wird als andere Indikatoren [121].



Abbildung 12: Bodenfallen im Winter (09.02.2017) in Rosenau, links Silphie, rechts Riesenweizengras

Zudem wurden die Auswirkungen auf verschiedene ökologische Gruppen der Laufkäfer untersucht: Samenfresser (Arten, die zu einem großen Anteil Pflanzensamen als Nahrung zu sich nehmen: die Gattungen *Amara*, *Anisodactylus*, *Harpalus*, *Ophonus*), kleine räuberische Laufkäfer (alle kleiner als 6 mm) und große räuberische Laufkäfer (Gattung *Carabus*) (Abbildung 13).



Abbildung 13: Ökologische Gruppen der Laufkäfer (links: *Bembidion lampros*, Mitte: *Amara aenea*, rechts: *Carabus granulatus*)



Abbildung 14: Larven verschiedener Laufkäferarten

Generalisierte lineare gemischte Modelle wurden verwendet, um den Effekt der Kulturart auf die Artenzahl, den inversen Simpson-Index, die Aktivitätsdichte (Adulte und Larven, verschiedene Zeitabschnitte) und die drei ökologischen Artengruppen zu untersuchen. Der inverse Simpson-Index wurde für Gaußsche Werteverteilung modelliert, die übrigen Parameter als Poisson-verteilte Werte. Die festen Effekte waren die Kulturart, zufällige Effekte die Standorte und darin geschachtelt die Feldwiederholungen. Die Aktivitätsdichte der Laufkäfer und ihre ökologischen Artengruppen wurden auf Ebene der Bodenfalle modelliert und dafür auch ein zufälliger Parzelleneffekt angenommen. Dies vermeidet zudem Überdispersion der Modelle. Die Indikatoren für die Diversität der erfassten Laufkäfer (Artenzahl, inverser Simpson-Index) wurden für zusammengefasste Fänge auf Parzellenebene untersucht. Ob die Kulturart einen signifikanten Anteil der Varianz erklärt, wurde

mithilfe von Likelihood-Ratio-Tests für ein Signifikanzniveau von 0,05 geprüft. Die Voraussetzungen für die Modelle wurden grafisch überprüft. Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturarten wurden durch den Vergleich der geschätzten Werte (*estimated marginal means*, *Tukey-HSD*) durchgeführt.

4.5.5 Fauna von Riesenweizen gras und GPS-Roggen nach der Ernte – Erfassung mit Minibarberfallen

Um die Fauna von Riesenweizen gras und GPS-Roggen im Sommer nach der Ernte zu vergleichen, wurden an den Standorten Aholting und Rosenau über fünf Jahre (2015–2019) Minibarberfallen eingesetzt. Die Kulturen sind sich zu diesem Zeitpunkt in ihrer Struktur (Stoppeln) relativ ähnlich, sodass Unterschiede nicht auf aktuelle mikroklimatische Bedingungen, sondern auf Änderungen im Boden oder abweichenden Bedingungen während der Wachstumsphase zurückzuführen sind. Mit zunehmendem Alter des Riesenweizen gras wurden auch größere Unterschiede in der Zusammensetzung der Fauna erwartet. An beiden Standorten wurden in jeder Parzelle der Kulturen zehn mit 75%igem Ethylenglycol gefüllte Glasröhrchen mit einer Öffnungsweite von 13 mm für 48 h eingegraben. Der Abstand zwischen den Fallen lag bei 50 cm. Die Probenahme fand vier bis fünfzehn Tage nach der gleichzeitigen Ernte des Riesenweizen gras (1. Schnitt) und des GPS-Roggens statt (Tabelle 15). Die Wetterbedingungen während der Probenahme waren immer trocken ohne Regenfall. Auch mindestens drei Tage vor dem Eingraben der Fallen gab es keine Niederschläge. Die Entnahme der Fallen erfolgte in der gleichen, dem Versuchsplan entsprechenden zufälligen Reihenfolge wie beim Aufstellen und dauerte je Standort etwa zwei Stunden. Im Labor wurde die Fangflüssigkeit durch mehrfaches Dekantieren weitestgehend durch 80%igen Ethanol ersetzt. Die Sortierung des Materials erfolgte mit einem Binokular mit mindestens 50-facher Vergrößerung. Die Klassifikation der Bodenfauna erfolgte in übergeordnete taxonomische Gruppen. Unterschieden wurden Milben (Oribatidae, Gamasina, Prostigmata – räuberisch, Prostigmata – Streuzersetzer, Uropodina, Astigmata und nicht näher identifizierbare Milben), Springschwänze (Isotomidae, Entomobryidae, Onychuridae, Poduridae, Neelidae), Käfer, Spinnen und Weberknechte, Asseln, Hundertfüßer und Doppelfüßer. Bis auf die Art wurden die Laufkäfer bestimmt. Da nicht immer alle Fallen geborgen werden konnten, wurde die mittlere Individuenzahl pro Minibarberfalle für die Parzellen berechnet. Für die Standorte und Versuchsjahre einzeln wurde mit einer Varianzanalyse (ANOVA) geprüft, ob Unterschiede in der Aktivitätsdichte von Springschwänzen, Milben und deren Summe zwischen den beiden Kulturen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 und 10 % abzusichern waren. Für die statistische Auswertung der Laufkäferfauna und der übrigen taxonomischen Gruppen wurden die fünf Untersuchungsjahre zusammengefasst, da die Fangzahlen insgesamt niedrig waren und so die ungefähre Nutzungsdauer des Riesenweizen gras abgebildet werden konnte. Effekte der Kulturart wurden für jeden der Standorte einzeln mit linearen Modellen geprüft, die die Versuchswiederholung als Faktor berücksichtigen. Für die Artenzahlen und die ökologischen Gruppen der Laufkäfer wurde eine Poisson-Verteilung angenommen, für den berechneten inversen Simpson-Index eine Gaußsche Verteilung. Die Voraussetzungen wurden grafisch geprüft.

Tabelle 15: *Leerungs- und Erntetermine sowie Daten zur Witterung für die Minibarberfallen an den Standorten Aholfing und Rosenau*

		Ernte	Fangperiode	Mittlere Temperatur 14 Tage zuvor in °C	Mittlere Temperatur während Fangperiode in °C	Niederschlag 14 Tage zuvor in mm
2015	Aholfing	26.06.	30.06.–02.07.	14,8	21,9	42
	Rosenau	01.07.	15.07.–17.07.	15,1	21,8	24
2016	Aholfing	24.06.	04.07.–06.07.	19,6	18,6	22
	Rosenau	28.06.	04.07.–06.07.	19,5	18,4	28
2017	Aholfing	22.06.	03.07.–05.07.	20,4	18,2	38
	Rosenau	21.06.	03.07.–05.07.	20,6	18,4	25
2018	Aholfing	19.06.	04.07.–06.07.	16,7	20,3	20
	Rosenau	02.07.	12.07.–14.07.	18,0	18,8	31
2019	Aholfing	01.07.	08.07.–10.07.	21,5	15,5	17
	Rosenau	27.06.	08.07.–10.07.	21,3	15,2	8



Abbildung 15: *Riesenweizengras (links) und GPS-Roggen (rechts) nach der Ernte in Aholfing am 02.07.2015*



Abbildung 16: *Fotos von Minibarberfallen im geernteten Riesenweizengras (links, rechts) und GPS-Roggen (Mitte)*

4.5.6 Arthropodenerfassung mit Laubsaugern (LfL)

An den Versuchsstandorten Rosenau, Wolferkofen und Aholting wurde die Bodenfauna (epigäische Arthropoden) zusätzlich im Herbst in den Kulturen Mais, Silphie, Sida und Riesenweizengras mithilfe von Laubsaugern (Stihl SH 86-D) erfasst (Aholting 20.09.2017; Rosenau 28.09.2017; Wolferkofen 20.09.2017). Die Geräte wurden mit einem in die Ansaugdüse eingefügten Beutel (Maschenweite < 0,5 mm) modifiziert, um das eingesaugte Material abzufangen. Die Befestigung des Beutels an der Düse erfolgte mithilfe eines Klebbands. Bei jeder der vier Wiederholungen wurden zwei Stichproben eingesaugt, zum einen auf den Pflanzen (Riesenweizengras) bzw. auf dem nach der Ernte noch stehenden Pflanzenstängel selbst und zum anderen neben den Pflanzen. Für die Entnahme einer Stichprobe wurde der Laubsauger 20 Mal für je fünf Sekunden auf die Parzelle aufgesetzt. Der Abstand zwischen den einzelnen Aufsetzpunkten betrug stets etwa ein Meter.



Abbildung 17: Mit Laubsaugern beprobte Parzellen in Aholting am 20.09.2017, von links Mais, Silphie, Sida, Riesenweizengras



Abbildung 18: Probenahme mit Laubsaugern im Feld (links) und Probeaufbereitung unter dem Binokular im Labor (rechts)

Insgesamt wurden 96 Proben genommen und nach der Probennahme umgehend eingefroren. Zur weiteren Untersuchung wurden die Proben im Labor aufgetaut und anschließend gesiebt. Dabei kamen drei verschiedene Siebgrößen zum Einsatz: 4 mm, 2 mm und 1 mm. Das Material kleiner als 1 mm wurde nicht analysiert und wieder tiefgefroren. Die Auszählung der Proben erfolgte unter dem Mikroskop, genauso die Einordnung der gefundenen Individuen nach taxonomischen Tiergruppen. Die aussortierten Tiere wurden in 70%igem Alkohol konserviert, um sie für weitere Analysen zu nutzen.

16 Proben mit nach dem Zählen wieder zusammengeführten Arthropoden wurden an das Labor der Firma AIM-Methods zum DNA-Metabarcoding übergeben. Es handelte sich hierbei um Proben der Kulturen Silphie, Sida, Riesenweizengras und Mais (nach Ernte) von den Versuchsstandorten Aholting und Wolferkofen, aus zwei Wiederholungen. Die Proben von auf und neben den Stängeln wurden hierbei zusammengefasst. DNA-Metabarcoding ist die genetische Analyse von Mischproben bestehend aus einer Vielzahl von Individuen. Die Organismen können in einem einzigen Analyseschritt erfasst werden und müssen nicht wie bei klassischen Methoden einzeln sortiert und identifiziert werden. Ganze Proben können homogenisiert und mittels Hochdurchsatzmethode (NGS – *Next Generation Sequencing*) analysiert werden. Hiermit erhält man komplette Artenlisten und die Zusammensetzung der Arten innerhalb einer Probe in nur einem Arbeitsschritt (AIM-Methods). Die beim Metabarcoding gewonnenen operativen taxonomischen Einheiten (OTUs) wurden mit der Datenbank BOLD abgeglichen und so über BINs (*Barcode Index Numbers*) Arten zugeordnet. Einträge mit weniger als 0,01 % der gesamten Abschnitte einer Probe und einer Identifikationsgenauigkeit unter 98 % wurden von der Analyse ausgeschlossen. Sequenzen, die nur bis zur Gattung oder höheren taxonomischen Einheiten bestimmt werden konnten, wurden nur als Art gezählt, wenn keine andere Art dieses Taxons präsent war. Nicht genau geklärte Artenkomplexe und nicht zu trennende Arten (*BIN-sharing*) wurden zusammengefasst.

Unterschiede für die Siedlungsdichte der insgesamt erfassten Arthropoden wurden mit gemischten linearen Modellen geprüft. Hierfür wurden die Daten zuvor logarithmisch transformiert. Als feste Effekte wurden die Kulturart und die Position der Probe (auf/neben der Pflanze) sowie deren Wechselwirkungen geprüft. Zufällige Effekte waren ineinander geschachtelt der Standort, die Versuchswiederholung und die Parzelle. Beim Auftreten ungleicher Varianzen wurde eine Varianzfunktionsstruktur berücksichtigt. Die mit dem Metabarcoding nachgewiesene Artenzahl wurde ebenfalls mit einem gemischten linearen Modell geprüft (Poisson-Verteilung). Der zufällige Teil des Modells war der Effekt der Standorte, der feste Teil die Kulturart. Inwieweit die festen Effekte einen signifikanten Teil der Varianz erklären, wurde mithilfe von Likelihood-Ratio-Tests für ein Signifikanzniveau von 0,05 getestet. Die Voraussetzungen für die Modelle wurden grafisch überprüft und auf Überdispersion (Poisson-Modelle) getestet. Unterschiede zwischen den verschiedenen Kulturarten wurden durch den Vergleich der geschätzten Werte (*estimated marginal means*, *Tukey-HSD*) durchgeführt. Um artspezifische Reaktionen aufzudecken, kam eine Indikatorarten-Analyse nach DUFRENE & LEGRENDRE (1997) [58] zur Anwendung. Hierfür wurden für jede Kultur alle vier vorhandenen Proben gleichrangig behandelt. Die Arten (bzw. taxonomischen Einheiten), für die die Wahrscheinlichkeit des erreichten

Indikatorwerts bei 2000 zufälligen Wiederholungen unter 5 % lag, wurden in einer Tabelle dargestellt.

4.5.7 Insektenfauna von Praxisflächen im Vergleich – Silphie versus Mais

Für den Vergleich der Insektenfauna von Silphie- und Maisflächen unter praktischen Anbaubedingungen wurden sechs Landwirte, die Silphie anbauen, kontaktiert und nach Silomaisflächen in der direkten Nähe zum Silphiefeld gefragt. Die sechs Standorte waren über ganz Bayern verteilt (Abbildung 19) und unterschieden sich hinsichtlich ihrer Standortbedingungen (Tabelle 16). Alle Felder wurden den lokalen Gegebenheiten angepasst praxisüblich bewirtschaftet. Die Größe der Felder reichte von einem kleinen Streifen von etwa 800 m² bis zu drei großen Feldern über 2 ha (Maximum 3 ha). Im Mittel waren die Silphiefelder 1,36 ha groß. Die Silphie wurde zwischen Ende August und Mitte September geerntet. Sowohl alle Silphie- als auch Maisfelder wurden mit Gärresten gedüngt. Das Alter der Silphieflächen reichte vom Etablierungsjahr bis zu elf Jahren. Die Beikrautdeckung in den jungen Flächen an den Standorten Froschbach, Markt Indersdorf war mit etwa 50 % hoch und in den älteren Beständen in Alsmoos, Lappersdorf und Münchberg geringer als 5 %. In den Maisfeldern konnte an den Standorten Markt Indersdorf und Rehau Beikraut in nennenswertem Umfang (bis etwa 5 % Deckung) festgestellt werden. Die übrigen Maisfelder waren zum Aufnahmezeitpunkt im Hochsommer praktisch unkrautfrei.



Abbildung 19: Lage der Standorte des Silphie- und Mais-Praxisflächen-Vergleichs in Bayern (links; Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung (www.geodaten.bayern.de)) sowie Malaisefalle in Silphie (rechts)

Im Sommer 2018 wurden auf den sechs Flächenpaaren aus Silphie und Mais (siehe Abbildung 19) eine Malaisefalle (Typ: Bartak) und sechs Bodenfallen für einen Zeitraum von 13 bis 15 Tagen aufgebaut (Froschbach und Lappersdorf vom 17.07.2018 bis 30.07.2018,

Alsmoos und Markt Indersdorf vom 19.07.2018 bis 02.08.2018, Rehau und Münchberg vom 21.07.2018 bis 05.08.2018). Dafür wurden die Mais- und Silphiepflanzen jeweils auf einer Fläche von ca. 2 × 4 m entfernt. Malaisefallen fangen vorwiegend flugaktive Insekten. Als Fangflüssigkeit diente ein Ethylenglykol-Ethanolgemisch. Nach Abbau der Fallen wurde das Probenmaterial in 80%igen Ethanol überführt. Die Insekten aus den Malaisefallen wurden mehrfach mit 80%igem Ethanol gespült, um anhaftendes Ethylenglycol zu entfernen. Im Anschluss erfolgte die Bestimmung der Insektenbiomasse in Form des Abtropfgewichts in vierfacher Wiederholung (Abbildung 20). Hierfür wurden die Insekten wie bei SSYMANK *et al.* (2018) [171] beschrieben in ein Sieb mit Maschenweite 0,5 mm gegeben. Das Insektenmaterial wurde nach Erreichen eines Zeitabstands zwischen den herausfallenden Tropfen größer von mehr als zehn Sekunden gewogen. Zusätzlich wurde die Dichte der Konservierungsflüssigkeit bestimmt. Messungen, bei denen die Ethanolkonzentration weniger als 60 % betrug, wurden aus den Daten entfernt, die Proben erneut mit frischem Ethanol aufgefüllt und gemessen. Die Sortierung der Proben erfolgte im Labor auf Ordnungsebene.

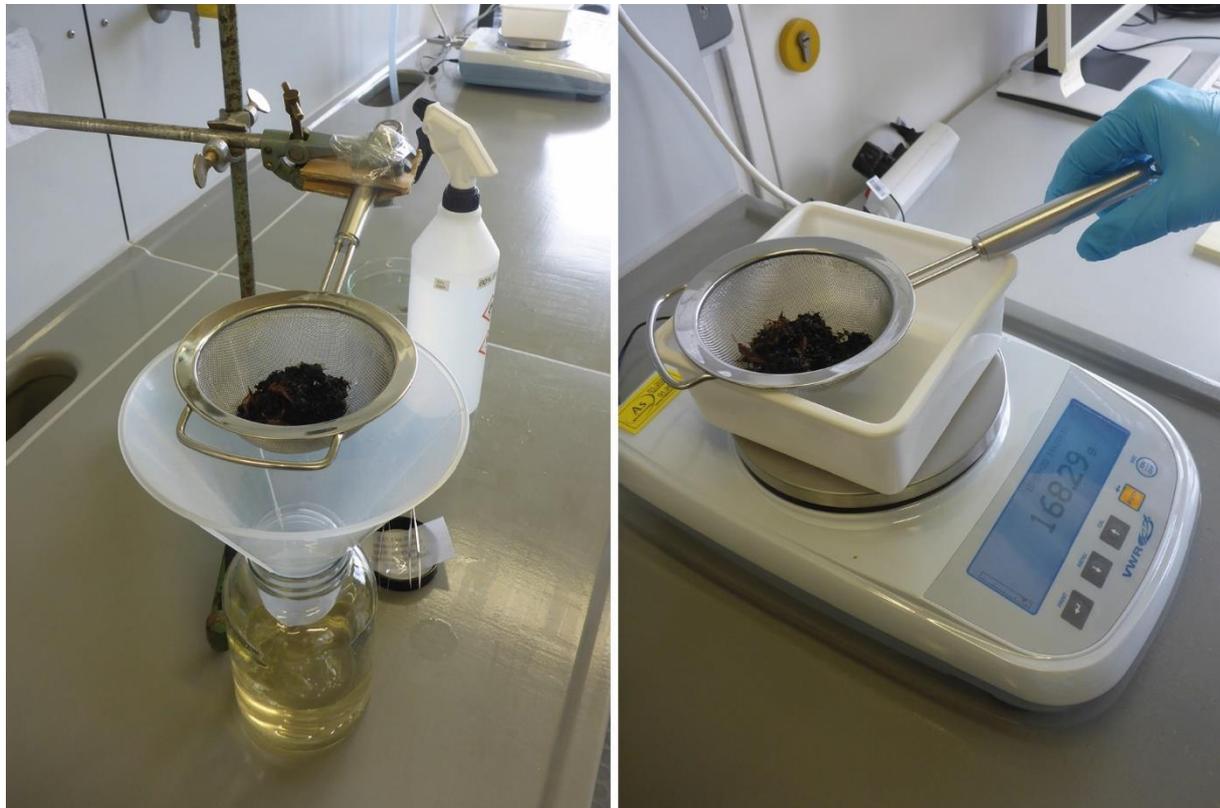


Abbildung 20: Bestimmung des Insekten-Abtropfgewichts der Malaisefallenfänge

Die sechs um die Malaisefalle im Abstand von etwa 2 m platzierten Bodenfallen wurden zu einer Probe zusammengefasst. Fallentyp und -behandlung der gesammelten Tiere entsprachen dem Vorgehen wie in Abschnitt 4.5.4 beschrieben. Die Fangflüssigkeit war 75%iges Ethylenglycol.

Tabelle 16: Standorteigenschaften und Alter der untersuchten Silphie-Praxisfelder

	Landkreis	Alter der Silphie	Niederschlag in mm*	Mittlere Jahrestemperatur in °C*	Bodenart nach Bodenschätzung
Froschbach	PAF	1	830	8,6	Lehmiger Sand
Rehau	HO	1	780	7,3	Stark lehmiger Sand
Lappersdorf	R	8	680	8,9	Lehm
Münchberg	HO	3	1010	6,9	Sandiger Lehm
Alsmoos	AIC	11	820	8,5	Lehmiger Sand
Markt Indersdorf	DAH	1	860	8,5	Lehmiger Sand

* Daten des DWD – Climate Data Center (CDC): mehrjährige Mittel (1981–2010) von Lufttemperatur (2 m) und Niederschlag in Deutschland, Version v1.0

Die Ergebnisse der Insektenbiomasse (Abtropfgewicht) und der Anzahl nachgewiesener Individuen wurden mit einem gepaarten T-Test bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % geprüft.

4.6 Witterung in den Versuchsjahren (TFZ)

Jahr 2017

Der Herbst 2016 war eher trocken und das Jahresende, wie so oft, zu warm (Abbildung 21 bis Abbildung 26). Dafür kam im Januar 2017 die Kälte. Ungewöhnlicherweise war die mittlere Monatstemperatur in Aholfing, Rosenau und Wolferkofen niedriger als in Hötzelsdorf im Bayerischen Wald (Tabelle 44). Der Februar zeigte sich dann deutlich milder und im März wurden fast schon Rekordtemperaturen erreicht. Zunächst mild, dann wieder kühler war der Frühling. Ab Mitte Mai und im Juni wurde es wieder warm. Die Temperaturen im Juni lagen insgesamt deutlich über dem langjährigen Mittel. Der Juli war sommerlich warm, besonders in Hötzelsdorf wurde im Vergleich zum vieljährigen Mittel eine höhere Temperatur erreicht und auch im August blieb es warm. Im September kühlten die Temperaturen ab und fielen teilweise sogar unter das langjährige Monatsmittel. Trüb, aber mild ging die Saison im Oktober und November zu Ende.

Nach einem trockenen Herbst blieben auch die Monate Januar und Februar in Bezug auf den Niederschlag eher unterdurchschnittlich. Im März fielen dann mehr Niederschläge, besonders die Standorte Parsberg und Hötzelsdorf konnten profitieren. Auch im April gab es ausreichend Niederschläge, nur der Standort Gelchsheim blieb weitgehend trocken. Durch reichlich Niederschlag im Mai wurde dieses Defizit dort aber wieder ausgeglichen. Mit Ausnahme von Gelchsheim (Juli) waren der Juni und Juli eher unterdurchschnittlich feucht, auch wenn es immer mal wieder regnete. Im August bewegten sich die Niederschlagsmengen um den vieljährigen Durchschnitt, aber mit teilweise heftigen Schauern. Der September blieb unbeständig, zum Ende hin dann aber trocken. Im Oktober war es dann besonders in Hötzelsdorf und Parsberg nass.

Insgesamt war die mittlere Jahrestemperatur höher als im vieljährigen Mittel. Die Jahresniederschlagssumme entsprach mehr oder weniger dem langjährigen Mittel. Nur in Parsberg, Rosenau und Wolferkofen fiel 2017 weniger Niederschlag.

Jahr 2018

Nach einem milden Januar mit ausreichend Niederschlägen wurde es im Februar kühl und trocken. Ab April wurde es sommerlich warm mit insgesamt zu geringen Niederschlägen. Die hohen Temperaturen blieben an allen Standorten bis August deutlich über dem langjährigen Mittel, erst im September fielen die Temperaturen wieder. Insgesamt war das Jahr sehr warm, bis auf Februar und März lagen die Temperaturen über dem langjährigen Mittel (Tabelle 1 und Tabelle 44, Abbildung 21 bis Abbildung 26). Im Januar und im Dezember fielen überdurchschnittlich hohe Niederschläge. Dafür waren alle anderen Monate im Vergleich sehr trocken. Nur im März, Juni und September fielen auf den Standorten nennenswerte Niederschläge. Im April gab es in Gelchsheim hohe Niederschläge und im August in Parsberg. Der Jahresniederschlag lag auf allen Standorten deutlich unter dem langjährigen Mittel (Tabelle 1 und Tabelle 45).

Jahr 2019

Das Jahr 2019 war ebenfalls insgesamt auf allen Standorten wärmer und trockener als im langjährigen Mittel von 1981 bis 2010 (Tabelle 1, Tabelle 46 und Tabelle 47, Abbildung 21 bis Abbildung 26), wenn auch nicht so warm wie 2018. Das Frühjahr war kühl bis in den Mai hinein mit einem starken Temperaturanstieg im Juni, der der heißeste Monat des Jahrs war. Auch auf den allgemein eher kühlen und feuchten Standorten Hötzelsdorf und Parsberg wurde eine mittlere Monatstemperatur von 20 °C erreicht. Juli und August blieben ähnlich warm. Der Februar war in Gelchsheim mit nur 10,9 mm Niederschlag extrem trocken, in Hötzelsdorf war der trockenste Monat der Juni mit nur 20 mm Niederschlag, was gleichzeitig auch der wärmste Monat war. Das Frühjahr war insgesamt eher trocken, besonders im April regnete es wenig. Im Mai gab es in Aholfing, Hötzelsdorf und Wolferkofen überdurchschnittlich hohe Niederschläge mit teilweise heftigen Schauern. In Parsberg fielen im August hohe Niederschlagsmengen von über 100 mm.

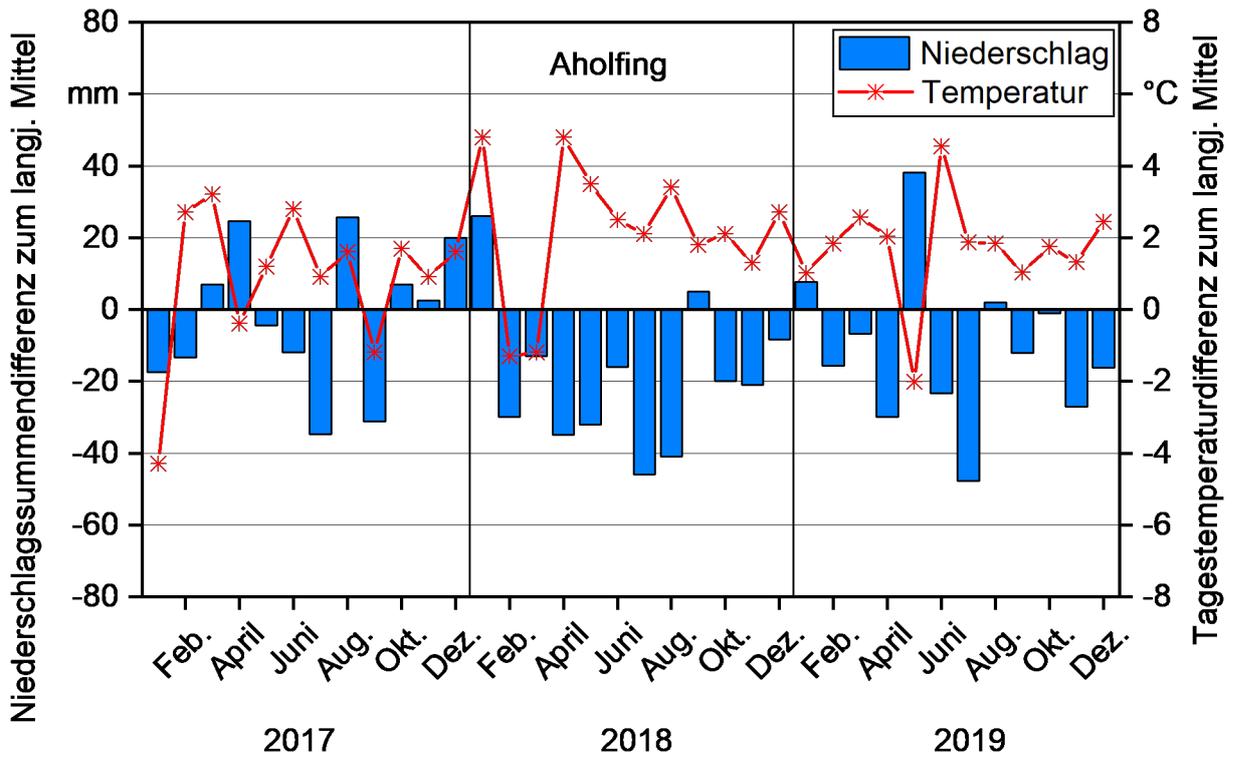


Abbildung 21: Witterungsdaten des Versuchsstandorts Aholting, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)

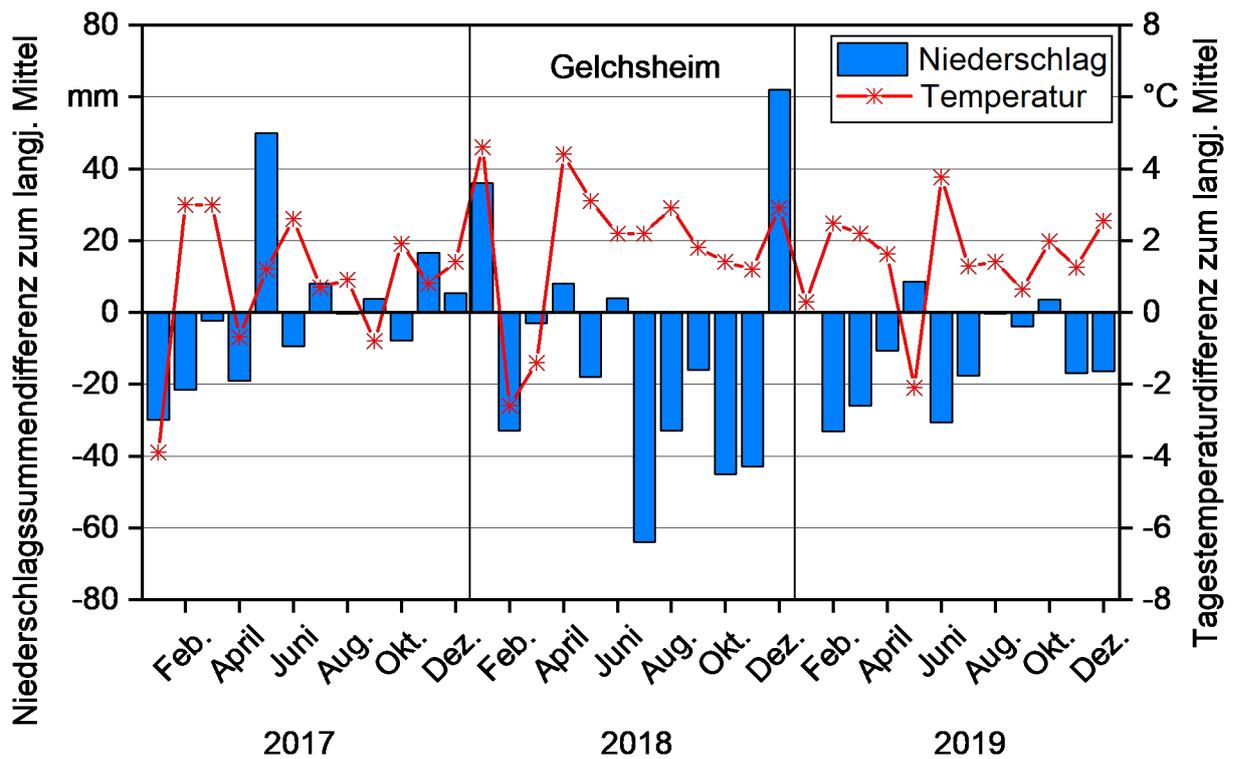


Abbildung 22: Witterungsdaten des Versuchsstandorts Gelchsheim, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)

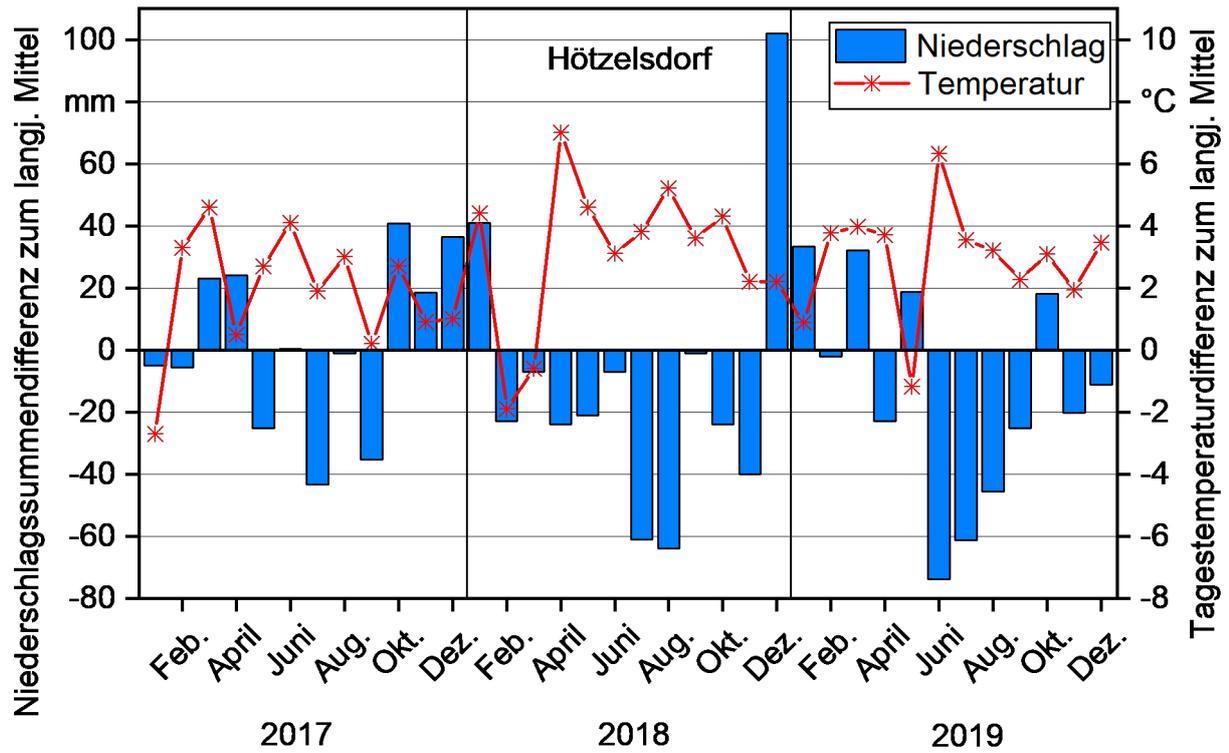


Abbildung 23: Witterungsdaten des Versuchsstandorts Hötzelstdorf, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)

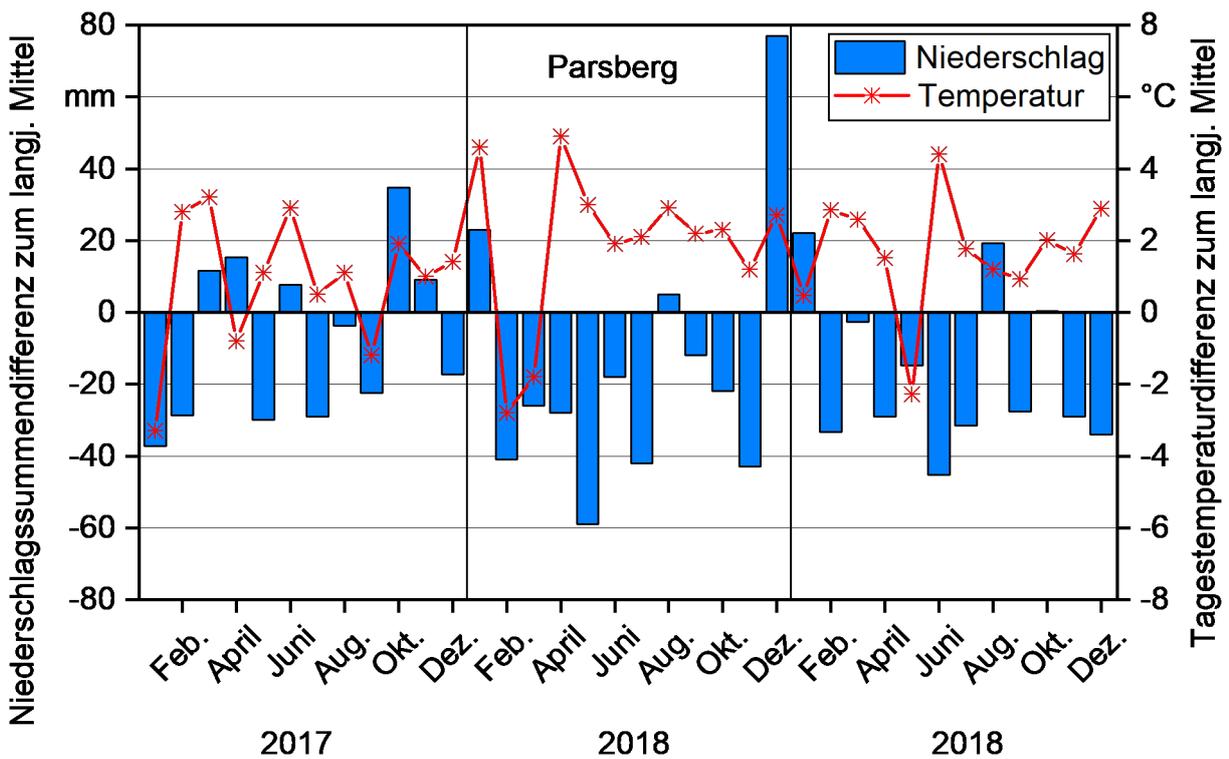


Abbildung 24: Witterungsdaten des Versuchsstandorts Parsberg, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)

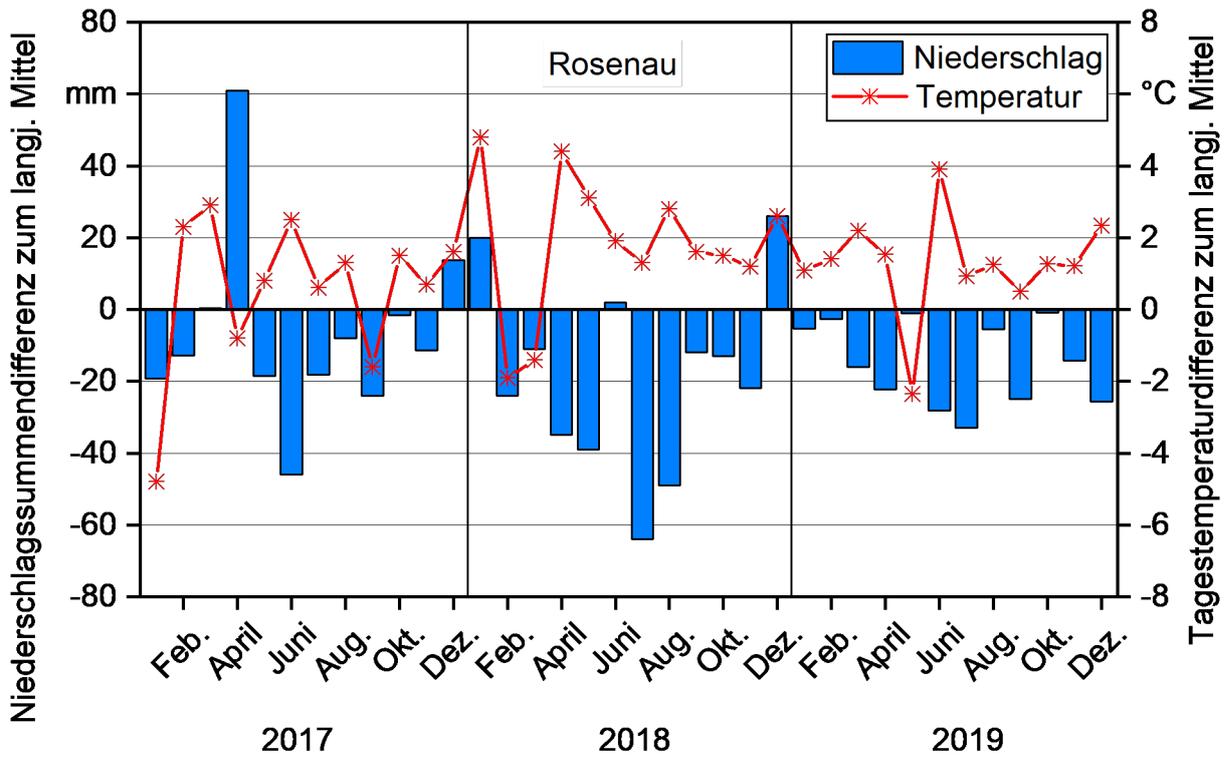


Abbildung 25: Witterungsdaten des Versuchsstandorts Rosenau, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)

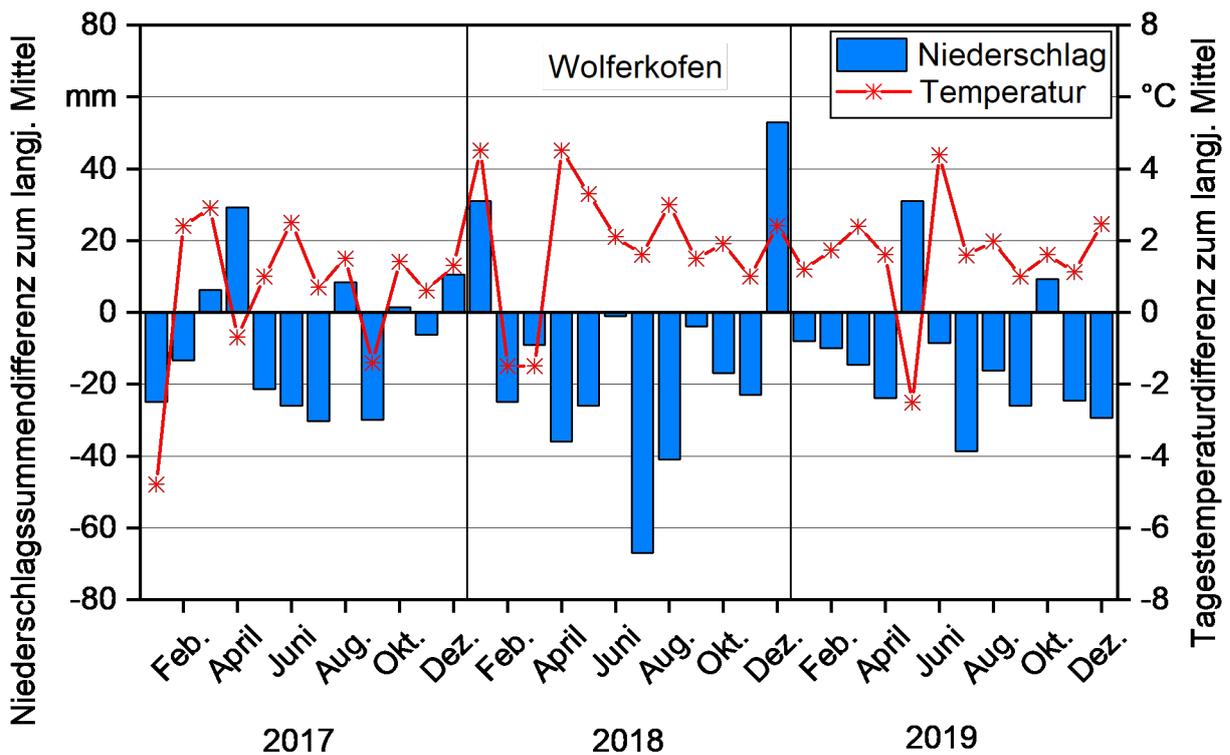


Abbildung 26: Witterungsdaten des Versuchsstandorts Wolferkofen, dargestellt als Abweichung zum langjährigen Mittel (1981–2010)

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Feldversuche (TFZ)

Nach der erfolgreichen Etablierung der Feldversuche zur Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen in 2014 und 2015, standen 2017 meist gut entwickelte Bestände zur Ernte bereit. Für die thermisch genutzten Kulturen war es die zweite Ernte, die als Biogassubstrat eingesetzten Pflanzen wurden 2017 bereits das dritte Mal geerntet. Bei der in 2017 gesäten Variante „Etablierung der Silphie als Untersaat unter Mais“ stand 2017 nur die Silomaisernte an, ab 2018 wurde hier Silphie geerntet.

5.1.1 Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen für eine Verwertung in der Biogasanlage

5.1.1.1 Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt

Silphie

Die Silphie brachte im Versuchsjahr 2017 auf den Standorten sehr unterschiedliche Erträge (Abbildung 30). Die höchsten Erträge wurden auf den nährstoffreichen Böden in Wolferskofen und Rosenau mit 197 und 191 dt TM/ha gemessen. Auf den tonigen Lehmlandstandorten Gelchsheim und Parsberg lagen die Erträge bei knapp 150 dt TM/ha. Die Biomasseleistung war damit, vermutlich aufgrund des geringeren Niederschlags (Gelchsheim) und der kühleren Temperaturen (Parsberg), um fast ein Viertel niedriger. In Hötzelndorf wurden aufgrund eines Hagelschadens im Mai nur 114 dt TM/ha geerntet. Noch niedriger war der Ertrag am Standort Aholting mit nur 108 dt TM/ha. Der kiesige Boden mit nur geringer Wasserspeicherkapazität führte vermutlich zu einem reduzierten Pflanzenwachstum. Dies schlägt sich auch in den Ergebnissen zur Bestandshöhe nieder (siehe Tabelle 83, Tabelle 84 und Tabelle 85 im Anhang). Der Wachstumsrückstand konnte offenbar bis zur Ernte nicht mehr kompensiert werden.

Der Trockenmasseertrag der Silphie war im Versuchsjahr 2018 zum Teil stark geprägt von der monatelangen Trockenheit. Auf tiefgründigen schweren Böden, wie z. B. in Wolferskofen oder Gelchsheim, wirkte sich das Niederschlagsdefizit im Sommer weniger ertragsmindernd aus. Mit 174 und 185 dt TM/ha wurden dort gute Biomasseerträge geerntet (Abbildung 30). Auch rein optisch waren die Pflanzen hier kaum von der Trockenheit beeinträchtigt (Abbildung 27).



Abbildung 27: Silphiebestände am Standort Wolferkofen (links, Foto: 02.08.2018) und Gelchsheim (rechts, Foto: 08.08.2018)



Abbildung 28: Silphiebestände am Standort Aholting (links, Foto: 02.08.2018) und Parsberg (rechts, Foto: 08.08.2018)

In Parsberg variierte das Ernteergebnis stark zwischen den Versuchswiederholungen. In einer Parzelle, die besonders flachgründig und durchsetzt von vielen Steinen ist, entwickelten sich die Silphiepflanzen besonders schlecht. Im Mittel wurden in Parsberg nur 115 dt TM/ha geerntet. Die kühleren Temperaturen im Vergleich zu den anderen Standorten und besonders die Sommertrockenheit schränkten das Wachstum der Silphie stark ein. Am Standort Aholting machte sich 2018 die geringe Wasserspeicherkapazität des Bodens ebenfalls deutlich bemerkbar (Abbildung 28). Das Ergebnis fiel, bedingt durch den kiesig-sandigen Untergrund, noch schlechter aus als auf den anderen Standorten. Der mittlere TM-Ertrag betrug dort nur 65 dt/ha.

In Hötzelndorf und Rosenau wurde der Trockenmasseertrag mit 118 und 155 dt TM/ha ermittelt. Im Bayerischen Wald (Hötzelndorf) sind aufgrund der verkürzten Vegetationsperiode keine Spitzenerträge zu erwarten. Der humose Standort Rosenau besitzt ein enormes Ertragspotenzial. Allerdings kommt es aufgrund des Nährstoffüberschusses im Boden oft zu Lager und damit zu Ernteproblemen. Das Ertragsergebnis war auch 2018 stark davon beeinflusst. Wie auch in den letzten Jahren zeigte die Silphie auf nährstoffreichen

Böden und bei ausreichender Wasserverfügbarkeit das beste Wachstum. Leichte, flachgründige Böden sind für den Silphieanbau nicht geeignet, wie das Versuchsjahr 2018 eindrücklich vor Augen geführt hat.

In 2019 zeigte die Silphie in Wolferkofen mit 199 dt TM/ha, in Rosenau mit 173 dt TM/ha und Gelchsheim mit 170 dt TM/ha ihr hohes Ertragspotenzial auf Böden mit guter Wasserversorgung. Auch der Ertrag in Parsberg ist mit 141 dt TM/ha noch zufriedenstellend. In Hötzelsdorf hatte die verkürzte Vegetationsperiode zusammen mit der Trockenheit im Juni zu einem Ertrag von nur 97 dt TM/ha geführt. Auch in Aholting wurden nur 112 dt TM/ha erreicht. Wie in den Vorjahren kann das geringe Pflanzenwachstum durch die geringe Wasserspeicherkapazität des kiesig-sandigen Untergrunds begründet werden.



Abbildung 29: Silphieparzelle in Hötzelsdorf (Foto: 23.08.2019)

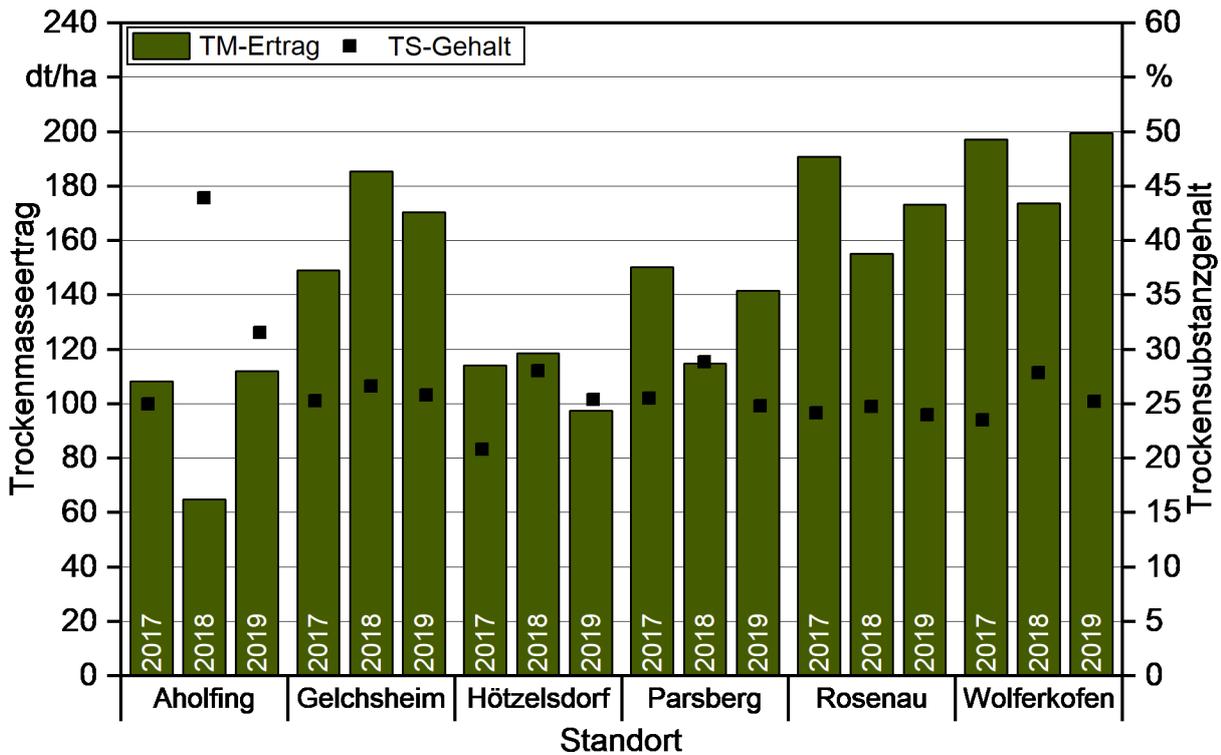


Abbildung 30: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Silphie in den Jahren 2017 bis 2019

Die Trockensubstanzgehalte zur Ernte lagen, wie aus Abbildung 30 ersichtlich, meistens zwischen 20,8 und 28,8 %. Nur in Aholfing wurden Werte von 31,5 und 43,9 % erreicht. Hier war die Reife schon sehr weit und der ideale Erntezeitpunkt für eine maximale Methanausbeute bereits überschritten. Wird die Silphie, wie in der Praxis oft durchgeführt, gemeinsam mit Mais ensiliert, spielt der niedrige Trockensubstanzgehalt keine Rolle. Bei einer reinen Silphie-Silage ist auf beste Silierbedingungen zu achten und gegebenenfalls ein Silierhilfsmittel einzusetzen. Die Bildung von Sickersaft tritt nach Angaben von Praktikern auch bei Trockensubstanzgehalten um die 25 % nicht auf [14], eine frühe Ernte bereitet somit keine Probleme.

Sida

Die Sida war 2017, wie auch in den Vorjahren, die ertragsschwächste Kultur. In Wolferkofen wurden immerhin 159 dt TM/ha (Abbildung 33) geerntet. Allerdings wurde dieser Bestand über eine Pflanzung etabliert, was zu einem gleichmäßigen und ausreichend dichten Bestand führte. In Gelchsheim lag der Ertrag bei 114 dt TM/ha mit großer Schwankung zwischen den Wiederholungen. In Parsberg wurden nur 73 dt TM/ha geerntet, ebenfalls mit großen Schwankungen zwischen den Wiederholungen. Dieser Bestand wurde erst 2016 gepflanzt und die Fläche dort ist sehr heterogen, was die Streuung und den geringen Ertrag erklärt.

Die Sida war auch 2018 die ertragsschwächste Kultur. Selbst am Standort Wolferkofen, wo im Vorjahr akzeptable Erträge erreicht worden waren, lag der Trockenmasseertrag nur bei 111 dt TM/ha. Offenbar wird auch das Wachstum dieser Kultur von der Trockenheit

negativ beeinflusst, obwohl sie bisher als relativ trockentolerant galt [75]. Auf den Standorten Parsberg, Hötzelsdorf und Rosenau wurden 64, 67 und 70 dt TM/ha geerntet. Insbesondere in Rosenau und Hötzelsdorf sind die Sidaparzellen der Biogasvariante über die Jahre stark verunkrautet (Abbildung 31, Abbildung 32). Das Ertragspotenzial der Kultur lässt sich anhand dieser Bestände nicht mehr gesichert abschätzen. In Hötzelsdorf und Rosenau spielt ebenfalls die nur geringe vorhandene Anzahl an Pflanzen pro Quadratmeter eine Rolle, wie im Abschlussbericht der ersten Projektphase schon beschrieben wurde [85]. Dies wirkt sich negativ auf den Ertrag aus. Am Standort Gelchsheim betrug der Biomasseertrag immerhin 91 dt TM/ha. Hier beschränkte sich die Unkrautproblematik auf eine der Wiederholungen, ansonsten waren die Parzellen weitgehend unkrautfrei. Das Ergebnis des Standorts Aholting wurde verworfen, da das Wachstum der Kultur stark durch einen Spritzschaden eingeschränkt war. Im Frühjahr, zu Beginn des Wiederaustriebs, war ein wuchsstoffhaltiges Präparat zur Bekämpfung der starken Verunkrautung gespritzt worden.



Abbildung 31: Verunkrauteter Sidabestand in Aholting, Versuchsjahr 2017

2019 wurden am besten Standort, in Wolferkofen, 122 dt TM/ha geerntet, gefolgt von Gelchsheim mit 87 dt TM/ha. Die Parzellen in Hötzelsdorf und Parsberg sind mit den Jahren immer mehr verunkrautet, was sich in den niedrigen Erträgen zeigte. Eine Standorteignung lässt sich anhand dieser Daten nur schwierig ableiten. Die Sida in Aholting hatte sich nicht vom Spritzschaden aus 2018 erholt, die Daten wurden auch 2019 nicht verwendet. Die Sidaparzellen in Rosenau wurden im Frühjahr 2019 umgebrochen, da nur noch vereinzelt Sidapflanzen zu finden waren. Eine Ertragserfassung war nicht mehr möglich.



Abbildung 32: Verunkrauteter Sida-Bestand am Standort Rosenau, rechter Bildrand Sida zur thermischen Nutzung (Foto: 05.06.2018)

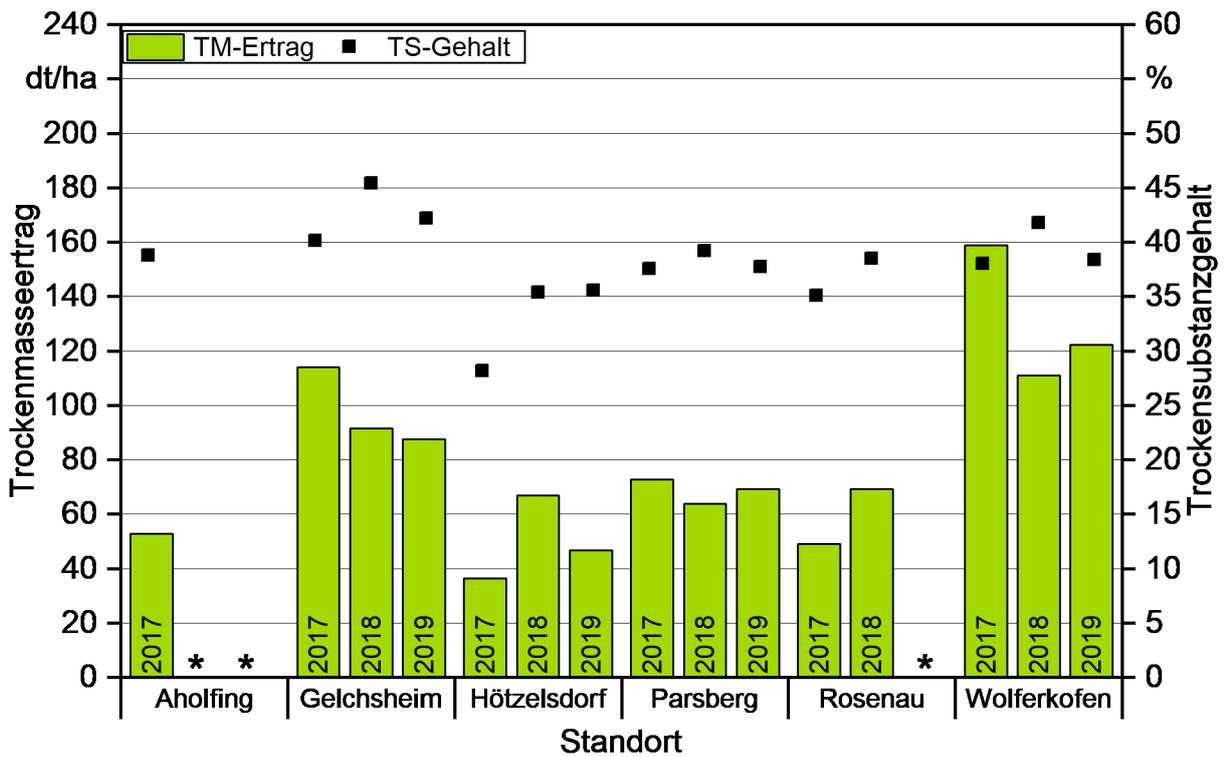


Abbildung 33: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Sida in den Jahren 2017 bis 2019 (* keine verwertbaren Daten)

Der Trockensubstanzgehalt der Sida war mit 28,1 bis 45,4 % recht hoch. Die Ernte fand verspätet, gemeinsam mit der Silphieernte (Anfang bis Mitte September) statt. Ein optimaler Trockensubstanzgehalt um 28 % wird bei einer Ernte im Juli erreicht [85]. Nur dann ist auch ein zweiter Schnitt im Herbst möglich. Der im Vergleich niedrige Trockensubstanzgehalt am Standort Hötzelsdorf in 2017 erklärt sich durch den verspäteten Wiederaufwuchs, bedingt durch einen Hagelschaden im Frühjahr, sowie eine klimabedingte, verzögerte Entwicklung auf diesem kühlen Standort. Zu hohe Trockensubstanzgehalte können zu Problemen bei der Silierung führen. Auch nimmt die Methanausbeute bei fortschreitender Abreife der Pflanzen ab.

Riesenweizengras Sorte GreenStar

Die Kultur mit dem höchsten mittleren Gesamt-Ertrag über die Versuchsjahre 2015 und 2016 war das Riesenweizengras der Sorte GreenStar [85]. Auch in 2017 zeigt sich das hohe Ertragspotenzial dieser Sorte, allerdings schnitten die Standorte recht unterschiedlich ab. Der höchste Ertrag wurde am Standort Gelchsheim mit 190 dt TM/ha erreicht. Auf den Standorten Aholfing, Parsberg und Wolferkofen waren es 155, 156 und 158 dt TM/ha. In Hötzelsdorf und Rosenau fiel der Ertrag mit nur etwas über 100 dt TM/ha deutlich niedriger aus.

Nach den guten Erträgen des Riesenweizengrases im Jahr 2017 fiel das Versuchsjahr 2018 weniger günstig aus. Der höchste Ertrag wurde mit der Sorte GreenStar auf dem Standort Gelchsheim mit 133 dt TM/ha erzielt, gefolgt von Wolferkofen mit 126 dt TM/ha (Abbildung 36). Die übrigen Ergebnisse lagen zwischen 80 und 99 dt TM/ha und waren nicht zufriedenstellend. Insbesondere der Biomasseertrag des zweiten Aufwuchses war, bedingt durch die ausgeprägte Trockenheit, sehr gering. In Rosenau war das Wachstum besonders schlecht, obwohl es sich dabei um einen Standort handelt, der eigentlich eine gute Wasserspeicherkapazität besitzt. Die zunehmende Verungrasung trug sicherlich zu den niedrigen Erträgen bei. Eventuell wurde eine Herbizidbehandlung mit Atlantis WG von dem durch Trockenheit gestressten Gras nicht so gut vertragen wie angenommen. Mit Sicherheit bestätigt ist diese Annahme jedoch nicht, da die Bestände 2017 auch ohne Behandlung mit Atlantis WG dünn und frühzeitig gelb bzw. trocken aussahen.

In 2019 lagen die Erträge des Riesenweizengrases wieder etwas höher als im Vorjahr. Die Sorte GreenStar erzielte die höchsten Erträge in Wolferkofen mit 143 dt TM/ha gefolgt von Gelchsheim, Aholfing und Parsberg mit jeweils 123, 120 und 113 dt TM/ha. Der niedrige Ertrag in Rosenau von nur 105 dt TM/ha lässt sich nur schwierig erklären. Der Standort zeichnet sich durch milde Temperaturen, eine hohe Stickstoffnachlieferung und ausreichend Feuchtigkeit aus. Auch der pH-Wert liegt im neutralen Bereich, womit der Standort eigentlich gut für den Anbau von Riesenweizengras geeignet sein sollte. Wie in Abbildung 34 im Vergleich zu Abbildung 35 zu sehen ist, sah das Gras in Rosenau auch im Jahr 2019 gelblich und trocken aus. Der Standort ist mit dem stark humosen Auenboden sehr speziell und es konnten in der Literatur keine vergleichbaren Versuche oder Anhaltspunkte gefunden werden, die die Ergebnisse erklären könnten. In Hötzelsdorf wurden nur 89 dt TM/ha geerntet. Dies war sicher bedingt durch ein Zusammenspiel der kurzen Vegetationsperiode mit der Sommertrockenheit auf einem Boden mit geringer Wasserspeicherkapazität.



Abbildung 34: Riesenweizengras in Rosenau, links die Sorte Alkar, rechts die Sorte GreenStar (Foto: 26.06.2019)



Abbildung 35: Riesenweizengras in Wolferkofen, vorne die Sorte Alkar, rechts dahinter die Sorte GreenStar (Foto: 26.06.2019)

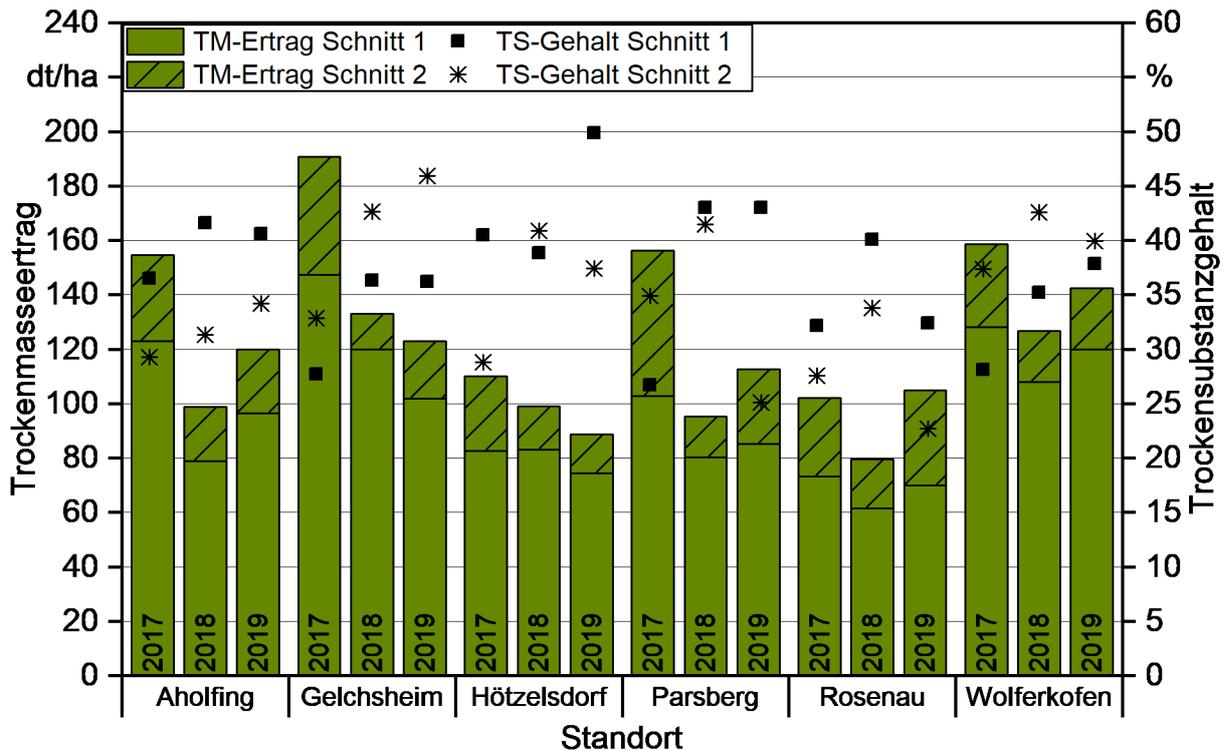


Abbildung 36: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Riesenweizen- gras, Sorte GreenStar in den Jahren 2017 bis 2019

Die Trockensubstanzgehalte variierten stark. Besonders in den trockenen Jahren 2018 und 2019 wurde der optimale Trockensubstanzgehalt von 35 % häufig überschritten, im zweiten Schnitt wurden aber auch zu geringe Trockensubstanzgehalte unter 28 % gemessen. Im Versuch wurde die Ernte auf allen Standorten für die Vergleichbarkeit innerhalb weniger Tage durchgeführt, wodurch der Erntetermin nicht auf allen Standorten optimal war.

Riesenweizen- gras Sorte Alkar

Die Erträge der Sorte Alkar waren mit Ausnahme des Standorts Wolferskofen etwas niedriger als die der Sorte GreenStar (Abbildung 37). Auch hier war die Biomasseleistung auf den Standorten Gelchsheim (188 dt TM/ha) und Wolferskofen (166 dt TM/ha) am höchsten. In Parsberg und Aholting wurden nur noch 111 dt TM/ha geerntet, die Leistung auf den Standorten Hötzelsdorf und Rosenau fiel auf unter 100 dt TM/ha ab.

Die Ertragsergebnisse der Sorte Alkar fielen 2018 noch niedriger aus. Bester Standort war Wolferskofen mit 112 dt TM/ha gefolgt von Gelchsheim mit 107 dt TM/ha. Die weiteren Ergebnisse lagen zwischen 44 und 76 dt TM/ha. Der Biomasseaufwuchs des zweiten Schnitts von Alkar lag auf vergleichbarem Niveau wie bei der Sorte GreenStar und trug damit nur unwesentlich zum Ertragsergebnis bei.

Die Trockenmasseerträge der Sorte Alkar lagen auch im Jahr 2019 unter denen der Sorte GreenStar, mit Ausnahme von Wolferskofen. Hier wurden 152 dt TM/ha geerntet. Der Ertrag in Gelchsheim war mit 121 dt TM/ha geringer. Auf den anderen Standorten lagen die

Erträge deutlich unter 100 dt TM/ha. Insgesamt zeigten sich für bayerische Verhältnisse ein höheres Ertragspotenzial und eine bessere Eignung der Sorte GreenStar.

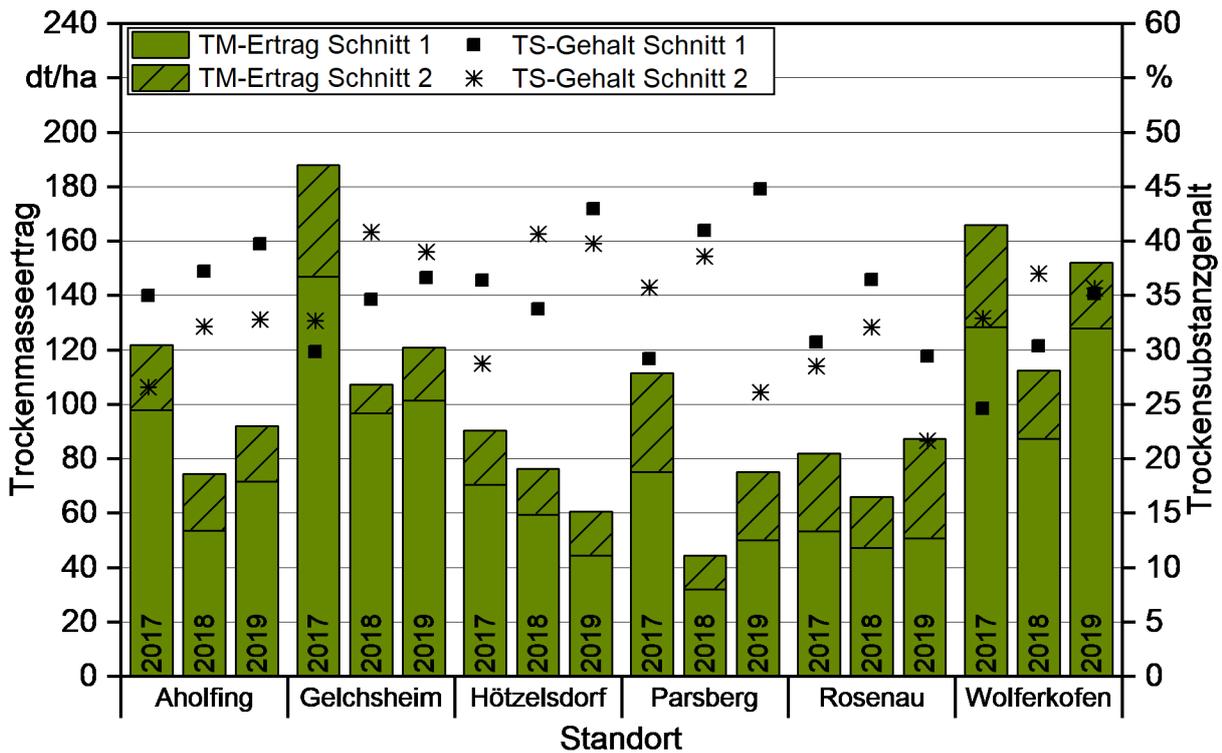


Abbildung 37: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Riesenweizen-gras, Sorte Alkar in den Jahren 2017 bis 2019

Auch bei der Sorte Alkar gab es eine große Varianz bei den Trockensubstanzgehalten. Fast immer wurden über 28 % Trockensubstanzgehalt erreicht. In den trockenen Jahren 2018 und 2019 lagen die Werte häufig über 35 % und damit nicht im optimalen Bereich.

Switchgras

Auch bei der Kultur Switchgras waren Gelchsheim und Wolferkofen 2017 die ertragreichsten Standorte (Abbildung 38). In Gelchsheim lag der Trockenmasseertrag bei 151 dt TM/ha und in Wolferkofen bei 147 dt TM/ha. In Aholfing wurden 128, in Rosenau 116 und in Hötzelsdorf 91 dt TM/ha geerntet. Der Biomasseaufwuchs lag damit deutlich unter dem des Riesenweizen-grases. Die klimatischen Bedingungen sind in Bayern für dieses wärmeliebende C₄-Gras nicht ganz optimal. Allerdings erfolgte der erste Schnitt 2017 auf einigen Standorten etwas früher als im Vorjahr.

Das Switchgras wuchs 2018, ganz anders als in den vorhergehenden Jahren, am besten am Standort Hötzelsdorf. In der Regel sind dort die Temperaturen zu kühl und die Vegetationsperiode zu kurz, um einen Anbau zu empfehlen. Doch im Ausnahmesommer 2018 war die Kombination aus Temperatur und Niederschlag in Hötzelsdorf anscheinend recht günstig, es wurden in zwei Schnitten immerhin 154 dt TM/ha geerntet. Nach dem Mais war

das Gras damit ertragsstärkste Kultur in 2018. Die Erträge der übrigen Standorte variierten zwischen 104 und 140 dt TM/ha.

Auch im Jahr 2019 überzeugte das Switchgras mit stabilen Erträgen. Die ertragreichsten Standorte waren Wolferkofen mit 165 dt TM/ha und Gelchsheim mit 147 dt TM/ha. In Aholfing und Hötzelsdorf wurden noch 122 und 117 dt TM/ha erreicht, beides trockene Standorte in der Vegetationsperiode 2019.

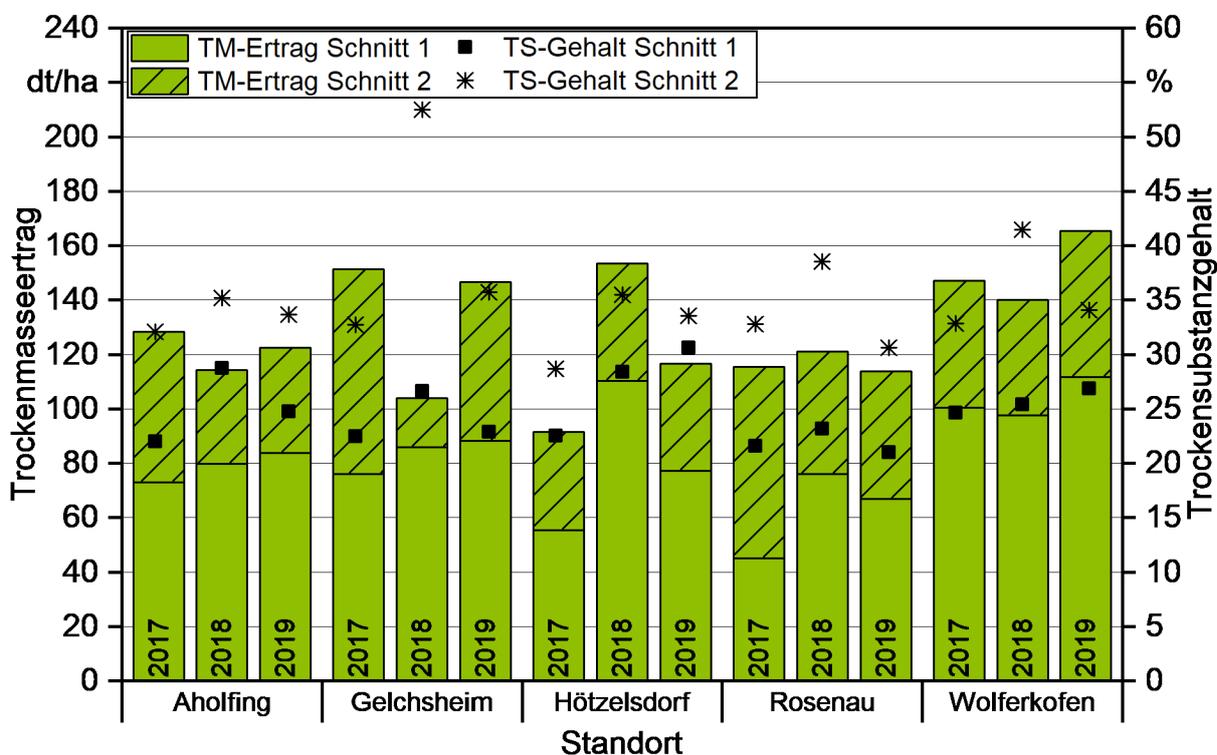


Abbildung 38: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Switchgras in den Jahren 2017 bis 2019

Die Ernte erfolgte zusammen mit der Ernte des Riesenweizengrases Ende Juni bis Anfang Juli. Der für das Riesenweizengras teilweise zu späte Termin war für das Switchgras häufig zu früh. Die Trockensubstanzgehalte des ersten Schnitts lagen häufig unter 28 %. Im zweiten Aufwuchs wurde der optimale Trockensubstanzgehalt 2018 deutlich überschritten, insbesondere in Gelchsheim, während in den Jahren 2017 und 2019 der Trockensubstanzgehalt im optimalen Bereich zwischen 28 und 35 % lag. In der ersten Projektphase in den Jahren 2015 und 2016 wurde gezeigt, dass bei einer späteren ersten Ernte die Trockensubstanzgehalte deutlich höher liegen [85].

Silomais

Der Silomais war 2017 auf allen Standorten die ertragsstärkste Kultur. Der höchste Ertrag wurde in Rosenau mit 221 dt TM/ha und der niedrigste Ertrag in Gelchsheim mit 186 dt TM/ha gemessen (Abbildung 39).

Auf allen Standorten, außer in Gelchsheim, war auch 2018 der als Referenz angebaute Silomais die ertragsstärkste Kultur. Im Vergleich zu den Vorjahresergebnissen zeigte sich jedoch ein Biomassedefizit aufgrund der anhaltenden Trockenheit. Die ertragsstärksten Standorte waren Wolferkofen und Rosenau mit 197 und 195 dt TM/ha. Das schlechteste Ergebnis erzielte der Standort Parsberg mit nur 119 dt TM/ha. In Aholfing und Gelchsheim wurden 131 und 150 dt TM/ha geerntet. In Parsberg war es zu Ausfällen von Einzelpflanzen, bedingt durch schlechte Auflaufbedingungen, gekommen. Dies erklärt teilweise das Ertragsergebnis. In Gelchsheim waren Fraßschäden durch Tiere zu verzeichnen, die eventuell nicht gänzlich durch die Pflanzen kompensiert werden konnten. Am Standort Aholfing waren sicherlich die Trockenheit und die mangelnde Wasserspeicherefähigkeit des Bodens für das niedrige Ergebnis verantwortlich.

Bis auf den Standort Hötzelsdorf war der Silomais im Jahr 2019 wieder die ertragreichste Kultur. In Hötzelsdorf hat sich sehr wahrscheinlich die Sommertrockenheit negativ auf den Ertrag ausgewirkt, es wurden nur 130 dt TM/ha geerntet. Erträge über 200 dt TM/ha wurden in Wolferkofen, Gelchsheim und Rosenau gemessen. In Aholfing lag der Ertrag bei 176 dt TM/ha und in Parsberg bei 146 dt TM/ha.

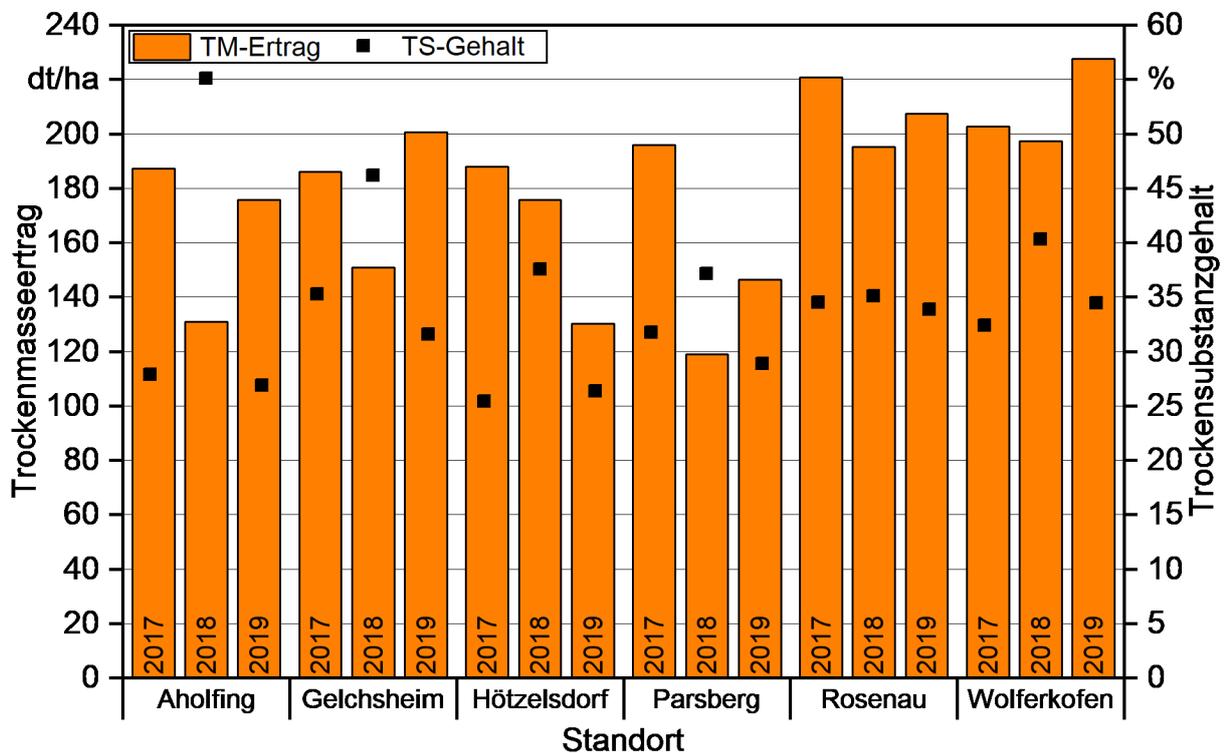


Abbildung 39: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Silomais in den Jahren 2017 bis 2019

Die Trockensubstanzgehalte lagen 2017 und 2019 zwischen 28 und 35 %, also im optimalen Bereich. Lediglich in Hötzelsdorf war der Trockensubstanzgehalt mit ca. 25 beziehungsweise 26 % etwas niedriger. Der Erntetermin Anfang September war für diesen Standort etwas zu früh.

Die Trockensubstanzgehalte betragen 2018 auf den unterschiedlichen Standorten zwischen 35 (Parsberg) und 56 % (Aholfung). Für die Silierung sind solche hohen Trockensubstanzgehalte nicht mehr optimal und es empfiehlt sich, den Silomais etwas früher zu ernten. Insbesondere am Standort Aholfung war der geeignete Erntezeitpunkt schon überschritten.

GPS-Roggen

Die zweite Referenzkultur, der GPS-Roggen, erreichte Erträge zwischen 100 und 128 dt TM/ha (Abbildung 40). Die ertragsstärksten Standorte waren Aholfung und Wolferskofen. In Hötzelsdorf fiel der Roggen über Winter weitgehend aus und musste im Frühjahr 2017 durch Sommertriticale ersetzt werden, die ebenfalls als GPS beerntet wurde und 69 dt TM/ha erzielte. Die Ernte erfolgte Ende Juni bis Mitte Juli.

Der GPS-Roggen erreichte 2018 Erträge von 89 bis 138 dt TM/ha. Der höchste Biomasseaufwuchs wurde in Hötzelsdorf und Wolferskofen gemessen. In Parsberg wurde im Frühjahr 2018 zusätzlich Sommerroggen gesät (siehe Abschnitt 4.1.2), dessen Ertrag mit 38 dt TM/ha jedoch gering und kaum erntewürdig ausfiel. Die Ernte des Roggens und auch des Winterweizens (WW ohne Ertragserfassung) erfolgte Ende Juni bis Anfang Juli.

Die Erträge des GPS-Roggens lagen 2019 bei 147 dt TM/ha in Hötzelsdorf und 124 dt TM/ha in Parsberg. Auf den Hohertragsstandorten Wolferskofen und Gelchsheim lagen die Erträge bei 141 dt TM/ha und 131 dt TM/ha.

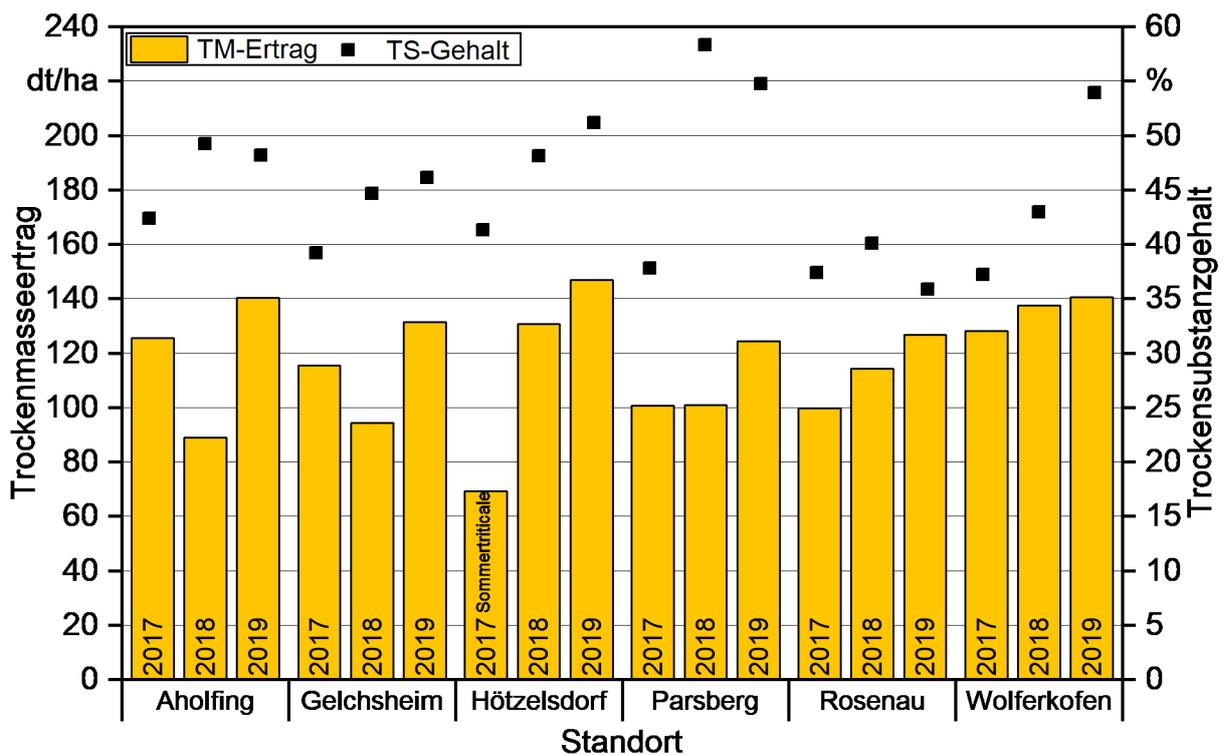


Abbildung 40: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von GPS-Roggen in den Jahren 2017 bis 2019

Die Trockensubstanzgehalte waren mit 36 bis 59 % zur Ernte generell zu hoch. Die Abreife war zu diesem Erntezeitpunkt bereits zu weit fortgeschritten.

5.1.1.2 Standort- und Kulturvergleich

Im Mittel über alle Standorte betrachtet war die Kultur Silphie die ertragreichste mehrjährige Energiepflanze (Abbildung 41). Das Riesenweizengras der Sorte GreenStar zeigte ebenfalls ein hohes Ertragspotenzial. Das Switchgras kam nie an die hohen Erträge der beiden Kulturen heran, war aber ausgesprochen stabil in den Erträgen, auch auf schlechteren Standorten in trockeneren Jahren. Nach wie vor sind jedoch mit Silomais deutlich höhere Erträge zu erzielen. Allerdings sollte dieser in einer ausgewogenen Fruchtfolge mit anderen Kulturen stehen, den Vergleich zum Beispiel mit GPS-Roggen brauchen besonders Silphie, Riesenweizengras und Switchgras nicht zu scheuen. Nur die Sida konnte ertragsmäßig nicht überzeugen.

Abbildung 41 gibt eine Übersicht der Erträge über alle Standorte. Um die Standorteignung bewerten zu können, gewährt Tabelle 17 einen Überblick über die Biomasseleistung der mehrjährigen Energiepflanzen auf den unterschiedlichen Standorten für die Jahre 2016 bis 2019. Damit beinhaltet sie auch Ergebnisse aus der ersten Projektphase, wobei die Jahre 2014 und 2015 als Etablierungsjahre angesehen wurden und nicht in die Erträge eingeflossen sind.

Die Ergebnisse bestätigen die Schlussfolgerung der ersten Versuchsphase, dass die Silphie ein hohes Ertragspotenzial besitzt [85], das am besten auf nährstoffreichen Böden und bei ausreichender Wasserverfügbarkeit, wie Wolferkofen, Rosenau und Gelchsheim, ausgeschöpft wird. Zum relativ guten Abschneiden in Gelchsheim, dem Standort mit der geringsten Niederschlagsmenge, lassen sich nur Vermutungen anstellen. Da auf diesem Standort immer die geringsten Niederschlagsmengen fallen, sind die Silphiepflanzen dort wahrscheinlich am besten an Trockenphasen adaptiert (z. B. Wurzelmenge und -tiefe). Eine besondere Eignung für schlechte Böden oder trockene Regionen kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht abgeleitet werden, da die Silphie einen relativ hohen Wasserbedarf hat [158]. Auf solchen Standorten ist generell mit Ertragseinbußen zu rechnen.

Ein hoher Biomasseaufwuchs auf sehr nährstoffreichen Standorten kann sich auch als Nachteil auswirken. Es kann Lager auftreten, das zu Ernteproblemen führt. Dies war hauptsächlich in Rosenau der Fall, dort war die Silphie aber mit Abstand die beste Dauerkultur. Der Standort hat eine hohe Mineralisationsrate (Abbildung 78, Tabelle 50 bis Tabelle 55), es wurde nur in den Gräsern eine Düngung von 30 kg N/ha gegeben. Wie beim Silomais und an der Silphie zu beobachten war, können auf diesem Standort auch ohne Stickstoffdüngung hohe Erträge erreicht werden. Die Silphie konnte als einzige der Dauerkulturen die Standortvorteile von Rosenau nutzen. Die Ernte war aufgrund auftretenden Lagers (vgl. 5.1.1.3) erschwert, aber ohne Verluste möglich. Die Angaben in der Literatur beziehen sich meist auf die erste oder zweite Ernte nach dem Etablierungsjahr. SIWEK *et al.* (2019) haben 2017 auf einem leichten und sandigen Boden in Polen 157 dt TM/ha und 2018 191 dt TM/ha geerntet [170]. In Niedersachsen wurden ebenfalls 2017 und 2018 Erträge von 146 dt TM/ha und 181 dt TM/ha gemessen [105]. MAST *et al.* (2014) ermittelten

in einem Abstand von jeweils zwei Wochen im Jahr 2012 Erträge von 171 dt TM/ha Ende August, die bis Anfang Oktober auf 130 dt TM/ha abfielen. Der Standort war ein schwerer Lehmboden mit Lössauflage [126]. In Versuchen des Landwirtschaftlichen Versuchswesens Rheinland-Pfalz wurden auf einem Standort auf 365 m NN mit der Bodenart Lehm, bei geringen Niederschlägen und kühlen Temperaturen von 2011 bis 2016 im Mittel 126 dt TM/ha geerntet [180]. Die zitierten Erträge decken sich nicht ganz mit den Ertragsresultaten auf den im vorliegenden Projekt untersuchten Standorten, bei denen die leichteren Böden niedrigere Erträge brachten, zeigen aber das hohe Ertragspotenzial der Silphie auf unterschiedlichen Standorten. Silphie gilt als flexible Pflanze, die sich an viele verschiedene Bedingungen anpassen kann [77]. Hohe Temperaturen im Sommer kann sie gut überstehen, solange genügend Wasser zur Verfügung steht [172]. Mit Mais vergleichbare Erträge kann die Silphie nur auf Standorten mit guter Wasserversorgung realisieren [156].

Insgesamt zeigt auch das Riesenweizengras auf Standorten mit guter Wasser- und Nährstoffversorgung, wie Wolferkofen, die höchsten Erträge. Es hat den Vorteil, dass es mit temporärem Wassermangel im Sommer gut zurechtkommt, was sich beim guten Abschneiden in Aholting widerspiegelte. Zur Hauptwachstumsphase im Frühjahr und im Spätsommer/Herbst sollten dann allerdings Niederschläge einsetzen, damit diese Kultur ihr hohes Biomassepotenzial auch ausschöpfen kann, wie sich im trockenen und heißen Jahr 2018 zeigte. Die kalten Winter in Hötzelsdorf überstand das Gras gut. Hier hat sich aufgrund der schlechten Wasserspeicherkapazität des Bodens die Trockenheit der Jahre 2018 und 2019 besonders stark ausgewirkt. Zusammen mit der verkürzten Vegetationsperiode aufgrund der Höhenlage waren die Erträge niedrig. In Rosenau kommt das Gras wie oben schon beschrieben nicht zurecht, Erträge unter 100 dt TM/ha können auf diesem Standort nicht überzeugen. Die Erträge der Sorte GreenStar waren zum Teil deutlich höher als die der Sorte Alkar. Offenbar ist für süddeutsche Anbauggebiete GreenStar besser geeignet. Die Sorte Alkar wurde ursprünglich für die Beweidung nasser Flächen gezüchtet [152], was ein Grund für den geringeren Ertrag der Sorte sein könnte. Auf warm-trockenen Standorten wie dem Fränkischen Triesdorf wurden Riesenweizengraserträge zwischen 179 und 193 dt TM/ha erreicht [78], auf einem ebenfalls warmen trockenen Standort mit Löss-Parabraunerde in Dornburg über 160 dt TM/ha im Mittel über die Jahre 2005 bis 2015, als Höchsterträge wurden bis zu 265 dt TM/ha gemessen [13]. In Versuchen des Landwirtschaftlichen Versuchswesens Rheinland-Pfalz wurden auf einem Standort auf 365 m über NN, mit der Bodenart sandiger Lehm, geringen Niederschlägen und kühlen Temperaturen von 2011 bis 2016 im Mittel 160 dt TM/ha geerntet [180]. CSETE *et al.* (2011) geben als Erträge über 200 dt TM/ha auf einem Boden mit moderatem Tongehalt und 200 dt TM/ha auf einem Standort mit hohem Grundwasserspiegel an [41]. Die hohen Erträge auf verschiedenen Standorten, die in der Literatur zu finden sind, veranschaulichen die Anbaueignung des Grases auf unterschiedlichen Standorten, die Eignung auch für trockenere Standorte sowie das hohe Ertragspotenzial.

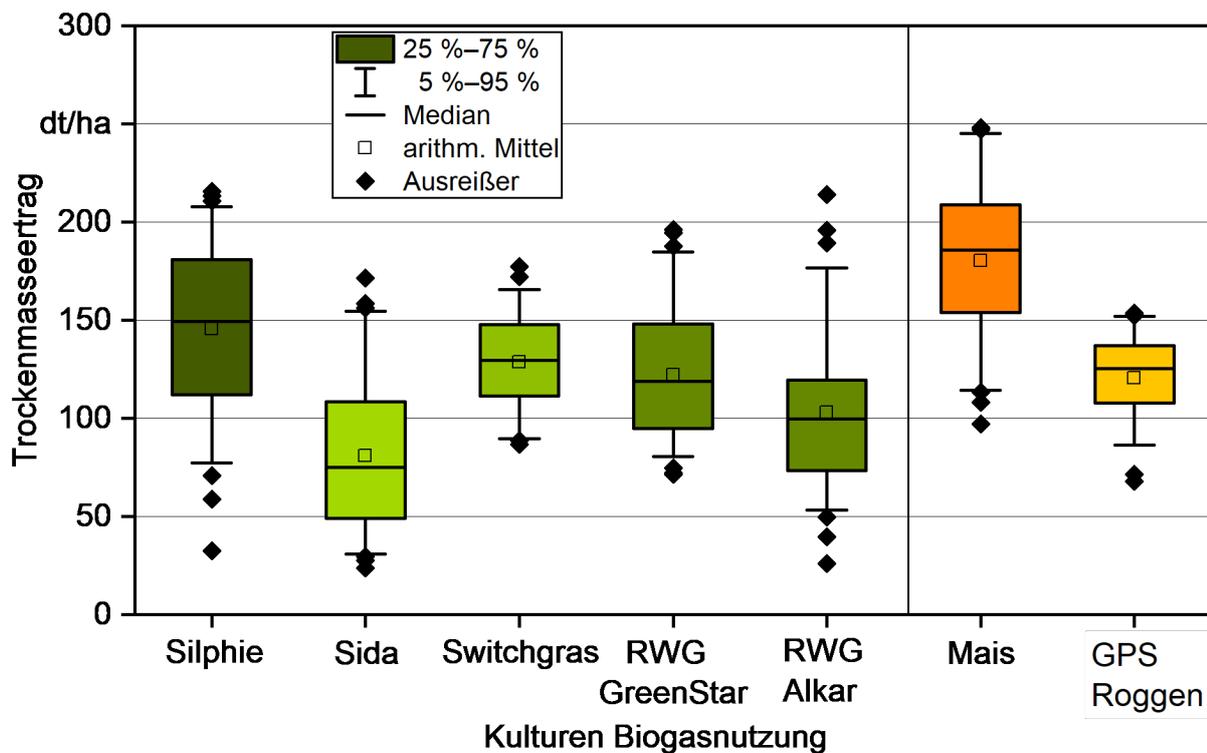


Abbildung 41: Trockenmasseerträge der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung über die Versuchsjahre und Standorte in den Jahren 2017 bis 2019, (Silphie $n = 70$, Sida $n = 60$, Switchgras $n = 57$, RWG GreenStar $n = 68$, RWG Alkar $n = 72$, Mais $n = 71$, GPS-Roggen $n = 68$)

Der Anbau von Switchgras empfiehlt sich eher auf warmen und trockenen Standorten. Hier kann das Gras, das auch Sommertrockenheit gut übersteht, seinen Vorteil nutzen. In Bayern sind solche Standorte eher in Mittel- oder Unterfranken oder im Donau-/Isar-/Inn-Hügelland zu finden. Den höchsten Biomasseaufwuchs hatte das Gras auf den Hochartragsstandorten in Wolferkofen und Gelchsheim, dort war es aber nicht die ertragreichste Kultur. Besonders in den trockenen Jahren 2018 und 2019 konnte das Gras seine Ertragsbeständigkeit und Trockentoleranz zeigen. Auf den sandigen Böden in Aholting und in Hötzelsdorf überzeugte das Switchgras gerade in diesen beiden Jahren mit Ertragsstabilität. Wie schon die Vorjahre gezeigt haben, profitiert dieses Gras weniger vom Nährstoffreichtum eines Bodens als vielmehr von warmen Temperaturen und einer langen Vegetationszeit. Dies war 2018 sogar in der Höhenlage in Hötzelsdorf gegeben. Sollten zukünftig immer häufiger trockene und warme Jahre wie 2018 und 2019 auftreten, wird der Anbau dieser Kultur für sandige und trockene Standorte interessant. LEWANDOWSKI *et al.* (2003) haben mittlere jährliche Switchgraserträge von 160 dt TM/ha ermittelt, in den besten Parzellen wurden sogar 220 dt TM/ha gemessen [116]. Dies sind höhere Erträge als auf den bayerischen Standorten geerntet wurden. Auf einem Standort in Texas mit immer wieder auftretender Trockenheit wurden mit einem einschnittigen System 100 bis 160 dt TM/ha geerntet, mit einem zweischnittigem System 80 bis über 150 dt TM/ha [129]. Nahe Stuttgart wurden Erträge von 84 bis 142 dt TM/ha ermittelt [102]. Diese Werte sind eher mit den vorliegenden Ergebnissen vergleichbar. Der Unterschied in den Erträgen kann in der

Sortenwahl liegen. Tieflandsorten sind ertragreicher [185], haben aber einen deutlich höheren Wärmeanspruch [116], der nicht zu bayerischen Anbaubedingungen passt. Auch die Schnittanzahl kann einen Einfluss auf den Ertrag haben. Im Süden der USA erzielte ein zweischnittiges System mit Ernten im Juli und Oktober höhere Erträge, während ein einschnittiges System im Norden vorteilhafter erscheint [127]. Ertragsdaten dreijähriger Feldversuche von MCLAUGHLIN *et al.* (1999) zeigten die Bedeutung regional angepasster Schnittpraktiken. Auf zwei Standorten in Virginia (Blacksburg) und Alabama (Auburn) wurden die höchsten Erträge mit zwei Schnitten im Jahr erreicht, während in Texas, mit häufig auftretender Trockenheit, ein Schnitt im Jahr ertragreicher war [129].

Insgesamt sind die Ertragsergebnisse der Sida auf bayerischen Standorten nicht zufriedenstellend. Aus rein ökonomischer Sicht sind die Erträge zu gering, um mit dieser Kultur rentabel wirtschaften zu können. Die Etablierung eines dichten Bestands als Grundlage für die Biomasseleistung der nächsten Jahre ist schwierig. Hinsichtlich des Bodens gilt sie als anspruchslos. Als Ausschlusskriterium für den Anbau gelten lediglich Staunässe und sehr trockene Böden [105]. Da der Haupteinfluss auf die Erträge im Experiment aber die Verunkrautung war, lässt sich die Standorteignung anhand der vorliegenden Daten schlecht beurteilen. Als Grund für das schlechte Abschneiden der Standorte Rosenau, Aholting und Hötzelndorf war eine nicht ausreichende Pflanzenzahl pro m² und die übermäßige Verunkrautung, die in der Sida chemisch nicht kontrolliert werden kann, anzugeben. Gelingt es im Saat- oder Pflanzjahr nicht, einen dichten Bestand zu etablieren, so bieten die Lücken Platz und Licht für die Entwicklung von Unkraut, das sich im Laufe der Jahre immer mehr im Bestand ausbreiten kann. Das Unkraut entwickelt sich im Frühjahr meist schneller als die Kulturpflanze und auch das Samenpotenzial im Boden vermehrt sich von Jahr zu Jahr. Kühle Standorte mit spätem Vegetationsbeginn verschärfen dieses Problem, da die Sida für ihr Wachstum auf warme Temperaturen angewiesen ist. Eine Pflanzung anstelle der Etablierung im Saatverfahren kann hier Vorteile bringen. Der Boden ist schneller bedeckt und bereits im ersten Jahr können sich Unkräuter weniger ausbreiten. Insgesamt gibt es für die zunehmende Verunkrautung der Sidabestände bisher keine Lösung, da eine chemische Unkrautkontrolle weder zugelassen noch verträglich ist [85]. Umso wichtiger ist es, bereits im ersten Jahr einen dichten, lückenlosen und wüchsigen Bestand zu etablieren.

Untersuchungen von BORKOWSKA *et al.* (2009) ergaben auf leicht sandigem Lehm mittlere Erträge von 84 dt TM/ha. Dies wird mit der auf dem Boden vorherrschenden Trockenheit begründet [19]. Untersuchungen von SIWEK *et al.* (2019) ergaben im Jahr 2017 Erträge von 92 bis 150 dt TM/ha, im trockenen Jahr 2018 wurden nur 48 bis 85 dt TM/ha erreicht [170]. In Niedersachsen hingegen zeigte die Sida eine hohe Trockentoleranz. Dort wurden 2017 im Mittel 114 dt TM/ha geerntet und 2018 172,9 dt TM/ha. Dabei zeigte eine gedrillte Variante eine vergleichbare Ertragsleistung wie eine Jungpflanzenanlage [105]. Eine der Hauptursachen für die deutlich besseren Ertragsergebnisse der hier genannten Experimente, im Vergleich zu den Erträgen der untersuchten Standorte, war vermutlich eine gelungene Etablierung. In Wolferskofen, wo die Etablierung relativ unkrautfrei gelungen war, wurden höhere Erträge als auf den anderen Standorten erzielt.

Die vollständigen Ertrags- und TS-Daten sowie Angaben zu Höhe, BBCH-Stadium und Lager aller Varianten und Standorte sind Tabelle 79 bis Tabelle 85 im Anhang zu entnehmen.

Tabelle 17: Trockenmasseertrag nach Standort für die Versuchsjahre; abnehmender Ertrag von links nach rechts sortiert; Mittelwerte aus den Jahren 2016 bis 2019; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen

Standort (Ackerzahl/ Wasserspeicherfähigkeit)	Trockenmasseertrag in dt TM/ha						

Aholfing (45/gering)	Switchgras 134 b	RWG GreenStar 133 bc	RWG Alkar 108 cd	Silphie 108 cd	Sida 73 d	Mais 178 a	GPS- Roggen 120 bc
Gelchsheim (72–76/gut)	Silphie 167 ab	RWG GreenStar 161 ab	RWG Alkar 153 ab	Switchgras 138 b	Sida 103 c	Mais 183 a	GPS- Roggen 102 c
Hötzelsdorf (35–45/gering)	Silphie 121 bc	Switchgras 113 bcd	RWG GreenStar 111 cd	RWG Alkar 88 de	Sida 51 f	Mais 179 a	GPS- Roggen 135 bc
Parsberg (32–59/mittel)	Silphie 148 ab	RWG GreenStar 142 abc	RWG Alkar 79 cd	Sida 69 de		Mais 157 a	GPS- Roggen 112 bc
Rosenau (58/gut)	Silphie 165 b	Switchgras 117 c	RWG GreenStar 109 cd	RWG Alkar 86 de	Sida 69 e	Mais 217 a	GPS- Roggen 114 c
Wolferkofen (76/gut)	Silphie 187 ab	RWG GreenStar 166 bc	RWG Alkar 158 bc	Switchgras 148 cd	Sida 128 d	Mais 213 a	GPS- Roggen 137 cde

5.1.1.3 Pflanzenhöhe und Lageranfälligkeit

In Abbildung 42 ist die Höhe der Biogaskulturen zum Erntezeitpunkt abgebildet. Wie im Vergleich mit Abbildung 41 zu sehen ist, bedeutete ein hoher Bestand nicht immer einen hohen Ertrag. Während der Mais und auch die Silphie sowohl sehr hoch als auch ertragreich waren, bildete die Sida zwar sehr hohe, aber auch sehr lichte Bestände. Die Gräser wurden in zwei Schnitten geerntet, weshalb der Bestand je Schnitt nicht so hoch war wie bei den Stauden Sida und Silphie. Speziell beim Riesenweizengras hing die Pflanzenhöhe beim zweiten Schnitt davon ab, ob noch Ähren gebildet wurden oder nicht. Für jede Kultur einzeln betrachtet kann die Höhe schon einen Hinweis auf den zu erwartenden Ertrag geben. Die Silphie erreichte auf den Standorten Rosenau, Gelchsheim und Wolferkofen im Mittel Höhen zwischen 288 und 338 cm, während sie auf den ertragsschwächeren Standorten Aholfing, Hötzelndorf und Parsberg im Mittel nur 203 bis 242 cm hoch wuchs (Tabelle 18). Ein ähnliches Bild ergab sich für die Sida. Das Switchgras zeigte im Mittel

nur geringe Höhenunterschiede zwischen den Standorten, bei dieser Kultur waren auch die Ertragsunterschiede am geringsten. Bei der Riesenweizengrassorte GreenStar waren kaum Höhenunterschiede festzustellen, die Sorte Alkar hingegen war auf Standorten mit hohen Erträgen auch höher gewachsen. BIERTÜMPFEL (2015) zeigte ausführliche Untersuchungen zu Erträgen und Höhen von Riesenweizengras und von Silphie. In diesen schien schon ein Zusammenhang zwischen der Höhe des Riesenweizengrases und der Ertragshöhe zu bestehen, während bei unterschiedlichen Herkünften der Silphie nicht die höchsten Herkünfte die höchsten Erträge hatten [13]. Die Sida zeigte in Untersuchungen von BORKOWSKA *et al.* (2009) bei höheren Beständen höhere Erträge [19]. Auf das Switchgras wird in Abschnitt 5.1.2.3 eingegangen. Die Pflanzenhöhe ist sicher als ein Faktor zu betrachten, an dem der zu erwartende Ertrag abgeschätzt werden kann, andere Faktoren, wie z. B. Anzahl Triebe pro Fläche, Stängeldicke, Blattanteil und Standfestigkeit, haben sicher auch einen Einfluss.

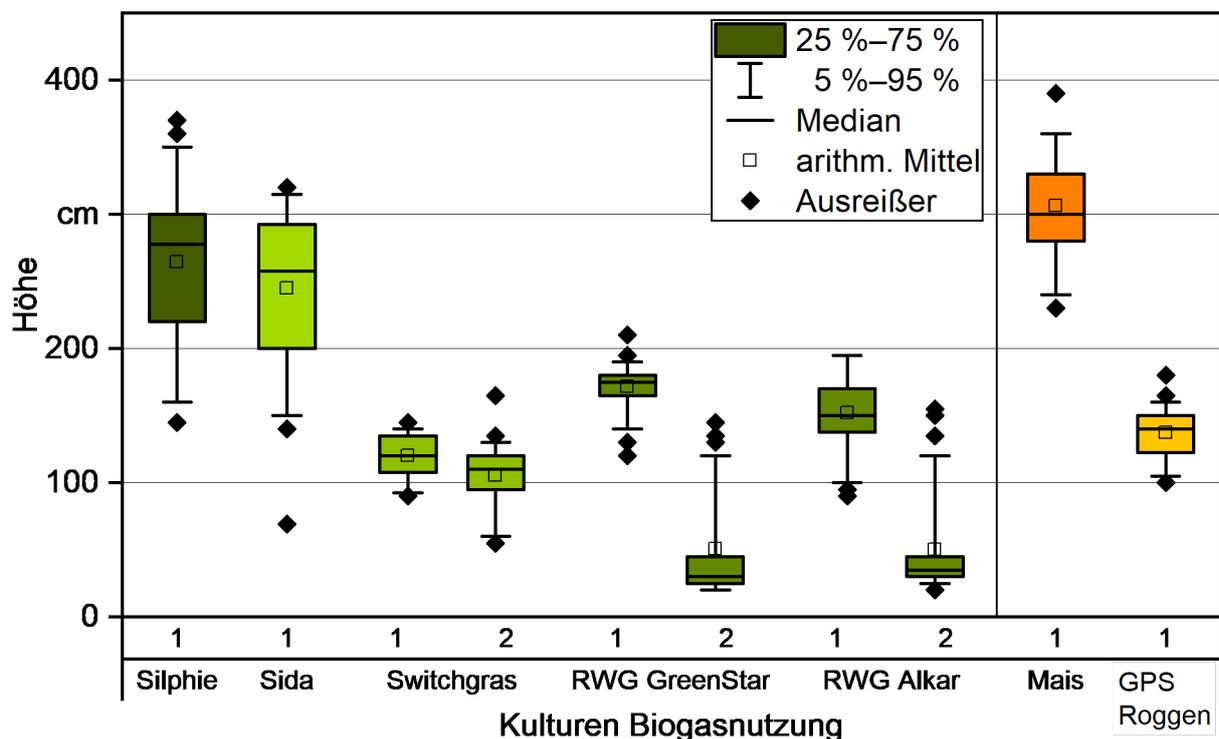


Abbildung 42: Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung, je Variante und Schnitt über die Versuchsjahre 2017 bis 2019

Tabelle 18: Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung, im Mittel über die Standorte und Versuchsjahre 2017 bis 2019

Kultur	Schnitt	Aholfing	Gelchsheim	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Wolferkofen
in cm							
Silphie	1	203	293	242	221	338	288
Sida	1	157	293	224	228	208	288
Switchgras	1	119	124	117		118	123
Switchgras	2	101	98	93		119	115
RWG GreenStar	1	171	174	174	167	164	177
RWG GreenStar	2	36	56	31	61	55	61
RWG Alkar	1	148	175	157	139	126	167
RWG Alkar	2	34	50	30	46	63	72
Mais	1	290	299	306	270	361	310
GPS-Roggen	1	136	144	140	134	137	132

Starkes Lager senkt oftmals den Trockensubstanzgehalt, verursacht Probleme bei der Ernte und führt zu Ertragseinbußen und Qualitätseinbußen durch Verschmutzung. Tabelle 19 zeigt die im Feldversuch ermittelten Lagerboniturwerte der mehrjährigen Biogaskulturen über die Versuchsjahre und Standorte. Für die Gräser wurden jeweils die Bonituren von beiden Schnitten dargestellt. Wie zu sehen ist, sind Sida und die Referenzkultur Mais ausgesprochen standfest. Beim Switchgras war zum Zeitpunkt des ersten Schnitts kein Lager festzustellen, beim zweiten Schnitt hingegen trat leichtes Lager auf. In der ersten Projektphase war dies genau umgekehrt, hier lag der erste Schnitt teilweise im Lager, wenn auch nicht stark, aber der zweite Schnitt nicht [85]. Da der Erntezeitpunkt in der zweiten Projektphase etwa vier Wochen eher stattfand, liegt die Vermutung nahe, dass Switchgras bei längerer Standdauer ins Lager gehen kann. Eine Ernte war aber auch in der ersten Projektphase zum zweiten Schnittzeitpunkt problemlos möglich. Bei nur einem Schnitt im Jahr trat in Versuchen von SCHRABAUER *et al.* (2014) Lager von 64 % auf, hier erfolgte der Schnitt erst im September [163]. Da in beiden Projektphasen im Switchgras Lager nur ein geringes Problem war, erscheinen zwei Ernten im Jahr in dieser Hinsicht empfehlenswerter. Auch die richtige Sortenwahl kann helfen, frühreifere Hochlandsorten zeigten Lager von 0 bis 50 % und mittelreife Sorten bis zu 70 % [185].



Abbildung 43: Lager in der Silphie auf dem Standort Rosenau (Foto: 20.08.2018)

Die Silphie neigte auf dem guten Standort Wolferkofen zu Lager, Boniturwerte über 5 wurden jedoch ausschließlich in Rosenau vergeben. In Rosenau ist das Stickstoffangebot durch Mineralisation des humusreichen Bodens durchgehend so hoch, dass im Versuch nur eine Startdüngung von 30 kg N/ha bei den Gräsern gegeben wurde. Alle anderen Erträge wurden ohne Stickstoffdüngung erreicht. Die hohe Stickstoffversorgung wirkt sich negativ auf die Standfestigkeit der Silphie aus.

Das Riesenweizen gras neigte zum Lager, auf allen Standorten kam es zu beiden Schnitten vor. Unter den Biogaskulturen hat das Riesenweizen gras das größte Lagerproblem, starkes Lager kam besonders bei der Sorte GreenStar vor. Nur bei starkem Lager kam es auch zu Ernteverlusten. SCHRAUBAUER *et al.* (2014) hingegen haben bei drei Riesenweizen grassorten bei Ernte im Juni und September kaum Lager feststellen könne. Nur bei einem einzigen Schnitt im Jahr (September/Okttober) trat in 59–64 % der Fälle Lager auf [163].

Tabelle 19: Lagerbonitur der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung, Häufigkeit der Notenvergabe je Variante und Schnitt über die Versuchsjahre 2017 bis 2019

Kultur	Silphie	Sida	Switch- gras	Switch- gras	RWG Green- Star	RWG Green- Star	RWG Alkar	RWG Alkar	Mais	GPS- Roggen
Schnitt	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1
Bonitur- note	Notenvergabe in %									
1	52	88	100	49	10	27	37	35	95	59
2	15	9	0	37	11	2	18	1	1	10
3	7	1	0	5	17	2	12	1	4	9
4	7	1	0	2	10	15	11	23	0	9
5	4	0	0	2	9	21	7	10	0	1
6	5	0	0	4	7	6	5	4	0	1
7	3	0	0	2	9	9	4	9	0	3
8	0	0	0	0	14	15	5	12	0	7
9	7	0	0	0	13	3	0	4	0	0

5.1.1.4 Entwicklung von Trockensubstanzgehalt und BBCH-Stadium im Erntezeitraum

Untersuchungen zur Entwicklung des Trockensubstanzgehalts sollten Aufschluss über den geeigneten Erntezeitpunkt der unterschiedlichen Biogaskulturen geben. Am Standort Wolferkofen wurden Untersuchungen zur Entwicklung des Trockensubstanzgehalts sowie der Substratqualität durchgeführt, um Erkenntnisse über den geeigneten Erntezeitpunkt der unterschiedlichen Biogaskulturen zu erlangen. Als Ziel-Trockensubstanzgehalt im Erntegut sollten etwa 28 % erreicht werden, um eine optimale Silierung zu ermöglichen.

Abbildung 44 zeigt die ermittelten Trockensubstanzgehalte der Kulturen im möglichen Erntezeitraum. Der Erntezeitraum wurde aus den Erfahrungen der Vorjahre abgeschätzt.

Das Riesenweizengras reifte am frühesten ab und erreichte schon Anfang Juni 28 % Trockensubstanzgehalt. Das BBCH-Stadium zu diesem Zeitpunkt lag bei Mitte bis Ende Rispenschieben, wie aus Abbildung 45 deutlich wird. Danach stieg der Trockensubstanzgehalt relativ schnell an. Ende Juni, zum Ende der Blüte, lagen die Trockensubstanzgehalte teilweise schon zu hoch. In Versuchen von MAST *et al.* (2014) lagen die Trockensubstanzgehalte Ende Juni bei 38 % und stiegen bis zum 18. Juli auf 43,5 % an [126]. Die Ernte sollte daher frühzeitig, zwischen Ende Rispenschieben und Mitte Blüte erfolgen.

Das Switchgras erreichte Anfang Juli einen Trockensubstanzgehalt von 28 %. Zu diesem Zeitpunkt befand sich das Gras im Rispenschieben (Abbildung 45). Die 35 % wurden Anfang August zum Ende der Blüte überschritten. Eine späte Ernte wirkt sich negativ auf den

Ertrag des zweiten Schnitts aus, da dann die begrenzte Zeit und abnehmende Temperaturen keinen erntewürdigen Bestand mehr ermöglichen.

Der Trockensubstanzgehalt der Sida stieg langsam an. Allerdings waren zur ersten Ernte Ende Juni die angestrebten 28 % bereits überschritten. Das BBCH-Stadium zu diesem Zeitpunkt lag bei Anfang bis Mitte Blüte. Wie in Abbildung 45 zu sehen ist der Trockensubstanzgehalt zum Ende der Blüte zu hoch, ab Anfang August liegt er über den optimalen 35 %. Ergebnisse von Silierversuchen aus dem Vorgängerprojekt (2014–2016) [85] haben gezeigt, dass eine Silierung der Sida mit 35 % Trockensubstanzgehalt nicht ganz einfach ist, die Silagequalität war verbesserungsbedürftig. Silierhilfsmittel oder eine Mischsilierung mit anderen Kulturen könnten jedoch Abhilfe schaffen.

Die Silphie veränderte ihren Trockensubstanzgehalt im Erntezeitraum nur langsam. Dies hängt sicherlich mit der sehr lang andauernden Blüte und den bis in den Herbst grün bleibenden Blättern der Silphie zusammen. Auch trocknen die sehr dichten und zu Lager neigenden Bestände nach einem Niederschlagsereignis nur langsam ab. PICHARD (2012) beobachtete eine Zunahme des Trockensubstanzgehalts von der vegetativen Phase mit 60 % Blattanteil und 14,4 % Trockensubstanzgehalt, auf 24,9 % Trockensubstanzgehalt zum Beginn des Samenansetzens mit noch 40 % Blattanteil [140]. GÖBEL *et al.* (2012) geben als optimalen Erntezeitpunkt das Ende der Hauptblüte, Ende August bis Anfang September, an [81]. Auch bei MAST *et al.* (2014) lagen die Trockensubstanzgehalte von Ende August bis Ende September im optimalen Bereich [126]. Wie in Abbildung 44 zu sehen ist, wurde im Projekt der gewünschte Trockensubstanzgehalt nur im trockenen Jahr 2018 erreicht. Eine Ernte sollte aber aus Qualitätsgründen nicht zu spät erfolgen (vgl. Unterkapitel 5.2). Eine Silierung ist allerdings auch mit geringeren Trockensubstanzgehalten von 25 oder 26 % verlustfrei möglich [14] [108], eine Ernte ab Ende August bis Ende September erscheint daher auf bayerischen Standorten sinnvoll. Es ist allerdings hinzuzufügen, dass die Bonitur des Entwicklungsstadiums bei Silphie wie auch bei Sida schwierig ist, da die Pflanzenbestände über einen sehr langen Zeitraum abreifen und bis in den Spätsommer hinein immer wieder neue Blüten bilden. Eine späte Ernte ist insbesondere aus agrarökologischer Sicht empfehlenswert, um das lange Blüh- bzw. Nahrungsangebot der Silphie auszunutzen.

Der hier diskutierte geeignete Erntezeitpunkt der Biogaskulturen lässt qualitative Veränderungen im Erntegut mit zunehmender Reife außer Acht. Nähere Ausführungen dazu sind in Unterkapitel 5.2 zu finden.

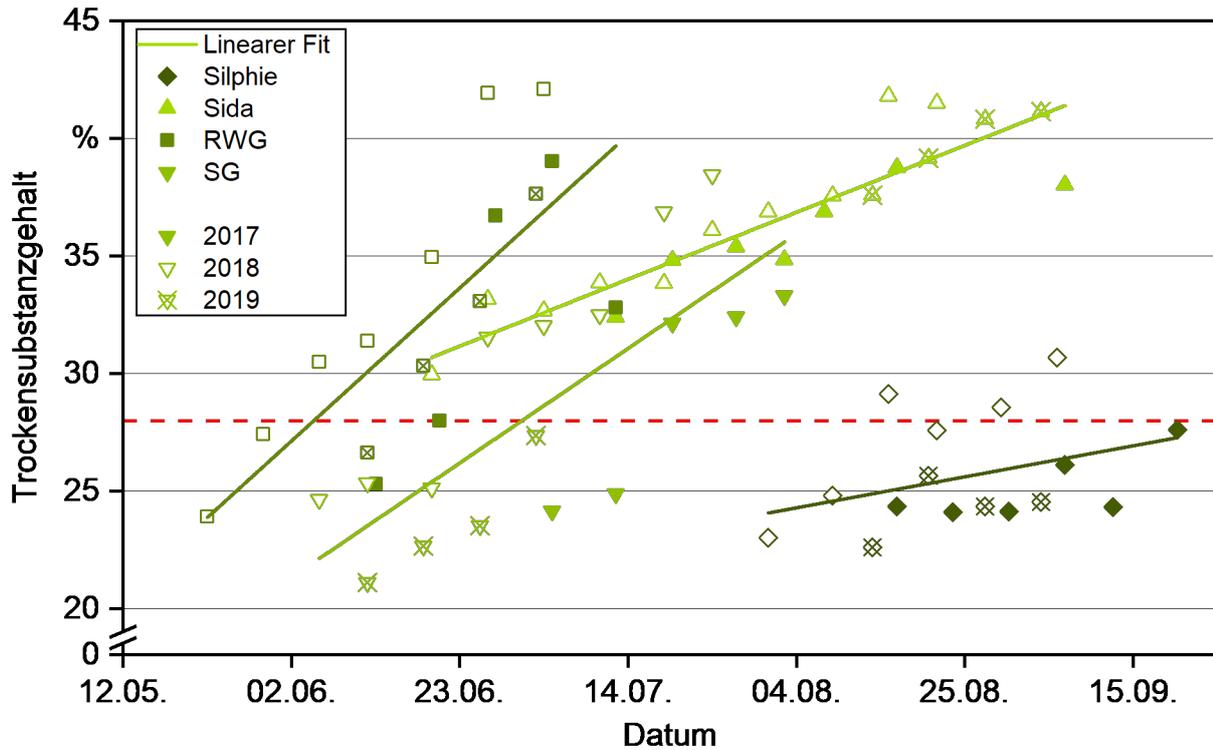


Abbildung 44: Entwicklung des Trockensubstanzgehalts von Riesenweizengras, Silphie, Sida und Switchgras für die Versuchsjahre am Standort Wolferkofen im Erntezeitraum der Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019; rot markiert der Zielwert von mindestens 28 % Trockensubstanzgehalt

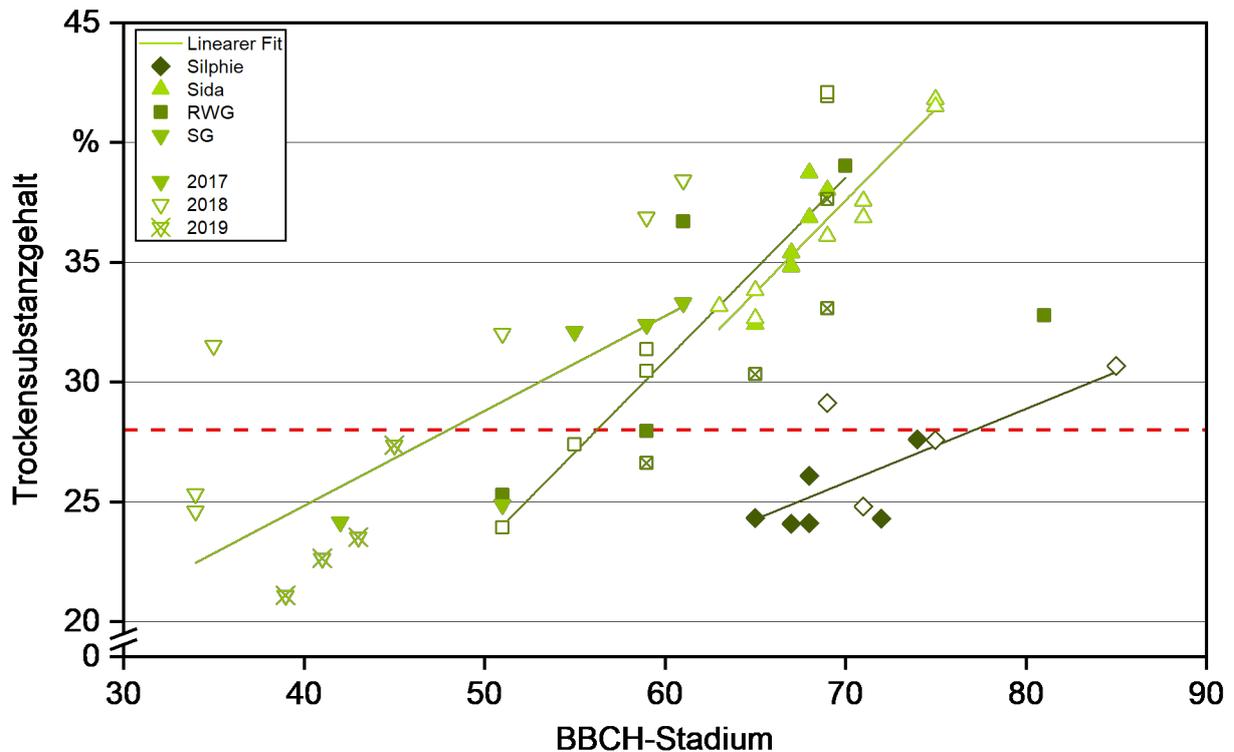


Abbildung 45: Entwicklung des Trockensubstanzgehalts und des BBCH-Stadiums von Riesenweizengras, Silphie, Sida und Switchgrass am Standort Wolferskofen im Erntezeitraum der Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019; rot markiert der Zielwert von mindestens 28 % Trockensubstanzgehalt

5.1.2 Anbaueignung mehrjähriger Energiepflanzen zur thermischen Verwertung

Die abgetrockneten Bestände von Sida, Switchgrass und Miscanthus wurden im Frühjahr geerntet (Erntetermine siehe Anhang Tabelle 60). Dadurch wird jeweils der Biomasseaufwuchs des Vorjahrs erfasst. Im Jahr 2020 wurden die Kulturen nur auf den Standorten Aholfing, Hötzelsdorf, Rosenau und Parsberg geerntet. Die Standorte Parsberg und Gelchsheim mussten im Herbst 2019 aus technischen Gründen umgebrochen werden.

5.1.2.1 Trockenmasseertrag, Trockensubstanzgehalt und Ertebonituren

Miscanthus

Den höchsten mittleren Biomasseertrag erreichte die Kultur Miscanthus (Abbildung 46). Im Mittel über die Standorte ergab sich 2017 ein Trockenmasseertrag von 116 dt TM/ha. Im Vorjahr lag der Durchschnittsertrag noch bei nur 56 dt TM/ha [85]. Maximal wurden 170 dt TM/ha am Standorte Aholfing geerntet. Das schlechte Abschneiden der Standorte Gelchsheim und Wolferskofen hängt vermutlich mit der späteren Etablierung erst 2015 zusammen, da Miscanthus drei bis vier Jahre bis zum Ertragsmaximum benötigt [95].

In 2018 ergab sich im Mittel über die Standorte ein Trockenmasseertrag von 146 dt TM/ha. Der Maximalertrag wurde in Gelchsheim mit 163 dt TM/ha ermittelt, der niedrigste Ertrag in Hötzelsdorf mit 138 dt TM/ha. Das insgesamt hohe Ertragspotenzial des Miscanthus

von bis zu 250 dt TM/ha [86] konnte jedoch auch im dritten Erntejahr nicht ausgeschöpft werden.

Im Trockenmasseertrag der thermischen Kulturen des Erntejahrs 2019 zeigte sich die Trockenheit des Jahrs 2018. Besonders in Aholfing mit nur 68 dt TM/ha und in Parsberg mit 101 dt TM/ha zeigten sich die Auswirkungen. In Gelchsheim, Hötzelsdorf, Rosenau und Wolferkofen hingegen stieg der Ertrag im Vergleich zum Vorjahr leicht an. Der höchst Ertrag wurde in Gelchsheim mit 177 dt TM/ha geerntet.

2020 wurde der Miscanthus nur auf den Standorten Aholfing, Hötzelsdorf, Rosenau und Parsberg geerntet. In Rosenau ging der Ertrag zurück auf 122 dt TM/ha, auf den anderen drei Standorten stieg er an, in Wolferkofen sogar auf 206 dt TM/ha.

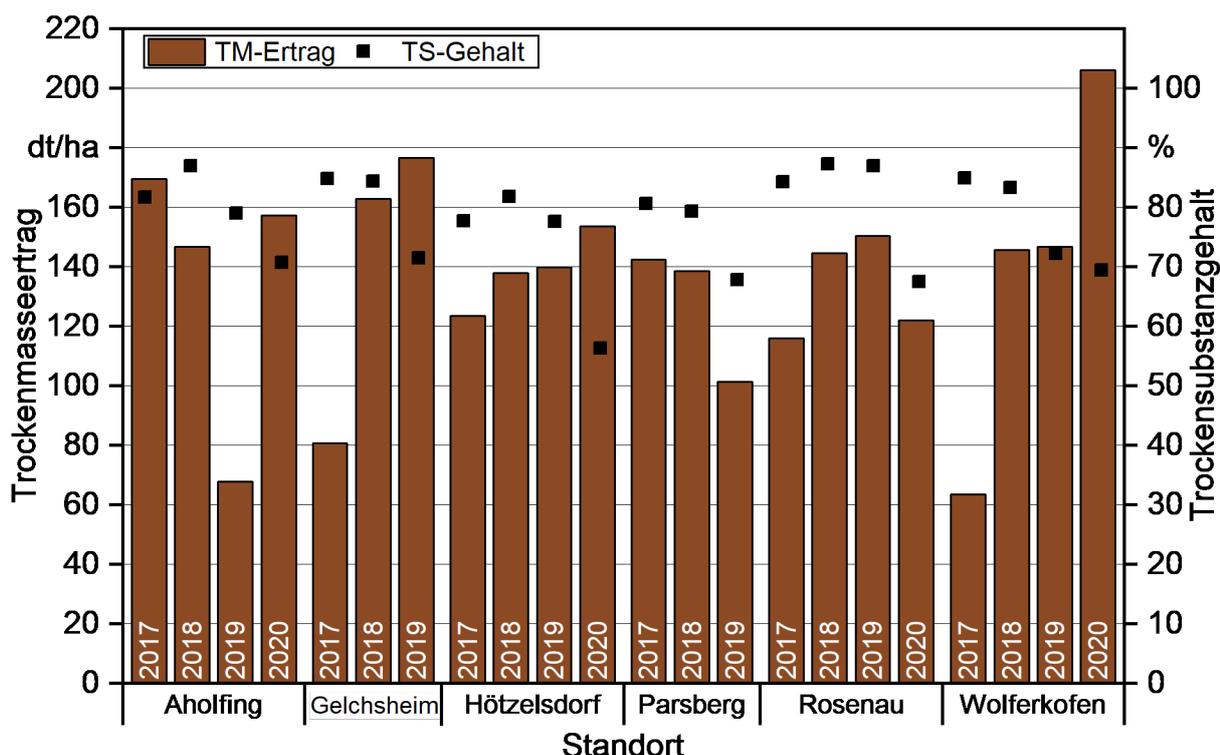


Abbildung 46: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Miscanthus in den Jahren 2017 bis 2019 bzw. 2020

Der für eine verlustfreie Lagerung angestrebte Ziel-Trockensubstanzgehalt von 85 % wurde nicht immer erreicht (Abbildung 46). Eventuell wäre ein etwas späterer Erntetermin vorteilhaft gewesen. Die Anfälligkeit von Miscanthus für Lager ist insbesondere in schnee-reichen Lagen gegeben. Die Lagerbonitur der Bestände zeigte jedoch nur ein geringes Ausmaß in Rosenau (vgl. Abschnitt 5.1.2.3).

Sida

Das Malvengewächs Sida erreichte 2017 im Mittel über die Standorte nur 66 dt TM/ha. Im Vergleich zum Vorjahr (35 dt TM/ha [85]) ist aber auch dies eine deutliche Steigerung. Der Maximalertrag wurde am Standort Rosenau mit 83 dt TM/ha geerntet. Besonders schlecht

fiel das Ergebnis am Standort Hötzelstdorf aus. Dort war zum einen nur ein dünner Bestand vorhanden (ca. 4,7 Pflanzen/m²), zum anderen war dort das Klima für die wärmeliebende Kultur nicht ideal. Die kühlen Temperaturen und der lange Winter führten zu einem sehr späten Wiederaustrieb. Bedingt dadurch und aufgrund der geringen Pflanzendichte war der Unkrautdruck bzw. die Konkurrenz um Nährstoffe und Licht hoch.

In 2018 erreichte die Sida im Mittel über die Standorte 60 dt TM/ha. Im Vergleich zum Vorjahr (66 dt TM/ha) war das ein leichter Rückgang des Ertrags. Beeinflusst wurde der Mittelwert besonders durch das wiederholt schlechte Abschneiden der Kultur in Hötzelstdorf. Der Maximalertrag von 87 dt TM/ha wurde in Gelchsheim geerntet. Das warme Klima an diesem Standort, die relativ milden Winter und der damit zeitige Wiederaustrieb waren für die Entwicklung der Sida förderlich.

2019 waren die besten Standorte Gelchsheim und Wolferkofen mit 83 und 81 dt TM/ha. Auf beiden Standorten war die Etablierung der Sida in ausreichender Pflanzenanzahl gelungen und die Verunkrautung gering. Der schlechteste Standort war Aholting mit 28 dt TM/ha. Hier war 2018 die Sommertrockenheit besonders ausgeprägt. Der Ertrag in Rosenau ging im Vergleich mit den Vorjahren zurück. Grund war vermutlich die zunehmende Verunkrautung.

2020 erreichte die Sida in Wolferkofen einen Ertrag von 80 dt TM/ha, gefolgt von Aholting mit 49 dt TM/ha. In Hötzelstdorf und Rosenau lagen die Erträge um die 30 dt TM/ha.

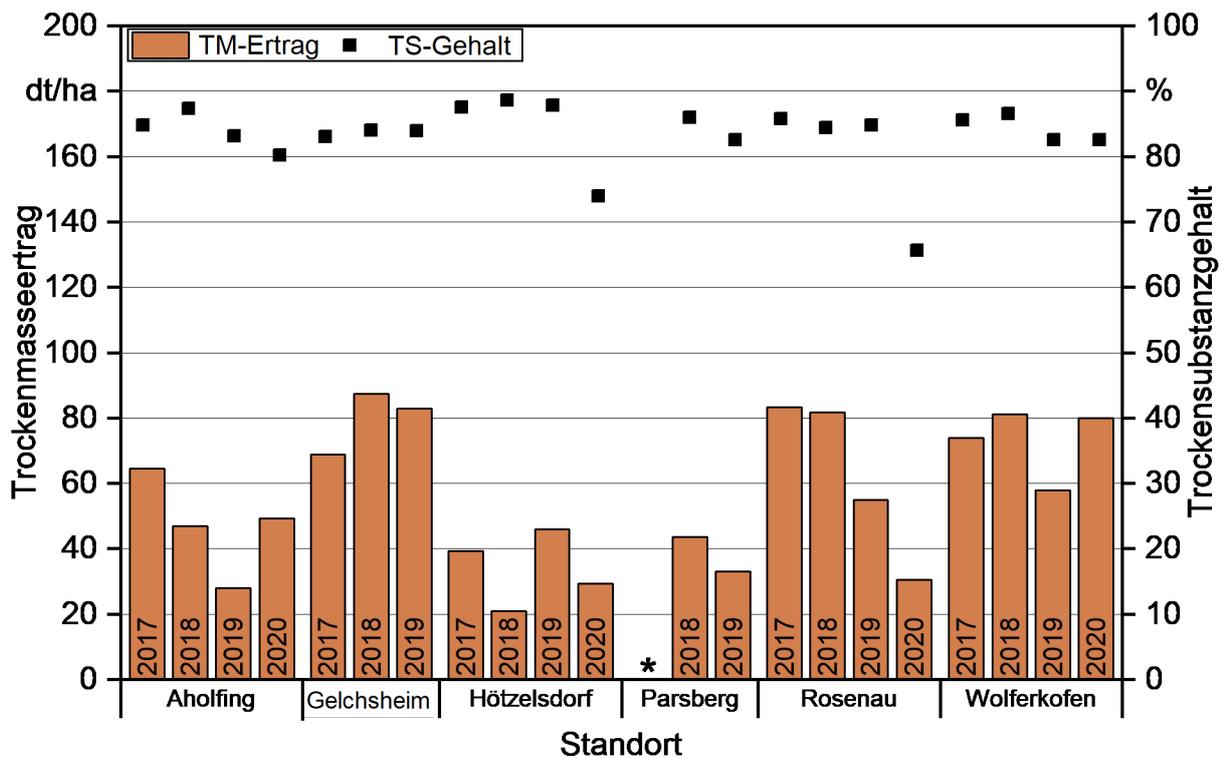


Abbildung 47: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte der Sida in den Jahren 2017 bis 2019 bzw. 2020 (* keine verwertbaren Daten)

Der Trockensubstanzgehalt von 85 % wurde nicht immer erreicht. 2017 war der niedrige Trockensubstanzgehalt in Gelchsheim auf den zeitigen Wiederaustrieb der Sida-pflanzen zurückzuführen. Somit gelangte bei der Ernte grünes, feuchtes Pflanzenmaterial in das Erntegut und reduzierte insgesamt den Trockensubstanzgehalt. Für die Lagerung von Sidahäckselgut ist das negativ. Die Ernte sollte auf jeden Fall vor dem Wiederaustrieb der Pflanzen erfolgen. 2018 konnte die Biomasse der Sida auf fast allen Standorten mit einem Trockensubstanzgehalt von annähernd 85 % oder mehr geerntet werden. Eine Nachtrocknung wäre in diesem Fall nicht notwendig, das Häckselgut könnte direkt eingelagert werden. In den beiden Jahren 2019 und 2020 lagen die Trockensubstanzgehalte meist etwas unter 85 %. Besonders auffällig sind die Standorte Hötzelsdorf und Rosenau in 2020. Hier wäre eine spätere Ernte vermutlich besser gewesen.

Switchgras

Der Trockenmasseertrag des Switchgrases lag 2017 im Mittel über die Standorte bei 82 dt TM/ha. Damit war auch bei dieser Kultur ein Ertragsanstieg im Vergleich zum Vorjahr (62 dt TM/ha [85]) zu verzeichnen. Maximal wurden 102 dt TM/ha am Standort Aholfing geerntet (Abbildung 48).

Das Switchgras erzielte bei der Ernte im Frühjahr 2018 einen mittleren Ertrag von 92 dt TM/ha. Der höchste Biomasseaufwuchs von 109 dt TM/ha wurde am Standort Wolferskofen geerntet, der zweithöchste in Aholfing mit 102 dt TM/ha.

2019 lag der mittlere Ertrag über die Standorte bei 95 dt TM/ha. Die höchsten Erträge wurden in Wolferkofen und Hötzelsdorf gemessen mit knapp über 110 dt TM/ha der niedrigste Ertrag lag bei 7 dt TM/ha in einer Wiederholung in Aholfing.

Auch 2020 lag Wolferkofen ertragsmäßig vorne mit 117 dt TM/ha. In Rosenau und Hötzelsdorf war ein deutlicher Abfall gegenüber 2018 zu erkennen.

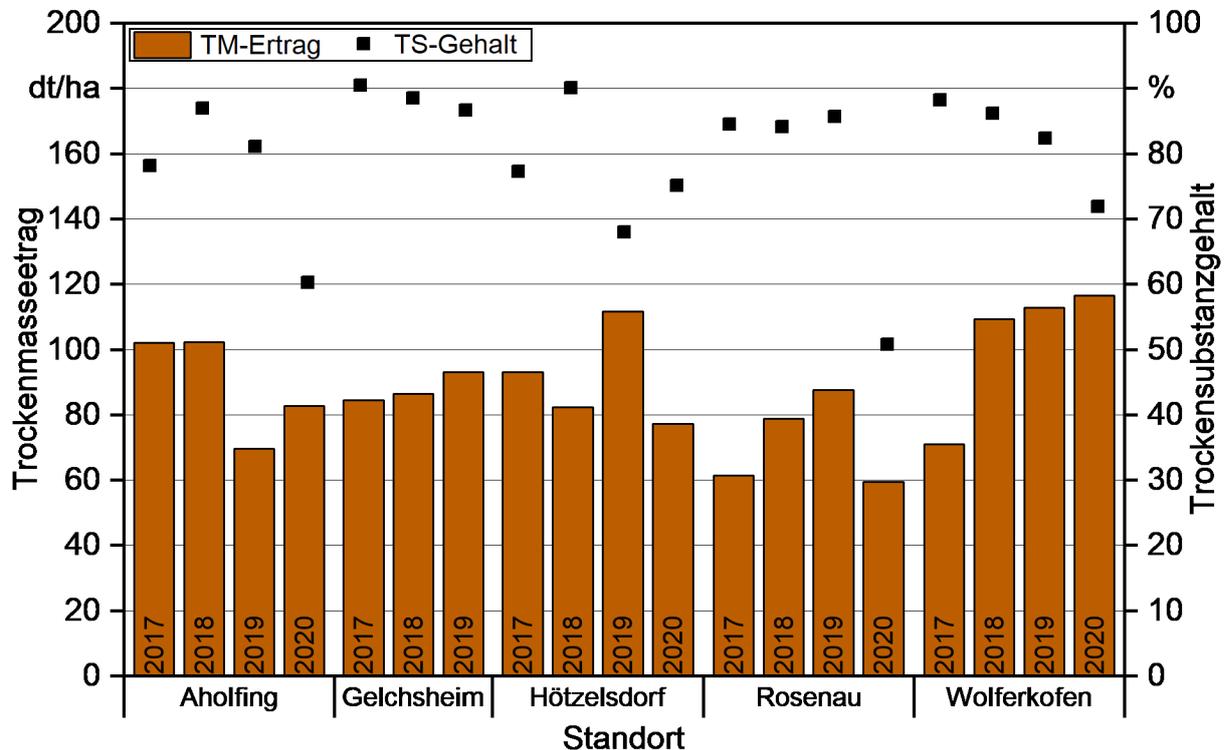


Abbildung 48: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Switchgras in den Jahren 2017 bis 2019 bzw. 2020

Die gemessenen Trockensubstanzgehalte erreichten nur in Gelchsheim immer die erforderlichen 85 %. Hier war auch das Lager am geringsten. Das bei Switchgras häufig auftretende Lager ist sicherlich ein Problem, auch wenn 2018 in stark lagernden Beständen Trockensubstanzgehalte von 85 % oder mehr geerntet wurden.

5.1.2.2 Standort- und Kulturenvergleich

Von den drei Kulturen zur thermischen Nutzung lag Miscanthus ertragsmäßig eindeutig vorne, wie in Abbildung 49 und Tabelle 20 zu sehen ist. Im Versuch erbrachte Miscanthus auf allen Standorten hohe Erträge. Miscanthus braucht etwa drei bis vier Jahre, um das maximale Ertragsniveau zu erreichen [95], was die teilweise noch recht niedrigen Erträge im Jahr 2017 erklärt. Dies war erst die zweite Ernte im Versuch. Auf Langzeitversuchen des TFZ wurden von 1991 bis 2017 auf drei Standorten mittlere Erträge von 170 bis über 250 dt TM/ha erzielt. Auch HIMKEN *et al.* (1997) erzielten auf einem Standort nahe Duisburg nach drei Jahren Etablierung einen Ertrag von 150 bis 180 dt TM/ha [95]. In

Untersuchungen auf unterschiedlichen Standorten in Europa von LEWANDOWSKI *et al.* (2016) wurden auf einem trockenen Mittelmeerstandort in Adana in der Türkei bis zu 150 dt TM/ha erreicht, in der Nähe von Stuttgart auf einem flachgründigen Boden bis zu 180 dt TM/ha. Die höchsten Erträge von bis zu 200 dt TM/ha wurden auf einem guten tonreichen Boden mit guter Wasserversorgung erzielt [114]. Zusammenfassend kann man sagen, dass Miscanthus auf vielen Standorten hohe Erträge erbringt, aber durchaus von besseren Standorten mit guter Wasserversorgung profitiert. Bei der Ernte sollte darauf geachtet werden, dass der Miscanthus ausreichend abgetrocknet ist. Auf die Brennstoffqualität wird in Abschnitt 5.2.5 eingegangen.

Das Switchgras lag ertragsmäßig weit unter Miscanthus. Die Ergebnisse wurden durch Probleme bei der Ernte, bedingt durch starkes Lager, beeinflusst (Abbildung 51). Der Blattabfall über Winter ist bei Switchgras gering, die Auflage- oder Angriffsfläche für Niederschlag und Wind dementsprechend groß. Nach den Erfahrungen der ersten Jahre ist Switchgras zur thermischen Verwertung für Bayern weitgehend ungeeignet. Lediglich trockene und milde Standorte ohne nennenswerten Schneefall, wie z. B. Gelchsheim, können für den Anbau in Betracht gezogen werden. In ADLER *et al.* (2006) werden Erträge von 21 bis 68 dt TM/ha angegeben: Die Autoren geben einen Verlust von 11 % im Vergleich mit einer Ernte im Herbst an, was unter anderem mit der Abnahme von Blattmasse und Rispen während des Winters in Verbindung gebracht wurde, aber auch eine Abnahme von Elementen wie Kalium, Chlor (38–83 %), Magnesium und Phosphor (41–67 %) sowie Kalzium, Schwefel und Stickstoff (5–28 %) wurde festgestellt [2]. Höhere Erträge wurden in Klein-Altendorf nahe Bonn geerntet. Hier wurden bei frühreifen Hochlandsorten 52–77 dt TM/ha erfasst, bei mittelreifen Hochlandsorten 60–140 dt TM/ha [185]. Von IQBAL *et al.* (2014) wurden über einen Zeitraum von elf Jahren im Mittel 102 dt TM/ha geerntet [97]. Das Switchgras kommt damit einfach nicht an die Erträge des Miscanthus heran, weder die vorliegenden Ertragsergebnisse noch die Zahlen aus der Literatur weisen auf hohe Erträge hin. Es hat sich zwar bei der thermischen Nutzung als trockentolerant gezeigt, aber auch auf den trockenen Standorten im Versuch lieferte der Miscanthus höhere Erträge.

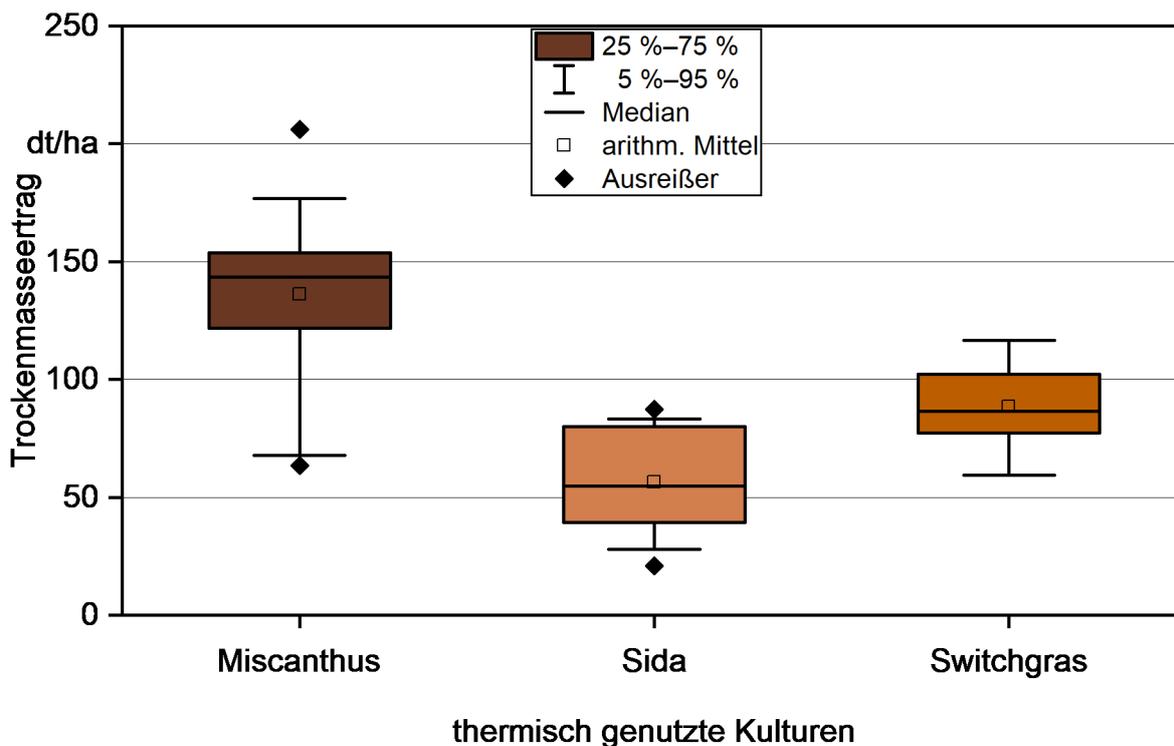


Abbildung 49: Trockenmasseerträge der Kulturen zur thermischen Nutzung für die Versuchsjahre 2017 bis 2020 (Miscanthus n = 22, Sida n = 21, Switchgrass n = 19)

Tabelle 20: Trockenmasseertrag nach Standort, Mittelwert für die Versuchsjahre 2017 bis 2020; abnehmender Ertrag von links nach rechts sortiert; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen

Standort (Ackerzahl/Wasserspeicherfähigkeit)	Trockenmasseertrag in dt TM/ha		
	Miscanthus	Switchgrass	Sida
Aholfing (45/gering)	143 a	89 ab	47 b
Gelchsheim (72–76/gut)	140 a	88 b	80 b
Hötzelsdorf (35–45/gering)	139 a	91 b	34 c
Parsberg (32–59/mittel)	127 a		38 b
Rosenau (58/gut)	133 a	72 b	63 b
Wolferskofen (76/gut)	140 a	107 b	73 c

Die Sida konnte auch als thermisch genutzte Kultur nicht überzeugen. Die Verunkrautung war weniger stark ausgeprägt als bei der Biogasvariante, aber immer noch ein großes Problem. Die Erträge lagen weit unter denen von Miscanthus und auch von Switchgras. Für bayerische Anbaubedingungen hat sich die Sida im Versuch als ungeeignet herausgestellt. BORKOWSKA *et al.* (2013) berichten von deutlich höheren Erträgen auf einem polnischen Standort. Ab der zweiten Ernte lagen die Erträge dabei über 145 dt TM/ha, bis hin zu 197 dt TM/ha [18]. KÖNNING (2019) berichtet von Erträgen von 73 bis 80 dt TM/ha [105]. Diese Werte liegen näher an den ermittelten Ertragsdaten der verschiedenen Standorte. Das Ziel des Projekts ist, geeignete Kulturen für bayerische Standorte zu testen. Auch wenn hohe Erträge der Sida der Literatur nach auf einigen Standorten möglich sind, kann anhand der erhobenen Daten für keinen der getesteten bayerischen Standorte eine Empfehlung für den Anbau der Sida ausgesprochen werden.

5.1.2.3 Pflanzenhöhe und Lageranfälligkeit

Die Pflanzenhöhe der Kulturen sagte im Vergleich miteinander wenig über den Trockenmasseertrag oder die Standfestigkeit aus. Die Sida war fast so hoch wie der Miscanthus (Abbildung 50), ihre Erträge lagen aber deutlich unter denen von Miscanthus (Abbildung 49). Das Switchgras, die niedrigste Kultur, hatte die größten Probleme mit Lager (Abbildung 50, Tabelle 22). Der Miscanthus erreichte Höhen von 1,2 bis 4 m, am höchsten war er in Rosenau, am niedrigsten im Erntejahr 2019 in Aholfing und Parsberg, wo 2019 auch die Erträge niedrig ausfielen. In Rosenau, wo der Miscanthus am höchsten war, hatte er aber nicht die höchsten Erträge (Tabelle 21 und Tabelle 20). Die Sida wurde 1,0 bis 3,9 m hoch. Allerdings wuchs die Kultur sehr licht, die Pflanzenhöhe wurde nicht in Ertrag umgesetzt. In Parsberg, Hötzelndorf und Aholfing, die Standorte mit den niedrigsten Erträgen, war die Sida am kleinsten, auf den Standorten mit etwas höheren Erträgen etwas höher.

Das Switchgras wurde nicht höher als zwei Meter. In Wolferkofen und Hötzelndorf, wo es die höchsten Erträge erzielte, war es am niedrigsten. In Rosenau, dem Standort mit den niedrigsten Erträgen war es am höchsten. IQBAL *et al.* (2015) fanden positive Korrelationen zwischen Höhe und Ertrag sowie Triebdurchmesser und Ertrag für die Kulturen Switchgras und Miscanthus [97]. Bei Untersuchungen verschiedener Switchgrassorten brachten höhere Sorten auch höhere Erträge [185]. Insgesamt ergibt sich der Eindruck, dass die Pflanzenhöhe Hinweise auf einen hohen Ertrag liefern kann, aber weitere kulturspezifische Parameter für eine Ertragsabschätzung berücksichtigt werden müssen.

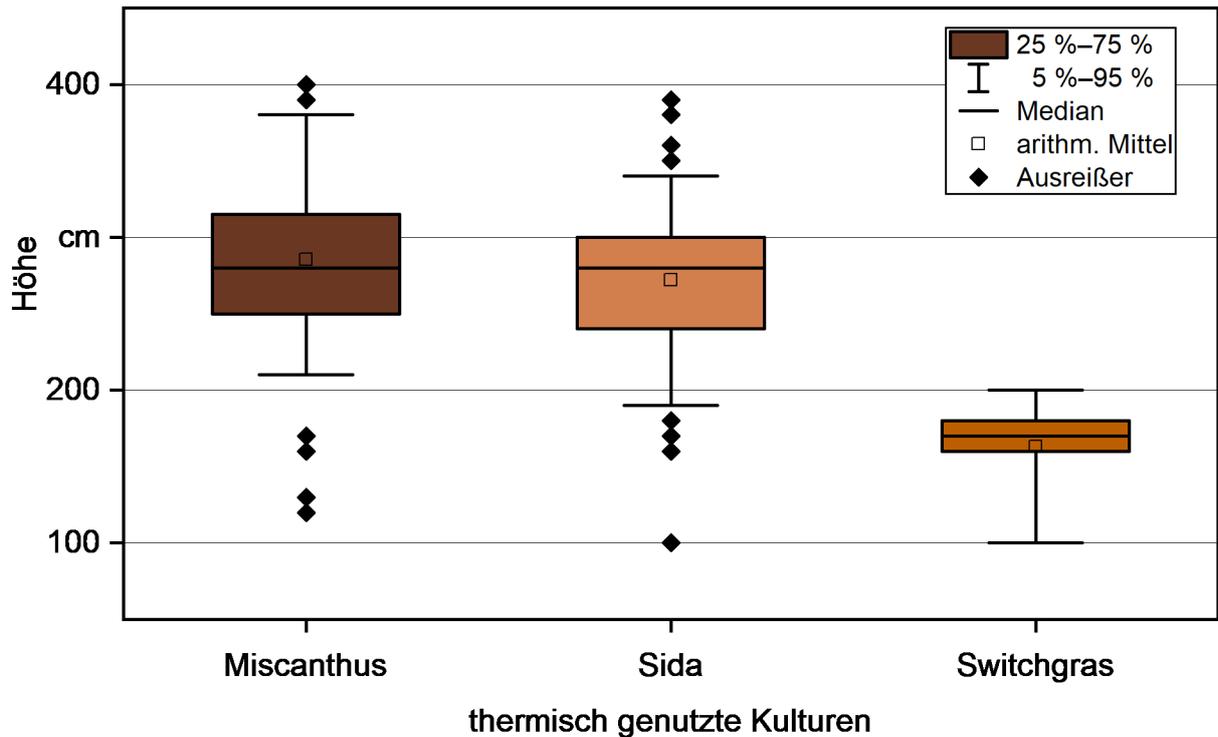


Abbildung 50: Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung, je Variante über die Versuchsjahre 2017 bis 2020

Tabelle 21: Pflanzenhöhe der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung im Mittel je Standort für die Versuchsjahre 2017 bis 2019

Kultur	Aholting	Gelchsheim	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Wolferkofen
	in cm					
Miscanthus	258	268	277	243	366	284
Switchgras	161	177	147	–	174	153
Sida	241	300	233	219	319	286

– = keine Daten

Tabelle 22: Lagerbonitur der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung, Häufigkeit der Notenvergabe, über alle Versuchsstandorte für die Versuchsjahre 2017 bis 2020

Kultur	Miscanthus	Switchgras	Sida
Boniturnote	Notenvergabe in %		
1	90	4	45
2	2	4	21
3	3	4	13
4	1	1	8
5	1	16	2
6	1	8	1
7	0	13	5
8	0	24	4
9	0	25	0

Bonitur von 1 = kein Lager bis 9 = starkes Lager

Die bereits diskutierten Ernteprobleme und -verluste bei stark lagernden Beständen sind insbesondere beim Anbau der Kultur Switchgras zu bedenken, wie Tabelle 22 verdeutlicht. Die Lageranfälligkeit der thermisch genutzten Switchgrasvariante war besonders bei der Ernte problematisch. Auf allen Standorten wurde mittleres oder sogar starkes Lager mit Boniturnoten bis neun verzeichnet (Abbildung 51). Der Blattabfall über Winter ist bei Switchgras gering [2], die Auflage- oder Angriffsfläche für Niederschlag und Wind dementsprechend groß. Im Winter kann es nach starkem Schneefall zu starkem Lager kommen, was die Ernte erschwerte und zu Ernteverlusten führte [2]. Der Switchgrasanbau zur thermischen Verwertung ist für Bayern weitgehend ungeeignet. Lediglich trockene und milde Standorte ohne nennenswerten Schneefall können für den Anbau in Betracht gezogen werden.

In den Miscanthusparzellen wurde nur in wenigen Fällen Lager bonitiert, obwohl diese Kultur in schneereichen oder windexponierten Lagen durchaus anfällig dafür ist. Auch die Sida konnte ohne Probleme weitgehend ohne Lager beerntet werden, lediglich am Standort Gelchsheim wurde geringes Lager notiert. Generell gilt die Sida als nicht anfällig gegenüber Lager [176].



Abbildung 51: Lagernder Switchgrasbestand in Aholting; Foto vom 21.03.2017

5.1.2.4 Etablierung und Standdauer

In der ersten Projektphase wurden die Dauerkulturen 2014 auf sieben Standorten etabliert. Der siebte Standort, Thürnthenning, wurde im Frühjahr 2017 aufgegeben. Auf dem Standort Wolferkofen fand die Etablierung erst 2015 statt.

Das Riesenweizengras hatte schon im zweiten Jahr einen hohen Ertrag, der zum dritten Jahr noch anstieg (Abbildung 52), in den darauffolgenden Jahren wurde kein weiterer Ertragszuwachs festgestellt. Auch CSETE *et al.* geben zwei Jahre an, bis Riesenweizengras den maximalen Biomasseertrag erreicht. Die Nutzungsdauer wird mit zehn [139] bis 15 Jahren angegeben [41]. Das Riesenweizengras neigte in der Wachstumspause im Sommer zur Verunkrautung und Verungrasung was sich ertragsmindernd auswirken kann und damit die Nutzungsdauer begrenzt. Auch die Silphie hatte nach der zweiten Ernte keinen Ertragszuwachs mehr. Laut Literatur kann sie 15 [172] bis 20 Jahre genutzt werden [51] [139]. Auch im Laufe des Projekts blieben die Erträge stabil und die Bestände waren unkrautfrei. Die Erträge der Sida stiegen von der ersten zur zweiten Ernte an. Mit den weiteren Jahren nahm die Verunkrautung zu und ein Ertragszuwachs konnte nicht festgestellt werden. BORKOWSKA *et al.* berichten, dass das Ertragspotenzial der Sida erst ab dem dritten Jahr ausgeschöpft wird [19], und eine Nutzungsdauer von zwölf [108] bis 20 Jahren wird angegeben [20].

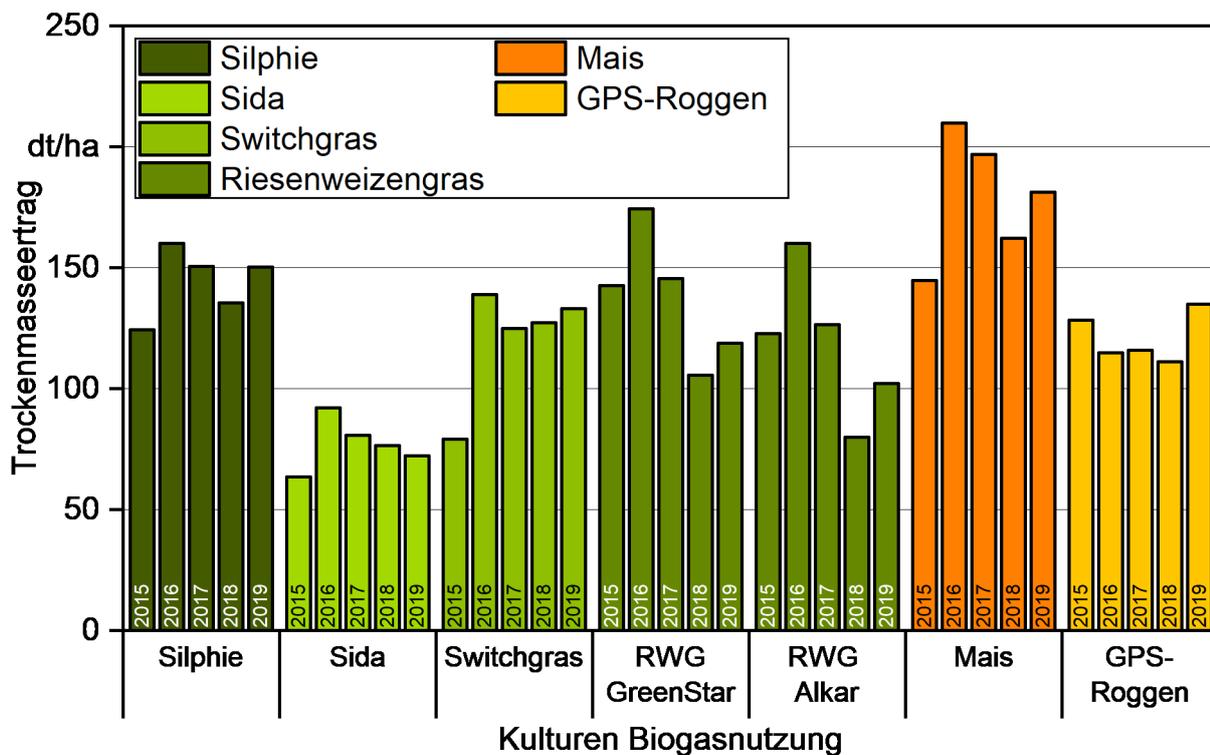


Abbildung 52: Trockenmasseertrag der mehrjährigen Energiepflanzen für die Biogasnutzung im Mittel der Standorte (2015–2019)

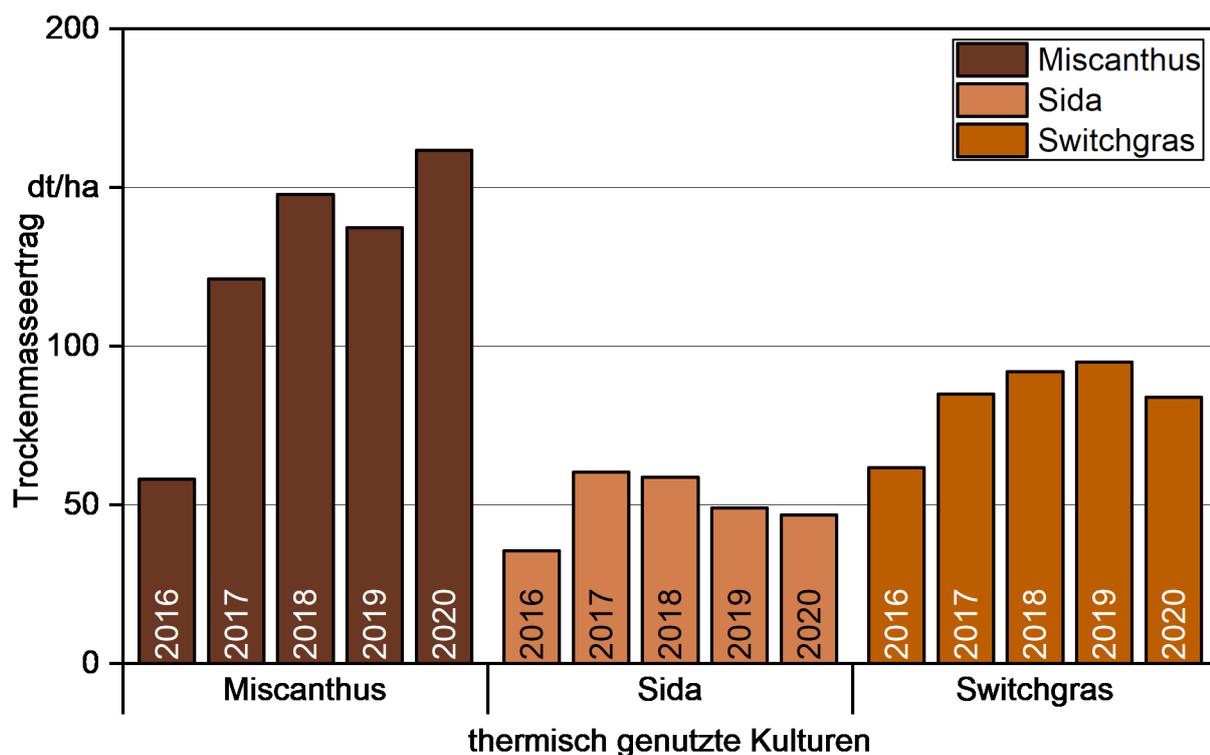


Abbildung 53: Trockenmasseertrag der mehrjährigen Energiepflanzen für die thermische Nutzung im Mittel der Standorte (2016–2020)

Switchgras soll im zweiten Jahr zwei Drittel seines Ertragspotenzials erreichen und den vollen Ertrag im dritten Jahr [129]. Die Ergebnisse aus den beiden Projektphasen zeigten einen deutlichen Ertragsanstieg vom zweiten zum dritten Jahr (Abbildung 52 und Abbildung 53). Danach stiegen die Erträge nur noch leicht an, was auch mit den für Switchgras günstigen warmen Jahren 2018 und 2019 zusammenhängen kann. Die Standdauer wird mit sieben bis neun Jahren angegeben [97]. Für Miscanthus werden drei bis vier [95] und drei bis fünf Jahre [165] angegeben, um den vollen Ertrag zu erreichen. Die niedrigen Erträge im Jahr 2016 (Abbildung 53), dem ersten Erntejahr, bestätigen dies. In Wolferskofen war das Jahr 2017 das erste Erntejahr, auch hier waren die Erträge noch niedrig. Auf den anderen Standorten, auf denen das Jahr 2017 schon das zweite Erntejahr und damit das dritte Standjahr war, fielen die Erträge 2017 höher als im Vorjahr aus. Bis auf Aholfing hatte Miscanthus 2018 nochmals einen Ertragszuwachs (Abbildung 46). Die Erträge im Jahr 2019 waren vom Trockenjahr 2018 beeinflusst. Insgesamt bestätigen die vorliegenden Daten die oben genannte Etablierungsdauer von mindestens drei Jahren. Die Nutzungsdauer wird mit 15 [95] [97] bis 25 Jahren angegeben [139]. In Langzeitversuchen des TFZ auf drei Standorten ist nach 24 Jahren kein Ertragsrückgang beim Miscanthus festzustellen [83].

5.1.3 Etablierung von Sida als Untersaat

Anlage A

Der Feldversuch zur Etablierung der Sida in Untersaat wurde am Standort Straubing erstmalig im Frühjahr 2017 angelegt (Abbildung 31). Lediglich die Saat des Ackergrases fand im Herbst 2016 statt, um im Frühjahr in einen ausreichend unkrautunterdrückenden Bestand säen zu können.



Abbildung 54: Etablierung von Sida als Untersaat: verunkrautete Kontrolle (links oben); Winterweizen als Deckfrucht (rechts oben); Buchweizen als Deckfrucht (links unten); abgetötetes Ackergras als Deckfrucht (rechts unten) (Foto: 30.06.2017)

Der Feldaufgang der Sida war, trotz günstiger Bedingungen nach der Saat (Niederschläge), schlecht. Bei einer Zählung am 11.07.2017 wurden im Mittel der vier Wiederholungen nur 3,8 (Kontrolle) bzw. 3,3 (Buchweizen) und 2,6 (Winterweizen) Pflanzen pro m² gefunden. Im Ackergras war sogar nur eine bis keine Pflanze zu finden. Offenbar war die Saatgutablage im Ackergras ohne Bodenbearbeitung für das feinkörnige Sidasaatgut nicht geeignet oder die Konkurrenz um Wasser durch den bereits etablierten Grasbestand war zu groß. Für die anderen Varianten ist eine Erhöhung der Saatstärke anzudenken. Aufgrund der geringen Pflanzenanzahl wurde der Versuch am 28.08.2017 umgebrochen und nicht wie ursprünglich vorgesehen bis zur Ernte der Sida im darauffolgenden Jahr weitergeführt.

Die Entwicklung der drei Deckfrüchte war gut und zunächst auch die Unkrautunterdrückung wirkungsvoll, wie ein Vergleich mit der Kontrolle in Abbildung 54 zeigt. Mit wachsendem Unkrautdruck im Sommer stieg jedoch die Verunkrautung. Insbesondere nach der Ernte der Deckfrucht Buchweizen am 20.07.2017, aber auch in der Winterweizenvariante nahm der Unkrautbesatz stark zu (Abbildung 55). Für den Buchweizen wäre eventuell ein späterer Erntetermin günstiger. Auch die Saat in alternierenden Reihen sollte überdacht

werden, da insbesondere bei dem kaum in die Höhe wachsenden Winterweizen viel Boden unbedeckt blieb.



Abbildung 55: Etablierung von Sida als Untersaat: Kontrolle (links oben); Winterweizen als Deckfrucht (rechts oben); abgeernteter Buchweizen als Deckfrucht (links unten); Ackergras als Deckfrucht (rechts unten) (Foto: 18.08.2017)

Insgesamt konnte aus den Erfahrungen des ersten Versuchsjahrs kein funktionierendes Etablierungssystem abgeleitet werden. Tendenziell erschien aber die Saat unter Buchweizen am vielversprechendsten, da hier noch Biomasse für eine Ernte anfällt. In 2017 wurden im Mittel 27 dt TM/ha geerntet.

Anlage B

Die Variante der Etablierung als Untersaat in Ackergras in Anlage A erwies sich als nicht praktikabel und die Sida hatte allgemein einen schlechten Feldaufgang. Deshalb wurde Anlage A aufgegeben. Für die Aussaat in 2018 (Anlage B) wurde die Aussaatstärke deutlich erhöht. Zusätzlich zur Untersaat wurde eine Etablierung als Herbstsaat (Saat: 20.10.2017) geprüft. Diese sollte eine natürliche Stratifikation des Saatguts durch das Verbleiben der Samen über Winter im Boden ermöglichen. Die Keimung soll dabei erst im Frühjahr stattfinden. Bei einer Aprilaussaat soll die höhere Feuchtigkeit im Boden den Feldaufgang verbessern sowie die Konkurrenzkraft der Sida gegenüber Unkraut erhöhen. Der Feldaufgang der Sida war im Jahr 2018 trotz erhöhter Saatstärke in fast allen

Varianten schlecht. Die Frühjahrs- und Sommertrockenheit bereitete ebenfalls Probleme (Tabelle 23).

Tabelle 23: Anzahl an Sidapflanzen und Trockenmasseerträge pro Variante (Zählung: 11.06.2018, Ernte: 05.10.2018)

Variante	Normalsaat	Frühsaat	Deckfrucht Buchweizen	Deckfrucht Winterweizen	Herbtsaat
Gekeimte Pflanzen/m ²	2	11	1	1	5
Ertrag in dt/ha TM	27	41	49 (Buchweizen)	–	56

Die Sida benötigt zum Keimen sehr feuchte Bedingungen, die besonders 2018 nicht gegeben waren. In der Normalsaatvariante (Saat: 02.05.2018) wurden nur zwei Pflanzen pro m² gezählt (Zählung 11.06.2018, Abbildung 56). Die Deckfrüchte Buchweizen und Winterweizen verschärften durch die Konkurrenz um Wasser die Problematik der Trockenheit noch zusätzlich (Abbildung 58). Es wurde jeweils nur eine Pflanze pro m² ermittelt. Außerdem schließt der schnell wachsende Buchweizen den Bestand sehr rasch (Abbildung 57). Die sehr langsam keimende und wachsende Sida wurde durch den bald dichten Bestand des Buchweizens zu sehr unterdrückt. Bei einer Saat am 09.04.2018 keimten elf Pflanzen pro m² – das beste Ergebnis (Abbildung 59). Hierbei konnte die Sida noch von ausreichend feuchten Bedingungen im Frühjahr profitieren. Für die Herbtsaatvariante ist der Grund für den mäßigen Feldaufgang unter anderem in den schlechten Saatbedingungen bzw. im sehr rauen Saatbett zu suchen. Der Erfolg der Etablierung als Herbtsaat kann deshalb nur eingeschränkt beurteilt werden. Es keimten aber immerhin noch fünf Pflanzen pro m². Bei gleichmäßiger Verteilung könnte daraus schon ein guter Bestand wachsen (Abbildung 59).



Abbildung 56: Kein Feldaufgang in der Normalsaatvariante bedingt durch das trockene Frühjahr (Aussaat Sida in Reinsaat am 02.05.2018, Foto: 23.05.2018)

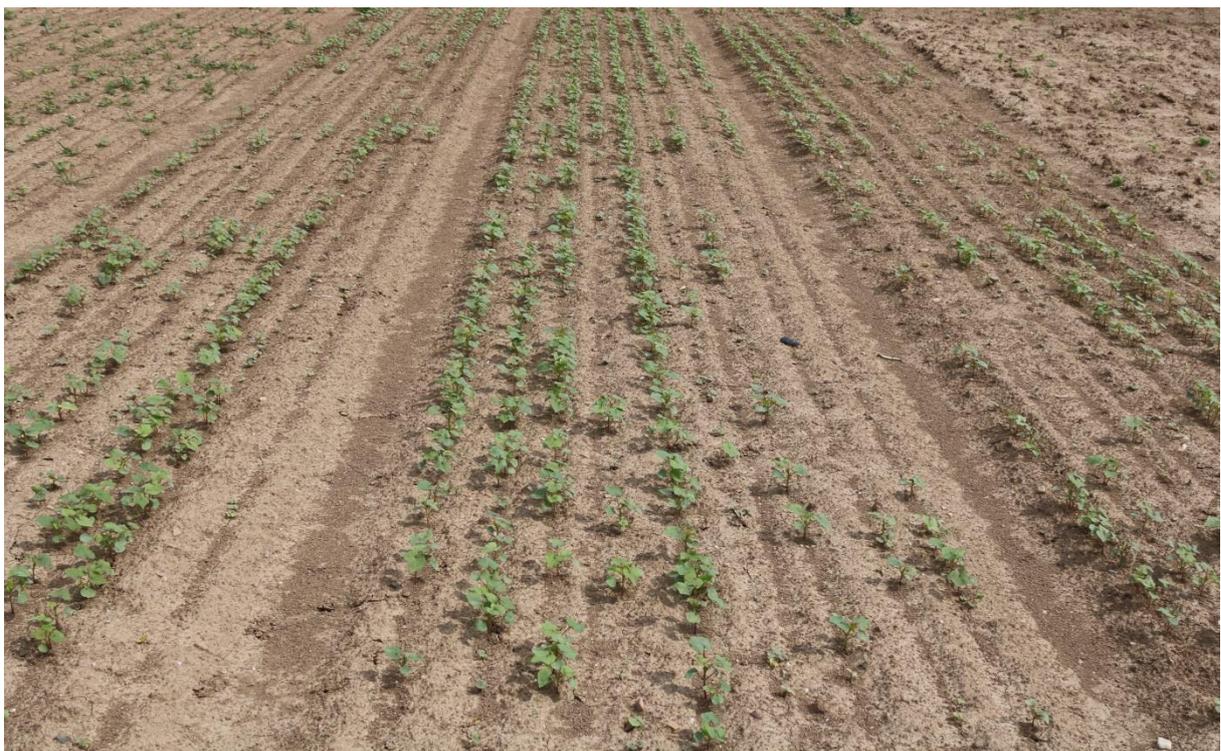


Abbildung 57: Schnell wachsende Deckfrucht Buchweizen (Aussaat Sida und Buchweizen am 02.05.2018, Foto: 23.05.2018)



Abbildung 58: Deckfrucht Winterweizen (Aussaat Sida und Winterweizen am 02.05.2018, Foto: 23.05.2018)

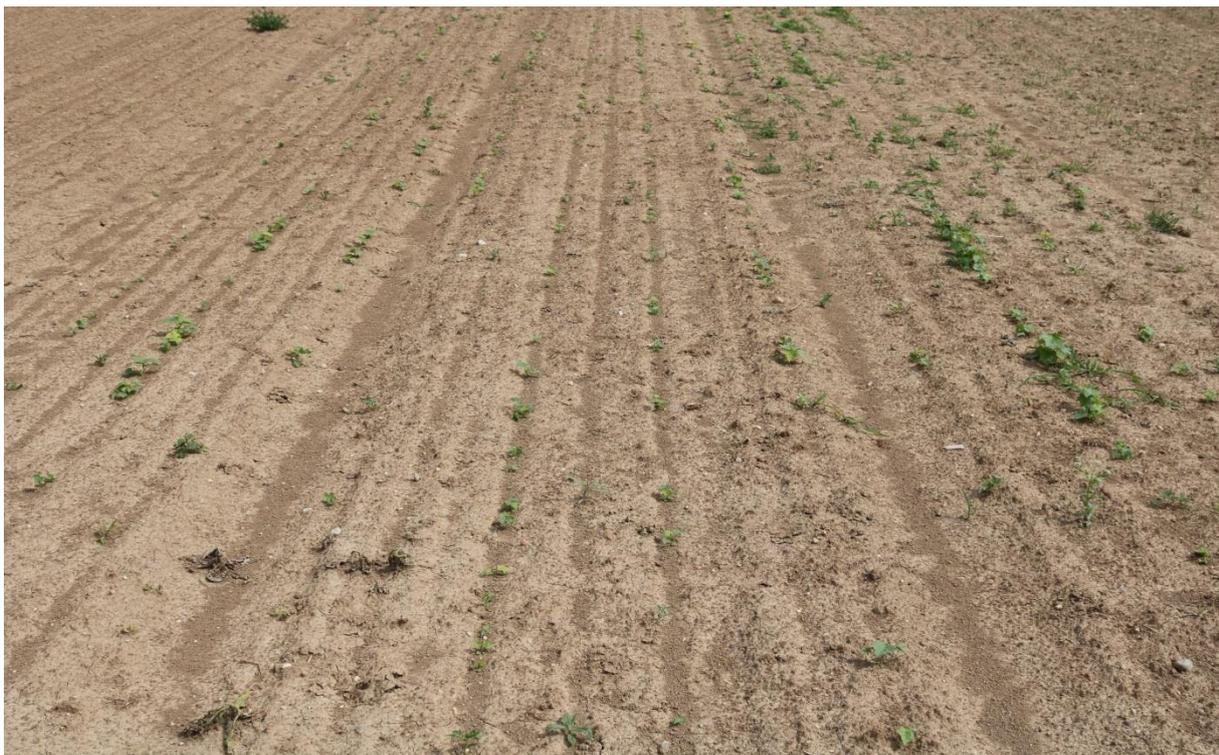


Abbildung 59: Guter Feldaufgang der Sida bei früher Saat (Aussaat Sida am 09.04.2018, Foto: 23.05.2018)



Abbildung 60: Akzeptabler Feldaufgang der Herbstsaat trotz schlechter Saatbedingungen (Aussaat Sida am 20.10.2017, Foto: 23.05.2018)

Die Trockenmasseerträge waren für die Herbstsaat und die Fröhsaat am besten mit 56 und 41 dt TM/ha. Beide Varianten waren damit besser zu bewerten als die Normsaat. Der Ertrag in der Variante Deckfrucht Buchweizen setzte sich fast ausschließlich aus dem geernteten Buchweizen zusammen, der Sidaanteil war gering. In der Variante Deckfrucht Winterweizen ergab sich kein erntefähiger Bestand (siehe auch Tabelle 23).

Im Versuchsjahr 2018 hat sich insbesondere eine Etablierung mit frühem Saattermin, schon Anfang April, als vorteilhaft herausgestellt. Die Samen befinden sich dann frühzeitig im Boden und können die Fröhsjahrsfeuchtigkeit für den Quellungs- und Keimungsprozess nutzen. Die Keimung setzt ein, sobald die Temperaturen den Ansprüchen der Kultur genügen. Mit Spätfrost gab es 2018 keine Probleme. Auch die Herbstsaat erzielte angesichts der schlechten Saatbedingungen (Saatbett) erstaunlich gute Ergebnisse. Das Überdauern der Samen im Boden bis zum Fröhsjahr schadete offensichtlich nicht. Ob sich durch die wechselnden kühlen Temperaturen über Winter eine natürliche Stratifikation ergab, kann aufgrund der suboptimalen Bedingungen zur Saat nicht sicher beurteilt werden. Die fehlende Bodenbearbeitung im Fröhsjahr wirkte sich aber sicherlich feuchtigkeitskonservierend und damit positiv auf den Feldaufgang aus. Die beiden zuletzt genannten Varianten wurden erneut im Herbst 2018 und Fröhsjahr 2019 geprüft.

Neben dem schlechten Feldaufgang ist die schlechte Widerstandsfähigkeit gegenüber Unkraut ein großes Problem bei der Etablierung der Sida. Die Versuchsvarianten als Untersaat unter Buchweizen oder Winterweizen sollten diesem Problem Rechnung tragen. Als Ergebnis zeigte sich die durchaus gute unkrautunterdrückende Wirkung des Buchweizens.

Für das Wachstum der Sida lässt er allerdings ebenfalls keinen Raum, Licht oder Wasser. Eine unterdrückende Wirkung des Winterweizens war nicht gegeben. Große Teile waren kurz nach der Saat von Vögeln ausgepickt worden. Zudem war das Wachstum der übriggebliebenen Pflanzen nicht dicht genug, um aufkommende Unkräuter unterdrücken zu können. Weiterhin ergaben sich Probleme durch eine intensive Verunkrautung mit Hühnerhirse. In der Sida könnte dieses Ungras chemisch bekämpft werden, im Winterweizen jedoch nicht. Die beiden Untersaatvarianten sind damit insgesamt für eine Etablierung der Sida nicht zu empfehlen. Besser ist es, die Saat mit geeigneter Reihenweite vorzunehmen, um eine mechanische Unkrautbekämpfung durchführen zu können. Eine etwas geringere Verunkrautung zeigte sich in der Herbstsaatvariante. Hierbei wurde der Boden im Frühjahr nicht mehr durch Bodenbearbeitung bewegt und somit keine Unkrautsamen zum Keimen angeregt. Auch hatten die Pflanzen einen gewissen Wachstumsvorsprung gegenüber den übrigen Varianten. Auf eine Unkrautbekämpfung kann allerdings auch in dieser Variante nicht verzichtet werden.

Im Jahr 2019 sollten die Varianten Herbstsaat und Frühsaat nochmals untersucht werden. Die Variante 2, die Herbstsaat, verschlammte über Winter, was in Verbindung mit dem trockenen Frühjahr zu einer dicken Kruste (Abbildung 61) führte, die auch durch Walzen nicht aufgebrochen werden konnte (Abbildung 62). In dieser Variante liefen kaum Pflanzen auf. Aufgrund der Frühjahrstrockenheit war der Feldaufgang in der Variante 3, der Frühsaat, ebenfalls gering. Wie in Abbildung 63 zu sehen war der Feldaufgang nicht nur schlecht, sondern auch extrem unregelmäßig. Nur an vereinzelten Stellen ließen sich Sidapflanzen finden. Daher wurde Anlage B im Mai 2019 aufgegeben.

Die Keimrate des Sidasaatguts schwankt zum Teil noch erheblich [105]. In Versuchen von FRANZARING *et al.* (2014) ließen sich große Unterschiede zwischen verschiedenen Herkünften feststellen, von 2 % über 46 % bis hoch zu 62 %. Auch liefen die Samen sehr ungleichmäßig auf [73]. Dies liegt sicher zum Teil an der hohen Dormanz der Samen. In einem Experiment von KURUCZ und FÁRI (2013) zeigten die unbehandelten Samen eine Keimfähigkeit von 4,67 % bis 10 %, die durch Abtrennung der schwimmenden Samen und eine Behandlung der gesunkenen Samen mit 80 °C heißem Wasser auf 79,33 % gesteigert werden konnte [109].

Dies sind sicher Gründe, warum sich die Sida nicht gegen den Buchweizen durchsetzen konnte. Kombiniert mit den teilweise schlechten Bedingungen aufgrund von grobem Saatbett, Trockenheit und Verschlammungen ist es nicht verwunderlich, dass der Feldaufgang in einigen Varianten derart niedrig war. Insgesamt hat sich die Sida im Projekt als schwierig zu etablieren gezeigt, auch wenn die Herbstsaat und die Aussaat im zeitigen Frühjahr nach den Ergebnissen aus 2018 eine funktionierende Alternative sein könnten. Da die Ergebnisse in 2019 nicht bestätigt werden konnten, ist für eine allgemeine Aussage weitere Forschung nötig.



Abbildung 61: Verschlämmung der Herbstsaat (Aussaat Sida am 15.11.2018, Foto: 29.03.2019)



Abbildung 62: Gewalzte verschlammte Herbstsaat (Aussaat Sida am 15.11.2018, Foto: 16.04.2019)



Abbildung 63: Schlechter und unregelmäßiger Aufgang der Saat im zeitigen Frühjahr (Aussaat Sida am 28.03.2019, Foto: 13.05.2019)

5.1.4 Etablierung von Silphie als Untersaat unter der Deckfrucht Silomais

Als Ersatz für die Variante „Waldstaudenroggen“ wurde 2017 eine Silphie-Variante mit Einzelkornsaatechnik als Untersaat unter Mais gesät. Der Vorteil der Etablierung der Silphie in Untersaat ist die zusätzliche Maisernte im Etablierungsjahr. Da die Silphie im Ansaatjahr nur eine bodennahe Blattrosette bildet, ist normalerweise eine Ernte nicht möglich.

Die angestrebten vier Silphiepflanzen/m² wurden mit Ausnahme des Standorts Hötzelsdorf im Durchschnitt erreicht. Insgesamt war die Etablierung als Untersaat erfolgreich. Eine Zählung im Herbst 2017 ergab in Aholting 6,8, in Wolferkofen 4,7, in Hötzelsdorf 3,0 und in Rosenau 4,8 Pflanzen/m². Die Verteilung der Pflanzen erwies sich als nicht ganz zufriedenstellend. Teilweise wuchsen mehrere Pflanzen dicht gedrängt, an anderer Stelle gab es hingegen Fehlstellen in der Saatreihe (Abbildung 64). Daraus – und aufgrund des großen Reihenabstands von 75 cm – ergaben sich z. T. relativ große Lücken. Abbildung 66 zeigt einen ebenfalls mit Einzelkorntechnik gesäten Silphiebestand im Raum Straubing. Der Bestand wurde in Reinsaat gesät, allerdings mit einem Reihenabstand von 50 cm anstelle der 75 cm in der Untersaatvariante. Hier wurde besonders der Entwicklungsvorsprung im Vergleich zu Abbildung 65 deutlich.

2018 erfolgte die erste Ernte der Silphiepflanzen. Eine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums der Untersaat-Variante, bedingt durch die schlechtere Entwicklung im Vorjahr,

wurde 2018 deutlich (vgl. Abbildung 68 und Abbildung 69). Die Pflanzen wuchsen im Frühjahr viel langsamer als ein in Reinsaat gesäter Bestand am Standort Straubing (nicht Bestandteil des Projekts). Als problematisch erwies sich auch der weite Reihenabstand von 75 cm. Bedingt durch die weiten Reihen erfolgte der Reihenschluss sehr spät und es verblieben viel Raum und Licht für die Entwicklung von Unkräutern (Abbildung 70). Der dichte Unkrautbestand entzog den Silphiepflanzen im ohnehin sehr schwierigen und trockenen Frühjahr/Sommer viele Nährstoffe und vor allem Wasser, was sich deutlich in der Entwicklung und auch im Ertragsergebnis niederschlug. Mit einer mechanischen Unkrautbehandlung (Maschinenhacke) wurde Ende Mai 2018 in Aholting, Hötzelsdorf und Rosenau ein Teil des Unkrautbesatzes beseitigt. Unkräuter innerhalb der Reihen konnten damit aber nicht erfasst werden und stellten weiterhin eine Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe dar. 2019 wurden die Parzellen gefräst, was ähnlich wie bei der Hacke die Unkräuter zwischen den Reihen erfolgreich bekämpft, die Unkräuter in der Reihe aber nicht erfasst hat. Während in der Reinsaatvariante der Bodenschluss so früh erfolgte, dass Unkräuter unterdrückt wurden, konnten sich die aus 2018 geschwächten Silphiepflanzen aus der Untersaat nicht von alleine durchsetzen (Abbildung 71). Hier wäre vermutlich ein Einsatz von Herbiziden sinnvoll gewesen. Die Verträglichkeit verschiedener Herbizide wurde in der ersten Projektphase untersucht [85]. Vor deren Einsatz muss die Zulassung überprüft werden.



Abbildung 64: Lückige Saatreihe der Silphieuntersaat in Wolferkofen (links), Doppelbelegung bei Einzelkornsaat in Aholting (rechts) (Foto: September 2017)



Abbildung 65: Silphieuntersaat unter Silomais am Standort Wolferkofen (Saat: 18.05.2017) (Foto: 12.10.2017)



Abbildung 66: Silphie etabliert in Reinsaat am Standort Straubing (Saat: 23.05.2017) (Foto: 18.10.2017)

Wie in Abbildung 67 zu sehen ist der Maisertrag im Untersaatverfahren etwas geringer als normalerweise (vgl. Abbildung 39). Der Ertrag des Silomais betrug 2017 in Aholting 173, in Wolferkofen 138, in Hötzelsdorf 156 und in Rosenau 160 dt TM/ha. Damit wurden noch 68 % bis 93 % des Ertrags des Maises in der Referenzvariante geerntet. Der Minderertrag des Silomais im Vergleich zur Referenzvariante war begründet in der geringeren Aussaatstärke und der unterschiedlichen Sorte. Auch auf Haus Düsse wurden bei verringerter Aussaatstärke noch drei Viertel des Ertrags des Maisanbaus in vergleichbarem Reinanbau geerntet, in Niederbayern sogar 80 % des üblichen Maisertrags [51].

Die Silphieerträge lagen 2018 zwischen 23 dt TM/ha in Aholting, 51 dt TM/ha in Hötzelsdorf, 77 dt TM/ha in Rosenau und 75 dt TM/ha in Wolferkofen. 2019 gab es einen Anstieg bei den Erträgen mit 69 dt TM/ha in Aholting, 62 dt TM/ha in Hötzelsdorf, 114 dt TM/ha in Rosenau und 132 dt TM/ha in Wolferkofen. Damit lagen die Erträge der in Untersaat gesäten Silphie auf allen Standorten für beide Jahre unter denen der Reinsaat. Der Vergleich ist nur eingeschränkt aussagekräftig, da die Vergleichsvariante schon in 2014 bzw. 2015 etabliert wurde und der Reihenabstand bei 50 cm liegt. Auch im Vergleich mit den Erträgen der ersten Versuchsphase lagen die Erträge der Silphie in Untersaat deutlich unter denen der Reinsaat, hier waren die Witterungsbedingungen aber natürlich anders. Die Reinsaat von 2017 auf dem Straubinger Standort erbrachte in beiden Jahren Erträge über 190 dt TM/ha. Der Standort hat sehr ähnliche Standortbedingungen wie Wolferkofen, im Vergleich dazu lagen die Erträge der Silphie-Untersaatvariante deutlich niedriger.

Beim Untersaatverfahren konkurrieren Mais und Silphie um Wasser [81]. Unter 600 mm Niederschlag im Jahr kann dies zu Wuchsdefiziten führen, die möglicherweise in den Folgejahren nicht kompensiert werden. Sie führen dann zu geringeren Erträgen als in etablierten Reinbeständen [51]. Am Standort Dornburg erzielte die Silphie in Untersaat infolge eines extrem trockenen Etablierungsjahrs 2015 mit nur 470 mm Jahresniederschlag im zweiten Jahr einen um gut ein Drittel niedrigeren Ertrag als die Reinsaat im zweiten Jahr [51]. Im Etablierungsjahr 2017 waren die Witterungsbedingungen günstig für eine Etablierung, das größte Problem waren die Unkräuter, die durch den weiten Reihenabstand Licht zum Wachsen fanden. Theoretisch soll der Anbau unter Mais einer Spätverunkrautung entgegenwirken [51]. Vielleicht wäre das Unkrautproblem mit einer Reihenweite von 50 cm geringfügiger gewesen. Ob dies in Untersaat mit Mais technisch möglich ist, müsste untersucht werden. In der Praxis wird berichtet, dass das Unkrautproblem mit den Jahren zurückgeht und sich die Erträge mit der Zeit an die Reinsaat angleichen. Brodmann (Donau-Silphie, Metzler & Brodmann Saaten GmbH) gibt hier spätestens vier Jahre an (private Korrespondenz). Auch Stolzenburg konnte in Etablierungsversuchen in den Jahren 2016 bis 2018 zeigen, dass Silphie nach Reinsaat in den beiden Folgejahren höhere Erträge lieferte als nach Etablierung als Untersaat. Der Maisertrag aus dem Etablierungsjahr konnte dabei den Ertragsverlust im Vergleich zur Reinsaat aufwiegen (Stolzenburg 2020, mündliche Mitteilung zu unveröffentlichten Daten 2020).

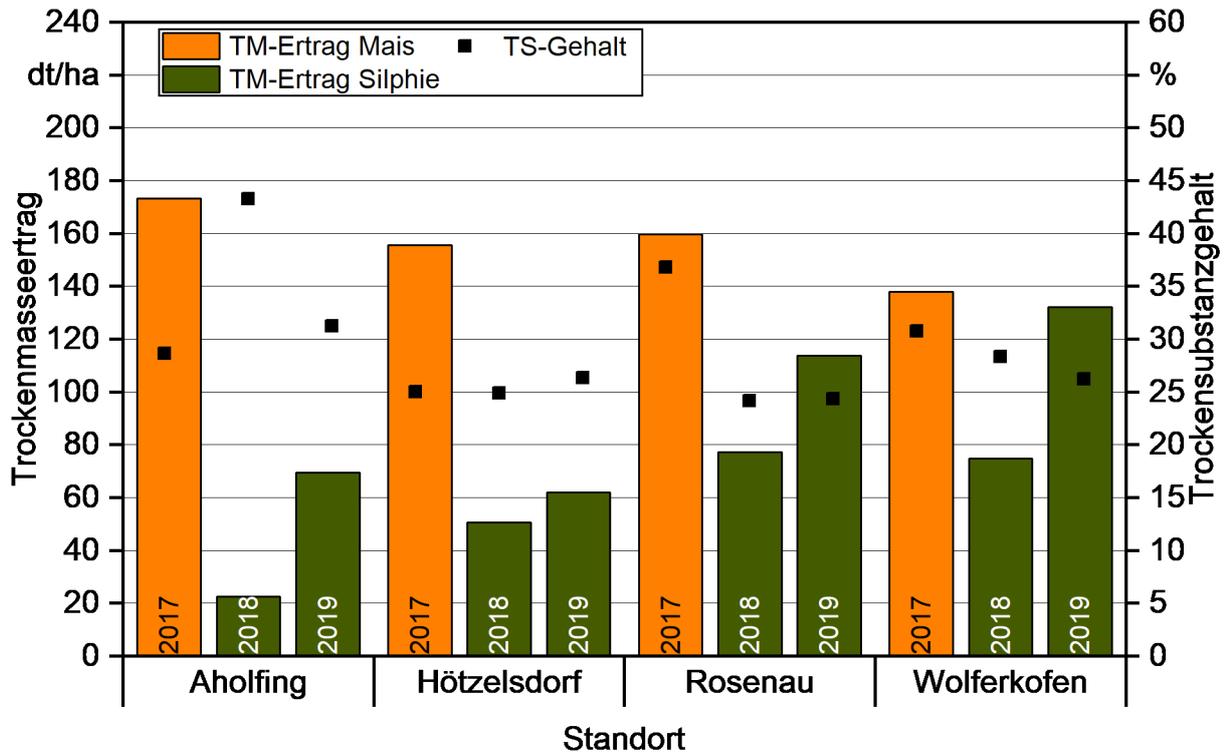


Abbildung 67: Trockenmasseerträge und Trockensubstanzgehalte von Mais und Silphie im Untersaatversuch



Abbildung 68: Silphie, etabliert in Untersaat unter Silomais am Standort Wolferkofen (Saat: 18.05.2017) (Foto: 19.07.2018)



Abbildung 69: Silphie etabliert in Reinsaat am Standort Straubing (Saat: 23.05.2017), nicht Bestandteil des Projekts (Foto: 19.07.2018)



Abbildung 70: Verunkrauteter Silphie-Bestand etabliert in Untersaat unter Silomais am Standort Aholfing (Saat: 22.05.2017) (Foto: 18.07.2018)



Abbildung 71: Verunkrauteter Silphie-Bestand etabliert in Untersaat unter Silomais am Standort Aholting (Saat: 22.05.2017) (Foto: 19.07.2019)

5.2 Substratqualität (TFZ)

5.2.1 Entwicklung der Methanausbeute im Erntezeitraum

Neben dem in Abschnitt 5.1.1.4 diskutierten Trockensubstanzgehalt und BBCH-Stadium spielen auch die Veränderungen der Inhaltsstoffe und damit verbunden auch Änderungen in der Methanausbeute eine wichtige Rolle zur Bestimmung des geeigneten Erntezeitpunkts. Abbildung 72 und Abbildung 73 zeigen die im Batchversuch (Laborfermenter) bestimmten Methanausbeuten der Erntegüter von Riesenweizengras, Sida, Silphie, Switchgras und den Referenzkulturen aus den Jahren 2017 und 2018.

Die höchsten Methanausbeuten wurden in den Proben des Riesenweizengrases festgestellt. Diese lagen in den beiden Versuchsjahren bei 351 l_N/kg oTS und 361 l_N/kg oTS. Die Methanausbeuten des Riesenweizengrases lagen damit in etwa auf dem gleichen Niveau wie die der Referenzkulturen. Außerdem war zu beobachten, dass die Methanausbeuten mit späterem Erntedatum tendenziell abnahmen. Eine Ernte Anfang/Mitte Juni scheint daher angemessen, um die höchsten Ausbeuten zu erzielen. Diese Schlussfolgerung deckt sich mit den Ergebnissen zu Trockensubstanzgehalt und BBCH-Stadium. In Versuchen von MAST *et al.* (2014) wurden Ende Juni noch Methanausbeuten von 376 l_N/kg oTS gemessen, die mit zunehmend späterer Ernte bis Mitte Juli auf 311 l_N/kg oTS abfielen [126]. Auch andere Autoren berichten von hohen Methanausbeuten bei Riesenweizengras: GEIßENDÖRFER (2012) gibt als Mittelwert aus zwei Schnitten 324,4 l_N/kg oTS an [78], THIELEN

et al. (2017) haben auf zwei verschiedenen Standorten jeweils 310 und 340 l_N/kg oTS gemessen [180] und BIERTÜMPFEL (2015) berichtet für den ersten Schnitt Methanausbeuten von 331 bis 348 l_N/kg oTS und für den zweiten Schnitt Ausbeuten von 254 bis 301 l_N/kg oTS [13].

Ähnlich wie auch im Riesenweizengras lagen die höchsten Methanausbeuten im Switchgras in beiden Versuchsjahren zu den frühen Erntezeitpunkten vor. Zur frühesten Ernte wurden in den beiden Jahren mit je 323 l_N/kg oTS und 353 l_N/kg oTS die höchsten Ausbeuten festgestellt. Mit zunehmender Reife bis circa Mitte Juli nahmen die Ausbeuten um etwa 10 bis 20 % ab. Demnach wäre für das Switchgras eine frühe Ernte Ende Juni angeraten. Eine frühzeitige Ernte deckt sich allerdings nicht mit den Ergebnissen zum Trockensubstanzgehalt in 2017. Der Ziel-Trockensubstanzgehalt wurde erst Mitte Juli erreicht. 2018 lag hingegen bereits Ende Juni ein Trockensubstanzgehalt von 31 % vor, der bis Mitte Juli auf über 36 % anstieg. Entsprechend muss scheinbar ein Kompromiss zwischen Methanausbeute und Trockensubstanzgehalt gefunden werden. Außerdem deuteten sich leichte Anstiege in den Methanausbeuten zum Ende der Ernteschnitte an. Diese stimmten mit tendenziellen Zunahmen der Inhaltsstoffe Hemicellulose und Zucker überein, die in Abschnitt 5.2.3 weiter besprochen werden. MASSÉ *et al.* (2010) untersuchten die Methanausbeute von Switchgrassilage und erhielten in zwei Jahren 266 und 309 l_N/kg oTM für den ersten Schnitt und 269 und 276 l_N/kg oTM für den zweiten Schnitt [125] Werte, die etwas unter den eigenen Ergebnissen liegen. Es ist aber auch zu beachten, dass die eigenen Untersuchungen an getrocknetem Material erfolgten, ein direkter Vergleich ist also nicht uneingeschränkt zulässig.

Eine Vergärung der Kultur Sida ist weniger effektiv als die der geprüften Gräservarianten. Die Methanausbeuten im Versuch von 2017 lagen bei 246 l_N/kg oTS bis 313 l_N/kg oTS. Die höchsten gemessenen Ausbeuten 2018 lagen bei etwa 290 l_N/kg oTS. THIELEN *et al.* (2017) haben mit 289 und 295 l_N/kg oTM an zwei Standorten sehr ähnliche Methanausbeuten ermittelt [180]. Wie auch in den Gräservarianten erkennbar zeichneten sich mit fortschreitenden Reifen Abnahmen in den Methanausbeuten in beiden Versuchsjahren ab. Eine Abnahme um circa 10 % war Mitte August 2018 sehr deutlich sichtbar. Zudem betrug der Trockensubstanzgehalt zur höchsten Methanausbeute um Mitte Juli 2018 etwa 35 %, sodass sich dieser Zeitraum als optimaler Erntetermin darstellte. Eine frühzeitige Ernte, wie auch zuvor in Bezug auf den Trockensubstanzgehalt diskutiert, erscheint daher vorteilhaft.

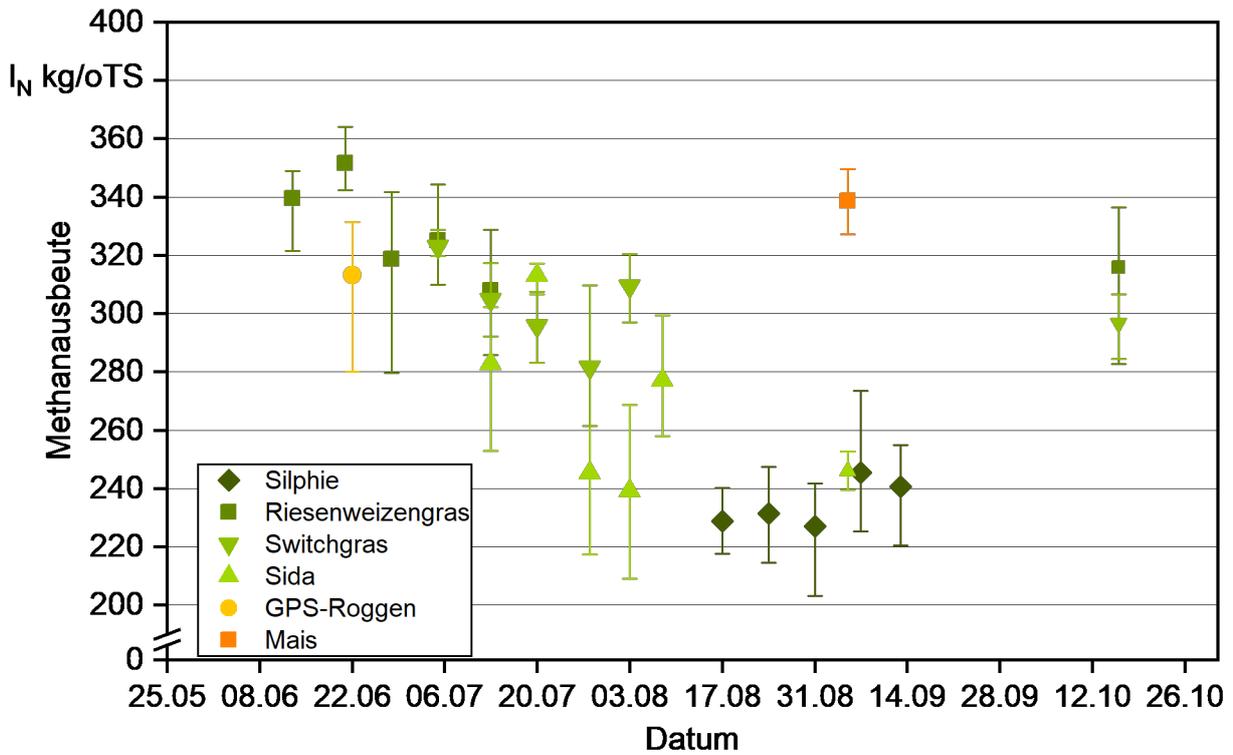


Abbildung 72: Entwicklung der Methanausbeute der Biogaskulturen im Erntezeitraum des Versuchsjahrs 2017

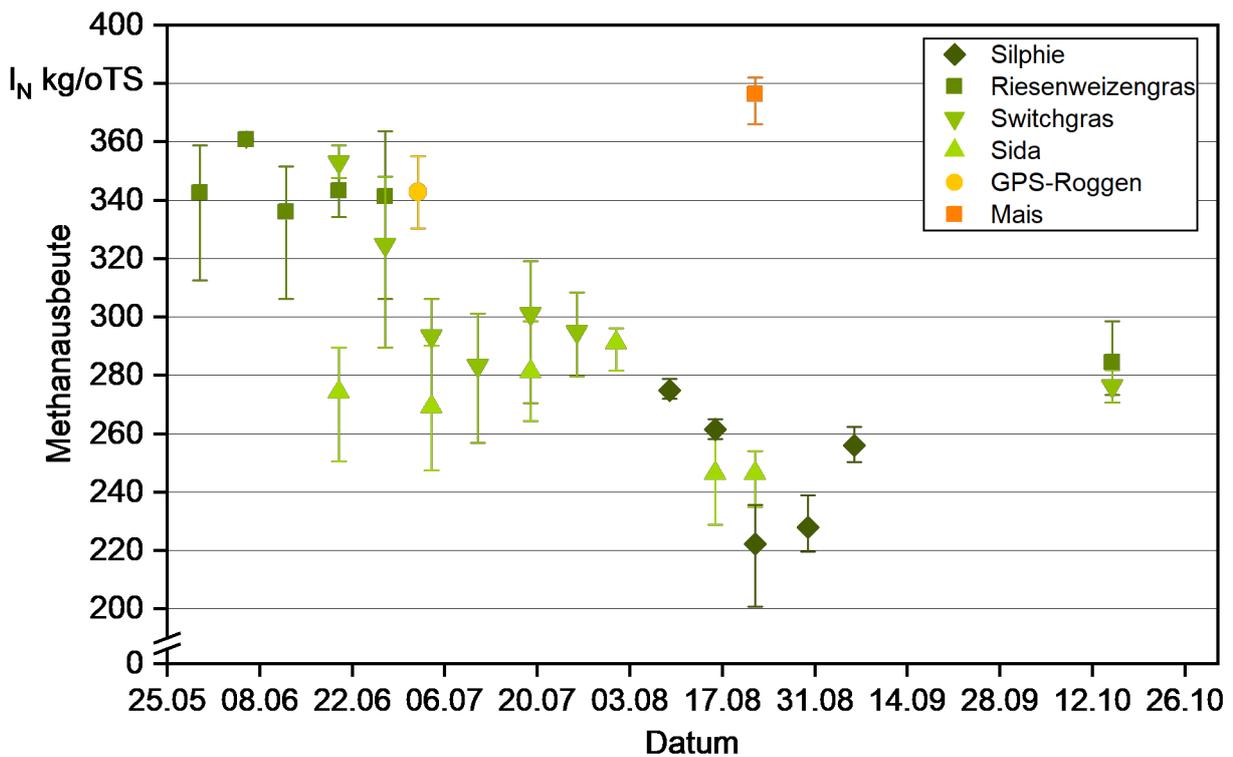


Abbildung 73: Entwicklung der Methanausbeute der Biogaskulturen im Erntezeitraum des Versuchsjahrs 2018

Die niedrigsten Methanausbeuten wurden in der Silphie gemessen. Die Ausbeuten lagen in den beiden Versuchsjahren zwischen etwa 220 l_N/kg oTS und 280 l_N/kg oTS. 2017 hatte sich eine tendenzielle Zunahme der Methanausbeuten mit voranschreitendem Erntedatum angedeutet, während 2018 zunächst ein Abfall der Ausbeuten zu beobachten war. Sowohl die Untersuchungen zum Trockensubstanzgehalt als auch die Analysen zur Methanausbeute in 2017 sprechen für eine Ernte gegen Mitte September. Die Ergebnisse zum Trockensubstanzgehalt aus 2018 deuten auf eine Ernte ab Ende August hin, wodurch die steigenden Methanausbeuten ab diesem Zeitpunkt genutzt werden könnten. MAST *et al.* (2014) haben in Abständen von zwei Wochen Methanausbeuten bei der Silphie untersucht und vom 22. August bis zum 19. September signifikante Zunahmen der Methanausbeuten von 232 l_N/kg oTS bis zu 275 l_N/kg oTS gemessen. Zum 4. Oktober fiel die Methanausbeute auf 256 l_N/kg oTS ab [126]. Untersuchungen aus Thüringen ergaben, dass es bei einer Ernte ab Mitte September zu einer Abnahme der Methanbildung kommt [14]. Die Autoren führen diese auf ein Absinken des Zuckergehalts und eine zunehmende Lignifizierung der Pflanze zurück. Eine Ernte zu einem späten Zeitpunkt erscheint auch unter ökologischen Gesichtspunkten optimal, später als Mitte September sollte sie aber nicht erfolgen.

Zur generellen Methanausbeute der Silphie gibt es eine ganze Reihe Untersuchungen. Es werden Methanausbeuten von 265 l_N/kg oTS [16], 278 l_N/kg oTS [108] und 280 l_N/kg oTS [73] angegeben sowie Spannen von 277 bis 289 l_N/kg oTS [13] und 270 bis 293 l_N/kg oTS [180]. Methanausbeuten von Silphiesilage wurden mit 203 l_N/kg oTS [94] und 289 l_N/kg oTS [155] beziffert. Die meisten dieser Werte liegen über den vorliegenden Ergebnissen, bei denen die Methanausbeute der Silphie doch sehr niedrig ausfiel.

5.2.2 Methanertrag

Zum Vergleich der Ertragspotenziale der Kulturarten sollte nicht nur der Biomasse- bzw. Trockenmasseertrag, sondern auch der hochgerechnete Methanertrag je Hektar betrachtet werden. Der Methanertrag pro Hektar setzt sich aus dem Trockenmasseertrag und der Methanausbeute pro kg organischer Trockenmasse zusammen. Die Methanerträge wurden basierend auf den Erntetermin-Erhebungen und Analysen der Gehalte organischer Trockensubstanz und Methanausbeuten zum Haupterntetermin am Standort Wolferkofen berechnet. Zu den weiteren Beprobungsterminen, wie in Tabelle 26 und Tabelle 27 zu sehen, fand keine Ertragserfassung, sondern lediglich die Entnahme von Pflanzenmaterial für Laboruntersuchungen statt. Ein Methanertrag konnte deshalb für diese Termine nicht berechnet werden.

Da nur Methanausbeuten aus Wolferkofen für die Jahre 2017 und 2018 vorlagen, wurden die Methanerträge für diesen Standort und die beiden Jahre berechnet (Abbildung 74). Diese werden im Folgenden ausführlich dargestellt und mit Literaturwerten verglichen.

Ziel des Projekts war es, die Standorteignung der Kulturen zu ermitteln. Deshalb wurden auf Grundlage der gemittelten Methanausbeuten der Haupterntetermine aus Wolferkofen auch die theoretischen Methanerträge der anderen Standorte für die Jahre 2016 bis 2019 berechnet. In Tabelle 24 und Tabelle 25 wurden jeweils die Daten aller Erntetermine jeder

Kultur gemittelt, um eine Selektion möglichst günstiger oder ungünstiger Bedingungen zu verhindern und auch die unterschiedlichen Abreifezustände aller Bestände an den diversen Standorten berücksichtigen zu können. Auf Grundlage der in Abschnitt 5.1.1.2 erarbeiteten Standorteignung wurden nochmals die Methanerträge unter der Annahme ermittelt, dass die Kulturen nur auf geeigneten Standorten angebaut wurden.

Standort Wolferkofen

Im Versuchsjahr 2017 erreichte unter den mehrjährigen Kulturen das Riesenweizengras mit 5101 m³N/ha den höchsten potenziellen Methanhektarertrag. Im Vergleich zur Referenzkultur Mais entsprach dies 77 %. Die Silphie erzielte mit 4348 m³N/ha den zweithöchsten Methanertrag (66 % im Vergleich zu Mais), dicht gefolgt vom Switchgras mit 4172 m³N/ha (63 % relativ zur Referenz). Die schlechtesten Ergebnisse lieferte die Sida mit 3700 m³N/ha. Diese Kultur schaffte es nur in etwa auf 56 % des mit Mais produzierbaren Methanertrags.

Im Versuchsjahr 2018 blieben die Methanerträge der Dauerkulturen deutlich hinter denen von 2017 zurück. Die Methanerträge des Riesenweizengrases, der Silphie und von Sida fielen um die 1000 m³N/ha geringer aus. Nur das Switchgras zeigte höhere Methanerträge als im Vorjahr – vermutlich durch die hohe Trockenstresstoleranz der Kultur. So erreichte das Switchgras mit 61 % des Methanertrags der Referenzkultur Mais das höchste Ertragspotenzial unter den Dauerkulturen. Das Riesenweizengras wies mit einem Gasertrag von 3656 m³N/ha lediglich 50 % des Silomaispotenzials auf. Der niedrige Methanertrag des Riesenweizengrases ist auf die Trockenzeiten während der Hauptwachstumsperioden im Frühjahr und Herbst zurückzuführen, wodurch die Trockenmasseerträge vergleichsweise gering ausfielen. Dadurch erzielte das Riesenweizengras, trotz der höchsten Gasausbeute, nicht den höchsten Methanertrag unter den Dauerkulturen. Die hier berechneten Methanerträge liegen im üblichen Bereich. THIELEN *et al.* (2017) geben an zwei Standorten Methanerträge von 4906 und 4976 m³N/ha an [180], BIERTÜMPFEL (2015) ermittelte in zwei Jahren theoretische Methanerträge von 3138 und 3845 m³N/ha [13], während MAST *et al.* (2014) einen Anstieg der Methanerträge von 3340 m³N/ha Ende Juni auf 4156 m³N/ha Mitte Juli feststellten [126].

Die Silphie schnitt 2018 trotz Ernte zu einem Termin mit der geringsten Methanausbeute von 222 l_N/kg oTS besser als die Sida ab. Die niedrige Methanausbeute konnte die Silphie wie auch im Vorjahr durch ihr hohes Ertragspotenzial ausgleichen. Die in der Literatur angegebenen Werte liegen im Bereich der Werte, die auch im Projekt ermittelt wurden: von 3283 und 3615 m³N/ha [180] über 3690 m³N/ha [73] bis zu 4170 m³N/ha [16]. Die Sida zeigte mit 2616 m³N/ha die mit Abstand niedrigsten Methanerträge. Bei der Sida ist zu bedenken, dass die Methanerträge mit den Trockenmasseerträgen aus Wolferkofen berechnet wurden, die höher waren als auf den meisten anderen Standorten. Wie in Tabelle 24 und Tabelle 25 zu sehen fällt der Methanertrag deutlich niedriger aus, wenn man die anderen Standorterträge für die Berechnung heranzieht. THIELEN *et al.* (2017) errechneten mit vergleichbaren Methanausbeuten (vgl. Abschnitt 5.2.1) Methanerträge von 1060 bis 1628 m³N/ha [180]. Der Silomais blieb in beiden Jahren mit jeweils circa 7000 m³N/ha Methanertrag konkurrenzlos, da er sich durch sowohl hohe Trockenmasseerträge als auch

Methanausbeuten auszeichnete, die zu den hohen Methanerträgen führten. Die mehrjährigen Kulturen stellen aber eine gute Alternative zum GPS-Roggen mit ähnlichen Methanertragungspotenzialen dar.

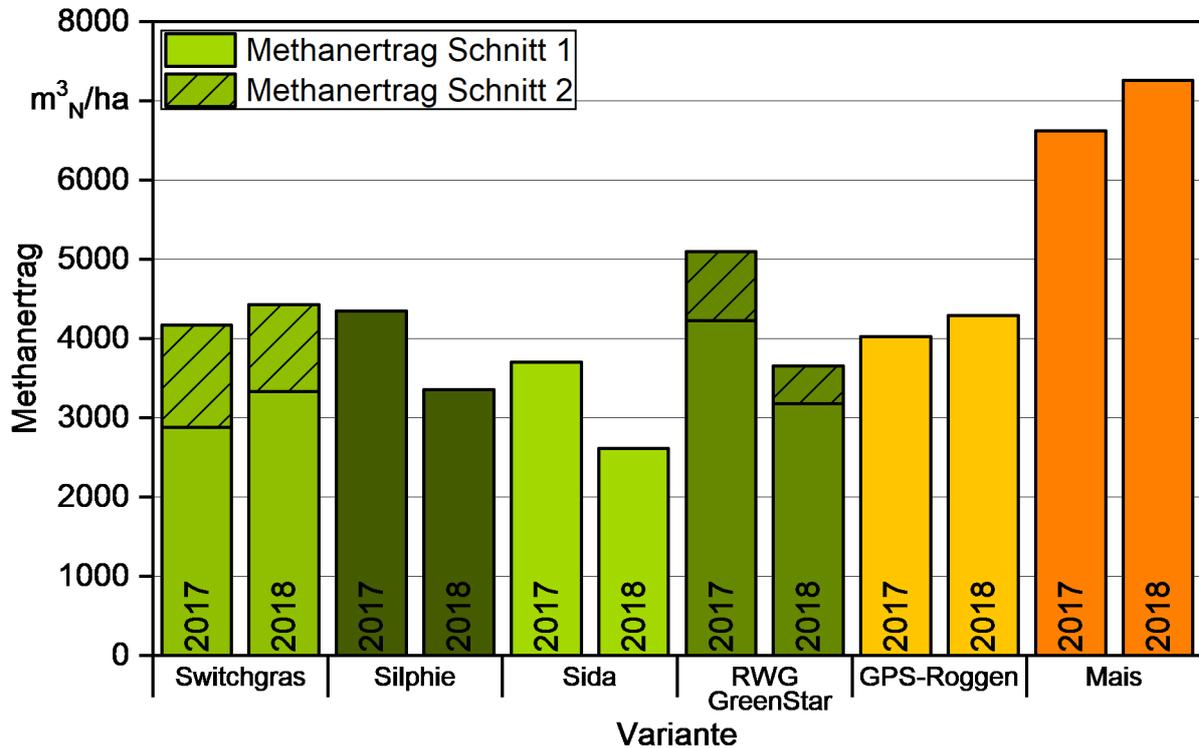


Abbildung 74: Methanertrag der mehrjährigen Energiepflanzen und der Referenzkulturen zum Haupterntetermin der Versuchsjahre 2017 und 2018 am Standort Wolferskofen

Betrachtung aller Standorte

Auffällig war, dass die Dauerkulturen im Vergleich der Trockenmasseerträge dem seit Jahrzehnten züchterisch bearbeiteten Mais schon recht nahekommen (vgl. Tabelle 24), die Silphie schaffte durchschnittlich 80 und Riesenweizengras (Sorte GreenStar) sowie Switchgras erreichten 73 bzw. 70 % des Maisertrags. GPS-Roggen lag mit 64 % hinter diesen Dauerkulturen, bietet allerdings noch ein nutzbares Vegetationszeitfenster nach seiner Beerntung. Die Sida lag mit nur 43 % vom Trockenmasseertrag des Maises weit abgeschlagen am Ende der Kulturreihenfolge. Bei einer Betrachtung der Methanerträge je Hektar verschoben sich diese Relationen nochmals zugunsten des Silomaises, da dieser eine insgesamt sehr gut im Fermenter verdauliche Biomasse liefert. Die Silphie fiel mit nur 51 % des Mais-Methanertrags je Hektar deutlich hinter Riesenweizengras mit immerhin noch 67 % zurück. Dies war vor allem in dem hohen Aschegehalt bzw. im Umkehrschluss dem vergleichsweise geringen Gehalt organischer Trockensubstanz der Silphie (nur 91,7 % im Vergleich zu 94,5 bis 96,9 % der anderen Kulturen im Test) sowie ihrer ebenfalls niedrigen Methanausbeute von im Mittel nur 243 l_N/kg oTS begründet.

Tabelle 24: *Trockenmasse- und Methanerträge im Kulturartenvergleich, alle Standorte einbezogen, Erträge aus Versuchsjahren 2016 bis 2019 (ohne Etablierungsjahre 2014 und 2015)*

Kulturart	Sorte	Ertrag in dt TM/ha	Relativer TM- Ertrag zu Mais in %	Methanertrag in m ³ _N CH ₄ /ha	Relativer Me- thanertrag zu Mais in %
Silomais	Atletas	187,5	100	6493	100
GPS-Roggen	Brasetto	119,2	64	3854	59
RWG	GreenStar	136,0	73	4354	67
Silphie	–	149,1	80	3323	51
Switchgras	Shawnee	131,0	70	3805	59
Sida	–	80,3	43	2056	32

Tabelle 25: *Trockenmasse- und Methanerträge im Kulturartenvergleich mit Berücksichtigung der Standorteignung von Riesenweizengras und Silphie, Erträge aus Versuchsjahren 2016 bis 2019 (ohne Etablierungsjahre 2014 und 2015)*

Kulturart	berücksichtigte, ge- eignete Standorte	Ertrag in dt TM/ha	Relativer TM- Ertrag zu Mais in %	Methanertrag in m ³ _N CH ₄ /ha	Relativer Methanertrag zu Mais in %
Silomais	alle	187,5	100	6493	100
GPS-Roggen	alle	119,2	64	3854	59
RWG	tiefgründig, lange Ve- getationsperiode ¹⁾	153,1	82	4898	75
Silphie	tiefgründig, grund- wassernah ²⁾	173,4	92	3866	60
Switchgras	alle	131,0	70	3805	59
Sida	alle	80,3	43	2056	32

¹⁾ Standorte Aholting, Gelchsheim, Wolferkofen; ²⁾ Standorte Gelchsheim, Wolferkofen, Rosenau

Bei einer geeigneten Standortwahl für die Dauerkulturen Riesenweizengras und Silphie wurde dieses Bild nochmals verschoben. Für Riesenweizengras wurden dabei nur die Trockenmasseerträge der Standorte mit tiefgründigem Boden und langer Vegetationsperiode berücksichtigt. Wird Riesenweizengras unter solchen Bedingungen angebaut, konnte es im Mittel 82 % des Trockensubstanzertrags und 75 % des Methanhektarertrags von Silomais erzielen (siehe Tabelle 25). Silphie bevorzugt ebenfalls tiefgründigen Boden, um ihre Vorteile als Dauerkultur mit tiefreichendem Wurzelsystem ausspielen zu können, hat aber einen noch höheren Anspruch an die Wasserversorgung als Riesenweizengras (vgl. Kapitel 5.1.1.2). An für Silphie passenden Standorten betrug der Trockenmasseertrag sogar 92 % des Silomais – für eine ökologisch und arbeitswirtschaftlich so vorteilhafte Kultur

sehr beachtlich. Bezüglich des Methanertrags sank die Relation ab, es wurden nur 62 % des Methanertrags je Hektar ermittelt, den Silomais erreichte. Für Switchgras wurden keine Standorte ausgeschlossen. Generell sind für das Gras Höhenlagen mit eingeschränkter Vegetationszeit und geringem Wärmeangebot ungeeignet, allerdings wurden diese generellen Standortmerkmale durch die Witterungsbedingungen der extrem trockenwarmen Jahre 2018 und 2019 überlagert. Auch für Sida konnten keine besonders geeigneten Standortgegebenheiten extrahiert werden, da sie unter allen Bedingungen Probleme bei der Etablierung und der Beikrautunterdrückung zeigte. Daher blieben für diese beiden Dauerkulturen die Relativerträge von Trockenmasse und Methan wie bereits in Tabelle 24 gezeigt.

Im Vergleich mit früheren Versuchen [85] aus den Jahren 2015 und 2016 bestätigte sich der kontinuierlich gute Methanertrag des Riesenweizengrases. Silphie, Sida und Switchgras lieferten 2017 etwas bessere Erträge als in den Vorjahren, während 2018 die Silphie auf einem ähnlichen Ertragsniveau lag wie im Vorprojekt und sowohl die Sida als auch das Switchgras bessere Ergebnisse aufwiesen. Besonders bei Sida und Switchgras ist bekannt, dass der Bestand einige Jahre für seine vollständige Etablierung und bis zur vollen Ausschöpfung des Leistungspotenzials benötigt [19] [80].

Für die Bewertung der Methanerträge sollte auch eine ökonomische Betrachtung erfolgen, die auch die Kosten der Substraterzeugung berücksichtigt [203]. Bei den Dauerkulturen werden die jährliche Bodenbearbeitung und Bestandsetablierung eingespart. Auch die Etablierungskosten sind teilweise gesunken. Bei der Silphie ist inzwischen die Aussaat mit gängiger Drill- und Einzelkornsaattechnik möglich. Dadurch ist die Etablierung einfacher, schneller und kostengünstiger möglich als beim aufwendigen Pflanzverfahren [51]. Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist geringer, da kaum Krankheiten auftreten. Auch die Standdauer ist ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit. Für die Kulturen Riesenweizengras und Silphie stellt die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft ein Programm und Kalkulationsdaten zur Berechnung des betriebsindividuellen Deckungsbeitrags bereit [9].

5.2.3 Entwicklung der Inhaltsstoffe im Erntezeitraum

Die Methanbildung ist abhängig von den vergärbaren Inhaltsstoffen im Pflanzenmaterial. In der Literatur gibt es zahlreiche Ansätze, die Methanbildung anhand der Inhaltsstoffe abzuschätzen. Von hoher Bedeutung ist die Ligninfraktion, die sich negativ auf die Methanbildung auswirkt. Lignin kann von den Bakterien nur schwierig abgebaut werden und auch die Abbaubarkeit weiterer Pflanzenstandteile wird negativ beeinflusst [94]. Laut DANIKAS *et al.* (2014 und 2015) spielen ebenso Hemicellulose und Rohproteingehalt bei Gräsern entscheidende Rollen bei der Methanbildung [44] [43]. Diese wirken sich steigernd auf die Methanausbeute aus. Nachfolgend zu sehen (Tabelle 26 und Tabelle 27) sind die Gehalte an Lignin (ADL), Hemicellulose und Rohprotein (RP) im Erntematerial der Biogaskulturen Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras. Der Zuckergehalt wird ebenfalls dargestellt, da ein Zusammenhang mit der Methanausbeute zwar nicht nachgewiesen, aber immer wieder diskutiert wird. Rohasche ist der anorganische Pflanzenbestandteil und

beschreibt zum einen den Gehalt an Makro- und Spurenelementen und zum anderen den Grad der Verunreinigung durch Bodenmaterial. Die Rohasche kann nicht in Biogas umgesetzt werden.

Übereinstimmend mit zuvor genannter Literatur und den Ergebnissen zur Methanausbeute nahm sowohl 2017 als auch 2018 mit zunehmender Reife des Riesenweizengrases der Rohproteingehalt ab, während der Ligningehalt im Pflanzenmaterial stieg. Zudem nahm 2018 der Hemicellulosegehalt ab und der Zuckergehalt zu. Die Hemicellulose- und Zuckergehalte zeigten 2017 keine Änderungen mit dem Erntezeitpunkt.

Anders verhielt es sich beim Switchgras. 2017 war sowohl eine Abnahme des Rohprotein- als auch des Ligningehalts zu verzeichnen. Der sinkende Ligningehalt war etwas überraschend, da dieser mit der Abreife von Gräsern normalerweise ansteigt. Der Gehalt an Hemicellulose schien vom Erntetermin unbeeinflusst. Der Zuckergehalt stieg tendenziell an. Der Rohproteingehalt nahm im Erntegut aus 2018 ebenfalls stetig ab, während Ligninanteil und Hemicelluloseanteil im Vergleich zu 2017 zunahmen. Die zunehmenden Hemicellulosegehalte stehen im Gegensatz zur abnehmenden Methanausbeute. Diese schienen stärker von den zunehmenden ADL- und abnehmenden Rohproteingehalten bestimmt zu werden. Der tendenzielle Anstieg des Zuckergehalts mit späterem Erntetermin in 2017 war auch 2018 zu beobachten.

Im 2017 gewählten Erntefenster schwankten die Lignin- und Rohproteingehalte der Sida geringfügig. Tendenziell war ein leichter Abfall mit zunehmender Reife zu beobachten. Die Hemicellulose hingegen fiel deutlich ab. Ab Mitte August veränderten sich die Fraktionen Hemicellulose und Rohprotein kaum noch. Eine Zunahme der Stärke könnte auf eine zunehmende Samenbildung bei Abreife zurückzuführen sein. Im Zusammenhang mit den sinkenden Methanausbeuten standen vermutlich die abnehmenden Hemicellulosewerte, die sich entsprechend negativ auf die Methanbildung auswirkten. Die Lignin- und Zuckergehalte waren 2018 relativ konstant. Deutlich zeigten sich jedoch im Gegensatz zum Vorjahr die steigenden Hemicellulosegehalte, wenngleich sie sich nicht positiv auf die Methanausbeute auswirkten. Grund könnten die gleichzeitig sinkenden Proteingehalte gewesen sein.

Die Entwicklung der Inhaltsstoffe der Silphie war ebenso uneinheitlich (Tabelle 26 und Tabelle 27). Tendenziell nahmen der Rohprotein- und der Hemicellulosegehalt mit zunehmender Reife ab. Der Ligningehalt war relativ konstant. Der Zuckergehalt stieg mit zunehmender Reife deutlich an. Ein Zusammenhang zur Methanbildung mit zunehmendem Zuckergehalt erschien daher am ehesten gegeben. Die Nährstoffgehalte der Silphie änderten sich im untersuchten Versuchszeitraum 2018 hingegen kaum. Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Methananalysen und untersuchten Inhaltsstoffen war folglich nicht erkennbar. Es wurde lediglich deutlich, dass der Hemicellulosegehalt im Vergleich zu den anderen Kulturen relativ gering war. Auffällig bei der Silphie ist auch der hohe Anteil an Rohasche. Als anorganischer Bestandteil kann dieser nicht in Biogas umgewandelt werden, was eine Erklärung für die niedrige Methanausbeute der Silphie ist.

Teilweise sind die Ergebnisse nur schwierig zu erklären. Eventuell sind bei den untersuchten Energiepflanzen die Zusammenhänge zwischen Inhaltsstoffgehalten und Methanausbeuten komplexer als angenommen. Aufgrund der kurzfristigen Schwankungen sollte aber auch eine nicht optimale Handprobenahme als Teilursache in Betracht gezogen werden. Angaben zu weiteren, im Rahmen der Weender Analyse bestimmten Inhaltsstoffen liefern Tabelle 86 und Tabelle 87 im Anhang.

Tabelle 26: Entwicklung der Inhaltsstoffe im Erntezeitraum 2017

Kulturart	Termin	Probenahme- datum	Rohasche	Zucker	Rohprotein	Hemicellulose	ADL
			in g/kg TM				
RWG	1	13.06.	65,5	58,5	97,5	285,8	85,5
RWG	2	21.06.	61,5	29,9	74,3	297,8	112,0
RWG	3	28.06.	54,8	51,1	63,2	289,4	109,2
RWG	4	05.07.	51,4	51,6	56,0	293,3	113,3
RWG	5	13.07.	59,9	59,9	58,0	289,0	116,8
GPS-Roggen	HE	22.06.	45,5	87,4	73,2	261,4	92,6
Sida	1	13.07.	46,0	38,4	55,8	191,7	116,1
Sida	2	20.07.	55,6	47,3	65,0	179,3	105,7
Sida	3	28.07.	48,5	21,1	75,0	170,1	148,0
Sida	4	03.08.	48,6	43,6	58,7	129,4	122,6
Sida	5	08.08.	48,1	58,9	50,0	134,2	107,5
Switchgras	1	05.07.	65,5	27,0	105,3	322,0	109,2
Switchgras	2	13.07.	61,1	19,9	90,9	308,9	65,8
Switchgras	3	20.07.	50,4	46,8	74,9	300,1	62,5
Switchgras	4	28.07.	52,5	40,2	66,5	310,6	69,7
Switchgras	5	03.08.	51,1	39,6	70,8	310,5	60,0
Silphie	1	17.08.	92,5	100,8	68,2	119,7	68,4
Silphie	2	24.08.	96,1	88,1	59,3	80,4	86,3
Silphie	3	31.08.	109,0	70,4	64,5	70,8	96,8
Silphie	4	07.09.	100,9	136,0	60,3	84,7	83,0
Silphie	5	13.09.	99,3	168,4	50,4	85,0	84,3
Mais	HE	05.09.	35,0	100,3	52,3	206,8	53,2
Sida	HE	05.09.	52,2	62,5	51,2	124,2	104,2

HE = Haupterte, RWG = Riesenweizengras, Sorte GreenStar

Tabelle 27: Entwicklung der Inhaltsstoffe im Erntezeitraum 2018, Mittelwerte mit Standardabweichung ($n = 4$, außer Switchgras-Termine 2 bis 6, da nur $n = 3$, und Sida-Termin 1, da Mischprobe)

Kulturart	Termin	Probenahme- datum	Rohasche	Zucker	Rohprotein	Hemicellulose	ADL
			in g/kg TM				
RWG	1	30.05.	63,5 ± 4,0	30,6 ± 6,5	89,4 ± 5,7	308,6 ± 6,7	54,0 ± 5,4
RWG	2	06.06.	61,9 ± 5,4	31,4 ± 3,0	86,8 ± 2,9	303,7 ± 9,8	57,7 ± 3,1
RWG	3	12.06.	56,1 ± 1,7	22,3 ± 6,4	62,3 ± 2,9	291,8 ± 6,6	73,5 ± 5,8
RWG	4	20.06.	56,2 ± 4,9	46,0 ± 7,6	76,0 ± 9,4	264,7 ± 11,6	79,0 ± 9,9
RWG	5	27.06.	56,4 ± 4,7	64,6 ± 12,8	67,4 ± 17,0	259,1 ± 7,8	64,7 ± 4,5
GPS-Roggen	HE	02.07.	48,4 ± 2,9	76,9 ± 8,3	24,1 ± 2,1	263,2 ± 21,3	49,1 ± 2,3
Switchgras	1	21.06.	53,7 ± 2,7	24,6 ± 5,8	73,7 ± 2,3	255,7 ± 9,6	54,2 ± 4,3
Switchgras	2	27.06.	52,8 ± 6,2	26,1 ± 1,5	68,1 ± 10,6	256,5 ± 10,0	58,2 ± 3,6
Switchgras	3	04.07.	45,3 ± 3,6	34,7 ± 5,1	57,3 ± 9,0	267,5 ± 7,3	77,5 ± 15,5
Switchgras	4	11.07.	43,8 ± 0,7	46,5 ± 8,8	53,4 ± 8,5	265,8 ± 1,5	104,2 ± 3,5
Switchgras	5	19.07.	37,0 ± 3,5	59,5 ± 1,6	40,3 ± 5,2	286,7 ± 1,1	94,1 ± 3,7
Switchgras	6	25.07.	36,8 ± 2,1	60,8 ± 5,9	30,8 ± 7,7	294,5 ± 7,7	96,0 ± 4,5
Sida	1	20.06.	76,0	13,4	112,8	156,0	84,4
Sida	2	04.07.	66,9 ± 6,7	1,3 ± 0,5	90,5 ± 13,9	188,5 ± 20,3	97,0 ± 7,0
Sida	3	19.07.	68,9 ± 7,3	28,0 ± 12,4	70,9 ± 8,5	203,4 ± 17,1	86,1 ± 3,4
Sida	4	01.08.	60,5 ± 5,6	2,7 ± 2,9	58,3 ± 8,0	224,9 ± 15,2	97,5 ± 7,7
Sida	5	16.08.	51,6 ± 8,2	9,8 ± 8,9	51,4 ± 5,8	236,4 ± 17,8	96,3 ± 4,4
Sida	6	22.08.	54,3 ± 7,7	27,2 ± 9,6	54,3 ± 8,6	224,2 ± 14,7	88,4 ± 2,4
Silphie	1	09.08.	143,9 ± 6,1	19,0 ± 16,1	77,4 ± 6,2	66,1 ± 8,9	107,8 ± 13,2
Silphie	2	16.08.	125,2 ± 3,5	23,3 ± 10,5	69,7 ± 4,4	70,3 ± 23,1	108,8 ± 12,6
Silphie	3	22.08.	142,8 ± 10,5	9,2 ± 15,7	79,3 ± 6,0	50,7 ± 26,0	99,4 ± 6,7
Silphie	4	30.08.	138,0 ± 8,7	4,5 ± 2,4	76,1 ± 6,5	67,9 ± 35,0	112,4 ± 4,1
Silphie	5	06.09.	120,6 ± 6,1	24,6 ± 31,2	68,9 ± 10,6	64,4 ± 9,1	104,3 ± 7,3
Mais	HE	22.08.	30,2 ± 3,6	77,4 ± 6,6	61,2 ± 6,1	227,6 ± 20,2	63,6 ± 9,5
RWG	2.A	15.10.	84,5 ± 2,6	52,5 ± 11,7	113,8 ± 10,0	260,4 ± 6,7	73,3 ± 20,9
Switchgras	2.A	15.10.	45,9 ± 1,3	47,6 ± 3,2	31,3 ± 3,5	255,7 ± 7,7	63,3 ± 2,2

HE = Haupternte, A = Aufwuchs, RWG = Riesenweizengras, Sorte GreenStar

5.2.4 Nährstoffentzug über das Erntegut der Pflanzen für eine Biogasnutzung

Neben den Inhaltsstoffen nach Weender Analyse wurden im Erntegut auch die Gehalte an Mineralstoffen bestimmt. Tabelle 28 gibt die kalkulierten Nährstoffentzüge der Jahre 2017 und 2018 wieder, die bei der Düngeplanung zu berücksichtigen sind. Detaillierte Ergebnisse, auch der verschiedenen Schnitzeitpunkte, sind im Anhang in Tabelle 88 und Tabelle 89 zu finden.

Tabelle 28: Mineralstoffentzug mit dem Erntegut der mehrjährigen Energiepflanzen, Versuchsjahre 2017 und 2018, Standort Wolferskofen

Variante	Schnitt	Erntedatum	TM-Ertrag	N	CaO	P ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	S
			dt/ha	kg/ha					
2017									
Silphie	1	07.09.	197	189	495	78	131	328	14
Sida	1	05.09.	159	130	206	39	40	208	22
RWG (GreenStar)	1 + 2	21.06./16.10.	159	200	59	71	23	377	23
Switchgras	1 + 2	13.07./16.10.	147	194	83	53	55	301	17
Silomais	1	05.09.	203	237	60	103	56	214	18
GPS-Roggen	1	22.06.	128	107	36	62	15	235	13
2018									
Silphie	1	22.08.	176	223	378	34	84	309	15
Sida	1	22.08.	112	97	110	14	20	119	22
RWG (GreenStar)	1 + 2	20.06./15.10.	117	153	36	22	12	173	22
Switchgras	1 + 2	21.06./15.10.	130	125	53	18	24	173	15
Silomais	1	22.08.	199	195	60	37	39	167	17
GPS-Roggen	1	02.07.	139	54	24	34	12	128	18

Die kalkulierten Nährstoffentzüge ähnelten sich in beiden Versuchsjahren. Auffällig waren die hohen Stickstoffentzüge der Silphie und der beiden Gräser. Bei den Gräsern war dies in den hohen Stickstoffgehalten in der Pflanze, bei der Silphie in dem hohen Trockenmasseertrag begründet. Der Stickstoffbedarfswert [7], nach dem auch die Düngung im Versuch berechnet wurde (vgl. N-Düngung Tabelle 66, Tabelle 67 und Tabelle 68), liegt für Silphie und Switchgras deutlich unter der Menge entzogenen Stickstoffs, während der Entzug des Riesenweizengrases nahezu dem Sollwert entspricht. Weiterhin ist der hohe Calcium-Gehalt in den Silphiepflanzen herauszustellen. Dieser könnte ein Grund für die in Abschnitt 5.4.1 festgestellte pH-Wert-Absenkung des Bodens sein. An Phosphor stellten die Dauerkulturen keinen erhöhten Bedarf. Magnesium war vornehmlich im Erntegut der Silphie enthalten und verdient daher bei der Düngeplanung besondere Aufmerksamkeit. Kalium wurde von den beiden Gräsern und der Silphie in großen Mengen aus dem Boden

aufgenommen. Da Kalium besonders für die Regulierung des Wasserhaushalts der Pflanzen eine Bedeutung hat [120], ist eine Zuführung dieses Nährstoffs bzw. die Aufrechterhaltung eines ausgeglichenen Kaliumniveaus im Boden über die Düngung wichtig. Die hohen Nährstoffauszüge der Silphie kamen sowohl durch den hohen Trockenmasseertrag als auch durch die hohen Gehalte von Kalzium, Kalium und Magnesium pro kg TM zustande. Die Nährstoffentzüge der Sida fielen zu den anderen Kulturen bis auf Kalzium vergleichsweise gering aus, was sehr wahrscheinlich durch die niedrigen Trockenmasseerträge bedingt wurde. Die Mineralstoffgehalte im Boden änderten sich kaum von Frühjahr 2017 bis Herbst 2019. Nur in Rosenau nahmen einige Mineralstoffgehalte im Boden ab, was vermutlich eher mit den Standorteigenschaften als mit dem Nährstoffentzug der Kulturen zusammenhing (vgl. Tabelle 48 und Tabelle 49).

5.2.5 Brennstoffqualität und Nährstoffentzug thermisch genutzter Energiepflanzen

In Tabelle 29 und Tabelle 30 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Heizwerts, des Aschegehalts sowie der Inhaltsstoffuntersuchung dargestellt.

Bezüglich des Heizwerts unterschieden sich die Kulturen Miscanthus, Sida und Switchgras kaum. Die Heizwerte der drei Kulturen lagen im Bereich von 17,8 bis 18,1 MJ/kg TS. Damit war der Heizwert etwas niedriger als beispielsweise der von Fichtenholz (18,8 MJ/kg TS), lag aber etwas über vergleichbaren halmgutartigen Brennstoffen wie Weizenstroh (17,2 MJ/kg TS) [65]. CUMPLIDO-MARIN *et al.* (2020) geben in einem Literaturreview Heizwerte von 14,9 bis 17,7 MJ/kg TS für Sida an [42]. KÖNNING (2019) berichtet von einem Heizwert von 17 MJ/kg TS [105]. Beim Heizwert der Sida scheint es größere Differenzen zwischen den berichteten Werten zu geben. Der hohe Heizwert, der im Projekt gemessen wurde, liegt im oberen Bereich. Für Miscanthus hingegen kann der gemessene Heizwert als üblich betrachtet werden. Laut Literatur sind Angaben von 17,05 bis 18,91 MJ/kg TS üblich [108] [115]. In der Feste-Regenerative-Energieträger-Datenbank (FRED) des TFZ wird als Mittelwert aus 198 Werten ein Heizwert von 17,6 MJ/kg TS angegeben. Das Minimum liegt bei 16,4 und das Maximum bei 18,4 MJ/kg TS [181]. MCLAUGHLIN *et al.* (1996) ermittelten für Switchgras einen Heizwert von 18,4 MJ/kg TS [127], der leicht über den in unseren Versuchen gemessenen Werten liegt.

Der Aschegehalt lag für Sida 2017 im Mittel über fünf Standorte bei 2,41 Gew.-%, für Miscanthus bei 2,31 Gew.-% und für Switchgras bei 3,39 Gew.-%. 2018 wurden nur in Wolfershofen Proben genommen. Dort lagen die Werte etwas unter denen des Vorjahrs. Insgesamt sind die Aschegehalte der drei Kulturen deutlich höher als die von Holz (Fichte: 0,6 %), aber geringer als die von Weizenstroh (5,7 %) [65]. Letztendlich muss das Ascheaustragssystem die höheren Aschemengen aus dem Brennraum austragen können. Außerdem erhöhen sich die Aufwendungen für die Verwertung oder Entsorgung der anfallenden Verbrennungsrückstände mit steigendem Aschegehalt. Die Asche besteht vorwiegend aus Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Phosphor (P) und Natrium (Na). Unter bestimmten Bedingungen kann sie daher auch als Dünger eingesetzt werden [87].

Weitere relevante Parameter bei der Verbrennung halmgutartiger Brennstoffe sind die als kritisch zu betrachtenden Inhaltsstoffe Stickstoff (N), Schwefel (S) und Chlor (Cl). Sie können bei der Verbrennung zur Bildung umwelt- oder gesundheitsschädlicher Gase beitragen. Stickstoff wirkt sich direkt auf die Stickstoffoxidbildung aus, da er bei der Verbrennung nahezu vollständig in die Gasphase übergeht. Der Schwefelgehalt bestimmt primär die Schwefeldioxidemission, wobei ein Großteil des Schwefels in die Asche eingebunden wird. Bei chlorreichen Brennstoffen können die Chlorwasserstoffemissionen problematisch werden [87]. Niedrige Gehalte dieser Elemente sind deshalb vorteilhaft. Die drei geprüften Brennstoffe schnitten schlechter als Nadelholz ab, besonders die Stickstoff- und Schwefelgehalte waren deutlich erhöht (Tabelle 29 und Tabelle 30). Miscanthus enthielt im Mittel zehnmal so viel Chlor wie Nadelholz. Kalium (K), Silizium (Si) und Natrium (Na) können zu einer Erhöhung der Partikelemission führen [87]. Auch hier waren die Werte, mit Ausnahme des Siliziumgehalts von Sida, höher als die von Nadelholz. Höhere Gehalte von Stickstoff, Kalium und Chlor führen in der Regel auch zu höherer Korrosion von Feuerraum und Wärmeübertragungsflächen. Die Korrosionsbeständigkeit der Bauteile muss für die Brennstoffe ausgelegt sein, was sich in erhöhten Kosten niederschlägt [26].

Kalzium (Ca) kann zur Erhöhung des Ascheschmelzpunktes beitragen [53] und ist damit positiv zu bewerten, Kalium [131] und Silizium hingegen senken den Ascheschmelzpunkt [127]. Sida und Switchgras wiesen besonders hohe Kalziumwerte auf, was sich auch in der ermittelten Ascheerweichungstemperatur niederschlug. Miscanthus hingegen enthielt viel Kalium, aber auch Sida und Switchgras enthielten deutlich mehr Kalium als Nadelholz. Die höchsten Siliziumgehalte hatte das Switchgras, aber auch der Miscanthus enthielt vergleichsweise viel Silizium. Für das Häckselgut der Sida ergaben die Analysen eine Ascheschmelztemperatur von deutlich über 1200 °C (Abbildung 75), so wie es zur Vermeidung von Schlackebildung im Feuerraum gefordert wird [143]. Switchgras lag zumeist darunter mit Werten ab 1060 °C. McLAUGHLIN *et al.* (1996) geben sogar nur 1016°C als Ascheerweichungstemperatur für Switchgras an [127]. Die Asche von Miscanthus hingegen erweichte schon ab 900 °C und weniger, was zu Schlackebildung und damit zu Ablagerungen bei der Verbrennung führen kann. Dies ist ein bekanntes Problem der thermischen Nutzung von Miscanthus [177] [114] [116] [87]. Die Ascheerweichungstemperaturen von Holz und Rinde werden mit ca. 1300 bis 1400 °C angegeben [66]. Insgesamt bringen Sida und Switchgras gute Eigenschaften für die Verbrennung mit. Die hohen Stickstoff- und Schwefelwerte können allerdings zu einer erhöhten Bildung von Stick- oder Schwefeloxiden führen. Die Eigenschaften des Miscanthus sind für die Verbrennung nicht ganz so vorteilhaft. Verwendete Öfen müssen auf jeden Fall für die Verwendung von Agrarbrennstoffen ausgelegt sein. Praktiker berichten jedoch, dass die Verschlackung durch angepasste Kesseltechnik und eine optimale Einstellung des Kessels in den Griff zu bekommen sei.

Tabelle 29: Verbrennungstechnische Kenndaten und Inhaltsstoffe der mehrjährigen Energiepflanzen je Kultur und Standort; Erntejahr 2017; Vergleichswert für Nadelholz [53]

Ort	Kultur	Aschegehalt, wasserfrei	Gew.-% Heizwert, Hu, MJ/kg TS	N, gesamt, Ma.-%	S, gesamt, Ma.-%	Cl, gesamt, Ma.-%	Ca, mg/kg	K, mg/kg	Na, mg/kg	Si, mg/kg
Aholfing		2,88	17,7	0,27	0,03	0,01	5870	4390	42	< 100
Gelchsheim		2,82	17,6	0,46	0,06	0,01	7300	2790	51	< 100
Hötzelsdorf		1,69	18,0	0,27	0,03	< 0,005	4430	1540	61	< 100
Rosenau	Sida	2,31	17,9	0,29	0,03	< 0,005	6680	1460	28	< 100
Wolferkofen		2,35	17,7	0,27	0,03	< 0,005	6530	2100	39	< 100
Mittelwert		2,41	17,8	0,31	0,04	0,01	6162	2456	44	< 100
Aholfing	Switchgras	3,83	18,0	0,58	0,05	0,02	2830	1980	21	8770
Gelchsheim		3,60	18,0	0,57	0,05	0,03	2840	1680	28	7030
Hötzelsdorf		2,89	18,1	0,57	0,05	0,04	2070	1770	< 10	5630
Rosenau		2,44	18,3	0,61	0,05	0,02	2330	3220	< 10	6470
Wolferkofen		4,21	17,8	0,57	0,07	0,01	2770	1000	15	8980
Mittelwert		3,39	18,1	0,58	0,06	0,02	2568	1930	21	7376
Aholfing	Miscanthus	2,42	18,1	0,25	0,06	0,07	664	5140	< 10	3370
Gelchsheim		2,38	18,0	0,31	0,03	0,11	1340	3040	< 10	4630
Hötzelsdorf		1,56	18,2	0,20	0,04	0,09	468	3010	< 10	2450
Parsberg		2,54	18,1	0,42	0,05	0,11	887	5760	< 10	2590
Rosenau		2,04	18,2	0,37	0,06	0,16	1610	4000	< 10	2290
Wolferkofen		2,95	17,9	0,26	0,02	0,04	937	2470	14	6270
Mittelwert		2,31	18,1	0,30	0,04	0,10	984	3903	14	3600
Nadelholz		0,6	18,8	0,1	< 0,02	0,01	900	400	20	150

Tabelle 30: Verbrennungstechnische Kenndaten und Inhaltsstoffe der mehrjährigen Energiepflanzen je Kultur am Standort Wolferkofen; Erntejahr 2018; Vergleichswert für Nadelholz [53]

Ort	Kultur	Aschegehalt, wasserfrei Gew.-%	Heizwert, Hu, MJ/kg TS	N, gesamt, Ma.-%	S, gesamt, Ma.-%	Cl, gesamt, Ma.-%	Ca, mg/kg	K, mg/kg	Na, mg/kg	Si, mg/kg
Wolferkofen	Sida	1,96	17,8	0,21	0,03	0,01	5180	1860	81	326
	Switchgras	3,25	17,9	0,39	0,04	0,06	3270	1930	14	7450
	Miscanthus	2,05	18,1	0,19	0,03	0,16	950	3630	< 10	3750
	Nadelholz	0,6	18,8	0,1	< 0,02	0,01	900	400	20	150

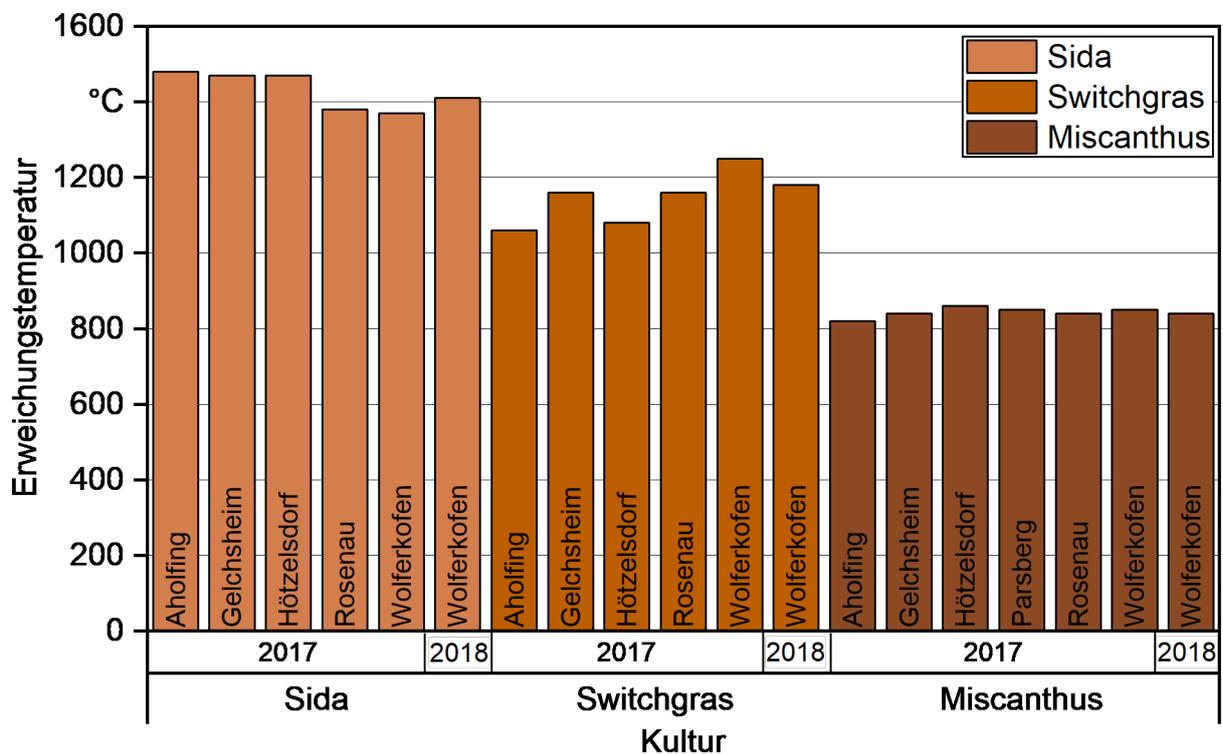


Abbildung 75: Ascheerweichungstemperatur der mehrjährigen Energiepflanzen im Erntejahr 2017 und 2018

Eine Untersuchung der Schüttdichte wurde an allen Standorten durchgeführt, um Standorteffekte wie auftretendes Lager und Qualität zu berücksichtigen. Da spezifische Einstellungen an der Erntemaschine und damit die Häckselgutlänge einen Einfluss haben, sind die Jahre 2017 und 2018 in Tabelle 31 getrennt angegeben. Je nach Bestand, Trockenheit und Lager wurden die Einstellungen bei der Ernte vom Techniker angepasst. Die

Schüttdichte des Häckselguts der drei Kulturen und der damit benötigte Lagerraumbedarf unterscheiden sich deutlich von den Werten der Holzhackschnitzel (Tabelle 31). Sida-Hackschnitzel der Ernte 2017 wogen im Mittel nur 69 kg/m³, die der Ernte 2018 im Mittel nur 88 kg/m³. Die Switchgras-Hackschnitzel der beiden Erntejahre lagen bei 69 kg/m³ und 73 kg/m³ und die des Miscanthus bei 94 kg/m³ und 110 kg/m³. Der Bedarf an Lagerraum liegt damit deutlich über den gängigen Kapazitäten, die für Holzhackschnitzel vorgehalten werden müssen.

Tabelle 31: Schüttdichte des Häckselguts; Erntejahr 2017 und 2018; n = 6

	Mittelwert	Maximum	Minimum
Jahr und Kultur	Schüttdichte in kg/m ³		
2017			
Sida	69,0	75,4	56,2
Switchgras	64,8	76,0	53,3
Miscanthus	93,7	102,8	79,5
2018			
Sida	87,8	104,5	76,8
Switchgras	73,2	78,6	68,8
Miscanthus	110,0	125,4	93,9
Holzhackschnitzel*	≥ 200		

* = Qualitätsklasse A1

Die aus den Ergebnissen der Inhaltsstoffanalyse berechneten Nährstoffentzüge sind für den Standort Wolferkofen in Tabelle 32 und Tabelle 33 dargestellt. Insgesamt ist die Nährstoffabfuhr als gering einzuordnen, da die Pflanzen im abgetrockneten Zustand geerntet werden. Damit ist ein Großteil der Nährstoffe bereits in die Wurzeln zurückverlagert oder über den Abwurf der Blätter bzw. die Auswaschung durch Niederschläge dem Boden zurückgeführt. Bei der Düngemengenberechnung ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

Tabelle 32: Nährstoffabfuhr pro Jahr durch das Erntegut; Erntejahr 2017

Ort	Kultur	Ertrag	N	CaO	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	S
Aholfing	Miscanthus	169,4	42,3	15,7	104,9	8,4	11,3	10,3
Gelchsheim		80,6	25,0	15,1	29,5	6,7	2,6	2,4
Hötzelndorf		123,5	24,7	8,1	44,8	6,7	16,3	4,6
Parsberg		142,3	59,8	17,7	98,8	12,0	9,1	7,5
Rosenau		116,0	42,9	26,1	55,9	8,9	4,9	6,6
Wolferskofen		63,4	16,5	8,3	18,9	3,1	2,4	1,1
Mittelwert		115,9	35,2	15,2	58,8	7,6	7,8	5,4
Aholfing	Sida	64,4	17,4	52,9	34,1	7,5	14,2	2,1
Gelchsheim		68,7	31,6	70,2	23,1	12,0	8,9	4,3
Hötzelndorf		39,3	10,6	24,4	7,3	4,9	4,4	1,0
Rosenau		83,3	24,1	77,8	14,6	6,1	5,8	2,5
Wolferskofen		74,0	20,0	67,6	18,7	8,2	5,4	2,2
Mittelwert			65,9	20,8	58,6	19,6	7,7	7,7
Aholfing	Switchgras	102,1	59,2	40,4	24,4	10,6	15,0	5,5
Gelchsheim		84,4	48,1	33,5	17,1	10,0	7,8	3,8
Hötzelndorf		93,0	53,0	26,9	19,8	9,1	13,4	4,7
Rosenau		61,5	37,5	20,0	23,9	5,5	10,1	3,3
Wolferskofen		71,0	40,5	27,5	8,6	6,9	6,0	5,0
Mittelwert			82,4	47,7	29,7	18,7	8,4	10,4

Tabelle 33: Nährstoffabfuhr pro Jahr durch das Erntegut; Erntejahr 2018; n = 4

Ort	Kultur	Ertrag	N	CaO	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	S
Wolfers- kofen	Sida	81	17,1	59	18	9	5	2,4
	Switchgras	109	42,6	50	25	14	10	4,6
	Miscanthus	146	27,7	19	64	12	4	4,5

5.3 Bodenstickstoff und -nitrat zum Vegetationsende (TFZ)

In Deutschland werden heute etwa 70 % des Trinkwassers aus dem Grundwasser gewonnen. Das Grundwasser stellt somit eine lebenswichtige Ressource dar. Mineralisierter Stickstoff kann über Winter aus dem Wurzelraum in tiefere Bodenschichten bis in das Grundwasser verlagert werden [120]. Der Grenzwert für den Nitratgehalt im Trinkwasser liegt bei 50 mg NO₃/l. Daraus einen Grenzwert für einen tolerierbaren N_{min}-Gehalt im Boden abzuleiten, ist schwierig, da der Zusammenhang zwischen Boden-N_{min} und Nitratgehalt im Sickerwasser erheblich vom Boden und von den Niederschlagsmengen abhängt.

Der Herbst-N_{min}-Wert beschreibt den Gehalt an Mineralstickstoff in der Wurzelzone (0–90 cm) zu Beginn der Sickerwasserbildung im Winterhalbjahr [27]. Abbildung 76, Abbildung 77 und Abbildung 78 zeigen die in Bodenuntersuchungen ermittelten Ammonium- und Nitratgehalte zum Vegetationsende auf sechs Standorten in Bayern aus den Versuchsjahren 2017, 2018 und 2019.

Über alle Jahre betrachtet wiesen die Flächen der Dauerkulturen auf den Standorten Aholting, Gelchsheim, Hötzelsdorf, Parsberg, und Wolferkofen nur geringe Stickstoffgehalte im Boden auf. Die N_{min}-Gehalte in den Bodenschichten von 0 bis 90 cm lagen zumeist unter 40 kg N_{min}/ha. Laut HENNINGS und SCHEFFER (2000) ist dies ein Wert für einen tolerierbaren N_{min}-Gehalt im Boden für Schluffe, Lehme und Tone [93].

Die 2017 am Standort Hötzelsdorf erhöhten Werte in den Riesenweizengras-Varianten sind nicht ganz nachvollziehbar. Die Stickstoffdüngung war 2017 mit 90 kg N/ha eher moderat. Der zweite Aufwuchs fiel 2017 aber niedrig aus (weniger als 30 dt TM/ha) und hat offenbar keine nennenswerten Nährstoffmengen aus dem Boden mehr aufgenommen. Die teilweise recht hohen Ammoniumwerte sind ebenso ungewöhnlich. In Wolferkofen, Gelchsheim und Parsberg überschritten 2018 einige Dauerkulturen geringfügig die Grenze von 40 kg N_{min}/ha. 2019 wurden nur unter der Sida in Gelchsheim und Parsberg höhere Werte als 40 kg N_{min}/ha gefunden, die meisten Werte lagen sogar deutlich unter 30 kg N_{min}/ha. Auffällig waren wie 2017 die vergleichsweise hohen Ammoniumwerte in Hötzelsdorf. Die geringen gemessenen Stickstoffmengen auf den Flächen der mehrjährigen Kulturen bestätigen somit die Ergebnisse der Jahre 2015 und 2016 [85].

Auch die Variante GPS-Roggen mit anschließender Zwischenfrucht (über den Winter) schnitt über die Jahre gut ab und hinterließ nur geringe auswaschbare Stickstoffmengen im Boden. Sie zeigte in den Jahren 2017 und 2019 ähnliche Stickstoffmengen im Boden wie die Dauerkulturen. In 2018 schnitt sie in Aholting und Hötzelsdorf gut ab, auf den anderen Standorten etwas höher als die der Dauerkulturen.

Der Anbau der einjährigen Kulturen Mais und Winterweizen hinterließ oft höhere, potenziell auswaschbare Stickstoffmengen. Dies ist sicherlich auch der Bodenbearbeitung im Herbst geschuldet, welche die Mineralisierung von Stickstoff anregt [120]. Der Aufwuchs im Herbst durch das Wintergetreide ist dann zu gering, um relevante Mengen aufnehmen zu können.

Ein zehnjähriges Stickstoff-Monitoring der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft zeigte durchschnittliche N_{\min} -Gehalte zum Vegetationsende für Weizen von über 70 kg N_{\min} /ha und für Mais von über 80 kg N_{\min} /ha [6], was nochmals das gute Abschneiden der Dauerkulturen verdeutlicht.

Der humushaltige Standort Rosenau hebt sich deutlich von den anderen Standorten ab. Dieser ist, unabhängig von der Kultur, durch sehr hohe N_{\min} -Gehalte im Boden gekennzeichnet. Eine Auswaschung ins Grundwasser ist hier zu befürchten. Der Boden hat aufgrund seiner Vorgeschichte (ehemaliges Niedermoor) ein hohes Mineralisierungspotenzial. Umso wichtiger ist es, auf solchen Flächen einen durchgehenden Bewuchs, der die Nährstoffe aus dem Boden binden kann, zu gewährleisten und die Bodenbearbeitung zu minimieren. Eine Reduzierung der potenziellen N-Auswaschung deutete sich bereits auf den Versuchsflächen an, da ein direkt benachbarter Praxisacker, der bis zu Versuchsbeginn gleich mit der Versuchsfläche bewirtschaftet wurde, noch deutlich höhere Werte aufzeigte. Die geringeren Stickstoffgehalte in den Böden der Versuchsflächen sind aber sicherlich auch auf die ausbleibende Bodenbearbeitung (mehrjährige Kulturen) und den Zwischenfruchtanbau (folgend auf GPS-Roggen) zurückzuführen, die sich förderlich auf die N_{\min} -Gehalte auswirken und so einer potenziellen Nitratauswaschung entgegenwirken können [6]. Auffällig war auch der hohe Anteil an NH_4^+ -Stickstoff, der jedoch nicht der Auswaschungsgefahr unterliegt.

Die Ergebnisse veranschaulichen sowohl die erhöhte Nitratauswaschungsgefahr sehr humushaltiger Anbauflächen und einjährig bewirtschafteter Kulturflächen als auch das Potenzial von Dauerkulturen und Zwischenfruchtanbau zur Minimierung der Auswaschung. Besonders die Ergebnisse der Bodenuntersuchung unter den mehrjährigen Energiepflanzen waren sehr vielversprechend. Sie verdeutlichen, auch im Vergleich zu den mit einjährigen Kulturen bewirtschafteten Praxisäckern in direkter Nachbarschaft oder naher Umgebung, das Potenzial der mehrjährigen Kulturen im Bereich Gewässerschutz durch ihren erhöhten Stickstoffentzug über die ganze Vegetationsperiode. Da auf den Flächen der mehrjährigen Energiepflanzen im Herbst keine Bodenbearbeitung erfolgt, und teilweise ein Wiederaufwuchs und ein intaktes Wurzelsystem auch nach der Ernte im Herbst noch Stickstoff aufnehmen können, sind diese Kulturen den Grundwasserschutz betreffend sehr vielversprechend. Laut den vorliegenden Erkenntnissen ist daher nach erfolgreicher Etablierung und Entwicklung eines dichten Bestands mit nur einer geringen Nitratauswaschung unter den getesteten mehrjährigen Energiepflanzen zu rechnen. Diese Kulturen könnten daher möglicherweise als interessante Alternative besonders für grundwassersensible Gebiete in der Beratung dargestellt werden.

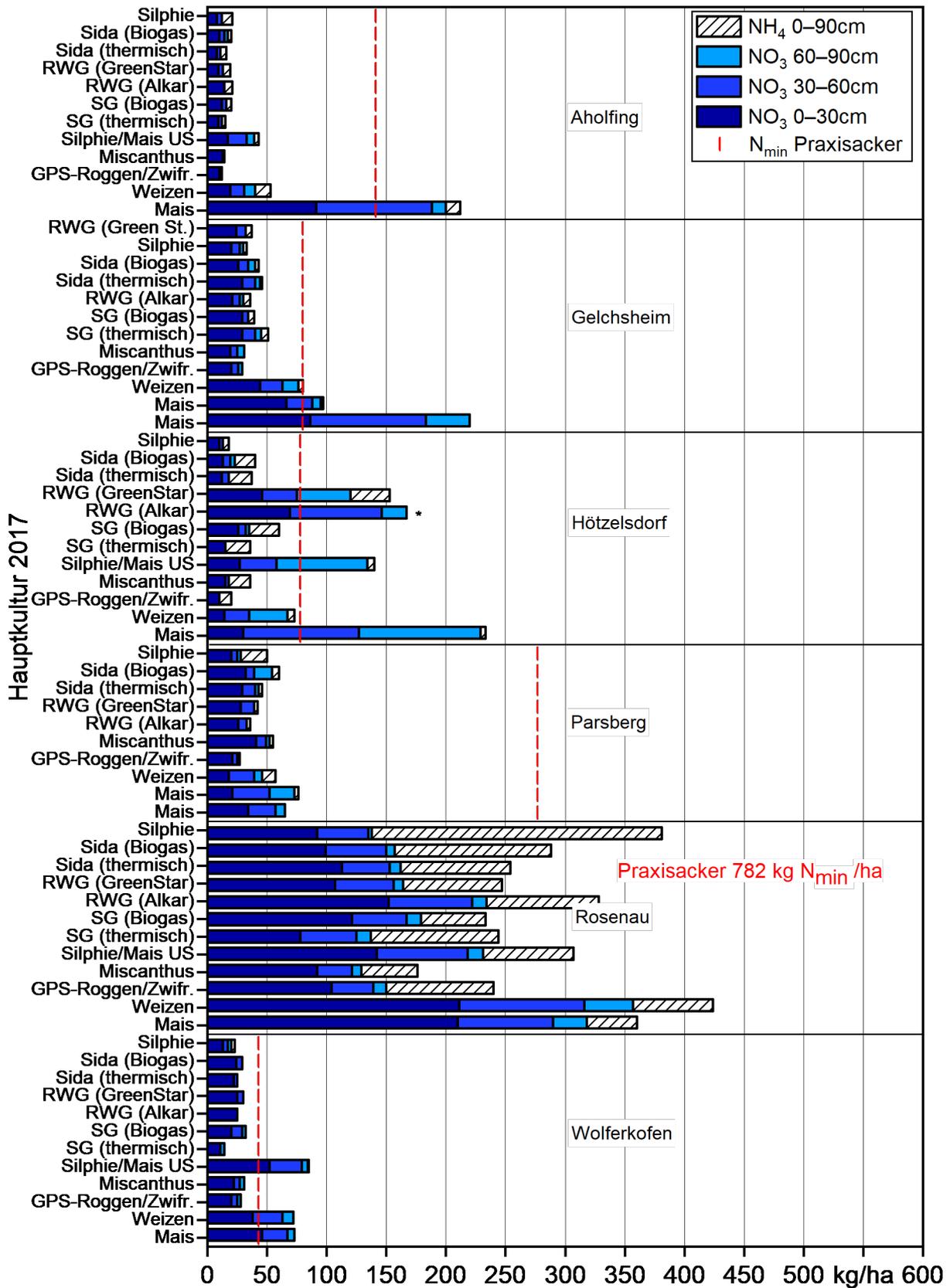


Abbildung 76: Boden-N_{min}-Gehalte im Herbst 2017 (* fehlerhafter NH₄-Wert wurde entfernt; US = Untersaat; rot gestrichelte Linie = vergleichbarer Praxisacker in direkter Nachbarschaft)

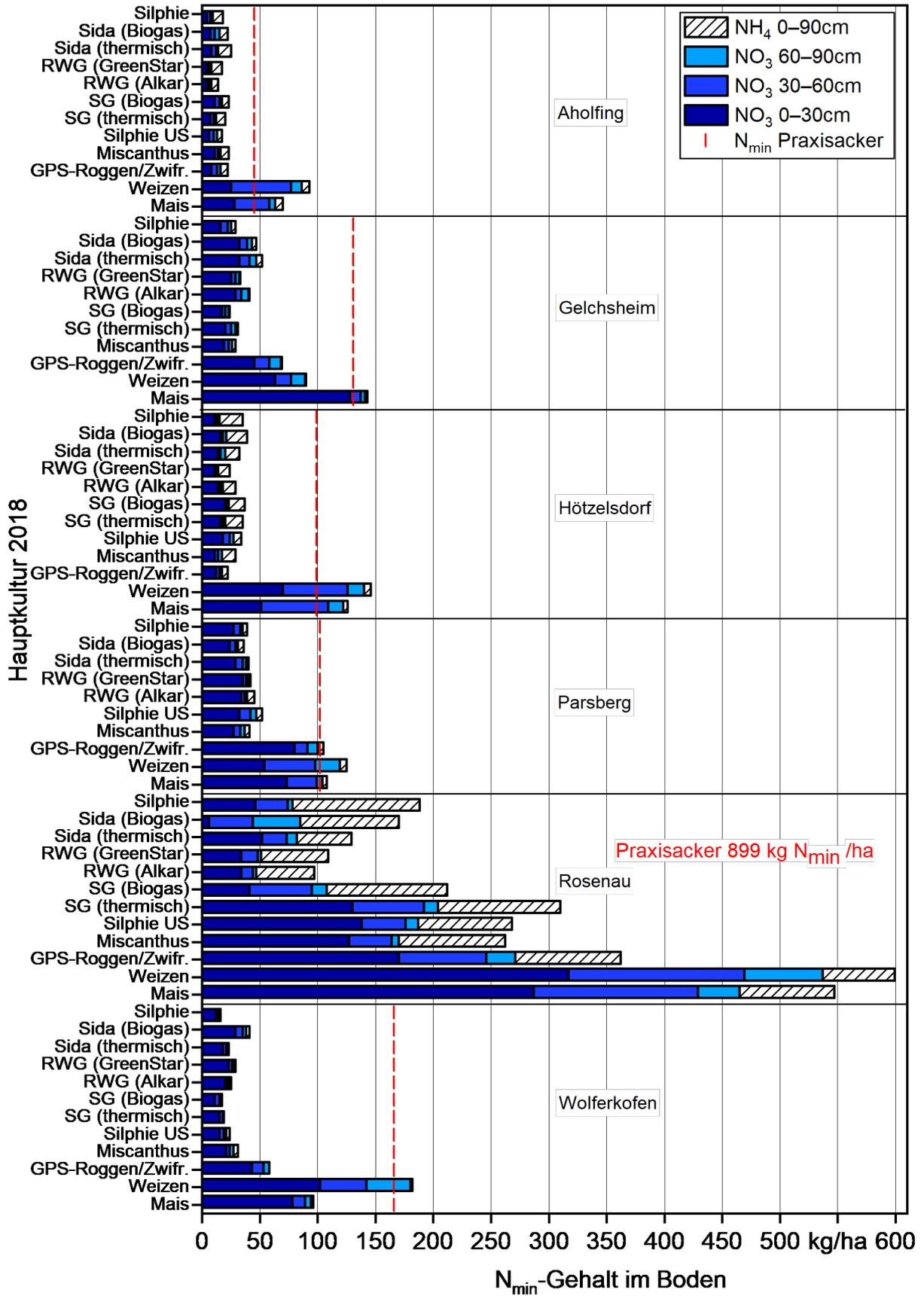


Abbildung 77: Boden-N_{min}-Gehalte im Herbst 2018 (US = Untersaat; rot gestrichelte Linie = vergleichbarer Praxisacker in direkter Nachbarschaft)

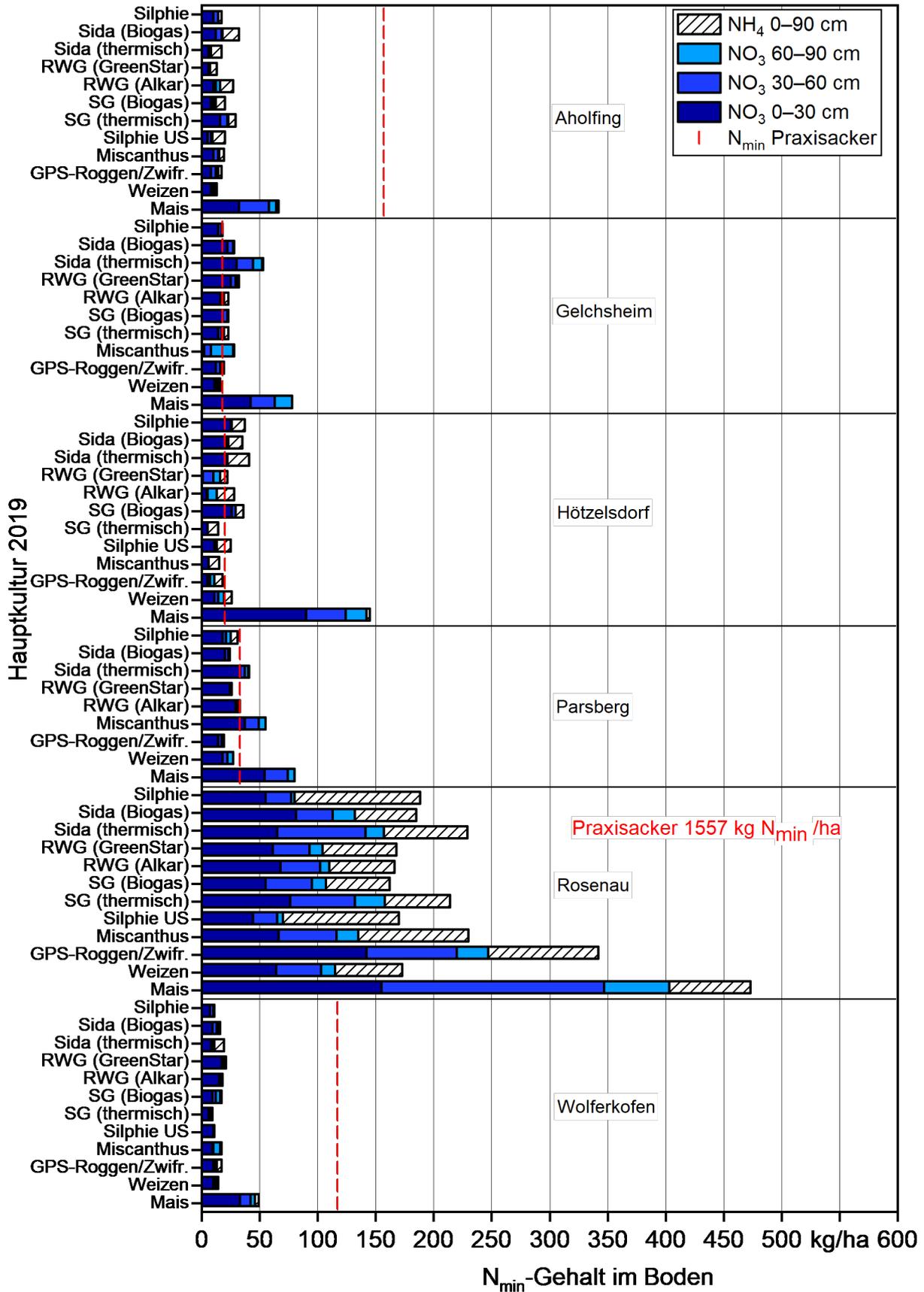


Abbildung 78: Boden-N_{min}-Gehalte im Herbst 2019 (US = Untersaat; rot gestrichelte Linie = vergleichbarer Praxisacker in direkter Nachbarschaft)

5.4 Ökologie (LfL)

5.4.1 Humusgehalte und -Vorräte

Die Untersuchungen zu Humusparametern an den Standorten Aholfing, Gelchsheim, und Wolferkofen zeigten grundsätzlich einen deutlichen Einfluss der Standortbedingungen. Unabhängig von der untersuchten Kultur wurden die höchsten C_{org} - und N_{t} -Gehalte entsprechend dem höheren Tongehalt am Standort Gelchsheim festgestellt. Der Standort Aholfing mit leichterem Boden zeigte deutlich niedrigere C_{org} - und N_{t} -Gehalte sowohl im Ober- als auch im Unterboden. An allen Standorten nahmen die C_{org} - und N_{t} -Gehalte mit der Tiefe ab (Abbildung 79), wobei ein deutlicher Rückgang insbesondere vom Oberboden (0–30 cm) zum Unterboden (30–100 cm) ersichtlich ist. Zwischen den Kulturen ergaben sich etwa fünf Jahre nach Versuchsbeginn an allen untersuchten Standorten und Tiefen keine signifikanten Unterschiede der C_{org} - und N_{t} -Gehalte (Abbildung 79, Abbildung 80). In Gelchsheim wurden in den obersten 15 cm lediglich unter Riesenweizengras tendenziell etwas höhere mittlere Gehalte an C_{org} (14,6 mg/g) und N_{t} (1,6 mg/g) gegenüber der Referenz und den anderen Kulturen festgestellt (12,2–13,1 mg/g C_{org} und 1,4 mg/g N_{t}). Darunter zeigten sich grundsätzlich keine erkennbaren Unterschiede zwischen den Kulturen, lediglich in der untersten Tiefe 70–100 cm wurden für *Miscanthus* leicht erhöhte C_{org} - und N_{t} -Gehalte bestimmt. An den Standorten Aholfing und Wolferkofen sind keine Unterschiede zwischen den Kulturen erkennbar. Im Oberboden (0–15 cm) lagen die C_{org} -Gehalte im Bereich 8,8–9,4 mg/g (Aholfing) bzw. 11,0–11,4 mg/g (Wolferkofen), im Unterboden (70–100 cm) im Bereich 0,4–1,5 mg/g an beiden Standorten.

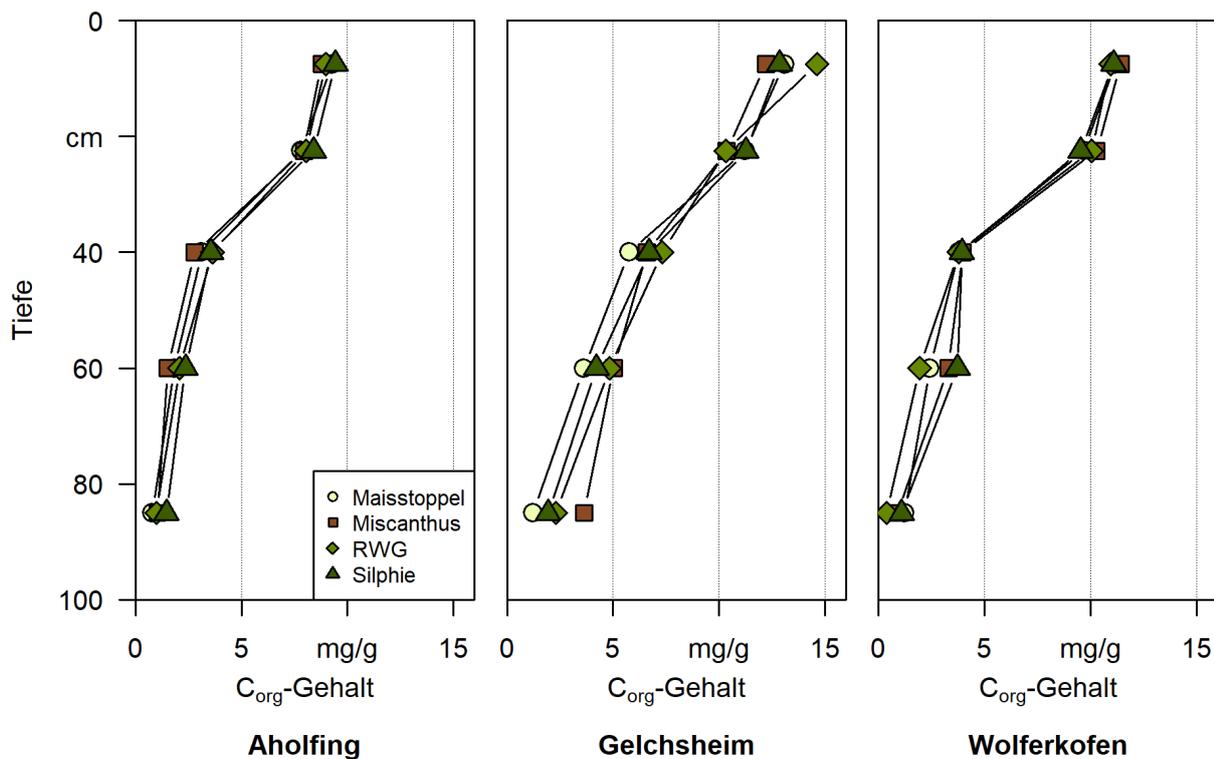


Abbildung 79: Tiefenprofil der Gehalte organischen Kohlenstoffs (C_{org}) an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen)

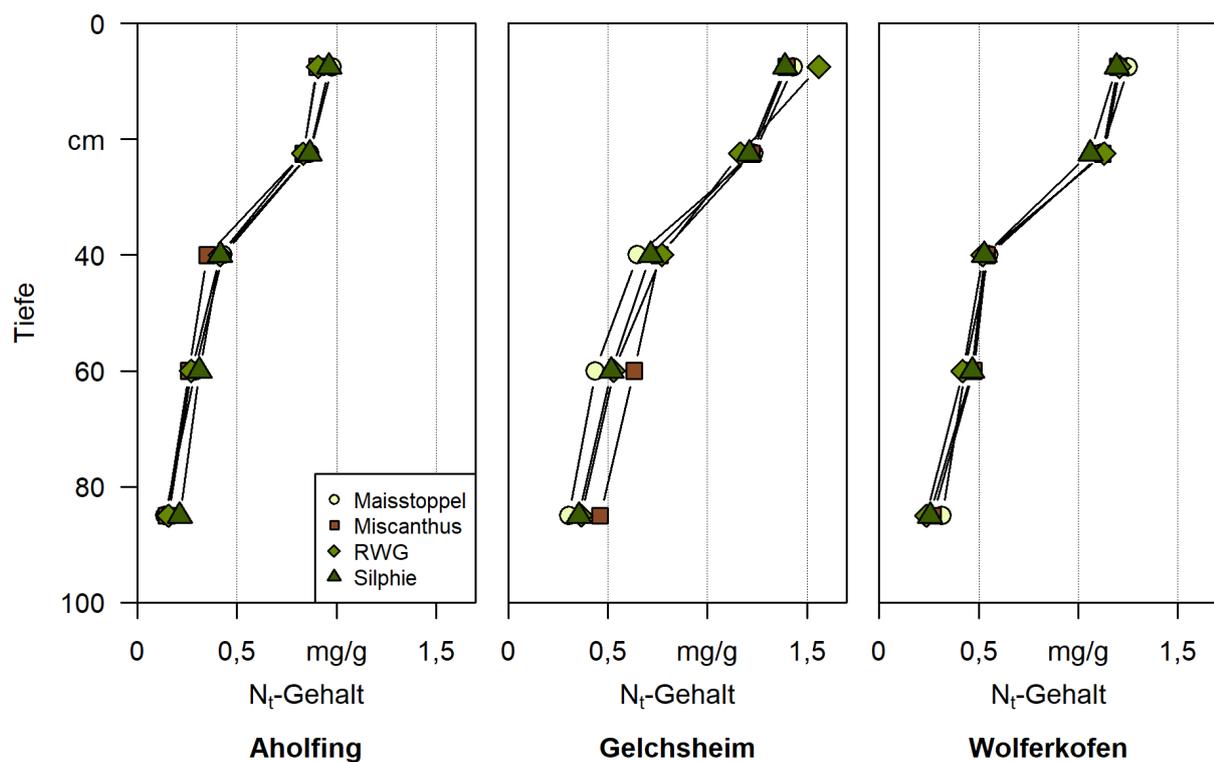


Abbildung 80: Tiefenprofil der Gesamtstickstoff-Gehalte (N_t) an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen)

Hinsichtlich der C/N-Verhältnisse als Indikator für die Qualität der organischen Bodensubstanz wurden ebenfalls keine systematischen Unterschiede zwischen den Kulturen gefunden (Anhang, Tabelle 92). Im Oberboden (0–30 cm) lagen die C/N-Verhältnisse an allen Standorten im Bereich von 8,4–9,9. Im Unterboden (50–100 cm) zeigte sich eine größere Variabilität, wobei sehr niedrige C/N-Verhältnisse bis zu 1,6 auf sehr niedrige C_{org} - und N_{t} -Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze zurückzuführen sind.

Die aus den Bodenkernen ermittelten Lagerungsdichten zeigten grundsätzlich eine relativ hohe Variabilität (Anhang Tabelle 92), was neben der natürlichen Heterogenität der Böden (insbesondere der Unterböden mit relativ hohen Steingehalten) auch auf die Stauchungen bzw. Streckungen der Bodenkern zurückzuführen ist, die über eine lineare Korrektur über den gesamten Unterboden nur ansatzweise korrigiert werden konnten. Im Oberboden (0–30 cm) lagen die Lagerungsdichten an allen Standorten im Bereich 1,33–1,54 g/cm³, im Unterboden zeigte sich für Wolfertkofen ein tendenzieller Anstieg auf Werte von 1,52 bis 1,57 g/cm³ in 70–100 cm, an den anderen beiden Standorten lagen die Werte der Unterböden im Bereich der Oberbodenwerte.

Die pH-Werte zeigten mit Ausnahme der Silphie keine signifikanten Veränderungen zwischen den Kulturen (Abbildung 81). In Oberböden (0–30 cm) lagen die pH-Werte im neutralen bzw. schwach sauren Bereich von 6,5 bis 7,1. In Unterböden (50–100 cm) wurde an den Standorten Aholting und Wolfertkofen ein Anstieg der pH-Werte auf bis zu 7,5 festgestellt, was auf das Vorhandensein von Carbonat zurückzuführen ist. Unter Silphie ergab sich an den Standorten Aholting und Wolfertkofen ein signifikanter Rückgang der pH-Werte auf 6,0–6,2 im Oberboden (0–30 cm), der sich bis in den Unterboden vollzog. Die Gründe hierfür sind nicht bekannt, in einem vierjährigen Feldversuch zu den Auswirkungen des Anbaus der Silphie auf die Bodenqualität in Rheinland-Pfalz wurde kein Rückgang der pH-Werte festgestellt [63].

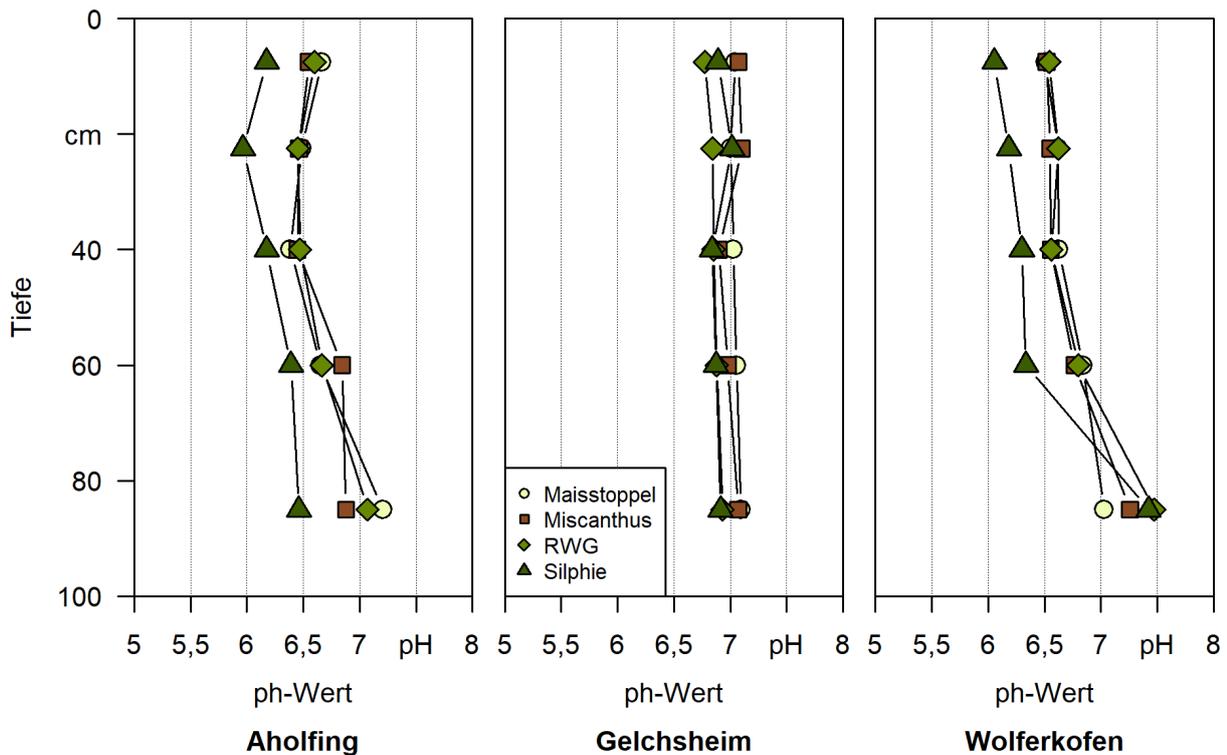


Abbildung 81: Tiefenprofil der pH-Werte an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen).

In Abbildung 82 ist die bei der Probenaufbereitung separat erfasste Menge an Grobwurzeln bzw. Rhizomen > 2 mm dargestellt. Die Werte sind nur als grober Indikator für die Wurzelbiomasse der Kulturen anzusehen, da mineralische Anhaftungen das Gewicht der abgesiebten Wurzelmasse stark verändern können und Feinwurzeln nur zu einem vermutlich geringen Anteil erfasst werden. Zudem werden sehr unterschiedliche Wurzelsysteme miteinander verglichen. Die Ergebnisse weisen auf eine deutlich höhere Grobwurzelmasse von Dauerkulturen hin, die diejenige der Referenz (Mais) um das Acht- bis 27-Fache übersteigt. In Aholfing wurde die größte Masse für die Silphie festgestellt, während in Gelchsheim und Wolferkofen in den Bohrkernen aus den Parzellen mit Miscanthus die meisten Wurzelteile enthalten waren. Der Großteil der Wurzel- bzw. Rhizombiomasse wurde in Oberböden (0–30 cm) abgesiebt, jedoch wurden auch in Unterböden bis 100 cm Tiefe Grobwurzeln gefunden. Allerdings ist anzumerken, dass bei der Probenahme im Oktober/November 2019 der Mais bereits vier bis sechs Wochen davor beerntet wurde, während die Dauerkulturen noch vorhanden waren.

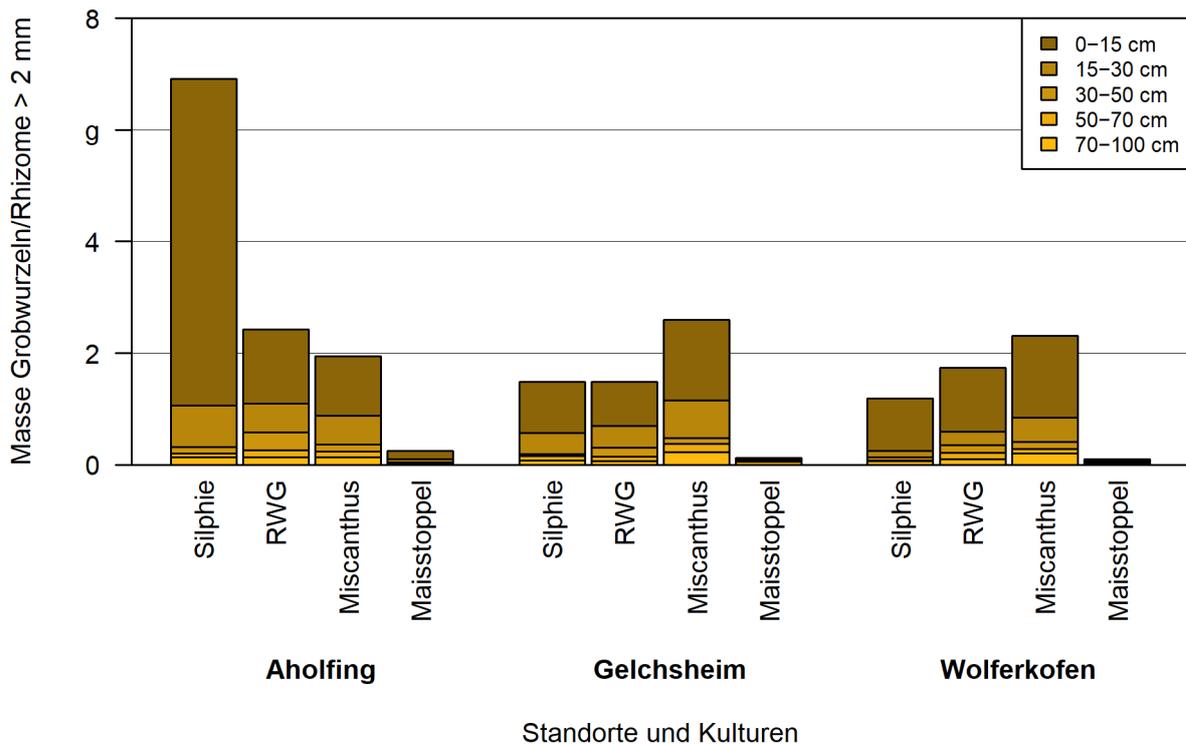


Abbildung 82: Masse der Grobwurzeln/Rhizome (> 2 mm) an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen und gestapelt über die erfassten Tiefenstufen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen)

Die aus den C_{org} -Gehalten und Lagerungsdichten berechneten C_{org} -Vorräte zeigten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kulturen an allen drei Standorten (Abbildung 83). Aufgrund des höheren Tonanteils ergaben sich die höchsten C_{org} -Vorräte am Standort Gelchsheim (8,4–9,9 kg/m²), gefolgt von Wolferkofen (6,3–7,1 kg/m²) und Ahol fing (5,0–6,1 kg/m²). Etwa 50–70 % der Gesamt-vorräte sind in Oberböden (0–30 cm) gespeichert, 30–50 % in Unterböden (30–100 cm). Tendenziell ist zwar ein Trend zu höheren C_{org} -Vorräten unter den untersuchten Dauerkulturen im Vergleich zur Referenz erkennbar (insbesondere in Gelchsheim), die Unterschiede sind aber fast vollständig auf erhöhte C_{org} -Vorräte in der untersten Tiefenstufe (70–100 cm) zurückzuführen. Ein Kulturarten-bedingter C_{org} -Anstieg ausschließlich im Unterboden ohne entsprechende positive Beeinflussung der Oberböden, in denen der Großteil wurzelbürtiger organischer Substanz eingetragen wird (Abbildung 83 [70]), ist unwahrscheinlich. Vermutlich sind die erhöhten Unterbodenwerte auf die hohe standörtliche Variabilität von C_{org} im Unterboden zurückzuführen.

Die Ergebnisse stehen im Widerspruch zur Annahme, dass durch den Anbau von Dauerkulturen ein C_{org} -Aufbau erfolgt und somit ein Beitrag zum Klimaschutz durch die Sequestrierung atmosphärischen Kohlenstoffs gegeben ist [113]. Ein vermuteter positiver Effekt von Dauerkulturen hinsichtlich C_{org} ergibt sich daraus, dass (1) der unterirdische Eintrag organischer Substanz über Rhizome, Wurzeln und Wurzelexsudate im Vergleich zu einjährigen Kulturen deutlich erhöht ist [110] [69], (2) der oberirdische Eintrag organischer Substanz erhöht ist, vor allem aufgrund des Blattfalls im Winter [69] [110] [70], und (3) die Mineralisierung durch Ausbleiben der Bodenbearbeitung reduziert ist [70] [110].

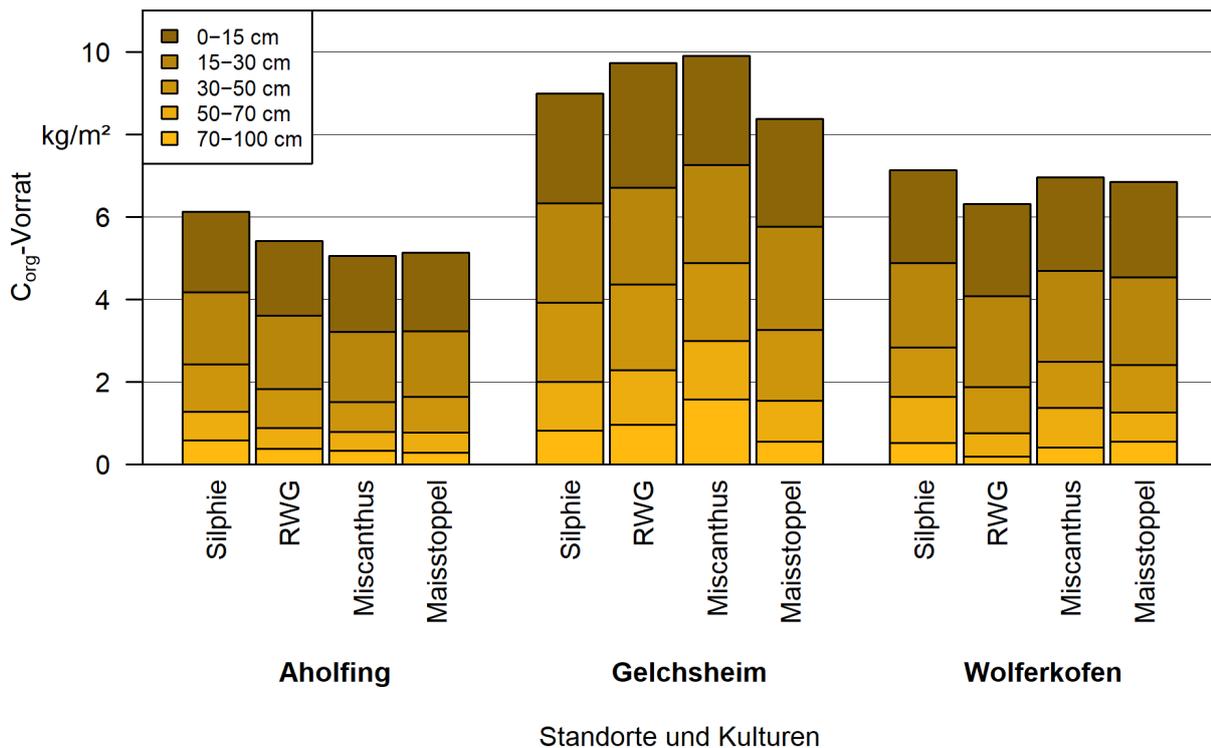


Abbildung 83: Vorrat organischen Kohlenstoffs an den drei untersuchten Standorten für die Kulturen und gestapelt über die erfassten Tiefenstufen im Herbst 2019 (Mittelwerte aus vier Parzellen)

Allerdings zeigten Studien zur Veränderung der C_{org}-Vorräte unter Dauerkulturen sehr widersprüchliche Ergebnisse. Neben oftmals belegten C_{org}-Anstiegen wurden in einigen Studien keine Veränderungen oder sogar rückläufige C_{org}-Vorräte festgestellt [142]. Neben methodischen Schwierigkeiten (z. B. fehlende initiale C_{org}-Bestimmung in Kombination mit standörtlicher Heterogenität der Böden) und einer hohen räumlichen Variabilität des Biomasseeintrags von Dauerkulturen scheint auch die Versuchsdauer entscheidend zu sein [70] [147] [204]. Studien mit einer Versuchsdauer unter zehn Jahren lassen zumeist keine C_{org}-Veränderungen erkennen [70] [204] [148], wohingegen bei Langzeitbeobachtungen (länger als zehn Jahre) durchweg ein signifikanter C_{org}-Anstieg festgestellt wurde [56] [69] [57] [142] [55]. In einer globalen Meta-Analyse zu den langfristigen Effekten (Versuchsdauer > 20 Jahre) mehrjähriger Kulturen auf C_{org} mit 138 Beobachtungen zeigte sich im globalen Durchschnitt ein Anstieg der C_{org}-Vorräte von 20 % bei Betrachtung von Oberböden (0–30 cm) und von 11 % bei Betrachtung des gesamten Bodenprofils (0–100 cm) [110]. Es bleibt anzumerken, dass der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Miscanthus und Switchgras liegt und es kaum Studien zu anderen Dauerkulturen gibt [25]. Es ist also zu vermuten, dass das Ausbleiben eines positiven Effekts der untersuchten Dauerkulturen auf C_{org} auf die relativ kurze Versuchsdauer von etwa fünf Jahren zurückzuführen und langfristig mit einer Zunahme der C_{org}-Vorräte zu rechnen ist. Zudem ist die punktuelle Erfassung der C_{org}-Vorräte mittels einer einmaligen Rammkernsondierung je Versuchsparzelle angesichts der räumlichen Heterogenität der Dauerkulturen mit gewissen Unsicherheiten hinsichtlich der Repräsentativität der Ergebnisse behaftet.

5.4.2 Textur, Lagerungsdichte und Porenverteilung

Die Texturanalyse zur Bestimmung der Bodenart zeigt, dass die Standorte Gelchsheim und Wolferkofen sehr ähnlich sind und etwa vergleichbar variieren von stark tonigem Schluff (Ut4) über stark schluffigen Ton (Tu4) bis mittel schluffigen Ton (Tu3) (Abbildung 84). Diese sind in die Bodenartengruppe Tonschluffe und Schlufftone nach Kartieranleitung einzuteilen. Solche Böden sind als sehr ertragreich einzustufen und haben ein gutes Nährstoffspeichervermögen, neigen jedoch auch stark zur Verschlämmung und Erosion. Vor allem die Korngröße Schluff ist dafür verantwortlich. Die Bodenart der Versuchsfläche in Aholting ist unterschiedlich zu den beiden anderen Standorten und weist sehr hohe Sandanteile auf. Zusätzlich ist die Bodenart über die Versuchsfläche sehr heterogen, was die Wiederholbarkeit aller Ergebnisse beeinflussen kann. Zusätzlich wurden hohe Stein- und Skelettanteile vorgefunden. Die Bodenart variiert demnach von schwach lehmigem Sand (Sl2) über stark lehmigen Sand (Sl4) zu mittel sandigem Lehm (Ls3) sowie schwach tonigem Lehm (Lt2) (Abbildung 84). Grundsätzlich sind Standorte mit hohem Sandanteil ertragsschwächer und weisen eine hohe Infiltrationsleistung auf. Dies bedingt aber ein hohes Verlust- und Auswaschungsrisiko und hält das Wasser nicht lange pflanzenverfügbar.

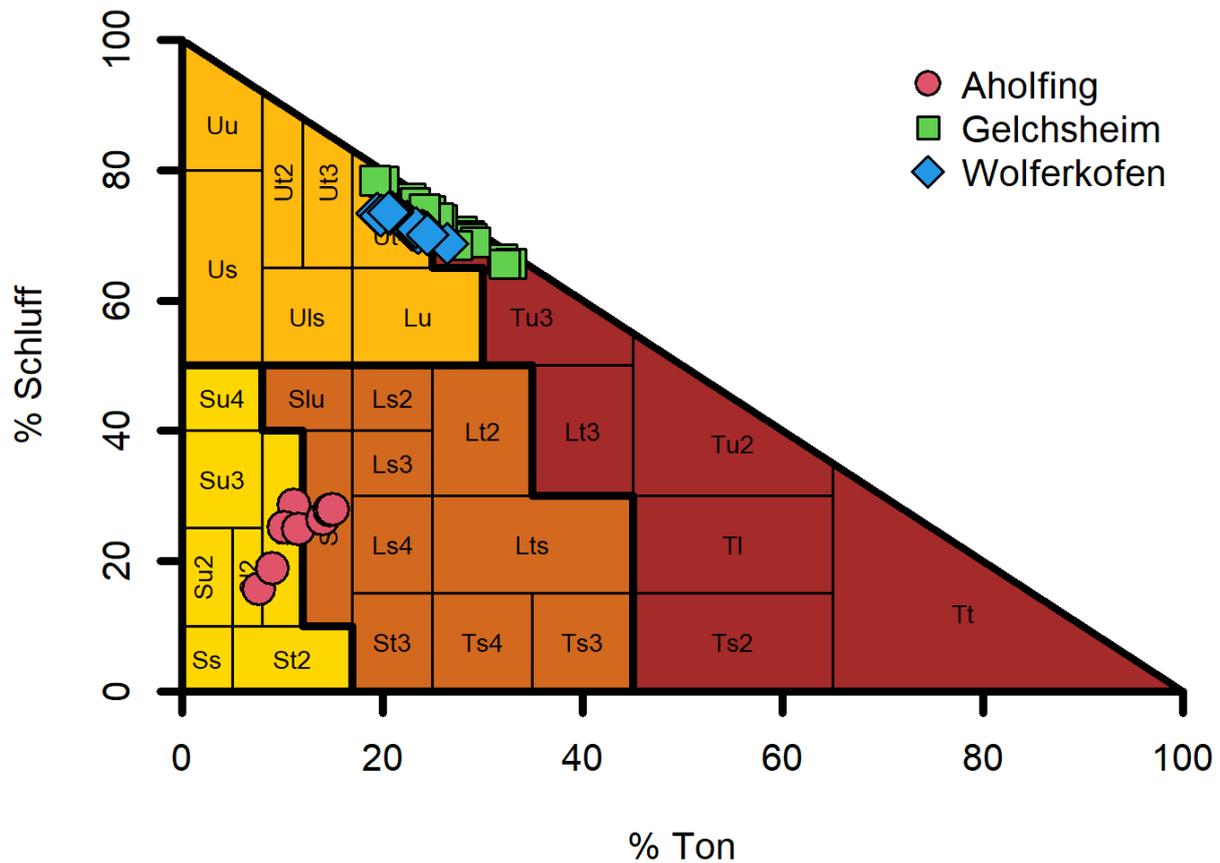


Abbildung 84: Bodenartendreieck mit der Textur an den untersuchten Standorten für den Oberboden (10–15 cm)

Das Gesamtporenvolumen war in Aholzing über alle Varianten und beide Tiefen deutlich geringer als an den übrigen Standorten (Abbildung 85), wobei nur in Aholzing ein signifikanter Einfluss der Kultur nachzuweisen war und die Referenz in 10–15 cm Tiefe ein deutlich niedrigeres Gesamtporenvolumen aufwies als die mehrjährigen Kulturen (signifikante Unterschiede zum Riesenweizengras). Für die Trockenrohdichte wurde entsprechend der umgekehrte Unterschied für den Standort Aholzing nachgewiesen (Abbildung 86). In Wolferkofen lagerte der Boden in 10–15 cm Tiefe nicht nur in der Referenz, sondern auch im Miscanthus deutlich dichter als unter Silphie und Riesenweizengras (signifikante Unterschiede zu Miscanthus). In Gelchsheim wurden in 30–35 cm Tiefe das höchste Gesamtporenvolumen und die geringste Trockenrohdichte gemessen (Abbildung 85, Abbildung 86 rechts). Dies kann möglicherweise auf bodenstrukturelle Mängel oder Verdichtung hindeuten, allerdings auch durch die Textur bedingt sein. In Aholzing kann die Kombination aus Bodenart (sL4) und Bodentyp (Rendzina) ein erhöhtes Verdichtungsrisiko im Oberboden nach sich ziehen.

Auffällig war, dass die Trockenrohdichte und das Gesamtporenvolumen unter Silphie und Riesenweizengras in 30–35 cm auf lockerere Bodenbedingungen als in 10–15 cm hinwiesen, während bei Miscanthus und den Maisstoppelein die Unterschiede geringer waren

(Abbildung 85 und Abbildung 86 rechts). Diese Effekte scheinen auch nicht durch die Bodenart auf den Parzellen bedingt zu sein.

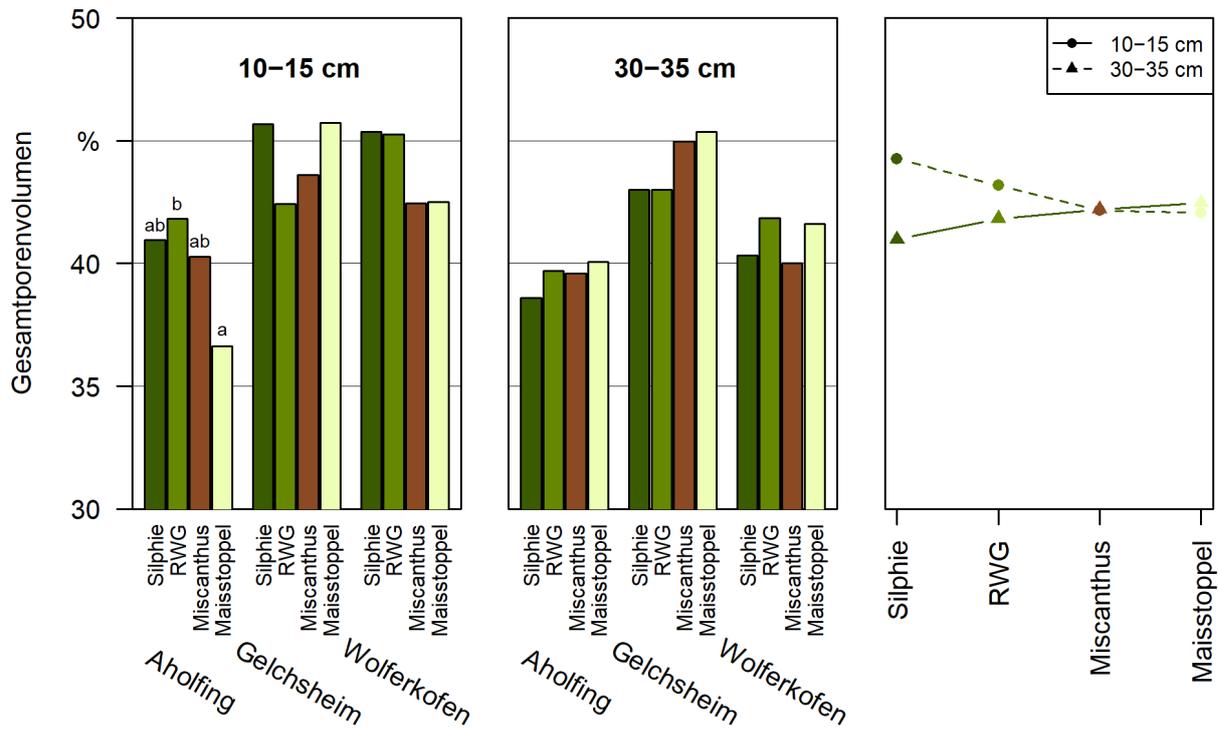


Abbildung 85: Gesamt-porenvolumen des Bodens in 10–15 cm sowie in 30–35 cm Tiefe im Herbst 2019; links und Mitte: Mittelwert der Varianten je Versuchsstandort; rechts: Mittelwert der beiden Tiefen aller Versuchsstandorte über die Varianten, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen

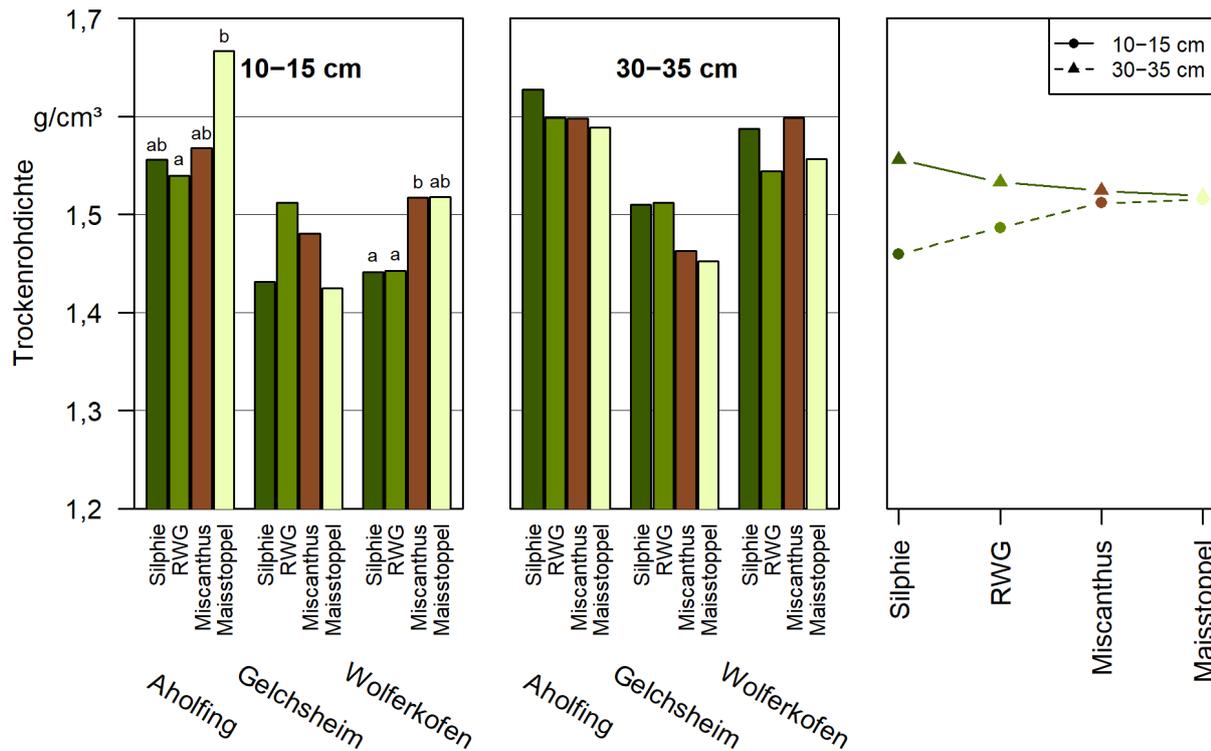


Abbildung 86: Trockenrohddichte des Bodens in 10–15 cm sowie in 30–35 cm Tiefe im Herbst 2019; links und Mitte: Mittelwert der Varianten je Versuchsstandort; rechts: Mittelwert der beiden Tiefen aller Versuchsstandorte über die Varianten, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen

Die im Herbst 2019 erfasste Porenverteilung zeigte mit 9–12 % im Mittel der Versuchsvarianten eine ähnliche Luftkapazität an den drei Standorten und jeweils beiden Tiefen, ausgenommen in Wolferkofen in der Tiefe 30–35 cm mit nur 6 % (Abbildung 87). Der Totwassergehalt verteilte sich analog zum Tongehalt auf die Versuchsstandorte, wobei mit geringen Unterschieden in der Tendenz die Tiefen von 30–35 cm über alle Standorte die höchsten Totwasseranteile und dementsprechend niedrigere nutzbare Feldkapazitäten zeigten.

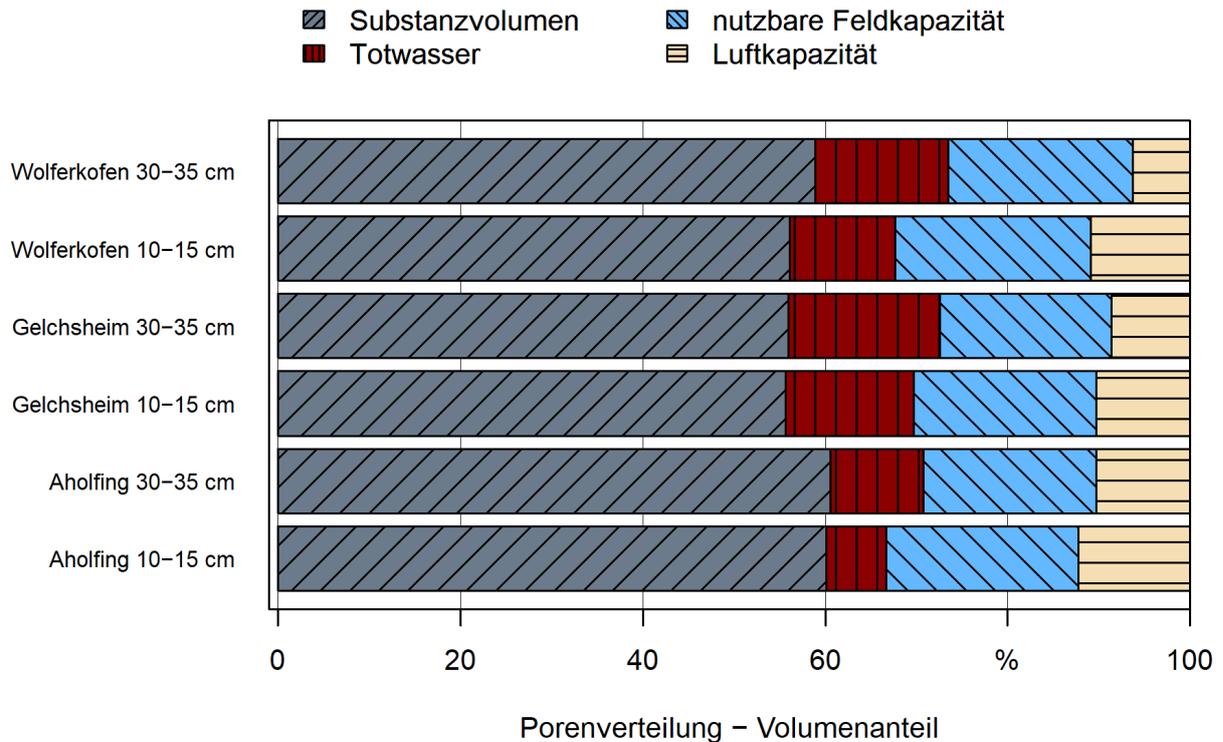


Abbildung 87: Porenverteilung an den Versuchsstandorten im Mittel der Varianten, Probenahme Herbst 2019

Bezogen auf die untersuchten Kulturen über die Standorte war auffällig, dass alle Varianten in Ahol fing geringere Totwassergehalte aufwiesen als die Varianten in Gelchsheim und Wolferkofen (Abbildung 88), wobei an den jeweiligen Standorten zwischen den Kulturen für diese Parameter keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

Die niedrigen Totwasseranteile in Ahol fing in der Variante Riesenweizengras (RWG) sind der Heterogenität der Bodeneigenschaften der Fläche zuzuordnen und mit einem hohen Stein- und Skelettgehalt an diesen Stellen zu erklären.

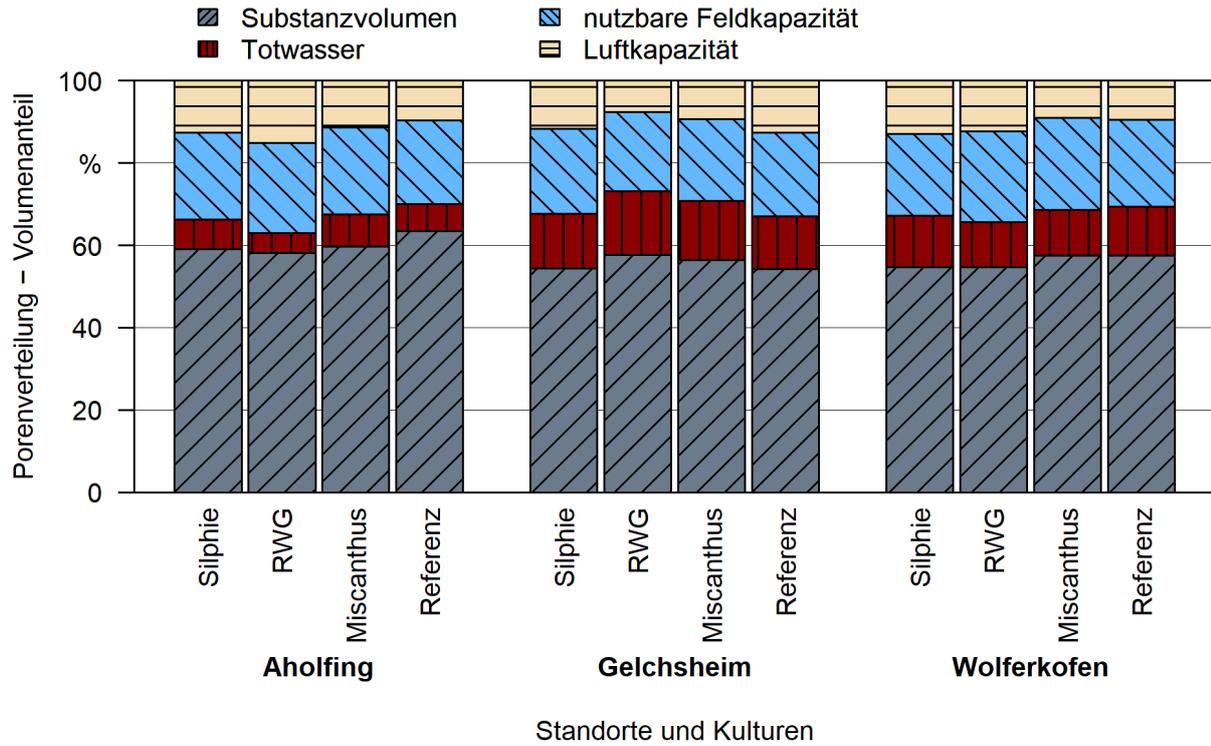


Abbildung 88: Porenverteilung in den Versuchsvarianten an den Versuchsstandorten, Probenahme Herbst 2019 in der Tiefe 10–15 cm

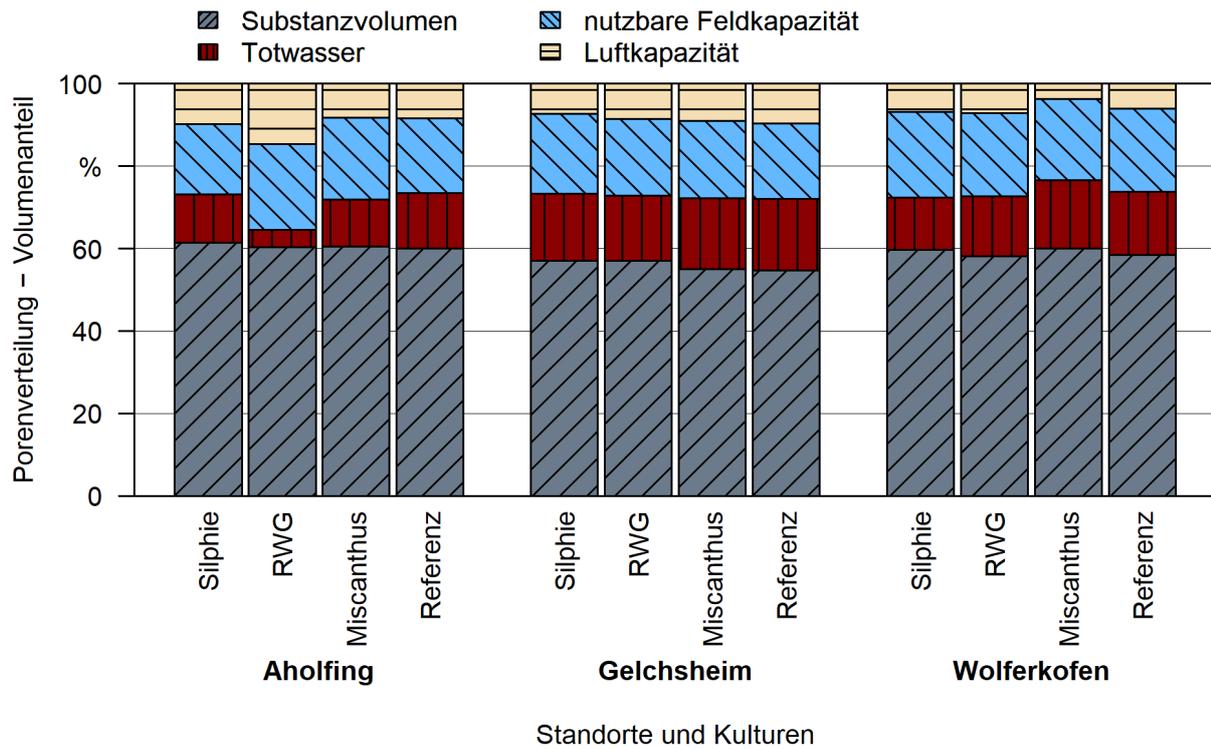


Abbildung 89: Porenverteilung in den Versuchsvarianten an den Versuchsstandorten, Probenahme Herbst 2019 in der Tiefe 30–35 cm

Die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden erst zum Abschluss des Projekts im Herbst 2019 und nicht in allen Varianten sowie nicht auf allen Standorten durchgeführt. Auf die stark von Standortbedingungen, insbesondere der Textur, geprägten Parameter, wie Feldkapazität, Gesamtporenvolumen oder auch Lagerungsdichte (bei intensiver Bodenbearbeitung), haben die Jahre mit Dauerkulturen in den beprobten Varianten noch keine entscheidenden Auswirkungen gezeigt. Allerdings steht hierzu nur eine Momentaufnahme am Ende der Versuchslaufzeit zur Beurteilung zur Verfügung. Unterschiede in der Lagerungsdichte, die bei ausbleibender Bodenbearbeitung erwartet wurden, konnten nur an einzelnen Standorten nachgewiesen werden. Hierbei lagerten die Referenzparzellen mit Maisstoppeln im Oktober im Mittel der Standorte trotz jährlicher Bodenbearbeitung dichter als die Parzellen mit Silphie oder Riesenweizengras. Dies kann möglicherweise durch die verstärkte Durchwurzelung und Regenwurmaktivität erklärt werden. Einen höheren Regenwurmbestand im Boden unter Silphie und Riesenweizengras im Vergleich zu einer annuellen Ackernutzung bestätigen die Ergebnisse in diesem Versuch (siehe Abschnitt 5.4.3.1) und ist aus der Literatur bekannt (z. B. [62] [160]). Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass Dauerkulturen in Verbindung mit der Anreicherung organischen Materials die Lagerungsdichte verringern und die Aggregatstabilität erhöhen können [63] sowie die Porosität des Oberbodens vergrößern.

Genauigkeit und Wiederholbarkeit (mehrere Messtermine, Jahre, Dauer der Messung usw.) sind aufgrund des methodischen Aufwands Grenzen gesetzt, umso wertvoller sind entsprechende erste Ergebnisse. Um den stationären langfristigen Fließprozess im Boden aufzuzeigen, sind Messungen über einen größeren Zeitraum nötig.

Eine Momentaufnahme der Bodenfeuchte wurde für die thermisch genutzten Kulturen Sida, Switchgras und Miscanthus im Vergleich mit Winterweizen der Referenzfruchtfolge im Frühjahr 2019 am Tag der jeweiligen Regenwurmprobenahme durchgeführt (Abbildung 90). Die Messungen an sechs Standorten lassen keinen Vergleich der absoluten Messwerte zwischen den Standorten zu, da die Aufnahmen an unterschiedlichen Tagen entsprechend unterschiedlichen vorherigen Witterungsbedingungen durchgeführt wurden. Jedoch können innerhalb der Standorte die Kulturen verglichen werden. Tatsächlich wurde für das Frühjahr eine signifikant höhere Bodenfeuchte unter Switchgras und Miscanthus als unter Sida und der Referenz mit Winterweizen festgestellt. Die Streuauflage bei Miscanthus und der dichte Bestand des Switchgrases scheinen den Boden vor Austrocknung zu schützen.

Die Arbeiten von EMMERLING (2016) zeigen, dass die Silphie als Dauerkultur für die Biomasseproduktion nach der Ernte verglichen mit Mais lignocellulosereiche Stoppelreste hinterlässt [63]. Auch in dieser Arbeit ergab die Berücksichtigung verschiedener Böden und Bodenarten sowie unterschiedlicher klimatischer Wachstumsbedingungen zum Teil divergierende, standortabhängige Ergebnisse, die für manche bodenphysikalischen Indikatoren keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen zulassen.

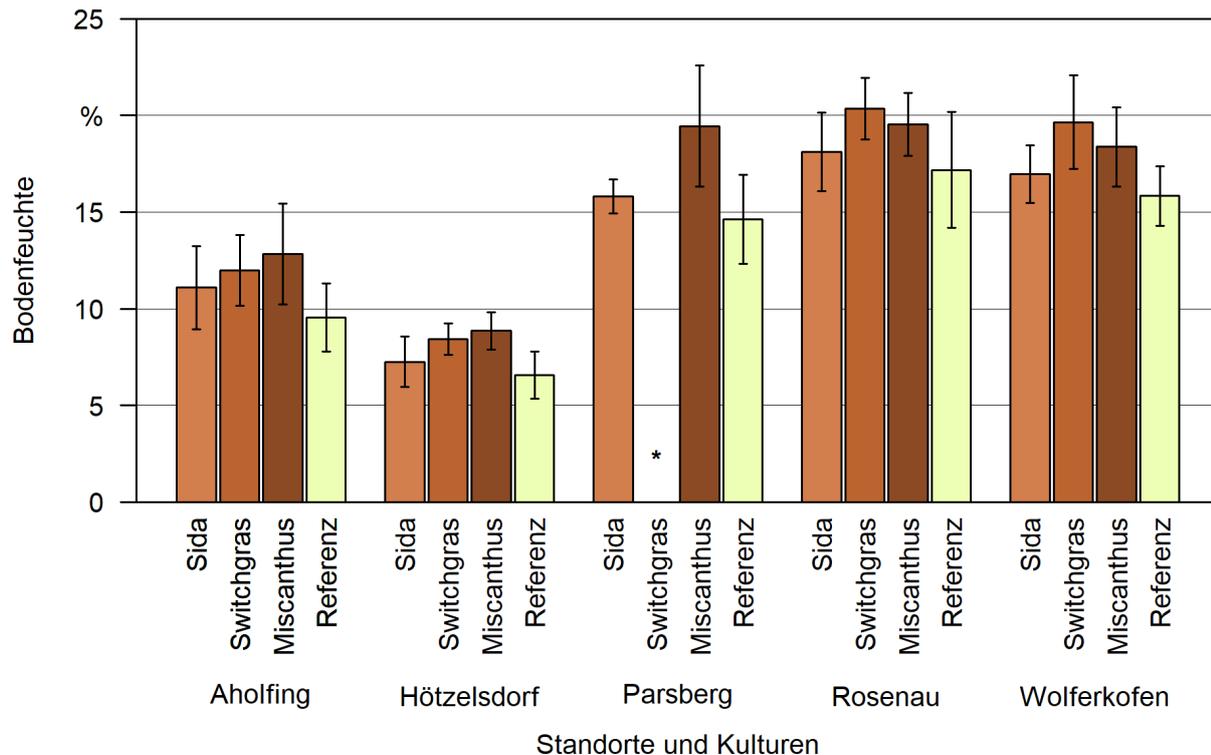


Abbildung 90: Bodenfeuchte der thermischen Kulturen und der Referenz mit Winterweizen im Frühjahr 2019 an sechs Versuchsstandorten (Mittelwerte und Standardabweichung aus $n = 20$) (* in Parsberg kein Switchgras)

Eigene Untersuchungen zusammen mit der TU München und dem TFZ in einem anderen Projekt beschäftigten sich mit dem Beitrag der Silphie zum Erosionsschutz hinsichtlich Bedeckungsgrad und somit Bewirtschaftungsfaktor (C-Faktor) in der AGAB (Allgemeine Bodenabtragsgleichung). Dabei zeigen sich in der Tendenz im Ansaatjahr der Silphie etwa vergleichbar hohe C-Faktoren wie für Mais ohne Mulchsaat. Die Art der Etablierung (Rein- oder mit Maisdecksaat) macht relativ wenig aus. In den Folgejahren zeigt sich die Tendenz, dass der Bodenabtrag bei Silphie dann etwa halb so hoch wie bei Getreide sein wird (mündliche Mitteilung Auerswald, 2020).

Eine weitere Studie belegt, dass eine Kombination aus Faktoren wie Bodenruhe, Streuauflage, höheren Gehalten an organischer Bodensubstanz sowie erhöhter Aktivität von Mikroorganismen und Bodentieren zu einer Gefügestabilisierung (Aggregatstabilität) der Böden unter Dauerkulturen und damit zu einer signifikant geringeren Erosionsdisposition führt [35]. Darüber hinaus postulieren weitere Untersuchungen von Dauerkulturen, dass die Auswaschung von Stickstoff- und Phosphorverbindungen in das Grundwasser oder angrenzende Fließgewässer im Vergleich zu einjährigen Kulturen drastisch reduziert ist und somit der Anbau von Dauerkulturen einen aktiven Beitrag zum Gewässerschutz darstellt [54].

5.4.3 Regenwurmfauna

Regenwürmer unterstützen viele wichtige Funktionen des Bodens, z. B. die Wasserversickerung, den Nährstoffrecyclingprozess, ein stabiles Bodengefüge und tragen durch ihre vielseitigen Leistungen zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit bei [12] [15] [59] [112]. Ein reichhaltiger Regenwurmbestand weist auf einen gesunden, funktionsfähigen und biologisch aktiven Boden hin.

Tabelle 34: Anzahl der von den Regenwurmartens besiedelten Versuchsstandorte ($n = 7$, inklusive des nur in der ersten Projektphase beprobten Standorts Thürnthenning [85], für die Kulturen über den gesamten Untersuchungszeitraum (Projektphasen I und II von 2015 bis 2019)

	Häufigkeit in Deutschland [111]	Silphie	Sida (Biogas)	Sida (thermisch)	Riesenweizengras	Switchgras	Miscanthus	Ackerreferenz
Streubewohner								
<i>Dendrodrilus rubidus</i>	häufig	1	1	–	1	1	1	–
<i>Lumbricus castaneus</i>	häufig	–	–	–	–	1	1	–
<i>Lumbricus rubellus</i>	sehr häufig	3	3	5	3	2	4	2
<i>Aporrectodea handlirschi</i>	selten	–	–	–	1	–	1	1
endogäische Arten								
<i>Allolobophora chlorotica</i>	häufig	5	5	5	5	5	5	5
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	sehr häufig	7	7	7	7	7	6	7
<i>Aporrectodea rosea</i>	sehr häufig	7	6	6	6	5	5	7
<i>Octolasion tyrtaeum</i>	häufig	5	5	5	5	5	5	7
<i>Proctodrilus antipae</i>	selten	–	–	–	1	–	1	–
<i>Proctodrilus tuberculatus</i>	sehr selten	1		1	2	1	2	1
anezische Arten								
<i>Aporrectodea longa</i>	häufig	1	1	1	1	1	1	2
<i>Lumbricus terrestris</i>	sehr häufig	7	7	7	6	5	7	6
Anzahl Arten (insgesamt)		9	8	8	11	10	12	9

Über alle Versuchsstandorte wurden insgesamt zwölf Regenwurmartens nachgewiesen (Tabelle 34). Bezieht man ergänzend zu den Feldversuchsstandorten noch die im ersten

Untersuchungsabschnitt des Projekts beprobten mehrjährigen Praxisflächen von Dauerkulturen ein, konnten unter mehrjährigen Energiepflanzen in Bayern bislang in der Summe 14 Regenwurmart nachgewiesen werden. Hervorzuheben ist, dass auf einer Praxisfläche bei Kirchweidach im Boden unter der Silphie zwei Regenwurmart – *Octodrilus pseudolissaensoides* und *Proctodrilus opisthoductus* – in den Jahren 2014 und 2016 erstmals in Deutschland nachgewiesen wurden [31] [85].

Alle drei bodenbewohnenden Lebensformen, die epigäischen (streubewohnende), die anezischen (tiefgrabende) und die endogäischen (Mineralbodenformen) Regenwurmart sind über die Versuchsstandorte vertreten. Besonders hervorzuheben ist das Vorkommen drei in Deutschland seltener Arten, *Aporrectodea handlirschii* und die beiden hydrophilen Arten *Proctodrilus antipae* und *Proctodrilus tuberculatus* (Tabelle 34). Letztere gilt sogar als sehr selten in Deutschland und *P. antipae* steht auf der Vorwarnliste [111]. *A. handlirschii* war nur in Hötzelndorf nachweisbar, *P. antipae* nur in Wolferkofen und *P. tuberculatus* in Gelchsheim, Thürnthening und als Einzelindividuum in Aholting (Anhang). Alle weiteren neun erfassten Regenwurmart sind in Deutschland weit verbreitete und häufige Arten. Dennoch wurden für manche Arten nur an zwei (*Dendrodrilus rubidus*, *Lumbricus castaneus*, *Allolobophora longa*) oder fünf Versuchsstandorten (*Lumbricus rubellus*, *Allolobophora chlorotica*) Vorkommen erfasst. Häufigste und dominanteste Art in nahezu allen Versuchsstandorten war *Aporrectodea caliginosa*. Auch *Aporrectodea rosea*, *Octolasion lacteum* und *Lumbricus terrestris* sind drei häufige Arten, die mit hoher Stetigkeit an den Versuchsstandorten auftraten (Tabelle 95 bis Tabelle 106). Auffallend ist, dass die Streuauflage besiedelnde epigäische Arten nur am Moorstandort Rosenau eine Bestandsdichte von mehreren adulten Tieren pro Quadratmeter erreichten (Anhang Tabelle 99). Lediglich Einzelindividuen epigäischer Arten waren in Parsberg, Hötzelndorf und Wolferkofen nachweisbar und keine streubewohnende Art wurde über den gesamten Untersuchungszeitraum in Aholting und in Gelchsheim erfasst. Sehr niedrig lag die Bestandsdichte der tiefgrabenden Art *L. terrestris* auf dem Moorstandort Rosenau und auf dem Jurastandort Parsberg. Dagegen war in Hötzelndorf seit der Grundaufnahme im Jahr 2014 eine deutliche Zunahme dieser tiefgrabenden Lebensform feststellbar (Anhang Tabelle 97, Tabelle 103). Auf dem kühlen Mittelgebirgsstandort im Bayerischen Wald wurde mit acht Regenwurmart die höchste Artenvielfalt der Versuchsstandorte nachgewiesen.

5.4.3.1 Regenwurmfauna von Kulturen für die Biogas-Verwertung

Die zur Biogasverwertung genutzten Dauerkulturen Silphie, Sida und Riesenweizengras wiesen vier bis fünf Jahre nach ihrer Etablierung im Mittel über die sechs in 2018 und 2019 beprobten Versuchsstandorte eine signifikant höhere Regenwurmsiedlungsdichte (Abundanz) im Vergleich zu der als Referenz dienenden dreigliedrigen Fruchtfolge mit Silomais als Energiepflanze auf (Tabelle 35).

Tabelle 35: Abundanz, Biomasse und Artenvielfalt der Regenwürmer im Boden als Biogassubstrat genutzter Kulturen im Mittel über sechs Versuchsstandorte vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Beprobung im Herbst 2018, Ausnahme Gelchsheim im Frühjahr 2019; *Lumbricus spec.*: streubewohnende, tiefgrabende Arten; sonstige Arten: v. a. Mineralbodenformen)

		Silphie	Sida	RWG	Referenz
Abundanz in Individuen/m ²	Gesamt	181 ^c	143 ^c	93 ^b	51 ^a
	<i>Lumbricus spec.</i>	45 ^b	41 ^b	20 ^a	15 ^a
	Sonstige Arten	136 ^c	102 ^c	73 ^b	36 ^a
Biomasse in g/m ²	Gesamt	71 ^b	64 ^b	32 ^a	23 ^a
	<i>Lumbricus spec.</i>	43 ^b	38 ^b	17 ^a	13 ^a
	Sonstige Arten	27 ^b	25 ^b	14 ^a	8 ^a
Artenzahl	Gesamt	8	7	9	9
	MW für Standorte	5,0	4,7	4,8	3,8
	MW für Wdh.	4,0 ^b	3,4 ^{ab}	3,2 ^{ab}	2,3 ^a

Insbesondere von der Silphie und von der Sida profitieren Regenwürmer. So lag in diesen beiden Kulturen nicht nur die Abundanz, sondern auch die Biomasse der Regenwürmer signifikant höher als in der Referenz und im Riesenweizengras. Obwohl die Regenwurmbiomasse unter Riesenweizengras sich nicht von der Referenz unterscheidet (Tabelle 35), deutet die dort festgestellte signifikant höhere Abundanz darauf hin, dass unter Riesenweizengras eher kleinere Arten bzw. Individuen profitieren. Darauf weist auch die signifikant höhere Abundanz der sonstigen Arten hin, die sich v. a. aus kleineren endogäischen Arten zusammensetzen. Von der Silphie und von Sida profitieren sowohl die endogäischen Arten als auch die Gattung *Lumbricus*. Letztere setzt sich an vier von sechs Versuchsstandorten überwiegend aus der tiefgrabenden Art *Lumbricus terrestris* zusammen und an einem Standort (Rosenau) aus streubewohnenden Arten. Beide Lebensformen beschleunigen den Streuabbau und profitieren von Bodenruhe und einem hohen Anteil verrottender organischer Substanz auf der Bodenoberfläche. Der Einbau von Streu in den Boden wird dabei vor allem von der nachts an der Bodenoberfläche erscheinenden Art *Lumbricus terrestris* geleistet. Eine Bestandszunahme dieser Art unter Dauerkulturen bestätigen SCHORPP & SCHRADER (2016) [160] für Silphie und FELDYN-SZEWCZYK *et al.* (2019) [67] für Sida. Während auch die tiefgrabende Art *L. terrestris* sich v. a. von dem an der Bodenoberfläche befindlichen Streu (z. B. über Winter abgefrorene Triebe der Silphie) ernährt, nutzen die endogäischen Arten v. a. das verrottende organische Material im Boden. So kann die tiefere und intensivere Durchwurzelung der Silphie im Vergleich zu Mais [157] [154] den endogäischen Arten durch ein höheres Angebot abgestorbener Wurzelmasse mehr Nahrung bereitstellen.

Auffallend sind die sehr niedrigen Abundanz- und Biomassewerte der Regenwürmer in der Referenzvariante, die deutlich unterhalb des für bayerische Äcker bekannten Durchschnitts liegen. Ursache dafür ist wahrscheinlich zum einen die trockene Witterung im Sommer und Herbst 2018 vor der Probenahme der Regenwürmer. Der Grad der Trockenheit zeigte sich noch deutlich im Oktober, als auf dem unmittelbar an den Versuchsstandort Rosenau angrenzenden, bereits abgeernteten Maisfeld größere Mengen humosen Bodens durch Wind verweht wurden (Abbildung 91). Dass langanhaltende Trockenperioden zu Populationseinbrüchen bei Regenwürmern führen können, ist bekannt [60], und vor allem endogäische Arten reagieren empfindlich auf die Bodenfeuchte [160]. Dauerkulturen weisen möglicherweise unter diesen Extrembedingungen, z. B. aufgrund einer höheren Bodenbedeckung, etwas günstigere Lebensbedingungen für Regenwürmer auf, sodass Populationsrückgänge aufgrund von Trockenheit geringer ausfallen als in einer dreigliedrigen Fruchtfolge mit regelmäßiger Bodenbearbeitung mit dem Grubber. Zudem kann in einem Feldversuch mit einer Größe der Parzellen von ca. 20 m Sälänge und 7,5 m Breite auch eine Abwanderung der Regenwürmer hinein in die unmittelbar benachbarten Dauerkulturen nicht ausgeschlossen werden. Regenwürmer können bis zu 5–10 m pro Jahr zurücklegen [123]. Durch die ganzjährige Bodenruhe, eine höhere Streuauflage und intensivere Durchwurzelung sind Dauerkulturen wahrscheinlich attraktiver für Regenwürmer und bieten bei keiner organischen Düngung, wie es unter den Versuchsbedingungen gegeben war, ein kontinuierliches und umfangreicheres Nahrungsangebot für Regenwürmer. Die besseren Lebensbedingungen führen wahrscheinlich auch zu der tendenziell etwas höheren Artenvielfalt im Boden unter Dauerkulturen. Wenngleich die Summe der über alle Versuchsstandorte nachgewiesenen Regenwurmartens bei der Referenz und unter Riesenweizengras mit neun (Tabelle 35) bzw. elf Arten im Riesenweizengras bezogen auf den gesamten Untersuchungszeit seit 2015 (einschließlich des nur in der ersten Projektphase beprobten Standorts Thürnthenning, Tabelle 34) höher lag, so stieg dennoch die mittlere Artenvielfalt je Wiederholung und je Versuchsstandort von der Referenz über Sida und Riesenweizengras zur Silphie an und war je Wiederholung in der Silphie signifikant höher als in der Referenz (Tabelle 35). Zwischen vier und fünf Regenwurmartens entspricht der im Boden eines bayerischen Ackerfeldstücks erfassten mittleren Artenvielfalt [195].



Abbildung 91: Winderosion auf einem an den Versuchsstandort Rosenau angrenzenden, bereits abgeernteten Maisfeld (Beobachtung während der Regenwurmprobenahme im Oktober 2018)

Die Vielfalt der Standorteigenschaften bietet unterschiedliche Wuchsbedingungen für die Dauerkulturen und lässt auch standortspezifische Effekte bei Regenwürmern erkennen. Beispielsweise wurden an vier Standorten signifikant höhere Abundanzwerte der Regenwürmer bei der Silphie im Vergleich zur Sida festgestellt. Allerdings wies an den zwei Versuchsstandorten Aholting und Hötzelstdorf mit leichten Böden und geringer Wasserspeicherfähigkeit die als sehr trockentolerant geltende Sida [75] höhere Siedlungsdichten der Regenwürmer auf als die Silphie (Abbildung 92). Am humosen Standort Rosenau und auf dem steinigen Jurastandort Parsberg lag die Regenwurmabundanz unter Riesenweizen-gras auf ähnlichem Niveau wie unter Sida. Die geringste Siedlungsdichte unter der Silphie wurde am kühlen Mittelgebirgsstandort Hötzelstdorf (648 m über NN) im Bayerischen Wald erfasst. Diese lag dort ähnlich niedrig wie im Boden unter Riesenweizen-gras. Eine ähnliche Siedlungsdichte und Biomasse der Regenwürmer unter Riesenweizen-gras (Sorte Szarvasi) wie unter Silphie wurde in einer Studie in Trier ermittelt [62].

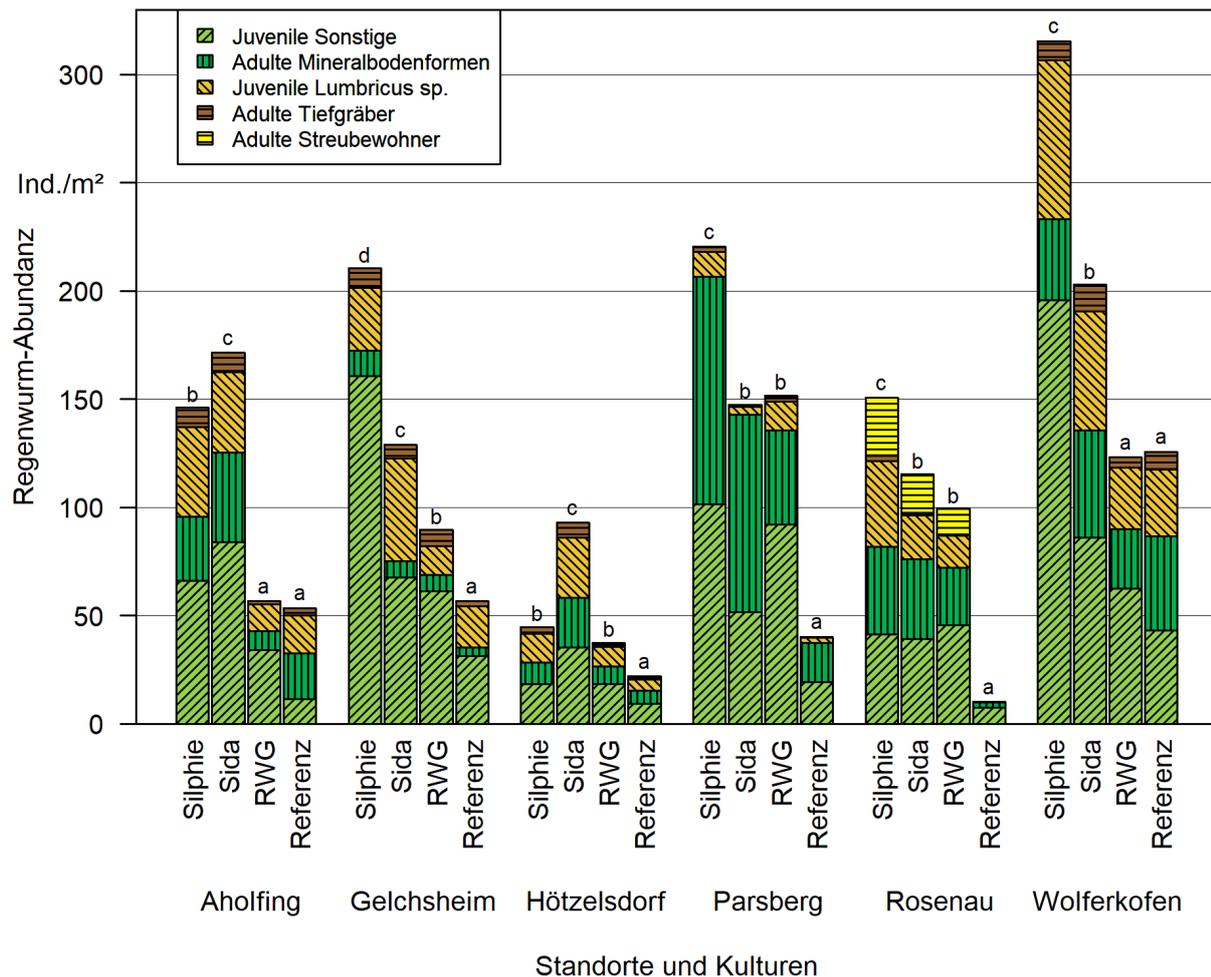


Abbildung 92: Abundanz der Regenwürmer im Boden als Biogassubstrat genutzter Kulturen je Versuchsstandort vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, $n = 4$, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen, Beprobung im Herbst 2018, Ausnahme Gelchsheim im Frühjahr 2019)

Die Regenwurmbiomasse, die an den beiden produktivsten Ackerstandorten Gelchsheim und Wolferkofen am höchsten ist und ein Indikator für die Leistungen der Regenwürmer im Boden darstellt, lässt überwiegend sehr ähnliche Ergebnisse wie die Regenwurmbundanz erkennen. Dennoch bestätigten sich einige signifikante Unterschiede nicht, z. B. waren in der Regenwurmbiomasse am Standort Gelchsheim die Unterschiede zwischen Sida und Riesenweizengras sowie an den Standorten Aholting, Gelchsheim und Wolferkofen die Unterschiede zwischen Silphie und Sida geringer als in der Regenwurmbundanz (Abbildung 93).

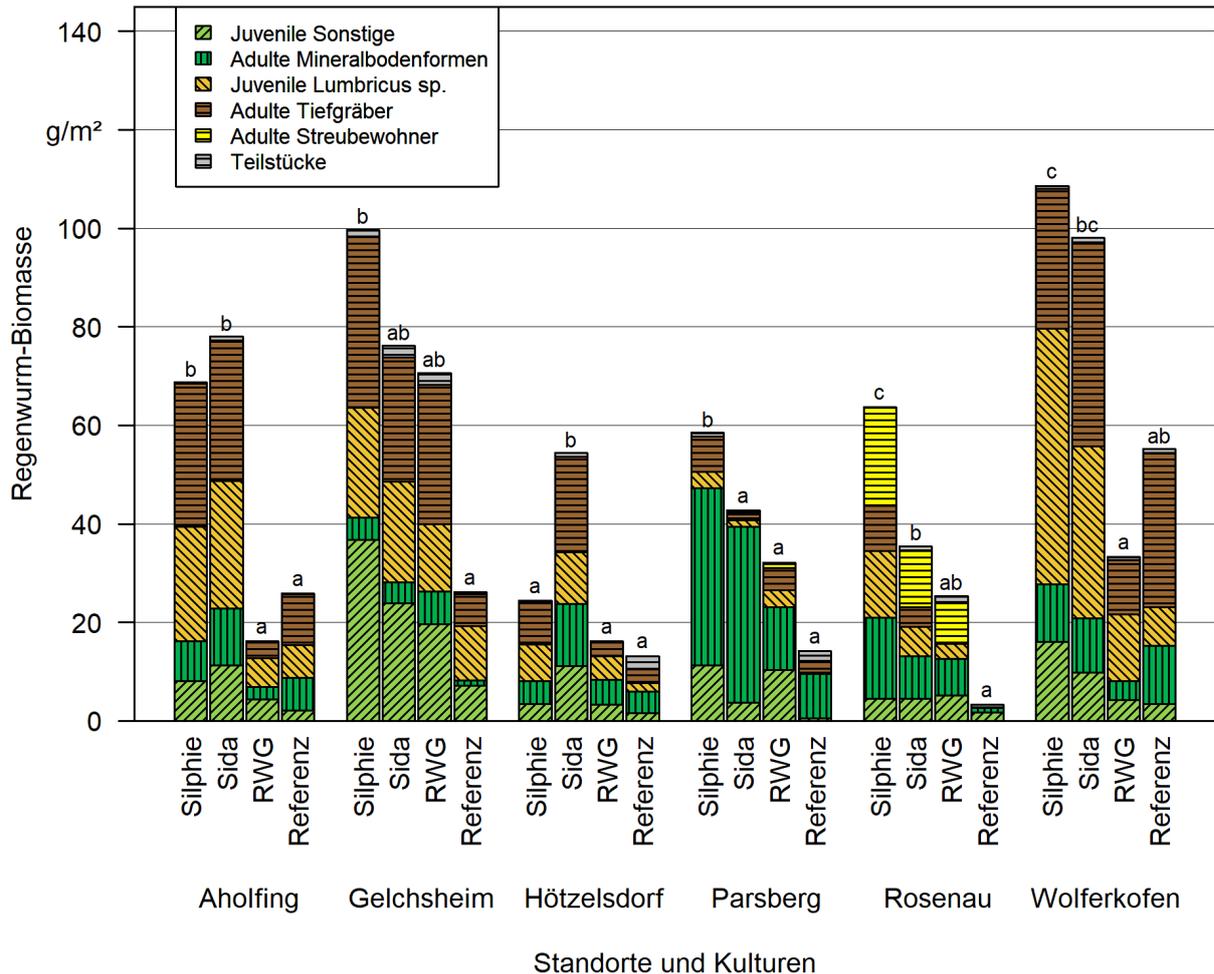


Abbildung 93: Biomasse der Regenwürmer im Boden als Biogassubstrat genutzter Kulturen je Versuchsstandort vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, $n = 4$, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen, Beprobung im Herbst 2018, Ausnahme Gelchsheim im Frühjahr 2019)

Die deutlich positive Wirkung der beiden Dauerkulturen Silphie und Sida auf die Regenwürmer im Boden nahm mit deren Bestandsalter zu. So stieg von ca. 1,5 Jahre bis ca. 4,5 Jahre nach ihrer Etablierung die Abundanz und Biomasse der Regenwürmer im Mittel über vier Versuchsstandorte an (Abbildung 94). Auch auf verschiedenen Untersuchungsflächen in Thüringen und Niedersachsen kam es zu einem Anstieg des Regenwurmbestands mit zunehmendem Alter der Silphie [160].

Über diesen Zeitraum weitgehend unverändert blieb die Regenwurmabundanz unter Riesenweizengras und für die Referenz wurde eine Abnahme ermittelt (Abbildung 94).

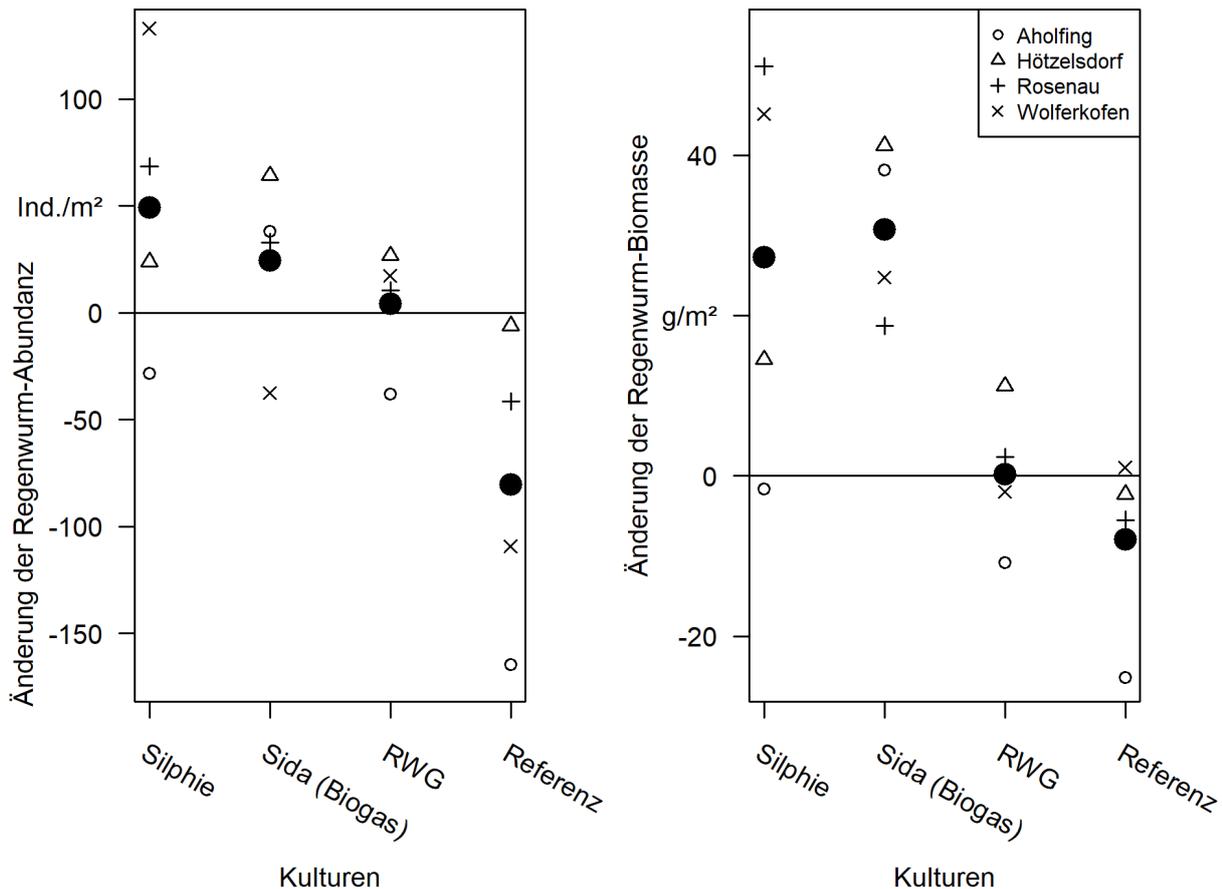


Abbildung 94: Änderung der Abundanz (links) und Biomasse (rechts) der Regenwürmer vom Herbst 2015 bis zum Herbst 2018 im Boden als Biogassubstrat genutzter Dauerkulturen im Vergleich zur Referenz (dreigliedrige Fruchtfolge) für vier Versuchsstandorte (Mittelwerte, $n = 4$; schwarzer Punkt ist das Mittel über die vier Versuchsstandorte)

In der vorliegenden Regenwurmbestandserfassung der Parzellenversuche wurde durch die ausbleibende organische Düngung der Kulturen, die als Biogassubstrat genutzt werden und in denen systembedingt Gärreste anfallen, unter Umständen benachteiligt. Eine organische Düngung mit Gärresten nach der guten fachlichen Praxis fördert den Regenwurmbestand im Boden [32]. Andererseits bietet der hier gewählte Versuchsansatz die Möglichkeit, den direkten Effekt der Kulturpflanze auf die Regenwurmfauna aufzuzeigen. Hierbei ist davon auszugehen, dass Effekte, wie Bodenwasserhaushalt und Mikroklima im Jahresverlauf, sowie Qualität und Menge organischer Reststoffe, wie Streu und Erntereste, entscheidend sind.

5.4.3.2 Regenwurmfauna thermisch genutzter Kulturen

Die thermisch genutzten Dauerkulturen Sida, Switchgras und Miscanthus wiesen vier bis fünf Jahre nach ihrer Etablierung im Mittel über alle sechs Versuchsstandorte sowohl eine signifikant höhere Siedlungsdichte als auch eine signifikant höhere Biomasse der Regenwürmer als die Referenz (dreigliedrige Fruchtfolge mit Silomais als Energiepflanze) auf

(Tabelle 36). Insbesondere von der Sida profitieren Regenwürmer, wie auch andere Studien bestätigen [62] [67]. Demgegenüber wurden unter Switchgras und Miscanthus eine um etwa 40 % geringere Siedlungsdichte und bis zu 60 % geringere Biomasse der Regenwürmer festgestellt. Auch eine Untersuchung in Trier [62] ergab die höchsten Abundanz- und Biomassewerte der Regenwürmer unter Sida und stellte für das als Biogassubstrat genutzte Switchgras eine signifikant niedrigere Regenwurmbiomasse im Vergleich mit mehreren anderen mehrjährigen Energiepflanzen fest. Vor allem die Gattung *Lumbricus spec.*, die an vier von sechs Versuchsstandorten nahezu ausschließlich aus der tiefgrabenden Art *Lumbricus terrestris* und an einem Standort sich vor allem aus den streubewohnenden Arten zusammensetzt, wurde durch den Anbau von Sida gefördert. So lagen sowohl die Biomasse- als auch die Abundanzwerte von *Lumbricus spec.* in der Sida signifikant höher als im Switchgras und in Miscanthus (Tabelle 36). Dass *Lumbricus terrestris* von Sida profitiert, bestätigt auch eine Untersuchung aus Polen [67]. Dennoch konnten sowohl für das Switchgras als auch für Miscanthus im Mittel der sechs Versuchsstandorte signifikant höhere Abundanz- und Biomassewerte im Vergleich zur Referenz festgestellt werden (Tabelle 36).

Über alle im Frühjahr 2019 untersuchten thermischen Kulturen wurde beim Miscanthus mit insgesamt neun Regenwurmarten die höchste Artenzahl erfasst. Wird der gesamte Untersuchungszeitraum seit 2015 betrachtet, so ist der Miscanthus ebenfalls die Kultur, in der mit zwölf Regenwurmarten die größte Artenzahl nachgewiesen wurde (Tabelle 34). Die Artenakkumulationskurven auf Basis der Versuchsstandorte und der einzelnen Probenstellen bestätigen dies und deuten zudem daraufhin hin, dass Dauerkulturen insgesamt vermutlich längerfristig zu einer höheren Diversität der Regenwürmer beitragen (Abbildung 95). Obwohl die Sida in der Artenakkumulation vergleichsweise schlecht abschneidet, nahm die mittlere Artenvielfalt je Versuchsstandort tendenziell von der Referenz über Miscanthus und Switchgras zur Sida zu und lag in der Sida je Wiederholung sogar signifikant höher als in der Referenz (Tabelle 36). Dies weist bei Sida auf eine kleinräumig beständigere höhere durchschnittliche Artenvielfalt hin. Die tendenzielle Zunahme der Artenvielfalt unter mehrjährigen Dauerkulturen bei Berücksichtigung zusätzlicher Standorte im Vergleich zur Referenz (Abbildung 95), deutet dagegen auf eine höhere Diversität aufgrund variierender Standortbedingungen hin.

Tabelle 36: *Abundanz und Biomasse der Regenwürmer im Boden thermisch genutzter Kulturen im Frühjahr 2019 im Mittel über alle sechs Versuchsstandorte vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen; Lumbricus spec. (adulte streubewohnende und tiefgrabende Arten), sonstige Arten (v. a. adulte Mineralbodenformen, Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)*

		Sida	Switchgras*	Miscanthus	Referenz
Abundanz in Individuen/m ²	Gesamt	160 ^c	91 ^b	96 ^b	43 ^a
	Lumbricus spec.	54 ^c	25 ^b	29 ^b	9 ^a
	Sonstige Arten	106 ^c	66 ^b	68 ^b	35 ^a
Biomasse in g/m ²	Gesamt	98 ^c	40 ^b	46 ^b	18 ^a
	Lumbricus spec.	73 ^d	21 ^b	28 ^c	9 ^a
	Sonstige Arten	24 ^b	17 ^b	16 ^b	8 ^a
Artenzahl	Gesamt	7	8	9	8
	MW für Standorte	5,2	4,8	4,6	4,0
	MW für Wdh.	3,4 ^b	3,1 ^{ab}	3,1 ^{ab}	2,0 ^a

* fünf Orte für Switchgras

Trotz ungünstiger Streuqualität bei Miscanthus [64] ist die über den Winter anfallende Streumenge hoch. Die daraus resultierende Isolation des Bodens gegenüber Frost und Kälte ist möglicherweise entscheidend für die positive Wirkung von Miscanthus auf die Abundanz und Biomasse der Regenwürmer im Boden, wie auch andere Studien aus Rheinland-Pfalz [68], Sachsen-Anhalt [183] und Belgien [164] belegen. Zudem weisen Dauerkulturen im Frühjahr wahrscheinlich aufgrund der Bodenbedeckung mit Streu und der Bodenruhe eine höhere Bodenfeuchte als die Referenz mit einer jährlichen Bodenbearbeitung auf (Abschnitt 5.4.2, Abbildung 90). Dies kann v. a. in einem trockenen Frühjahr die Lebensbedingungen von Regenwürmern verbessern. Bei einer Untersuchung der Regenwurmfauna in Kaufering wurde eine Miscanthus-Fläche mit Ackerflächen und Kurzumtriebsplantagen verglichen [33]. Hierbei zeigte sich allerdings ein eher geringerer Regenwurmbestand im Miscanthus trotz sehr guter Bodenbedingungen (mächtige Lößauflage). Auch andere Studien ergaben keinen höheren Regenwurmbestand im Boden unter Miscanthus im Vergleich zu konventionell genutzten Ackerfruchtfolgen [67]. Probleme könnten bei der Ernte im Frühjahr in Miscanthus-Beständen auftreten, da auch hier auf Befahrbarkeit und die Gefahr von Bodenverdichtungen geachtet werden muss.

Auffallend sind wiederum die sehr niedrigen Bestandswerte der Regenwürmer in der Referenzvariante, die deutlich unterhalb des für bayerische Äcker bekannten Durchschnitts liegen. Ursache dafür sind wahrscheinlich dieselben wie bei den als Biogassubstrat genutzten Kulturen (Abschnitt 5.4.3.1).

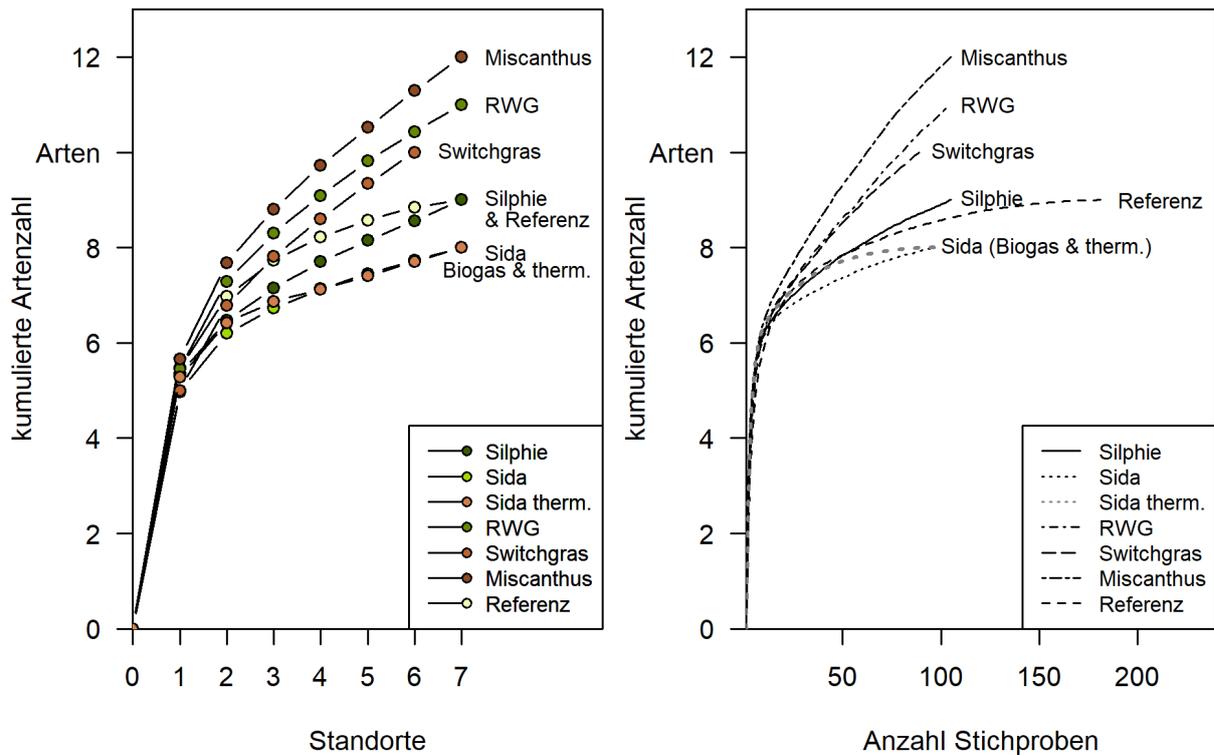


Abbildung 95: Artenakkumulationskurven der Regenwürmer basierend auf Standorten (links) und Proben (rechts) für die Kulturarten über den gesamten Untersuchungszeitraum seit 2015 und einschließlich des Versuchsstandorts Thürnthenning (nur in der ersten Projektphase beprobt [85])

Die deutlich positive Wirkung der Sida auf Regenwürmer bestätigte sich auf allen sechs Versuchsstandorten mit signifikant höheren Abundanzwerten im Vergleich zu Switchgras und der Referenz. Dennoch zeigten sich standortspezifische Effekte. So lag zwar an vier von sechs Standorten die Siedlungsdichte der Regenwürmer unter Sida signifikant höher als unter Miscanthus, allerdings waren an zwei Versuchsstandorten (Aholting und Hötzelsdorf) mit leichten Böden und geringer Wasserspeicherefähigkeit keine Unterschiede zwischen Sida und Miscanthus in der Regenwurmabundanz feststellbar (Abbildung 96).

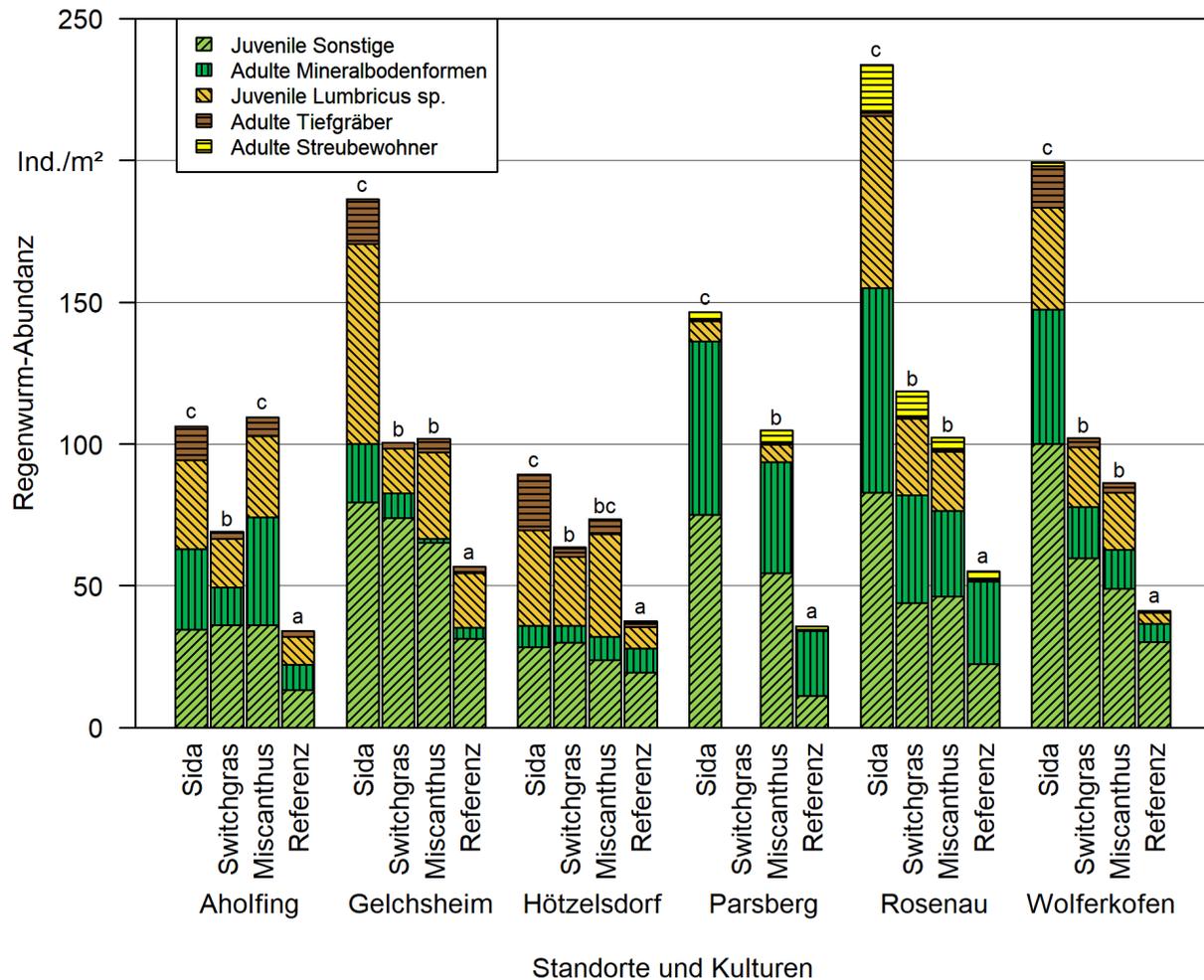


Abbildung 96: Abundanz der Regenwürmer im Boden thermisch genutzter Kulturen je Versuchsstandort im Frühjahr 2019, vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, $n = 4$; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)

In der Regenwurmbiomasse der thermisch genutzten Kulturen bestätigen sich überwiegend die Ergebnisse der Regenwurmbundanz. Die positive Wirkung der Sida auf Regenwürmer zeigt sich an vier Standorten (Aholfing, Gelchsheim, Hötzelstdorf und Wolferkofen) sogar noch ausgeprägter (Abbildung 97). Zurückzuführen ist dies v. a. auf die tiefgrabende Art *Lumbricus terrestris*, die eine Länge von bis zu 30 cm erreichen kann und somit wesentlich zur Regenwurmbiomasse beiträgt. Auffallend ist zudem, dass am steinigen Jurastandort Parsberg in der Regenwurmbiomasse keine Unterschiede zwischen den thermisch genutzten Dauerkulturen und der Referenz nachweisbar waren, in der Abundanz allerdings sehr deutlich Effekte gefunden werden konnten (Abbildung 96).

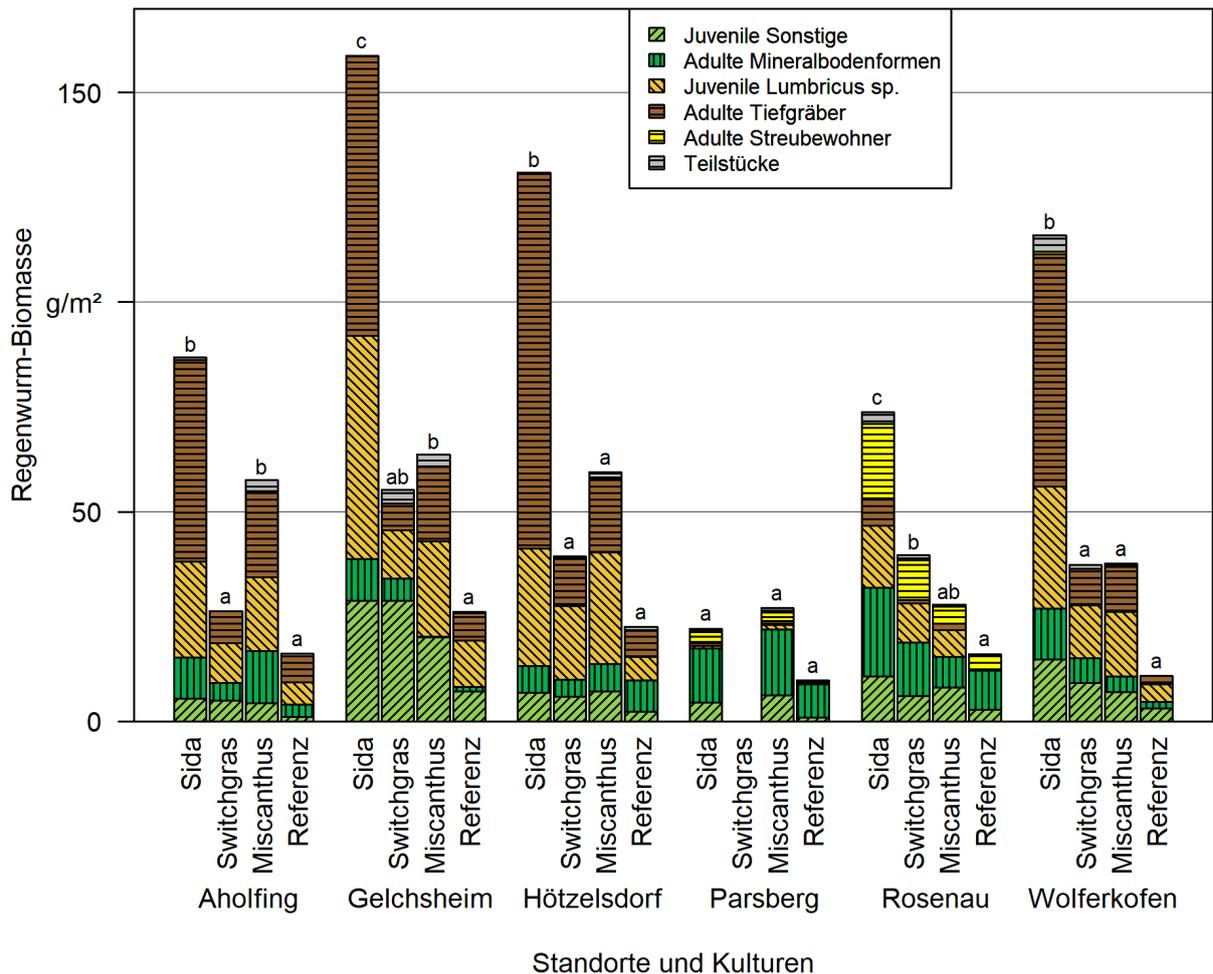


Abbildung 97: Biomasse der Regenwürmer im Boden thermisch genutzter Kulturen je Versuchsstandort im Frühjahr 2019, vier bis fünf Jahre nach Etablierung der Dauerkulturen (Mittelwerte, $n = 4$; Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)

Dass Regenwürmer von der Sida profitieren, bestätigte sich auch mit zunehmendem Alter der Sida. So stieg ca. eineinhalb bis viereinhalb Jahre nach ihrer Etablierung die Regenwurmbiomasse, im Mittel über die zu beiden Zeiträumen untersuchten Versuchsstandorte, an (Abbildung 98). Demgegenüber nahm allerdings die Regenwurmabundanz sowohl unter Sida als auch unter Switchgras, Miscanthus und der Referenz über diesen Zeitraum ab. Verantwortlich dafür ist wahrscheinlich der trockene Herbst 2018, der aufgrund der Trockenheit die Aktivitätszeit der Regenwürmer verkürzte und zu einer geringeren Reproduktionsrate führte. So bildet die Regenwurmabundanz eher kurzfristige Effekte ab, während die Regenwurmbiomasse über die adulten Tiere, die größer sind und mehrere Jahre alt werden können, auch länger zurückliegende Bewirtschaftungs- und Witterungseinflüsse aggregiert. Dass die Witterung eine wesentliche Wirkung auf den Regenwurmbestand im Boden hat, ist bekannt [60] [182]. Darauf weisen auch die Zunahmen der Regenwürmer am kältesten Mittelgebirgsstandort Hötzelstdorf im Bayerischen Wald über alle Varianten sowohl in ihrer Abundanz als auch in ihrer Biomasse hin. Möglicherweise sind dafür

mildere Temperaturen verantwortlich. So liegt die optimale Temperatur für *L. terrestris* bei 11 °C (5 cm über der Bodenoberfläche) [160].

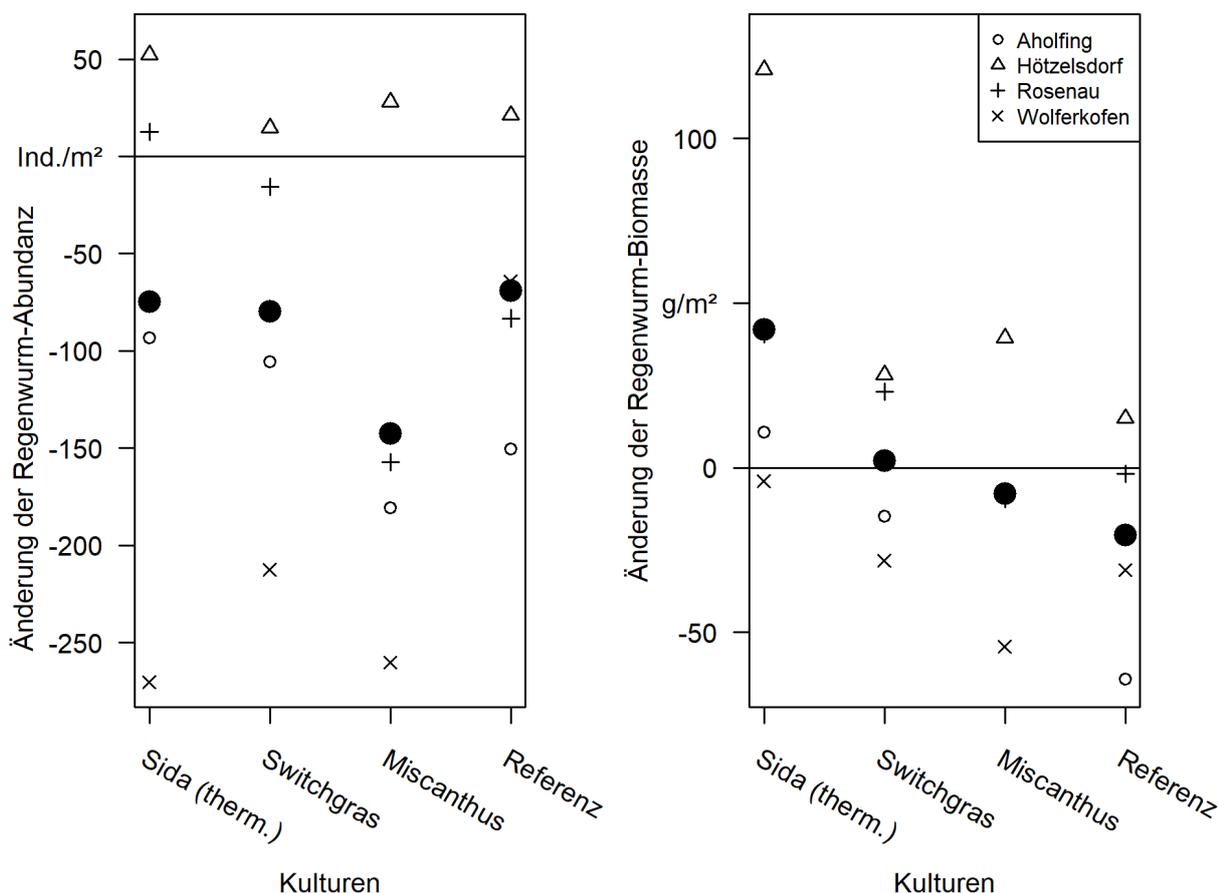


Abbildung 98: Änderung der Abundanz (links) und Biomasse (rechts) der Regenwürmer vom Frühjahr 2016 zum Frühjahr 2019 im Boden der thermisch genutzten Dauerkulturen im Vergleich zur Referenz (dreigliedrige Fruchtfolge) für vier Versuchsstandorte (Mittelwerte, $n = 4$; schwarzer Punkt ist das Mittel über die vier Versuchsstandorte)

5.4.3.3 Zusammenfassende Bewertung der Wirkung der Dauerkulturen auf Regenwürmer

Insgesamt zeigen die Ergebnisse aus den Feldversuchen ca. viereinhalb Jahre nach Versuchsbeginn einen klaren Vorteil der Dauerkulturen für Regenwürmer gegenüber der als Referenz dienenden dreigliedrigen Fruchtfolge mit einer regelmäßigen Bodenbearbeitung. Damit bestätigen sich die bereits auf Praxisflächen in Bayern festgestellten deutlichen positiven Effekte der Dauerkulturen auf Regenwurmdichte und -biomasse [31] [85]. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Studien aus anderen Regionen Deutschlands [62] [160].

Unter den als Biogassubstrat genutzten Kulturen profitierten Regenwürmer am stärksten von der Silphie sowie von Sida, unter den thermisch genutzten Kulturen war der positive Effekt bei Sida am größten. Obwohl demgegenüber bei Riesenweizengras, Switchgras

und *Miscanthus* die Bestandswerte der Regenwürmer deutlich niedriger lagen, wiesen diese im Mittel der Untersuchungsstandorte signifikant höhere Abundanzwerte als die Referenz auf. Ein hoher Regenwurmbesatz regt v. a. den Zersetzungsprozess abgestorbenen organischen Materials an, fördert den Aufbau eines stabilen Bodengefüges und erhöht die Dränfähigkeit und Durchlüftung des Bodens. Vor allem die tiefgrabende Art *Lumbricus terrestris*, die besonders von Dauerkulturen profitiert, verbessert mit ihren stabilen vertikalen Röhren die Wasserversickerung in den Boden und leistet somit einen Beitrag zum Erosionsschutz [107]. Ein gutes agrarökologisches Potenzial der Dauerkulturen kann somit bestätigt werden [160].

Für die insgesamt positive Wirkung der Dauerkulturen auf Regenwürmer ist wahrscheinlich das höhere Nahrungsangebot der Dauerkulturen durch Streuaufgabe, Erntereste, Wurzelmasse im Boden sowie die seit ca. fünf Jahren andauernde Bodenruhe im Vergleich zu einer dreigliedrigen Fruchtfolge mit Mais als Energiepflanze und regelmäßiger Bodenbearbeitung entscheidend. Die Silphie als diejenige mehrjährige Energiepflanze mit dem derzeit relativ größten Anstieg ihrer Anbaufläche in Bayern, von etwa 75 ha im Jahr 2015 auf etwa 1100 ha 2019, stellt eine hohe Streumenge für Zersetzungsprozesse dem Bodenleben und somit den Regenwürmer als Nahrungsressource zur Verfügung. Geschätzt werden bis zu 8 t pflanzliche Silphierückstände als Trockenmasse pro Hektar und Jahr [154]. Die Aktivität von *Lumbricus terrestris* fördert zudem das Pflanzenwachstum der Silphie. So ergaben Phytokosmenversuche, dass die Anwesenheit von *L. terrestris* bei der Silphie, vor allem in sandigen Böden, zu einer höheren Biomassebildung der Silphiewurzeln und Sprösslinge führte [46]. Von einer zunehmenden Pflanzenartenvielfalt, z. B. durch Beikräuter, die insbesondere bei Sida an vielen Standorten eine höhere Bodenbedeckung einnahmen, profitieren die endogäische Regenwurmart, vermutlich als Folge von Wurzelexsudaten [130].

Miscanthus weist zwar eine eher ungünstige Streuqualität für Regenwürmer auf [64], doch ist die über den Winter als Streu anfallende Blattmasse hoch. So können der über den Winter stehende Pflanzenbestand thermisch genutzter Kulturen sowie die hohe Streumenge auf der Bodenoberfläche und die daraus resultierende Abpufferung einer kühlen Witterung die Lebensbedingungen für Regenwürmer durch ein günstigeres Mikroklima im Boden verbessern und ihre Aktivitätsperiode verlängern [153].

Generell sind bei Dauerkulturen wahrscheinlich der hohe und länger andauernde Bodenbedeckungsgrad durch die Streuaufgabe sowie die ganzjährige Bodenruhe auch bei langanhaltenden Trockenperioden wie im Sommer 2018 entscheidend, die zu einem geringeren Wasserverlust aus dem Boden führen und somit die Lebensbedingungen für Regenwürmer begünstigen und Populationseinbrüche minimieren können. Der Boden unter mehrjährigen Kulturen bietet dadurch der Bodenfauna wahrscheinlich einen stabileren Lebensraum, der gegenüber den im Klimawandel vermehrt zu erwartenden Extremwetterereignissen, wie langanhaltenden Trockenperioden, resilienter ist. Um sich den Herausforderungen des Klimawandels zu stellen, bieten Dauerkulturen als innovative Anbauverfahren wahrscheinlich die Chance, durch Diversifizierung das Risiko zu streuen [195].

5.4.4 Laufkäfer (Bodenfallen)

Insgesamt wurden in der Summe über vier Versuchsstandorte 5916 Laufkäfer aus 60 Arten im Zeitraum 02.03.2017 bis 16.05.2017 gefangen (Anhang, Tabelle 94). Die häufigste Art war *Bembidion lampros*. Die höchste Aktivitätsdichte (gemittelt über den gesamten Zeitraum und die untersuchten Kulturen) wurde in Rosenau mit 1,05 Laufkäfern pro Tag und Falle festgestellt. Die übrigen Standorte zeigten ähnliche Aktivitätsdichten (0,45 Aholting, 0,48 Hötzelsdorf, 0,49 Wolferkofen). Die Aktivitätsdichte nahm von der ersten Fangperiode zur zweiten deutlich zu (Abbildung 99), was auf das Erscheinen adulter Laufkäfer aus den Überwinterungsquartieren hindeutet. Hauptsächlich kleine räuberische Arten (65 %, Gattung *Bembidion* 38 %) wurden in den ersten zwei Fangperioden gefangen. Mit Ausnahme von Hötzelsdorf nahm die Aktivitätsdichte danach wieder deutlich ab. In Hötzelsdorf war die Aktivitätsdichte vom 03.04. bis 08.04. sogar höher als in der Fangperiode zuvor. Es kann vermutet werden, dass die Höhenlage und die hier niedrigeren Temperaturen ursächlich für diese Beobachtung sind. Die insgesamt höchste Aktivitätsdichte dieser Untersuchung wurde in der letzten Fangperiode während der ersten zwei Maiwochen festgestellt. Ein außergewöhnlicher Kälteeinbruch in der zweiten Aprilhälfte 2017 könnte den deutlichen Rückgang der Fangzahlen zwischen dem 18.04. und 02.05. erklären. Die Untersuchungen waren beendet, bevor als Larven überwinterte Arten, wie *Pterostichus melanarius* in großer Zahl aktiv wurden. Diese in Mitteleuropa dominante Art auf Äckern wurde nur in geringer Dichte (insgesamt 30 Individuen) gefangen. Die meisten Arten wurden in Rosenau (46) nachgewiesen, am wenigsten in Wolferkofen (25). In Hötzelsdorf wurden 28 und in Aholting 38 Arten festgestellt.

Die Unterschiede der Laufkäfergemeinschaften der untersuchten Energiepflanzen waren nicht besonders deutlich. Standorteigenschaften, die vorausgegangene Bewirtschaftungsweise und die umgebende Lebensraumvielfalt bestimmen nicht nur die vor Ort auftretende Artengemeinschaft, sondern hatten in dieser Studie einen deutlich größeren Einfluss als die Kulturart. Dies ist für Feldversuche nicht sehr überraschend, da trotz eines Großparzellenversuchs die Versuchsparzellen mit einer Größe von ca. 20 m Sälänge und 7,5 m Breite für mobile Tiere vergleichsweise klein sind und die Standorte sich hinsichtlich der umgebenden Landschaft und verschiedener Umweltparameter deutlich unterscheiden. Nimmt man alle Proben zusammen, so war die Artenvielfalt der Laufkäfer am höchsten unter Sida (Tabelle 37). Die übrigen Kulturen zeigten eine vergleichbare Artenzahl. Der Mittelwert der Artenzahlen auf der Ebene der Standorte und der Versuchswiederholungen deutet ebenfalls darauf hin, dass die Sida die meisten Arten beheimatet. Die geringsten Artenzahlen wurden für das Riesenweizengras nachgewiesen und Sida wies im Vergleich zum Riesenweizengras eine durchschnittlich signifikant höhere Artenzahl je Wiederholung auf. Die Kulturart konnte keinen signifikanten Anteil der Variation in generalisierten gemischten Modellen für die Artenzahlen erklären. Allerdings deuteten die multiplen Vergleiche eine höhere Artenvielfalt in der Sida gegenüber dem Riesenweizengras an. Artenakkumulationskurven auf Basis der Versuchsstandorte und der einzelnen Proben (Bodenfalle) bestätigten die höhere Artenvielfalt in der Sida (Tabelle 37). Zusammen mit dem Riesenweizengras stieg die Artenvielfalt hier bei der Berücksichtigung zusätzlicher Standorte im Vergleich zum Winterweizen und der Silphie leicht stärker an (Abbildung 100). Dies

deutet auf eine höhere Diversität oder höhere Variation der Eigenschaften der Kulturen aufgrund variierender Standorteigenschaften hin. Ebenso relevant sind Unterschiede in der Artenausstattung der verschiedenen Landschaften. Die auf Individuen basierenden Artenakkumulationskurven bestätigen die geringste Artenvielfalt im Riesenweizengras. Die Zunahme der Arten konnte nicht mit verringerter Fangeffektivität in dieser Kultur in Zusammenhang gebracht werden, sondern scheint tatsächlich auf eine artenärmere Laufkäferfauna zurückzuführen zu sein. Im Gegensatz hierzu fanden PLATEN *et al.* (2017) in Brandenburg die höchste Artenvielfalt von Spinnen und Laufkäfern in Feldern mit Riesenweizengras und Wildpflanzenmischungen im Vergleich mit Silphie und Maisfeldern und führten dies auf die komplexe Vegetationsstruktur zurück [141]. In den vorliegenden Untersuchungen wurde der Sommeraspekt der Laufkäferfauna nicht berücksichtigt, die Klimabedingungen, insbesondere die Niederschläge unterscheiden sich deutlich von denen in Brandenburg und die Bewirtschaftung war wie für Feldversuche üblich intensiver, was zu einem nahezu unkrautfreien Bestand führte. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass die komplexe Vegetationsstruktur und das geringe Wachstum im Sommer, mit den daraus resultierenden warmen Bedingungen nach dem ersten Schnitt, die Laufkäferfauna später im Jahr bereichern. Es ist zu erwarten, dass dichte und schattige Habitate, wie Mais- oder Silphiefelder, vor allem im Sommer eine andere Fauna anziehen bzw. beheimaten als lichtere Kulturen.

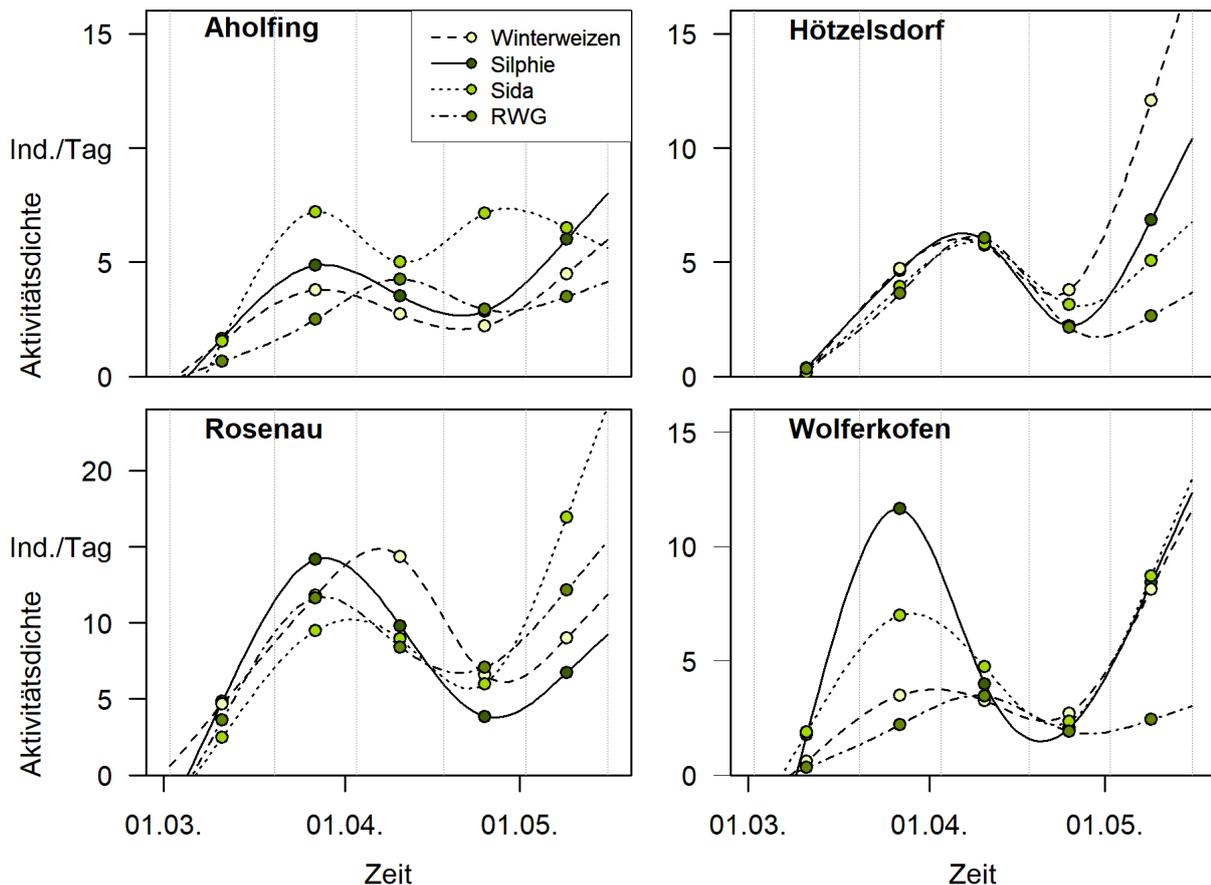


Abbildung 99: Zeitlicher Verlauf der Aktivitätsdichte der Laufkäfer im Frühjahr 2017 an den vier untersuchten Standorten (Kurven wurden geglättet [piecewise polynomial adjustment], Punkte repräsentieren die Aktivitätsdichte in der Mitte des Leerungsintervalls, vertikale Linien stellen die Leerungsintervalle dar)

Die Diversität (inverser Simpson-Index) der Laufkäfergemeinschaft war ebenfalls im Riesenweizengras am geringsten (Tabelle 37). Die übrigen Kulturen unterschieden sich nicht voneinander. Auch die Aktivitätsdichte war am geringsten im Riesenweizengras und am höchsten in der als Biogassubstrat genutzten Sida. Der Effekt der Kulturart konnte als signifikant bestätigt werden. Die Sida zeigte eine signifikant höhere Aktivitätsdichte als das Riesenweizengras, aber die Standorte waren hinsichtlich der Abfolge der Aktivitätsdichte der einzelnen Kulturen nicht konsistent. Beim Vergleich von Aktivitätsdichten ist zu berücksichtigen, dass diese nicht mit der tatsächlichen Siedlungsdichte in Relation stehen müssen. Tatsächlich beeinflusst die Vegetationsdichte die Aktivitätsdichte der Laufkäfer nicht linear [96]. Hunger kann bei Laufkäfern zu erhöhter Aktivität führen [72] und andere Faktoren wie das Mikroklima sind von Bedeutung [151]. Auf Parzellen mit Sida war die Aktivitätsdichte samenfressender Laufkäfer mehr als 2,3 bzw. sieben Mal höher als auf Parzellen mit Silphie, Winterweizen bzw. Riesenweizengras. Das Auftreten samenfressender Laufkäfer war übereinstimmend mit der stärksten bei Sida auftretenden Verunkrautung (Abbildung 32) am ausgeprägtesten. In Wolferkofen, wo die Sida die beste Wachstumsleistung zeigte, war für diese Kultur auch die geringste Anzahl samenfressender Laufkäfer zu

finden. Samenfressende Laufkäfer tragen tatsächlich einen großen Teil zur Artenvielfalt der Laufkäfer in der Agrarlandschaft bei (ungefähr 40 % der Arten mit einem Hauptvorkommen in der Agrarlandschaft sind samenfressende).

Tabelle 37: Ergebnisse zur Laufkäferfauna im Frühjahr 2017 über die vier untersuchten Standorte Rosenau, Wolferkofen, Aholfing und Hötzelsdorf (Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)

	WW	Silphie	Sida	RWG	p-Wert
Artenzahl (gesamt)	44	43	49	44	
MW für Standorte	23,5	23,0	24,5	20,5	
MW für Wdh.	13,9 ^{ab}	14,4 ^{ab}	15,1 ^a	11,7 ^b	0,054
Diversität – inverser Simpson-Index	5,73 ^b	5,52 ^b	5,86 ^b	4,00 ^a	0,004
Aktivitätsdichte	0,64 ^{ab}	0,64 ^{ab}	0,69 ^a	0,50 ^b	0,020
Anzahl samenfressender Laufkäfer	89 ^b	148 ^b	327 ^a	45 ^c	< 0,001
Anzahl kleiner räuberischer Laufkäfer	608 ^{ab}	855 ^a	662 ^a	466 ^b	0,005
Anzahl großer räuberischer Laufkäfer	64	58	64	56	0,555
Larven					
Anzahl Gattungen	4	8	8	4	
MW für Standorte	2,5	3,8	3,5	1,3	
MW für Wdh.	1,4 ^a	1,8 ^a	1,6 ^a	0,4 ^b	0,001
Larven (Anzahl)	55 ^a	62 ^a	51 ^a	7 ^b	<0,001
Früher Frühling (02.03.–03.04.)					
Aktivitätsdichte	0,45 ^{ab}	0,63 ^a	0,49 ^{ab}	0,36 ^b	0,005
Artenzahl	29	31	30	31	0,061

Für die Förderung der Artenvielfalt im Ackerland ist die Akzeptanz von Unkräutern daher ein Schlüsselfaktor nicht nur für Laufkäfer [167] [36]), sondern auch für Vögel [178] und die Biodiversität insgesamt [124] [4]. Kleine räuberische Laufkäferarten waren aktiver in Silphie, mit Ausnahme von Hötzelsdorf, wo kleine räuberische Arten grundsätzlich selten gefangen wurden. Auf Parzellen mit Silphie war besonders das Auftreten von *Bembidion lampros* und *Bembidion tetracolum* früher im Jahr und individuenreicher. Für diese Arten ist bekannt, dass sie in Feldrändern überwintern [192] [47] und in gewissem Umfang relevant für die natürliche Schädlingsregulation sind [193] [71]. Für große räuberische Arten konnten keine Unterschiede zwischen den Kulturen festgestellt werden. Hier waren die Effekte stark standortabhängig und von den vorkommenden Arten bedingt. In Hötzelsdorf war die einzige nachzuweisende Art *Carabus cancellatus* mit der höchsten Aktivitätsdichte im Winterweizen an diesem Standort. In Aholfing konnte nur ein Individuum von *Carabus monilis* nachgewiesen werden. In Rosenau war die Aktivitätsdichte großer räuberischer Laufkäfer (*Carabus*) am geringsten in Parzellen mit Winterweizen und die meisten

Individuen (hauptsächlich *Carabus granulatus* und *Carabus nemoralis*) wurden im Riesenweizengras gefangen. In Wolferkofen kam nur *Carabus granulatus* in geringer Dichte vor. Den Verlauf der Aktivitätsdichte der Laufkäfer im Frühling zeigt Abbildung 99. Auffällig war der Peak der Aktivitätsdichte in der Sida und in Silphie in der zweiten Fangperiode in Wolferkofen. Auch in Aholfing und Rosenau zeigte die Silphie höhere Aktivitätsdichten als der Winterweizen zu diesem Zeitpunkt. Die Aktivitätsdichte im frühen Frühling (02.03.–03.04) war am höchsten in der Silphie, signifikant jedoch nur im Vergleich zum Riesenweizengras (Tabelle 37).

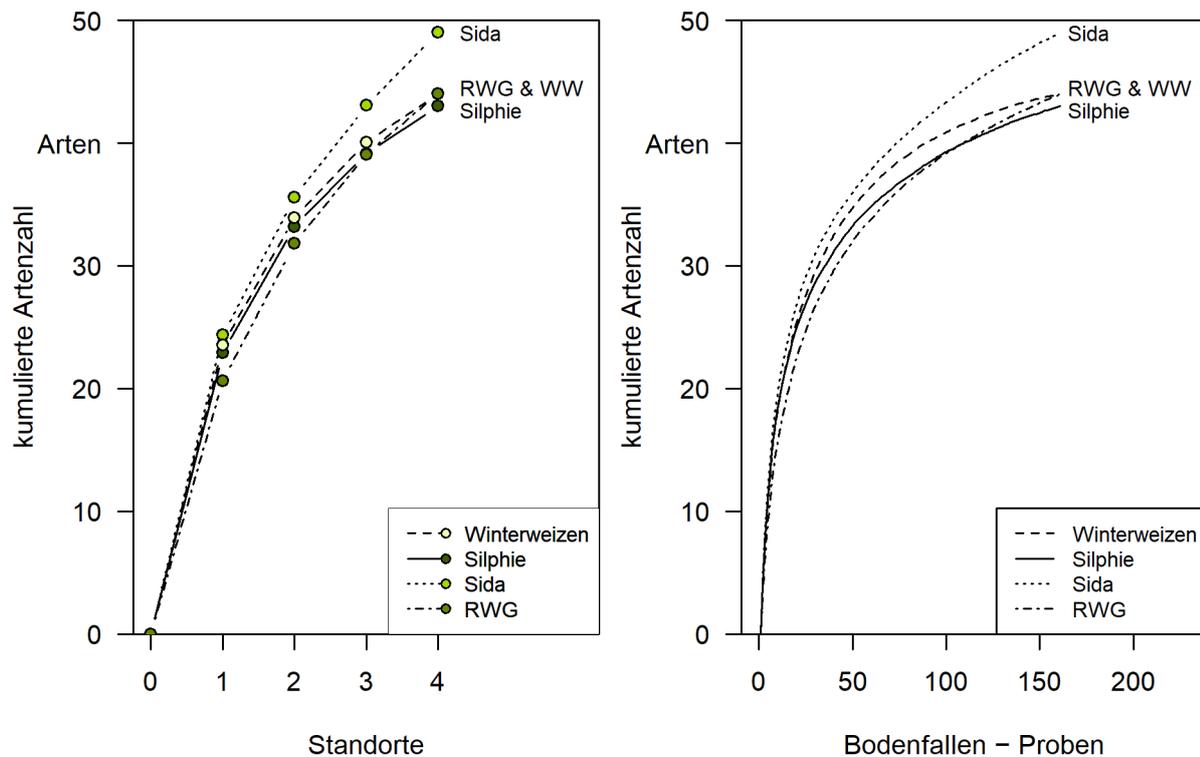


Abbildung 100: Artenakkumulationskurven der Laufkäfer basierend auf Standorten (links) und Proben (rechts) für die vier Kulturarten im Frühjahr 2017

Die Ordination der Laufkäfergemeinschaft (Abbildung 101) differenzierte deutlich zwischen den Standorten. Die erste Ordinationsachse spreizte sich vorwiegend zwischen Wolferkofen und Hötzelstdorf, die zweite zwischen Aholfing und Rosenau. Unterschiede zwischen den Kulturen konnten für beide Achsenwerte statistisch bestätigt werden. Auf der ersten Achse zeigte die Sida signifikant höhere Werte im Vergleich mit der Silphie und Winterweizen. Auf der zweiten Achse hatte das Riesenweizengras signifikant niedrigere Werte als alle übrigen Kulturen. Die höchsten Werte wurden hier für die Sida gefunden und diese waren signifikant höher als für Winterweizen. Da die Laufkäferfauna scheinbar auf die regionalen und untergeordneten kulturspezifischen Aspekte reagiert, kann angenommen werden, dass die Laufkäfergemeinschaft in mehrjährigen Energiepflanzen aufgrund standortspezifischer Charakteristika variieren kann. Da die Untersuchungen mit den

sehr unterschiedlichen Standortbedingungen allerdings keine echten Gradienten darstellen, können diese Ergebnisse nur einen ersten Hinweis liefern.

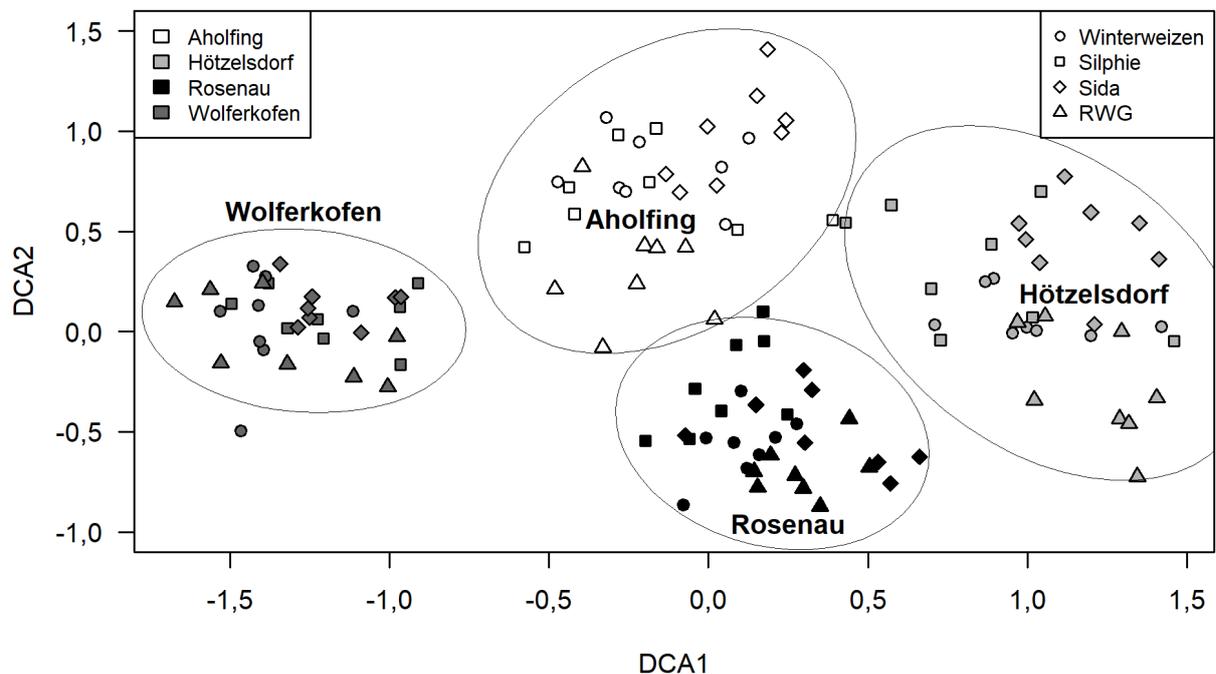


Abbildung 101: Ordination (DCA) der Laufkäfer für einzelne Bodenfallen im Frühjahr 2017 für die untersuchten Kulturen auf den vier Versuchsstandorten (Eigenvalues der Achsen DCA1: 0,40, DCA2: 0,24)

Winteraktivität

In der auf den Herbst und Winter ausgedehnten Fangperiode in Rosenau (17.10.2016–02.03.2017) wurden 214 zusätzliche Laufkäfer aus 23 Arten gefangen. Vier Arten wurden nur in diesem Zeitraum nachgewiesen. Die Aktivitätsdichte nahm wie erwartet während des Winters ab. Die häufigste Art war *Trechus quadristriatus*, die 60 % der Gesamtindividuen im Winterweizen ausmachte. In allen anderen untersuchten Kulturen war sein Anteil geringer als 25 %. Die Artenvielfalt unterschied sich für diesen Zeitraum nicht zwischen den Kulturen, in jeder wurden 13 Arten nachgewiesen (Tabelle 38). Der inverse Simpson-Index war signifikant von der Kulturart beeinflusst. Die höchste Diversität wurde im Riesenweizengras gefunden, während die anderen Kulturen sich ähnelnde Werte zeigten. Allerdings konnten die Unterschiede nicht durch multiple Vergleiche bestätigt werden. Zudem war die Aktivitätsdichte im Riesenweizengras signifikant niedriger als im Winterweizen und in der Silphie (Tabelle 38). Bemerkenswert war wiederum das Auftreten von *Bembidion tetracolum* als zweithäufigste Art in diesem Zeitraum in Rosenau. Ihr Auftreten auf Parzellen mit Silphie und Sida, vorwiegend in der Fangperiode 09.02.2017–02.03.2017 kann als Hinweis für das Erwachen aus dem Winterlager gedeutet werden. Das Riesenweizengras und der Winterweizen zeigten im Vergleich dazu eine deutlich niedrigere Aktivitätsdichte dieser Art, sodass eine Bevorzugung der Silphie und Sida als Überwinterungsquartier abgeleitet werden kann.

Tabelle 38: *Ergebnisse der Untersuchung der Laufkäferfauna in der verlängerten Fangperiode über den Winter (17.10.2016–02.03.2017) in Rosenau (Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)*

	WW	Silphie	Sida	RWG	p-Wert
Artenzahl	13	13	13	13	
MW für Wdh.	6,5	5,2	5,0	5,5	0,872
Diversität – inverser Simpson-Index	2,78	2,75	2,97	4,51	0,027
Aktivitätsdichte	0,07 ^a	0,06 ^a	0,04 ^{ab}	0,03 ^b	< 0,001

Laufkäferlarven

638 Laufkäferlarven wurden in der gesamten Untersuchung (einschließlich Herbst und Winter in Rosenau) gefangen. Im Frühling (02.03.2017–16.05.2017, alle Standorte, 175 Laufkäferlarven), war die Aktivitätsdichte genauso wie für die adulten Laufkäfer in Rosenau am höchsten. Zu bemerken ist, dass Bodenfallen für die Erfassung im Bodeninneren lebender Laufkäferlarven nicht geeignet und die festgestellten Aktivitätsdichten noch vorsichtiger zu interpretieren sind als die von adulten Laufkäfern. Zusätzliche Methoden wären für eine Erfassung der Siedlungsdichte wichtig [184]. Auf der anderen Seite gibt es bedauerlicherweise wenige Untersuchungen zu Laufkäferlarven auf landwirtschaftlichen Nutzflächen aus neuerer Zeit. So gilt es, die aus diesen Beifängen zu gewinnenden Erkenntnisse zu nutzen. Die Nachweise von Laufkäferlarven nahmen mit der Zeit im Frühjahr deutlich ab. Die erweiterte Fangperiode in Rosenau bestätigte die Bedeutung von Herbst und Winter für die Aktivität der Laufkäferlarven, da etwa 72 % aller Laufkäferlarven vor März gefangen wurden. Die geringste Aktivitätsdichte der Laufkäferlarven wurde in Hötzelsdorf festgestellt, Aholting und Wolferkofen zeigten vergleichbare Werte. Insgesamt wurden 14 Gattungen bestimmt, die häufigste war *Nebria* gefolgt von *Calathus* und *Amara*. Die Auswertung zeigte im Riesenweizengras eine signifikant niedrigere Larvenanzahl sowie Vielfalt der nachgewiesenen Gattungen je Wiederholung gegenüber den anderen untersuchten Kulturen (Tabelle 37). Nichtsdestotrotz waren zwei der nur sieben im Riesenweizengras gefangenen Larven der Gattung *Carabus* zuzuordnen, die in der gesamten Untersuchung nur mit einem einzigen weiteren Individuum festgestellt wurde. Auffällig war das Fehlen von Larven von *Nebria* und *Calathus* im Riesenweizengras. Der Winterweizen zeigte eine niedrigere Gattungsanzahl im Mittel über die Standorte als die Silphie und die Sida (nicht signifikant). Zwar sind die exakten Habitatansprüche der Arten und die Bedeutung von Bodenbearbeitung für die Überwinterung von Laufkäfern nicht vollständig geklärt, viele Larven und auch adulte Laufkäfer scheinen aber an die Dynamik in jährlich kultivierten Feldern angepasst. Besonders Larven der Gattung *Calathus* wurden in dieser Studie in ähnlicher Anzahl im Winterweizen wie auf den mehrjährigen Energiepflanzen gefangen. Larven der Gattung *Nebria* waren ebenfalls häufig im Winterweizen nachzuweisen, jedoch war die Aktivitätsdichte auf Silphie- und Sidapartellen wesentlich größer – besonders im Winter. Auch die Vielfalt der Larven unter Silphie und Sida war leicht höher als im Winterweizen, aber nicht höher als in Riesenweizengras. Da die als Referenz dienende Fruchtfolge des Feldversuchs pfluglos bestellt wurde, fällt möglicherweise der Unterschied

zwischen den annualen zu den mehrjährigen Kulturen geringer aus als im Vergleich zu gepflügten Systemen. Pfluglose Bodenbearbeitung wird als für die Laufkäferfauna förderlich angesehen [168] [106].

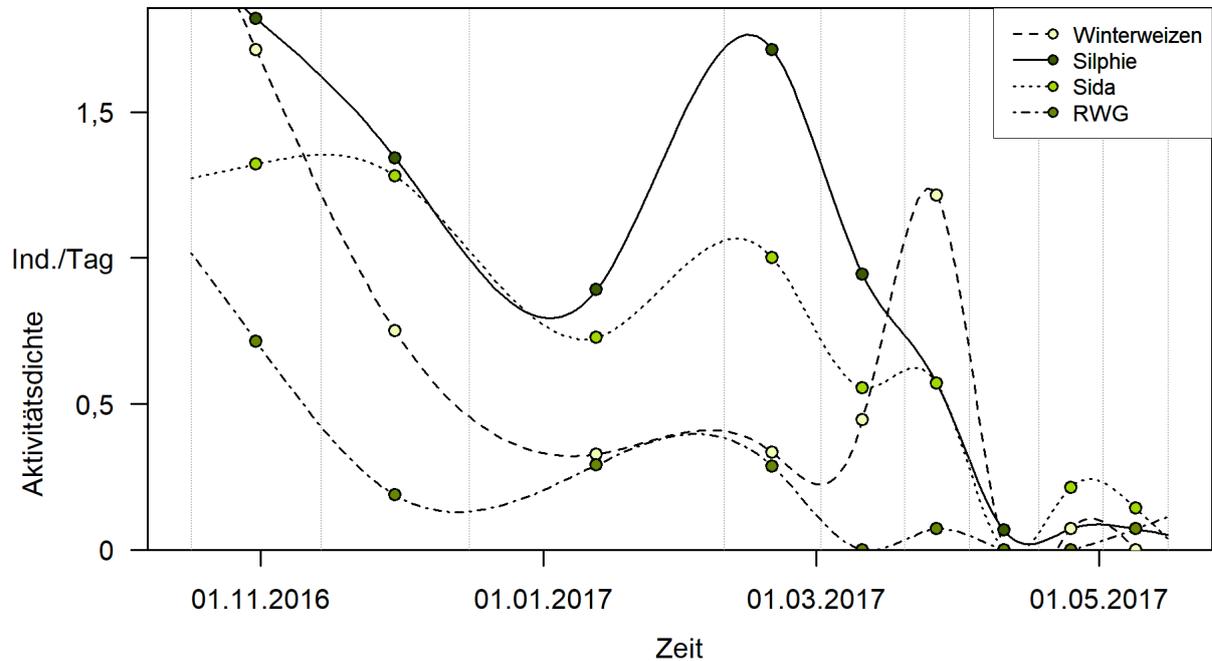


Abbildung 102: Zeitlicher Verlauf der Aktivitätsdichte von Laufkäferlarven am Standort Rosenau vom Herbst 2016 bis zum Frühjahr 2017 (Kurven wurden geglättet [piecewise polynomial adjustment], Punkte repräsentieren die festgestellte Aktivitätsdichte in der Mitte des Leerungsintervalls, vertikale Linien stellen die Leerungsintervalle dar)

Die Abbildung 102 zeigt den Verlauf der Aktivität von Laufkäferlarven in Rosenau über den gesamten Untersuchungszeitraum. Im Winter zeigten die Larven auf Parzellen mit Silphie und Sida eine höhere Aktivitätsdichte als im Riesenweizengras oder im Winterweizen. Nach einer leichten Abnahme während des Winters in diesen Kulturen gipfelte die Aktivitätsdichte nach dem Herbst im Februar, während im Vergleich die Aktivitätsdichte im Winterweizen einen Peak im März zeigte. Im Riesenweizengras war die Aktivitätsdichte von Laufkäferlarven im Frühjahr sehr gering.

Die vorliegende Untersuchung konnte Unterschiede hinsichtlich Artenzahl, Diversität und Aktivitätsdichte von Laufkäfern zwischen den Kulturen nachweisen. Insgesamt kann die besondere Bedeutung der Sida für Laufkäfer hervorgehoben werden. Dies ist allerdings weniger der Kultur als vor allem der hohen Pflanzenartenvielfalt und Deckung der Begleitflora bei Sida zuzuschreiben. Diese trägt in der Sida zur höheren Artenvielfalt und Aktivitätsdichte, insbesondere samenfressender Laufkäferarten bei. Für die Silphie ist das vermehrte Auftreten einiger kleiner räuberisch lebender Laufkäferarten im Frühjahr hervorzuheben, die zur natürlichen Schädlingsregulation beitragen und in einer Ackerlandschaft auf Feldränder zur Überwinterung angewiesen sind. Für das Riesenweizengras wurde

eine geringere Vielfalt und Aktivität von Laufkäfern festgestellt, auch im Vergleich zur anuellen Kultur. Möglicherweise liefert das Riesenweizengras allerdings im Frühsommer nach der Ernte einen wichtigen Beitrag zur Vielfalt. Dieser Aspekt wurde hier nicht untersucht. Die an der Bodenoberfläche aktiven Laufkäfer, die einen Aktionsradius von häufig 100 m und mehr haben (viele sind auch flugfähig), nutzen wahrscheinlich, entsprechend ihren ökologischen Ansprüchen, die ihnen in dem Feldversuch angebotene kleinräumige Lebensraumvielfalt der Kulturen mit ihrer zeitlich variierenden Bewirtschaftungsweise und der daraus resultierenden unterschiedlichen Raumstruktur und Mikroklima. Die Feldversuche können somit als sehr vielfältige und strukturreiche Flächen mit einer hohen Lebensraum- und Nutzungsvielfalt auf kleinstem Raum angesehen werden. In ausgeräumten ackerdominierten Landschaften können mehrjährige Energiepflanzen durch Erhöhung eines räumlichen und zeitlichen Nutzungsmosaiks einen wichtigen Beitrag zur Biodiversität und zur Förderung natürlicher Gegenspieler von Schadorganismen leisten.

5.4.5 Fauna von Riesenweizengras und GPS-Roggen nach der Ernte – Erfassung mit Minibarberfallen

Mesofauna

Insgesamt wurden 9628 Milben und 20 745 Springschwänze bei der Untersuchung festgestellt. Im Durchschnitt wurden 39 Individuen der Mesofauna (27 Springschwänze und zwölf Milben) in einer Minibarberfalle in 48 Stunden gefangen. Die mittlere Aktivitätsdichte der Mesofauna war auf dem sandigen Schotterstandort Aholting (49) höher als auf dem humosen, anmoorigen Boden in Rosenau (20). Die meisten Springschwänze waren der Gruppe der Entomobryidae zuzuordnen, gefolgt von Isotomidae und Symphypleona. Der Anteil der einzelnen Gruppen der Springschwänze war an beiden Standorten ähnlich. Im Vergleich mit der für die Bodenmesofauna häufig angewandten Untersuchung von Stechzylinder-Proben mit anschließender Austreibung in Licht-Wärmegradienten ergibt sich für die Minibarberfallen eine deutlich andere Zusammensetzung mit einem hohen Anteil an Lauf- und Kugelspringern und nur sehr wenigen blinden und im Bodeninneren lebenden Arten. In Rosenau waren 32 % der gefangenen Milben Hornmilben. Als streuzersetzende Arthropoden sind Hornmilben in hohem Maß auf organisches Material im Boden angewiesen. Ein entsprechend individuenreiches Auftreten ist auf Ackerflächen daher nur in sehr humusreichen Böden wie in Rosenau zu erwarten. In Aholting machten räuberische Prostigmata den Hauptanteil der zum Erhebungszeitpunkt an der Bodenoberfläche aktiven Milben aus (40 %).

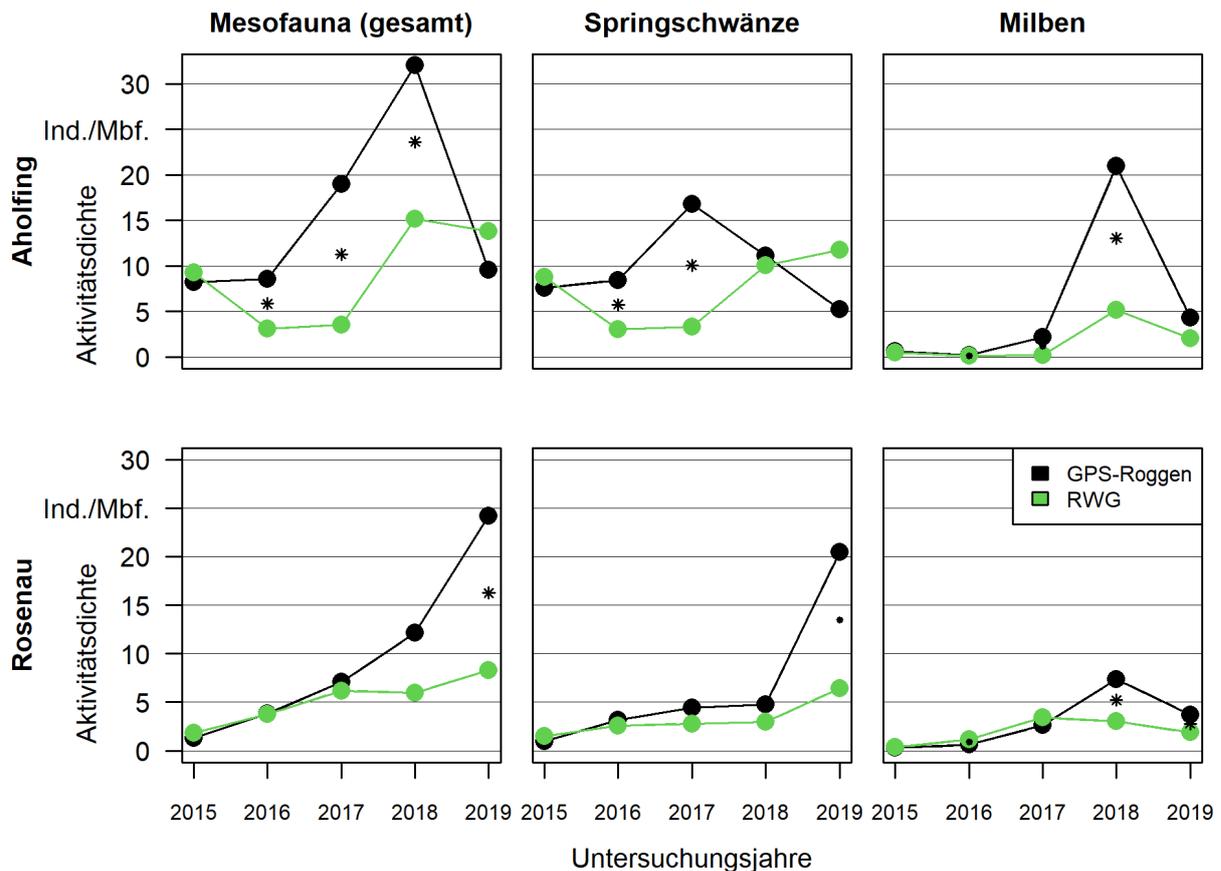


Abbildung 103: Aktivitätsdichten der Bodenmesofauna in Individuen je Minibarberfalle in 48 h für die Standorte Aholzing (oben) und Rosenau (unten), für die Kulturen Riesenweizengras (RWG) und GPS-Roggen nach der Ernte; links: Mesofauna gesamt (Springschwänze + Milben), Mitte: Springschwänze, rechts Milben; * markiert signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), • Tendenzen ($p < 0,1$)

Im Mittel aller Proben (Jahre, Standorte) war die Aktivitätsdichte der Mesofauna im GPS-Roggen etwa 1,8 Mal höher als im Riesenweizengras. Dies konnte sowohl für die Springschwänze (1,6 Mal) als auch für die Milben (2,4 Mal) beobachtet werden. Für die über die Jahre aufsummierten Individuen war der Unterschied der Gesamtmesofauna und der Milben zwischen Riesenweizengras und GPS-Roggen an beiden Standorten signifikant. Allerdings gab es deutliche Schwankungen und Wechselwirkungen mit dem Untersuchungs-jahr und dem betrachteten Standort (Abbildung 103). Im ersten Jahr nach der Etablierung war die Aktivitätsdichte zwischen den Kulturen sehr ähnlich und differenzierte sich erst in den folgenden Jahren aus. In Rosenau konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den Kulturen bei insgesamt ansteigenden Aktivitätsdichten erst in den beiden letzten Untersuchungs-jahren 2018 und 2019 festgestellt werden. In Aholzing war bereits im zweiten Jahr nach der Etablierung die Aktivitätsdichte der Mesofauna im Riesenweizengras weniger als halb so groß wie die im GPS-Roggen. Dieser Trend änderte sich für die Springschwänze in den letzten beiden Untersuchungs-jahren und 2019 war die Aktivitätsdichte der Springschwänze im Riesenweizengras sogar doppelt so hoch wie im GPS-Roggen. Eine

Übersicht über alle erfassten Artengruppen findet sich im Anhang (Tabelle 107). Auffällig war, dass in Rosenau Hornmilben (Oribatidae) häufiger im Riesenweizengras nachgewiesen wurden, während die übrigen Milbengruppen hier deutlich höhere Aktivitätsdichten im GPS-Roggen zeigten. Unterschiedliche mikroklimatische Verhältnisse während der Wachstumsphase oder auch vorhandene Streu in Blüten und Ernteresten fördern möglicherweise gerade diese Artengruppe. Bei den übrigen Tiergruppen (nicht Milben oder Springschwänze) wurden in Aholting signifikant höhere Aktivitätsdichten für Spinnen im Riesenweizengras im Vergleich zu GPS-Roggen festgestellt (Tabelle 107).

Laufkäfer

In den fünf Untersuchungsjahren wurden in den Minibarberfallen 752 Laufkäfern aus 40 Arten nachgewiesen. Etwa 47 % der Individuen waren kleine räuberische Tiere. Bemerkenswert war, dass trotz der geringen Öffnungsweite der Röhren von 14 mm auch größere Arten zahlreich gefangen wurden, so war die häufigste Art der Untersuchung *Harpalus rufipes*, eine Art mit etwa 1 cm Länge. In Rosenau war die Aktivitätsdichte der Laufkäfer in allen Jahren höher als in Aholting.

In Aholting wurden im Riesenweizengras 21 Arten und im GPS-Roggen 17 Arten nachgewiesen. Auch in Rosenau wurden im Riesenweizengras vier Arten mehr gefunden (26) als im GPS-Roggen (22) (Tabelle 39). Statistisch absicherbare Unterschiede zwischen den mittleren Artenzahlen bestanden jedoch nicht. Dies galt auch für die Diversität (inverser Simpson-Index), die nur in Rosenau im Riesenweizengras etwas höher lag. Die Aktivitätsdichte (hier als Summe der Individuen) war in Rosenau signifikant höher im GPS-Roggen. Dies war vorwiegend auf das Auftreten kleiner räuberischer Arten zurückzuführen, die auch in Aholting eine signifikant höhere Aktivitätsdichte im GPS-Roggen als im Riesenweizengras aufwiesen. Ein Großteil der Nahrung dieser Laufkäfer besteht aus Springschwänzen und anderen kleinen Organismen. Ähnlich wie die oberflächlich aktive Bodenmesofauna profitieren auch kleine Laufkäferarten von der regelmäßigen Lockerung des Bodens in den annuellen Kulturen. Ein Beispiel für die ausgeprägte Anpassung an Ackerflächen als Lebensraum ist die Art *Bembidion quadrimaculatum*: 88 % der Individuen dieser Art wurden im GPS-Roggen gefangen.

Tabelle 39: Ergebnisse zur Untersuchung der Laufkäferfauna mit Minibarberfallen am Standort Rosenau in den Jahren 2015, 2016, 2017, 2018 und 2019 für jeweils zwei Fangtage im Juli unmittelbar nach der Ernte der Kulturen (Buchstaben zeigen signifikant unterschiedliche Gruppen)

	Aholfing		Rosenau	
	GPS-Roggen	RWG	GPS-Roggen	RWG
Artenzahl	17	21	22	26
MW für Wdh.	9,2	10,2	13,2	14,2
Diversität – inverser Simpson-Index	4,6	4,3	6,4	7,1
Anzahl Laufkäfer	134	135	283 ^b	200 ^a
Anzahl samenfressender Arten	60	75	28	34
Anzahl kleiner räuberischer Arten	68 ^b	19 ^a	196 ^b	70 ^a

Betrachtet man die Ergebnisse über alle fünf Jahre der Untersuchungen (Abbildung 104), so zeigt sich, dass der geringere Anteil an kleinen Laufkäferarten im Riesenweizengras über alle Jahre zu beobachten war. Lag der Anteil dieser Gruppe in Rosenau im Jahr nach der Etablierung noch bei etwa 75 %, ging er in den folgenden Jahren auf deutlich unter die Hälfte zurück. Eine zunehmende Veränderung des Lebensraums ist anzunehmen. Besonders in den beiden letzten Untersuchungsjahren nimmt in Rosenau im Vergleich zum GPS-Roggen der Anteil sonstiger Arten im Riesenweizengras deutlich zu. Vor allem *Pterostichus melanarius* war im Riesenweizengras häufiger zu finden. Nicht zu vernachlässigen ist die Lage der Parzellen im Versuch, so könnten die geringen Fänge in Rosenau in den Jahren 2015 und 2018 auch auf die Stellung des GPS-Roggens in der Mitte der Referenzparzellen zurückzuführen sein. Die Einwanderung aus benachbarten mehrjährigen Kulturen, die z. T. noch nicht geerntet waren und möglicherweise Rückzugsraum boten, war somit geringer.

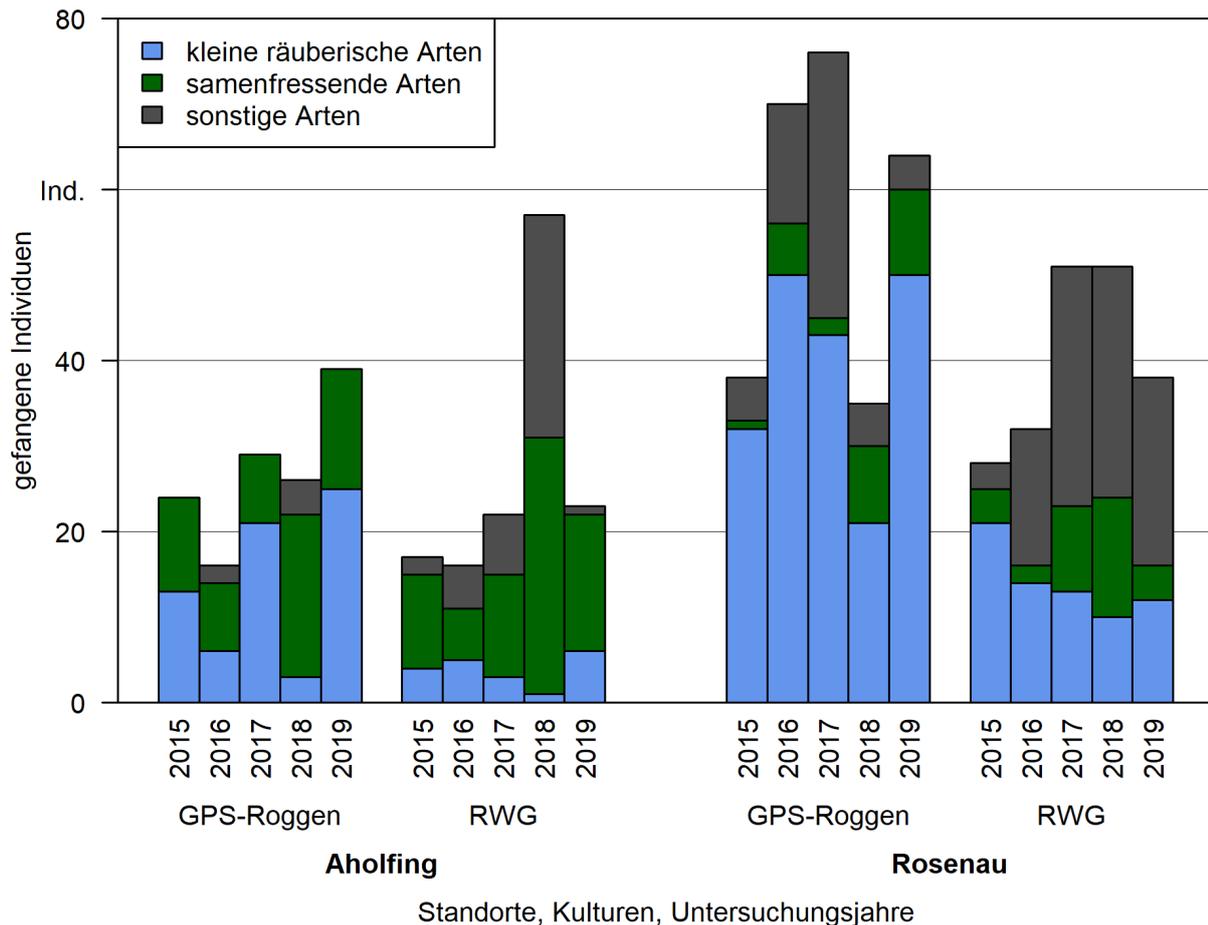


Abbildung 104: Summe der am Standort Rosenau über fünf Untersuchungsjahre von 2015 bis 2019 jeweils über zwei Fangtage im Juli nach der Ernte der Kulturen mit Minibarberfallen gefangenen Laufkäferindividuen nach ökologischen Gruppen

Der Nachweis von Unterschieden zwischen den nach der Ernte im Erscheinungsbild ähnlichen Kulturen zeigt, dass die Lebensräume je nach Art unterschiedlich attraktiv sind. Gerade für die kleineren Arten, wie die Springschwänze und auch kleine Laufkäfer, war die annuelle Kultur zu diesem Zeitpunkt tatsächlich attraktiver. Ein Rückgang der Dichte und Artenvielfalt von Springschwänzen bei abnehmender Bodenbearbeitungsintensität ist aus Deutschland bekannt [186]. Vermutlich wird durch die jährliche Bodenbearbeitung der besiedelbare Teil des Bodens für die nur in geringem Umfang selbst aktiv grabenden Tiere vergrößert, indem Poren geschaffen werden und organisches Material in den Boden gelangt. Unbearbeitete Böden lagern in der Regel etwas dichter, besonders wenn die Humusgehalte gering sind. Die Aktivitätsdichten sind zwar nicht mit Siedlungsdichten gleichzusetzen, doch können sie einen Hinweis darauf geben, dass Ackerflächen die regelmäßig mechanisch gelockert werden, einen wichtigen Lebensraum für Teile der Bodenmesofauna darstellen können. Langfristig spielen vermutlich die Entwicklung der obersten Bodenschicht und das Vorhandensein von Streu und Humus dort eine wichtige Rolle für die Fauna. Wie auch die Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt zeigen konnten (Abschnitt 5.4.1), ist die Versuchslaufzeit für größere Unterschiede aber noch zu kurz.

Allerdings liegt die gewöhnliche Nutzungsdauer des Riesenweizengrases nicht wesentlich höher als die Versuchslaufzeit, sodass Bedingungen für die Fauna, wie sie beispielsweise im Dauergrünland zu finden sind, nicht zu erwarten sein werden. Es bleibt darauf hinzuweisen, dass die Aufnahmen nur ein kurzes Zeitfenster widerspiegeln und wahrscheinlich auch von den aktuellen Wetterverhältnissen beeinflusst sind. Für diese Untersuchung konnte jedoch kein Zusammenhang mit den vorangegangenen Niederschlags- und Temperaturverhältnissen oder den Temperaturen während der Aufnahmen festgestellt werden, da diese parallel zum generellen Zeittrend verliefen. Gerade für die kleinen räuberischen Laufkäfer, für die Springschwänze häufig ein wichtiger Bestandteil ihrer Nahrung sind, unterstreicht die Untersuchung die Bedeutung der räumlichen Vernetzung von attraktiven Nahrungsflächen auf Feldern und den Überwinterungsquartieren. Das Vorhandensein alternativer Beute für Gegenspieler von Schädlingen ist zum einen essenziell für deren Überleben und kann andererseits der effektiven Kontrolle der Schadorganismen entgegenwirken.

5.4.6 Arthropodenerfassung mit Laubsaugern

Insgesamt wurden 27 890 Tiere in den eingesaugten Proben gefunden. Die häufigste taxonomische Gruppe waren die Springschwänze (42 %), gefolgt von Milben (19 %), Zikaden (7 %) und Spinnen (7 %). Im Durchschnitt aller untersuchten Kulturen lag die Siedlungsdichte bei 1800 Individuen/m² in Aholting, 1300 Individuen/m² in Wolferkofen und 1200 Individuen/m² in Rosenau.

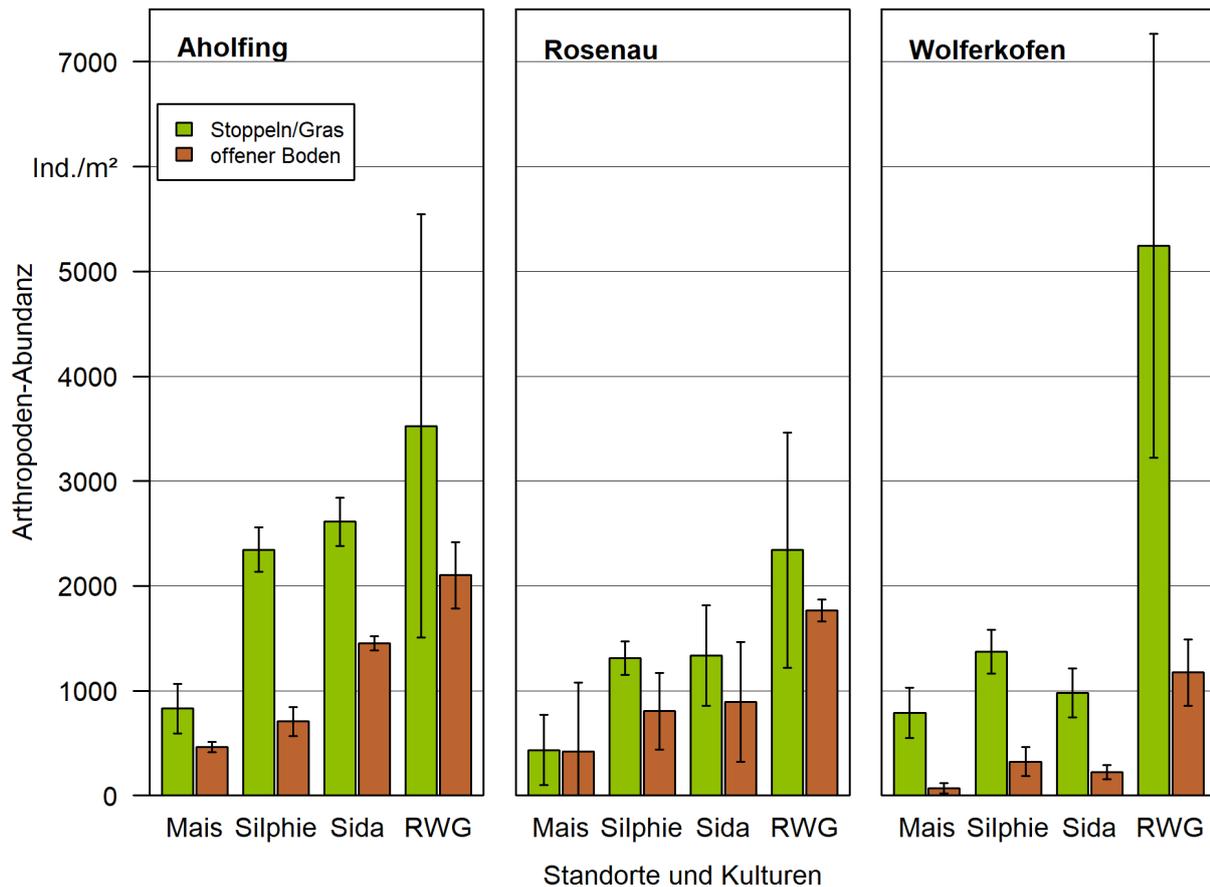


Abbildung 105: Abundanz der mit Laubsaugern im September 2017 erfassten Arthropoden für die Kulturen und die Position an den Standorten, Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung des Mittelwerts aus $n = 4$

Die höchste Siedlungsdichte an Tieren wurde an allen Standorten im Riesenweizengras festgestellt (Abbildung 105). Weiterhin wiesen die Proben, die auf den Stoppeln (Mais, Silphie, Sida) bzw. der Vegetation (beim Riesenweizengras) genommen wurden, bei allen Kulturen deutlich mehr Tiere auf als solche, die daneben auf offenem Boden aufgesaugt wurden. Die sich über lange Zeit erhaltenden, häufig hohlen Stoppeln in Verbindung mit den Rhizomen der Silphie und der Sida können als Strukturen angesehen werden, die klassischen annuellen Kulturen fehlen. Sie dienen vermutlich als Versteckmöglichkeit bei ungünstigen Witterungsbedingungen, als Nahrung oder als Verbindung zwischen Bodenoberfläche und Bodeninnerem. Während bei den krautigen Dauerkulturen Sida und Silphie diese Strukturen langfristig an der Bodenoberfläche verbleiben, ist beim Maisanbau aus phytosanitärer Sicht eine schnelle Be- und Einarbeitung der Stoppeln gewünscht. Die gemischten Modelle konnten einen signifikanten Einfluss sowohl der Kulturart als auch der Position (Stoppel/Gras versus offenen Boden) der Probenahme nachweisen. Wechselwirkungen zwischen den beiden Faktoren waren nicht abzuschließen. Der Vergleich der Kulturen ergab die signifikant höchste Siedlungsdichte von Arthropoden für das Riesenweizengras. Silphie und Sida wiesen ebenfalls signifikant höhere Werte als die Parzellen mit Mais auf. Im Riesenweizengras wurde für alle häufigen Tiergruppen (siehe Abbildung 106) die höchste Dichte festgestellt. Überproportional stark profitierten Pflanzensauger (Wanzen,

Zikaden, Blattläuse) vom zu diesem Zeitpunkt noch grünen Riesenweizengras. Die Dichte war hier fünf bis 20 Mal höher als in den übrigen Kulturen. Auch die auf den Stoppeln genommenen Proben wiesen für alle Tiergruppen die höchsten Werte auf. Relativ über alle Kulturen war die Dichte der erfassten Arthropoden etwa 2,3 Mal höher auf den Stoppeln bzw. Pflanzen als auf dem offenen Boden. Obwohl Springschwänze typische Bodenbewohner sind, war ihr relativer Anteil an der Zusammensetzung höher auf den Stoppeln bzw. den Pflanzen als auf offenen Bodenstellen. Zahlreiche Springschwänze sind demnach auf Strukturen am Boden angewiesen, bevorzugen das Mikroklima in und um Stoppeln bzw. unter Pflanzenbewuchs oder leben sogar auf der Vegetation. Für die Milben waren die Unterschiede weniger deutlich. Es zeigte sich, dass der stark humose Boden in Rosenau eine wesentlich höhere Siedlungsdichte an Milben aufwies als die beiden anderen mineralisch geprägten Standorte. Im Vergleich mit den Ergebnissen aus den Erhebungen mit Minibarberfallen (vgl. Abschnitt 5.4.5) zeigt sich, dass entweder methodenbedingt oder wahrscheinlicher wegen des abweichenden Bewuchses und der Jahreszeit die Springschwanzfauna durchaus positiv von Riesenweizengras beeinflusst sein kann.

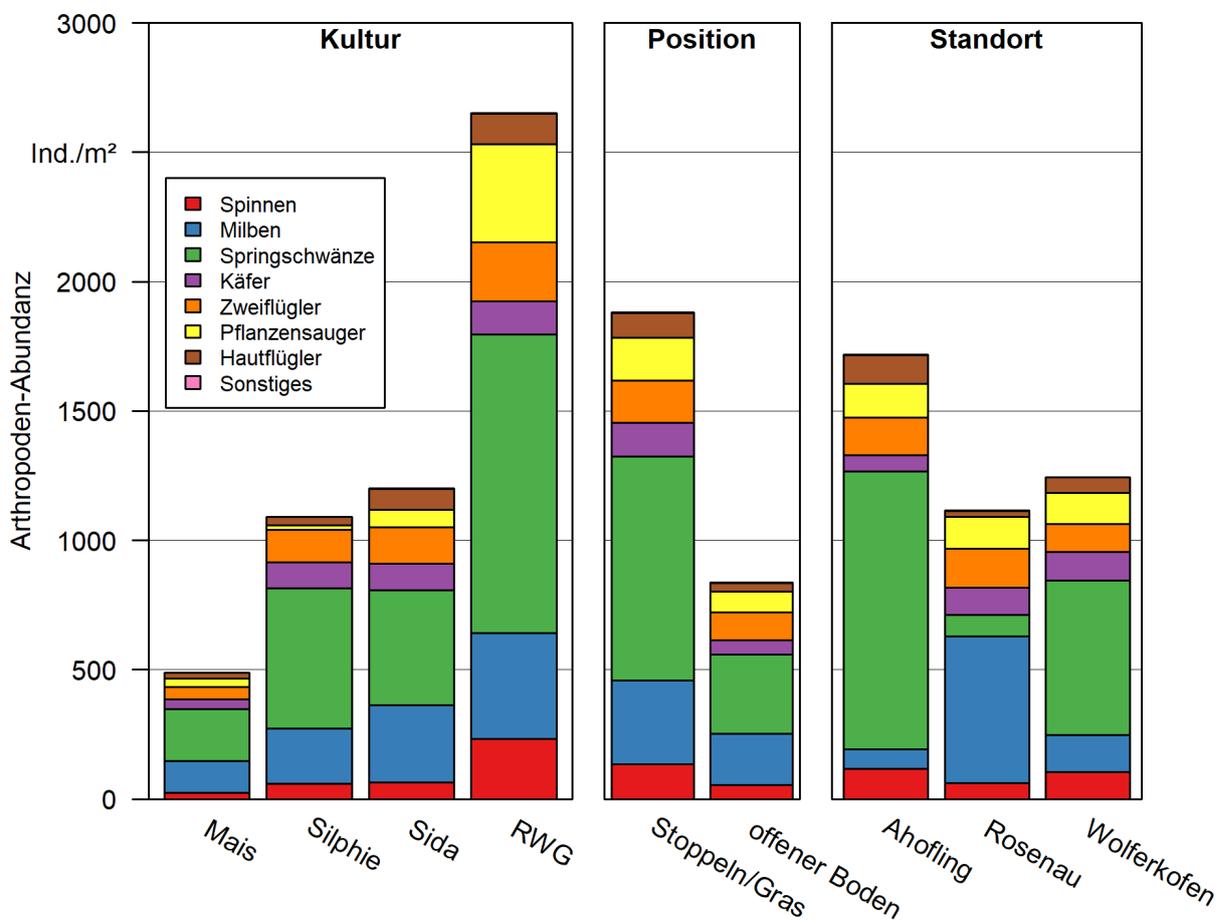


Abbildung 106: Zusammensetzung der mit Laubsaugern im September 2017 erfassten Arthropoden als Abundanz für die untersuchten Kulturen (links), die Position der Probenahme (Mitte) und die beprobten Standorte (rechts)

Metabarcoding

Nach der Datenbereinigung der 16 mittels Metabarcoding untersuchten Proben lag die mittlere Zahl an Sequenzen bei etwa 213 000. Eine Probe von Sida in Aholting zeigte eine nur geringe Zahl von etwa 7800. Die am häufigsten erfassten Arten waren die Springschwänze *Orchesella villosa* mit 44 % der gesamten Sequenzen, gefolgt von *Lepidocyrtus paradoxus* mit 11 %. Weitere häufig detektierte Arten waren Zikaden der Gattung *Euscelis* (4 %), *Psamotettix confinis* (3 %) und der Springschwanz *Isotoma anglicana* (4%). Insgesamt machten Springschwänze 63 % der gesamten erfassten Sequenzen aus, bei den vorangegangenen Zählungen für diese Proben waren es 52 %.

In den analysierten Proben waren mindestens 259 verschiedene Arthropoden-Arten vorhanden. Nimmt man beide Standorte zusammen, wurden die meisten Arten im Riesenweizengras (138), gefolgt von Sida (113) und Silphie (112) nachgewiesen. Die geringste Artenzahl wurde auf den Parzellen mit Mais festgestellt (84). Signifikant waren die Unterschiede allerdings nur für den Vergleich von Riesenweizengras und Mais.

Allen Kulturen waren nur 25 Arten gemeinsam (Abbildung 107), was darauf hindeutet, dass die Erfassung der Artengemeinschaft nicht vollständig ist und viele Arten möglicherweise als einzelne Individuen in den Proben detektiert wurden. 78 Arten wurden nur im Riesenweizengras gefunden und nur 22 ausschließlich auf Mais-Parzellen (Sida: 36; Silphie: 34). Silphie und Sida hatten etwas mehr Arten gemeinsam (62) als die übrigen Paare (immer unter 50 Arten).

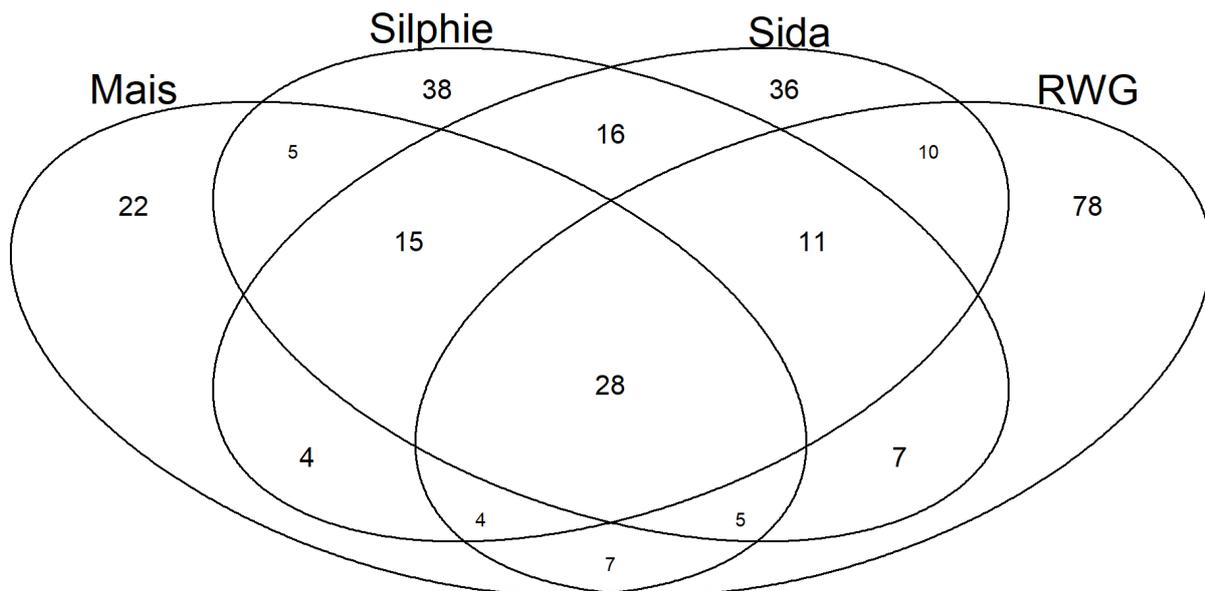


Abbildung 107: Venn-Plot mit den Schnittmengen der für die Kulturen mittels Metabarcodings aus Saugproben im September 2017 nachgewiesenen Arthropoden-Arten

Die Indikatorartenanalyse, in der alle analysierten Proben gleichrangig behandelt wurden, zeigte für 20 Arten eine Bindung an eine der Kulturarten. Wie bereits die vielen ausschließlich im Riesenweizengras nachgewiesenen Arten erwarten ließen, war auch die Zahl kulturtypischer Arten mit 15 hier am höchsten. Für diesen Datensatz konnte jeweils eine Indikatorart für Maisstoppeln und Sida und drei für die Silphie festgestellt werden (Tabelle 40). Im Riesenweizengras waren es typische an Gräsern lebende Zikaden (7) und zwei sehr ähnliche Grasweichwanzenarten, die das Habitat als „Grasland“ im weiteren Sinne auszeichneten. Interessanterweise war die als Überträger von Getreidevirosen eingeschätzte Wanderspornzikade (*Laodelphax striatella*) Maisstoppelfeldern zuzuordnen. Die Art kam auch zum Teil im Riesenweizengras vor, fehlte aber in den abgeernteten Stoppeln von Sida und Silphie. Für die Gelbe Getreidefliege (*Opomyza florum*), ein potenzieller Schädling am Getreide, legten die Daten aus dem Metabarcoding ein verstärktes Vorkommen in Wolferkofen im Riesenweizengras nahe. Für die meisten übrigen Arten, wie z. B. die Schlupfwespen, ist eine kausale Erklärung nicht möglich und Untersuchungen mit einem größeren Stichprobenumfang müssten mehr Sicherheit geben. Für phytophage Insekten ist die Kontinuität des Habitats von Vorteil. So profitieren die Arten davon, nicht auf risikobehaftete Ausbreitung angewiesen zu sein, sondern ihre Wirtspflanze direkt vor Ort wiederzufinden. Lebensräume mit Kontinuität, wie alle mehrjährigen Kulturen, können hierbei wichtige Spenderflächen für typische Arten der Agrarlandschaft darstellen und so die Biodiversität bereichern. Für das Riesenweizengras sind dies beispielsweise weitverbreitete, wenig spezialisierte, an Gräsern saugende Insekten. Flächen oder auch Streifen mit Riesenweizengras sind daher durchaus geeignet, in intensiv ackerbaulich genutzten Gegenden ein Minimum an für Grünland typische Fauna zu erhalten und entsprechende Habitate wie Randstreifen oder Feldraine stärker zu vernetzen.

Tabelle 40: Erfasste Arten aus Saugfang im September 2017, die nach der Indikator-Arten-Analyse eine Bindung an eine spezifische Kulturart aufwiesen (Daten aus Metabarcoding)

Kultur	Familie	lateinischer Name (deutscher Name)
Mais	Zikaden	<i>Laodelphax striatella</i> (Wanderspornzikade)
	Zikaden	Gattung Euscelis
RWG	Zikaden	<i>Euscelis aemulans</i> (Wiesengraszirpe)
	Zikaden	<i>Anoscopus serratulae</i> (Rasenerdzikade)
	Zikaden	<i>Errastunus ocellaris</i>
	Zikaden	<i>Latalus ocellaris</i>
	Zikaden	Gattung Psammotettix
	Zikaden	<i>Psammotettix confinis</i> -Komplex
	Weichwanzen	<i>Notostira elongata</i> (Grasweichwanze)
	Weichwanzen	<i>Notostira erratica</i> (Grasweichwanze)
	Schlupfwespen	<i>Gelis declivis</i>

	Fritfliegen	<i>Rhopalopterum carbonarium</i>
	Grasfliegen	<i>Opomyza florum</i> (Gelbe Getreidefliege)
	Dungfliegen	<i>Pullimosina pullula</i>
	Salz-/Sumpfliegen	<i>Psilopa polita</i>
	Kurzflügler	<i>Ochtheophilum collare</i>
Sida	Salz-/Sumpfliegen	Gattung Nostima
	Schlupfwespen	<i>Stenomacrus nemoralis</i>
Silphie	Zuckmücken	Gattung Smittia
	Gallmücken	Familie Cecidomyiidae

Inwieweit auch die krautigen Stauden als Neophyten entsprechenden Arten Lebensraum bieten können, ist nicht vollständig geklärt. Interessanterweise wurde in Wolferkofen die Feuerwanze (*Pyrrhocoris apterus*) sehr häufig auf Flächen mit Sida beobachtet und dort auch mit dem Metabarcoding nachgewiesen. Die Art ist eher untypisch für Ackerflächen, möglicherweise bietet die Sida sowohl Nahrungsressource (Samen von Malvaceae) als auch geeignete Überwinterungsmöglichkeiten an den Stoppeln. Die Möglichkeiten und Grenzen, die eine Analyse von Massenproben mithilfe von Metabarcoding bietet, zeigten sich auch am Nachweis des Malven-Erdflchs (*Podagrica fuscicornis*) in Aholfing. Dieser verursachte sowohl in Aholfing als auch in Wolferkofen in nennenswertem Umfang Fraßschäden an der Sida, er überwintert gewöhnlich als Larve im Boden. Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität in der Agrarlandschaft fördern häufig nicht nur nützliche Tiere. Vielfalt und Artenreichtum sorgen jedoch möglicherweise für widerstandsfähigere und unter Berücksichtigung aller Ökosystemleistungen produktivere Ökosysteme.

5.4.7 Insektenfauna von Praxisflächen im Vergleich – Silphie versus Mais

Insekten-Biomasse

Die als Abtropfgewicht erfasste Biomasse lag zwischen 2,5 und 8,6 g pro Tag. Vergleicht man die mittlere Biomasse von 4,4 g pro Tag mit den von HALLMANN *et al.* (2017) [84] im Juli gemessenen Werten, so war diese nur um 0,7 g pro Tag geringer. Berücksichtigt man hier nur die ab der Jahrtausendwende erfassten Daten, so lag die in bayerischen Mais- und Silphiefeldern erfasste Biomasse sogar um 2 g pro Tag höher. Dieser Vergleich ist allerdings nur unter mehreren Annahmen gültig, so waren die Wetterbedingungen während des gesamten Fangzeitraums optimal (kein Regen, hochsommerlich warm) sowie Malaisefallentyp und Fangflüssigkeit von den Untersuchungen in Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Brandenburg abweichend [84]. Deutlich gezeigt werden kann jedoch, dass für eine Beurteilung der Insektenwelt auf landwirtschaftlichen Nutzflächen Untersuchungen auch direkt auf Ackerflächen wertvoll und nötig sind. Überraschenderweise konnten mit der Erfassung der Insektenbiomasse im Hochsommer keine Unterschiede zwischen Mais- und Silphiefeldern festgestellt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die umgebende Landschaft einen deutlichen Einfluss auf die Fänge von Malaisefallen hat, denn viele der darin gefangenen flugfähigen Insekten haben einen Aktionsradius von

mehreren Hundert Metern und nicht wenige legen regelmäßig auch mehrere Kilometer zurück. Im Verhältnis mehr Insektenbiomasse im Mais wurde besonders an den beiden Standorten mit den älteren Silphiebeständen in Lappersdorf und Petersdorf nachgewiesen, während die Silphie im ersten Jahr nach der Etablierung in Froschbach eine nahezu dreimal höhere Biomasse aufwies als das nur durch einen Feldweg getrennte Maisfeld am Standort. Bei der faunistischen Evaluierung von Blühflächen (WAGNER *et al.* 2014 [191]) konnten mit Malaisefallen signifikant mehr Arthropoden in Mais gegenüber Blühflächen nachgewiesen werden. Allerdings wurde hier ein deutlich längerer Zeitraum beobachtet. Witterungsbedingungen können einen erheblichen Einfluss auf die Aktivität von Fluginsekten haben. Dies kann sowohl erhöhte Aktivität bei erhöhten Temperaturen bewirken, aber auch zur Attraktivität von schattigen Habitaten für einige Arten führen, v. a. wenn wie im Fangzeitraum hier über Wochen warme hochsommerlichen Temperaturen herrschen.

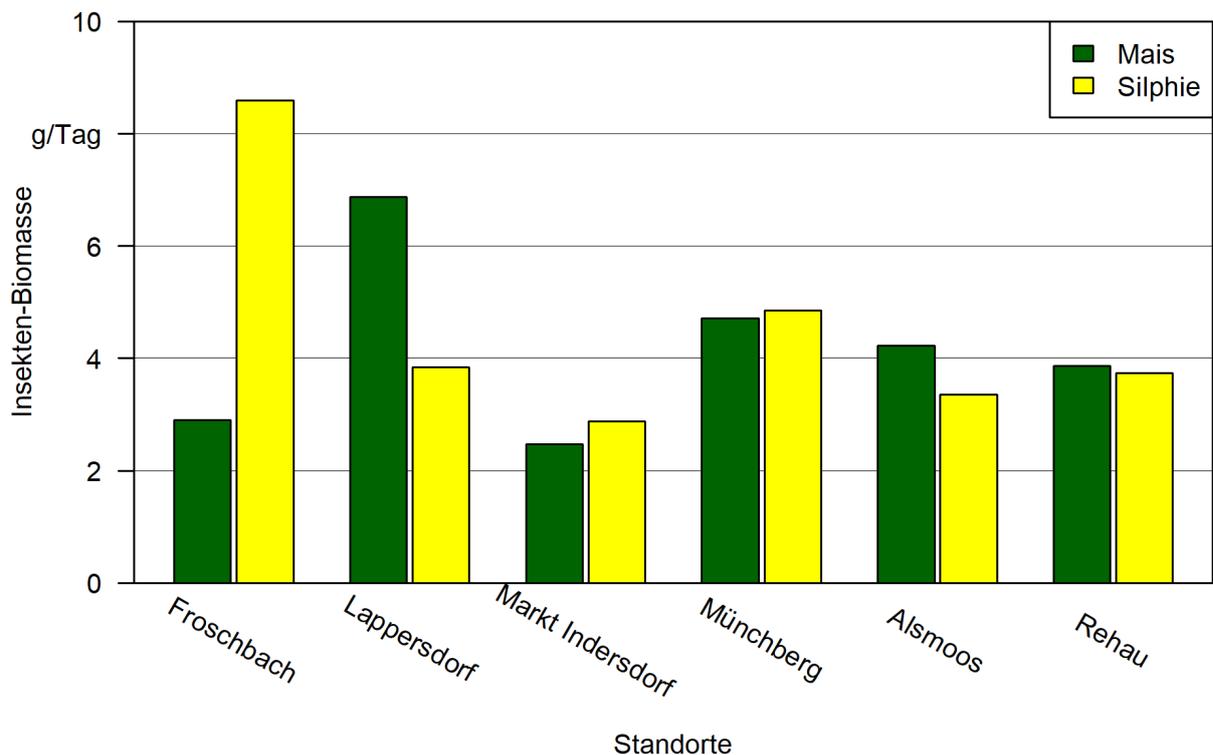


Abbildung 108: Insekten-Biomasse als Abtropfgewicht pro Tag in Mais- und Silphiefeldern für die sechs im Juli 2018 über einen Zeitraum von jeweils zwei Wochen beprobten Praxisflächen

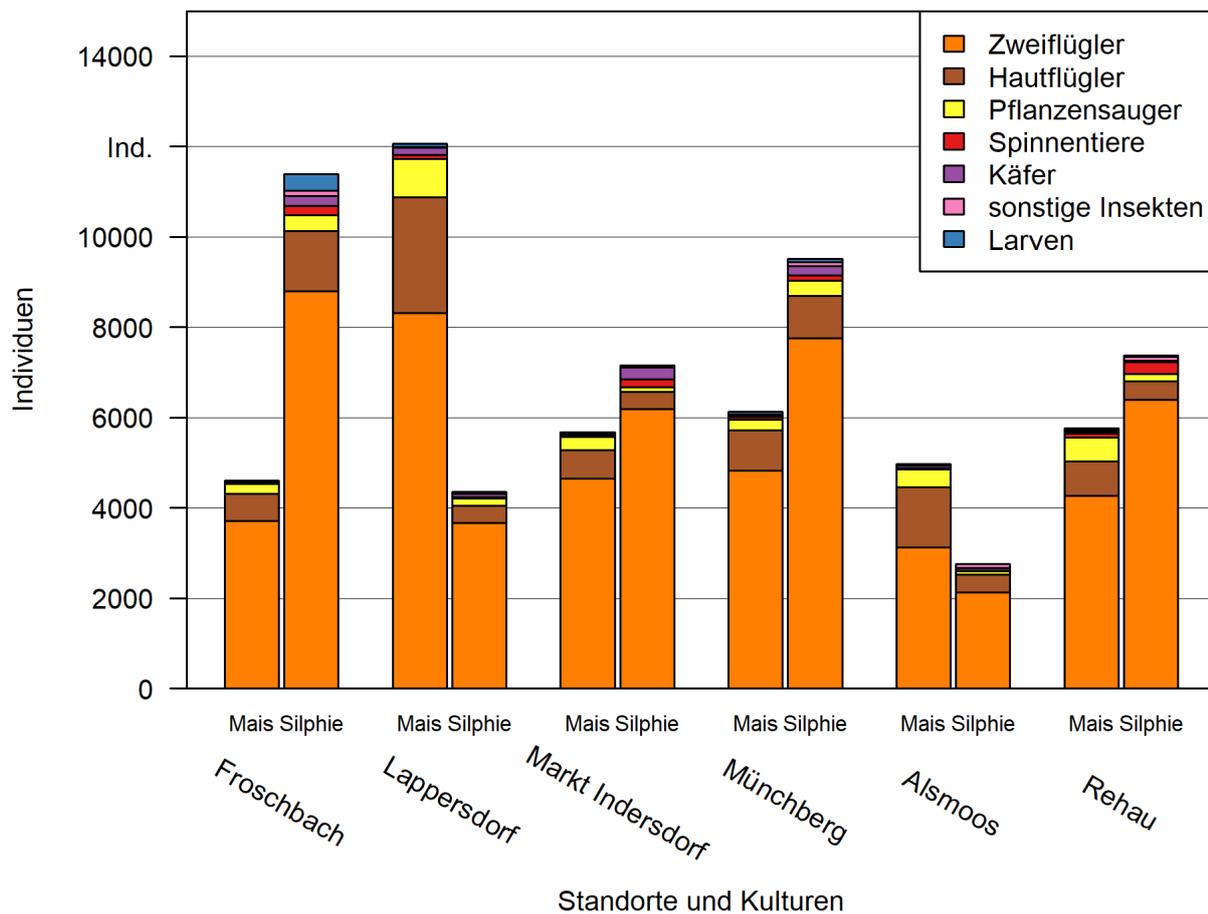


Abbildung 109: Individuenzahlen in Malaisefallen gefangener Arthropoden nach ökologischen Gruppen in Mais- und Silphiepraxisflächen im Juli 2018 (Fangperioden: Froschbach & Lappersdorf 13 Tage, Markt Indersdorf & Petersdorf 14 Tage, Münchberg & Rehau 15 Tage)

Zweiflügler, also Fliegen und Mücken, machen typischerweise den größten Teil der gefangenen Individuen in Malaisefallen aus. Bei dieser Untersuchung lag ihr Anteil bei 64–87 % der gefangenen Arthropoden. Signifikante Unterschiede zwischen den Kulturen konnten nur für die „sonstigen Insekten“ nachgewiesen werden und hier waren es vor allem die Schmetterlinge, die etwa 70 % dieser Gruppe ausmachten. Auch Thripse, Staubläuse, Milben und Ohrwürmer waren in der Summe mehr als dreimal häufiger in den Fallen von Silphie- als in Maisfeldern zu finden. Dies deutet auf eine ausgewogenere und diversere Artengruppengemeinschaft in Silphie als in Mais hin. Über die Artenvielfalt der mit den Malaisefallen gefangenen Tiere können leider keine Aussagen getroffen werden.

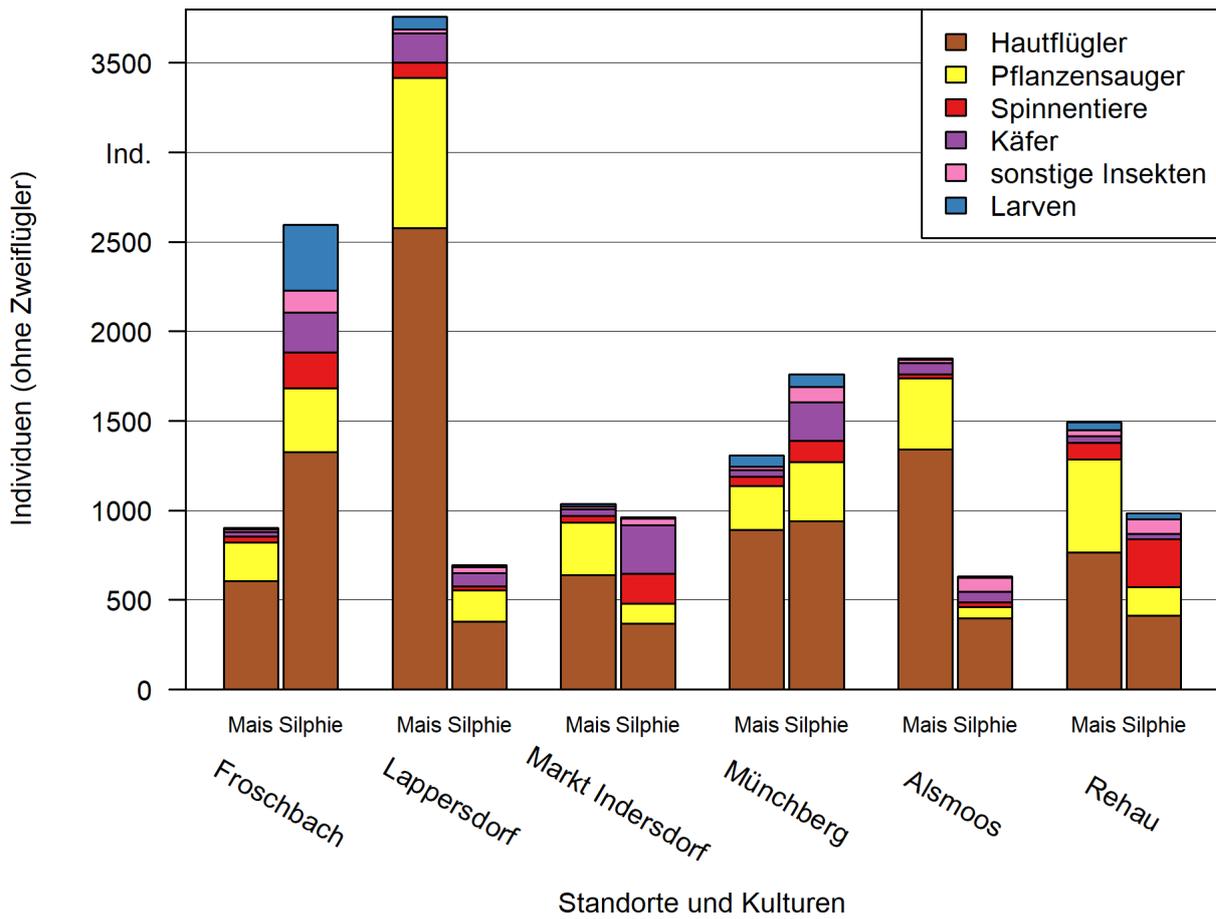


Abbildung 110: Individuenzahlen in Malaisfallen gefangener Arthropoden ohne Zweiflügler nach ökologischen Gruppen in Mais- und Silphiepraxisflächen im Juli 2018 (Fangperioden: Froschbach & Lappersdorf 13 Tage, Markt Indersdorf & Petersdorf 14 Tage, Münchberg & Rehau 15 Tage)

Laufkäfer

Insgesamt 1284 Laufkäfer aus 47 Arten wurden mit Bodenfallen auf Silphie und Maisfeldern unter Praxisbedingungen vom 17.07.2018 bis 05.08.2018 gefangen. Die Aktivitätsdichte war am höchsten in Lappersdorf (3,91), Froschbach (3,35) und Markt Indersdorf (3,35), mittel in Petersdorf (2,42) und gering auf den oberfränkischen Standorten Rehau (1,56) und Münchberg (1,11). Die Artenzahl lag zwischen 13 und 21 für die Standorte sowie sieben und 17 für die einzelnen Felder. Aufsummiert über die Standorte wurden 29 Arten in Maisfeldern und 38 Arten in Silphiefeldern nachgewiesen (Tabelle 41). Zu diesem Zeitpunkt (Hochsommer) waren larval überwinterte Herbsttiere wie, *Harpalus rufipes*, *Calathus fuscipes*, *Pterostichus melanarius* und *Amara aulica*, die dominanten Arten.

Tabelle 41: Ergebnisse der Laufkäferfauna für Mais- und Silphiefelder unter Praxisbedingungen im Juli 2018 auf jeweils sechs Standorten in Bayern

	Mais	Silphie
Artenzahl (gesamt)	29	38
Mittlere Artenzahl	10,3 ± 3,7	13,2 ± 2,6
Diversität – inverser Simpson-Index	2,94 ± 1,26	4,53 ± 1,18
Aktivitätsdichte in Individuen/Fallentag	1,63 ± 0,88	0,97 ± 0,70
Anzahl samenfressender Laufkäfer	167	196
Anzahl samenfressender Laufkäfer ohne <i>Harpalus rufipes</i>	14 ^a	126 ^b
Anzahl kleiner räuberischer Laufkäfer	91	57
Anzahl großer räuberischer Laufkäfer	1	3

Obwohl die Unterschiede zwischen Mais- und Silphiefeldern in der Gesamtartenzahl mit neun Arten offensichtlich waren, konnten sie statistisch nicht abgesichert werden, da die einzelnen Standorte keinen einheitlichen Trend zeigten. An vier Standorten war die Artenzahl in Silphie höher, an zwei Standorten in Maisfeldern. Bemerkenswerterweise wurden die meisten Arten in einem Maisfeld in Markt Indersdorf festgestellt. An diesem Standort war der Boden mit einigen Unkräutern bewachsen und der Mais weniger gut entwickelt als an den übrigen Standorten. Dennoch wurden 24 Arten sowohl in Mais- als auch in Silphiefeldern gefunden, fünf ausschließlich in Maisfeldern und 14 ausschließlich in Silphiefeldern. Eindeutige Ergebnisse konnten für samenfressende Arten, ohne die sehr häufige Art *Harpalus rufipes*, die individuenreich in Maisfeldern gefangen wurde, festgestellt werden. Andere samenfressende Arten waren signifikant häufiger in der Silphie zu finden. Besonders *Amara aulica* erreichte hohe Aktivitätsdichten an zwei Standorten. Diese Art war typisch für Blühflächen und in benachbarten Maisfeldern [30]. Aufgrund der kurzen Fangperiode und abweichenden Witterungsbedingungen vor der Aufnahme ist es möglich, dass der Höhepunkt der Aktivität nicht für alle Arten an allen Standorten beprobt wurde. Erwartungsgemäß bevorzugte *Bembidion quadrimaculatum* Maisfelder. Auch einige der häufigsten Arten auf Ackerland in Mitteleuropa, wie *Pterostichus melanarius*, *Poecilus cupreus*, *Calathus fuscipes* und *Harpalus rufipes*, waren stärker mit den Mais- als mit den Silphiefeldern verbunden.

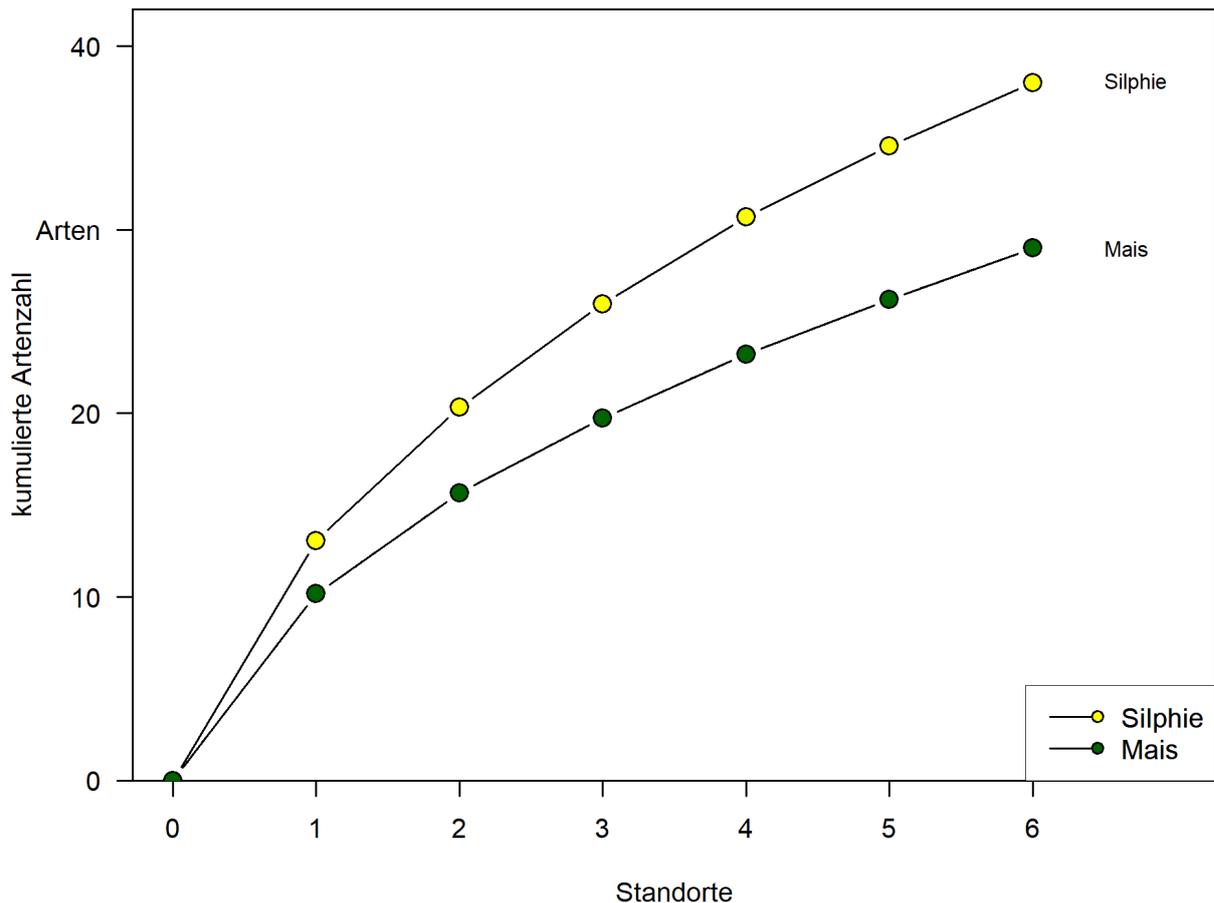


Abbildung 111: Artenakkumulationskurven der Laufkäfer basierend auf jeweils sechs Standorten von Mais- und Silphiefeldern unter Praxisbedingungen über einen Fangzeitraum von etwa zwei Wochen im Juli 2018

Die diversere Laufkäfergemeinschaft unter Silphie im Vergleich zu Mais im Hochsommer zeigte sich auch in der Artenakkumulationskurve (Abbildung 111). Aufgrund der kurzen Fangperiode und insgesamt niedrigen Anzahl gefangener Individuen sind die Artenakkumulationskurven allerdings weit von einer Sättigung entfernt.

Die Untersuchungen zur Insektenvielfalt auf Praxisflächen mit Mais und Silphie konnten zeigen, dass im kurzen Untersuchungszeitraum im Hochsommer keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Kulturen hinsichtlich der Masse an flugaktiven Insekten nachgewiesen werden konnten. Entscheidende Faktoren, wie die umgebende Landschaft, der Etablierungsstand der Silphie und die Wechselwirkungen von Methode und Witterung, sind nicht ausreichend erfasst bzw. mit der geringen Anzahl der Standorte nicht erfassbar. Zudem fehlt eine detaillierte Analyse der gefangenen Insekten auf Artebene. Trotz dieser Einschränkungen muss die Diskrepanz zwischen der öffentlichen Wahrnehmung von Maisfeldern und deren tatsächlicher Fauna diskutiert werden. Die vorliegende Untersuchung kann dazu beitragen, Maisfelder hinsichtlich ihrer Fauna exakter und weniger abwertend („ökologisch nahezu tot“) einzuordnen.

6 Schlussfolgerung für die Praxis

Aus ökologischer Sicht besitzen die mehrjährigen Energiepflanzen sehr viele Vorteile, so dass die Ergänzung oder teilweise Substitution annueller Kulturen, wie GPS-Getreide und Silomais, durch mehrjährige Dauerkulturen für die Produktion von Biogas klar befürwortet wird. Auch thermisch genutzte Kulturen können in Zukunft eine wichtige Ergänzung zu Brennholz werden.

6.1 Pflanzenbau

Das erste Jahr dient bei den Dauerkulturen der Etablierung. Ein erntewürdiger Biomasseaufwuchs wird nicht gebildet, aber die Kulturpflege während der Anwuchsphase ist beim Anbau von Dauerkulturen besonders wichtig. Ein ungleichmäßiger, lückiger Bestand mit Verunkrautung kann zu Ertragsminderung während der gesamten Standdauer und zum vorzeitigen Umbruch führen. Dies zeigte sich besonders bei der **Sida**. Sie war schwierig zu etablieren (vgl. Abschnitt 5.1.2.4) und die Bestände verunkrauteten stark, wodurch die Erträge massiv zurückgingen. Aber auch dort, wo die Etablierung gelungen war, waren die anderen Dauerkulturen ertragreicher. Auf bayerischen Standorten konnte Sida nicht überzeugen. Sida ist als Biogassubstrat und für die thermische Nutzung verwendbar. Die Methanausbeuten liegen im mittleren Bereich, der Heizwert ist gut und für die thermische Nutzung bringt Sida eine hohe Ascheerweichungstemperatur von etwa 1400 °C mit, das heißt, es besteht keine Gefahr der Verschlackung im Brennraum. Trotz dieser Vorzüge kann Sida aus pflanzenbaulicher Sicht aufgrund ihrer unsicheren Etablierung, starken Neigung zur Verunkrautung und geringen Ertragsniveaus nicht empfohlen werden.

Für die **Durchwachsene Silphie** ist die Etablierung durch Saat mittlerweile gängig, eine teure Pflanzung ist nicht mehr nötig. In der Praxis hat Aussaat der Silphie in Untersaat unter Mais stark zugenommen. Das Verfahren hat den Vorteil, dass man im ersten, normalerweise ertraglosen Jahr eine Maisernte einfahren kann, die nur wenig unter den üblichen Maiserträgen liegt. Zumindest in den ersten Erntejahren verringert sich dadurch aber der Ertrag der Silphie. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt davon ab, ob und wie schnell sich die Silphieerträge an die der Reinsaat angleichen und wie viele Jahre der Bestand genutzt wird. Für Lagen, in denen Sommertrockenheit erwartet werden kann, sollte auf eine Silphie-Reinsaat ausgewichen werden. Damit kann sich die Silphie ohne Konkurrenz durch den Mais etablieren und es steht ein längeres Zeitfenster zur mechanischen Beikrautkontrolle zur Verfügung.

Auf Standorten mit guter Nährstoff- und Wasserversorgung konnte die Silphie im Versuch hohe Erträge über 180 dt TM/ha liefern, die in guten Jahren fast an die Maiserträge herankamen. Auf trockenen, flachgründigen Standorten sowie in trockenen Jahren gingen die Erträge zurück. Im Mittel wurden 149 dt TM/ha erreicht. Die Methanausbeute der Silphie ist deutlich niedriger als die des Maises. Die Trockensubstanzgehalte lagen meist unter den geforderten 28 %, die Silierung ist aber trotzdem verlustarm möglich. Die Ernte sollte auf bayerischen Standorten Ende August bis Ende September erfolgen. Für tiefgründige

oder grundwassernahe Standorte ist die Silphie zu empfehlen, vor allen, wenn weitere Punkte wie ungünstiger Flächenzuschnitt, weit entfernte Lage und auch ökologische Gesichtspunkte dazukommen.

Auch das **Riesenweizengras** zeigte auf Standorten mit guter Wasser- und Nährstoffversorgung, wie beispielsweise Wolferkofen, die höchsten Erträge. Riesenweizengras hat die Hauptwachstumsphasen im Frühjahr und Herbst, im Sommer legt es eine Wachstumspause ein. Dadurch kommt es mit Sommertrockenheit gut zurecht. Zu den Hauptwachstumsphasen müssen aber ausreichend Niederschläge fallen, sonst kommt es zu Ertrags-einbußen. Im Versuch wurden Erträge bis zu 180 dt TM/ha erreicht, im Mittel über alle getesteten Standorte lagen sie aber nur bei 117 bis 136 dt TM/ha je nach Sorte. Die Sortenwahl hatte einen großen Einfluss auf die Ertragshöhe. Durch die Wachstumspause im Sommer besteht die Gefahr, dass sich Unkräuter etablieren, eine Herbizidbehandlung kann hier nötig sein. Die Methanausbeuten des Grases sind hoch, die Methanerträge kamen aber nicht an die von Mais heran. Lager war beim Riesenweizengras ein Problem und kann zu Ernteverlusten führen. Zwischen Ende Rispenschieben und Mitte Blüte lag der Trockensubstanzgehalt im optimalen Bereich zwischen 28 und 35 %. Der erste Schnitt sollte bis Ende Juni erfolgen, der zweite Schnitt im Oktober.

Switchgras ist je nach Sorte als Biogassubstrat oder thermisch nutzbar. Für die Biogasnutzung wird es zweimal, im Sommer sowie im Herbst, geschnitten. Für die thermische Nutzung wird der über Winter abgetrocknete Bestand im zeitigen Frühjahr vor Wiederaustrieb geerntet. Das Switchgras zeigte sich sehr trockentolerant. Auf den Hohertragsstandorten sind für die Biogasnutzung mit Riesenweizengras und Silphie höhere Erträge möglich. Aber auf den trockeneren Standorten und in den Trockenjahren 2018 und 2019 zeigte sich Switchgras sehr ertragsstabil mit Durchschnittserträgen von 131 dt TM/ha. Damit ist es eine gute Alternative für Grenzertragsstandorte, besonders wenn in Zukunft trockene Jahre häufiger auftreten werden. Die Methanausbeute ist gut und der Methanertrag je Hektar lag auf ähnlichem Niveau wie bei Silphie und Riesenweizengras. Das gute Abschneiden des Switchgrases lag sicher auch daran, dass zwei von drei Versuchsjahren überdurchschnittlich warm und trocken waren und dem wärmeliebenden Gras damit sehr günstige Witterung boten. Um einen ausreichenden Trockensubstanzgehalt zu erreichen, sollte der erste Schnitt ab Anfang Juli erfolgen, sobald 28 % Trockensubstanzgehalt erreicht sind. Bei einer späteren Ernte ermöglichen die begrenzte Zeit und abnehmende Temperaturen keinen erntewürdigen Bestand für einen zweiten Schnitt. Für die thermische Nutzung lagen die Erträge mit durchschnittlich 90 dt TM/ha deutlich unter denen von Miscanthus. Der Heizwert ist gut und die Ascheerweichungstemperatur liegt höher als beim Miscanthus, aber nicht immer über den geforderten 1200 °C, um eine Verschlackung zu vermeiden. Bei Schneefall im Winter kommt es zu starkem Lager und entsprechenden Ertrags- und Qualitätsverlusten, deshalb kann für bayerische Standorte für die thermische Nutzung keine Anbauempfehlung gegeben werden.

Der **Miscanthus** war auf allen Standorten die beste thermisch nutzbare Kultur mit einem Durchschnittsertrag von 142 dt TM/ha. Nur bei extrem trockenen Bedingungen kam es zur Ertragsminderung. Miscanthus hat eine lange Nutzungsdauer von 15 bis über 25 Jahren (vgl. Abschnitt 5.1.2.4 Etablierung und Standdauer) und der Heizwert ist gut. Ein Problem

mit Miscanthus ist die niedrige Ascheerweichungstemperatur von etwa 900 °C, die zu Verschlackung im Ofen führen kann. Öfen müssen demnach speziell an die Verbrennung von Miscanthus angepasst werden. Ein ausreichender Trockensubstanzgehalt von mindestens 85 % für die Lagerung wurde nicht immer erreicht, eine Trocknung ist eventuell nötig.

Pflanzenbauliche Vor- und Nachteile der Kulturen

Die Durchwachsene Silphie zeigt ihr volles Ertragspotenzial besonders auf tiefgründigen Böden mit guter Wasserversorgung. Riesenweizengras kann Sommertrockenheit gut überstehen, für hohe Erträge braucht das Gras ausreichend Niederschläge in Frühjahr und Herbst. Für ganzjährig trockene Standorte ist es weniger geeignet. Beide Kulturen kommen im Winter auf Höhenlagen zurecht, durch die verkürzte Vegetationsperiode werden allerdings keine Höchstertäge erreicht. Switchgras bevorzugt warme Standorte und kann Trockenheit gut überstehen. Es kann problemlos auf Hohertragsstandorten wachsen, aber hier gibt es ertragsstärkere Alternativen. Höhenlagen sind normalerweise zu kühl für Switchgras. Die Winter übersteht es ohne Auswinterungsverluste, aber in der Vegetationsperiode hat es einen zu hohen Wärmeanspruch. Eine wirkliche Standortempfehlung für Sida kann aufgrund der überall beobachteten starken Verunkrautung nach mangelhafter Etablierung nicht abgeleitet werden. Miscanthus sollte nur auf extrem trockenen Standorten nicht angebaut werden, ansonsten stellt er wenig Ansprüche an den Standort.

Um eine Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser zu vermeiden, sind möglichst niedrige N_{\min} - bzw. Nitratgehalte im Boden vor Vegetationsende anzustreben. Auf den Flächen der mehrjährigen Energiepflanzen erfolgt im Herbst keine Bodenbearbeitung. Teilweise können ein Wiederaufwuchs und das intakte Wurzelsystem auch nach der Ernte im Herbst noch Stickstoff aufnehmen, daher sind diese Kulturen vielversprechend für den Grundwasserschutz. Bodenuntersuchungen haben im Vergleich mit den einjährigen Referenzkulturen und benachbarten Praxisäckern das Potenzial der Dauerkulturen im Gewässerschutz gezeigt. Der Anbau der einjährigen Kulturen Mais und Winterweizen hinterließ oft deutlich höhere, potenziell auswaschbare Stickstoffmengen.

Beim Anbau von Dauerkulturen fallen nach dem ersten Jahr die jährliche Bodenbearbeitung und Ansaat weg, dies spart Zeit und Ressourcen. Der Düngemiteleinsatz ist besonders bei den thermisch genutzten Kulturen gering, da dort viele Nährstoffe im Herbst in die Wurzeln rückverlagert werden. Die Stickstoffbedarfswerte sind für Silphie (140 kg N/ha), Sida (100 kg N/ha) und Switchgras (100 kg N/ha) für die Biogasnutzung laut Gelbem Heft niedrig, Riesenweizengras (200 kg N/ha) hingegen benötigt eine hohe Stickstoffdüngung für hohe Erträge [199]. Die Unkrautkontrolle ist besonders während der Etablierung wichtig. War die Etablierung gelungen, überwuchsen Miscanthus und Silphie die Beikräuter im Frühjahr und ein Herbizideinsatz war selten nötig. In Switchgras und Riesenweizengras mussten häufiger Herbizide gegen zweikeimblättrige Beikräuter eingesetzt werden, um den Unkrautbesatz gering zu halten, wenn auch nicht in jedem Jahr auf jedem Standort. Besonders Riesenweizengras neigt zu Verunkrautung im Sommer zur Wachstumspause. Nehmen die Unkräuter und vor allem Ungräser überhand, verkürzt sich die Nutzungsdauer oder endet ganz.

6.2 Boden

Auch wenn die Untersuchungen zu den C_{org} -Vorräten von Silphie, Riesenweizengras und Miscanthus in diesem Versuch keine nachweisbaren Unterschiede erkennen lassen, kann davon ausgegangen werden, dass langfristig unter diesen Dauerkulturen Humus aufgebaut wird. Dies ist aufgrund der Festlegung bedeutender Mengen atmosphärischen Kohlenstoffs nicht nur ein Beitrag zum Klimaschutz, sondern auch ein Beitrag zur Aufrechterhaltung der Funktionalität von Böden bzw. Ökosystemdienstleistungen, wie Wasser- und Nährstoffspeicherung und Erosionsschutz. Der zu erwartende positive Effekt hinsichtlich Humus begründet sich im hohen Eintrag organischer Substanz bei mehrjährigen Energiepflanzen aufgrund der intensiven Bewurzelung, die bedeutend höher ist als bei Fruchtfolgen mit Silomais. Für die Biogaskulturen ist zusätzlich noch die Wirkung der erzeugten Gärreste zu berücksichtigen, während für den Vergleich mit Energiepflanzenfruchtfolgen Aspekte wie die Strohnutzung und der Zwischenfruchtanbau entscheidend sind. Kulturen wie Miscanthus und Sida, die bei Ernte im Frühjahr und über Blattfall im Winter organische Substanz und Nährstoffe vor Ort in den Kreislauf zurückführen, sind in der Regel ebenfalls mit einem im Vergleich mit Ganzpflanzensilagen erhöhten Eintrag organischer Substanz verbunden. Inwieweit sich die Bodenruhe und die bestands- und bodenklimatischen Verhältnisse in den mehrjährigen Energiepflanzenkulturen auf den Abbau bzw. die Stabilisierung der organischen Substanz auswirken, insbesondere unter sich ändernden Klimabedingungen, ist bisher nur schwierig abzuschätzen. Für die Bilanzierung des festgelegten Kohlenstoffs in den mehrjährigen Energiepflanzen ist neben dem Humus auch das ausge dehnte Wurzelsystem mit den Rhizomen einiger Dauerkulturen zu berücksichtigen. In dieser Hinsicht besteht jedoch noch Forschungsbedarf.

Unterschiede in der Lagerungsdichte, die bei ausbleibender Bodenbearbeitung erwartet wurden, konnten nur an einzelnen Standorten nachgewiesen werden. Hierbei lagerten die Referenzparzellen mit Maisstoppeln im Oktober im Mittel der Standorte trotz jährlicher Bodenbearbeitung dichter als die Parzellen mit Silphie oder Riesenweizengras. Dies kann durch die erhöhte Durchwurzelung und Regenwurmaktivität der Dauerkulturen erklärt werden. Da die Ergebnisse zwischen den Standorten jedoch variierten, müssten zu diesem Zeitpunkt weitere Untersuchungen die Schlussfolgerungen zu Auswirkungen auf Oberflächenabfluss und Erosionsgefährdung stützen. Der zeitliche Verlauf von Bodenbearbeitung, ober- und unterirdischem Wachstum sowie der Ernte der Kulturen beeinflusst die Bodeneigenschaften, die neben den Lebensraumbedingungen und den organischen Prozessen im Boden auch die Erosionsneigung auf der Fläche prägen. Sind die mehrjährigen Kulturen etabliert, liefern sie im Vergleich mit klassischen Energiepflanzenfruchtfolgen durch die längere Bodenbedeckung, die intensive Durchwurzelung und das Vorhandensein von Ernteresten und nicht lebender organischer Materie jedoch in der Regel einen besseren Schutz vor Bodenabtrag.

6.3 Fauna und Biodiversität

Die Untersuchungen zur Fauna konnten vier bis fünf Jahre nach der Etablierung der mehrjährigen Kulturen nachweisen, dass der Regenwurmbestand im Vergleich zu einer Fruchtfolge mit annuellen Kulturen, Zwischenfrüchten und regelmäßiger Bodenbearbeitung gefördert wird. Insbesondere die Silphie und die Sida führten zu einem höheren Regenwurmbestand. Aber unter allen mehrjährigen Kulturen lag die Siedlungsdichte der Regenwürmer signifikant höher als in der Fruchtfolge mit regelmäßiger Bodenbearbeitung. Insgesamt nimmt der Regenwurmbestand im Boden in folgender Reihenfolge zu: Referenz (dreigliedrige Fruchtfolge) < Riesenweizengras, Switchgras, Miscanthus < Sida, Silphie. Für die positive Wirkung der Dauerkulturen auf Regenwürmer sind wahrscheinlich die seit Jahren andauernden Bodenruhe, der hohe und längere Bodenbedeckungsgrad, z. B. durch Streuaufgabe, sowie das gute Nahrungsangebot durch Erntereste und Wurzelmasse im Boden verantwortlich. Bei der Artenvielfalt der Regenwürmer profitieren auch die Energiegräser inklusive Miscanthus, wenngleich sich standortspezifisch unterschiedliche Effekte zeigen. Größere Regenwurmpopulationen steigern die biologische Aktivität, ihre Leistungen unterstützen viele wichtige Funktionen im Boden, z. B. das Nährstoffrecycling und ein stabiles Bodengefüge. Weiterhin verbessern sie die Dränfähigkeit und Durchlüftung des Bodens. Vor allem die tiefgrabende Art *Lumbricus terrestris*, die von Dauerkulturen besonders profitiert, fördert mit ihren stabilen vertikalen Röhren die Wasserversickerung in den Boden. Dieser Aspekt spielt besonders bei ausbleibender Bodenbearbeitung eine wichtige Rolle, beispielsweise für den Erosionsschutz. Für die Biogaskulturen wäre zudem eine zusätzliche Anregung der Regenwurmbesiedlung durch die Rückführung der Gärreste zu erwarten. Bemerkenswert ist, dass die Dauerkulturen auch nach dem besonders trockenen Jahr 2018 einen für bayerische Verhältnisse normalen Regenwurmbesatz aufwiesen, während die regelmäßig bearbeiteten Flächen deutliche Einbußen verzeichneten. Bei der im Rahmen des Klimawandels zu erwartenden Häufung von Extremwettern inklusive langanhaltender Trockenperioden könnten sich mehrjährige Kulturen als stabilere Lebensräume resilienter gegenüber widrigen Bedingungen für die Bodenfauna erweisen. Insgesamt kann der Anbau mehrjähriger Energiepflanzen zu einem biologisch aktiven und somit funktionsfähigen Boden beitragen und ist vor allem in intensiv genutzten Ackerbaugebieten zur Diversifizierung von Anbauverfahren und Risikostreuung, um sich den Herausforderungen des Klimawandels zu stellen, empfehlenswert.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Insektenfauna einschließlich nützlicher Tiere, wie Bestäuber und Schädlingsantagonisten, sind die gewonnenen Ergebnisse nicht so eindeutig. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass

- samenfressende Laufkäfer aufgrund der dichten und diversen Beikrautflora besonders häufig in der Sida auftraten,
- die Silphie Winterlager für kleine und regulatorisch wirksame Laufkäfer bieten kann,
- auf sechs Praxisflächen die Artenzahl der Laufkäfer für die Silphie um neun Arten höher war als für Mais,
- das Riesenweizengras im Herbst grüne Inselrefugien für pflanzensaugende und andere Insekten bietet,
- im September auf abgeernteten Parzellen von Silphie und Sida eine höhere Siedlungsdichte an Arthropoden zu finden ist als auf abgeernteten Maisflächen,
- Stoppeln und Stängel attraktive Strukturen für verschiedene Arthropoden sind und ihre Besiedlungsdichte dort höher lag als auf den unmittelbar umgebenden offenen Bodenstellen.

Der Beikrautflora kommt durch ihr Angebot an Blüten, Samen und Blättern eine zentrale Bedeutung für die Biodiversität im Ackerbau zu. Andererseits muss festgestellt werden, dass auch typische Ackerkulturen einer Vielfalt angepasster Tierarten als Lebensraum dienen und sie hier häufig vorkommen. So waren in den Parzellenversuchen keine Unterschiede in der Diversität der Laufkäferfauna zwischen Silphie und der Referenz festzustellen. Der GPS-Roggen zeigte nach der Ernte höhere bzw. vergleichbare Werte hinsichtlich der oberflächlichen Aktivität von Springschwänzen und Milben wie das Riesenweizengras. Auch in Maisfeldern, die in der Öffentlichkeit oft den Ruf als von Insekten unbesiedelte Fläche haben, war im Hochsommer mit Malaisefallen im Mittel über sechs Standorte keine geringere Insektenbiomasse nachzuweisen als in Silphiefeldern. Zwar sind entsprechende Ergebnisse immer vor dem Hintergrund der angewandten Methodik zu beurteilen und keine nachweisbaren Unterschiede sind keineswegs mit „ist identisch“ gleichzusetzen. Doch wird zum einen klar, dass die Erfassung und Beurteilung der Biodiversität sich nicht immer auf einfache Aussagen reduzieren lässt, und zum anderen, dass die Wechselwirkungen verschiedener Lebensräume mit den Ansprüchen der Arten und daher die Strukturvielfalt in der Agrarlandschaft, insbesondere für mobile, flugfähige Arten, entscheidende Aspekte sind.

Mehrjährige Energiepflanzen bieten für die Biodiversität in der Agrarlandschaft vor allem die Chance der Erweiterung des Nischen-Angebots. Die Ansprüche der verschiedenen Arten, Entwicklungsstadien und Lebensgemeinschaften sind komplex und diversere Landschaften sind für deren Erhaltung besser geeignet. Kulturen mit eher außergewöhnlichen Wachstums- und Erntezyklen können die zeitliche und räumliche Diversität und das Nutzungsmosaik in einer ackerdominierten Agrarlandschaft deutlich erhöhen. So bietet das Riesenweizengras im Herbst vor dem zweiten Schnitt einen bis zu 60 cm hohen grünen Bestand mit intensiver Bodenbedeckung, der über Jahre hinweg aus Gräsern besteht und

nicht wie eine Zwischenfrucht extra etabliert werden muss. Alle im Frühjahr trocken geernteten Kulturen liefern über Winter Schutz vor Kälte und Frost, was sich auch auf Teile der Fauna positiv auswirken kann. Nektar- und Pollenangebot gegen Ende der Vegetationsperiode durch eine hochwüchsige, am Boden sehr schattige Staude, zusätzlich kombiniert mit verfügbarem Wasser in den Blattachseln, kann momentan auch nur die Durchwachsene Silphie liefern. Werden mehrjährige Energiepflanzen so angelegt, dass sich die Grenzliniendichte in der Agrarlandschaft erhöht, sind zusätzliche positive Effekte auf die Fauna zu erwarten.

Silphie, Riesenweizengras und Miscanthus bleiben jedoch hochproduktive Monokulturen und sind in ihrer ökologischen Wertigkeit in der Regel geringer als Blümmischungen für die Biogasproduktion oder artenreiches Grünland einzuordnen. Als nicht autochthone Pflanzen treffen sie in Bayern auf keine speziell angepasste Fauna. Jedoch sind viele pflanzenfressenden Arten nicht so stark spezialisiert, wie das Auftreten des Malven-Erdflchs auf der Sida oder verschiedener Pflanzensauger am Riesenweizengras belegt. Auch Pollen, Nektar und abgestorbenes Pflanzenmaterial sind in der Regel für wenig spezialisierte heimische Arten nutzbar. Andere Arten profitieren lediglich von den spezifischen mikroklimatischen Bedingungen oder dem Angebot an Beute. Für die Diversität der Kulturarten stellt der Ersatz einer Fruchtfolge durch mehrjährige Monokulturen eine Verringerung der Diversität dar. Endet die Nutzungsdauer der Dauerkulturen, kann sich dies wieder ändern. Von Bedeutung ist also auch der zeitliche Kontext. Für viele Tierarten kann die Dauerhaftigkeit des Habitats auch Vorteile haben, vor allem wenn die neuen mehrjährigen Energiepflanzen im räumlichen Kontext die Kulturartenvielfalt der Agrarlandschaft bereichern.

Will man Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der ökologischen Wertigkeit der mehrjährigen Energiepflanzen durchführen, muss man meist Ertragseinbußen, Risiken oder Minderungen bei der Substratqualität hinnehmen. Mögliche geänderte Bewirtschaftungsmaßnahmen hierbei könnten sein:

- Begründung von Silphie bei reduziertem Herbizideinsatz oder rein mechanischer Beikrautkontrolle, Akzeptanz von mehr Beikräutern im Etablierungsjahr, allerdings hohes Risiko lückigen Kulturbestands mit nachfolgender Ertrags- und Qualitätsminderung,
- spätere Erntezeitpunkte der Silphie zur Maximierung der Blühdauer mit verlängertem Nektar- und Pollenangebot, dabei verminderte Silierbarkeit und Methanausbeute,
- verlängerte Nutzungsdauer durch längere Standzeiten der Dauerkulturen, trotz abnehmender Erträge und zunehmenden Beikrautbesatzes, andauernde Bodenruhe mit der Möglichkeit zur Etablierung der Fauna und Entwicklung des Bodens,
- Verzicht auf Herbizide beim Anbau von Riesenweizengras, allerdings hohes Risiko entsprechender Ertrags- und Qualitätsminderung,
- Erhöhung der Grenzliniendichte und Nutzungsvielfalt in ausgeräumten Agrarlandschaften oder auf großen Schlägen durch Integration mehrjähriger Energiepflanzen.

Eine klare Absage im Zusammenhang mit dem Anbau mehrjähriger Energiepflanzen muss einer Intensivierung auf naturschutzfachlich wertvollen, artenreichen Flächen wie

Grenzertragsäckern oder Dauergrünland erteilt werden, auch wenn so die geringere Flächenproduktivität kompensiert werden könnte. Beispielsweise ist auch die Bepflanzung von Gewässerrändern mit Silphie – um den Ackerstatus nicht zu verlieren – nicht nur aufgrund der Verbreitung der möglicherweise invasiven Silphie kritisch zu sehen, sondern sollte nicht dem Leitbild einer synergetischen, landschaftlich integrierten Biogasproduktion entsprechen.

Insgesamt kann bestätigt werden, dass Dauerkulturen ein gutes agrarökologisches Potenzial bieten. Mit Ihnen kann die biologische Funktionalität des Bodens verbessert und vor allem in strukturarmen, ackerdominierten Agrarlandschaften die Nischenvielfalt, die Grenzliniendichte sowie das räumliche und zeitliche Nutzungsmosaik erhöht und dadurch ein Beitrag zur Verbesserung der Biodiversität geleistet werden.

Quellenverzeichnis

- [1] 3N KOMPETENZZENTRUM NIEDERSACHSEN, NETZWERK NACHWACHSENDE ROHSTOFFE UND BIOÖKONOMIE. E. V. (2020): Energiepflanzen. Werlte, URL: <https://www.3-n.info/themenfelder/rohstoffe/energiepflanzen.html> (Stand 03.08.2020)
- [2] ADLER, P. R.; SANDERSON, M. A.; BOATENG, A. A.; WEIMER, P. J.; JUNG, H.-G. (2006): Biomass Yield and Biofuel Quality of Switchgrass Harvested in Fall or Spring. *Agronomy Journal*, Bd. 98, S. 1518-1525
- [3] AGRAVIS RAIFFEISEN AG (2018): Chemische Zusammensetzung. Münster, URL: http://www.silierung.de/de/silierung_de/silierung/silierung_in_der_theorie/die_vergaerbarkeit_von_mikroorganismen.html (Stand: 20.11.2018)
- [4] BÀRBERI, P.; BURGIO, G.; DINELLI, G.; MOONEN, A. C.; OTTO, S.; VAZZANA, C.; ZANIN, G. (2010): Functional biodiversity in the agricultural landscape: relationships between weeds and arthropod fauna. *Weed Research*, Bd. 50, Nr. 5, S. 388-401
- [5] BERNSHAUSEN, F.; FUHR-BOßDORF, K.; KREUZIGER, J.; SACHER, T.; STÜBING, T. (2011): Förderung von Feldvogelgemeinschaften (Agro-Avizönosen) durch Integration von Artenhilfsmaßnahmen beim Anbau nachwachsender Rohstoffe. Mitarbeiter: Franziska Hillig, Matthias Korn. Frankfurt am Main: Staatliche Vogelschutzwarte für Hessen, Rheinland-Pfalz und das Saarland, 171 Seiten
- [6] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)(2001): Zehn Jahre Stickstoff-Monitoring. Freising-Weihenstephan, URL: <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/032228/index.php> (Stand: 03.08.2020)
- [7] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)(2018): Basisdaten (Düngeberatung/Düngeverordnung), Tabelle 1a. Freising-Weihenstephan, URL: <http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/031245> (Stand: 22.02.2018)
- [8] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)(2018): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. LfL-Information, Gelbes Heft. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. 14. Aufl., Januar 2018. Freising-Weihenstephan: Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 97 Seiten
- [9] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2020): Kalkulationsinstrumente für Verfahren des Energiepflanzenanbaus. Freising-Weihenstephan, URL: <https://www.lfl.bayern.de/iba/pflanze/104665/index.php> (Stand 21.07.2020)
- [10] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LFU) (2003). Rote Listen gefährdeter Tiere Bayerns. Augsburg, URL: https://www.lfu.bayern.de/natur/rote_liste_tiere/2016/index.htm (Stand 23.04.2019)
- [11] BELLAMY, P. E.; CROXTON, P. J.; HEARD, M. S.; HINSLEY, S. A.; HULMES, L.; HULMES, S.; NUTTALL, P.; PYWELL, R. F.; ROTHERY, P. (2009): The impact of growing miscanthus for biomass on farmland bird populations. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 33, Nr. 2, S. 191-199
- [12] BIERI, M.; CUENDET, G. (1989): Die Regenwürmer, eine wichtige Komponente von Ökosystemen. *Schweizerische landwirtschaftliche Forschung - Recherche agronomique en Suisse*, Bd. 28, Nr. 2, S. 81-96

- [13] BIERTÜMPFEL, A. (2015): Prüfung der Anbau- und Verwertungseignung alternativer Biogaspflanzen unter Thüringer Bedingungen. Abschlussbericht Projekt-Nr. 94.16, Dezember 2015. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 35 Seiten
- [14] 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, Laufzeit: 01.04.2010 bis 30.04.2013, FKZ-Nr.: 22012809 der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [FNR]). Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), 78 Seiten
- [15] BLOUIN, M.; HODSON, M. E.; DELGADO, E. A.; BAKER, G.; BRUSSAARD, L.; BUTT, K. R.; DAI, J.; DENDOOVEN, L.; PERES, G.; TONDOH, J. E.; CLUZEAU, D.; BRUN, J.-J. (2013): A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *European Journal of Soil Science*, Bd. 64, Nr. 2, S. 161-182
- [16] BOESE, L.; REICHARDT, I. (2013): Mehrjährige Energiepflanzen im Vergleich. In: DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (DWA) (Hrsg.): *Energietage Biogas mit begleitender Fachausstellung*, Garching, 09.–11. September. Hennef: DWA, S. 1-8
- [17] BORKOWSKA, H.; LIPIŃSKI, W. (2008): Comparison of content of selected elements in biomass of *Sida hermaphrodita* grown under various soil conditions. *Acta Agrophysica*, Bd.11, Nr. 3, S. 589-595
- [18] BORKOWSKA, H.; MOLAS, R. (2013): Yield comparison of four lignocellulosic perennial energy crop species. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 51, S. 145-153
- [19] BORKOWSKA, H.; MOLAS, R.; KUPCZYK, A. (2009): Virginia Fanpetals (*Sida hermaphrodita* Rusby) Cultivated on Light Soil, Height of Yield and Biomass Productivity. *Polish Journal of Environmental Studies*, Bd.18, Nr. 4, S. 563-568
- [20] BORKOWSKA, H.; STYK, B. (2006): Staude mit Potential. *Sida* als Energie- und Faserpflanze. *Energie Pflanzen*, Bd. 2, S. 12-13
- [21] BORKOWSKA, H.; WARDZINSKA, K. (2003): Some Effects of *Sida hermaphrodita* R. Cultivation on Sewage Sludge. *Polish Journal of Environmental Studies*, Bd. 12, Nr. 1, S. 119-122
- [22] BORKOWSKA, H.; STYK, B. (2006): *Slazowiec pensylwanski (Sida hermaphrodita* Rusby). *Uprawa i wykorzystanie. II Rozsz. Whyd. ER*. Lublin: Wydawnictwo Akademii Rolnicze, 67 Seiten, ISBN 978-8372591425
- [23] BOURKE, D.; STANLEY, D.; O'ROURKE, E.; THOMPSON, R.; CARNUS, T.; DAUBER, J.; EMMERSON, M.; WHELAN, P.; HECQ, F.; FLYNN, E.; DOLAN, L.; STOUT, J. (2014): Response of farmland biodiversity to the introduction of bioenergy crops: effects of local factors and surrounding landscape context. *GCB Bioenergy*, Bd. 6, Nr. 3, S. 275-289
- [24] BRIGHT, J. A.; ANDERSON, G. Q. A.; MCARTHUR, T.; SAGE, R.; STOCKDALE, J.; GRICE, P. V.; BRADBURY, R. B. (2013): Bird use of establishment-stage *Miscanthus* biomass crops during the breeding season in England. *Bird Study*, Bd. 60, Nr. 3, S. 357-369

- [25] BROCK, C.; BERNERT, S.; WILLMS, M.; KNEBL, L.; LEITHOLD, G. (2013): Bewertung von Energiepflanzen in der Humusbilanz – Status quo und Perspektiven. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 65, Nr. 6, S. 227-235
- [26] BRUHN, K.; REISINGER, K. (2015): Wärmegewinnung aus Biomasse. Vortragsfolien mit Erläuterungen. 3., erw. u. bearb. Aufl. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Berichte aus dem TFZ 8, 89 Seiten, ISSN 1614-1008
- [27] BUCHHOLTZ, J. (2012): ... zu viel gedüngt? Erfolgsparameter Herbst N_{min} . *Gewässerschutzberatung zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie*. Hrsg. v. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein, Kiel. Faltblatt vom 10.10.2012, 2 Seiten
- [28] BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (BFN) (2009): Die Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Bonn, URL: <https://www.bfn.de/themen/rote-liste.html> (Stand: 23.04.2019)
- [29] BUNDESAMT FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ UND LEBENSMITTELSICHERHEIT(2020): Verzeichnis zugelassener Pflanzenschutzmittel – Standardsuche. URL: <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/ListeMain.jsp?page=1&ts=1596719812917> (Stand 10.08.2020)
- [30] BURMEISTER, J.; WAGNER, C. (2014): Der Einfluss von Blühflächen auf epigäisch lebende Arthropoden. In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL)(Hrsg.): Faunistische Evaluierung von Blühflächen. Ergebnisse des Forschungsprojekts „Evaluierung und Optimierung von KULAP-A36 – Agrarökologische Ackernutzung und Blühflächen – zur Verbesserung der Wildlebensräume und zur Steigerung der Biodiversität in Bayern“. 1. Aufl., Januar 2014. LfL-Schriftenreihe, Nr. 1. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 65–77
- [31] BURMEISTER, J.; WALTER, R. (2016): Untersuchungen zur ökologischen Wirkung der Durchwachsenen Silphie aus Bayern. *Journal für Kulturpflanzen*, Jg. 68, Nr. 12, S. 407-411
- [32] BURMEISTER, J.; WALTER, R.; FRITZ, M. (2014): Auswirkung der Düngung mit Biogasgärresten auf die Bodentiere. *Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern. e. V. (ALB) (Hrsg.). Biogas Forum Bayern*, Nr. I – 27/2015. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern. e. V. (ALB) URL: <http://www.biogas-forum-bayern.de/media/files/0001/Auswirkung-der-Düngung-mit-Biogasgärresten-auf-die-Bodentiere.pdf> (Stand: 20.05.2016)
- [33] BURMEISTER, J.; ZACIOS, M.; WALTER, R. (2016): Regenwurmbesiedlung von Kurzumtriebsplantagen in der Gemeinde Kaufering. In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (LWF)(Hrsg.): Zur Ökologie von Kurzumtriebsplantagen. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), LWF Wissen, Jg. 79, S. 40-48
- [34] CHAUVAT, M.; PEREZ, G.; HEDDE, M.; LAMY, I. (2014): Establishment of bioenergy crops on metal contaminated soils stimulates belowground fauna. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 62, S. 207–211

- [35] CHIMENTO, C.; ALMAGRO, M.; AMADUCCI, S. (2016): Carbon sequestration potential in perennial bioenergy crops: the importance of organic matter inputs and its physical protection. *GCB Bioenergy*, Bd. 8, Nr. 1, S. 111–121
- [36] CHIVERTON, P. A.; SOTHERTON, N. W. (1991): The Effects of Beneficial Arthropods of the Exclusion of Herbicides from Cereal Crop Edges. *Journal of Applied Ecology*, Bd. 28, Nr. 3, S. 1027-1039
- [37] CHMELÍKOVÁ, L.; WOLFRUM, S. (2019): Mitigating the biodiversity footprint of energy crops – a case study on arthropod diversity. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 125, S. 180-187
- [38] CLAPHAM, S. J. (2011): The Abundance and diversity of small mammals and birds in mature crops of the perennial grasses *Miscanthus x giganteus* and *Phalaris arundinacea* grown for biomass energy. Dissertation. Cardiff, Wales, UK: University Cardiff School of Biosciences, 333 Seiten
- [39] CLAPHAM, S. J.; SLATER, F. M. (2008): The biodiversity of established biomass grass crops. *Aspects of Applied Biology, Biomass and Energy Crops III*, Bd. 90, S. 325-330
- [40] CLIFTON-BROWN, J. C.; LEWANDOWSKI, I. (2002): Screening *Miscanthus* genotypes in field trials to optimise biomass yield and quality in Southern Germany. *European Journal of Agronomy*, Bd. 16, Nr. 2, S. 97-110
- [41] CSETE, S.; STRANCZINGER, S.; SZALONTAI, B.; FARKAS, A.; PAL, R. W.; SALAMON-ALBERT, É.; KOCSIS, M.; TÓVÁRI, P.; VOJTELA, T.; DEZSÖ, J.; WALCZ, I.; JANOWSKY, Z.; JANOWSKY, J.; BORHIDI, A. (2011): Tall Wheatgrass Cultivar Szarvasi-1 (*Elymus elongatus* subsp. *ponticus* cv. Szarvasi-1) as a Potential Energy Crop for Semi-Arid Lands of Eastern Europe. Chapter 13. In: NAYERIPOUR, MAJID; KHESHTI, MOSTAFA (Hrsg.): *Sustainable Growth and Applications in Renewable Energy Sources*. London, UK: IntechOpen Limited, S. 269–294, ISBN 978-953-51-6081-6
- [42] CUMPLIDO-MARIN, L.; GRAVES, A. R.; BURGESS, P. J.; MORHART, C.; PARIS, P.; JABLONOWSKI, N. D.; FACCIOTTO, G.; BURY, M.; MARTENS, R.; NAHM, M. (2020): Two Novel Energy Crops. *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. – State of Knowledge. *Agronomy*, Bd. 10, Nr. 7, 928, Seite 1-67
- [43] DANDIKAS, V.; HEUWINKEL, H.; LICHTI, F.; DREWES, J. E.; KOCH, K. (2014): Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technology*, Bd. 174, S. 316-320
- [44] DANDIKAS, V.; HEUWINKEL, H.; LICHTI, F.; DREWES, J.E.; KOCH, K. (2015): Correlation between Biogas Yield and Chemical Composition of Grassland Plant Species. *Energy & Fuels*, Bd. 29, Nr. 11, S. 7221-7229
- [45] DAUBER, J.; CASS, S.; GABRIEL, D.; HARTE, K.; ÅSTRÖM, S.; O’ROURKE, E.; STOUT, J. C. (2015): Yield-biodiversity trade-off in patchy fields of *Miscanthus x giganteus*. *GCB Bioenergy*, Bd. 7, Nr. 3, S. 455-467
- [46] DAUBER, J.; MÜLLER, A. L.; SCHITTENHELM, S.; SCHOO, B.; SCHORPP, Q.; SCHRADER, S.; SCHROETTER, S. (2016): Schlussbericht zum Vorhaben: Agrarökologische Bewertung der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) als eine Biomassepflanze der Zukunft. Hrsg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut und Julius Kühn-Institut. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 125 Seiten, URL: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004411.pdf> (Stand: 22.02.2017)

- [47] DESENDER, K.; ALDERWEIRELDT, M. (1988): Population dynamics of adult and larval Carabid beetles in a maize field and its boundary. *Journal of Applied Entomology*, Bd. 106, Nr. 1–5, S. 13–19
- [48] DEUTER, U.; FÖRSTER, L.; FRITZ, M.; HARTMANN, A. (2019): Biomasse aus Gras. Langjährige Anbauerfahrungen mit Riesenweizengras in Bayern. *Landwirtschaft ohne Pflug (LOP) – das Fachmagazin für den professionellen Pflanzenbau*, Bd. 24 Nr. 6, S. 28–33
- [49] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2014): DIN EN ISO 17225-1. Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 4 Einteilung von Holzhackschnitzeln. Berlin: Beuth-Verlag, 11 Seiten
- [50] DICKEDUISBERG, M. (2017): Management and drought effects on growth and herbage yield of Tall Wheatgrass (*Agropyron elongatum*) for biogas production in Central Europe. Dissertation. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen, 114 Seiten
- [51] DICKEDUISBERG, M.; KÖHLER, J. (2016): Mit Mais Erträge schon im ersten Jahr. *Diz-Agrarmagazin*, Bd. 67, Nr. 12, S. 60-64
- [52] DIETERICH, M.; HEINTSCHEL, S.; HAUSBERG, M.; MÜCK, J.; BAUER, T.; BERGER, J.; DORSCH, H.; ZÜRCHER, A.; NERLICH, K.; MASTEL, K.; RIEDL, U.; FIEBIG, I.; LOHR, M. (2016). Biomassekulturen der Zukunft aus Naturschutzsicht. Bonn: Bundesamt für Naturschutz, BfN-Skripten, Nr. 442, 328 Seiten, ISBN 978-3-89624-178-8
- [53] DIETZ, E.; KUPTZ, D.; BLUM, U.; SCHULMEYER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2016): Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern. Gehalte ausgewählter Elemente, Heizwert und Aschegehalt. *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 46. Straubing, Freising-Weißenstephan: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ); Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)., 141 Seiten, ISSN 1614-1008
- [54] DIMITRIOU, I.; MOLA-YUDEGO, B.; ARONSSON, P. (2012): Impact of Willow Short Rotation Coppice on Water Quality. *BioEnergy Research*, Bd. 5, Nr. 3, S. 537-545
- [55] DON, A.; OSBORNE, B.; HASTINGS, A.; SKIBA, U.; CARTER, M. S.; DREWER, J.; FLESSA, H.; FREIBAUER, A.; HYVÖNEN, N.; JONES, M. B.; LANIGAN, G. J.; MANDER, Ü.; MONTI, A.; DJOMO, S. N.; VALENTINE, J.; WALTER, K.; ZEGADA-LIZARAZU, W.; ZENONE, T. (2012): Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *GCB Bioenergy*, Bd. 4, Nr. 4, S. 372-391
- [56] DONDINI, M.; HASTINGS, A.; SAIZ, G.; JONES, M. B.; SMITH, P. (2009): The potential of *Miscanthus* to sequester carbon in soils: comparing field measurements in Carlow, Ireland to model predictions. *GCB Bioenergy*, Bd. 1, Nr. 6, S. 413-425
- [57] DUFOSSÉ, K.; DREWER, J.; GABRIELLE, B.; DROUET, J.-L. (2014): Effects of a 20-year old *Miscanthus x giganteus* stand and its removal on soil characteristics and greenhouse gas emissions. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 69, October, S. 198-210
- [58] DUFRÉNE, M.; LEGENDRE, P. (1997): Species assemblage and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, Bd. 67, Nr. 3, S. 345-366

- [59] DUNGER, W. (2008): Tiere im Boden. Die neue Brehm-Bücherei, Bd. 327. 4., unveränd. Aufl. Hohenwarsleben: Westarp-Wissenschaften, 290 Seiten, ISBN 9783894324247
- [60] EHRMANN, O. (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwürmer Baden-Württembergs. Literaturstudie zur Bedeutung von Regenwürmern und den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Arten und Populationen der Regenwürmer. Stand: Oktober 2008, Internetausgabe Februar 2012 Karlsruhe: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 64 Seiten
- [61] EHRMANN, O.; BABEL, U. (1991): Quantitative Regenwurmerfassung ein Methodenvergleich. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd. 66, Nr. 1, S. 475-478
- [62] EMMERLING, C. (2014): Impact of land-use change towards perennial energy crops on earthworm population. Applied Soil Ecology, Bd. 84, December, S. 12-15
- [63] EMMERLING, C. (2016): Bodenqualität beim Anbau von Dauerkulturen für die Biomasseproduktion am Beispiel der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) – ein innovatives Agrarsystem der Zukunft. Journal für Kulturpflanzen, Bd. 68, Nr. 12, S. 399-406
- [64] ERNST, G.; HENSELER, I.; FELTEN, D.; EMMERLING, C. (2009): Decomposition and mineralization of energy crop residues governed by earthworms. Soil Biology and Biochemistry, Bd. 41, Nr. 7, S. 1548-1554
- [65] HARTMANN, H.; REISINGER, K.; TUROWSKI, P.; ROßMANN, P. (2013): Handbuch Bioenergie Kleinanlagen. Hrsg: Dr. Hans Hartmann; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 3., überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 192 Seiten, ISBN 3-00-011041-0
- [66] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (HRSG.) (2014): Leitfaden Feste Biobrennstoffe. Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich. Förderkennzeichen (FKZ) 22002410. Unter Mitarbeit von: L. Eltrop, M. Härdtlein, T. Jenssen, C., M. Henßler, C. Kruck, E. D. Özdemir, H. Hartmann, N. Poboss. I. 4., vollst. überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 208 Seiten, ISBN 9783000153891
- [67] FELEDYN-SZEWCZYK, B.; RADZIKOWSKI, P.; STALENGA, J.; MATYKA, M. (2019): Comparison of the Effect of Perennial Energy Crops and Arable Crops on Earthworm Populations. Agronomy, Bd. 9, Nr. 11, S. 675
- [68] FELTEN, D.; EMMERLING, C. (2011): Effects of bioenergy crop cultivation on earthworm communities – A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land-use intensity. Applied Soil Ecology, Bd. 49, September, S. 167-177
- [69] 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
- [70] 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

- [71] FINCH, S.; ELLIOTT, M. S. (1992): Carabidae as potential biological agents for controlling infestations of the cabbage root fly. *Phytoparasitica*, Bd. 20, Supplement, S. 67-70
- [72] FOURNIER, E.; LOREAU, M. (2002): Foraging activity of the carabid beetle *Pterostichus melanarius* Ill. in field margin habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 89, Nr. 3, S. 253-259
- [73] FRANZARING, J.; HOLZ, I.; KAUF, Z.; FANGMEIER, A. (2014): Reaktionen der Energiepflanzen Sida und Silphie auf erhöhte Temperaturen, reduzierte Niederschläge und den CO₂-Düngeeffekt, Abschlussbericht, Hohenheim: Universität Hohenheim, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie, 88 Seiten
- [74] FREUDE, H.; HARDE, K. W.; LOHSE, G. A.; KLAUSNITZER, B. (2004). Die Käfer Mitteleuropas. Band 2: Adepaga 1: Carabidae (Laufkäfer). Hrsg.: Müller-Motzfeld, G. 2. Aufl. Heidelberg: Springer Spektrum, 521 Seiten, ISBN 978-3-8274-1551-6
- [75] FROMMAGEN, K.; DENNER, M.; SYRBE, R.-U.; NEITZEL, H.(2013): Innovationsmöglichkeiten der landbaulichen Entwicklung, Vielfalt der nutzbaren Kulturarten zur Energiegewinnung in der Feldflur. In: INTERNATIONALES BEGEGNUNGSZENTRUM ST. MARIENTHAL (IBZ); LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE RAUMENTWICKLUNG (IÖR) (HRSG.): Nachhaltige Nutzung von Energiepflanzen für eine regionale Entwicklung im Landkreis Görlitz. Ein Handlungsleitfaden. Redaktion: Birgit Fleischer, Ralf-Uwe Syrbe. 1. Aufl. Ostritz: Internationales Begegnungszentrum St. Marienthal (IBZ), S. 27-35, ISBN 978-3-00-042194-5
- [76] FRÜND, H.-C.; JORDAN, B. (2003): Regenwurmerfassung mit Senf oder Formalin? Versuche zur Eignung verschiedener Senfzubereitungen für die Austreibung von Regenwürmern. *Osnabrücker Naturwissenschaftliche Mitteilungen*, Bd. 29, S. 97-102
- [77] 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
- [78] GEIßENDÖRFER, H. (2012): Mehr Gas mit Riesengras. *Diz-Agrarmagazin*, Bd. 63, Nr. 10, S. 54-57
- [79] GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE CARABIDOLOGIE (Hrsg.)(2009): Lebensraumpräferenzen der Laufkäfer Deutschlands. *Angewandte Carabidologie, wissenschaftlicher Katalog*. *Angewandte Carabidologie, Supplement*, Nr. 5. Filderstadt; GAC, 45 Seiten
- [80] GIBSON, L. (2007): Switchgrass. Ames, Iowa: Iowa State University, Department of Agronomy, URL: http://www.agmrc.org/media/cms/AG200_0432D5ED6E413.pdf (Stand: 23.04.2019)
- [81] GÖBEL, M.; FRANZEN, M.; HANSEN, H.; MARTENS, C.; NISSEN, T. (2012): Durchwachsene Silphie in Schleswig-Holstein. Eine Alternative zu Bioenergiemais? *Bauernblatt*, Ausgabe vom 14. Juli, S. 30
- [82] GRAVALOS, I.; XYRADAKIS, P.; KATERIS, D.; GIALAMAS, T.; BARTZIALIS, D.; GIANNOULIS, K. (2016): An Experimental Determination of Gross Calorific Value of Different Agroforestry Species and Bio-Based Industry Residues. *Natural Resources*, Bd. 7, Nr. 1, S. 57-68

- [83] HALLER, J.; FRITZ, M. (2015): Bioenergie-Dauerkulturen. Auswahl ökologischer Alternativen. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) (Hrsg.). Straubing. TFZ Wissen – Forschung für Praxis, Nr. 3, 59 Seiten
- [84] HALLMANN, C. A.; SORG, M.; JONGEJANS, E.; SIEPEL, H.; HOFLAND, N.; SCHWAN, H.; STENMANS, W.; MÜLLER, A.; SUMSER, H.; HÖRREN, T.; GOULSON, D.; DE KROON, H. (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PloS ONE*, Bd. 12, Nr. 10, S. e0185809, URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- [85] HARTMANN, A.; BURMEISTER, J.; FRITZ, M.; WALTER, R. (2018): Dauerkulturen. Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung. Förderkennzeichen: N/14/10, 01.04.2014–31.03.2017. Unter Mitarbeit von J. Wittmann, M. Lehner, M. Krinner, F. Heimler, S. Wiesent, F. Neumayr et al. Berichte aus dem TFZ, Nr. 54. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 240 Seiten, ISSN 1614-1008
- [86] HARTMANN, A.; FRITZ, M. (2016): Langzeit-Ergebnisse zum Miscanthusanbau in Bayern. In: H. KAGE, K. SIELING, M. FRANCKE-WELTMANN UND GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN E. V. (GPWP) (Hrsg.): Klimawandel und Qualität. Kurzfassung der Vorträge und Poster. 59. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. Gießen, 27.–29. September. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Nr. 28. Göttingen: Liddy Halm, S. 168-169
- [87] HARTMANN, H.; REISINGER, K.; TUROWSKI, P.; ROßMANN, P. (Hrsg.) (2013): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Unter Mitarbeit von K. Bruhn, J.-M. Gittel, H. Eismann, H. Nielsen und M. Scherle. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). 3., vollst. überarb. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 192 Seiten
- [88] HAUGHTON, A. J.; BOND, A. J.; LOVETT, A. A.; DOCKERTY, T.; SÜNNENBERG, G.; CLARK, S. J.; BOHAN, D. A.; SAGE, R. B.; MALLOTT, M. D.; MALLOTT, V. E.; CUNNINGHAM, M. D.; RICHE, A. B.; SHIELD, I. F.; FINCH, J. W.; TURNER, M. M.; KARP, A. (2009): A novel, integrated approach to assessing social, economic and environmental implications of changing rural land-use: a case study of perennial biomass crops. *Journal of Applied Ecology*, Bd. 46, Nr. 2, S. 315-322
- [89] HEDDE, M.; VAN OORT, F.; BOUDON, E.; ABONNEL, F.; LAMY, I. (2013): Responses of soil macroinvertebrate communities to Miscanthus cropping in different trace metal contaminated soils. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 55, August, S. 122-129
- [90] HEDDE, M.; VAN OORT, F.; RENOUF, E.; THÉNARD, J.; LAMY, I. (2013): Dynamics of soil fauna after plantation of perennial energy crops on polluted soils. *Applied Soil Ecology*, Jg. 66, April, S. 29-39
- [91] HEDÉNEC, P.; NOVOTNÝ, D.; UŠŤAK, S.; CAJTHAML, T.; SLEJŠKA, A.; ŠIMÁČKOVÁ, H.; HONZÍK, R.; KOVÁŘOVÁ, M.; FROUZ, J. (2014): The effect of native and introduced biofuel crops on the composition of soil biota communities. *Biomass and Bioenergy*, Jg. 60, January, S. 137-146
- [92] HEINZ, M. (2015): Riesenweizengras – eine Energiepflanze mit Zukunft. *Biogas Journal*, Nr. 2, S. 48-50
- [93] HENNINGS, H. H.; SCHEFFER, B. (2000): Zum Nitrataustrag ins Grundwasser – Stand der Erkenntnisse. *Wasserwirtschaft*, Bd. 90, Nr. 7/8, S. 348-355

- [94] HERRMANN, C.; IDLER, C.; HEIERMANN, M. (2016): Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresource Technology*, Bd. 206, April, S. 23-35
- [95] HIMKEN, M.; LAMMEL, J.; NEUKIRCHEN, D.; CZYPIONKA-KRAUSE, U.; OLFS, H.-W. (1997): Cultivation of *Miscanthus* under West European conditions: Seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization. *Plant and Soil*, Bd. 189, Nr. 1, S. 117-126
- [96] HONEK, A. (1997): The Effect of Plant Cover and Weather on the Activity Density of Ground Surface Arthropods in a Fallow Field. *Biological Agriculture & Horticulture*, Bd. 15, Nr. 1-4, S. 203-210
- [97] IQBAL, Y.; GAUDER, M.; CLAUPEIN, W.; GRAEFF-HÖNNINGER, S.; LEWANDOWSKI, I. (2015): Yield and quality development comparison between miscanthus and switchgrass over a period of 10 years. *Energy*, Bd. 89, September, S. 268-276
- [98] JODL, S.; EPEL-HOTZ, A.; MARZINI, K. (1998): Examination of the ecological value of miscanthus expanses – faunistic studies. In: C.A.R.M.E.N. e. V. (Hrsg.): *Biomass for Energy and Industry, Proceedings of the 10th EU Bioenergy Conference*. 8.–11.06.1998. Würzburg: Rimpfar, S. 778-779
- [99] KACZMAREK, J. M.; MIZERA, T.; TRYJANOWSKI, P. (2019): Energy crops affecting farmland birds in Central Europe: insights from a miscanthus-dominated landscape. *Biologia*, Bd. 74, Nr. 1, S. 35-44
- [100] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.) (2016): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3., aktual. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1867 Seiten, ISBN 978-3-662-47437-2
- [101] KIESEL, A. (2019): *Miscanthus für die Biogasnutzung: Anbau und Ertragspotential*. Vortrag. In: C.A.R.M.E.N e. V. (Hrsg.): *C.A.R.M.E.N-Fachgespräch*, Reutlingen, 17.09.2019, Straubing: C.A.R.M.E.N e. V., 19 Seiten
- [102] KIESEL, A.; WAGNER, M.; LEWANDOWSKI, I. (2017): Environmental Performance of *Miscanthus*, *Switchgrass* and *Maize*: Can C_4 Perennials Increase the Sustainability of Biogas Production? *Sustainability*, Bd. 9, Nr. 5, 1, S. 1-20
- [103] KLAUSNITZER, B. (1991): *Die Käfer Mitteleuropas*, Bd. L1. Adephega. München: Spektrum Akademischer Verlag, 273 Seiten, ISBN 978-3827406989
- [104] KOHLI, L.; DANIEL, O.; SCHÖNHOLZER, F.; HAHN, D.; ZEYER, J. (1999): *Miscanthus sinensis* and wild flowers as food resources of *Lumbricus terrestris* L. *Applied Soil Ecology*, Bd. 11, Nr. 2-3, S. 189-197
- [105] KÖNNING, C. (2019): Sida als innovative Mehrzweck-Pflanze. *Energie aus Pflanzen*, Bd. 4, S. 64-65
- [106] KROMP, B. (1999): Carabid beetles in sustainable agriculture: a review on pest control efficacy, cultivation impacts and enhancement. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 74, Nr. 1-3, S. 187-228
- [107] KRÜCK, S.; NITZSCHE, O.; SCHMIDT, W. (2001): Verbesserte Regenverdaulichkeit durch Regenwurmaktivität: Regenwürmer vermindern Erosionsgefahr. *Landwirtschaft ohne Pflug*, Bd. 1, S. 18-21

- [108] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (Hrsg.): (2012): Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Mit Online-Zugang www.ktbl.de. Unter Mitarbeit von T. Belau, H. Döhler, H. Eckel, J. Frisch, N. Fröba, M. Funk et al. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). KTBL-Datensammlung. 2. Aufl. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), 368 Seiten, ISBN 978-3-941583-65-8
- [109] KURUCZ, E.; FÁRI, M. G. (2013): Improvement of Germination Capacity of *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby by Seed Priming Techniques. International Review of Applied Sciences and Engineering, Bd. 4, Nr. 2, S. 137-142
- [110] LEDO, A.; SMITH, P.; ZERIHUN, A.; Whitaker, J.; VICENTE-VICENTE, J. L.; QIN, Z.; MCNAMARA, N. P.; ZINN, Y. L.; LLORENTE, M.; LIEBIG, M.; KUHNERT, M.; DONDINI, M.; DON, A.; DIAZ-PINES, E.; DATTA, A.; BAKKA, H.; AGUILERA, E.; HILLIER, J. (2020): Changes in soil organic carbon under perennial crops. Global change biology, Bd. 26, Nr. 7, S. 4158-4168
- [111] LEHMITS, R.; RÖMBKE, J.; GRAEFE, U.; BEYLICH, A.; KRÜCK, S. (2016): Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer (Lumbricidae et Criodrilidae) Deutschlands. Naturschutz und Biologische Vielfalt, Bd. 70, Nr. 4, S. 565-590
- [112] LEMTIRI, A.; COLINET, G.; ALABI, T.; CLUZEAU, D.; ZIRBES, L.; HAUBRUGE, É.; FRANCIS, F. (2014): Impacts of earthworms on soil components and dynamics. A review. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, Bd. 18, Nr. 1, S. 121-133
- [113] LEMUS, R.; LAL, R. (2005): Bioenergy Crops and Carbon Sequestration. Critical Reviews in Plant Sciences, Bd. 24, Nr. 1, S. 1-21
- [114] LEWANDOWSKI, I.; CLIFTON-BROWN, J.; TRINDADE, L. M.; VAN DER LINDEN, G. C.; SCHWARZ, K.-U.; MÜLLER-SÄMANN, K.; ANISIMOV, A.; CHEN, C.-L.; DOLSTRA, O.; DONNISON, I. S.; FARRAR, K.; FONTEYNE, S.; HARDING, G.; HASTINGS, A.; HUXLEY, L. M.; IQBAL, Y.; KHOKHLOV, N.; KIESEL, A.; LOOTENS, P.; MEYER, H.; MOS, M.; MUYLLE, H.; NUNN, C.; ÖZGÜVEN, M.; ROLDÁN-RUIZ, I.; SCHÜLE, H.; TARAKANOV, I.; VAN DER WEIJDE, T.; WAGNER, M.; XI Q.; KALININA, O. (2016): Progress on Optimizing Miscanthus Biomass Production for the European Bioeconomy: Results of the EU FP7 Project OPTIMISC. Frontiers in Plant Science, Bd. 18, Nr. 7, S. 1-23
- [115] LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A. (1997): Combustion quality of biomass. Practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. European Journal of Agronomy, Bd. 6, Nr. 3, S. 163-177
- [116] LEWANDOWSKI, I.; SCURLOCK, J. M. O.; LINDVALL, E.; CHRISTOU, M. (2003): The Development and Current Status of Perennial Rhizomatous Grasses as Energy Crops in the US and Europe. Biomass & Bioenergy, Bd. 25, Nr. 4, S. 335-361
- [117] LIEBEREI, R.; REISDORFF, C. (2007): Nutzpflanzenkunde. 7., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Thieme, 488 Seiten, ISBN 978-3-13-530407-6
- [118] LIPS, A.; JABERG, C.; FREI, G.; DUBOIS, D. (1999): Besiedlung nachwachsender Rohstoffe durch Flora & Fauna. Agrarforschung, Bd. 6, Nr. 8, S. 305-308
- [119] LOEFFEL, K.; NENTWIG, W. (1997): Ökologische Beurteilung des Anbaus von Chinaschilf (*Miscanthus sinensis*) anhand faunistischer Untersuchungen. Agrarökologie, Nr. 26. Bern: Verlag Agrarökologie, 133 Seiten, ISBN 9783909192038

- [120] LÜTKE ENTRUP, N.; OEHMICHEN, J. (2006): Lehrbuch des Pflanzenbaues, Band 1: Grundlagen. Bonn: AgroConcept, 823 Seiten, ISBN 9783981057515
- [121] MAGURRAN, A. E. (2011): Measuring biological diversity. 9. Nachdr. Malden, MA: Blackwell, 256 Seiten, ISBN 9780632056330
- [122] MANGOLD, A. (2019): Miscanthus als Biogassubstrat: Methangehalt und Silageeigenschaften. In: C.A.R.M.E.N e. V. (Hrsg.): C.A.R.M.E.N-Fachgespräch, Reutlingen, 17.09.2019, Straubing: C.A.R.M.E.N e. V., 21 Seiten
- [123] MARINISSEN, J. C. Y.; VAN DEN BOSCH, F. (1992): Colonization of new habitats by earthworms. *Oecologia*, Bd. 91, Nr. 3, S. 371-376
- [124] MARSHALL, E. J. P.; BROWN, V. K.; BOATMAN, N. D.; LUTMAN, P. J. W.; SQUIRE, G. R.; WARD, L. K. (2003): The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research*, Bd. 43, Nr. 2, S. 77-89
- [125] MASSÉ, D.; GILBERT, Y.; SAVOIE, P.; BELANGER, G.; PARENT, G.; BABINEAU, D. (2010): Methane yield from switchgrass harvested at different stages of development in Eastern Canada. *Bioresource Technology*, Bd. 101, Nr. 24, S. 9536-9541
- [126] MAST, B.; LEMMER, A.; OECHSNER, H.; REINHARDT-HANISCH, A.; CLAUPEIN, W.; GRAEFF-HÖNNINGER, S. (2014): Methane yield potential of novel perennial biogas crops influenced by harvest date. *Industrial Crops and Products*, Bd. 58, July, S. 194-203
- [127] McLAUGHLIN, S. B.; SAMSON, R.; BRANSBY, D.; WISELOGEL, A. (1996): Evaluating physical, chemical, and energetic properties of perennial grasses as biofuel. In: NATIONAL BIOENERGY CONFERENCE (Hrsg.): Bioenergy '96 – Proceedings of the Seventh National Bioenergy Conference, September 15-20. Muscle Shoals, AL: South-eastern Regional Biomass Energy Program, Tennessee Valley Authority, S. 1-8
- [128] McLAUGHLIN, S. B.; WALSH, M. E. (1998): Evaluating Environmental Consequences of Producing Herbaceous Crops for Bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 14, Nr. 4, S. 317-324
- [129] McLAUGHLIN, S.; BOUTON, J.; BRANSBY, D.; CONGER, B.; OCUMPAUGH, W.; PARRISH, D.; TALIAFERRO, C.; VOGEL, K.; WULLSCHLEGER, S. (1999): Developing Switchgrass as a Bioenergy Crop. In: JANICK, J. (Hrsg.): Perspectives on new crops and new uses. Proceedings of the 4th National symposium "New crops and new uses: biodiversity and agricultural sustainability", November 8-11, 1998, Phoenix, Arizona. Alexandria, VA, USA: ASHS Press, S. 282-299
- [130] MILCU, A. (2006): The role of earthworms for plant performance and ecosystem functioning in a plant diversity gradient. Dissertation: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Biologie, 125 Seiten
- [131] MILES, T. R.; MILES, T. R.; JR.; BAXTER, L. L.; JENKINS, B. M.; ODEN, L. L. (1993): Alkali Slagging Problems with biomass fuels. In: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (Hrsg.): First Biomass Conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture, and Industry, 30.08 - 02.09, Burlington, Vermont, Proceedings, Volume 1, NREL-Report, Nr. NREL/CP-200-5768-VOL.1. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL), S. 406-421

- [132] MUELLER, 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
- [133] MUELLER, A. L.; DAUBER, J. (2016): Hoverflies (Diptera: Syrphidae) benefit from a cultivation of the bioenergy crop *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae) depending on larval feeding type, landscape composition and crop management. *Agricultural and Forest Entomology*, Bd. 18, Nr. 4, S. 419-431
- [134] MÜLLER, A. L.; BIERTÜMPFEL, A.; FRIEDRITZ, L.; DAUBER, J. (2014): The energy plant *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae) as a late pollen resource for the honey bee *Apis mellifera* L. *Mitteilungen des Entomologischen Vereins Stuttgart*, Bd. 49, Nr. 1, S. 42-43
- [135] N. L. CHRESTENSEN ERFURTER SAMEN- UND PFLANZENZUCHT GMBH (2019): Die Durchwachsene Silphie. *Silphium perfoliatum* L. Erfurt, URL: <https://www.chrestensen.de/durchwachsene-silphie/> (Stand 19.11.2019)
- [136] NAHM, M.; MORHART, C. (2018): Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) as perennial multipurpose crop. Biomass yields, energetic valorization, utilization potentials, and management perspectives. *GCB Bioenergy*, Bd. 10, Nr. 6, S. 393-404
- [137] PELOSI, C.; BERTRAND, M.; CAPOWIEZ, Y.; BOIZARD, H.; ROGER-ESTRADE, J. (2009): Earthworm collection from agricultural fields: Comparisons of selected expellants in presence/absence of hand-sorting. *European Journal of Soil Biology*, Bd. 45, Nr. 2, S. 176-183
- [138] PENSKAR, M. R.; CRISPIN, S. R. (2010): Special plant abstract for *Silphium perfoliatum* (cup plant). Lansing, Michigan, USA: Michigan Natural Features Inventory, 3 Seiten
- [139] PFEIFER, J.; HOTHO A. (2013): Standortangepasster Anbau von Biomasse auf schwermetallkontaminierten Arealen der Region Freiberg unter Nutzung bewährter Anbausysteme auf Bergbaufolgelandschaften der Region Chomutov – Begleitstudie zum Anbauversuch im Rahmen des Ziel3-Projektes „RekultA“. Endbericht. Stand: Dezember 2013. Verein zur Förderung von Biomasse und nachwachsenden Rohstoffen Freiberg e.V.; Kontaktbüro im Fachschulzentrum Freiberg-Zug (Hrsg.). Rechenberg-Bienenmühle OT Clausnitz, Freiberg, 66 Seiten
- [140] PICHARD, G. (2012): Management, production and nutritional characteristics of cup-plant (*Silphium perfoliatum*) in temperate climates of southern Chile. *Ciencia e investigación agraria*, Bd. 39, Nr.1, S. 61-77
- [141] PLATEN, R.; KONRAD, J.; GLEMNITZ, M. (2017): Novel energy crops: an opportunity to enhance the biodiversity of arthropod assemblages in biomass feedstock cultures? *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, Bd. 13, Nr. 1, S. 162-171
- [142] POEPLAU, C.; DON, A. (2014): Soil carbon changes under *Miscanthus* driven by C4 accumulation and C3 decomposition – toward a default sequestration function. *GCB Bioenergy*, Bd. 6, Nr. 4, S. 327-338

- [143] PROSKE, S. (2010): Das Gütesiegel ENplus – neuer Maßstab für Holzpellets. In: OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT E. V. (OTTI) (Hrsg.): 19. Symposium Bioenergie. Festbrennstoffe – Bioenergie – ökonomisch, ökologisch, effizient; Unverzichtbar – Energieeffiziente Wärme- und Gasnetze, Feuerungs- und Vergasungstechnik, Nachhaltigkeit und Effizienz, Qualität und Nutzung, Bioenergie und Nachhaltigkeit. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) (Wissen für Profis), S. 230-234
- [144] PURVIS, G.; FADL, A. (2002): The influence of cropping rotations and soil cultivation practice on the population ecology of carabids (Coleoptera: Carabidae) in arable land. *Pedobiologia*, Bd. 46, Nr. 5, S. 452-474
- [145] RATH, J.; HEUWINKEL, H.; HERRMANN, A. (2013): Specific Biogas Yield of Maize Can Be Predicted by the Interaction of Four Biochemical Constituents. *BioEnergy Research*, Bd. 6, Nr. 3, S. 939-952
- [146] RATH, J.; HEUWINKEL, H.; TAUBE, F.; HERRMANN, A. (2015): Predicting Specific Biogas Yield of Maize-Validation of Different Model Approaches. *BioEnergy Research*, Bd. 8, Nr. 2, S. 832-842
- [147] RICHTER, G. M.; AGOSTINI, F.; REDMILE-GORDON, M.; WHITE, R.; GOULDING, K. W. T. (2015): Sequestration of C in soils under *Miscanthus* can be marginal and is affected by genotype-specific root distribution. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 200, S. 169-177
- [148] ROBERTSON, A. D.; DAVIES, C. A.; SMITH, P.; STOTT, A. W.; CLARK, E. L.; MCNAMARA, N. P. (2017): Carbon Inputs from *Miscanthus* Displace Older Soil Organic Carbon Without Inducing Priming. *BioEnergy Research*, Bd. 10, Nr. 1, S. 86-101
- [149] 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
- [150] SAGE, R.; CUNNINGHAM, M.; HAUGHTON, A. J.; MALLOTT, M. D.; BOHAN, D. A.; RICHE, A.; KARP, A. (2010): The environmental impacts of biomass crops: use by birds of *Miscanthus* in summer and winter in southwestern England. *Ibis*, Bd. 152, Nr. 3, S. 487-499
- [151] SASKA, P.; VAN DER WERF, W.; HEMERIK, L.; LUFF, M. L.; HATTEN, T. D.; HONEK, A.; POCOCK, M. (2013): Temperature effects on pitfall catches of epigeal arthropods: a model and method for bias correction. *The Journal of applied ecology*, Bd. 50, Nr. 1, S. 181-189
- [152] SCHEINOST, P.; TILLEY, D.; OGLE, D.; STANNARD, M. (2008): Plant guide for Tall Wheatgrass (*Thinopyrum ponticum*). (Podp.) Z.-W. Liu & R.-C. Wang, Plant Symbol = THPO7. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (Hrsg.). Edited August 10, 2008. Pullman, Washington: Plant Materials Center, 6 Seiten
- [153] SCHEU, S. (1992): Changes in the lumbricid coenosis during secondary succession from a wheat field to a beechwood on limestone. *Soil Biology and Biochemistry*, Bd. 24, Nr. 12, S. 1641-1646

- [154] SCHITTENHELM, S.; SCHOO, B.; SCHROETTER, S. (2016): Ertragsphysiologie von Biogaspflanzen: Vergleich von Durchwachsener Silphie, Mais und Luzernegras. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 378-384
- [155] SCHMIDT, A.; LEMAIGRE, S.; DELFOSSE, P.; FRANCKEN-WELZ, H. VON; EMMERLING, C. (2018): Biochemical methane potential (BMP) of six perennial energy crops cultivated at three different locations in W-Germany. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Bd. 8, Nr. 4, S. 873-888
- [156] SCHOO, B.; SCHROETTER, S.; BÖTTCHER, U.; KAGE, H.; SCHITTENHELM, S. (2015): Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Durchwachsenen Silphie. In: KAGE, H.; SIELING, K.; FRANCKE-WELTMANN, L.; GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN E. V. (GFP) (Hrsg.): Multifunktionale Agrarlandschaften - Pflanzenbaulicher Anspruch, Biodiversität, Ökosystemdienstleistungen. Kurzfassungen der Vorträge und Poster. 58. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V., 22.-24. September, Braunschweig. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Nr. 27. Göttingen: Verlag Liddy Halm, S. 19-20, ISSN 0934-5116
- [157] SCHOO, B.; WESSEL-TERHARN, M.; SCHROETTER, S.; SCHITTENHELM, A. (2013): Vergleichende Untersuchung von Wurzelmerkmalen bei Silphie und Mais. In: PEKRUN, C.; WACHENDORF, M.; FRANCKE-WELTMANN, L.; GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN E. V. (GFP) (Hrsg.): Nachhaltige Erzeugung von Nachwachsenden Rohstoffen. Kurzfassungen der Vorträge und Poster. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V., Technischen Universität München, Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Technologie- und Förderzentrum Straubing, 04.-06. September, Weihenstephan. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Nr. 25. Göttingen: Verlag Liddy Halm, S. 241-242, ISSN 0934-5116
- [158] SCHOO, B.; WITTICH, K. P.; BÖTTCHER, U.; KAGE, H.; SCHITTENHELM, S. (2017): 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
- [159] SCHORPP, Q.; MÜLLER, A. L.; SCHRADER, S.; DAUBER, J. (2016): Agrarökologisches Potential der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) aus Sicht biologischer Vielfalt. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 68, Nr. 12, S. 412-422
- [160] SCHORPP, Q.; SCHRADER, S. (2016): Earthworm functional groups respond to the perennial energy cropping system of the cup plant (*Silphium perfoliatum* L.). *Biomass and Bioenergy*, Bd. 87, April, S. 61-68
- [161] SCHORPP, Q.; SCHRADER, S. (2017): Dynamic of nematode communities in energy plant cropping systems. *European Journal of Soil Biology*, Jg. 78, January-February, S. 92-101
- [162] SCHRABAUER, J. (2010): Trockentolerante, perennierende Gräserarten für eine Futternutzung bzw. energetische Verwertung im semihumiden und semiariden Produktionsgebiet. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, 177 Seiten
- [163] SCHRABAUER, J.; BUCHGRABER, K.; MODER, K.; LIEBHARD, P. (2014): Potential of ten alternative grass species under different cutting regimes in Central Europe. *Journal für Kulturpflanzen*, Bd. 66, Nr. 6, S. 189-202

- [164] SCHRAMA, M.; VANDECASTEELE, B.; CARVALHO, S.; MUYLLE, H.; PUTTEN, W. H. V. D. (2016): Effects of first- and second-generation bioenergy crops on soil processes and legacy effects on a subsequent crop. *GCB Bioenergy*, Bd. 8, Nr. 1, S. 136-147
- [165] SCHWARZ, K. U.; SCHNUG, E. (1993): Ertragsentwicklung bei mehrjährigen Beständen von Beständen von *Miscanthus x giganteus*. In: ZOSCHKE, M.; MARQUARD, R.; DIEPENBROCK, W.; GESELLSCHAFT FÜR PFLANZENBAUWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): 37. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Gießen, 30.9.-2.10. Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Bd. 6. Gießen: Wissenschaftlicher Fachverlag, S. 125-128
- [166] SEMERE, T.; SLATER, F. (2007): Ground flora, small mammal and bird species diversity in miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 31, Nr. 1, S. 20-29
- [167] SEMERE, T.; SLATER, F. (2007): Invertebrate populations in miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) and reed canary-grass (*Phalaris arundinacea*) fields. *Biomass and Bioenergy*, Bd. 31, Nr. 1, S. 30-39
- [168] SHEARIN, A. F.; REBERG-HORTON, S. C.; GALLANDT, E. R. (2007): Direct Effects of Tillage on the Activity Density of Ground Beetle (Coleoptera: Carabidae) Weed Seed Predators. *Environmental Entomology*, Bd. 36, Nr. 5, S. 1140-1146
- [169] 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, December, S. 606-612
- [170] SIWEK H.; WŁODARCZYK M.; MOŹDŻER E.; BURY M.; KITCZAK T (2019): Chemical Composition and Biogas Formation potential of *Sida hermaphrodita* and *Silphium perfoliatum*. *Applied Sciences*, Bd. 9, Nr. 19, S. 4016, 1-11
- [171] SSYMANK, A.; SORG, M.; DOCZKAL, D.; RULIK, B.; MERKEL-WALLNER, G.; VISCHER-LEOPOLD, M. (2018): Praktische Hinweise und Empfehlungen zur Anwendung von Malaisefallen für Insekten in der Biodiversitätserfassung und im Monitoring. *Series Naturalis*, Bd.1. S. 1-12
- [172] 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, August 5-9, 1990, Cedar Falls, Iowa. Cedar Falls, Iowa, USA: University of Northern Iowa*, S. 33-38
- [173] STANLEY, D. (2013): Pollinators and pollination in changing agricultural landscapes – investigating the impacts of bioenergy crops. *Dissertation. Dublin: Trinity College, Department of Botany*, 196 Seiten
- [174] STANLEY, D. A.; STOUT, J. C. (2013): Quantifying the impacts of bioenergy crops on pollinating insect abundance and diversity: a field-scale evaluation reveals taxon-specific responses. *Journal of Applied Ecology*, Bd. 50, Nr. 2, S. 335-344

- [175] STOCKMANN, F.; FRITZ, M. (2013): Einfluss von Standort und Herkunft auf das Ertragspotential der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) unter bayerischen Anbaubedingungen. 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: Verlag Liddy Halm, S. 146-147
- [176] STOLARSKI, M. J.; KRZYZANIAK, M.; SNIEG, M.; STOMINSKA, E.; PIÓRKOWSKI, M.; FILIPKOWSKI, R. (2014): Thermophysical and chemical properties of perennial energy crops depending on harvest period. *International Agrophysics*, Bd. 28, Nr. 2, S. 201-211
- [177] STOLZENBURG, K.; MASTEL, K. (2010): Chinaschilf (*Miscanthus x giganteus*) – Anbau, Verwertung und rechtliche Rahmenbedingungen. Hg. v. Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg. URL: <https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/,Lde/Startseite/Kulturpflanzen/Miscanthus>, 12 Seiten
- [178] STORKEY, J.; WESTBURY, D. B. (2007): Managing arable weeds for biodiversity. *Pest management science*, Bd. 63, Nr. 6, S. 517-523
- [179] TALIAFERRO, C. M. (2002): Breeding and Selection of new Switchgrass. Varieties for Increased Biomass Production. December 2002. ORNL-Report, Nr. ORNL/SUB-02-19XSY162C/01. Oak Ridge, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory, managed by UT-Battelle LLC, 69 Seiten
- [180] THIELEN, S.; FRANKEN-WELZ, H.; LANG, O.; ANDERL, A.; GOETZ, M. (2017) Versuchsbericht Biomasse 2016, Landwirtschaftliches Versuchswesen Rheinland-Pfalz, Stand: 20.01.2017. DLR-Bericht, Nr. 11/2016. Bad Kreuznach: Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück (DLR), Abt. Landwirtschaft (Hrsg.), 35 Seiten
- [181] TECHNOLOGIE UND FÖRDERZENTRUM IM KOMPETENZZENTRUM FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (2020): FRED Feste Regenerative Energieträger Datenbank URL: <https://www.fred.bayern.de/cadenza/pages/selector/index.xhtml> (Stand 21.07.2020)
- [182] TIMMERMAN, A.; BOS, D.; OUWEHAND, J.; GOEDE, R. G.M. (2006): Long-term effects of fertilisation regime on earthworm abundance in a semi-natural grassland area. *Pedobiologia*, Bd. 50, Nr. 5, S. 427-432
- [183] TISCHER, S.; SCHMITT, A.-K.; HOFMANN, B.; TANNEBERG, H.; CHRISTEN, O. (2006): Auswirkungen des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen auf bodenbiologische Aktivitäten auf einer Löß-Schwarzerde im mitteldeutschen Trockengebiet. In: VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA) (Hrsg.): „Kreislaufwirtschaft mit der Landwirtschaft - quo vadis“. Vorträge zum Generalthema und weitere Beiträge aus den öffentlichen Sitzungen und Workshops des 117. VDLUFA-Kongresses, Bonn, 27.-29. September. Speyer: VDLUFA-Verlag, S. 481-489, ISBN 3-922712-92-4
- [184] TRAUGOTT, M. (1998): Larval and adult species composition, phenology and life cycles of carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) in an organic potato field. *European Journal of Soil Biology*, Bd. 34, Nr. 4, S. 189-197

- [185] TRESELER, C. H.; PUDE, R.; FRANKEN, H.; NOGA, G. (2006): Anbauwürdigkeit und Rohstoffqualität von ausgewählten Switchgrass-Sorten (*Panicum virgatum* L.) für Baustoffanwendungen. Pflanzenbauwissenschaften, Bd. 10, Nr. 2, S. 75-81
- [186] CAPELLE, C. v.; SCHRADER, S.; BRUNOTTE, J. (2012): Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota – A review with a focus on German data. European Journal of Soil Biology, Bd. 50, May-June, S. 165–181
- [187] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI)(2006): VDI-Richtlinie 4630 – Vergärung organischer Stoffe, Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. April 2006. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 92 Seiten
- [188] VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN (VDLUFA)(Hrsg.)(2011): Methodenbuch VII Umweltanalytik – Bestimmung der Biogas- und Methanausbeute in Gärtests. Abschnitt MB7-4.1.1, Grundwerk. Speyer: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V (VDLUFA), Getrennte Zählung, ISBN 978-3-941273-10-8
- [189] VETTER, A.; HEIERMANN, M.; TOEWS, T. (Hrsg.) (2009): Anbausysteme für Energiepflanzen. Optimierte Fruchtfolgen, effiziente Lösungen. 1. Aufl. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 336 Seiten, ISBN 978-3-7690-0701-5
- [190] WAGENER, F.; HECK, P.; BÖHMER, J. (Hrsg.) (2013): Nachwachsende Rohstoffe als Option für den Naturschutz – Naturschutz durch Landbau? – Schlussbericht zu ELKE III. Berichtszeitraum: 01.03.2010 – 31.07.2013 (Projektende 31.03.2013), Förderkennzeichen: 220 077 09. Trier: Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS), 802 Seiten, URL: http://landnutzungsstrategie.de/fileadmin/userdaten/dokumente/ELKE/Oeffentlicher_Bereich/Ergebnisse/2013-13-10_Schlussbericht_ELKE_III_JB.pdf, (Stand: 05.10.2015)
- [191] WAGNER, C.; HOLZSCHUH, A.; WIELAND, P. (2014): Der Beitrag von Blühflächen zur Arthropodendiversität in der Agrarlandschaft. In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)(Hrsg.): Faunistische Evaluierung von Blühflächen. 1. Aufl. Januar 2014. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Nr. 1/2014. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) S. 45-64, ISSN 1611-4159
- [192] WALLIN, H. (1989): Habitat selection, reproduction and survival of two small carabid species on arable land: a comparison between *Trechus secalis* and *Bembidion lampros*. Ecography, Bd. 12, Nr. 3, S. 193-200
- [193] WALLIN, H.; CHIVERTON, P. A.; EKBOM, B. S.; BORG, A. (1992): Diet, fecundity and egg size in some polyphagous predatory carabid beetles. Entomologia Experimentalis et Applicata, Bd. 65, Nr. 2, S. 129-140
- [194] WALTER, K.; DON, A.; TIEMEYER, B.; FREIBAUER, A. (2016): Determining Soil Bulk Density for Carbon Stock Calculations: A Systematic Method Comparison. Soil Science Society of America Journal, Bd. 80, Nr. 3, S. 579-591
- [195] WALTER, R.; BURMEISTER, J.; WOLFRUM, S.; BRANDHUBER, R. (2017): Die Leistungen der Regenwürmer trotz Klimawandel erhalten. In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL)(Hrsg.): Landwirtschaft im Klimawandel - Lösungen, die Geld sparen. 15. Kulturlandschaftstag, 14.11.2017 1. Aufl. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Nr. 5/2017. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 31-43, ISSN 1611-4159

- [196] WAMSER, S.; DAUBER, J.; BIRKHOFER, K.; WOLTERS, V. (2011): Delayed colonisation of arable fields by spring breeding ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in landscapes with a high availability of hibernation sites. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Bd. 144, Nr. 1, S. 235-240
- [197] WEAVER, J. E. (1968): *Prairie plants and their Environment: A Fifty-Year Study in the Midwest*. Lincoln, NE: University of Nebraska Press, 287 Seiten
- [198] WEIßBACH, F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik*, Bd. 63, Nr. 6, S. 365-358
- [199] WENDLAND, M.; DIEPOLDER, M.; OFFENBERGER, K.; RASCHBACHER, S. (2018): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. Stand: Januar 2018. 14. Aufl. Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz. LfL-Information; Gelbes Heft. Freising-Weihenstephan, 98 Seiten
- [200] WERLING, B. P.; DICKSON, T. L.; ISAACS, R.; GAINES, H.; GRATTON, C.; GROSS, K. L.; LIERE, H.; MALMSTROM, C. M.; MEEHAN, T. D.; RUAN, L.; ROBERTSON, B. A.; ROBERTSON, G. P.; SCHMIDT, T. M.; SCHROTENBOER, A. C.; TEAL, T. K.; WILSON, J. K.; LANDIS, D. A. (2014): Perennial grasslands enhance biodiversity and multiple ecosystem services in bioenergy landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, Bd. 111, Nr. 4, S. 1652–1657
- [201] WILLIAMS, M. A.; FEEST, A. (2019): The Effect of *Miscanthus* Cultivation on the Biodiversity of Ground Beetles (Coleoptera: Carabidae), Spiders and Harvestmen (Arachnida: Araneae and Opiliones). *Agricultural Sciences*, Bd. 10, Nr. 07, S. 903-917
- [202] WOLF, D. D.; FISKE, D. A. (2009): *Planting and Managing Switchgrass for Forage, Wildlife, and Conservation*. Virginia Cooperative Extension Publication, Nr. 418-013. Blacksburg, VA, USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, College of Agriculture and Life Sciences, 4 Seiten
- [203] WOLF, L.; SCHÄTZL, R.; HARTMANN, A. (2016): Mais ist nicht unersetzlich. Dem schlechten Image von Mais steht immer das unschlagbare Argument entgegen: der unerreicht günstige Preis. Das muss aber nicht immer so gelten, zeigen Berechnungen aus Bayern. *DLG-Mitteilung*, Bd. 131, Nr. 5, S. 49-51
- [204] ZIMMERMANN, J.; STYLES, D.; HASTINGS, A.; DAUBER, J.; JONES, M. B. (2014): Assessing the impact of within crop heterogeneity ('patchiness') in young *Miscanthus x giganteus* fields on economic feasibility and soil carbon sequestration. *GCB Bioenergy*, Bd. 6, Nr. 5, S. 566-576

Anhang

Tabelle 42: Mittlere Monatstemperatur im Versuchsjahr 2017 (Wetterstation in Klammern)

	Aholfing (Straubing)	Gelchsheim (Gollhofen)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Mittlere Monatstemperatur in C°						
Januar	-5,9	-3,8	-5,4	-5,1	-6,1	-6,4
Februar	2,3	3,8	1,4	2,2	2,3	2,0
März	7,4	7,7	6,3	6,6	7,3	7,1
April	8,4	8,0	6,7	7,2	8,1	8,1
Mai	15,0	14,6	14,1	13,9	14,8	14,8
Juni	19,3	18,8	18,4	18,5	19,2	19,0
Juli	19,3	19,1	18,0	18,1	19,2	19,1
August	19,5	18,8	18,6	18,3	19,3	19,4
September	12,4	12,9	11,7	11,5	12,1	12,2
Oktober	10,4	11,1	9,7	9,9	10,4	10,1
November	4,3	5,0	2,8	3,6	4,2	4,0
Dezember	1,4	2,3	-0,3	0,7	1,6	1,1
Mittelwert Jan.–Dez.	9,5	9,8	8,5	8,8	9,4	9,2
Mittelwert Apr.–Okt.	14,9	14,7	13,9	13,9	14,7	14,7

Tabelle 43: Mittlere Niederschlagssumme im Versuchsjahr 2017 (Wetterstation in Klammern)

	Aholfing (Aholfing)	Gelchsheim (Gelchsheim)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Monatsniederschlagssumme in mm						
Januar	36	16	47	32	32	28
Februar	33	23	39	32	32	33
März	64	50	80	79	57	63
April	68	26	76	64	107	72
Mai	68	117	57	44	55	51
Juni	71	62	94	90	41	57
Juli	53	81	69	66	77	58
August	104	57	102	77	78	86

	Aholfung (Aholfung)	Gelchsheim (Gelchsheim)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Monatsniederschlagssumme in mm						
September	33	62	39	43	40	34
Oktober	61	50	104	96	51	56
November	60	68	76	76	45	51
Dezember	82	61	99	61	76	73
Summe Jan.–Dez.	731	671	881	759	691	661
Summe Apr.–Okt.	457	454	540	480	450	413

Tabelle 44: Mittlere Monatstemperatur im Versuchsjahr 2018 (Wetterstation in Klammern)

	Aholfung (Straubing)	Gelchsheim (Gollhofen)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Mittlere Monatstemperatur in °C						
Januar	3,2	4,7	1,7	2,8	3,5	2,9
Februar	-1,7	-1,8	-3,8	-3,4	-1,9	-1,9
März	3,0	3,3	1,1	1,6	3,0	2,7
April	13,6	13,1	13,2	12,9	13,3	13,3
Mai	17,3	16,5	16,0	15,8	17,1	17,1
Juni	19,0	18,4	17,4	17,5	18,6	18,6
Juli	20,5	20,6	19,9	19,7	19,9	20,0
August	21,3	20,8	20,8	20,1	20,8	20,9
September	15,4	15,5	15,1	14,9	15,3	15,1
Oktober	10,8	10,6	11,3	10,3	10,4	10,6
November	4,7	5,4	4,1	3,8	4,7	4,4
Dezember	2,5	3,8	0,9	2,0	2,6	2,2
Mittelwert Jan.–Dez.	10,8	10,9	9,8	9,8	10,6	10,5
Mittelwert Apr.–Okt.	16,8	16,5	16,2	15,9	16,5	16,5

Tabelle 45: *Mittlere Niederschlagssumme im Versuchsjahr 2018 (Wetterstation in Klammern)*

	Aholfling (Aholfling)	Gelchsheim (Gelchsheim)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Monatsniederschlagssumme in mm						
Januar	79	82	93	92	71	84
Februar	16	11	22	20	21	21
März	44	49	50	41	46	48
April	8	53	28	21	11	7
Mai	40	49	61	15	35	46
Juni	67	75	87	64	89	82
Juli	42	9	51	53	31	21
August	37	24	39	86	37	37
September	69	42	73	53	52	60
Oktober	34	13	39	39	40	37
November	36	8	17	24	34	34
Dezember	167	118	164	155	88	115
Summe Jan.–Dez.	588	532	722	664	555	591
Summe Apr.–Okt.	297	264	376	332	295	290

Tabelle 46: *Mittlere Monatstemperatur im Versuchsjahr 2019 (Wetterstation in Klammern)*

	Aholfling (Straubing)	Gelchsheim (Gollhofen)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Mittlere Monatstemperatur in °C						
Januar	-0,6	0,4	-1,8	-1,3	-0,2	-0,4
Februar	1,4	3,3	1,9	2,3	1,4	1,3
März	6,8	6,9	5,7	6,0	6,6	6,6
April	10,8	10,3	9,9	9,5	10,4	10,4
Mai	11,8	11,3	10,2	10,5	11,7	11,3
Juni	21,0	20,0	20,6	20,0	20,6	20,9
Juli	20,3	19,7	19,6	19,4	19,5	20,0
August	19,7	19,3	18,8	18,4	19,3	19,9
September	14,6	14,4	13,8	13,6	14,2	14,6
Oktober	10,5	11,2	10,1	10,0	10,2	10,3
November	4,7	5,5	3,8	4,2	4,7	4,5

	Aholfing (Straubing)	Gelchsheim (Gollhofen)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Mittlere Monatstemperatur in °C						
Dezember	2,2	3,5	2,2	2,2	2,3	2,3
Mittelwert Jan.–Dez.	10,3	10,5	9,6	9,6	10,1	10,1
Mittelwert Apr.–Okt.	14,4	15,2	14,7	14,5	15,1	15,3

Tabelle 47: Mittlere Niederschlagssumme im Versuchsjahr 2019 (Wetterstation in Klammern)

	Aholfing (Aholfing)	Gelchsheim (Gollhofen)	Hötzelsdorf (Eiserszell)	Parsberg (Eglwang)	Rosenau (Gottfrieding)	Wolferkofen (Piering)
Monatsniederschlagssumme in mm						
Januar	61	46	85	91	46	45
Februar	30	11	43	28	42	36
März	50	26	89	64	41	42
April	13	34	29	20	24	19
Mai	110	76	101	59	73	103
Juni	60	40	20	37	59	74
Juli	40	55	51	64	62	49
August	80	57	58	100	81	62
September	52	54	49	37	39	38
Oktober	53	62	81	61	52	63
November	30	34	37	38	42	32
Dezember	46	40	51	44	36	33
Summe Jan.–Dez.	625	534	693	644	596	597
Summe Apr.–Okt.	408	378	388	379	389	409

Tabelle 48: Bodennährstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2017

Ort	Kultur	mg/100 g Boden							
		P ₂ O ₅	Stufe	K ₂ O	Stufe	Mg	Stufe	pH	Stufe
Aholfing	Silphie	17	C	11	C	10	C	6,8	D
Aholfing	Sida (Biogas)	20	C	18	C	13	C	7,0	D
Aholfing	Sida (thermisch)	20	C	15	C	9	B	6,7	D
Aholfing	RWG Alkar	20	C	13	C	11	C	6,8	D
Aholfing	RWG GreenStar	20	C	14	C	10	C	6,9	D
Aholfing	Switchgras (Biogas)	19	C	12	C	9	B	6,8	D
Aholfing	Switchgras (therm.)	21	D	18	C	9	B	6,6	C
Aholfing	Silphie/Mais	23	D	16	C	9	B	7	D
Aholfing	Miscanthus	22	D	14	C	11	C	6,9	D
Aholfing	GPS-Roggen	23	D	17	C	10	C	6,9	D
Aholfing	Winterweizen	23	D	15	C	9	B	7,1	D
Aholfing	Zwischenfrucht	12	C	11	C	13	C	7,0	D
Rosenau	Silphie	8	B	17	C	13	C	7,6	D
Rosenau	Sida (Biogas)	8	B	13	C	12	C	7,6	D
Rosenau	Sida (thermisch)	7	B	15	C	11	C	7,6	D
Rosenau	RWG Alkar	8	B	11	C	12	C	7,6	D
Rosenau	RWG GreenStar	10	C	13	C	11	C	7,6	D
Rosenau	Switchgras (Biogas)	9	B	9	B	10	C	7,6	D
Rosenau	Switchgras (therm.)	9	B	17	C	11	C	7,6	D
Rosenau	Silphie/Mais	8	B	18	C	14	C	7,6	D
Rosenau	Miscanthus	8	B	11	C	11	C	7,6	D
Rosenau	GPS-Roggen	11	C	17	C	11	C	7,6	D
Rosenau	Winterweizen	10	C	9	B	11	C	7,7	D
Rosenau	Zwischenfrucht	11	C	28	D	11	C	7,5	D
Hötzelsdorf	Silphie	15	C	8	B	16	C	6,7	D
Hötzelsdorf	Sida (Biogas)	15	C	14	C	16	C	6,4	C
Hötzelsdorf	Sida (thermisch)	16	C	11	C	17	C	6,3	C
Hötzelsdorf	RWG Alkar	17	C	11	C	17	C	6,5	D
Hötzelsdorf	RWG GreenStar	15	C	15	C	16	C	6,6	D
Hötzelsdorf	Switchgras (Biogas)	17	C	14	C	18	C	6,6	D
Hötzelsdorf	Switchgras (therm.)	19	C	12	C	17	C	6,4	C
Hötzelsdorf	Silphie/Mais	20	C	15	C	17	C	6,5	C
Hötzelsdorf	Miscanthus	18	C	13	C	19	C	6,4	C
Hötzelsdorf	GPS-Roggen	18	C	21	D	19	C	6,5	C
Hötzelsdorf	Winterweizen	18	C	15	C	19	C	6,4	C

Ort	Kultur	P ₂ O ₅	Stufe	K ₂ O	Stufe	Mg	Stufe	pH	Stufe
mg/100 g Boden									
Hötzelstdorf	Zwischenfrucht	17	C	18	C	19	C	6,5	C
Parsberg	Silphie	15	C	18	C	25	D	6,2	B
Parsberg	Sida (Biogas)	15	C	27	D	29	D	6,7	C
Parsberg	Sida (thermisch)	18	C	24	C	27	D	6,6	C
Parsberg	RWG Alkar	22	D	21	C	32	D	6,7	C
Parsberg	RWG GreenStar	15	C	19	C	35	D	6,9	D
Parsberg	Switchgras (Biogas)	22	D	26	D	30	D	6,8	D
Parsberg	Switchgras (therm.)	15	C	26	D	45	D	7	D
Parsberg	Miscanthus	29	D	26	D	33	D	7,1	D
Parsberg	GPS-Roggen	20	C	28	D	32	D	6,9	D
Parsberg	Winterweizen	21	D	28	D	36	D	6,9	D
Parsberg	Zwischenfrucht	20	C	23	C	35	D	6,8	D
Gelchsheim	Silphie	31	E	18	C	13	C	7,6	D
Gelchsheim	Sida (Biogas)	33	E	20	C	12	C	7,5	D
Gelchsheim	Sida (thermisch)	30	D	24	D	12	C	7,6	D
Gelchsheim	RWG Alkar	28	D	16	C	11	C	7,7	D
Gelchsheim	RWG GreenStar	26	D	18	C	13	C	7,7	D
Gelchsheim	Switchgras (Biogas)	30	D	14	C	11	C	7,6	D
Gelchsheim	Switchgras (therm.)	27	D	16	C	11	C	7,6	D
Gelchsheim	Silphie/Mais	24	D	18	C	12	C	7,6	D
Gelchsheim	Miscanthus	25	D	14	C	11	C	7,6	D
Gelchsheim	GPS-Roggen	27	D	18	C	11	C	7,6	D
Gelchsheim	Winterweizen	26	D	15	C	11	C	7,6	D
Gelchsheim	Zwischenfrucht	25	D	19	C	11	C	7,7	D
Wolferkofen	Silphie	13	C	9	B	11	C	6,9	D
Wolferkofen	Sida (Biogas)	13	C	9	B	12	C	7,0	D
Wolferkofen	Sida (thermisch)	15	C	11	C	12	C	6,9	D
Wolferkofen	RWG Alkar	13	C	8	B	15	C	7,2	D
Wolferkofen	RWG GreenStar	15	C	7	B	11	C	7,1	D
Wolferkofen	Switchgras (Biogas)	14	C	9	B	12	C	7,1	D
Wolferkofen	Switchgras (therm.)	13	C	8	B	13	C	7,2	D
Wolferkofen	Miscanthus	16	C	9	B	11	C	7,2	D
Wolferkofen	GPS-Roggen	13	C	12	C	14	C	7,2	D
Wolferkofen	Winterweizen	15	C	12	C	13	C	6,9	D
Wolferkofen	Zwischenfrucht	14	C	12	C	13	C	7,1	D

Tabelle 49: Bodennährstoffgehalt zu Vegetationsende 2019

Ort	Kultur	P ₂ O ₅	Stufe	K ₂ O	mg/100 g Boden				
					Stufe Mg	Stufe pH	Stufe		
Aholfing	Silphie	19	C	18	C	13,4	C	6,3	C
Aholfing	Sida (Biogas)	22	D	24	D	13,3	C	6,6	C
Aholfing	Sida (therm.)	22	D	18	C	10,5	C	6,6	C
Aholfing	RWG GreenStar	20	C	16	C	12,0	C	6,6	C
Aholfing	RWG Alkar	24	D	21	D	12,4	C	6,5	C
Aholfing	Switchgras (Biogas)	22	D	20	C	12,8	C	6,6	C
Aholfing	Switchgras (therm.)	21	D	16	C	9,1	B	6,7	C
Aholfing	Silphie/Untersaat	27	D	27	D	13	C	6,8	C
Aholfing	Miscanthus	24	D	24	D	13	C	7,0	D
Aholfing	GPS-Roggen	23	D	13	C	11	C	6,8	C
Aholfing	Weizen	25	D	15	C	12	C	6,9	D
Aholfing	Mais	23	D	26	D	13	C	6,8	C
Aholfing	Praxisacker	32	E	25	D	10	C	7,3	D
Rosenau	Silphie	4	A	13	C	11	C	7,5	D
Rosenau	Sida (Biogas)	6	B	23	D	12	C	7,5	D
Rosenau	Sida (therm.)	5	B	14	C	10	C	7,4	D
Rosenau	RWG GreenStar	6	B	11	C	12	C	7,5	D
Rosenau	RWG Alkar	5	B	13	C	11	C	7,6	D
Rosenau	Switchgras (Biogas)	6	B	11	C	10	C	7,6	D
Rosenau	Switchgras (therm.)	4	A	15	C	9	B	7,5	D
Rosenau	Silphie/Untersaat	5	B	18	C	13	C	7,5	D
Rosenau	Miscanthus	4	A	12	C	10	C	7,5	D
Rosenau	GPS-Roggen	5	B	10	C	10	C	7,5	D
Rosenau	Weizen	9	B	8	B	10	C	7,6	D
Rosenau	Mais	6	B	7	B	9	B	7,5	D
Rosenau	Praxisacker	4	A	8	B	10	C	7,5	D
Hötzelsdorf	Silphie	18	C	12	C	23	D	6,2	C
Hötzelsdorf	Sida (Biogas)	17	C	13	C	22	D	6,4	C
Hötzelsdorf	Sida (therm.)	18	C	12	C	16	C	6,2	C
Hötzelsdorf	RWG GreenStar	18	C	12	C	17	C	6,4	C
Hötzelsdorf	RWG Alkar	14	C	13	C	16	C	6,2	C
Hötzelsdorf	Switchgras (Biogas)	15	C	12	C	21	D	6,2	C
Hötzelsdorf	Switchgras (therm.)	14	C	12	C	17	C	6,1	B
Hötzelsdorf	Silphie/Untersaat	19	C	17	C	22	D	6,4	C

Ort	Kultur	P ₂ O ₅	Stufe	K ₂ O	Stufe Mg	Stufe pH	Stufe
mg/100 g Boden							
Hötzelsdorf	Miscanthus	14	C	10	C 20	C 6,2	C
Hötzelsdorf	GPS-Roggen	18	C	10	C 20	C 6,2	C
Hötzelsdorf	Weizen	19	C	12	C 20	C 6,2	C
Hötzelsdorf	Mais	21	D	15	C 23	D 6,5	C
Hötzelsdorf	Praxisacker	19	C	7	B 19	C 6,0	B
Parsberg	Silphie	14	C	18	C 27	D 6,0	B
Parsberg	Sida (Biogas)	13	C	27	D 33	D 6,5	B
Parsberg	Sida (therm.)	15	C	23	C 31	D 6,8	C
Parsberg	RWG GreenStar	12	C	21	C 26	D 6,3	B
Parsberg	RWG Alkar	11	C	28	D 33	D 6,6	C
Parsberg	Silphie/Untersaat	11	C	22	C 44	D 6,9	C
Parsberg	Miscanthus	12	C	22	C 34	D 6,6	C
Parsberg	GPS-Roggen	13	C	19	C 26	D 6,4	B
Parsberg	Weizen	14	C	21	C 28	D 6,6	C
Parsberg	Mais	20	C	28	D 36	D 6,9	C
Parsberg	Praxisacker	19	C	16	C 36	D 7,5	D
Gelchsheim	Silphie	24	D	16	C 11	C 7,4	D
Gelchsheim	Sida (Biogas)	23	D	25	C 13	C 7,2	C
Gelchsheim	Sida (therm.)	25	D	14	B 11	C 7,5	D
Gelchsheim	RWG GreenStar	25	D	25	C 15	C 7,5	D
Gelchsheim	RWG Alkar	24	D	17	C 12	C 7,5	D
Gelchsheim	Switchgras (Biogas)	22	D	19	C 12	C 7,3	D
Gelchsheim	Switchgras (therm.)	27	D	16	C 11	C 7,4	D
Gelchsheim	Silphie/Untersaat	21	D	19	C 14	C 7,4	D
Gelchsheim	Miscanthus	22	D	18	C 12	C 7,4	D
Gelchsheim	GPS-Roggen	21	D	12	B 11	C 7,5	D
Gelchsheim	Weizen	20	C	11	B 11	C 7,5	D
Gelchsheim	Mais	22	D	18	C 12	C 7,5	D
Gelchsheim	Praxisacker	20	C	11	B 11	C 7,5	D
Wolferkofen	Silphie	14	C	11	B 14	C 6,4	B
Wolferkofen	Sida (Biogas)	13	C	12	B 14	C 6,5	B
Wolferkofen	Sida (therm.)	14	C	11	B 13	C 6,8	C
Wolferkofen	RWG GreenStar	12	C	9	B 16	C 6,7	C
Wolferkofen	RWG Alkar	14	C	12	B 14	C 6,7	C
Wolferkofen	Switchgras (Biogas)	12	C	10	B 14	C 6,7	C

Ort	Kultur	P ₂ O ₅	Stufe	K ₂ O	Stufe Mg	Stufe pH	Stufe
mg/100 g Boden							
Wolferkofen	Switchgras (therm.)	14	C	16	C 16	C 6,8	C
Wolferkofen	Silphie/Untersaat	11	C	14	B 14	C 6,7	C
Wolferkofen	Miscanthus	13	C	10	B 14	C 6,8	C
Wolferkofen	GPS-Roggen	12	C	8	B 15	C 6,7	C
Wolferkofen	Weizen	16	C	9	B 14	C 6,7	C
Wolferkofen	Mais	15	C	8	B 14	C 7	C
Wolferkofen	Praxisacker	10	C	15	C 12	C 7	C

Tabelle 50: Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2017

Kultur	Wolfer- kofen	Rosenau	Parsberg	Hötzelsdorf	Gelchsheim	Aholting
N _{min} in kg/ha für die Bodentiefen 0–90 cm (0–30/30–60/60–90 cm)						
Silphie	12 (12/0/0)	277 (187/80/10)	21 (17/4/0)	16 (16/0/0)	28 (21/4/3)	10 (8/1/1)
Sida (Biogas)	19 (13/6/0)	169 (111/47/11)	33 (21/8/4)	34 (30/4/0)	56 (25/20/11)	14 (10/4/0)
Sida (thermisch)	13 (13/0/0)	186 (134/40/12)	36 (21/10/5)	31 (23/4/4)	55 (28/16/11)	24 (16/5/3)
RWG Green- Star	11 (11/0/0)	170 (125/38/7)	51 (28/22/1)	32 (25/5/2)	28 (22/5/1)	17 (13/4/0)
RWG Alkar	19 (19/0/0)	180 (118/51/11)	27 (21/6/0)	36 (29/6/1)	39 (21/11/7)	11 (10/1/0)
Switchgras (Biogas)	19 (13/6/0)	223 (136/62/25)	58 (19/23/16)	40 (28/7/5)	75 (32/23/20)	18 (12/6/0)
Switchgras (thermisch)	15 (15/0/0)	159 (130/20/9)	46 (21/13/12)	35 (23/6/6)	37 (32/2/3)	14 (11/2/1)
Silphie/ Untersaat	17 (14/3/0)	247 (145/81/21)	42 (25/14/3)	27 (19/4/4)	54 (22/17/15)	35 (14/11/10)
Miscanthus	9 (0/4/5)	254 (154/83/17)	75 (34/30/11)	28 (27/1/0)	27 (15/3/9)	15 (13/1/1)
GPS-Roggen	30 (12/9/9)	217 (127/48/42)	57 (24/18/15)	44 (19/12/13)	69 (22/23/24)	39 (11/12/16)
Weizen	43 (14/17/12)	238 (128/83/27)	56 (21/19/16)	44 (17/13/14)	128 (21/60/47)	36 (12/11/13)
Zwischenfrucht (Mais)	43 (14/16/13)	241 (151/69/21)	45 (32/9/4)	21 (17/4/0)	51 (31/12/8)	33 (13/10/10)

Tabelle 51: Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2018

	Aholting	Gelchs- heim	Hötzels- dorf	Parsberg	Rosenau	Wolfer- kofen
N _{min} in kg/ha für die Bodentiefen 0–90 cm (0–30/30–60/60–90 cm)						
Silphie	13 0/13/0	40 24/10/6	19 19/0/0	80 45/24/11	341 169/133/39	45 27/14/4
Sida (Biogas)	46 27/15/4	42 25/8/9	40 33/7/0	79 55/17/7	381 197/120/64	53 27/18/8
Sida (therm.)	29 14/9/6	77 41/19/17	68 56/10/2	200 61/134/5	473 161/232/80	48 24/20/4
RWG Green- Star	56 36/14/6	183 170/9/4	60 58/0/2	448 66/376/6	482 209/204/69	46 32/9/5
RWG Alkar	42 30/11/1	31 22/5/4	80 59/15/6	59 48/11/0	557 316/168/73	81 54/23/4
Switchgras (Bi- ogas)	71 46/19/6	41 29/8/4	74 58/14/2	–	502 227/192/83	60 35/19/6
Switchgras (thermisch)	52 33/14/5	–	88 88/0/0	–	613 309/258/46	85 63/18/4
Silphie/ Untersaat	59 30/22/7	93 39/21/33	51 37/10/4	68 44/19/5	557 226/230/101	94 44/31/19
Miscanthus	46 29/12/5	39 23/11/5	66 56/7/3	236 52/174/10	432 203/177/52	47 31/13/3
Zwischenfrucht	66 24/27/15	70 35/26/9	57 43/10/4	231 55/169/7	567 233/236/98	48 29/15/4
GPS-Roggen	37 20/12/5	156 142/8/6	73 48/18/7	67 42/17/8	549 241/208/100	81 42/26/13
Weizen	67 41/16/10	75 25/12/38	65 49/10/6	76 49/17/10	381 192/127/62	70 33/25/12
Praxisacker, angrenzend	120 80/3/37	75 31/18/26	106 39/57/10	170 54/55/61	1065 334/383/348	975 82/814/79

Tabelle 52: Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsbeginn 2019

Kultur	Aholting	Gelchsheim	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Wolferkofen
N _{min} in kg/ha für die Bodentiefen 0–90 cm (0–30/30–60/60–90 cm)						
Silphie	12 9/2/1	17 9/5/3	22 19/2/1	18 10/4/4	176 113/57/6	15 12/2/1
Sida (Biogas)	13 7/4/2	38 16/14/8	16 9/5/2	16 11/3/2	239 147/75/17	21 11/8/2
Sida (therm.)	18 9/5/4	99 45/25/29	20 13/4/3	20 13/4/3	218 107/80/31	14 10/2/2
RWG GreenStar	15 11/3/1	17 8/6/3	13 9/1/3	13 7/3/3	169 115/41/13	27 21/5/1

Kultur	Aholting	Gelchsheim	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Wolferkofen
N _{min} in kg/ha für die Bodentiefen 0–90 cm (0–30/30–60/60–90 cm)						
RWG Alkar	29 22/5/2	18 8/6/4	5 4/1/0	18 13/3/2	189 111/60/18	18 13/4/1
Switchgras (Biogas)	20 13/4/3	33 23/5/5	7 4/1/2	–	201 125/64/12	11 8/2/1
Switchgras (ther- misch)	19 12/5/2	31 21/6/4	15 10/3/2	–	177 117/50/10	13 9/3/1
Silphie/ Untersaat	10 5/3/2	–	8 5/2/1	31 * 14/10/7	150 86/48/16	14 10/3/1
Miscanthus	13 7/4/2	27 15/7/5	20 17/1/2	27 17/7/3	203 123/70/10	17 14/2/1
Weizen	16 9/4/3	75 13/6/56	31 5/3/23	83 12/16/55	196 92/51/53	43 13/10/20
Zwischenfrucht	22 11/7/4	69 24/19/26	20 8/6/6	48 16/13/19	257 87/92/78	31 15/5/11
GPS-Roggen	18 8/7/3	43 7/8/28	24 19/3/2	14 10/2/2	166 71/50/45	41 9/5/27
Praxisacker, angrenzend	50 29/11/10	56 20/12/24	20 9/6/5	38 22/11/5	318 101/125/92	40 18/11/11

* = GPS-Roggen

Tabelle 53: Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsende 2017

	Aholting	Gelchsheim	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Wolferkofen
in kg/ha						
Silphie	21 13/7/1	33 20/9/4	18 14/4/0	50 40/7/3	381 289/86/6	23 16/4/3
Sida (Biogas)	20 12/5/3	43 27/9/7	40 27/8/5	60 37/7/16	288 175/97/16	29 24/5/0
Sida (therm.)	16 12/4/0	46 30/12/4	37 29/8/0	46 29/13/4	254 171/68/15	25 22/3/0
RWG (Green- Star)	19 12/6/1	37 25/10/2	153 74/33/46	42 30/12/0	247 138/93/16	30 25/5/0
RWG (Alkar)	21 21/0/0	36 23/8/5	535 403/104/28	36 28/8/0	328 198/108/22	25 25/0/0
Switchgras (Biogas)	20 15/5/0	39 31/6/2	60 49/7/4	79 36/28/15	233 145/68/20	32 20/9/3
Switchgras (thermisch)	15 12/3/0	51 31/13/7	36 34/2/0	–	244 122/97/25	14 11/0/3
Silphie/Mais	43 19/18/6	97 68/22/7	140 31/33/76	76 23/31/22	307 162/122/23	85 53/27/5
Micanthus	14	31	36	55	176	31

	14/0/0	19/6/6	30/5/1	41/10/4	112/49/15	22/5/4
Zwischenfrucht	12 11/1/0	29 20/6/3	20 18/1/1	27 21/6/0	240 146/72/22	28 20/5/3
Roggen	53 28/15/10	80 48/19/13	73 20/21/32	57 27/23/7	424 239/131/54	72 38/25/9
Weizen	212 101/99/12	220 86/97/37	233 34/97/102	65 34/23/8	360 218/102/40	73 46/21/6
Praxisacker, angrenzend	141 77/44/20	80 47/23/10	78 33/29/16	277 114/85/78	782 588/151/43	43 32/6/5

Tabelle 54: Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsende 2018

	Aholting	Gelchsheim	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Wolferskofen
in kg/ha						
Silphie	18 9/5/4	29 16/8/5	35 27/4/4	39 28/8/3	188 113/64/11	16 12/2/2
Sida (Biogas)	22 11/6/5	47 33/9/5	39 29/4/6	36 27/6/3	170 12/70/88	41 31/7/3
Sida (thermisch)	25 15/6/4	52 34/10/8	32 24/3/5	40 29/7/4	129 84/31/14	23 18/3/2
RWG (GreenStar)	17 10/4/3	33 25/4/4	24 18/3/3	42 35/4/3	109 70/32/7	29 23/3/3
RWG (Alkar)	14 8/3/3	41 30/5/6	29 22/4/3	45 36/5/4	97 69/21/7	25 21/2/2
SG (Biogas)	23 14/6/3	24 17/4/3	37 31/3/3	–	212 79/102/31	17 11/4/2
SG (thermisch)	20 13/4/3	31 21/6/4	35 28/3/4	–	310 176/107/27	19 15/3/1
Silphie US	17 8/5/4	–	34 22/7/5	52* 33/12/7	268 165/69/34	24 16/5/3
Miscanthus	23 15/5/3	29 20/5/4	29 19/6/4	41 28/8/5	262 171/76/15	31 22/5/4
WV	70 32/32/6	143 129/10/4	126 54/59/13	108 74/27/7	547 300/191/56	96 78/12/6
Zwischenfrucht	22 12/6/4	69 45/14/10	22 15/4/3	105 81/13/11	362 193/124/45	58 43/10/5
RW	93 28/54/11	90 63/15/12	146 73/58/15	125 55/46/24	599 333/180/86	182 102/41/39
Praxisacker, angrenzend	45 22/15/8	131 107/18/6	99 59/27/13	102 45/33/24	899 424/355/120	166 129/26/11

* = Roggen

Tabelle 55: Boden-Stickstoffgehalt zu Vegetationsende 2019

	Aholfing	Gelchsheim	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Wolferkofen
Kultur	in kg/ha					
Silphie	17 12/5/0	18 14/3/1	37 33/1/3	31 23/4/4	188 115/65/8	11 7/3/1
Sida (Biogas)	32 23/8/1	28 22/5/1	35 30/4/1	24 20/3/1	185 118/42/25	16 10/5/1
Sida (therm.)	17 14/2/1	53 31/14/8	41 38/2/1	41 34/4/3	229 104/101/24	19 13/3/3
RWG GreenStar	13 11/2/0	32 27/4/1	22 2/14/6	26 25/1/0	168 96/53/19	21 19/1/1
RWG Alkar	27 20/3/4	23 20/2/1	28 4/1/23	33 29/2/2	166 104/49/13	18 15/2/1
Switchgras (Biogas)	20 15/3/2	23 18/4/1	36 32/4/0	–	162 84/57/21	17 10/3/4
Switchgras (ther- misch)	29 21/7/1	23 18/3/2	14 13/1/0	–	214 105/73/36	9 6/2/1
Silphie/Untersaat	20 15/4/1	–	25 21/2/2	42 26/11/5	170 105/49/16	11 10/1/0
Miscanthus	19 12/6/1	28 2/6/20	15 15/0/0	55 37/12/6	230 115/83/32	17 9/1/7
Weizen	13 10/1/2	16 12/2/2	26 17/4/5	27 18/4/5	173 95/58/20	14 11/2/1
Zwischenfrucht	66 34/26/6	78 42/21/15	145 93/34/18	80 54/20/6	473 176/221/76	49 34/10/5
GPS-Roggen	17 10/5/2	19 13/4/2	18 12/2/4	19 14/3/2	342 172/113/57	17 11/5/1
Praxisacker, angrenzend	157 57/78/22	18 11/5/2	20 15/1/4	33 16/10/7	1557 341/747/469	117 74/30/13

Tabelle 56: Erntetermine der mehrjährigen Kulturen für die Biogasnutzung in 2017

Variante	Aholfing	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Gelchsheim	Wolferkofen
Silphie	05.09.17	11.09.17	21.09.17	25.09.17	20.09.17	05.09.17
Sida	05.09.17	11.09.17	21.09.17	25.09.17	20.09.17	05.09.17
RWG (GreenStar)	22.06.17/ 09.10.17	13.07.17/ 16.10.12	28.06.17/ 05.10.17	21.06.17/ 17.10.17	27.06.17/ 11.10.17	22.06.17/ 16.10.12
RWG (Alkar)	22.06.17/ 09.10.17	13.07.17/ 16.10.12	28.06.17/ 05.10.17	21.06.17/ 17.10.17	27.06.17/ 11.10.17	22.06.17/ 16.10.12
Switchgras	22.06.17/ 09.10.17	13.07.17/ 16.10.12	–	21.06.17/ 25.09.17	27.06.17/ 11.10.17	13.07.17/ 16.10.12
Mais [#]	05.09.17	11.09.17	21.09.17 [#]	25.09.17	20.09.17 [#]	05.09.17

Variante	Aholfing	Hötzelndorf	Parsberg	Rosenau	Gelchsheim	Wolferkofen
GPS-Roggen	22.06.17	13.07.17*	28.06.17	21.06.17	27.06.17	22.06.17
Silomais	05.09.17	11.09.17	21.09.17	25.09.17	20.09.17	05.09.17

* Sommertriticale in Hötzelndorf; # Mais mit Untersaat Silphie

Tabelle 57: Erntetermine der mehrjährigen Kulturen für die Biogasnutzung in 2018

Variante	Aholfing	Hötzelndorf	Parsberg	Rosenau	Gelchsheim	Wolferkofen
Silphie	21.08.2018	24.08.2018	06.09.2018	28.08.2018	05.09.2018	22.08.2018
Sida	21.08.2018	24.08.2018	06.09.2018	28.08.2018	05.09.2018	22.08.2018
RWG (GreenStar)	19.06.2018 09.10.2018	02.07.2018 10.10.2018	03.07.2018 18.10.2018	02.07.2018 11.10.2018	27.06.2018 16.10.2018	20.06.2018 15.10.2018
RWG (Alkar)	19.06.2018 09.10.2018	02.07.2018 10.10.2018	03.07.2018 18.10.2018	02.07.2018 11.10.2018	27.06.2018 16.10.2018	20.06.2018 15.10.2018
Switchgras	19.06.2018 09.10.2018	02.07.2018 10.10.2018	–	21.06.2018 11.10.2018	27.06.2018 16.10.2018	20.06.2018 15.10.2018
Silphie US#	21.08.2018	24.08.2018	–	28.08.2018	–	22.08.2018
GPS-Roggen	19.06.2018	02.07.2018	03.07.2018	21.06.2018	27.06.2018	20.06.2018
Silomais	21.08.2018	24.08.2018	06.09.2018	28.08.2018	05.09.2018	22.08.2018

Silphie als Untersaat gesät in 2017

Tabelle 58: Erntetermine der mehrjährigen Kulturen für die Biogasnutzung in 2019

Variante	Aholfing	Hötzelndorf	Parsberg	Rosenau	Gelchsheim	Wolferkofen
Silphie	27.08.2019	28.08.2019	05.09.2019	16.09.2019	04.09.2019	11.09.2019
Sida	27.08.2019	28.08.2019	05.09.2019	–	04.09.2019	11.09.2019
RWG (GreenStar)	01.07.2019 01.10.2019	09.07.2019 01.10.2019	04.07.2019 29.10.2019	27.06.2019 15.10.2019	03.07.2019 16.10.2019	08.07.2019 30.09.2019
RWG (Alkar)	01.07.2019 01.10.2019	09.07.2019 01.10.2019	04.07.2019 29.10.2019	27.06.2019 15.10.2019	03.07.2019 16.10.2019	08.07.2019 30.09.2019
Switchgras	01.07.2019 01.10.2019	09.07.2019 01.10.2019	–	27.06.2019 15.10.2019	03.07.2019 16.10.2019	08.07.2019 30.09.2019
Silphie US#	27.08.2019	28.08.2019	–	16.09.2019	–	11.09.2019
GPS-Roggen	01.07.2019	09.07.2019	04.07.2019	27.06.2019	03.07.2019	08.07.2019
Silomais	27.08.2019	28.08.2019	05.09.2019	16.09.2019	04.09.2019	11.09.2019

Tabelle 59: *Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2017*

Variante	Aholting	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Gelchsheim	Wolferkofen
Sida	28.03.2017	29.03.2017	03.04.2017	27.03.2017	11.04.2017	28.03.2017
Switchgras	28.03.2017	29.03.2017	03.04.2017	27.03.2017	11.04.2017	28.03.2017
Miscanthus	28.03.2017	29.03.2017	03.04.2017	27.03.2017	11.04.2017	28.03.2017

Tabelle 60: *Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2018*

Variante	Aholting	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Gelchsheim	Wolferkofen
Sida	12.04.2018	11.04.2018	19.04.2018	13.04.2018	18.04.2018	11.04.2018
Switchgras	12.04.2018	11.04.2018	19.04.2018	13.04.2018	18.04.2018	11.04.2018
Miscanthus	12.04.2018	11.04.2018	19.04.2018	13.04.2018	18.04.2018	11.04.2018

Tabelle 61: *Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2019*

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
Sida	13.03.2019	13.03.2019	25.03.2019	22.03.2019	21.03.2019	20.03.2019
Switchgras	13.03.2019	13.03.2019	25.03.2019	22.03.2019	–	20.03.2019
Miscanthus	13.03.2019	13.03.2019	25.03.2019	22.03.2019	21.03.2019	20.03.2019

Tabelle 62: *Erntetermine der mehrjährig. Kulturen für die thermische Nutzung in 2020*

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
Sida	17.03.2020	17.03.2020	18.03.2020	18.03.2020	05.09.2019	04.09.2019
Switchgras	17.03.2020	17.03.2020	18.03.2020	18.03.2020	–	04.09.2019
Miscanthus	17.03.2020	17.03.2020	18.03.2020	18.03.2020	05.09.2019	04.09.2019

Tabelle 63: *Saattermine der einjährigen Referenz-Kulturen (2016/17)*

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
Winterweizen	10.10.2016	11.10.2016	10.10.2016	24.10.2016	17.10.2016	15.10.2016
GPS-Roggen	28.09.2016	28.09.2016	28.09.2016	29.09.2016	17.10.2016	05.10.2016
Silomais	22.05.2017	17.05.2017	17.05.2017	22.05.2017	16.05.2017	–

Tabelle 64: Saattermine der einjährigen Referenz-Kulturen (2017/18)

Variante	Aholfing	Hötzelsdorf	Parsberg	Rosenau	Gelchsheim	Wolferkofen
Winterweizen	13.10.2017	21.09.2017	27.09.2017	11.10.2017	15.10.2017	13.10.2017
GPS-Roggen	22.09.2017	21.09.2017	27.09.2017	11.10.2017	24.09.2017	22.09.2017
Sommer-roggen	–	–	10.04.2018	–	–	–
Silomais	23.04.2018	23.04.2018	24.04.2018	23.04.2018	27.04.2018	23.04.2018

Tabelle 65: Saattermine der einjährigen Referenz-Kulturen (2018/19)

Variante	Aholfing	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
Winter-weizen	09.10.2018	08.10.2018	08.10.2018	27.09.2018	02.10.2018	21.03.2019*
GPS-Roggen	27.09.2018	08.10.2018	08.10.2018	27.09.2018	02.10.2018	–
Silomais	16.04.2019	15.04.2019	15.04.2019	16.04.2019	17.04.2019	–

* = Sommerweizen

Tabelle 66: Stickstoffdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2017

Variante	Aholfing	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
kg N in Form von KAS (27%)						
Silphie	130	180	–	100	150	110
Sida (Biogas)	60	130	–	30	60	120
Sida (therm.)	30	30	–	30	40	30
RWG (GreenStar)	60+40+50	60+110+60	30	60+30+30	60+30+60	60+80+60
RWG (Alkar)	60+40+50	60+110+60	30	60+30+30	60+30+60	60+80+60
SG (Biogas)	120+40	120+40	30	60+30	–	85+30
SG (therm.)	30	30	–	30	40	30
Mais + US Silphie	170	170	30*	150	–	150
Miscanthus	30	30	–	30	–	30
Mais	140+30*	140+30*	–	150+30*	115+30*	150
GPS-Roggen	60+60	60+70	–	60+60	60+60	60+30
Weizen	60+100	60+100	–	60+90	60+80	60+30

US = Untersaat; * = als Unterfußdüngung

Tabelle 67: Stickstoffdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2018

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelndorf	Parsberg	Gelchsheim
kg N in Form von KAS (27 %)						
Silphie	110	130	30	130	130	130
Sida (Biogas)	50	104	30	50	70	70
Sida (therm.)	30	30	–	30	30	30
RWG (GreenStar)	60+30+40	60+41+50	30	50+30+30	60+70+60	60+70+60
RWG (Alkar)	60+30+40	60+68+50	30	50+30+30	60+50+50	60+50+60
SG (Biogas)	30+40	30+40	30	30+30	–	40+40
SG (therm.)	30	30	–	30	–	30
US Silphie	64	86	–	102	100 (Sommerroggen)	–
Miscanthus	30	30	–	30	30	30
Mais	134+30*	160+30*	30*	143+30*	140+30*	140+30*
GPS-Roggen	70+70	70+27	70	70+30	70+	70+40
Weizen	70+63	70+60	70	70+65	70+	70+80

US = Untersaat; * = als Unterfußdüngung; SG = Switchgras, RWG = Riesenweizengras

Tabelle 68: Stickstoffdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2019

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelndorf	Parsberg	Gelchsheim
kg N in Form von KAS (27 %)						
Silphie	80	160	–	130	130	160
Sida (Biogas)	100	100	–	80	80	60
Sida (therm.)	30	30	–	30	30	30
RWG Alkar	60+30+30	60+80+50	30	50+60+30	60+30+30	60+60+60
RWG Green-Star	60+60+30	60+60+50	30	50+60+30	60+60+40	60+80+50
SG (Biogas)	60+40	60+50	–	100+30	–	60+60
SG (therm.)	30	30	–	30	–	30
US Silphie	80	160	–	130	–	–
Miscanthus	30	30	–	30	30	30
Mais	160	160	–	180	130	130
GPS-Roggen	70+80	70+60	70	70+80	70+60	70+30
Weizen	70+60	70+30	70	70+60	70+0	70+30

Tabelle 69: Calciumdüngung im Versuchsjahr 2017

Variante	Parsberg	Hötzelndorf
kg CaO/ha in Form von Dolokorn (60 %)		
Silphie	1000	–
Sida (Biogas)	1000	1700
Sida (thermisch)	1000	1700
RWG GreenStar	1000	–
SG (thermisch)	–	1700
Mais + US Silphie	–	1700
Mais	–	1700
GPS-Roggen	–	1700
Weizen	–	1700

Tabelle 70: Phosphordüngung je Hektar im Versuchsjahr 2017

Variante	Aholting	Wolfers- kofen	Rosenau	Hötzelndorf	Parsberg	Gelchs- heim
kg P ₂ O ₅ /ha in Form von P-40 (40 %)						
Silphie	70	80	100	70	90	–
Sida (Biogas)	70	80	100	50	–	–
Sida (thermisch)	–	–	–	–	–	–
RWG GreenStar	70	80	50	50	70	–
RWG Alkar	70	80	100	50	35	–
SG (Biogas)	70	80	100	50	–	–
SG (thermisch)	–	–	50	–	–	–
Mais + US Silphie	50	80	150	100	–	50
Miscanthus	–	–	50	–	–	–
Mais	50	80	100	100	90	125
GPS-Roggen	50	80	100	100	90	50
Weizen	–	–	–	–	–	–

Tabelle 71: Phosphordüngung je Hektar im Versuchsjahr 2018

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
kg P ₂ O ₅ /ha in Form von P-40 (40 %)						
Silphie	50	100	150	100	100	–
Sida (Biogas)	30	50	100	30	30	–
Sida (thermisch)	–	–	50	–	–	–
RWG Alkar	50	50	50	30	30	30
RWG GreenStar	50	50	50	30	30	30
SG (Biogas)	100	100	100	50	–	30
SG (thermisch)	–	–	–	–	–	–
US Silphie	100	50	50	100	–	–
Miscanthus	30	–	–	–	–	–
Mais	–	–	–	–	–	30
GPS-Roggen	50	50	50	50	100	30
Weizen	100	100	100	100	100	50

Tabelle 72: Phosphordüngung je Hektar im Versuchsjahr 2019

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
kg P ₂ O ₅ /ha in Form von TSP (46 %)						
Silphie	20	80	140	60	60	–
Sida (Biogas)	–	40	90	30	30	–
Sida (thermisch)	–	–	70	–	–	–
RWG Alkar	20	40	30	30	–	30
RWG GreenStar	30	40	90	30	–	30
SG (Biogas)	60	80	140	80	–	30
SG (thermisch)	–	–	70	–	–	–
US Silphie	–	40	90	30	–	–
Miscanthus	–	20	90	30	–	–
Mais	20	80	70	60	0	30
GPS-Roggen	30	50	30	60	30	30
Weizen	20	80	90	80	60	30

Tabelle 73: Kaliumdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2017

Variante	Aholfing	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
kg K ₂ O/ha in Form von Patentkali (30 %)						
Silphie	400	525	400	450	400	300
Sida (Biogas)	300	450	250	150		250
Sida (thermisch)	–	–	–	–	–	–
RWG GreenStar	300	525	250	250	400	450
RWG Alkar	300	525	250	250	250	450
SG (Biogas)	250	325	325	150	–	250
SG (thermisch)	–	75	–	–	–	–
Mais + US						
Silphie	250	250	250	250	250	250
Miscanthus	30	75	30	–	30	–
Mais	250	250	250	250	250	250
GPS-Roggen	250	250	250	150	150	250
Weizen	–	–	75	–	–	–

Tabelle 74: Kaliumdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2018

Variante	Aholfing	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
kg K ₂ O/ha in Form von Patentkali (30 %)						
Silphie	250	500	500	400	350	350
Sida (Biogas)	50	300	100	50	50	150
Sida (thermisch)	–	–	–	–	–	–
RWG Alkar	200	350	150	150	200	300
RWG GreenStar	250	300	150	150	300	350
SG (Biogas)	300	350	250	200		350
SG (thermisch)	–	50	–	–	–	–
US Silphie	400	250	250	400	–	–
Miscanthus	100	50	50	50	50	50
Mais	150	150	100	30	50	150
GPS-Roggen	30	30	50	30	200	30
Weizen	350	300	150	350	300	250

Tabelle 75: Kaliumdüngung je Hektar im Versuchsjahr 2019

Variante	Aholting	Wolferkofen	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim
kg K ₂ O/ha in Form von Kornkali (40%)						
Silphie	70	440	400	300	250	440
Sida (Biogas)	–	200	100	110	50	100
Sida (thermisch)	–	–	–	–	–	–
RWG Alkar	110	200	100	110	50	150
RWG GreenStar	110	200	100	110	100	200
SG (Biogas)	220	330	300	300	–	200
SG (thermisch)	–	60	–	–	–	–
US Silphie	30	170	200	110	–	–
Miscanthus	70	100	50	70	50	100
Mais	70	150	200	110	20	100
GPS-Roggen	70	100	50	110	50	100
Weizen	110	250	300	110	100	150

Tabelle 76: Einsatz chemischer Pflanzenschutz- und Halmverkürzungsmittel im Versuchsjahr 2017

Variante	Aholting	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim	Wolferkofen
in l/ha oder in g/ha						
Silphie	–	–	–	–	–	–
Sida	Fusilade 1	Fusilade 1	–	–	–	–
Miscanthus	–	U46 1,5	–	–	–	–
Riesenweizengras	Traxos 1,2 + Pointer SX 35	Tristar 1,5 + U46 1,5; Traxos 1,2	Tomigan XL 1 + U46M 1	–	Tristar 1,5 + U46 1,5; Lontrell 200	–
Switchgras	Round up 2,5; U46 1,5 + Bucril 1	Round up 2,5; 2 x U46 1,5	Round up 2,5; Tomigan XL 1 + U46M 1	Round up 2,5	Tristar 1,5; Lontrell 200 + U46M 1,5	Round up 2,5
Mais+US Silphie	Stomp Aqua 4,4; Focus Ultra 2	Stomp Aqua 4,4; Focus Ultra 2	Stomp Aqua 4,4	–	–	Aqua 4,4; Focus Ultra 2
Mais	MaisTer 1 + Callisto 1	MaisTer 1 + Callisto 1	MaisTer 1 + Callisto 1	MaisTer 1 + Callisto 1	MaisTer 1 + Callisto 1	MaisTer 1 + Callisto 1
Roggen/ Triticale*	CCC 0,8 + Moddus 0,5	Moddus 0,5; Broadway 130	Biathlon 70	CCC 0,8 + Moddus 0,5; Broadway 275	CCC 0,8 + Moddus 0,5; Broadway 275	CCC 0,8 + Moddus 0,5

Weizen	CCC 0,8; Broadway 130g	CCC 0,8; Broadway 130g	Broadway 220; CCC 1	CCC 0,8 + Moddus 0,5; Broadway 275	CCC 0,8 + Moddus 0,5; Broadway 275	CCC 0,8 + Moddus 0,5; Broadway 275
--------	------------------------------	------------------------------	---------------------------	---	---	---

Tabelle 77: Einsatz chemischer Pflanzenschutz- und Halmverkürzungsmittel im Versuchsjahr 2018

Variante	Aholting	Rosenau	Hötzelsdorf	Parsberg	Gelchsheim	Wolferskofen
in l/ha oder in g/ha						
Silphie	–	–	–	–	–	–
Sida	0,2 l Lontrel 600 2 l Select 240	1 l Select 240	–	–	–	1 l Select 240
Miscanthus	–	–	–	–	–	–
Riesenweizen- engras	2 l Select 240 1 l U46M	2 l Select 240 0,2 l Lontrel 600	1,5 l Tomigan XL	300 g Atlantis WG 1 l Tomigan XL	–	–
Switchgras	300 g Atlantis WG 1 l Tomigan XL	2 l Select 240	300 g Atlantis WG 1 l Tomigan XL	–	0,2 l Lontrel 600 1 l U46M	300 g Atlantis
Silphie#	mechanisch	mechanisch	mechanisch 1 l Select 240	–	–	mechanisch
Mais	1 l Spectrum 1 l Mikado 0,4 l Buctril 0,2 l Lontrel 600	1 l Spectrum 1 l Mikado 0,4 l Buctril 0,2 l Lontrel 600	1 l Spectrum 1 l Mikado 0,4 l Buctril	1 l Spectrum 1 l Mikado 0,4 l Buctril 0,2 l Lontrel 600	1 l Spectrum 1 l Mikado 0,4 l Buctril 0,2 l Lontrel 600	1 l Spectrum 1 l Mikado 0,4 l Buctril
Roggen*	0,5 l Moddus 1,0 l Bacara	0,5 l Moddus 1,0 l Bacara	0,5 l Moddus 1,0 l Bacara	1,5 l U46M 0,5 l Moddus 1,0 l Bacara	0,4 l Moddus 1,0 l Bacara	0,5 l Moddus 1,0 l Bacara
Weizen	0,3 l Moddus 1,0 l Bacara	0,3 l Moddus 1,0 l Bacara	0,3 l Moddus 1,0 l Bacara	0,3 l Moddus 1,0 l Bacara	0,3 l Moddus	0,3 l Moddus 1,0 l Bacara

* zusätzlich Sommerroggen in Parsberg; # = als Untersaat unter Silomais in 2017 gesät

Tabelle 78: Einsatz chemischer Pflanzenschutz- und Halmverkürzungsmittel im Versuchsjahr 2019

Variante	Aholting	Rosenau	Hötzelstdorf	Parsberg	Gelchsheim	Wolferkofen
in l/ha oder in g/ha						
Silphie	–	–	–	Klettenlabkraut v. Hand entfernt	–	–
Sida	Select 240 1 l/ha	Select 240 1 l/ha	–	–	–	–
Sida thermisch	–	Select 240 1 l/ha	–	–	–	–
Riesenweizengras GreenStar	Dicopur 1,5 l/ha	Select 240 1 l/ha * Dicopur 1,5 l/ha	–	* Dicopur M 1,5 l/ha	* Dicopur M 1,5 l/ha	–
Riesenweizengras Alkar	Dicopur 1,5 l/ha	* Dicopur 1,5 l/ha	* Dicopur 1,5 l/ha	* Dicopur M 1,5 l/ha	* Dicopur M 1,5 l/ha	* Dicopur 1,5 l/ha
Switchgras	HAKSAR 500 SL 1,5 l/ha Dicopur 1,5 l/ha	HAKSAR 500 SL1,5 l/ha Arianne C 1,5 l/ha	HAKSAR 500 SL1,5 l/ha in Wdh. 1–3	–	–	–
Switchgras thermisch	–	Tomigan XL 1,5 l/ha Lontrel 720 167 g/ha	HAKSAR 500 SL1,5 l/ha in Wdh. 4	–	–	–
Silphie#	–	–	–	–	–	–
V9 Miscanthus	–	Dicopur M 1,5 l/ha	–	* Dicopur M 1,5 l/ha	–	* Dicopur 1,5 l/ha
Mais	Calaris 1,5 l/ Accent A+B 55 g+0,25 l/ BO235 0,3 l/ha					
Roggen*	AcuCel 1 l/ha	AcuCel 1 l/ha MCPA 1,5 l/ha	–	–	Ariane C 1 l/ha AcuCel 1 l/ha	AcuCel 1 l/ha
Weizen	AcuCel 1 l/ha Dicopur M 1,5 l/ha	AcuCel 1 l/ha Dicopur M 1,5 l/ha	–	* Dicopur M 1,5 l/ha	Baccara forte 1 l/ha AcuCel 1 l/ha	AcuCel 1 l/ha

* = Einzelpflanzenbehandlung Disteln mit Rückenspritze

Tabelle 79: *Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2017 (Mittelwerte)*

Standort	Variante	Schnitt	TM	FM	TS
			in dt/ha		in %
Aholfing					
	GPS-Roggen	1	125,6	298,7	42,3
	Mais	1	187,1	671,4	27,9
	Mais US	1	173,1	603,0	28,6
	Miscanthus	1	169,4	205,0	81,6
	RWG (Alkar)	1	97,9	287,3	34,9
	RWG (Alkar)	2	23,9	90,1	26,6
	RWG (GreenStar)	1	123,0	344,3	36,5
	RWG (GreenStar)	2	31,6	108,2	29,3
	SG (Biogas)	1	73,0	333,6	22,0
	SG (Biogas)	2	55,3	172,7	32,1
	SG (thermisch)	1	102,1	130,8	78,2
	Sida (Biogas)	1	52,7	135,5	38,7
	Sida (thermisch)	1	64,4	76,0	84,8
	Silphie	1	108,1	431,7	24,9
Gelchsheim					
	GPS-Roggen	1	115,4	294,7	39,2
	Mais	1	186,1	528,1	35,3
	Miscanthus	1	80,6	95,0	84,7
	RWG (Alkar)	1	146,8	489,6	29,8
	RWG (Alkar)	2	41,2	126,1	32,7
	RWG (GreenStar)	1	147,4	532,7	27,7
	RWG (GreenStar)	2	43,4	132,1	32,8
	SG (Biogas)	1	75,9	338,3	22,4
	SG (Biogas)	2	75,4	230,3	32,8
	SG (thermisch)	1	84,4	93,3	90,4
	Sida (Biogas)	1	114,1	291,2	40,1
	Sida (thermisch)	1	68,7	82,8	83,0
	Silphie	1	149,1	589,8	25,2
Hötzelsdorf					
	Mais	1	188,0	740,9	25,4
	Mais US	1	155,5	621,2	25,0
	Miscanthus	1	123,5	159,2	77,6
	RWG (Alkar)	1	70,3	194,4	36,4

Standort	Variante	Schnitt	TM	FM	TS
			in dt/ha		in %
	RWG (Alkar)	2	20,1	70,3	28,7
	RWG (GreenStar)	1	82,7	205,5	40,4
	RWG (GreenStar)	2	27,4	95,2	28,8
	SG (Biogas)	1	55,5	246,5	22,5
	SG (Biogas)	2	36,0	125,4	28,7
	SG (thermisch)	1	93,0	120,3	77,2
	Sida (Biogas)	1	36,3	129,1	28,1
	Sida (thermisch)	1	39,3	45,0	87,5
	Silphie	1	114,0	546,8	20,8
	Sommertriticale	1	69,2	168,0	41,3
Parsberg					
	GPS-Roggen	1	100,6	267,4	37,8
	Mais	1	196,0	617,3	31,7
	Miscanthus	1	142,3	176,8	80,6
	RWG (Alkar)	1	75,0	258,8	29,2
	RWG (Alkar)	2	36,3	102,7	35,7
	RWG (GreenStar)	1	102,7	384,8	26,7
	RWG (GreenStar)	2	53,5	152,7	34,9
	Sida (Biogas)	1	72,7	192,3	37,5
	Silphie	1	150,2	591,1	25,4
Rosenau					
	GPS-Roggen	1	99,7	264,7	37,3
	Mais	1	220,7	644,5	34,5
	Mais US	1	159,6	434,1	36,7
	Miscanthus	1	116,0	137,6	84,2
	RWG (Alkar)	1	53,3	175,4	30,7
	RWG (Alkar)	2	28,6	100,5	28,5
	RWG (GreenStar)	1	73,2	228,4	32,1
	RWG (GreenStar)	2	28,8	104,8	27,6
	SG (Biogas)	1	45,1	213,5	21,6
	SG (Biogas)	2	70,4	215,6	32,8
	SG (thermisch)	1	61,5	73,2	84,5
	Sida (Biogas)	1	49,0	138,5	35,1
	Sida (thermisch)	1	83,3	97,1	85,8
	Silphie	1	190,8	791,3	24,1

Wolferkofen

GPS-Roggen	1	128,0	344,2	37,2
Mais	1	202,7	626,4	32,4
Mais US	1	137,8	447,0	30,7
Miscanthus	1	63,4	74,7	84,9
RWG (Alkar)	1	128,4	522,6	24,6
RWG (Alkar)	2	37,3	113,6	32,9
RWG (GreenStar)	1	128,2	456,5	28,1
RWG (GreenStar)	2	30,4	89,4	37,3
SG (Biogas)	1	100,5	408,4	24,6
SG (Biogas)	2	46,7	145,6	32,9
SG (thermisch)	1	71,0	80,6	88,2
Sida (Biogas)	1	158,7	418,0	38,0
Sida (thermisch)	1	74,0	86,5	85,5
Silphie	1	197,1	840,0	23,4

Tabelle 80: Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2018 (Mittelwerte)

Standort	Variante	Schnitt	TM	FM	TS
			in dt/ha		in %
Aholfing					
	GPS-Roggen	1	88,8	183,9	49,2
	Mais	1	130,8	238,3	55,1
	Miscanthus	1	146,7	169,2	86,9
	RWG (Alkar)	1	53,6	146,8	37,2
	RWG (Alkar)	2	20,9	65,0	32,1
	RWG (GreenStar)	1	78,7	192,2	41,6
	RWG (GreenStar)	2	19,9	63,5	31,3
	SG (Biogas)	1	79,8	265,2	28,7
	SG (Biogas)	2	34,5	98,4	35,2
	SG (thermisch)	1	102,2	117,7	86,9
	Sida (thermisch)	1	46,9	53,7	87,3
	Silphie	1	64,7	147,7	43,9
	Silphie US	1	22,6	51,6	43,3

Gelchsheim

GPS-Roggen	1	94,3	211,2	44,6
Mais	1	150,7	307,3	46,2
Miscanthus	1	162,8	193,3	84,3
RWG (Alkar)	1	96,6	277,2	34,6
RWG (Alkar)	2	10,8	25,7	40,8
RWG (GreenStar)	1	120,0	333,0	36,3
RWG (GreenStar)	2	12,9	30,9	42,6
SG (Biogas)	1	85,9	322,5	26,6
SG (Biogas)	2	18,1	34,6	52,5
SG (thermisch)	1	86,4	97,7	88,5
Sida (Biogas)	1	91,4	201,5	45,4
Sida (thermisch)	1	87,3	104,1	84,0
Silphie	1	185,4	698,0	26,6

Hötzelndorf

GPS-Roggen	1	130,8	271,9	48,1
Mais	1	175,7	470,1	37,5
Miscanthus	1	137,8	168,7	81,8
RWG (Alkar)	1	59,5	178,1	33,7
RWG (Alkar)	2	16,8	41,3	40,6
RWG (GreenStar)	1	83,1	214,3	38,8
RWG (GreenStar)	2	15,9	39,2	40,9
SG (Biogas)	1	110,3	388,7	28,4
SG (Biogas)	2	43,2	121,8	35,5
SG (thermisch)	1	82,3	91,5	90,0
Sida (Biogas)	1	66,9	188,5	35,4
Sida (thermisch)	1	21,0	23,7	88,6
Silphie	1	118,4	422,4	28,0
Silphie US	1	50,7	203,2	24,9

Parsberg

GPS-Roggen	1	100,8	175,6	58,3
Mais	1	118,8	322,2	37,1
Miscanthus	1	138,5	174,4	79,3
RWG (Alkar)	1	32,0	77,1	40,9
RWG (Alkar)	2	12,4	32,4	38,6
RWG (GreenStar)	1	80,3	186,9	43,0
RWG (GreenStar)	2	14,9	36,2	41,5
Sida (Biogas)	1	63,8	161,5	39,2

Sida (thermisch)	1	43,6	50,6	86,0
Silphie	1	114,8	399,2	28,8
Sommerroggen	1	37,9	85,4	44,3
Rosenau				
GPS-Roggen	1	114,2	285,3	40,0
Mais	1	195,1	567,1	35,1
Miscanthus	1	144,6	165,8	87,2
RWG (Alkar)	1	47,1	128,7	36,4
RWG (Alkar)	2	18,7	58,4	32,1
RWG (GreenStar)	1	61,4	161,0	40,1
RWG (GreenStar)	2	18,2	54,0	33,8
SG (Biogas)	1	76,0	329,2	23,2
SG (Biogas)	2	45,1	117,3	38,5
SG (thermisch)	1	78,8	93,6	84,1
Sida (Biogas)	1	69,1	178,5	38,4
Sida (thermisch)	1	81,6	96,6	84,4
Silphie	1	155,1	629,5	24,7
Silphie US	1	77,1	318,4	24,1
Wolferkofen				
GPS-Roggen	1	137,4	320,0	42,9
Mais	1	197,2	489,8	40,3
Miscanthus	1	145,6	174,9	83,2
RWG (Alkar)	1	87,3	288,5	30,3
RWG (Alkar)	2	25,2	68,6	37,0
RWG (GreenStar)	1	107,9	306,5	35,2
RWG (GreenStar)	2	18,7	44,2	42,6
SG (Biogas)	1	97,7	384,9	25,4
SG (Biogas)	2	42,3	101,8	41,5
SG (thermisch)	1	109,4	127,0	86,1
Sida (Biogas)	1	111,0	266,3	41,7
Sida (thermisch)	1	81,2	93,8	86,5
Silphie	1	173,6	626,9	27,8
Silphie US	1	74,8	265,5	28,3

Tabelle 81: *Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2019 (Mittelwerte)*

Standort	Variante	Schnitt	TM	FM	TS
			in dt/ha		in %
Aholfing					
	GPS-Roggen	1	140,3	293,0	48,2
	Mais	1	175,6	651,8	26,9
	Miscanthus	1	67,8	85,3	79,0
	RWG (Alkar)	1	71,6	184,2	39,7
	RWG (Alkar)	2	20,4	62,4	32,8
	RWG (GreenStar)	1	96,5	242,1	40,6
	RWG (GreenStar)	2	23,3	68,4	34,2
	SG (Biogas)	1	83,8	340,8	24,7
	SG (Biogas)	2	38,6	114,5	33,7
	SG (thermisch)	1	69,7	86,0	81,1
	Sida (thermisch)	1	27,9	33,6	83,1
	Silphie	1	112,0	362,5	31,5
	Silphie US	1	69,4	225,7	31,2
Gelchsheim					
	GPS-Roggen	1	131,4	284,9	46,1
	Mais	1	200,5	636,2	31,6
	Miscanthus	1	176,7	247,8	71,4
	RWG (Alkar)	1	101,2	276,8	36,6
	RWG (Alkar)	2	19,7	51,6	39,0
	RWG (GreenStar)	1	101,9	283,3	36,2
	RWG (GreenStar)	2	21,1	46,4	45,9
	SG (Biogas)	1	88,2	386,2	22,9
	SG (Biogas)	2	58,4	163,5	35,7
	SG (thermisch)	1	93,0	107,3	86,6
	Sida (Biogas)	1	87,4	207,7	42,1
	Sida (thermisch)	1	82,9	98,8	83,9
	Silphie	1	170,4	666,2	25,7
Hötzelsdorf					
	GPS-Roggen	1	146,9	287,5	51,1
	Mais	1	130,1	493,7	26,3
	Miscanthus	1	139,7	180,3	77,6
	RWG (Alkar)	1	44,3	102,8	42,9
	RWG (Alkar)	2	16,3	41,0	39,7

Standort	Variante	Schnitt	TM		TS
			FM	in dt/ha	
	RWG (GreenStar)	1	74,3	149,9	49,9
	RWG (GreenStar)	2	14,4	38,5	37,4
	SG (Biogas)	1	77,2	252,7	30,6
	SG (Biogas)	2	39,5	118,2	33,5
	SG (thermisch)	1	111,7	162,2	67,9
	Sida (Biogas)	1	46,7	131,5	35,5
	Sida (thermisch)	1	46,0	52,3	87,8
	Silphie	1	97,2	370,7	25,3
	Silphie US	1	61,9	235,7	26,3
Parsberg					
	GPS-Roggen	1	124,3	228,4	54,7
	Mais	1	146,4	507,5	28,8
	Miscanthus	1	101,2	152,2	67,7
	RWG (Alkar)	1	50,1	112,2	44,8
	RWG (Alkar)	2	24,9	96,0	26,1
	RWG (GreenStar)	1	85,2	198,5	43,0
	RWG (GreenStar)	2	27,3	108,2	25,1
	Sida (Biogas)	1	69,1	180,9	37,7
	Sida (thermisch)	1	33,1	40,0	82,5
	Silphie	1	141,4	573,3	24,7
Rosenau					
	GPS-Roggen	1	126,8	353,8	35,9
	Mais	1	207,4	612,6	33,9
	Miscanthus	1	150,3	173,0	86,8
	RWG (Alkar)	1	50,6	174,4	29,4
	RWG (Alkar)	2	36,7	169,9	21,6
	RWG (GreenStar)	1	69,8	217,8	32,4
	RWG (GreenStar)	2	34,9	153,7	22,7
	SG (Biogas)	1	66,9	319,2	21,0
	SG (Biogas)	2	46,9	153,0	30,6
	SG (thermisch)	1	87,6	102,4	85,6
	Sida (thermisch)	1	54,9	64,7	84,8
	Silphie	1	173,2	723,0	23,9
	Silphie US	1	113,8	469,0	24,3

Wolferkofen					
GPS-Roggen	1	140,6	260,5	53,9	
Mais	1	227,5	660,5	34,4	
Miscanthus	1	146,6	202,6	72,2	
RWG (Alkar)	1	127,9	361,7	35,1	
RWG (Alkar)	2	24,2	67,8	35,6	
RWG (GreenStar)	1	119,8	315,7	37,8	
RWG (GreenStar)	2	22,7	56,8	39,9	
SG (Biogas)	1	111,6	415,2	26,9	
SG (Biogas)	2	53,7	157,6	34,1	
SG (thermisch)	1	112,7	137,2	82,3	
Sida (Biogas)	1	122,3	319,1	38,3	
Sida (thermisch)	1	57,8	70,1	82,5	
Silphie	1	199,5	793,0	25,2	
Silphie US	1	132,0	507,1	26,2	

Tabelle 82: Trockenmasseerträge, Trockensubstanzgehalte und Frischmasseerträge der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2020 (Mittelwerte)

Standort	Variante	Schnitt	TM	FM	TS
			in dt/ha		in %
Aholting					
	Miscanthus	1	157,2	222,3	70,6
	SG (thermisch)	1	82,7	137,4	60,2
	Sida (thermisch)	1	49,2	61,4	80,1
Hötzelsdorf					
	Miscanthus	1	153,7	273,0	56,3
	SG (thermisch)	1	77,3	103,8	75,1
	Sida (thermisch)	1	29,4	39,5	73,9
Rosenau					
	Miscanthus	1	121,9	181,1	67,4
	SG (thermisch)	1	59,4	116,5	50,7
	Sida (thermisch)	1	30,4	46,4	65,6
Wolferkofen					
	Miscanthus	1	206,0	297,6	69,4
	SG (thermisch)	1	116,5	163,6	71,9
	Sida (thermisch)	1	80,0	96,9	82,5

Tabelle 83: Boniturwerte der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2017 (Mittelwerte $n = 4$ und Standardabweichung)

Standort	Variante	Schnitt	Lager (1–9)	BBCH	Höhe in cm
Aholfing					
	GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	87 ± 0	145 ± 6
	Mais	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	270 ± 14
	Mais US	1	1,0 ± 0,0	–	273 ± 28
	Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	305 ± 34
	RWG (Alkar)	1	1,0 ± 0,0	55 ± 0	143 ± 17
	RWG (Alkar)	2	–	–	–
	RWG (GreenStar)	1	6,3 ± 2,2	61 ± 0	175 ± 6
	RWG (GreenStar)	2	–	–	–
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	59 ± 0	113 ± 5
	SG (Biogas)	2	–	–	–
	SG (thermisch)	1	9,0 ± 0,0		160 ± 8
	Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	188 ± 19
	Sida (thermisch)	1	1,3 ± 0,5		268 ± 28
	Silphie	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	225 ± 27
Gelchsheim					
	GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	87 ± 0	149 ± 6
	Mais	1	1,0 ± 0,0	89 ± 0	268 ± 30
	Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	213 ± 5
	RWG (Alkar)	1	5,5 ± 1,7	71 ± 0	170 ± 11
	RWG (Alkar)	2	8,0 ± 0,0	–	98 ± 5
	RWG (GreenStar)	1	7,8 ± 0,5	71 ± 0	188 ± 7
	RWG (GreenStar)	2	6,3 ± 1,3	–	115 ± 6
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	37 ± 0	99 ± 5
	SG (Biogas)	2	2,5 ± 0,6	–	123 ± 5
	SG (thermisch)	1	4,5 ± 1,0	–	163 ± 5
	Sida (Biogas)	1	1,8 ± 1,5	69 ± 0	280 ± 29
	Sida (thermisch)	1	3,3 ± 1,3	–	290 ± 8
	Silphie	1	2,5 ± 1,7	69 ± 0	285 ± 13
Hötzelstdorf					
	Mais	1	1,0 ± 0,0	87 ± 0	333 ± 10
	Mais US	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	298 ± 10
	Miscanthus	1	2,3 ± 2,5	–	308 ± 10
	RWG (Alkar)	1	1,5 ± 0,6	49 ± 0	158 ± 10

Standort	Variante	Schnitt	Lager (1–9)	BBCH	Höhe in cm
	RWG (Alkar)	2	8,5 ± 0,6	–	30 ± 4
	RWG (GreenStar)	1	6,3 ± 2,8	51 ± 0	173 ± 10
	RWG (GreenStar)	2	8,5 ± 0,6	–	45 ± 37
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	51 ± 0	106 ± 13
	SG (Biogas)	2	1,0 ± 0,0	–	80 ± 0
	SG (thermisch)	1	8,0 ± 0,0	–	130 ± 35
	Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	67 ± 0	180 ± 20
	Sida (thermisch)	1	1,0 ± 0,0	–	273 ± 10
	Silphie	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	220 ± 28
	Sommertriticale	1	1,0 ± 0,0	75 ± 0	100 ± 4
Parsberg					
	GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	83 ± 0	131 ± 3
	Mais	1	1,0 ± 0,0	87 ± 0	285 ± 37
	Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	275 ± 37
	RWG (Alkar)	1	1,3 ± 0,5	73 ± 0	138 ± 10
	RWG (Alkar)	2	1,0 ± 0,0	–	73 ± 5
	RWG (GreenStar)	1	4,3 ± 0,6	73 ± 0	165 ± 9
	RWG (GreenStar)	2	1,0 ± 0,0	–	117 ± 6
	Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	215 ± 37
	Silphie	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	230 ± 37
Rosenau					
	GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	141 ± 9
	Mais	1	1,0 ± 0,0	87 ± 0	383 ± 15
	Mais US	1	1,0 ± 0,0	89 ± 0	313 ± 13
	Miscanthus	1	3,0 ± 2,2	–	358 ± 28
	RWG (Alkar)	1	1,0 ± 0,0	59 ± 0	124 ± 20
	RWG (Alkar)	2	8,0 ± 0,8	–	115 ± 6
	RWG (GreenStar)	1	1,0 ± 0,0	61 ± 0	178 ± 10
	RWG (GreenStar)	2	7,8 ± 0,5	–	89 ± 45
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	59 ± 0	106 ± 11
	SG (Biogas)	2	1,0 ± 0,0	59 ± 0	125 ± 6
	SG (thermisch)	1	9,0 ± 0,0	–	178 ± 13
	Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	208 ± 33
	Sida (thermisch)	1	2,8 ± 0,5	–	370 ± 18
	Silphie	1	7,8 ± 1,5	69 ± 0	328 ± 10

 Wolferkofen

GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	81 ± 0	140 ± 0
Mais	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	295 ± 13
Mais US	1	1,0 ± 0,0	83 ± 0	290 ± 14
Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	285 ± 6
RWG (Alkar)	1	1,0 ± 0,0	61 ± 0	164 ± 5
RWG (Alkar)	2	1,0 ± 0,0	59 ± 0	140 ± 16
RWG (GreenStar)	1	4,5 ± 1,7	61 ± 0	180 ± 0
RWG (GreenStar)	2	1,0 ± 0,0	69 ± 0	124 ± 27
SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	59 ± 0	100 ± 4
SG (Biogas)	2	1,0 ± 0,0	59 ± 0	126 ± 28
SG (thermisch)	1	8,8 ± 0,5	–	100 ± 0
Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	288 ± 15
Sida (thermisch)	1	7,8 ± 0,5	–	310 ± 14
Silphie	1	1,0 ± 0,0	69 ± 0	285 ± 13

– Keine Erhebung; Mais US = Mais mit Silphie als Untersaat

Tabelle 84: Boniturwerte der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2018 (Mittelwerte $n = 4$ und Standardabweichung)

Standort	Variante	Schnitt	Lager (1–9)	BBCH	Höhe in cm
Aholfing					
	GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	84 ± 1	104 ± 5
	Mais	1	1,0 ± 0,0	89 ± 0	300 ± 0
	Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	283 ± 39
	RWG (Alkar)	1	2,0 ± 0,8	71 ± 0	128 ± 26
	RWG (Alkar)	2	4,8 ± 0,5	49 ± 0	28 ± 3
	RWG (GreenStar)	1	4,5 ± 1,3	71 ± 0	159 ± 17
	RWG (GreenStar)	2	5,0 ± 0,0	49 ± 0	28 ± 3
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	49 ± 0	111 ± 156
	SG (Biogas)	2	2,0 ± 0,0	65 ± 0	81 ± 13
	SG (thermisch)	1	6,5 ± 1,7	–	180 ± 0
	Sida (thermisch)	1	1,0 ± 0,0	–	253 ± 29
	Silphie	1	1,0 ± 0,0	78 ± 0	160 ± 0
	Silphie US	1	1,0 ± 0,0	78 ± 0	80 ± 47

Gelchsheim

GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	86 ± 1	118 ± 10
Mais	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	304 ± 14
Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	97 ± 0	293 ± 17
RWG (Alkar)	1	7,8 ± 0,5	71 ± 1	165 ± 10
RWG (Alkar)	2	4,0 ± 0,0	49 ± 0	25 ± 0
RWG (GreenStar)	1	9,0 ± 0,0	70 ± 1	165 ± 10
RWG (GreenStar)	2	5,0 ± 0,0	49 ± 0	23 ± 3
SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	49 ± 0	135 ± 4
SG (Biogas)	2	2,0 ± 0,0	75 ± 0	58 ± 3
Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	71 ± 0	301 ± 10
Sida (thermisch)	1	3,5 ± 1,0	97 ± 0	319 ± 14
Silphie	1	1,3 ± 0,5	77 ± 0	293 ± 5

Hötzelndorf

GPS-Roggen	1	1,3 ± 0,5	83 ± 0	125 ± 4
Mais	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	330 ± 0
Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	283 ± 13
RWG (Alkar)	1	3,3 ± 0,5	69 ± 0	171 ± 3
RWG (Alkar)	2	4,0 ± 0,0	50 ± 1	33 ± 9
RWG (GreenStar)	1	4,5 ± 0,6	69 ± 0	174 ± 3
RWG (GreenStar)	2	3,8 ± 0,5	49 ± 0	25 ± 0
SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	49 ± 0	139 ± 3
SG (Biogas)	2	2,3 ± 0,5	70 ± 1	111 ± 9
SG (thermisch)	1	9,0 ± 0,0	–	138 ± 13
Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	61 ± 3	315 ± 6
Sida (thermisch)	1	1,0 ± 0,0	–	197,5 ± 10
Silphie	1	1,0 ± 0,0	75 ± 0	312,5 ± 19
Silphie US	1	1,0 ± 0,0	65 ± 0	185 ± 10

Parsberg

GPS-Roggen	1	2,0 ± 0,0	84 ± 1	114 ± 10
Mais	1	1,0 ± 0,0	87 ± 0	263 ± 17
Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	97 ± 0	235 ± 45
RWG (Alkar)	1	2,5 ± 0,6	71 ± 0	139 ± 5
RWG (Alkar)	2	1,0 ± 0,0	29 ± 0	31 ± 3
RWG (GreenStar)	1	2,7 ± 0,6	69 ± 0	168 ± 8
RWG (GreenStar)	2	1,0 ± 0,0	29 ± 0	32 ± 3
Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	73 ± 0	254 ± 51
Sida (thermisch)	1	1,8 ± 0,5	97 ± 0	213 ± 28

Silphie	1	1,0 ± 0,0	83 ± 0	228 ± 58
Sommerroggen	1	4,8 ± 0,5	81 ± 0	115 ± 7
Rosenau				
GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	83 ± 0	123 ± 10
Mais	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	355 ± 10
Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	345 ± 13
RWG (Alkar)	1	1,0 ± 0,0	71 ± 0	98 ± 5
RWG (Alkar)	2	4,5 ± 0,6	49 ± 0	30 ± 4
RWG (GreenStar)	1	2,0 ± 1,2	71 ± 0	135 ± 17
RWG (GreenStar)	2	4,3 ± 0,5	49 ± 0	31 ± 3
SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	43 ± 0	123 ± 5
SG (Biogas)	2	2,5 ± 1,0	73 ± 0	131 ± 3
SG (thermisch)	1	7,5 ± 0,6	–	163 ± 5
Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	60 ± 0	208 ± 45
Sida (thermisch)	1	1,0 ± 0,0	–	318 ± 22
Silphie	1	8,5 ± 1,0	69 ± 0	358 ± 19
Silphie US	1	2,0 ± 1,2	81 ± 0	228 ± 15
Wolferkofen				
GPS-Roggen	1	1,0 ± 0,0	70 ± 4	105 ± 4
Mais	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	300 ± 0
Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	258 ± 21
RWG (Alkar)	1	3,5 ± 0,6	–	145 ± 13
RWG (Alkar)	2	3,8 ± 0,5	49 ± 0	35 ± 4
RWG (GreenStar)	1	9,0 ± 0,0	–	160 ± 12
RWG (GreenStar)	2	4,0 ± 0,0	50 ± 1	28 ± 3
SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	–	128 ± 10
SG (Biogas)	2	2,0 ± 0,0	71 ± 0	105 ± 6
SG (thermisch)	1	5,8 ± 1,5	–	152,5 ± 5
Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	75 ± 0	280 ± 0
Sida (thermisch)	1	1,0 ± 0,0	–	280 ± 34
Silphie	1	2,8 ± 0,5	76 ± 3	300 ± 0
Silphie US	1	1,0 ± 0,0	70 ± 0	160 ± 0

– Keine Erhebung; Silphie US = Silphie als Untersaat unter Silomais in 2017 gesät

Tabelle 85: Boniturwerte der Kulturen auf den Standorten im Versuchsjahr 2019 (Mittelwerte $n = 4$ und Standardabweichung)

Standort	Variante	Schnitt	Lager (1–9)	BBCH	Höhe
Aholting					
	GPS-Roggen	1	4,5 ± 1,7	81 ± 3	159 ± 7
	Mais	1	2,8 ± 0,5	82 ± 1	300 ± 24
	Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	213 ± 57
	RWG (Alkar)	1	4,8 ± 2,5	66 ± 2	173 ± 10
	RWG (Alkar)	2	6,8 ± 0,5	49 ± 0	41 ± 3
	RWG (GreenStar)	1	6,3 ± 2,1	68 ± 2	180 ± 0
	RWG (GreenStar)	2	8,0 ± 0,0	49 ± 0	45 ± 4
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	41 ± 0	134 ± 10
	SG (Biogas)	2	1,0 ± 0,0	75 ± 0	120 ± 12
	SG (thermisch)	1	7,5 ± 0,6	–	135 ± 27
	Sida (Biogas)	1	–	–	–
	Sida (thermisch)	1	1,8 ± 1,0	–	178 ± 61
	Silphie	1	2,3 ± 0,5	82 ± 2	225 ± 42
	Silphie US	1	2,3 ± 1,3	82 ± 1	100 ± 12
Gelchsheim					
	GPS-Roggen	1	3,0 ± 0,8	83 ± 0	165 ± 10
	Mais	1	1,0 ± 0,0	85 ± 0	325 ± 13
	Miscanthus	1	1,3 ± 0,5	–	298 ± 4
	RWG (Alkar)	1	4,8 ± 0,5	69 ± 0	189 ± 8
	RWG (Alkar)	2	1,0 ± 0,0	45 ± 0	28 ± 5
	RWG (GreenStar)	1	7,8 ± 0,5	69 ± 0	169 ± 8
	RWG (GreenStar)	2	1,0 ± 0,0	45 ± 0	31 ± 3
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	41 ± 0	139 ± 3
	SG (Biogas)	2	1,0 ± 0,0	79 ± 0	113 ± 10
	SG (thermisch)	1	1,3 ± 0,5	–	180 ± 8
	Sida (Biogas)	1	1,5 ± 1,0	79 ± 0	298 ± 10
	Sida (thermisch)	1	2,0 ± 0,0	–	290 ± 16
	Silphie	1	3,3 ± 1,5	77 ± 5	300 ± 18
Hötzelsdorf					
	GPS-Roggen	1	4,3 ± 1,3	83 ± 0	155 ± 6
	Mais	1	1,0 ± 0,0	82 ± 2	255 ± 10
	Miscanthus	1	–	–	–
	RWG (Alkar)	1	2,5 ± 1,0	68 ± 2	143 ± 13

Standort	Variante	Schnitt	Lager (1–9)	BBCH	Höhe
	RWG (Alkar)	2	1,0 ± 0,0	45 ± 0	28 ± 3
	RWG (GreenStar)	1	2,5 ± 0,6	68 ± 2	176 ± 8
	RWG (GreenStar)	2	1,0 ± 0,0	45 ± 0	23 ± 3
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	41 ± 0	105 ± 4
	SG (Biogas)	2	1,0 ± 0,0	69 ± 0	88 ± 10
	SG (thermisch)	1	–	–	–
	Sida (Biogas)	1	1,8 ± 0,5	72 ± 1	178 ± 21
	Sida (thermisch)	1	–	–	–
	Silphie	1	2,0 ± 0,0	74 ± 5	193 ± 22
	Silphie US	1	1,5 ± 0,6	72 ± 3	148 ± 15
Parsberg					
	GPS-Roggen	1	3,0 ± 1,8	85 ± 1	158 ± 5
	Mais	1	1,0 ± 0,0	79 ± 0	264 ± 23
	Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	–	220 ± 69
	RWG (Alkar)	1	1,0 ± 0,0	69 ± 1	141 ± 10
	RWG (Alkar)	2	4,5 ± 0,6	49 ± 0	35 ± 7
	RWG (GreenStar)	1	2,0 ± 0,0	59 ± 10	168 ± 3
	RWG (GreenStar)	2	5,0 ± 0,0	49 ± 0	35 ± 5
	Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	65 ± 0	215 ± 33
	Sida (thermisch)	1	1,5 ± 1,0	99 ± 0	225 ± 39
	Silphie	1	1,0 ± 0,0	65 ± 0	205 ± 30
Rosenau					
	GPS-Roggen	1	5,3 ± 2,6	71 ± 1	148 ± 5
	Mais	1	1,0 ± 0,0	84 ± 1	345 ± 13
	Miscanthus	1	1,0 ± 0,0	99 ± 0	380 ± 14
	RWG (Alkar)	1	3,3 ± 1,5	69 ± 0	158 ± 10
	RWG (Alkar)	2	6,5 ± 0,6	49 ± 0	43 ± 3
	RWG (GreenStar)	1	2,8 ± 1,0	69 ± 0	180 ± 0
	RWG (GreenStar)	2	6,5 ± 1,0	49 ± 0	44 ± 3
	SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	41 ± 0	124 ± 5
	SG (Biogas)	2	6,0 ± 0,8	75 ± 0	101 ± 3
	SG (thermisch)	1	8,0 ± 0,0	99 ± 0	165 ± 6
	Sida (Biogas)	1	–	–	–
	Sida (thermisch)	1	6,8 ± 0,5	99 ± 0	298 ± 37
	Silphie	1	5,8 ± 0,5	84 ± 1,	330 ± 16
	Silphie US	1	4,5 ± 0,6	84 ± 1	298 ± 13

Wolferkofen

GPS-Roggen	1	8,0 ± 0	81 ± 0	151 ± 6
Mais	1	1,0 ± 0	89 ± 0	335 ± 17
Miscanthus	1	1,0 ± 0	–	278 ± 19
RWG (Alkar)	1	5,8 ± 1,3	70 ± 1	191 ± 5
RWG (Alkar)	2	1,0 ± 0,0	75 ± 0	40 ± 4
RWG (GreenStar)	1	6,5 ± 0,6	70 ± 1	191 ± 17
RWG (GreenStar)	2	6,5 ± 0,6	75 ± 0	33 ± 5
SG (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	41 ± 0	140 ± 0
SG (Biogas)	2	1,0 ± 0,0	75 ± 0	113 ± 5
SG (thermisch)	1	6,5 ± 1,3	–	178 ± 10
Sida (Biogas)	1	1,0 ± 0,0	83 ± 1	298 ± 21
Sida (thermisch)	1	2,0 ± 0,8	–	270 ± 8
Silphie	1	4,0 ± 0,8	84 ± 1	280 ± 14
Silphie US	1	2,3 ± 1,0	82 ± 2	268 ± 13

– Keine Erhebung; Silphie US = Silphie als Untersaat unter Silomais in 2017 gesät

Tabelle 86: Nährstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras, Versuchsjahr 2017; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung

Erntedatum:	Silphie						
	17.08.	24.08.	31.08.	07.09.	13.09.	21.09.	
in % TS							
Rohasche	92	96	109	101	99	93	
Rohprotein	68	59	65	60	50	53	
Rohfett	22	25	22	21	26	19	
Rohfaser	366	389	403	415	391	401	
Acid detergent fibre	443	489	499	468	450	479	
Neutral detergent fibre	563	569	570	553	535	548	
Acid detergent lignin	68	86	97	83	84	89	
Hemicellulose	120	80	71	85	85	70	
Stärke	0	0	0	0	0	0	
Zucker	101	88	70	136	168	165	
Erntedatum:	Sida						
	13.07.	20.07.	28.07.**	03.08.***	08.08.	17.08.	05.09.
in % TS							
Rohasche	46	56	49	49	48	44	52
Rohprotein	56	65	75	59	50	54	51
Rohfett	10	15	9	13	16	12	15
Rohfaser	471	421	479	472	456	417	479
Acid detergent fibre	498	439	567	532	512	474	558

Neutral detergent fibre	690	619	737	661	646	603	682
Acid detergent lignin	116	106	148	123	108	97	104
Hemicellulose	192	179	170	129	134	129	124
Stärke	59	93	58	74	84	131	58
Zucker	38	47	21	44	59	54	63

Riesenweizengras

Erntedatum:	13.06.	21.06.	28.06.	05.07.	13.07.	16.10.*
	in % TS					
Rohasche	65	61	55	51	60	94
Rohprotein	97	74	63	56	58	100
Rohfett	408	433	436	449	428	20
Rohfaser	9	8	8	6	6	358
Acid detergent fibre	428	461	464	470	459	374
Neutral detergent fibre	713	758	753	763	748	655
Acid detergent lignin	86	112	109	113	117	55
Hemicellulose	286	298	289	293	289	280
Stärke	0	0	0	0	0	1
Zucker	58	30	51	52	60	72

Switchgras

Erntedatum:	05.07.	13.07.	20.07.	28.07.	03.08.	16.10.*
	in % TS					
Rohasche	65	61	50	52	51	65
Rohprotein	105	91	75	67	71	64
Rohfett	20	18	18	19	17	20
Rohfaser	360	388	383	378	372	333
Acid detergent fibre	391	428	429	421	412	352
Neutral detergent fibre	713	737	729	732	723	635
Acid detergent lignin	109	66	62	70	60	79
Hemicellulose	322	309	300	311	311	283
Stärke	0	0	0	0	7	1
Zucker	27	20	47	40	40	94

GPS-Roggen

Silomais

Erntedatum:	22.06.	05.09.
	in % TS	
Rohasche	46	35
Rohprotein	73	52
Rohfett	13	25
Rohfaser	349	234
Acid detergent fibre	351	273
Neutral detergent fibre	612	479
Acid detergent lignin	93	53
Hemicellulose	519	426
Stärke	54	223

Zucker	87	100
--------	----	-----

* = zweiter Aufwuchs; ** = evtl. Fehler bei Probentrocknung; *** = Schimmel in Probe

Tabelle 87: Nährstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras, Versuchsjahr 2018; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung

		Silphie				
Erntedatum:	09.08.	16.08.	22.08.	30.08.	06.09.	
		in % TS				
Rohasche	14,4	12,5	14,3	13,8	12,1	
Rohprotein	7,7	7,0	7,9	7,6	6,9	
Rohfett	1,7	1,8	2,1	2,0	1,9	
Rohfaser	33,6	34,7	34,2	34,9	34,7	
Acid detergent fibre	44,7	45,1	45,8	47,2	47,5	
Neutral detergent fibre	51,3	52,2	50,9	54,0	53,9	
Acid detergent lignin	10,8	10,9	9,9	11,2	10,4	
Hemicellulose	6,6	7,0	5,1	6,8	6,4	
Stärke	2,7	0,9	5,4	2,7	1,2	
Zucker	19,0	23,3	9,2	4,5	24,6	

		Sida				
Erntedatum:	20.06.	04.07.	19.07.	01.08.	16.08.	22.08.
		in % TS				
Rohasche	7,6	6,7	6,9	6,1	5,2	5,4
Rohprotein	11,3	9,0	7,1	5,8	5,1	5,4
Rohfett	1,4	1,1	1,4	1,1	1,2	1,4
Rohfaser	36,8	42,5	38,3	44,4	44,8	42,0
Acid detergent fibre	45,0	51,3	46,7	53,2	53,2	49,9
Neutral detergent fibre	60,6	70,1	67,1	75,7	76,9	72,3
Acid detergent lignin	8,4	9,7	8,6	9,8	9,6	8,8
Hemicellulose	15,6	18,9	20,3	22,5	23,6	22,4
Stärke	44,1	49,3	92,7	66,2	74,7	72,9
Zucker	13,4	1,3	28,0	2,7	9,8	27,2

		Riesenweizengras				
Erntedatum:	30.05.	06.06.	12.06.	20.06.	27.06.	15.10.*
		in % TS				
Rohasche	6,4	6,2	5,6	5,6	5,6	8,4
Rohprotein	8,9	8,7	6,2	7,6	6,7	11,4
Rohfett	0,7	0,8	0,6	0,8	0,9	1,8
Rohfaser	40,8	41,1	43,9	39,4	39,7	31,3
Acid detergent fibre	45,0	45,6	49,9	45,4	46,0	40,0
Neutral detergent fibre	75,8	76,0	79,1	71,9	71,9	66,0
Acid detergent lignin	5,4	5,8	7,3	7,9	6,5	7,3

Hemicellulose	30,9	30,4	29,2	26,5	25,9	26,0
Stärke	1,2	1,2	0,9	1,2	1,2	1,2
Zucker	30,6	31,4	22,3	46,0	64,6	52,5

Switchgras

Erntedatum:	21.06.	27.06.	04.07.	11.07.	19.07.	25.07.	15.10.*
	in % TS						
Rohasche	5,4	5,3	4,5	4,4	3,7	3,7	4,6
Rohprotein	7,4	6,8	5,7	5,3	4,0	3,1	3,1
Rohfett	1,4	1,4	1,4	1,2	1,1	1,0	1,9
Rohfaser	39,1	40,1	40,1	39,5	39,9	39,9	38,4
Acid detergent fibre	43,3	44,6	44,2	43,9	44,0	44,8	42,8
Neutral detergent fibre	68,9	70,2	71,0	70,5	72,7	74,2	68,4
Acid detergent lignin	5,4	5,8	7,7	10,4	9,4	9,6	6,3
Hemicellulose	25,6	25,6	26,7	26,6	28,7	29,4	25,6
Stärke	2,0	1,2	9,7	13,7	32,3	41,8	1,2
Zucker	24,6	26,1	34,7	46,5	59,5	60,8	47,6

GPS-Roggen

Silomais

Erntedatum:	02.07	22.08
	in % TS	
Rohasche	4,8	3,0
Rohprotein	2,4	6,1
Rohfett	1,7	2,2
Rohfaser	33,9	22,0
Acid detergent fibre	39,2	23,3
Neutral detergent fibre	65,5	46,0
Acid detergent lignin	4,9	6,4
Hemicellulose	26,3	22,8
Stärke	172,3	236,9
Zucker	76,9	77,4

* = 2. Aufwuchs

Tabelle 88: Mineralstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras, Versuchsjahr 2017; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung

Silphie						
Erntedatum	17.08.	24.08.	31.08.	07.09.	13.09.	21.09.
g/kgTM						
Ca	18,2	18,4	20,8	18,0	19,0	16,8
P	1,6	1,9	1,7	1,7	1,5	1,4
Mg	4,4	4,3	5,9	4,0	4,9	3,7
K	16,3	16,1	14,7	13,8	12,9	12,6
S	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6

Sida							
Erntedatum	13.07.	20.07.	28.07.	03.08.	08.08.	17.08.	05.09.
g/kgTM							
Ca	8,6	11,1	8,5	9,1	8,8	11,5	9,3
P	1,7	1,9	1,5	1,3	1,6	1,5	1,1
Mg	1,9	2,2	1,9	1,8	1,6	2,0	1,5
K	14,7	13,2	12,4	11,2	12,2	10,0	10,9
S	1,8	2,0	1,8	1,9	1,7	1,7	1,4

GreenStar						
Erntedatum	13.06.	21.06.	28.06.	05.07.	13.07.	16.10.
g/kgTM						
Ca	2,9	2,5	2,5	2,4	2,6	3,4
P	1,8	1,9	1,6	1,3	1,4	2,2
Mg	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9
K	21,5	20,0	16,3	13,4	13,2	18,7
S	1,6	1,4	1,3	1,1	1,2	1,8

Switchgras						
Erntedatum	05.07.	13.07.	20.07.	28.07.	03.08.	16.10.
g/kgTM						
Ca	4,1	3,9	3,5	3,7	3,5	4,4
P	1,7	1,7	1,3	1,3	1,3	1,3
Mg	2,5	2,4	2,1	2,2	2,0	2,0
K	19,1	19,3	14,4	14,1	13,0	12,0
S	1,5	1,1	1,1	1,1	0,7	1,3

	GPS-Roggen	Silomais
Erntedatum	22.06.	05.09.
	g/kgTM	
Ca	2,0	2,1
P	2,1	2,2
Mg	0,7	1,7
K	15,2	8,8
S	1,0	0,9

Tabelle 89: Mineralstoffgehalt in Silphie, Sida, Riesenweizengras und Switchgras in g/kg TM, Versuchsjahr 2018; Standort Wolferkofen, Biogasnutzung

	Silphie					
Erntedatum	09.08.	16.08.	22.08.	30.08.	06.09.	
	g/kgTM					
Ca	21,4	22,5	21,5	22,4	23,8	
P	1,6	1,7	1,9	1,5	1,3	
Mg	5,2	5,1	4,8	5,0	5,2	
K	16,3	15,1	17,6	15,9	12,9	
S	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	
	Sida					
Erntedatum	20.06.	04.07.	19.07.	01.08.	16.08.	22.08.
	g/kgTM					
Ca	13,7	12,0	12,8	10,4	9,9	9,8
P	2,0	1,8	1,4	1,2	1,3	1,2
Mg	3,2	2,4	2,3	1,7	1,8	1,8
K	19,6	13,9	11,7	9,6	9,9	10,6
S	3,1	2,3	2,5	1,8	1,9	1,9
	GreenStar					
Erntedatum	30.05.	06.06.	12.06.	20.06.	27.06.	15.10.*
	g/kgTM					
Ca	2,4	2,3	2,0	3,0	2,8	3,8
P	2,3	1,9	1,8	1,9	1,6	2,3
Mg	0,9	0,9	0,8	1,0	0,9	1,1
K	17,2	14,5	13,8	14,2	12,2	18,4
S	1,9	1,8	1,5	1,8	1,5	2,2

Switchgras							
Erntedatum	21.06.	27.06.	04.07.	11.07.	19.07.	25.07.	15.10.*
g/kgTM							
Ca	3,5	3,4	2,8	3,5	2,8	2,5	5,4
P	1,6	1,4	1,3	1,2	0,9	0,9	0,9
Mg	2,0	1,8	1,4	1,8	1,4	1,3	1,7
K	16,5	15,7	13,0	11,3	10,5	9,1	6,5
S	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	0,8	0,8

GPS-Roggen		Silomais	
Erntedatum	02.07.	22.08.	
g/kgTM		g/kgTM	
Ca	1,7	3,0	
P	2,4	1,9	
Mg	0,9	2,0	
K	9,2	8,4	
S	1,3	0,9	

* = 2. Aufwuchs

Tabelle 90: Methanausbeute der Energiepflanzen zur Biogasnutzung, im Batchversuch ermittelt 2017

Erntedatum	Silphie	Sida	Riesenweizengras	Switchgras	GPS-Roggen	Mais
Methanausbeute in l _N /kg oTM						
13.06.2017		–	339	–	–	–
21.06.2017		–	351	–	330	–
28.06.2017		–	338	–	–	–
05.07.2017		–	325	323	–	–
13.07.2017		298	308	305	–	–
20.07.2017		313	–	296	–	–
28.07.2017		259**		282		
03.08.2017		254***	–	309	–	–
08.08.2017		277	–	–	–	–
17.08.2017	229	267	–	–	–	–
24.08.2017	231	–	–	–	–	–
31.08.2017	227	–	–	–	–	–
05.09.2017	245	246	–	–	–	339

13.09.2017	241	–	–	–	–	–
21.09.2017	258	–	–	–	–	–
16.10.2017*	–	–	316	–	–	–
16.10.2017*	–	–	–	297	–	–

* = zweiter Aufwuchs; ** = evtl. Fehler bei Probentrocknung; *** = Schimmel in Probe

Tabelle 91: Methanausbeute der Energiepflanzen zur Biogasnutzung, im Batchversuch ermittelt (2018)

Erntedatum	Silphie	Sida	Riesenweizengras	Switchgras	GPS-Roggen	Mais
Methanausbeute in L _N /kg oTM						
30.05.2018	–	–	343	–	–	–
06.06.2018	–	–	361	–	–	–
12.06.2018	–	–	336	–	–	–
20.06.2018	–	274	343	353	–	–
27.06.2018	–	–	341	325	–	–
02.07.2018	–	–	–	–	343	–
04.07.2018	–	269	–	293	–	–
11.07.2018	–	–	–	283	–	–
19.07.2018	–	281	–	301	–	–
26.07.2018	–	–	–	295	–	–
01.08.2018	–	291	–	291	–	–
09.08.2018	275	–	–	–	–	–
16.08.2018	261	246	–	246	–	–
22.08.2018	222	222	–	246	–	376
30.08.2018	228	228	–	–	–	–
06.09.2018	256	256	–	–	–	–
15.10.2018*	–	–	284	276	–	–

* = 2. Aufwuchs

Tabelle 92: *Ergebnisse der Bodenuntersuchungen (Rammkernsonde) im Oktober 2019 als Mittelwert aus vier Wiederholungen*

Tiefe	pH	CO ₃ C	C _t	C _{org}	N _t	CN	Stein- gehalt	LD	C _{org} - Vorrat
in cm				in mg/g			in %	in g/cm ³	in kg/m ²
Aholfing									
Maisstoppel									
0–15	6,7	0,2	9,4	9,3	1,0	9,5	4,6	1,5	1,9
15–30	6,5	0,1	7,9	7,8	0,9	9,0	7,1	1,5	1,6
30–50	6,4	0,1	3,2	3,1	0,4	7,2	9,0	1,5	0,9
50–70	6,7	3,4	5,3	1,8	0,3	6,4	11,3	1,4	0,5
70–100	7,2	12,6	13,4	0,8	0,1	12,5	13,2	1,5	0,3
Miscanthus									
0–15	6,5	0,3	9,1	8,8	0,9	9,8	3,5	1,5	1,8
15–30	6,5	0,1	8,0	7,9	0,8	9,5	5,7	1,5	1,7
30–50	6,4	0,1	2,9	2,8	0,4	8,1	11,5	1,5	0,7
50–70	6,8	7,5	9,0	1,5	0,3	5,5	13,1	1,4	0,4
70–100	6,9	5,7	6,7	1,0	0,1	8,4	27,9	1,4	0,3
RWG									
0–15	6,6	0,2	9,2	9,0	0,9	9,9	3,9	1,4	1,8
15–30	6,5	0,1	8,1	8,1	0,8	9,7	3,5	1,5	1,8
30–50	6,5	0,1	3,7	3,6	0,4	8,8	7,5	1,5	0,9
50–70	6,7	2,9	5,0	2,1	0,3	7,8	15,2	1,4	0,5
70–100	7,1	8,1	9,1	1,0	0,2	12,6	23,2	1,4	0,4
Silphie									
0–15	6,2	0,1	9,6	9,4	1,0	9,8	2,3	1,4	2,0
15–30	6,0	0,0	8,4	8,4	0,9	9,7	3,1	1,4	1,7
30–50	6,2	0,1	3,7	3,5	0,4	8,6	1,2	1,6	1,1
50–70	6,4	3,5	5,8	2,4	0,3	7,6	0,6	1,5	0,7
70–100	6,5	8,8	10,2	1,5	0,2	7,1	12,3	1,5	0,6
Gelchsheim									
Maisstoppel									
0–15	7,0	0,6	13,7	13,1	1,4	9,1	0,0	1,3	2,6
15–30	7,0	0,6	11,8	11,2	1,2	9,1	0,4	1,5	2,5
30–50	7,0	0,1	5,9	5,8	0,7	8,9	0,0	1,5	1,7
50–70	7,1	4,7	8,4	3,6	0,4	8,0	0,0	1,4	1,0
70–100	7,1	17,5	18,7	1,2	0,3	3,9	0,5	1,5	0,5

Tiefe	pH	CO ₃ C	C _t	C _{org}	N _t	CN	Stein- gehalt	LD	C _{org} - Vorrat
in cm				in mg/g			in %	in g/cm ³	in kg/m ²
Miscanthus									
0–15	7,1	1,3	13,6	12,2	1,4	8,7	0,1	1,4	2,6
15–30	7,1	1,1	11,5	10,4	1,2	8,4	0,0	1,5	2,4
30–50	6,9	0,5	7,1	6,6	0,8	8,7	0,0	1,4	1,9
50–70	7,0	5,0	10,1	5,0	0,6	7,6	0,1	1,4	1,4
70–100	7,1	9,2	12,8	3,6	0,5	7,7	0,4	1,5	1,6
RWG									
0–15	6,8	1,5	16,1	14,6	1,6	9,4	0,2	1,4	3,0
15–30	6,8	2,1	12,4	10,3	1,2	8,8	0,1	1,5	2,3
30–50	6,9	1,1	8,4	7,3	0,8	9,5	0,1	1,4	2,1
50–70	6,9	6,2	11,1	4,8	0,5	8,7	0,3	1,4	1,3
70–100	6,9	13,2	15,5	2,3	0,4	5,5	0,2	1,4	1,0
Silphie									
0–15	6,9	0,4	13,3	12,9	1,4	9,3	0,0	1,4	2,7
15–30	7,0	0,5	11,8	11,3	1,2	9,3	0,4	1,4	2,4
30–50	6,8	0,2	6,9	6,7	0,7	9,3	0,2	1,4	1,9
50–70	6,9	5,2	9,5	4,2	0,5	7,1	0,0	1,4	1,2
70–100	6,9	14,4	16,3	1,9	0,4	3,9	0,3	1,4	0,8
Wolferkofen									
Maisstoppel									
0–15	6,5	0,1	11,3	11,1	1,3	8,9	0,4	1,4	2,3
15–30	6,6	0,1	9,8	9,7	1,1	8,7	0,8	1,5	2,1
30–50	6,6	0,1	3,9	3,8	0,6	6,9	0,0	1,5	1,2
50–70	6,8	5,7	8,2	2,4	0,4	5,6	0,1	1,4	0,7
70–100	7,0	22,3	23,6	1,2	0,3	3,7	0,2	1,5	0,6
Miscanthus									
0–15	6,5	0,1	11,6	11,4	1,2	9,5	0,6	1,3	2,3
15–30	6,6	0,1	10,4	10,3	1,1	9,1	0,7	1,4	2,2
30–50	6,6	0,1	4,1	4,0	0,5	7,3	0,1	1,4	1,1
50–70	6,8	3,3	6,6	3,3	0,5	6,7	0,0	1,4	1,0
70–100	7,3	26,1	27,0	0,9	0,3	3,1	0,5	1,5	0,4
RWG									
0–15	6,5	0,2	11,1	11,0	1,2	9,1	0,4	1,4	2,2
15–30	6,6	0,1	10,2	10,1	1,1	8,9	0,3	1,5	2,2

Tiefe	pH	CO ₃ C	C _t	C _{org}	N _t	CN	Stein- gehalt	LD	C _{org} - Vorrat
in cm				in mg/g			in %	in g/cm ³	in kg/m ²
30–50	6,6	0,1	3,9	3,8	0,5	7,3	0,2	1,5	1,1
50–70	6,8	9,4	11,4	1,9	0,4	4,2	0,3	1,5	0,6
70–100	7,5	33,0	33,4	0,4	0,2	1,6	0,3	1,6	0,2
Silphie									
0–15	6,1	0,1	11,2	11,1	1,2	9,3	0,4	1,4	2,2
15–30	6,2	0,1	9,6	9,5	1,1	9,0	0,3	1,4	2,1
30–50	6,3	0,1	4,0	3,9	0,5	7,4	0,1	1,5	1,2
50–70	6,3	0,1	3,8	3,7	0,5	7,7	0,0	1,5	1,1
70–100	7,4	23,6	24,7	1,1	0,3	4,2	0,6	1,5	0,5

Tabelle 93: *Ergebnisse der Bodenuntersuchungen (Stechzylinderproben) im Oktober 2019 als Mittelwert aus vier Wiederholungen, für TRD, GPV, Totwasser, FK, nFK mit je sechs Einzelproben je Wiederholung*

	Tiefe	Ton	Schluff	Sand	TRD	GPV	Tot- wasser	FK	nFK
	in cm	in %			in g/cm ³		in %		
Aholting									
Silphie	10–15	12,8	28,1	59,1	1,6	41,0	7,2	28,4	21,1
	30–35	18,0	30,2	51,7	1,6	38,6	11,8	28,7	16,9
RWG	10–15	9,5	21,4	69,1	1,5	41,8	4,8	26,6	21,9
	30–35	8,3	22,0	69,6	1,6	39,7	4,3	25,1	20,8
Miscanthus	10–15	13,5	26,3	60,1	1,6	40,3	7,8	28,9	21,0
	30–35	17,6	27,8	54,6	1,6	39,6	11,5	31,3	19,8
Referenz	10–15	11,7	23,5	64,8	1,7	36,6	6,7	26,9	20,2
	30–35	20,2	24,9	55,0	1,6	40,1	13,5	31,6	18,1
Gelchsheim									
Silphie	10–15	26,3	71,9	1,8	1,4	45,7	13,3	34,0	20,7
	30–35	31,3	67,6	1,1	1,5	43,0	16,3	35,7	19,4
RWG	10–15	26,1	71,7	2,2	1,5	42,4	15,6	34,8	19,2
	30–35	30,0	67,9	2,1	1,5	43,0	15,9	34,5	18,6
Miscanthus	10–15	26,5	71,8	1,7	1,5	43,6	14,4	34,3	19,9
	30–35	32,3	66,7	1,0	1,5	45,0	17,2	35,9	18,7
Referenz	10–15	27,4	70,9	1,7	1,4	45,7	12,7	33,1	20,4
	30–35	35,2	63,7	1,1	1,5	45,4	17,4	35,7	18,3

	Tiefe	Ton	Schluff	Sand	TRD	GPV	Tot- wasser	FK	nFK
	in cm	in %		in g/cm ³		in %			
Wolferkofen									
Silphie	10–15	21,4	72,6	6,1	1,4	45,4	12,5	32,5	20,0
	30–35	23,0	70,7	6,3	1,6	40,3	12,7	33,5	20,8
RWG	10–15	23,1	71,2	5,7	1,4	45,3	10,8	33,0	22,2
	30–35	26,6	68,1	5,3	1,5	41,9	14,5	34,7	20,1
Miscanthus	10–15	22,6	71,9	5,5	1,5	42,5	11,0	33,5	22,4
	30–35	27,0	67,8	5,2	1,6	40,0	16,5	36,3	19,7
Referenz	10–15	23,4	70,9	5,6	1,5	42,5	11,9	33,0	21,1
	30–35	32,6	63,2	4,2	1,6	41,6	15,4	35,5	20,2

Tabelle 94: Artenliste der Laufkäfer an den vier untersuchten Standorten für den Zeitraum 02.03.2017 bis 16.05.2017

	Aholfing	Hötzelsdorf	Rosenau	Wolferkofen
	in Individuen			
<i>Abax parallelepipedus</i>	–	–	31	–
<i>Acupalpus flavicollis</i>	–	–	4	–
<i>Acupalpus meridianus</i>	4	–	–	–
<i>Agonum emarginatum</i>	1	–	–	–
<i>Agonum muelleri</i>	3	7	132	1
<i>Agonum sexpunctatum</i>	–	2	42	–
<i>Amara aenea</i>	114	86	99	10
<i>Amara communis</i>	2	–	6	–
<i>Amara convexior</i>	–	3	9	–
<i>Amara familiaris</i>	19	29	34	2
<i>Amara lunicollis</i>	–	2	3	–
<i>Amara ovata</i>	–	7	2	6
<i>Amara plebeja</i>	–	–	1	–
<i>Amara similata</i>	5	1	9	8
<i>Anchomenus dorsalis</i>	18	14	20	170
<i>Anisodactylus binotatus</i>	3	11	17	2
<i>Anisodactylus signatus</i>	2	–	–	–
<i>Asaphidion flavipes</i>	5	–	704	81

	Aholfing	Hötzelsdorf	Rosenau	Wolferkofen
	in Individuen			
<i>Badister bullatus</i>	–	–	1	1
<i>Badister sodalis</i>	–	–	2	2
<i>Bembidion guttula</i>	15	–	23	1
<i>Bembidion lampros</i>	255	83	316	331
<i>Bembidion lunulatum</i>	1	–	–	–
<i>Bembidion obtusum</i>	1	–	6	135
<i>Bembidion properans</i>	146	9	55	79
<i>Bembidion quadrimaculatum</i>	1	5	8	4
<i>Bembidion tetracolum</i>	190	–	73	–
<i>Carabus cancellatus</i>	–	93	–	–
<i>Carabus convexus</i>	–	1	–	–
<i>Carabus granulatus</i>	–	9	43	28
<i>Carabus monilis</i>	1	–	–	–
<i>Carabus nemoralis</i>	–	3	8	–
<i>Carabus ulrichii</i>	–	–	2	–
<i>Chlaenius nigricornis</i>	–	–	1	–
<i>Clivina fossor</i>	14	–	74	–
<i>Demetrias atricapillus</i>	–	–	1	2
<i>Dyschirius globosus</i>	–	2	–	–
<i>Harpalus affinis</i>	25	40	–	–
<i>Harpalus distinguendus</i>	39	–	1	1
<i>Harpalus rufipes</i>	3	–	3	2
<i>Harpalus tardus</i>	–	2	1	–
<i>Limodromus assimilis</i>	–	–	4	–
<i>Loricera pilicornis</i>	88	40	96	119
<i>Microlestes minutulus</i>	2	–	1	–
<i>Nebria brevicollis</i>	10	2	40	49
<i>Notiophilus aestuans</i>	–	25	–	–
<i>Notiophilus biguttatus</i>	1	2	6	101
<i>Notiophilus palustris</i>	–	9	3	–
<i>Oodes helopioides</i>	1	–	–	–
<i>Paratachys bistriatus</i>	1	–	–	–
<i>Poecilus cupreus</i>	91	149	243	6

	Ahofling	Hötzelsdorf	Rosenau	Wolferkofen
	in Individuen			
<i>Poecilus versicolor</i>	10	501	347	–
<i>Pterostichus anthracinus</i>	1	–	6	–
<i>Pterostichus melanarius</i>	7	3	6	14
<i>Pterostichus nigrita</i>	–	–	1	–
<i>Pterostichus strenuus</i>	2	–	25	–
<i>Pterostichus vernalis</i>	2	–	8	–
<i>Stenolophus teutonius</i>	1	–	–	–
<i>Stomis pumicatus</i>	1	–	–	–
<i>Trechus quadristriatus</i>	2	–	1	16

Tabelle 95: Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Ahofling für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)					Adulte Tiefgräber		Juvenile	
	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. yrtaeum</i>	<i>P. tuberculatus</i>	<i>A. longa</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
Individuen/m ²									
2014									
Referenz ZF stehend	33,0	4,8	4,0	1,3	–	–	3,0	26,3	67,5
Referenz ZF gemulcht	73,3	52,3	3,3	–	–	1,0	6,5	94	284,8
2015									
Silphie	11,8	15,0	4,0	–	–	0,3	9,3	36,8	97,8
Sida (Biogas)	8,3	9,5	1,8	–	–	0,3	4,8	29,5	79,5
RWG	4,5	6,3	1,5	–	–	–	3,0	28,3	51,5
Referenz ZF	20,0	22,3	2,8	0,3	–	0,5	4,0	62,5	106
2016									
Sida (thermisch)	18,8	15,5	1,5	–	–	2,3	8,8	38	114,8
Switchgras (thermisch)	8,5	7,8	1,8	–	–	1,3	5,0	45,8	104,5
Miscanthus	12,8	15,8	4,3	0,25	–	0,3	7,0	41,3	208,8
Referenz WW	35,3	18,0	1,3	–	–	1,3	9,3	60	59,5

2018									
Silphie	16,5	10,8	2,5	–	–	–	9,3	41,3	66
Sida (Biogas)	27,3	8,5	5,5	–	–	1,0	8,0	37,3	84
RWG	6,5	1,8	0,3	–	–	0,3	1,3	12,5	34,3
Referenz ZF	14,3	5,5	1,3	–	–	0,5	3,0	17,5	11,5
2019									
Sida (thermisch)	18,0	7,5	3,0	–	–	–	12,0	31,3	34,5
Switchgras (thermisch)	8,8	3,0	1,5	–	–	–	2,5	17,0	36,3
Miscanthus	28,5	2,5	5,8	–	1,3	–	6,8	28,5	36,3
Referenz WW	6,5	1,3	1,3	–	–	–	2,0	9,8	13,3

Tabelle 96: Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Gelchsheim für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)				Adulte Tief- Juvenile gräber		
	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>P. tuberculatus</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in Individuen/m ²							
2014							
Referenz ZF stehend	15,0	2,5	2,8	–	0,5	22,8	57,5
Referenz ZF gemulcht	21,3	1,3	2,5	–	2,3	21,5	39,5
2019							
Silphie	2,5	4,3	1,3	3,8	9,0	29	160,8
Sida (Biogas)	3,8	3,8	–	–	6,3	47,5	67,8
Sida (thermisch)	8,5	8,0	0,3	3,8	15,8	70,5	79,5
RWG	5,0	1,3	0,3	1,3	7,5	13,3	61,3
Switchgras (thermisch)	4,0	3,8	0,8	–	2,0	16,0	74,0
Miscanthus	–	–	–	1,3	4,8	30,5	65,3
Referenz WW	0,3	2,5	–	1,3	2,3	19,3	31,3

Tabelle 97: Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Hötzeldorf für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Streube- wohnende Arten			Adulte endogäi- sche Arten (Mine- ralbodenformen)			Adulte Tief- gräber	Juvenile		
	<i>A. handlirschi</i>	<i>L. castaneus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>A. longa</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in Individuen/m ²										
2014										
Referenz ZF stehend	–	–	–	3,8	–	5,3	–	–	3,8	16,5
Referenz ZF gemulcht	0,5	–	–	5,8	–	6,0	–	1,0	6,5	18,3
2015										
Silphie	–	–	–	1,0	1,3	7,3	–	0,3	2,3	8,8
Sida (Biogas)	–	–	–	0,8	0,3	5,3	–	1,8	3,8	17,0
RWG	–	–	–	–	0,5	0,8	–	1,8	1,3	6,5
Referenz ZF	–	–	–	4,5	–	3,5	0,3	2,0	5,8	12,0
2016										
Sida (thermisch)	–	–	–	6,3	1,3	6,3	–	0,3	3,8	19,3
Switchgras (thermisch)	–	–	–	6,0	0,3	1,5	–	0,5	1,8	38,8
Miscanthus	–	–	–	7,0	0,3	2,8	–	1,0	8,5	26,0
Referenz WW	–	–	–	1,5	1,3	2,8	–	0,3	0,5	10,0
2018										
Silphie	–	–	–	4,8	2,5	2,8	–	3,0	13,3	18,5
Sida (Biogas)	–	–	–	9,8	2,5	10,8	–	7,0	27,8	35,3
RWG	0,3	–	–	2,5	–	5,8	–	1,5	9,3	18,3
Referenz ZF	0,3	–	–	2,5	–	3,5	–	1,3	5,3	9,3
2019										
Sida (thermisch)	–	–	0,3	1,5	1,3	5	–	19,5	33,5	28,3
Switchgras (thermisch)	–	0,3	–	0,5	1,3	4,3	–	3,0	24,3	30,0
Miscanthus	0,3	–	0,3	1,8	1,3	5,3	–	4,8	36,3	23,8
Referenz WW	0,3	–	–	2,8	–	5,8	–	1,8	7,5	19,5

Tabelle 98: Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Parsberg für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Adulte Streubewohner		Adulte endogäische Arten (Mikroendobionten)				Adulte Tiefgräber	Juvenile	
	<i>L. castaneus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in Individuen/m ²									
2014									
Referenz ZF stehend	–	–	3,5	1,8	–	1	–	0,3	28,0
Referenz ZF gemulcht	–	–	27,5	10,8	2,8	–	–	0,5	22,8
2018									
Silphie	–	0,3	73	16,5	5,3	10,3	2,0	11,8	101,5
Sida (Biogas)	–	0,5	50,5	27,0	7,5	6,0	0,5	3,8	51,8
RWG	–	1,3	24,5	11,3	7,3	0,8	1,5	13,3	92,0
Referenz ZF	–	–	11	4,5	–	2,8	0,5	2,3	19,3
2019									
Sida (thermisch)	–	3,0	27,5	23,8	7,5	2,5	0,3	7,0	75,0
Miscanthus	0,3	4,5	22,8	8,0	–	8,3	0,3	6,3	54,5
Referenz WW	–	1,25	13,8	6,3	1,3	1,5	–	0,5	11,3

Tabelle 99: Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Rosenau für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Streubewohnende Arten		Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)					Adulte Tiefgräber	Juvenile
	<i>D. rubidus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in Individuen/m ²									
2014									
Referenz ZF stehend	–	1,0	13,3	10,0	32,8	1,0	–	10,5	41,3
Referenz ZF gemulcht	–	1,0	11,0	24,8	40,8	2,5	–	5,8	80,8
Silphie	–	3,5	7,5	3,5	3,5	2,5	–	12,3	49,5
Sida (Biogas)	–	6,3	5,8	3,3	10,8	1,5	–	12,5	42,3
RWG	0,3	13,0	6,0	2,3	7,0	3,0	–	24,3	33,0
Referenz ZF	–	2,8	7,0	2,3	5,8	2,0	–	5,3	26,8
2016									
Sida (thermisch)	–	5,5	5,3	12,3	16,5	1,3	0,3	42,5	137,7
Switchgras (thermisch)	0,3	1,8	3,8	1,0	10,8	1,8	–	14,3	100,5
Miscanthus	1,5	4,0	12,3	6,8	15,0	3,3	–	54,3	162,5
Referenz WW	–	1,0	6	16,3	18,0	4,0	–	8,25	85,0
2018									
Silphie	1,5	25,0	19,0	3,8	7,0	10,8	2,8	39,8	41,3
Sida (Biogas)	–	17,8	17,5	1,3	16,3	2,0	1,0	20,3	39,3
RWG	–	12,3	6,8	1,5	10,0	8,5	–	14,8	45,5
Referenz ZF	–	0,3	2,5	–	–	–	–	–	7,5
2019									
Sida (thermisch)	–	17,0	16,5	2,5	47,3	6,0	1,3	60,5	82,8
Switchgras (thermisch)	0,3	9,0	13,5	2,8	17,0	4,8	0,3	27,0	44,0
Miscanthus	–	4,5	3,8	2,5	22,3	1,8	0,5	20,8	46,3
Referenz WW	–	3,0	3,5	–	20,0	5,5	–	0,8	22,5

Tabelle 100: Regenwurmabundanz des Versuchsstandorts Wolferkofen für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Adulte Streubewohner		Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)					Adulte Juvenile Tiefgräber		
	<i>D. rubidus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>P. antipae</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
In Individuen/m ²										
2016										
Silphie	–	–	35,8	–	6,0	0,5	–	6,3	4,3	129,8
Sida (Biogas)	0,3	–	23,8	0,5	8,0	0,3	–	7,5	28,3	172
RWG	–	–	23,3	0,3	10,0	0,3	–	5,0	20,0	47,3
Referenz Maisstoppel	–	–	46,5	1,0	3,5	0,3	–	6,5	14,8	162,5
2017										
Sida (thermisch)	–	–	29,0	3,5	9,5	0,3	–	5,8	46,0	140,8
Switchgras (thermisch)	–	–	23,5	0,3	7,5	1,0	–	2,3	15,8	107,0
Miscanthus	–	–	33,3	0,5	22,5	0,5	–	5,3	23,8	87,5
Referenz WW	–	–	24,0	–	–	–	–	2,8	4,8	21,3
2018										
Silphie	–	–	27,5	1,3	8,8	–	–	8,8	73,5	195,8
Sida (Biogas)	–	–	31,8	–	16,3	1,8	–	12,3	55,0	86,0
RWG	–	–	12,5	–	13,8	1,3	–	4,8	28,5	62,5
Referenz ZF	–	–	33,5	6,3	3,8	–	–	8,25	30,8	43,3
2019 (Frühjahr)										
Sida (thermisch)	–	1,3	25,0	1,3	21,3	–	–	14,8	35,8	100,0
Switchgras (thermisch)	–	–	12,3	–	4,5	1,3	–	3,3	21,0	59,8
Miscanthus	–	–	8,5	–	5,3	–	–	3,5	20,0	49,0
Referenz WW	–	–	3,8	–	2,5	–	–	0,8	4,0	30,3
2019 (Herbstaufnahme)										
Silphie	–	–	23,5	0,3	14,8	2,0	–	13,3	36,5	154,5
RWG	–	–	25,0	–	28,0	0,5	1,3	5,0	24,8	84,8
Miscanthus	–	–	17,8	–	8,8	2,0	1,3	5,3	16,3	36,0
Referenz Maisstoppel	–	–	18,3	1,5	4,5	0,5	–	5,8	26,0	93,3

Tabelle 101: Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Aholting für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)					Adulte Tiefgräber		Jugendile	
	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>P. tuberculatus</i>	<i>A. longa</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in (g/m ²)									
2014									
Referenz ZF stehend	7,3	0,8	0,8	1,1	–	–	7,5	2,4	3,9
Referenz ZF gemulcht	24,3	9,8	0,5	–	–	0,9	20,6	30,0	26,0
2015									
Silphie	2,9	1,4	0,5	–	–	0,2	23,5	28,7	11,7
Sida (Biogas)	1,8	0,9	0,2	–	–	0,2	12,3	16,2	8,4
RWG	0,8	0,6	0,2	–	–	–	7,1	13,2	5,1
Referenz ZF	4,7	2,2	0,3	0,2	–	0,4	11,0	19,0	12,7
2016									
Sida (thermisch)	5,8	2,2	0,3	–	–	1,6	29,6	23,5	12,6
Switchgras (thermisch)	2,6	0,9	0,2	–	–	1	13,6	12,7	9,6
Miscanthus	3,4	2,2	0,6	0,1	–	0,2	20,3	17,1	19,6
Referenz WW	11,6	3,0	0,3	–	–	0,9	27,8	26,1	10,0
2018									
Silphie	5,7	1,9	0,6	–	–	–	29,2	23,1	8,1
Sida (Biogas)	9,4	1,2	0,9	–	–	0,8	27,8	25,9	11,3
RWG	2,2	0,3	0,04	–	–	0,1	3,2	5,9	4,4
Referenz ZF	5,5	1,0	0,2	–	–	0,3	10,0	6,6	2,1
2019									
Sida (thermisch)	7,1	1,8	0,8	–	–	–	48,1	23,0	5,4
Switchgras (thermisch)	3,3	0,6	0,3	–	–	–	7,6	9,5	5,0
Miscanthus	10,5	0,5	1,4	–	0,1	–	20,6	17,6	4,3
Referenz WW	2,4	0,2	0,3	–	–	–	6,3	5,2	1,1

Tabelle 102: Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Gelchsheim für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)			Adulte Tiefgräber	Juvenile		
	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyraeum</i>	<i>P. tuberculatus</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in (g/m ²)							
2014							
Referenz ZF stehend	10,5	0,3	1,5	–	1,3	4,4	8,7
Referenz ZF gemulcht	16,1	0,2	2,0	–	8,1	9,3	7,3
2019							
Silphie	2,2	1,0	1,0	0,3	34,8	22,3	36,8
Sida (Biogas)	3,5	0,8	–	–	25,1	20,4	23,9
Sida (thermisch)	7,3	2	0,3	0,4	66,7	53,1	28,8
RWG	5,9	0,4	0,2	0,1	28,2	13,7	19,7
Switchgras (thermisch)	3,8	0,9	0,7	–	6,4	11,5	28,8
Miscanthus	–	–	–	0,1	17,9	22,8	20,0
Referenz WW	0,4	0,5	–	0,2	6,5	11,0	7,2

Tabelle 103: Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Hötzelndorf für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Streube- wohnende Arten			Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)			Adulte Tiefgräber		Juvenile	
	<i>A. handlirschi</i>	<i>L. castaneus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>A. longa</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in (g/m ²)										
2014										
Referenz ZF stehend	–	–	–	1,8	–	3,8	–	–	2,0	2,0
Referenz ZF gemulcht	0,3	–	–	3,1	–	3,4	–	3,5	0,9	2,7
2015										
Silphie	–	–	–	0,4	0,1	4,8	–	0,8	2,3	1,6
Sida (Biogas)	–	–	–	0,3	0,02	2,9	–	5,6	1,1	2,9
RWG	–	–	–	–	0,1	0,3	–	2,9	0,9	0,7
Referenz ZF	–	–	–	2,7	–	2,9	0,2	4,4	3,5	1,8
2016										
Sida (thermisch)	–	–	–	2,5	0,1	3,3	–	0,7	0,9	2,2
Switchgras (thermisch)	–	–	–	2,9	0,03	0,7	–	2,1	0,4	4,3
Miscanthus	–	–	–	5,7	0,04	3,4	–	4,7	2	3,6
Referenz WW	–	–	–	1	0,2	2,2	–	0,9	0,5	2,6
2018										
Silphie	–	–	–	2,4	0,3	2,0	–	8,7	7,4	3,4
Sida (Biogas)	–	–	–	4,1	0,3	8,3	–	19,4	10,4	11,2
RWG	0,1	–	–	0,5	–	4,7	–	3,0	4,7	3,2
Referenz ZF	0,1	–	–	1,1	–	3,2	–	2,8	1,7	1,6
2019										
Sida (thermisch)	–	–	0,3	0,9	0,2	5,3	–	89,3	28,1	6,8
Switchgras (thermisch)	–	0,04	–	0,3	0,1	3,5	–	11,3	17,6	6,0
Miscanthus	0,2	–	0,3	1,3	0,1	5,3	–	17,6	26,5	7,1
Referenz WW	0,1	–	–	1,2	–	6,2	–	6,2	5,7	2,4

Tabelle 104: Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Parsberg für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Streubewohnende Arten		Adulte endogäische Arten (Mikroendobionten)				Adulte Tiefgräber	Juvenile	
	<i>L. castaneus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in (g/m ²)									
2014									
Referenz ZF stehend	–	–	1,6	0,3	–	1,1	–	0,02	2,2
Referenz ZF gemulcht	–	–	11,9	3,1	0,5	–	–	0,03	1,1
2018									
Silphie	–	0,1	26,8	3,1	1,0	5,1	7,1	3,4	11,3
Sida (Biogas)	–	0,3	23,6	6,7	1,3	4,0	1,2	1,4	3,7
RWG	–	0,7	8,4	2,7	1,2	0,5	4,6	3,5	10,3
Referenz ZF	–	–	5,4	1	–	2,6	2,4	0,3	0,6
2019									
Sida (thermisch)	–	2,2	6,4	2,9	1,3	2,3	1,0	0,7	4,5
Miscanthus	0,03	2,1	8,9	1,4	–	5,6	0,9	1,0	6,2
Referenz WW	–	0,5	5,4	1,0	0,3	1,2	–	0,1	0,9

Tabelle 105: Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Rosenau für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Streubewohnende Arten		Adulte endogäische Arten (Mineralbodenformen)				Adulte Tiefgräber	Juvenile	
	<i>D. rubidus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tyrtaeum</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in g/m ²									
2014									
Referenz ZF	–	0,5	3,9	1,4	4,8	0,6	–	0,5	3,4
Referenz ZF	–	0,6	3,5	4,1	5,7	1,5	–	0,3	4,6
2015									
Silphie	–	2,8	2,5	0,4	0,4	1,3	–	1,0	3,9
Sida (Biogas)	–	5,3	2,0	0,3	1,4	0,9	–	1,4	5,5
RWG	0,01	9,1	2,0	0,3	0,7	1,6	–	3,9	3,8
Referenz ZF	–	1,7	2,1	0,3	0,7	0,7	–	0,8	2,3
2016									
Sida (thermisch)	–	5,1	1,8	1,4	2,0	0,5	0,7	10,0	10,6
Switchgras (thermisch)	0,02	1,5	1,3	0,1	1,3	0,9	–	2,3	8,4
Miscanthus 9	0,1	3,5	3,9	1,0	1,9	2,0	–	9,8	14,3
Referenz WW	–	0,9	2,4	2,5	2,9	2,7	–	1,1	5,1
2018									
Silphie	0,1	19,9	6,9	0,7	1,2	7,6	9,2	13,5	4,6
Sida (Biogas)	–	11,6	5,2	0,2	2,2	1,1	4,0	5,9	4,5
RWG	–	8,4	1,8	0,1	1,0	4,5	–	3,1	5,1
Referenz ZF	–	0,2	0,9	–	–	–	–	–	1,7
2019									
Sida (thermisch)	–	17,7	7,4	0,5	8,3	5,0	6,6	14,7	10,7
Switchgras (thermisch)	0,01	9,4	5,9	0,5	2,5	3,9	0,8	9,4	6,1
Miscanthus	–	4,0	1,8	0,5	3,8	1,2	1,7	6,3	8,1
Referenz WW	–	3,4	1,6	–	3,6	4,1	–	0,4	2,7

Tabelle 106: Regenwurmbiomasse des Versuchsstandorts Wolferkofen für die einzelnen Untersuchungsjahre (Mittelwerte $n = 4$)

Variante	Streube- wohnende Arten		Adulte endogäische Ar- ten (Mineralbodenformen)					Adulte Tief- gräber	Juvenile	
	<i>D. rubidus</i>	<i>L. rubellus</i>	<i>A. caliginosa</i>	<i>A. chlorotica</i>	<i>A. rosea</i>	<i>O. tytaeum</i>	<i>P. antipae</i>	<i>L. terrestris</i>	<i>Lumbricus spec</i>	Sonstige
in g/m ²										
2016										
Silphie	–	–	13,2	–	0,7	0,4	–	22,8	2,5	22,1
Sida (Biogas)	0,1	–	8,2	0,1	0,9	0,3	–	31,6	8,7	20,1
RWG	–	–	7,5	0,04	1,0	0,2	–	15,0	6,9	4,1
Referenz Maisstoppel	–	–	16,3	0,3	0,6	0,2	–	20,4	4,0	11,2
2017										
Sida (thermisch)	–	–	9,0	0,8	0,9	0,2	–	25,1	13,2	10,4
Switchgras (thermisch)	–	–	6,7	0,03	0,9	0,2	–	8,0	6,6	9,8
Miscanthus	–	–	9,7	0,2	2,3	0,2	–	20,1	4,9	8,4
Referenz WW	–	–	7,0	–	–	–	–	9,3	1,3	1,8
2018										
Silphie	–	–	9,8	0,2	1,6	–	–	28,4	52,0	16,1
Sida (Biogas)	–	–	8,8	–	1,6	0,6	–	41,5	35,0	9,8
RWG	–	–	2,2	–	1,2	0,5	–	11,0	13,5	4,3
Referenz ZF	–	–	10,0	1,1	0,7	–	–	31,2	8,0	3,4
2019 (Frühjahrsaufnahme)										
Sida (thermisch)	–	0,5	9,5	0,2	2,4	–	–	55,4	29,1	14,8
Switchgras (thermisch)	–	–	4,1	–	1,1	0,6	–	8,7	12,7	9,2
Miscanthus	–	–	3,1	–	0,7	–	–	10,7	15,4	7,0
Referenz WW	–	–	1,1	–	0,5	–	–	1,9	4,3	3,0
2019 (Herbstaufnahme)										
Silphie	–	–	9,7	0,1	2,0	0,8	–	50,1	30,6	23,3
RWG	–	–	8,2	–	3,6	0,5	0,1	15,9	13,3	10,0
Miscanthus	–	–	6,5	–	1,4	1,2	0,04	14,8	13,2	5,0
Referenz Maisstoppel	–	–	7,5	0,4	0,8	0,4	–	19,5	11,4	4,4

Tabelle 107: Aktivitätsdichte der mit Minibarberfallen in 48 Stunden erfassten Tiergruppen

Standort		Aholting		Rosenau	
		GPS-Roggen	RWG	GPS Roggen	RWG
Tiergruppen		in Individuen/Minibarberfalle			
Springschwänze	Entomobryidae	18,45	14,48	15,63	6,00
	Isotomidae	10,41	7,90	5,01	3,41
	Symphyleona	7,77	4,66	5,64	3,25
	Onychuridae	0,01	0,00	0,00	0,00
	Poduridae	1,25	2,07	0,82	0,34
	Neelidae	1,45	0,40	0,00	0,00
	Milben	Gamasina	0,31	0,52	0,80
Oribatida		0,06	0,26	3,32	4,60
Prostigmata (Räuber)		10,36	3,08	3,71	1,41
Prostigamata (Streuzersetzer)		5,37	1,72	3,07	1,15
Uropodina		0,15	0,24	0,08	0,07
Sonstige		6,26	0,54	0,81	0,13
Chilopoda		0,05	0,07	0,13	0,12
Diplopoda	0,02	0,08	0,12	0,12	
Isopoda	0,00	0,05	0,01	0,02	
Coleoptera	0,94	1,02	1,87	1,54	
Aranea	4,05	4,35	1,15	1,83	

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 Wassergehalts 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 – Markt Betrachtungen, 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 Anbau-szenarien
- 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 – Prüfstandsuntersuchungen 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 Prüfstandsuntersuchungen
- 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 Amarant 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 Zünd- und Brennverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf einen Motor der Abgasstufe V
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II

