

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

**Agrarökologische Bewertung der Durchwachsenen
Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) als eine
Biomassepflanze der Zukunft**

**Teilvorhaben 1: Ober- und unterirdische Biodiversität in
Beständen der Durchwachsenen Silphie**

**Teilvorhaben 2: Wasserhaushalt und Ökophysiologie der
Durchwachsenen Silphie**

Zuwendungsempfänger:

**TV1: Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald
und Fischerei – Institut für Biodiversität**

**TV2: Julius Kühn-Institut Bundesforschungsinstitut für
Kulturpflanzen (JKI) – Institut für Pflanzenbau und
Bodenkunde**

Förderkennzeichen:

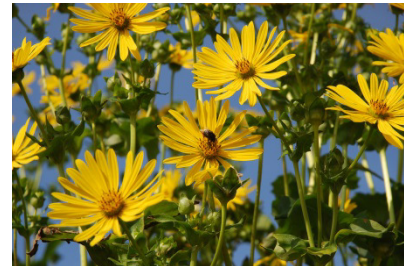
TV1: 22004411

TV2: 22037311

bzw. 11NR044

Laufzeit:

01.02.2012 bis 31.07.2015



Monat der Erstellung:

10/2015

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Braunschweig, den 25. April 2016

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Autoren

Jens Dauber

Anna Lena Müller

Siegfried Schittenhelm

Burkhard Schoo

Quentin Schorpp

Stefan Schrader

Susanne Schroetter



Das Projekt-Team beim Kick-Off Meeting in
2012

unter Mitarbeit von

Christian Berger

Andrea Biertümpfel

Stephanie Boley

Friederike Diers

Sabine El Sayed

Lennart Friedritz

Sarah Havertz

Ineke Joormann

Bernd Kahlstorf

Andrea Kremling

Sabine Peickert

Eileen Power

Catharina Riggers

Valentina Sandor

Martina Schabanoski

Hanna Schmitz

Evelin Schummer

Katja Steininger

Michael Wessel-Terharn

Jan-Martin Voigt

Klaus-Peter Wittich

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	3
Abbildungen	4
Tabellen	7

Schlussbericht

I. Ziele	8
1. Aufgabenstellung	8
2. Stand der Technik	10
3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
II. Ergebnisse	18
1. Erzielte Ergebnisse	18
1.1 Ergebnisse des TV1 „Oberirdische und unterirdische Biodiversität“	18
1.1.1 Oberirdische Biodiversität (Dauber, Müller)	18
1.1.1.1 Erfassung der Blütenbesuchergemeinschaften auf Praxisflächender Silphie im Laufe der Blühperiode und in Abhängigkeit von der landschaftlichen Einbindung der Bestände	18
1.1.1.2 Ermittlung der Pollenquellen von Bestäuberinsekten in der Agrarlandschaft (Pflanze-Bestäuber-Netzwerke)	23
1.1.1.3 Vergleich der Blütenbesuchergemeinschaft der Silphie zu anderen Energiepflanzen	27
1.1.1.4 Überprüfung der Qualität und Quantität der von der Silphie produzierten Nahrungsressourcen (Nektar und Pollen) für blütenbesuchende Insekten	29
1.1.1.5 Auswirkungen von Trockenstress auf die Nektarproduktion der Durchwachsenen Silphie und auf den Blütenbesuch durch Bestäuberinsekten	34
1.1.1.6 Bestäubungsökologische Aspekte der Durchwachsenen Silphie	39
1.1.1.7 Untersuchung der Habitatqualität der Silphie für Nützlinge (epigäische Raubarthropoden, Parasitoide) und Schädlinge	43
1.1.1.8 Erfassung des Ackerwildkrautspektrums in Silphiebeständen	43
1.1.2 Unterirdische Biodiversität (Schorpp, Schrader)	47
1.1.2.1 Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Regenwurmgemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände	47
1.1.2.2 Kartierung der Regenwurmlösung an der Bodenoberfläche in Beständen unterschiedlichen Alters	50
1.1.2.3 Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Collembolengemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände	52
1.1.2.4 Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Nematodengemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände	54
1.1.2.5 Funktionelle Bewertung der unterirdischen Biodiversität in den Silphiebeständen anhand des Inventars an funktionellen Bodentiergruppen und ihres anteilmäßigen Auftretens	56
1.1.2.6 Begleitende Erfassung physiko-chemischer Boden-Parameter bei	

	unterschiedlich alten Silphiebeständen	59
1.1.2.7	Analyse gasförmiger Stickstoff-Verluste bei Abbauprozessen von Ernterückständen der Silphie durch Bodentiere	62
1.1.2.8	Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Bodentieren und Energiepflanzen auf das Pflanzenwachstum in unterschiedlich texturierten Böden	64
1.1.3	Zusammenfassung TV1	68
1.2	Ergebnisse des TV2 „Wasserhaushalt und Ökophysiologie der Durchwachsenen Silphie“ (Schittenhelm, Schoo, Schroetter)	71
1.2.1	Feldversuch in Braunschweig	71
1.2.1.1	Bodenfeuchte, Wassereffizienz und Biomasseertrag	74
1.2.1.2	Wurzelmerkmale von Silphie im Vergleich zu Mais und Luzernegras	82
1.2.1.3	Bedeutung der Blattbecher für den Wasserhaushalt der Silphie	88
1.2.1.4	Stomatäre Leitfähigkeit von Silphie im Vergleich zu Mais	92
1.2.1.5	Blattflächenindex, Strahlungsinterzeption und Strahlungsnutzungseffizienz	94
1.2.1.6	Wirkung von Wassermangel auf den Methanertrag	100
1.2.1.7	Vitalität der Wurzelsysteme der Dauerkulturen nach Winter	105
1.2.2	Gefäßversuche in der Vegetationshalle	106
1.2.3	Vergleich der Wurzelsysteme von Silphie und Mais auf Standorten mit unterschiedlichen Bodenarten	109
1.2.4	Zusammenfassung	115
1.3	Literatur	116
2.	Verwertung	121
3.	Erkenntnisse von Dritten	122
4.	Veröffentlichungen	124
	Anhang	i-viii

Abkürzungen

ANOVA	Varianzanalyse (analysis of variance)
Bft	Windgeschwindigkeit nach der Beaufortskala
cal	Kalibrationsdatensatz
DWD	Deutscher Wetterdienst
ELADP	Blattstellungswinkel (Ellipsoidal Leaf Angle Distribution Parameter)
ETK	Evapotranspirationskoeffizient
FM	Frischmasse
gs	Stomatäre Leitfähigkeit
LAI	Blattflächenindex (leaf area index)
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NL, Nm3	Normliter, Normkubikmeter (Gasausbeute bei 0 °C Temperatur und 1013 mbar Druck)
oTS	Organische Trockensubstanz
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung (photosynthetic active radiation)
R ²	Bestimmtheitsmaß
RLD	Wurzellängendichte (root length density)
RUE	Strahlungsnutzungseffizienz (radiation use efficiency)
SD	Standardabweichung (standard deviation)
SRL	Spezifische Wurzellänge (specific root length)
Tact/Tpot	Verhältnis von aktueller und potentieller Transpiration
TM	Trockenmasse
TUE	Transpirationsnutzungseffizienz (transpiration use efficiency)
V	Mikroskopische Vergrößerung
Vol.-%	Volumenprozent
WUE	Wassernutzungseffizienz (water use efficiency)

Abbildungen

1	Farbschalenset zur Erfassung blütenbesuchender Insekten	19
2	Vergleich der Anzahl an blütenbesuchenden Insekten je Falle in den niedersächsischen Praxisflächen der Durchwachsenen Silphie mit der Anzahl aus den Fallen, die in den sie umgebenden Habitaten (Maisfelder, Gewässer, lineare Habitate) in den Erfassungsperioden von Ende Juli (n=15), Mitte August (n=15), Ende August/Anfang September (n=14) und Mitte September (n=8) nachgewiesen wurden.	22
3	Pollenhöschchen von Honigbienen, gesammelt am Standort 13. Links farblich sehr heterogene Pollenhöschchen von Mitte August und rechts farblich homogene von Anfang September. Vgl. hierzu Abbildung 4.	23
4	Anteile der verschiedenen Pollenressourcen, die von den Honigbienen während der Silphieblüte in die Völker eingetragen wurden (obere Grafik). Zum Vergleich ist das Blütenangebot in den Silphiefeldern zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten dargestellt (untere Grafik).	24
5	Mageninhalt einer Schwebfliege der Art <i>Episyrphus balteatus</i> .	25
6	Mageninhalt einer Schwebfliege der Art <i>Helophilus trivittatus</i> .	26
7	Anzahl an Hummeln und Wildbienen, die während der Blühperiode der Silphie und der Wildpflanzenmischungen im Jahr 2013 in Brandenburg erfasst wurden. Rot umrandet sind jene Versuchs- und Vergleichsstandorte, für die ein Vergleich der Blütenbesucher möglich ist.	28
8	Auflistung der Wildbienenarten (Hummeln und sonstige Wildbienen), die nur in der Silphie (gelb), nur in den Wildpflanzenmischungen (lila), oder in beiden Biogaskulturen (Schnittmenge) während ihrer Blüte zwischen Juli und August 2013 in Brandenburg nachgewiesen wurden, mit Angabe der Anzahl an gefangenen Individuen.	29
9	<i>Links</i> : Die Zungenblüten präsentieren ihre Griffel, während die Röhrenblüten gerade morgens mit der Pollenpräsentation begonnen haben, indem sich ihr Griffel durch die braunen, verwachsenen Staubblätter schiebt und so den Pollen nach außen drückt. <i>Rechts</i> : Die Zungenblüten tragen die Samenanlagen, während die Röhrenblüten Nektar und Pollen produzieren.	30
10	Durchschnittliche Anzahl der Sammelblüten je Silphiepflanze (n=6 je Standort) und Ordnung, wie sie in den 15 Praxisflächen in Niedersachsen während der Blüte in vier Aufnahmezeiträumen gemessen wurden, im Vergleich zu der Anzahl an Pollen je Sammelblüte und Ordnung, die in Silphiebeständen in Dornburg an zwei Silphiefeldern ermittelt wurden. Da der Unterschied zwischen den Silphiefeldern aus verschiedenen Anlagejahren (2005 und 2010) statistisch nicht signifikant war, sind hier die Mittelwerte aller Proben (n=20 je Ordnung) dargestellt.	31
11	Akkumulierte Nektar- und Zuckermengen einer Röhrenblüte über den Tag aus einer vor blütenbesuchenden Insekten isolierten Sammelblüte der Durchwachsenen Silphie.	33
12	Plan des Versuchsfeldes am Standort Braunschweig. Die Erhebungen konzentrierten sich auf die Silphieparzellen mit der Nr. 2, 3, 4, 5, 6 und 8. Die Parzellen mit der Nr. 1 und 7, in dieser Abbildung heller dargestellt, wurden bei den Erhebungen nicht berücksichtigt. Die Erhebungen fanden an Silphieparzellen statt, die an Maisparzellen angrenzen. Sie sind jeweils mit einer dickeren Linie abgebildet. Exemplarisch dargestellt sind auf Feld Nr.5 die markierten Pflanzen auf den jeweiligen Parzellen. Die Buchstaben repräsentieren die bewässerte und unbewässerte Variante, die jeweils am gleichen Tag aufgenommen wurden.	35
13	Anzahl blühender Infloreszenzen/m ² der Durchwachsenen Silphie über den Zeitraum von der 27. bis zur 32. KW, 2014 im Feldversuch am Standort Braunschweig. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler an.	36
14	Beispiele für vertrocknete Sammelblüten (links) und nicht ganz ausgebildete Blütenstände (rechts) in der unbewässerten Variante am Standort Braunschweig in der 30. KW.	37
15	Durchschnittliches Nektarvolumen in µl pro Röhrenblüte. Vergleich zwischen der bewässerten und unbewässerten Variante am Standort Braunschweig. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler an.	37
16	Durchschnittliche Anzahl an Blütenbesuchen durch Honigbienen, Hummeln und Schwebfliegen auf 10 Blütenständen der Silphie pro 15 min. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler an.	38

17	Die Blüte einer Sammelblüte der Durchwachsenen Silphie wurde in drei Phasen eingeteilt, je nachdem, ob nur die Röhrenblüten blühen während die Zungenblüten entweder noch nicht blühen oder schon verwelkt sind oder sowohl Röhren- als auch Zungenblüten gleichzeitig blühen.....	40
18	Ablauf der Blüte einer Sammelblüte der Durchwachsenen Silphie. Dargestellt sind die Anzahl der blühenden Röhrenblüten je Sammelblüte (oben) und Tag sowie Anzahl der Sammelblüten je Blühphase und Tag (unten).....	41
19	Verpackung der Blütenstände der Varianten S und B des Bestäubungsversuchs vor dem Aufblühen mit Beuteln aus Tomatenvlies. Ein Drahtgestell verhindert den Kontakt der Blüten mit dem Vlies. Dies wurde zusätzlich an Dachlatten befestigt, um ein Abknicken der Blütenstände durch das zusätzliche Gewicht des Vliesbeutels zu verhindern.	42
20	Blühperioden der auf den 19 Silphie-Feldern in Niedersachsen nachgewiesenen Ackerbegleitflora und Zeitraum des vollständigen Bestandsschlusses durch die Silphie (roter Balken).....	46
21	Silphiefeld im Oktober nach der Ernte. Ein großer Teil der Bodenoberfläche zwischen den Reihen ist ohne Bedeckung.	47
22	<i>Lumbricus terrestris</i> (Foto).	49
23	Ergebnisse der Regenwurm-Beprobung.	50
24	Losungskartierung (Foto).	51
25	Ergebnisse der Losungskartierung.	51
26	<i>Stenaphorura quadrispina</i> . V: 400x (Foto).	53
27	Ergebnisse der Collembolen-Beprobung.	54
28	Ergebnisse der Nematoden-Beprobung.	56
29	Relative Anteile der funktionellen Bodentier-Gruppen in Silphie und Mais.....	58
30	Variationsbreite der Umweltvariablen in Mais und den Altersstufen der Silphiebestände.	61
31	Mesokosmen und Durchflusssystem des Versuchs zur Treibhausgasemission.	62
32	Ergebnisse der Treibhausgasmessungen.	63
33	Verwertung von Silphiestreu durch Bodentiere.	64
34	Aufbau des Phytokosmenversuchs im Gewächshaus.....	65
35	Ergebnisse des Phytokosmenversuchs.	66
36	Einfluss von <i>L. terrestris</i> (Regenwürmer) auf das Wurzelwachstum in Abhängigkeit der Bodentextur.	66
37	Fotodokumentation zum Bewässerungsfeldversuch in Braunschweig: (a) Luftaufnahme des Versuchs; (b) Ausspflanzen und (c) Anwässern der Silphie; (d) etablierter Silphiebestand mit Messstelle für Bodenfeuchte; Maschinelle Ernte von (e) Luzernegras und (f) Silphie.	71
38	Bodenprofil des Versuchsfeldes in Braunschweig mit Tonbändern in etwa 60 und 90 cm Bodentiefe.	74
39	Vergleich der Werkskalibration des Diviner 2000 Bodenfeuchtemesssystems mit der tiefspezifischen Feldkalibration am Standort Braunschweig (n = 1.714).	75
40	Künstliche Beregnung der Großparzellen von Silphie, Mais und Luzernegras mit einer Beregnungsmaschine (oben); Luftaufnahme der Wasserverteilung (unten).	75
41	Bodenfeuchtedynamik in den unbewässerten und bewässerten Parzellen von Silphie, Mais und Luzernegras in den Versuchsjahren 2013 und 2014 am Standort Braunschweig. Dargestellt sind die Mittelwerte der Bodenfeuchte im durchwurzelten Boden. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Zielgröße von nFK = 50%.	76
42	Bewässerte Silphieparzelle mit Kopfeinheit für die Tropfbewässerung zur Sicherstellung einer konstanten Bodenfeuchte >50% nFK im Jahr 2014.	77
43	Wurzellängendichte von Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit von Bodentiefe und Wasserregime in den Versuchsjahren 2013 und 2014 am Standort Braunschweig (n = 12).	83
44	Tiefenspezifische Bodenwasserentzüge von Vegetationsbeginn bis Ernte für Silphie, Mais und Luzernegras ohne Zusatzbewässerung in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 am Standort Braunschweig. Die gepunkteten Linien umfassen den Bereich der nutzbaren Feldkapazität (FK-PWP).	84
45	Zeitlicher Verlauf der Erschließung von Wasservorräten in unterschiedlichen Bodentiefen durch Silphie, Mais und Luzernegras in den Versuchsjahren 2013 und 2014. Dargestellt sind die Mittelwerte der unbewässerten Parzellen.	87

46	Berechnete monatliche Taumengen am DWD-Standort Braunschweig. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Jahre 1961-2013.	90
47	Tauwasserbildung im Zeitraum vom 2.10. bis 6.10.2014 am DWD-Standort Braunschweig.	91
48	Meteorologische Messungen in Silphie- und Maisparzellen in Braunschweig 2014.	91
49	Messung der stomatären Leitfähigkeit mit dem SC-1 Porometer an einem Silphieblatt in Braunschweig 2014.	92
50	Stomatäre Leitfähigkeit gemessen am jeweils obersten, mittleren und untersten Blatt in unbewässerten und bewässerten Parzellen von Silphie und Mais in Braunschweig 2013 und 2014.	93
51	Ermittlung von Blattflächenindex und PAR-Interzeption mit dem SunScan System bestehend aus Stabquantensensor und externem PAR-Sensor mit RadioLINK zur Messung der PAR oberhalb des Blätterdachs. Messung nur zu Demonstrationszwecken am Parzellenrand, sonst im Bestand.	94
52	Globalstrahlung und Interzeption photosynthetisch aktiver Strahlung durch Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.	95
53	Entwicklung des Blattflächenindex (LAI) bei Silphie, Luzernegras und Mais in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.	96
54	Interzeption photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) durch Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit vom Blattflächenindex (LAI) im Mittel der Jahre und Bewässerungsregime am Standort Braunschweig. Der kritische LAI kennzeichnet die für eine PAR-Interzeption von 95% notwendige Blattfläche.	97
55	Üppig entwickelte und voll turgeszente Silphiepflanzen in einer Parzelle mit Zusatzberegnung (links) im Gegensatz zu welken und teilweise vertrockneten Pflanzen in der benachbarten unberegneten Parzelle (rechts) in Braunschweig 2013.	100
56	Physiologisch aktive Wurzellängendichte von Silphie und Luzernegras in verschiedenen Bodentiefen der unbewässerten Parzellen vor Vegetationsbeginn in Braunschweig 2015. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.	106
57	Fotodokumentation zum Gefäßversuch in Braunschweig: (a) für die Pflanzung der Silphie vorbereitetes 110 L Gefäß; (b) Gefäßversuch in der Vegetationshalle; (c) Auswaschen der Wurzeln aus einem Gefäß; (d) für die Bildverarbeitung aufgelegte Wurzeln; (e) Silphiepflanzen in 310 L Gefäßen; (f) Wurzelstock mit Erneuerungsknospen zum Vegetationsende; (g) Büschelwurzel der Silphie; (h) Wassergefüllter „Blattbecher“ der scheinbar vom Stängel durchwachsen ist.	107
58	Standorte an denen Rammkernsondierungen in Silphie und nahegelegenen Mais durchgeführt wurden.	109
59	Links: Entnahme eines Bohrkerns mit der Rammkernsonde aus einer Silphieparzelle in Braunschweig 2012. Die Beprobung auf den externen Standorten erfolgte hingegen zum Zeitpunkt der Vollblüte. Rechts: Bohrkern aus Beständen mit Silphie (S) und Mais (M) von den Standorten Rockstedt (RS), Dasselbruch (DA), Straguth (SG) und Dornburg (DB).	110
60	Vergleich der Wurzellängendichte von Silphie und Mais in Abhängigkeit von der Bodentiefe für die in den Jahren 2012 und 2013 beprobten sechs Standorte. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.	111
61	Vergleich der Gesamtwurzellänge von Silphie und Mais an sechs Standorten sowie im Mittel der Standorte. Dargestellt sind Mittelwerte von $n = 6$ Bohrkernen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante ($P < 0,05$) Unterschiede zwischen den Mittelwerten.	112
62	Vergleich der spezifischen Wurzellänge von Silphie und Mais in Abhängigkeit von der Bodentiefe an den in den Jahren 2012 und 2013 beprobten Standorten. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.	113
63	Vergleich der Wurzeltrockenmasse von Silphie und Mais in Abhängigkeit von der Bodentiefe an den sechs in den Jahren 2012 und 2013 beprobten Standorten. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.	114

Tabellen

1	Mittlerer, prozentualer Anteil der Samen mit entwickelten Embryonen an der Gesamtanzahl an entwicklungsfähigen Samen einer Sammelblüte für die Varianten offene Bestäubung (O; n=18), Bestäubung nur innerhalb der Sammelblüte unter Ausschluss von Insekten (S; n=18) und Bestäubung mit Beobachtung des Blütenbesuchs (B; n=9).....	42
2	Deckungsgrade der Ackerbegleitflora und der Silphie sowie Gesamtindividuenzahlen der Ackerbegleitflora und mittlere Größe [m ³] der Silphiepflanzen auf den 19 Praxisflächen in Niedersachsen.....	45
3	Übersicht über die Untersuchungsflächen mit Gruppierung der Altersstufen in TV1 „unterirdische Biodiversität“.....	48
4	Regenwurmart in den Altersstufen.....	49
5	Collembolen Familien in den Altersstufen.....	53
6	Nematoden Familien in den Altersstufen.....	55
7	Mittlere monatliche Lufttemperaturen und Niederschlagssummen sowie (in Klammern) Abweichungen von den langjährigen Monatsmittelwerten in den Vegetationsperioden 2012 bis 2014 am Standort Braunschweig.	73
8	Bodeneigenschaften des Versuchsfeldes in Braunschweig.	73
9	Trockenmasseertrag, Wasserverbrauch, Evapotranspirationskoeffizient (ETK) und Wassernutzungseffizienz (WUE) von Silphie, Mais und Luzernegrass in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre 2013 und 2014 am Standort Braunschweig.	78
10	Ergebnisse der Simulationsstudie für Wassernutzungseffizienz (WUE), Transpirationsnutzungseffizienz (TUE) sowie den als Verhältnis von aktueller zu potentieller Transpiration (Tact/Tpot) ausgedrückten Stressfaktor für Silphie und Mais in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre am Standort Braunschweig.	81
11	Wurzellänge, Wurzeltrockenmasse, mittlere spezifische Wurzellänge sowie mittlerer Anteil Feinwurzeln ($\phi < 0,5$ mm) an der Wurzellänge im gesamten Tiefenverlauf des Bodenprofils von Silphie, Mais und Luzernegrass und in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre am Standort Braunschweig.	85
12	Entwicklung der Wurzellängendichte von Silphie in Abhängigkeit von Wasserregime und Probennahmetermin in Braunschweig 2013.	88
13	In den Blattbechern der Silphie gesammelte Wassermengen und deren Anteil am Gesamtwasserbedarf in den Versuchsjahren 2013, 2014 sowie im Mittel der Jahre am Standort Braunschweig.	89
14	Kumulierte Globalstrahlung, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) sowie Strahlungsnutzungseffizienz (RUE) von Silphie, Mais und Luzernegrass in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre 2013 und 2014 am Standort Braunschweig.	98
15	Wuchshöhe, Rohrnährstoffgehalte in der Trockenmasse, Methanerausbeute sowie Biomasse- und Methanerträge von Silphie, Mais und Luzernegrass in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.	102
16	Geographische sowie bodensystematische Charakterisierung der sechs beprobten Standorte.	110
17	Prozentualer Anteil der Wurzellänge an drei Durchmesserklassen ± 1 Standardfehler über das gesamte Bodenprofil (n = 90) für Silphie und Mais an den 2012 und 2013 beprobten Standorten.	112

Schlussbericht

I. Ziele

Aufgrund des Klimawandels werden sich die natürlichen Bedingungen für die deutsche Landwirtschaft in den nächsten Jahrzehnten spürbar ändern (UBA 2006) und das Wasser wird zum wichtigsten limitierenden Faktor für die Biomasseproduktion avancieren. Das erwartete stärkere Wasserdefizit in der Hauptwachstumszeit der Kulturpflanzen lässt sich nicht durch eine beliebige Ausweitung der Zusatzbewässerung kompensieren. Bei einer durch den Klimawandel bedingten ansteigenden Bewässerungsfläche und Bewässerungsmenge würde der Grundwasserspiegel vielerorts deutlich absinken. Das Stockholm International Water Institute hat vor einer massiven Wasserverknappung durch den Anbau von Energiepflanzen gewarnt (SIWI 2007). Vor diesem Hintergrund müssen in stärkerem Maße Energiepflanzen angebaut werden, die mit weniger Wasser auskommen, sei es natürlicher Niederschlag oder Beregnungswasser. Mit der idealen Energiepflanze sollte eine wirtschaftliche Biomasseproduktion auch auf solchen Standorten möglich sein, die wegen durchlässiger Böden und/oder hoher Verdunstung zur Sommertrockenheit neigen. Neben einem künftig sparsameren Umgang mit dem Produktionsfaktor Wasser muss auch auf eine ausreichende Diversität der Fruchtfolgen geachtet werden. In den Einzugsgebieten von Biogasanlagen werden in Deutschland heute enge Maisfruchtfolgen bis hin zu Maismonokulturen praktiziert. Neben der zunehmenden Monotonisierung des Landschaftsbildes sind mit dem intensiven Maisanbau noch weitere Probleme verbunden. Dazu gehören ein zunehmender Schädlingsdruck (z.B. durch den Westlichen Maiswurzelbohrer) sowie Bodenabtrag durch Wind- und Wassererosion und Nährstoffverluste durch Auswaschungsprozesse. Zusätzlich sind enge Maisfruchtfolgen durch eine hohe Intensität beim Bodenmanagement und Pestizideinsatz gekennzeichnet. Es wäre fatal, wenn der positive Beitrag der regenerativen Biomasse zum Klimaschutz durch Umweltbelastungen bei der Erzeugung der Biomasse wieder zunichte gemacht würde. Deshalb muss einer Umnutzung der Landschaft zugunsten von engen Maisfruchtfolgen entgegengewirkt werden. Eine sowohl unter dem Aspekt von Biodiversität als auch der vermuteten Trockentoleranz interessante neue Energiepflanze stellt die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.; kurz: Silphie) dar. Der Anbau der Durchwachsenen Silphie als Dauerkultur lässt wegen der hohen Durchwurzelung des Bodens, dem weitgehenden Verzicht auf Bodenbearbeitung, des geringeren Pflanzenschutzmitteleinsatzes sowie der als Bienenweide attraktiven Blüte einen positiven Einfluss auf die ober- und unterirdische Biodiversität erwarten. Wissenschaftliche Daten zur Rolle dieser Energiepflanze im Agrarökosystem liegen allerdings bislang nicht oder nur in sehr geringem Umfang vor. Ziel unseres Projekts war es, den Einfluss der Durchwachsenen Silphie auf die Biodiversität zu quantifizieren und ihren Wasserhaushalt bei unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit zu untersuchen und vergleichend zu beurteilen. Die Ergebnisse sollen dazu dienen, das Anbausystem dieser Energiepflanze aus agrarökologischer Sicht zu optimieren und ihre Interaktionen mit Nachbarkulturen zu beschreiben.

1. Aufgabenstellung

Wissenschaftliches Ziel des Projekts war es, die Bedeutung der Silphie im Agrarökosystem hinsichtlich ihrer Eigenschaften als neue Kulturpflanze und ihres spezifischen Anbauverfahrens zu verstehen und zu bewerten. Darüber hinaus sollten, vor einer möglichen großflächigen Einführung dieser neuen Pflanzenart in die Landwirtschaft, die notwendigen Standortvoraussetzungen hinsichtlich ihres Wasserbedarfs aufgezeigt werden.

Es wurde die ober- und unterirdische Biodiversität mit Schwerpunkt auf deren funktionale Komponenten erfasst und quantifiziert. Im Fokus waren hierbei der Silphiebestand selbst sowie der Austausch und die Interaktion zwischen Silphiebeständen und anderen Feldkulturen in der Umgebung. Zur Generalisierung und besseren regionalen Übertragbarkeit der Ergebnisse war

die Studie nicht auf einen Versuchsstandort beschränkt, sondern umfasste eine möglichst große Zahl an Silphiebeständen in unterschiedlichen standörtlichen und landschaftlichen Zusammenhängen. Zusätzlich wurde der zeitlichen Dimension der Silphie-Dauerkultur Rechnung getragen, indem die Flächenauswahl Anbauflächen unterschiedlichen Alters mit einschloss und über einen Zeitraum von 2 Jahren wiederholt Feldbeprobungen durchgeführt wurden. Benachbarte Maisbestände zur Bioenergieproduktion im selben Betrieb wurden jeweils als vergleichende Referenz herangezogen. Begleitende Versuche mit Silphie-Blattmaterial (Labor) und Jungpflanzen (Gewächshaus) dienten zur Klärung bislang offener Fragen zu Abbauprozessen von Ernterückständen und zur Biomasse-Entwicklung unter dem Einfluss von Bodentieraktivität. Hierbei wurde insbesondere die Bodentextur als wesentlicher Standortfaktor für Pflanzenwachstum und biologische Aktivität berücksichtigt.

Das Projekt gliederte sich in zwei Teilvorhaben: TV1, oberirdische und unterirdische Biodiversität sowie TV2, Wasserhaushalt und Ökophysiologie der Silphie als integrierender Komponente zwischen unter- und oberirdischem System.

Im Folgenden sind die Aufgabenstellungen der Teilvorhaben aufgelistet:

TV1

Oberirdische Biodiversität

- Erfassung der Blütenbesuchergemeinschaften der Silphie im Laufe der Blühperiode und in Abhängigkeit von der landschaftlichen Einbindung der Bestände
- Vergleich der Blütenbesuchergemeinschaften der Silphie zu anderen Energiepflanzen
- Ermittlung der Pollenquellen von Bestäuberinsekten in der Agrarlandschaft (Pflanze-Bestäuber-Netzwerke):
 - Nutzung der Silphie durch die Honigbiene
 - Nutzung von Mais und Silphie durch Schwebfliegen
- Überprüfung der Qualität und Quantität der von der Silphie produzierten Nahrungsressourcen (Nektar und Pollen) für blütenbesuchende Insekten
- Auswirkungen von Trockenstress auf die Nektarproduktion der Durchwachsenen Silphie und auf den Blütenbesuch durch Bestäuberinsekten
- Untersuchungen zu bestäubungsökologischen Aspekten der Durchwachsenen Silphie
- Untersuchung der Habitatqualität der Silphie für Nützlinge (epigäische Raubarthropoden, Parasitoide) und Schädlinge
- Erfassung des Ackerwildkrautspektrums in Silphiebeständen

Unterirdische Biodiversität

- Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Regenwurm-Gemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände
- Kartierung der Regenwurmlosung an der Bodenoberfläche in Beständen unterschiedlichen Alters
- Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Collembolen-Gemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände
- Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Nematoden-Gemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände
- Funktionelle Bewertung der unterirdischen Biodiversität in den Silphiebeständen anhand des Inventars an funktionellen Bodentiergruppen und ihres anteilmäßigen Auftretens
- Begleitende Erfassung physikochemischer Boden-Parameter bei unterschiedlich alten Silphiebeständen
- Analyse gasförmiger Stickstoff-Verluste bei Abbauprozessen von Ernterückständen der Silphie durch Bodentiere

- Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Bodentieren und Energiepflanzen auf das Pflanzenwachstum in unterschiedlich texturierten Böden

Die ersten sechs Aufgabenstellungen betreffen Felduntersuchungen in Praxisbetrieben und praxisnahen Feldversuchen öffentlicher und kommerzieller Versuchsbetriebe (siehe 3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen). Die folgenden beiden Aufgabenstellungen umfassen Versuche mit Boden-Mesokosmen unter standardisierten Bedingungen im Labor (Punkt 7) und Gewächshaus (Punkt 8).

TV2

Wasserhaushalt und Ökophysiologie der Silphie

- Ermittlung des Wasserverbrauchs einer Dauerkultur mit Silphie im Vergleich zu anderen wichtigen Anbausystemen für Biogaspflanzen
- Untersuchungen zur Wassernutzungseffizienz der Silphie auf Einzelblattebene sowie auf Bestandesebene (nach Ehlers 1997)
- Schätzung des Evapotranspirationskoeffizienten
- Charakterisierung des Wurzelapparates (Wurzeltiefgang, Wurzeldichte, Wurzelmasse) der Silphie in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte
- Abschätzung der Bedeutung der „Becher“ für den Wasserhaushalt
- Wasserstatus der Silphie im Verlauf der Vegetation
- Zeitliche Entwicklung von Bodendeckungsgrad und Blattflächenindex bei Erstanlage und nach Wiederaustrieb von Silphie
- Aufklärung der Auswirkung von Trockenheit auf die Methanausbeute
- Beurteilung der Winterfestigkeit des Wurzelsystem der Silphie

2. Stand der Technik

Der Flächenverbrauch durch den Anbau von Biogaspflanzen nimmt tendenziell zu (Schüsseler 2009). Um den Bedarf an pflanzlicher Biomasse zu decken, wird in erster Linie Silomais angebaut (FNR 2010, Poeschl et al. 2010). Obwohl Maisanbau mancherorts zu einer Auflockerung der Fruchtfolgen und dadurch zu einer positiven Wirkung auf die Biodiversität führen kann (Glemnitz et al. 2010, Wiehe et al. 2009), ist bei einem Überschreiten der regional sinnvollen Anbaugrenzen von Mais auf Grund von Flächenkonkurrenz zu Grünland und Ackerkulturen von höherem Naturschutzwert mit einem deutlichen Rückgang der Biodiversität und der mit ihr verbundenen ökosystemaren Dienstleistungen zu rechnen (Sala et al. 2009, Decourtye et al. 2010, Gardiner et al. 2010). Der langjährige Anbau von Mais in kurzen Fruchtfolgen kann sich nachteilig auf den Boden einschließlich seiner Struktur und den darin ablaufenden Prozessen auswirken (Rippel et al. 2008). Darüber hinaus werden unter diesen Bedingungen Entwicklung und Etablierung von Pflanzenpathogenen begünstigt (Meissle et al. 2010). Da sich der Anbau von Energiepflanzen meist im nahen Umfeld der Endnutzer (insbesondere der Biogasanlagen) konzentriert, kann dies zu räumlich aggregiertem Anbau mit kurzen Fruchtfolgen und lokalen Monokulturen führen, was die Habitat- und Ressourcenverfügbarkeit für wildlebende Organsimen einschränkt (Glemnitz et al. 2010, Dauber et al. 2010). Eine zunehmende „Vermassung“ von Landschaften führt zudem verstärkt zu Ablehnung und Protesten, nicht nur seitens der Bevölkerung wegen des Verlusts der Landschaftsidentität und Landschaftsästhetik, sondern auch seitens des Naturschutzes (NABU 2010). Auch von Imkern wird diese Entwicklung kritisch gesehen, da ihre Bienenvölker in den Maislandschaften keine ausreichende Nahrungsgrundlage mehr finden. Der Deutsche Imkerbund e.V. fordert daher in seinem Positionspapier zu Agrarumweltmaßnahmen die Verwendung von alternativen Blühpflanzen zur Biogasgewinnung (Deutscher Imkerbund 2010). Unter diesen Gesichtspunkten und zur Sicherung der Nachhaltigkeit der Biomasseproduktion sind Handlungsansätze unter Berücksichtigung der technischen, ökologischen und ökonomischen

Rahmenbedingungen und zwar entlang der gesamten Produktlinie umzusetzen (Schüsseler 2009).

Ein möglicher Handlungsansatz ist die Erweiterung des Spektrums energetisch nutzbarer Kulturen, insbesondere im Bereich Biogaserzeugung. Ein solcher Ansatz macht es möglich, mit Bioenergie mehr Vielfalt in die Landschaft und auf die Äcker zu bringen und durch Förderung von low input/low output Systemen Synergien zwischen Naturschutz und Energiepflanzenanbau zu stärken (BfN 2010, Karpenstein-Machan 2004). Anbausysteme mit mehrjährigen Pflanzenarten könnten eine Ergänzung oder an manchen Standorten sogar eine Alternative zum Mais darstellen und für eine Vielzahl der bestehenden Probleme Lösungsansätze bieten. Eine mehrjährige Standzeit ohne wiederkehrende Bodenbearbeitung wird die Gefahr von Bodenerosionen durch Wind und Wasser stark vermindern. In der Po-Ebene Norditaliens fanden Monti und Zatta (2009) große Unterschiede hinsichtlich der Wurzelmasse zwischen ein- und mehrjährigen Energiepflanzen. Der einjährige Faser-Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) produzierte wesentlich weniger Wurzeltrockenmasse als die mehrjährigen Arten Rutenhirse (*Panicum virgatum* L.), Pfahlrohr (*Arundo donax* L.) und Riesen-Chinaschilf (*Miscanthus sinensis* x *giganteus* Greef und Deuter). Die wegfallende Bodenbearbeitung und die größere Wurzelbiomasse von Dauerkulturen werden die Humusreproduktion des Bodens erhöhen (Frank et al. 2004, Fargione et al. 2008). Ein geringerer Pflanzenschutzmitteleinsatz sowie verbleibende Stoppelstrukturen nach der jährlichen Ernte können sich positiv auf Biodiversität und Habitatfunktion auswirken (Kuhn und Vollrath 2009, Dauber et al. 2010). Der Anbau mehrjähriger, insektenbestäubter Neophyten, zu denen auch die Silphie gehört, kann die Biodiversität fördern, da solche Arten auf Grund langer Standzeiten von >10 Jahren auf einem Schlag und ihrer langen Blütezeit kontinuierliche Nektar- und Pollenquellen für blütenbesuchende Insekten anbieten (Kuhn und Vollrath 2009). Untersuchungen von neophytischen Blühpflanzen im Energiepflanzenbau zeigen zudem den großen Wert solcher Bestände für Vögel und für bodenbewohnende Spinnen und Laufkäfer sowie die Eignung als Trachtpflanzen für Bienen (Vollrath et al. 2010).

Aufgrund spezifischer Charakteristika der Silphie und ihres Anbaus (TLL 2010) ist eine Reihe von Einflüssen auf die ober- und unterirdische Biodiversität zu erwarten. Die Silphie ist eine ausdauernde, mehrjährige Pflanze, die sich mindestens zehn Jahre lang beernten lässt. Im ersten Jahr ist eine Unkrautbekämpfung unbedingt notwendig, ab dem 2. Standjahr wächst die Silphie 1,8 m bis 3,0 m hoch und unterdrückt aufgrund ihres dichten Bestandes andere Pflanzen. Die entfallende Bodenbearbeitung und der vergleichsweise geringe Pflanzenschutzmitteleinsatz können sich positiv auf die epigäische Arthropodenfauna auswirken, was jedoch durch den dichten Bestand und das geringe Wildkrautangebot relativiert werden kann. Durch die lange Blühzeit von Juli bis September werden Insekten angelockt. Die Ernte erfolgt Ende August bis Anfang September, zu einer Zeit der optimalen Methanausbeute wenn die Pflanze jedoch bei guter Wasserversorgung noch voll in Blüte steht. Der Wiederaustrieb nach der Ernte fungiert ähnlich wie eine Zwischenfrucht als temporärer Stickstoffspeicher und dient damit dem Boden- und Grundwasserschutz. Der herbstliche Neuaustrieb der Stoppelhorste liefert nach Absterben bei Frost reichlich organisches Material an der Bodenoberfläche, wodurch sich das Nahrungsangebot für Streuzersetzer günstig gestaltet. Ob sich der relativ späte Erntetermin eher positiv oder negativ auf die Reproduktionszyklen von Arten auswirkt gilt es zu untersuchen. Da die Silphie nicht über Rhizome zur Nährstoffspeicherung verfügt, ist sie auf angepasste Düngung angewiesen. Der Stickstoffbedarf beträgt im Pflanz- und in jedem weiteren Vegetationsjahr 150 bis 200 Kilogramm pro Hektar. Der Dünger kann sowohl in mineralischer Form als auch in Kombination mit organischen Düngern verabreicht werden. Hier bietet sich die Rückführung von Biogasgülle oder Gärresten an (TLL 2010).

Unter den neuen Biogaspflanzen ist die Silphie aufgrund ihres hohen Ertragspotentials eine der erfolgversprechendsten Alternativen bzw. Ergänzungen zu Mais (Conrad und Biertümpfel 2010,

Bauböck et al. 2014, Mast et al. 2014). Erwartungsgemäß liegen für diese relativ neue Biogaspflanze bislang kaum Erfahrungswerte zu ertrags- bzw. ökophysiologisch wichtigen Kenngrößen wie beispielsweise der Wasser- und Strahlungsnutzungseffizienz vor. Das gilt auch für Wurzeleigenschaften, die im Hinblick auf eine tiefe und effektive Ausschöpfung des Bodenwassers wichtig sind. Besonders das Wasser stellt vor dem Hintergrund des Klimawandels einen zunehmend wichtigen pflanzenbaulichen Produktionsfaktor dar. Hohe und stabile Biomasseerträge setzen eine ausreichende Verfügbarkeit und die effiziente Nutzung dieser Ressource voraus. Eine im Hinblick auf den Anbau in Trockengebieten wichtige Frage ist die nach einer möglichen Veränderung der Qualität des Biogassubstrates. Grundsätzlich kann man annehmen, dass die Silphie als mehrjährige Staude ein kräftiges Wurzelsystem entwickelt. Unklar ist indessen ob sie damit auch eine zur Bedarfsdeckung ausreichende Wassermenge aufnehmen kann und wie effizient sie das aufgenommene Wasser für die Ertragsbildung nutzt. Es ist auch nicht bekannt wie viele der Wurzeln einer Silphie-Dauerkultur den Winter unbeschadet überdauern und inwieweit sie gleich zu Beginn der Vegetation die vorhandene Winterbodenfeuchte ausschöpfen können. Die Silphie entwickelt sich ab Vegetationsbeginn sehr schnell und bildet bereits Ende April einen geschlossenen Pflanzenbestand. Zu dieser Zeit befinden sich wärmebedürftige Energiepflanzen wie z.B. Mais und Sorghumhirse erst im Keimblattstadium bzw. sind noch nicht einmal ausgesät. Theoretisch könnte die Silphie deshalb eine große Strahlungsmenge aufnehmen. Auf der anderen Seite hat die Silphie als C3-Pflanze eine weniger effiziente Photosynthese als beispielsweise die C4-Pflanze Mais, so dass auch die Frage nach der Strahlungsnutzungseffizienz offen ist.

Zur Bedeutung der Silphie und ihres Anbaus für die in Deutschland heimische Flora und Fauna liegen bislang kaum wissenschaftliche Daten vor. Aus ihrem Ursprungsareal, den Prärien Nordamerikas, ist die Bedeutung für eine artenreiche Insektenfauna bekannt. Ein Experiment zur Attraktivität von im Osten der USA heimischen Blütenpflanzen für Honig- und Wildbienen in der Agrarlandschaft zeigte, dass die Silphie von 13 Wildbienenarten sowie von Honigbienen besucht wird. Am attraktivsten wirkte die Silphie auf die Hummelart *Bombus impatiens* (Tuell et al. 2008). Silphiebestände zogen im Vergleich zu anderen Blütenpflanzen die größte Zahl an Individuen an und erwiesen sich als attraktiv für ein sehr breites Artenspektrum an blütenbesuchenden Insekten (Tuell et al. 2008). In Präriefragmenten von Iowa, USA, wurde die Silphie als eine Bienen- und Schmetterlingspflanze charakterisiert (Davis et al. 2008). Aufgrund dieser Eigenschaften wird in den USA die Pflanzung von Silphie in Ackerrandstreifen als Futterquelle für Honigbienen empfohlen (Decourtye et al. 2010). Untersuchungen von Fiedler und Landis (2007) zeigten, dass Silphiebestände sehr attraktiv für Herbivore sind, die Zahl ihrer natürlichen Gegenspieler war jedoch höher. In den USA rangiert die Silphie unter den am meisten attraktiven Arten für natürliche Gegenspieler von Schadinsekten (Fiedler und Landis 2007). Das Auftreten von Gallwespen (Hymenoptera: Cynipidae) in den Stielen der Silphie wurde von Tooker et al. (2004) nachgewiesen. Für Deutschland ist die Attraktivität der Silphie für Schadinsekten und Predatoren noch nachzuweisen. An der Agraruniversität in Poznań (Polen) wurde für die Silphie ein Befall mit der Blattlaus *Aphis fabae* Scop. nachgewiesen (Wilkaniec und Piekarska-Boniecka 2008).

Aus bodenbiologischer und insbesondere aus bodenzoologischer Sicht gibt es bislang nur wenige Untersuchungen zu Wirkungen von mehrjährigen Energiepflanzen (Dauber et al. 2010). Die meisten der existierenden Untersuchungen beschäftigten sich in erster Linie mit Regenwürmern in Miscanthusbeständen oder Kurzumtriebsplantagen (Makeschin 1994, Friis et al. 1999, Tischer et al. 2006, Bellamy et al. 2009). Kürzlich zeigten Versuche von Ernst et al. (2009) zeigten, dass es bei Abbau und Mineralisation von Miscanthus-Ernterückständen zur Konkurrenz um Stickstoffressourcen zwischen Regenwürmern und Bodenmikroorganismen kommen kann. Andererseits scheint der Anbau des mehrjährigen Grases Miscanthus die Vielfalt von Regenwurmgemeinschaften im Boden zu fördern (Felten und Emmerling 2011). Auch für Collembolen wurden höhere Individuendichten (ca. das 20fache) und ein höherer Artenreichtum

unter Miscanthus- und Rutenhirsebeständen im Vergleich zu einjährigem Getreide nachgewiesen (Chauvat et al. 2014). Geringe Intensität und Frequenz von Bodenbearbeitungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen lassen geringe Störungen der Biodiversität im Boden beim Anbau der ebenfalls mehrjährigen Silphie erwarten, da die Aktivität der Bodenorganismen und deren damit verbundener funktioneller Beitrag für ökosystemare Dienstleistungen bei verringerten mechanischen und chemischen Eingriffen in das Boden-System steigt (Roger-Estrade et al. 2010, Schrader und Seibel 2001, Donker et al. 1994). Unter den Bodentieren sind insbesondere Regenwürmer bedeutsame Akteure, die als Primär- und Sekundärzersetzer die Bodenfruchtbarkeit erhöhen (Curry und Schmidt 2007). Sie fördern durch Makroporen-Neubildung Transportprozesse (Schrader et al. 1995, Schrader et al. 2007), verbessern durch Bodenaggregat-Neubildung die Bodenstruktur (Flegel et al. 1998, Zhang und Schrader 1993) und reduzieren Pflanzenpathogene (Oldenburg et al. 2008, Wolfarth et al. 2011). Kürzlich berichtete Emmerling (2014) über höhere Individuendichten und Biomasse bei Regenwürmern in Silphiebeständen ungenannten Alters im Vergleich zu Mais. Collembolen wirken als Katalysatoren mikrobieller Aktivität indem sie durch Abweiden deren Dominanzverhältnisse regulieren (Hopkin 1997). Dabei scheiden sie zudem einfache organische Verbindungen aus, die wiederum durch Pilze und Mikroorganismen leicht zu mineralischen Verbindungen (Pflanzennährstoffe) abgebaut werden (Ehrensberger 1993). Nematoden gewinnen ihre ökologische Bedeutung insbesondere durch ihre Vielfalt an Ernährungstypen und der damit einhergehenden Nahrungsspezialisierung (Yeates 2003, Yeates et al. 1993). Durch ihre große Anzahl und funktionelle Vielfalt bieten sie detaillierte Einblicke in die komplexen Abbauprozesse in Böden. Bei Collembolen und Nematoden gibt es starke Abhängigkeiten zur angebauten Frucht (Sticht et al. 2008, 2009). Inwieweit die hier beispielhaft genannten Bodentiere ihre Wirkung in einem Silphie-Anbausystem entfalten und welche Interaktionen untereinander, mit der Pflanze und mit der oberirdischen Biodiversität zum Tragen kommen, ist bislang nicht untersucht.

Derzeit sind ca. 400 ha Silphie deutschlandweit in landwirtschaftlichen Betrieben auf Flächengrößen von 0,25 bis 3,50 ha etabliert (Biertümpfel et al. 2015). Die insbesondere in Thüringen durch die TLL durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die Silphie Biomasse- und Methanerträge erbringt, die mit denen von Mais vergleichbar sein können (Biertümpfel & Conrad 2010, Haag et al. 2015). Aus Sicht der Verfahrenstechnik wird die Silphie bereits als Mischzusatz zur Optimierung der Spurenelementversorgung der Mikroorganismen im Fermenter empfohlen (Ahrens & Metzger 2012). Die Untersuchungen zum Anbausystem der Silphie sind mittlerweile soweit fortgeschritten (Conrad et al. 2010), dass die Untersuchungen im Projekt unter nahezu praxisüblichen Anbaubedingungen (im Hinblick auf Düngung, Pflanzenschutz und Bestandsdichte) erfolgen konnten.

Literatur

- Ahrens W, Metzger M (2012) Optimale Pflanzenmischung für Biogasanlagen. forum.new power 2/2012 (6. Jg.), 6-9.
- Bauböck R, Karpenstein-Machan M, Kappas M (2014) Computing the biomass potentials for maize and two alternative energy crops, triticale and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.), with the crop model BioSTAR in the region of Hannover (Germany). Environmental Sciences Europe 26, 19.
- BfN (Hrsg., 2010) Bioenergie und Naturschutz. Synergien fördern, Risiken vermeiden. BfN, Bonn, 32 S.
- Bellamy PE, Croxton PJ, Heard MS et al. (2009) The impact of growing Miscanthus for biomass on farmland bird populations. Biomass and Bioenergy, 33, 191-199.
- Biertümpfel A, Conrad M (2010) Leckerbissen für Bienen und Methanbakterien. In: Biogas Journal, Sonderheft Energiepflanzen, 67-69.
- Biertümpfel A, Köhler J, Müller R (2015) Neues von der Silphie. Biogas Journal 18, 42-43
- Chauvat M, Perez G, Hedde M, Lamy I (2014) Establishment of bioenergy crops on metal contaminated soils stimulates belowground fauna. Biomass and Bioenergy 62, 207-211.

- Conrad M, Biertümpfel A (2010) Optimierung des Anbauverfahrens für Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*) als Kofermentpflanze in Biogasanlagen sowie Überführung in die landwirtschaftliche Praxis. Abschlussbericht der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zum Forschungsprojekt FKZ 22004307 gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Conrad M, Biertümpfel A, Vetter A (2010) Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) – Von der Futterpflanze zum Koferment. In: Gülzower Fachgespräche, Band 34. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow, 281-289.
- Curry JP, Schmidt O (2007) The feeding ecology of earthworms – A review. *Pedobiologia* 50, 463-477.
- Dauber J, Jones MB, Stout JC (2010) The impact of biomass crop cultivation on temperate biodiversity. *Global Change Biology - Bioenergy*, 2, 289–309.
- Davis JD, Hendrix SD, Debinski DM, Hemsley CJ (2008) Butterfly, bee and forb community composition and cross-taxon incongruence in tallgrass prairie fragments. *Journal of Insect Conservation* 12, 69–79.
- Decourtaye A, Mader E, Desneux N (2010) Landscape enhancement of floral resources for honey bees in agro-ecosystems. *Apidologie* 41, 264–277.
- Deutscher Imkerbund e.V. (2010) Positionspapier des Deutschen Imkerbundes e. V. zu Agrarumweltmaßnahmen.
http://www.deutscherimkerbund.de/phpwcms_ftp/Positionen/Agrarumweltmassnahmen.pdf
- Donker MH, Eijssackers H, Heimbach F (Eds) (1994) *Ecotoxicology of Soil Organisms*. CRC Press, Inc., Lewis Publ., Boca Raton.
- Ehlers W (1997) Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. *Pflanzenbauwissenschaften* 1, 97-108.
- Ehrnsberger R (1993) Bodenzöologie und Agrarökosysteme. *Informationen aus Naturschutz und Landschaftspflege* 6, 11-41.
- Emmerling C (2014) Impact of land-use change towards perennial energy crops on earthworm population. *Applied Soil Ecology* 84, 12-15.
- Ernst G, Henseler I, Felten D, Emmerling C (2009) Decomposition of energy crop residues by earthworms. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1548-1554.
- Fargione J, Tilman T, Polasky S, Hawthorne P (2008) Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319, 1235-1238.
- Frank AB, Berdahl JD, Hanson JD, Liebig MA, Johnson HA (2004) Biomass and carbon partitioning in switchgrass. *Crop Science* 44, 1391-1396.
- Felten D, Emmerling C (2011) Effects of energy crop cultivation on earthworm communities – A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land-use intensity. *Applied Soil Ecology* 49, 167-177.
- Fiedler AK, Landis D (2007) Attractiveness of Michigan Native Plants to Arthropod Natural Enemies and Herbivores. *Environmental Entomology* 36, 751-765.
- Flegel M, Schrader S, Zhang H (1998) Influence of food quality on the physical and chemical properties of detritivorous earthworm casts. *Applied Soil Ecology* 9, 263-269.
- FNR (2010) Daten und Fakten, Entwicklung des Anbaus von Rohstoffpflanzen
<http://www.nachwachsenderohstoffe.de/service/daten-und-fakten/anbau/?spalte=3>
- Friis K, Reddersen J, Petersen IK (1999) Tilplanting af dyrkede marker med energipil: Effekter på regnormefaunaen. *Flora og Fauna*, 105, 71-78.
- Gardiner MA, Tuell JK, Isaacs R, Gibbs J, Ascher JS, Landis DA (2010) Implications of three biofuel crops for beneficial arthropods in agricultural landscapes. *Bioenergy Research* 3, 6–19.
- Glemnitz M, Platen R, Brandt K, Hufnagel J, Saure C (2010) Energiepflanzenanbau und Biodiversität. *ForschungsReport* 1/2010, 38-41.
- Haag NL, Nägele HJ, Reiss K, Biertümpfel A, Oechsner H (2015) Methane formation potential of cup plant (*Silphium perfoliatum*). *Biomass and Bioenergy* 75, 126-133.
- Hopkin SP (1997) *Biology of the Springtails*. Oxford University Press, Oxford.
- Karpenstein-Machan M (2004) Neue Perspektiven für den Naturschutz durch einen ökologisch ausgerichteten Energiepflanzenbau. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 36, 58-64.
- Kuhn W, Vollrath B (2009) Neophyten als Energiepflanzen – Chancen und Risiken. Gülzower Fachgespräche, Band 34, 2. Symposium Energiepflanzen 2009, 17./18. November 2009, Berlin, Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR),

- Hofplatz 1, 18276 Gülzow mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) FNR 2010, 211-220.
- Makeschin F (1994) Effects of energy forestry on soils. *Biomass and Bioenergy*, 6, 63-79.
- Mast B, Lemmer A, Oechsner H, Reinhardt-Hanis A, Claupein W, Graeff-Hönninger S (2014) Methane yield potential of novel perennial biogas crops influenced by harvest date. *Industrial Crops and Products* 58, 194-203.
- Meissle M, Mouron P, Musa T, Bigler F, Pons X, Vasileiadis VP, Otto S, Antichi D, Kiss J, Pálincás Z, Dorner Z, van der Weide R, Groten J, Czembor E, Adamczyk J, Thibord J-B, Melander B, Cordsen Nielsen G, Poulsen RT, Zimmermann O, Verschwele A, Oldenburg E (2010) Pests, pesticide use and alternative options in European maize production: current status and future prospects. *Journal of Applied Entomology* 134, 357-375.
- Monti A, Zatta A (2009) Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 132, 252-259.
- NABU (2010) Zehn-Punkte-Papier Biogas: Grundsätze für eine naturverträgliche Produktion. http://niedersachsen.nabu.de/imperia/md/content/niedersachsen/nabu-grunds_tze_biogas_stand_08_februar_2010.pdf
- Oldenburg E, Kramer S, Schrader S, Weinert J (2008) Impact of the earthworm *Lumbricus terrestris* on the degradation of *Fusarium*-infected and deoxynivalenol-contaminated wheat straw. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 3049-3053.
- Poeschl M, Ward S, Owende P (2010) Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1782-1797.
- Rippel R, Brandhuber R, Burger F, Capriel P, Kreuter T, Müller C, Weigand S, Wendland M (2008) Einfluss des Biomasseanbaus für Energiebereitstellung auf den Bodenschutz. *Schriftenreihe der DLKG*, Heft 5, 131-164.
- Roger-Estrade J, Anger C, Bertrand M, Richard G (2010) Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research* 111, 33-40.
- Sala OE, Sax D, Leslie H (2009) Biodiversity consequences of biofuel production. In: R.W. Howarth and S. Bringezu (eds) *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use*. Proceedings of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) International Biofuels Project Rapid Assessment, 22-25 September 2008, Gummersbach Germany. Cornell University, Ithaca NY, USA. 127-137. (<http://cip.cornell.edu/biofuels/>)
- Schrader S, Seibel C (2001) Impact of cultivation management in an agroecosystem on hot spot effects of earthworm middens. *European Journal of Soil Biology* 37, 309-313.
- Schrader S, Joschko M, Kula H, Larink O (1995) Earthworm effects on soil structure with emphasis on soil stability and soil water movement. In: Hartge, KH, Stewart BA (Eds) *Soil Structure – Its Development and Function*. Advances in Soil Science. CRC Press, Inc., Lewis Publ., Boca Raton, 109-133.
- Schrader S, Rogasik H, Onasch I, Jégou D (2007) Assessment of soil structural differentiation around earthworm burrows by means of X-ray computed tomography and scanning electron microscopy. *Geoderma* 137, 378-387.
- Schüsseler P (2009) Bedeutung des Sektors Biogas im Rahmen der Erneuerbaren Energien. *Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, 15, Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, Band 1, 9-20.
- SIWI (2007) Presseinformation des Stockholm International Water Institute (SIWI). http://www.worldwaterweek.org/Downloads/WWW_2007_Press_Kit.pdf.
- Sticht C, Schrader S, Giesemann A, Weigel H-J (2008) Atmospheric CO₂ enrichment induces life strategy- and species-specific responses of collembolans in the rhizosphere of sugar beet and winter wheat. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1432-1445.
- Sticht C, Schrader S, Giesemann A, Weigel H-J (2009) Sensitivity of nematode feeding types in arable soil to free air CO₂ enrichment (FACE) is crop-specific. *Pedobiologia* 52, 337-349.
- Tischer S, Schmitt A-K, Hofmann B et al. (2006) Auswirkungen des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen auf bodenbiologische Aktivitäten auf einer Löß-Schwarzerde im Mitteldeutschen Trockengebiet. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 61, 481-489.
- TLL (2010) Anbautelegramm Durchgewachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). <http://www.tll.de/ainfo/pdf/silp0810.pdf>
- Tooker JF, Deans AR, Hanks LM (2004) Description of the *Antistrophus rufus* (Hymenoptera: Cynipidae) species complex, including two new species. *J. Hym Res.* 13, 125-133.

- Tuell JK, Fiedler AK, Landis D, Isaacs R (2008) Visitation by Wild and Managed Bees (Hymenoptera: Apoidea) to Eastern U.S. Native Plants for Use in Conservation Programs. *Environmental Entomology* 37, 707-718.
- UBA (2006) Erhebliche Klimaänderungen in Deutschland zu erwarten. Umweltbundesamt Presseinformation 265/2006 vom 25. April 2006.
- Vollrath B, Kuhn W, Werner A (2010) „Wild“ statt „mono“ – neue Wege für die Biogaserzeugung. *LandInForm* 1/2010, Seite 42-43
- Wiehe J, von Ruschkowski E, Rode M, Kanning H, von Haaren C (2009) Auswirkung des Energiepflanzenanbaus auf die Landschaft. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 41, 107-113.
- Wilkaniec B, Piekarska-Boniecka H (2008) Aphid infestation of decorative perennials. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus* 7, 13-19.
- Wolfarth F, Schrader S, Oldenburg E, Weinert J, Brunotte J (2011) Earthworms promote the reduction of Fusarium biomass and deoxynivalenol content in wheat straw under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1858-1865.
- Yeates GW, Bongers T, de Goede RGM, Freckman DW, Georgieva SS (1993) Feeding habits in soil nematode families and genera: an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology* 25, 315-331.
- Yeates GW (2003) Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects. *Biology and Fertility of Soils* 37, 199-210.
- Zhang H, Schrader S (1993) Earthworm effects on selected physical and chemical properties of soil aggregates. *Biology and Fertility of Soils* 15, 229-234.

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), welche auf der Versuchsstation Dornburg sowie auf Praxisbetrieben langjährige anbautechnische Versuche mit der Durchwachsenen Silphie durchführt, war im Projekt Auftragnehmer. Mitarbeiter/-innen der TLL unterstützten die Projektarbeiten durch Überwachung der projektbezogenen Versuche vor Ort, Probennahmen von Nektar und Pollen, Messungen an den Versuchspflanzen sowie Beprobung von Bodentiergemeinschaften.

Weiterhin bestand eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Geographie der Universität Osnabrück (Prof. Dr. Gabriele Broll, Dr. Hans-Jörg Brauckmann) sowie der Ruhe Agrar GmbH im Rahmen des Projekts „Optimierte Energiepflanzen-Anbausysteme zur nachhaltigen Biogaserzeugung - Upscaling der FuE-Ergebnisse zu neuen Kulturen und deren Implementierung (FNR FKZ 22017511)“. Zwei der Standorte der Ruhe Agrar GmbH, Vehlów und Fürstenhagen, auf denen in großflächigen Streifenversuchen die Silphie sowie andere alternative Energiepflanzen(-mischungen) angebaut wurden, dienten insbesondere TV1 „Oberirdische Biodiversität“ als Untersuchungsflächen.

Auf eben jenen Untersuchungsflächen erfolgte zudem eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Landnutzungssysteme des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung e. V. (ZALF) (Dr. Michael Glemnitz) im Rahmen des Projekts EVA III (FNR FKZ 22006112). Hier wurde der Einsatz von Farbschalen und Bodenfallen auf den Flächen abgestimmt und aufgeteilt um Doppelbeprobungen zu vermeiden. Das ZALF übernahm hierbei die Beprobung mittels Bodenfallen und TV 1 die Beprobung mittels Farbschalen.

Die Untersuchung der Langzeitwirkung der Silphie auf die Entwicklung von Bodentiergemeinschaften wurde von der Erfurter Samen- und Pflanzenzucht GmbH N.L. Chrestensen unterstützt. Die langjährige Kultivierung der Durchwachsenen Silphie auf dem Betriebsgelände der N.L. Chrestensen ermöglichte die Integration unterschiedlicher Altersstufen in ausreichender Anzahl. Durch die Zusammenarbeit mit Herrn Scheithauer konnten Silphiebestände aus den Anbaujahren 2007, 2009 und 2011 beprobt werden. Des Weiteren wurden über die N.L. Chrestensen junge Silphie-Sprösslinge für Gewächshausversuche bezogen.

Weitere Silphiebestände unterschiedlichen Alters, die auf Grund ihrer Bodeneigenschaften in das Versuchsdesign passten, konnten in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer (LWK) Niedersachsen gefunden werden. Die freundliche Unterstützung durch Herrn Wilken ergänzte die Untersuchung um eine Anbaufläche, die seit 2009 von der LWK unter Gesichtspunkten der Biogasproduktion untersucht wird.

Die Mikrokosmenversuche zur Analyse der Treibhausgasentwicklung während des Abbaus von Silphiestreu wurden in Kooperation mit dem Thünen-Institut für Agrarklimaschutz durchgeführt. Hilfe bei Planung und Konzeption des Versuchs wurden von Dr. Reinhard Well und Dr. Dominika Lewicka-Szcebak geboten. Die Analysen der Isotopensignaturen in tierischem Gewebe wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Anette Giesemann durchgeführt und ausgewertet.

Das Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienstes (Dr. Klaus-Peter Wittich) hat mit mikrometeorologischen Messungen in Silphie- und Maisparzellen (u.a. Temperatur und Luftfeuchtigkeit) sowie Modellrechnungen zur Taubildung im TV2 mitgewirkt.

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Henning Kage und Dr. Ulf Böttcher vom Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel wurde ein beschreibendes Pflanzenwachstumsmodell mit im TV2 erfassten Spross- und Wurzeleigenschaften parametrisiert. Mit Hilfe dieses Modells ließen sich verschiedene Wasserhaushaltskomponenten für die Kulturen Silphie und Mais abschätzen. Darüber hinaus wurden mittels einer Bildanalysesoftware von Dr. Böttcher anhand von Digitalfotos der Bodendeckungsgrad und Blattflächenindex in frühen Entwicklungsstadien der untersuchten Kulturen ermittelt.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

1.1 Ergebnisse des TV1 „Oberirdische und unterirdische Biodiversität“

1.1.1 Oberirdische Biodiversität (Dauber, Müller)

1.1.1.1 Erfassung der Blütenbesuchergemeinschaften auf Praxisflächen der Silphie im Laufe der Blühperiode und in Abhängigkeit von der landschaftlichen Einbindung der Bestände

Blütenbesuchende Insekten sind auf eine adäquate Versorgung mit Nektar und Pollen als Nahrung angewiesen. Als Gegenleistung fungieren vielen von ihnen als Bestäuber von Pflanzen. Der Ertrag vieler Kulturen wie Raps oder Tomate wird durch Insektenbestäubung deutlich gesteigert (Klein et al. 2007). In Agrarlandschaften können in Form von Wildkräutern und Segetalpflanzen auf extensiv genutzten Wiesen und Weiden, schonend gepflegten Weg- und Feldrändern sowie organisch bewirtschafteten Feldern, aber auch durch blühende Hecken oder Streuobst, Nahrungsressourcen für blütenbesuchende Insekten über die gesamte Vegetationsperiode zu finden sein. Die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion kann aber zu monotonen Agrarlandschaften führen, in denen diese Nahrungsressourcen oft nur in geringem Umfang zur Verfügung stehen, oder es werden blühenden Kulturen wie Raps angebaut, die eine intensive, aber zeitlich sehr begrenzte Blüte haben (Decourtye et al. 2010). In Regionen mit zunehmendem Maisanbau nimmt dieser Mangel an Nahrungsquellen zu. Mais wird zwar auch von Honigbienen als Pollenquelle genutzt (Danner et al. 2014), die Pflanzenart gehört aber zu den Gräsern (Poaceae), deren windbestäubte Blüten keinen Nektar produzieren. In dieses Landschaftsbild könnte sich die Durchwachsene Silphie in besonderer Weise einfügen: Durch eine fortwährende Verzweigung ihrer Triebe blüht sie über einen sehr langen Zeitraum hinweg von Juli bis September zu einer Zeit, in der viele Hecken, Bäume und andere Kulturen bereits verblüht sind. Wie bereits erwähnt, wird die Silphie in ihrer Herkunftsregion in Nordamerika von verschiedenen Insekten besucht, für Europa liegen aber bislang keine detaillierter Daten über die Attraktivität der Durchwachsenen Silphie für hier heimische Bestäuber vor (s.o.).

Im ersten Projektjahr 2012 war es deshalb das Ziel, die blütenbesuchenden Insekten auf den bereits existierenden Praxisflächen der Durchwachsenen Silphie zu erfassen. Dafür standen 20 Silphieflächen in Niedersachsen zur Verfügung (siehe Abbildung A1 im Anhang). Da die Attraktivität einer Pflanze von der landschaftlichen Umgebung beeinflusst werden kann, weil z.B. je nach vorhandenen Nist- und Larvalhabitaten nur ein gewisser Pool an bestimmten Bestäubern vorkommt, oder aber weil alternative Trachtquellen blütenbesuchende Insekten stärker anziehen können, wurde mithilfe verschiedener Methoden versucht, diesen landschaftlichen Kontext bei der Bewertung der Silphie zu berücksichtigen (zu alternativen Trachtquellen s. außerdem 1.1.1.2). Zum einen wurden die Bestäuber ebenfalls in benachbarten Habitaten erfasst, die im Umfeld aller Silphie-Untersuchungsflächen zu finden waren, um herauszufinden, welche Bestäuber in der Umgebung im Vergleich zur Silphie vorkommen. Bei diesen Habitaten handelte es sich um Maisflächen sowie lineare Habitate (Gräben oder kleine Bäche und Waldränder). Zum anderen wurde mithilfe von Informationen aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) sowie dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKos) die Habitatzusammensetzung in einem Radius von 3km um die Silphieflächen untersucht. So konnten Parameter berechnet werden, die die Standorte charakterisieren, z.B. der Anteil an Ackerfläche, ein Parameter, der negativ mit der Habitatdiversität korreliert ist, der Anteil an semi-natürlichen Habitats sowie die Kulturartenvielfalt der Ackerfläche.

Aus den 20 zur Verfügung stehenden Silphieflächen wurden für diesen Projektteil diejenigen Standorte ausgewählt, die sich in den Landschaftsgradienten einfügten, sowie solche, deren Silphiefelder eine Mindestgröße von 0,4 ha bis maximal 2,8 ha hatten, um die Flächen vergleichbar zu halten. So wurden 15 der 20 Standorte für die Erfassung der blütenbesuchenden Insekten genutzt. Die Erfassung erfolgte mit Hilfe von mit Wasser und einem Tropfen Parfüm-freien Spülmittel gefüllten Schalen, die mit UV-reflektierenden Farben der Farbtöne gelb, blau und weiß



Abbildung 1: Farbschalenset zur Erfassung blütenbesuchender Insekten.

angesprüht wurden (Abbildung 1). Diese Fallen wurden je nach Erntetermin zweimal (ein Standort), dreimal (sechs Standorte) oder viermal (acht Standorte) für zwei Tage während der Silphieblüte in die Felder und Vergleichshabitate aufgestellt. Es wurden jeweils zwei Fallen in Silphie, zwei Fallen in Mais und zwei Fallen in den linearen Habitaten je Aufnahme aufgestellt.

Aus den Farbschalen wurden die beiden wichtigsten Bestäubergruppen herausortiert, die Bienen (Apidae), zu denen die staatenbildenden Honigbienen und Hummeln, aber auch zumeist solitär bis hin zu semi-sozial lebende Wildbienen gehören, sowie die Schwebfliegen (Syrphidae) (Abbildung 2). Insgesamt wurden 1629 Bienen und 2441 Schwebfliegen erfasst.

Honigbiene

Die Honigbiene (*Apis mellifera*) ist von der ersten bis zur dritten Aufnahme deutlich häufiger in den Silphie-Feldern gefangen worden als in den benachbarten Habitaten, nicht aber in der letzten Aufnahme (Abbildung 2). Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass an manchen Silphiefeldern durch das Interesse lokaler Imker an der neuen Biogaskultur Bienenstöcke direkt am Feld standen, und zwar bei der ersten Aufnahme an 7 der 15 Silphiefelder, bei der zweiten Aufnahme an 8 von 15, bei der dritten Aufnahme an 5 von 14 und bei der letzten Aufnahme nur noch an 1 von 8. Schaut man sich die Honigbienenendichte dieser Felder getrennt an, wurden bei der ersten Aufnahme deutlich mehr Honigbienen in den Silphiefeldern gefangen als in der Umgebung, wenn Bienenstöcke direkt am Feld standen, nicht aber an den Standorten, an denen keine Bienenstöcke direkt am Feld aufgestellt worden waren. In der zweiten und dritten Aufnahme sind aber in beiden Fällen mehr Honigbienen in der Silphie als in der Umgebung nachgewiesen worden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich Honigbienen gerne auf Massentrachten „einfliegen“, die Blütendichte in der Silphie am Anfang der Blühperiode aber noch recht gering war (durchschnittlich 8 blühende Blütenstände je Pflanze) und sich so eine weitere Flugentfernung energetisch wahrscheinlich nicht auszahlte. Während der Hauptblüte im August (durchschnittlich 32 blühende Blütenstände je Pflanze in der Mitte von sowie 35 blühende Blütenstände je Pflanze am Ende des August) wurden dann auch Honigbienen aus Stöcken angelockt, die eine weitere Entfernung zu den Silphiefeldern überwinden mussten. In der letzten Aufnahme Mitte September (durchschnittlich 21 blühende Blütenstände je Pflanze, aber schon mit deutlichen Unterschieden zwischen den Feldern) war die Auffütterung der Bienenvölker nach der Honigernte wohl weitgehend abgeschlossen und die Hauptsammelaktivität war beendet.

Hummeln

Von den gefangenen Hummeln wurden 41% als Erdhummeln (der sog. „Erdhummel-Komplex“, zu dem die nur schwer zu unterscheidenden Arten *Bombus terrestris*, *B. lucorum*, *B. cryptarum* und *B. magnus* gehören), 37% als Ackerhummeln (*B. pascuorum*) und 13% als Steinhummeln (*B. lapidarius*) identifiziert. Andere Hummelarten machten insgesamt nur 9% an der Gesamtzahl aus, davon etwa zur Hälfte Kuckuckshummeln. In allen Aufnahmen wurden durchschnittlich deutlich mehr Hummeln in Silphiefeldern gefangen als in der Umgebung (Abbildung 2). Dies lässt sich aber vor allem auf die Steinhummel und die Arten des Erdhummelkomplexes zurückführen, von denen jeweils 72% aller gefangenen Individuen aus den Silphiefallen stammen. Demgegenüber stammen zwar auch 48% der Ackerhummeln aus den Silphiefallen, aber auch über die Hälfte aus den Fallen in der Umgebung. Während Erdhummeln und Steinhummeln sich durch einen vergleichsweise sehr kurzen Rüssel (Arbeiterinnen: 8-9mm, von Hagen und Aichhorn 2014) bzw. mittellangen Rüssel (Arbeiterinnen: 10-12mm, von Hagen und Aichhorn 2014) auszeichnen, hat die Ackerhummel einen langen Rüssel (Arbeiterinnen: 12-13mm, von Hagen und Aichhorn 2014). So ist vorstellbar, dass Ackerhummeln zwar die Silphie nutzen, aber auch gerne andere Blüten mit tiefen Kelchen als Alternative besuchen, während Erd- und Steinhummeln am meisten von einem Silphieanbau profitieren könnten.

Solitäre Wildbienen

Im Gegensatz zu den staatenbildenden Hummeln zeigten die anderen, meist solitär lebenden Wildbienen ein deutlich anderes Verhalten. Es wurden zwar vereinzelt Sand-, Hosen-, Mauer-, Seiden- und Furchenbienen in der Silphie nachgewiesen, aber ihr Anteil machte nur 18% der an den Standorten insgesamt nachgewiesenen Wildbienen aus.

Schwebfliegen

Es wurden insgesamt 49 Schwebfliegenarten nachgewiesen (Artenliste in Tabelle A1 im Anhang). Mithilfe den Farbschalen wurden zwar nur die Imagines gefangen und nicht etwa die Larven, dennoch ist es interessant, die gefangenen Arten nach dem Ernährungstyp der Larven einzuteilen. Denn während die adulten Schwebfliegen sich alle von Pollen und Nektar ernähren, so haben die Larven sehr unterschiedliche Fressgewohnheiten und damit auch sehr unterschiedliche Lebensraumsansprüche. Unter den Schwebfliegenarten ernährt sich ein Teil der Larven von Blattläusen und fungiert so als deren natürlicher Gegenspieler. Die gefangenen Individuen der niedersächsischen Praxisflächen gehörten etwa zur Hälfte diesem als „zoophag“ bezeichnetem Ernährungstyp an, die andere Hälfte gehörte zumeist zum saprophagen Ernährungstyp. Dessen Larven ernähren sich von sich zersetzendem Material in feuchten und nassen Habitaten, Dung oder auch Totholz. Insgesamt konnten 30 Schwebfliegenarten in der Silphie nachgewiesen werden. Der Großteil der zoophagen Larven wurde in der ersten Aufnahme gefangen, in der Silphie allerdings im Mittel die geringste Anzahl an Individuen (Abbildung 2). Dies könnte daran liegen, dass die Silphiepflanzen zu dieser Zeit gerade erst mit der Blüte begannen. Andererseits sieht man aber, dass, auch wenn die Gesamtaktivität nach Juli deutlich zurückging, die Individuendichte in der Silphie immer unter der in den Vergleichshabitaten lag. Demgegenüber stieg die Zahl der saprophagen Schwebfliegen über die Blühperiode an und war zumindest in der letzten Aufnahme in der Silphie deutlich höher (Abbildung 2). Saprophage Arten scheinen also stärker vom Silphieanbau profitieren zu können als zoophage Arten. Neben den sich hier abzeichnenden generell unterschiedlichen Aktivitätsperioden könnte eine andere Erklärung dafür die Morphologie der Tiere sein. Die zoophagen Arten unserer Studie waren im Vergleich zu den meisten saprophagen Arten eher kurzrüsslig (<4 mm, Ssymank 2001), der Zugang zum Nektar könnte deshalb für manche Arten erschwert gewesen sein, da er innerhalb der Röhrenblüten produziert und nicht wie der Pollen nach außen gedrückt wird (vgl. 1.1.1.5).

Zusammenfassend kann man festhalten, dass von den hier untersuchten bestäubenden Insekten vor allem die Honigbienen, sowie bestimmte Hummeln und saprophage Schwebfliegen von einem Anbau der Durchwachsenen Silphie gefördert werden könnten. Allerdings profitierten die saprophagen Schwebfliegen vor allem von der Silphie als sehr späte Nahrungsressource. Dies ist interessant, weil bei der letzten Aufnahme Mitte September die Hälfte der Standorte bereits abgeerntet war. Momentan erfolgt eine späte Ernte vor allem aus Kostengründen zusammen mit der Maisernte und nicht zum optimalen Ertragszeitpunkt Ende August bis Anfang September (Biertümpfel und Conrad 2013), da bei kleineren Silphieschlägen der Mehrertrag einer früheren Ernte nicht die Arbeitskosten decken würde. Deshalb wäre es wünschenswert, die Silphie dahingehend zu züchten, dass ein optimaler Ertrag möglichst zu einer sehr späten Ernte erfolgen kann.

Die Honigbienen sind durch das Management der Imkerei nicht auf geeignete Nisthabitate in der Umgebung angewiesen, wohl aber die Hummeln und die saprophagen Schwebfliegen. Wie einführend erläutert könnte es also sein, dass das Vorkommen dieser wildlebenden Insekten von der landschaftlichen Umgebung abhängt, und nicht an allen Standorten die gleichen Individuendichten in den Silphiefeldern gemessen wurde. Hummeln waren weder in sehr monotonen, noch in sehr diversen Landschaften besonders häufig in der Silphie nachgewiesen worden, sondern in Landschaften mit einem mittleren Anteil an Ackerland. Dies könnte daran liegen, dass in sehr monotonen Landschaften aufgrund von mangelnden Nisthabitaten nur wenige Hummeln siedeln konnten während in sehr diversen Landschaften die Attraktivität der Silphie abnimmt, weil genügend andere Trachtpflanzen zur Verfügung stehen (vgl. Tschardt et al. 2012). Im Fall der saprophagen Schwebfliegen konnte ein deutlicher positiver Zusammenhang zwischen ihrer Aktivitätsdichte in den Silphieflächen und dem Anteil an semi-natürlichen Habitaten in der Umgebung dieser Silphieflächen gemessen werden. Die semi-natürlichen Habitate umfassten Naturschutzgebiete sowie Heideflächen. Der positive Effekt eines Silphieanbaus kann also nur dann voll zum Tragen kommen, wenn ein Mindestmaß an extensiven Lebensräumen außerhalb der Ackerfläche erhalten bleibt.

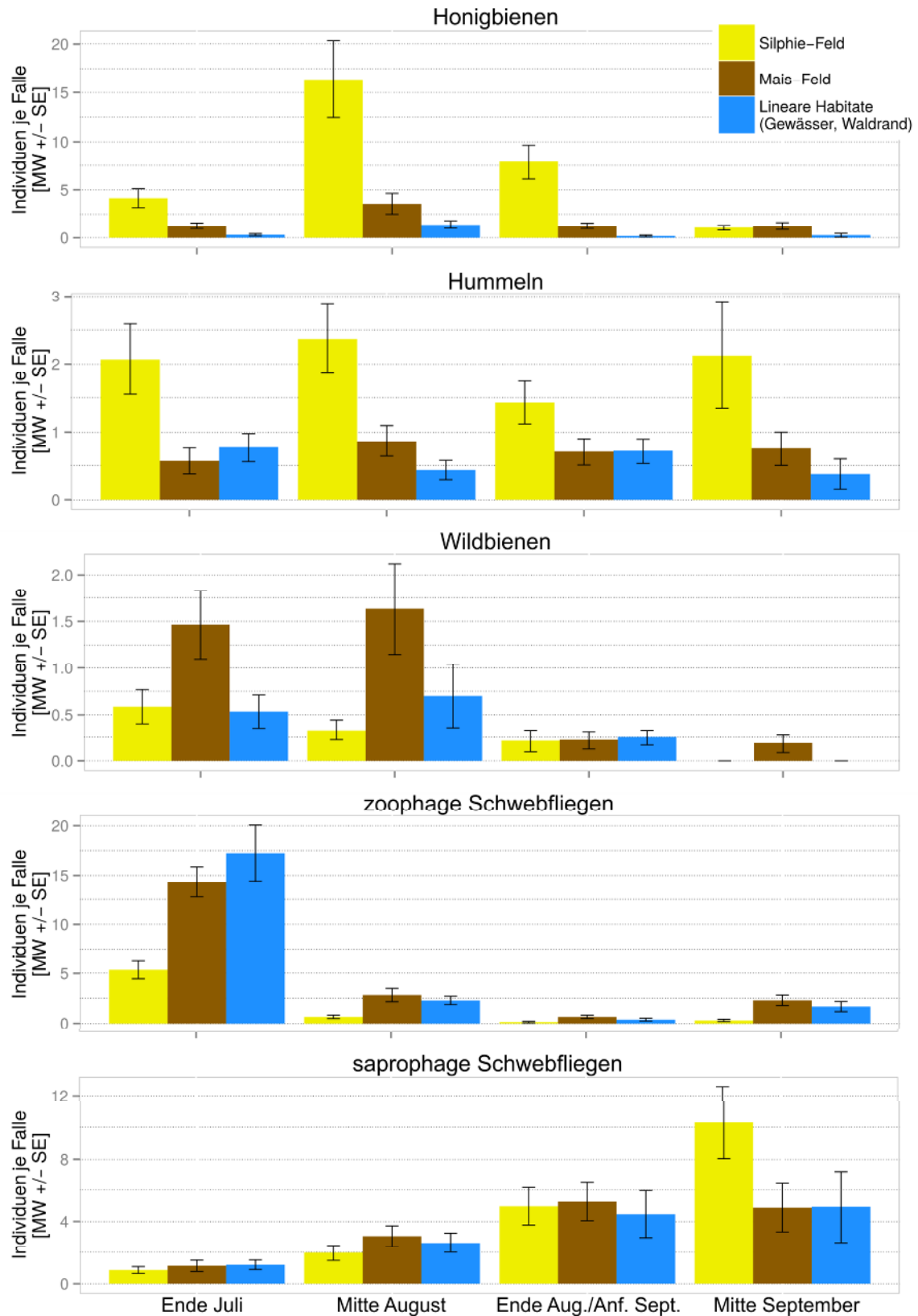


Abbildung 2: Vergleich der Anzahl an blütenbesuchenden Insekten je Falle in den niedersächsischen Praxisflächen der Durchwachsenen Silphie mit der Anzahl aus den Fallen, die in den sie umgebenden Habitaten (Maisfelder, Gewässer, lineare Habitate) in den Erfassungsperioden von Ende Juli (n=15), Mitte August (n=15), Ende August/Anfang September (n=14) und Mitte September (n=8) nachgewiesen wurden.

1.1.1.2 Ermittlung der Pollenquellen von Bestäuberinsekten in der Agrarlandschaft (Pflanze-Bestäuber-Netzwerke)

Nutzung der Silphie durch die Honigbiene

Pollen hat eine besondere Bedeutung bei der Entwicklung des Bienenstaates, da dieser als Proteinquelle insbesondere bei der Larvalaufzucht eingesetzt wird (Brodtschneider und Crailsheim 2010). Am Ende der Vegetationsperiode wachsen im Bienenstock verstärkt die sogenannten „Winterbienen“ heran, die mit der Königin in einer sie umgebenden, wärmenden und schützenden Bienentraube den Winter verbringen werden. Sie benötigen eine reiche Pollenversorgung, um sich ein gutes Fett-Eiweiß-Polster anzufressen (von der Ohe 2004). Deshalb könnte die Durchwachsene Silphie mit ihrer späten Blüte als frische Pollenquelle einen wichtigen Beitrag zur Winterfestigkeit der Bienenvölker leisten. Wie unter 1.1.1.1 bereits gezeigt, wurden die Praxisflächen der Durchwachsenden Silphie intensiv von Honigbienen besucht, in der Hauptblüte sowohl von nahen als auch von weiter entfernt stehenden Bienenvölkern. In Kooperation mit den Imkern, die genau an oder in der Nähe von diesen niedersächsischen Silphiefeldern ihre Bienenstöcke platziert hatten, konnte an sieben Standorten an zwei bis drei Aufnahmen der Polleneintrag in die Stöcke untersucht werden. Dafür wurden Pollenfallen vor dem Flugloch der Bienenstöcke befestigt, die einen Teil des von den Arbeiterinnen in Form von Pollenhöschen eingetragenen Pollens abfingen (Abbildung 3). Die Pollenhöschen wurden getrocknet und nach Farbe sortiert. Diese Farbgruppen wurden gewogen und aus drei Pollenhöschen je Farbgruppe mikroskopische Präparate hergestellt. So konnte der prozentuale Anteil der Pollenquellen am Polleneintrag in den Bienenstock festgestellt werden. *Silphium*- kann mit *Helianthus*-Pollen verwechselt werden, weshalb wir hier vom „Typ“ *Silphium* sprechen.

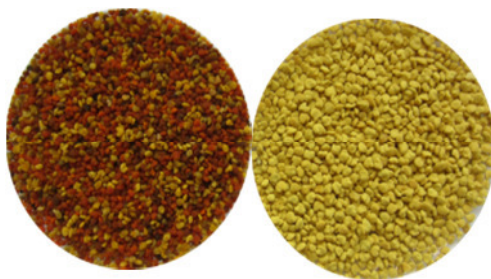


Abbildung 3: Pollenhöschen von Honigbienen, gesammelt am Standort 13. Links farblich sehr heterogene Pollenhöschen von Mitte August und rechts farblich homogene von Anfang September. Vgl. hierzu Abbildung 4.

Der Anteil des Pollens vom *Silphium*-Typ variierte stark und lag zwischen 0,1 und 55,2% (18% im Durchschnitt, $n=17$). Interessanterweise war kein Zusammenhang zwischen dem aktuellen Blütenangebot auf dem Feld und dem eingetragenen Anteil des Pollens vom Typ *Silphium* feststellbar. Vielmehr bestimmte das alternative Trachtangebot die Nutzung dieser Pollenquelle. An drei Standorten wurde die Besenheide (*Calluna vulgaris*) besonders häufig genutzt (Abbildung 4, Standorte mit der ID 14, 15 und 6 aus Abbildung A1). An vier Standorten wurden während der letzten Aufnahme fast ausschließlich Kreuzblütler (Brassicaceae) als

Pollenquelle eingetragen (Abbildung 4, Standorte mit der ID 4, 18, 12 und 13 aus Abbildung A1). An zwei dieser Standorte konnte der Pollen dem Senf-Typ zugeordnet werden, was auf den Anbau von Gründünger in der Umgebung hinweist. Maispollenhöschen kam in fünf Proben mit Anteilen von 3, 4, 9, 10 und 15% vor, es handelte sich in der Regel aber um Mischpollenhöschen, in denen Mais dominierte. Andere Kulturen, die als Trachtpflanzen genutzt wurden, waren *Phacelia tanacetifolia*, eine Pflanze, die ebenfalls als Gründünger oder in Blühstreifen angebaut wird und Spargel. Auf Wildkräuter als Pollenquelle weist der *Achillea*-Typ hin, zu dem neben der Schafgarbe auch verschiedene Kamillen gehören. So stellte der Pollen des *Silphium*-Typs an einigen Standorten zu bestimmten Zeiten eine bedeutende Nahrungsergänzung dar, die Bienen konnten aber in diesen Agrarlandschaften auch andere Quellen für ihre Pollenversorgung ausmachen.

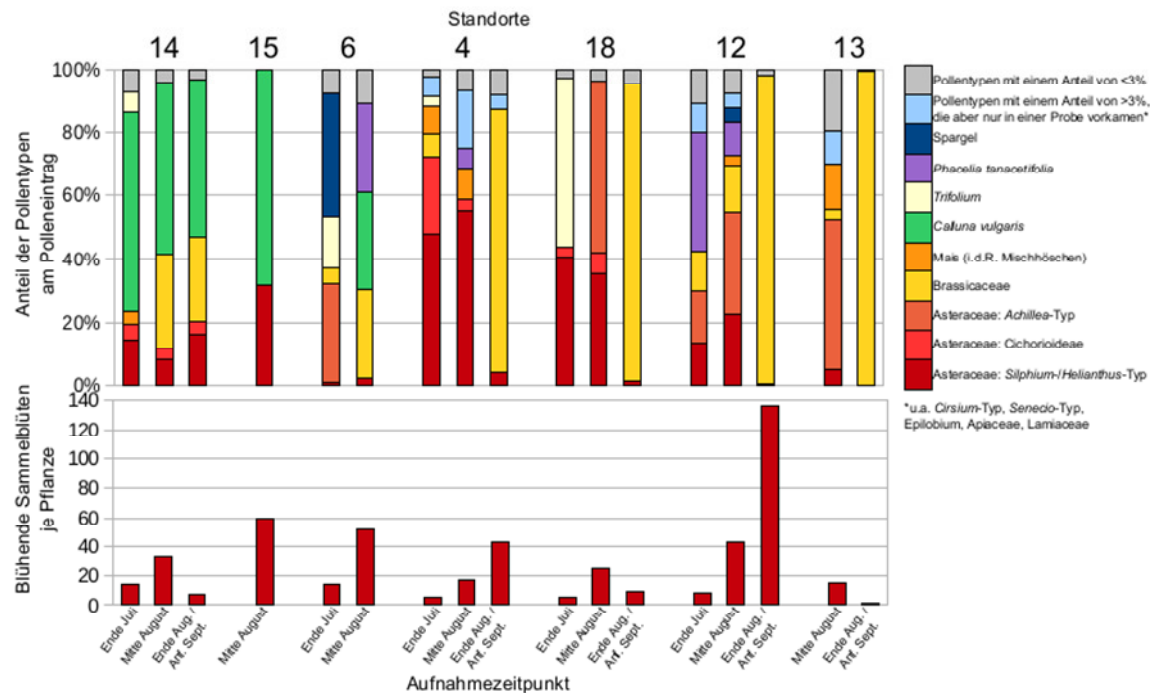


Abbildung 4: Anteile der verschiedenen Pollenressourcen, die von den Honigbienen während der Silphieblüte in die Völker eingetragen wurden (obere Grafik). Zum Vergleich ist das Blütenangebot in den Silphiefeldern zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten dargestellt (untere Grafik). Die Standorte sind in Abbildung A1 dargestellt.

Nutzung von Mais und Silphie durch Schwebfliegen

Einige der auf den niedersächsischen Praxisflächen erfassten Schwebfliegenarten (siehe 1.1.1.1) wurden deutlich häufiger in den Maisfeldern nachgewiesen als in den Silphiefeldern. *Episyrphus balteatus* bspw. wurde zwar überwiegend in den linearen Habitaten gefangen (55% aller Individuen), dennoch stammen 34% der Individuen aus den Maisfallen und nur 11% aus den Silphiefallen. Von der Schwebfliege *Melanostoma mellinum* wurden insgesamt 99 Exemplare gefangen, davon 70 im Mais und nur drei in der Silphie. Diese beiden Schwebfliegenarten sind bekannt dafür, Graspollen zu fressen (Speight et al. 2013, Ssymank und Gilbert 1993), inwieweit sie aber Maispollen in der Agrarlandschaft sammeln, ist unseres Wissens nicht bekannt. Genauso sind ihre Larven aphidophag und die Tiere könnten Blattlauskolonien im Mais gesucht haben, was zumindest für *Episyrphus balteatus* belegt wurde (Bigler et al. 1995). Aber auch die saprophage Art *Eristalis arbustorum* nimmt zumindest Pollen einkeimblättriger Pflanzen zu sich. Diese Art wurde genauso häufig im Mais wie in der Silphie gefangen. Die Art *Helophilus trivittatus* wurde häufiger im Mais gefangen (126 Individuen) als in der Silphie (95 Individuen), sie wird aber weder als Graspollenkonsument gelistet, noch sucht sie als saprophage Art Blattlauskolonien in landwirtschaftlichen Kulturen. Um diesen offenen Fragen bzgl. der Individuendichte in Maisfeldern auf den Grund zu gehen und herauszufinden, ob Maispollen eine Pollenquelle für Schwebfliegen darstellen kann, wurde der Pollen aus dem Abdomen der gefangenen Exemplare dieser vier genannten Schwebfliegenarten herauspräpariert und daraus ein mikroskopisches Präparat hergestellt. Nicht in allen Fällen konnten von den gewünschten Schwebfliegen Präparate hergestellt werden, da nicht in allen Fällen ausreichend Pollen im Abdomen vorhanden war. Es wurden, wenn es die Pollenmengen erlaubten, jeweils 300 Pollen je Präparat ausgezählt und der Anteil von Maispollen sowie Pollen vom Typ *Silphium* (s.o.) am Gesamtpollenkonsum bestimmt. Außerdem wurde noch zwischen anderen Graspollen, anderen Korbblütler (Asteraceae) sowie sonstigen Pollenquellen differenziert. Als Vergleich wurden nicht nur die Individuen präpariert, die in Maisfeldern gefangen wurden, sondern auch die aus den

Silphiefeldern und den linearen Habitaten (vgl. 1.1.1.1.). So konnte festgestellt werden, ob es einen direkten Zusammenhang zwischen Habitat und Pollenkonsum gab.

Episyrphus balteatus

91% der Individuen von *Episyrphus balteatus* wurde in der ersten Aufnahme Ende Juli gefangen, weshalb nur Individuen aus dieser Aufnahme ausgewählt wurden. Insgesamt wurden Tiere aus sieben Standorten ausgewählt, bei denen sowohl Individuen im Mais, als auch Individuen in der Silphie und den linearen Habitaten gefangen wurden. Nach Möglichkeit wurden drei Individuen je Habitat und Standort präpariert. Die Silphiefelder hatten zu dieser Aufnahme an allen Feldern schon vereinzelt ihre Blütenstände geöffnet, es waren aber noch nicht alle der untersuchten Maisflächen am Blühen. Allerdings schwankte der Anteil an Maisflächen in einem Umkreis von 3km zwischen 30 und 1269ha.

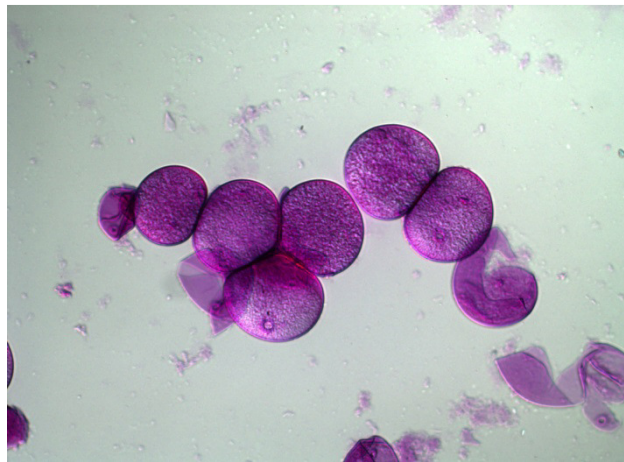


Abbildung 5: Mageninhalt einer Schwebfliege der Art *Episyrphus balteatus*. Mit Fuchsin angefärbter Maispollen. V: 200x

Insgesamt wurden 21 Individuen von *Episyrphus balteatus* aus Maisfangschalen analysiert (Abbildung 5). Sechs der neun Individuen, die in einem blühenden Maisfeld gefangen wurden, hatten Maispollen konsumiert mit einem durchschnittlichen Anteil von 75%. Aber auch in vier der zwölf Individuen, die in einem Maisfeld gefangen wurden, das noch nicht blühte, konnte Maispollen mit einem durchschnittlichen Anteil von 54% nachgewiesen werden. Zusätzlich wurden 14 Individuen aus Silphiefallen und 20 Individuen aus linearen Habitaten analysiert, aber nur fünf Individuen hatten Maispollen gefressen, der aber einen hohen Anteil von durchschnittlich 92% bei diesen Tieren ausmachte. Diese fünf Individuen wurden alle an zwei Standorten gefangen. An einem dieser beiden Standort lag der Anteil der Ackerfläche bei 88% und es wurde die höchste Flächendeckung an Maisfeldern in der Umgebung verzeichnet (s.o.), bei dem anderen dieser beiden Standorte war die Flächendeckung an Maisflächen recht gering (364ha), aber der Anteil an Ackerfläche war relativ hoch (69%). Maispollen scheint also eine durchaus genutzte Pollenquelle von *Episyrphus balteatus* zu sein, insbesondere dann, wenn die Agrarlandschaft recht intensiv genutzt wird.

An allen sieben Standorten wurde mindestens in einer Schwebfliege, die in der Silphiefläche gefangen wurde, auch Pollen vom *Silphium*-Typ nachgewiesen, insgesamt in 15 von 17 untersuchten Individuen mit Anteilen zwischen 0,7 und 100% (62% im Durchschnitt). In sechs der 41 Schwebfliegen aus Mais- oder Gewässerfallen wurde Pollen vom *Silphium*-Typ gefunden, bei fünf Individuen allerdings nur geringe Anteile von bis zu 3% und nur ein Individuum mit einem höheren Anteil von 68%. Sonstige Graspollen waren nur in sieben der 58 insgesamt präparierten Schwebfliegen mit einem Anteil von durchschnittlich 10% vorhanden, sonstige Asteraceae in 39 der 58 Schwebfliegen mit stark wechselnden Anteilen (28% im Durchschnitt; <1 - 99%).

Melanostoma mellinum

Wie oben erwähnt wurden 70 der 99 gefangenen Individuen von *Melanostoma mellinum* im Mais gefangen. Von diesen Maisfängen wurden 26 Individuen in der ersten Aufnahme im Juli und 16 Individuen Mitte August gefangen, in einem Zeitfenster, indem die Maispflanzen der Untersuchungsfelder selbst oder zumindest in der Umgebung blühten, während in der dritten Aufnahme Ende August nach der Maisblüte dann nur noch vier Individuen im Mais nachgewiesen

wurden. Allerdings nahm Mitte September die Aktivität von *Melanostoma mellinum* wieder zu und 24 Individuen wurden in den Maisfeldern erfasst. Deshalb wurde überprüft, ob in den ersten beiden Aufnahmen Maispollen genutzt wurde und inwieweit sich dann in der vierten Aufnahme die Pollenaufnahme verändert hat, oder ob sich die Pollenquellen oder -präferenzen in den ersten beiden und der vierten Aufnahme ähneln.

Insgesamt wurden 13 Individuen von *Melanostoma mellinum* präpariert, die in Maisfangschalen gefangen wurden, acht aus den ersten beiden Aufnahmen und fünf aus den letzten beiden Aufnahmen. In den ersten beiden Aufnahmen konnten zwei von vier Schwebfliegen, die in noch nicht blühenden Maisfeldern gefangen wurden, kleine Mengen an Maispollen nachgewiesen werden (1,6 und 2,4%). In zwei von vier Schwebfliegen aus blühenden Maisfeldern wurde ebenfalls Mais gefunden (7 und 98%). In sechs dieser acht Individuen wurde aber der Pollen anderer Gräser gefunden mit Anteilen von 1, 5, 43, 96, 97 und 100%. Im Gegensatz zu diesen ersten Aufnahmen, in denen sich *Melanostoma mellinum* zu einem Großteil von Graspollen ernährte, wurde in der letzten Aufnahme überhaupt kein Graspollen mehr entdeckt, sondern verschiedenste nicht weiter identifizierbare, sonstige Pollenquellen. Nur in einem Fall wurde der Pollen vom *Silphium*-Typ bei einem Individuum aus einer Gewässerfangschale gefunden, an diesem Standort lag allerdings auch ein Sonnenblumenfeld in der Nähe. Während seiner Blüte wird Mais also durchaus auch von *Melanostoma mellinum* als Pollenquelle genutzt, auch wenn andere Graspollen in unseren Fängen einen größeren Anteil an der Pollennutzung hatten. Asteraceae spielten generell eine vergleichsweise untergeordnete Rolle, obwohl, wie anhand der anderen Schwebfliegenarten zu erkennen, ein solches Pollenangebot an diesen Standorten vorhanden gewesen sein musste.

Helophilus trivittatus

Die Anzahl an gefangenen Individuen von *Helophilus trivittatus* nahm mit den Aufnahmen zu, allerdings wurden immer ein paar mehr Tiere im Mais als in der Silphie und den linearen Habitaten gefangen, obwohl in den letzten beiden Aufnahmen die Maisblüte abgeschlossen war. Deshalb wurden insgesamt 37 Individuen aus verschiedenen Aufnahmen und Habitaten präpariert.

In nur einem Fall wurde ein einzelner Graspollen gefunden, bei dem es sich auch um eine Verschmutzung handeln könnte, sonst konnte in keiner der Schwebfliegen Mais- oder sonstiger Graspollen nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu waren in 13 von 15 der

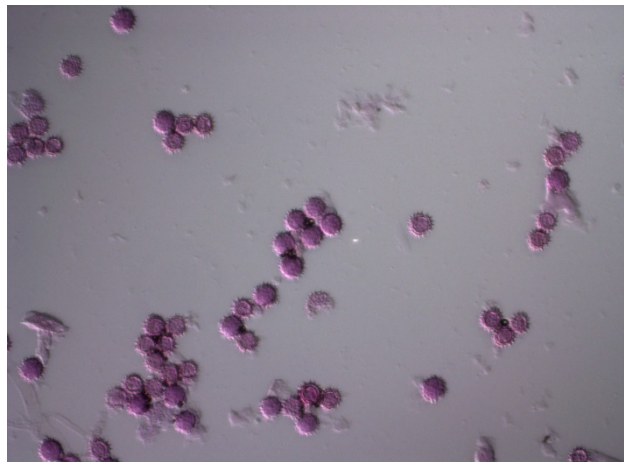


Abbildung 6: Mageninhalt einer Schwebfliege der Art *Helophilus trivittatus*. Mit Fuchsin angefärbter Pollen vom *Silphium*-Typ. V: 200x

in einem Silphiefeld gefangenen Individuen Pollen vom *Silphium*-Typ zu finden. Der Anteil lag in drei Fällen unter 10%, in zwei Fällen zwischen 10 und 50% und in allen restlichen acht Fällen meist weit über 90% (65% im Durchschnitt). Auch in zwölf der 22 Individuen aus den Mais- oder Gewässerfällen war dieser Pollentyp vertreten, allerdings mit deutlich geringeren Anteilen (in sieben Fällen unter 10%, zweimal zwischen 10-50%, und nur zweimal 80% sowie einmal 97%, 26% im Durchschnitt). Auch sonstiger Pollen der Asteraceae war in 33 der 37 präparierten Individuen zu finden mit einem Anteil von durchschnittlich 51%. Die Fänge in der Silphie scheinen deshalb den tatsächlichen Blütenbesuch widerzuspiegeln, während der Aufenthalt im Mais eine andere Ursache haben muss.

Eristalis arbustorum

Von der Schwebfliegenart *Eristalis arbustorum* wurden insgesamt 24 Individuen präpariert, davon zehn aus den ersten beiden Aufnahmen und 14 aus den letzten beiden Aufnahmen bzw. sieben aus Silphie-, zehn aus Mais- und sieben aus linearen Habitaten. Graspollen konnte nur in zwei Fällen und in sehr geringen Mengen identifiziert werden (0,3 und 0,8%). Pollen der Asteraceae war in 20 Schwebfliegen dominant mit Anteilen zwischen 68 und 100% (93% im Durchschnitt), und wurde nur in einer Schwebfliege überhaupt nicht nachgewiesen. Dabei war der *Achillea*-Typ (s.o.) besonders häufig. Der Pollen der vom *Silphium*-Typ wurde zumindest in vier von sieben Individuen aus Silphiefallen gefunden (1, 24, 95 und 100%) sowie in zwei Individuum aus Maisfangschalen, allerdings in sehr geringen Mengen (0,3 und 2,6%). Silphie scheint für *Eristalis arbustorum* also nicht die attraktivste Asteraceae darzustellen, wird aber durchaus konsumiert, während Graspollen keine Rolle bei der Pollenernährung zu spielen scheint.

1.1.1.3 Vergleich der Blütenbesuchergemeinschaft der Silphie zu anderen Energiepflanzen

Die Durchwachsene Silphie ist durch ihre ökonomischen und ökologischen Vorteile eine vielversprechende Biogaskultur. Doch trotz des Vorteils einer langen und späten Blüte kann ein monoflorales Trachtangebot bestimmte Bestäubergruppen einseitig fördern. Es konnte bisher gezeigt werden, dass die Silphie zwar für einige Bestäuber eine attraktive Blüte darstellen kann, für anspruchsvolle Insekten wie Wildbienen aber vergleichsweise unattraktiv scheint (1.1.1.1). Deshalb sollte die Silphie nicht nur, wie bisher geschehen, mit Mais verglichen werden – also mit der Pflanze, zu der die Silphie eine Alternative darstellen soll – sondern auch mit weiteren, alternativen Biogaskulturen. Wildpflanzenmischungen für Biogasanlagen wachsen zwar in der Regel weniger üppig als die Silphie und haben deshalb einen geringeren Biomasseertrag (Vollrath und Kuhn 2010), doch durch das vielfältige Blütenangebot könnten weit mehr und spezialisierte Bestäuber angelockt werden (Haaland et al. 2010). Im Rahmen des von der FNR geförderten Projektes «Upscaling der FuE-Ergebnisse zu neuen Kulturen und deren Implementierung in optimierte Energiepflanzen-Anbausysteme zur nachhaltigen Biogasproduktion» der Universität Osnabrück und der RuheAgrar wurden im Untersuchungsjahr 2013 an den Standorten Fürstenhagen und Vehlow in Brandenburg Silphie, Mais und Wildpflanzenmischungen angebaut. An jedem Standort standen dabei vier Felder pro Kultur mit einer Größe von jeweils 5 ha zur Verfügung. Die Bestäubergemeinschaften dieser Biogaskulturen wurde mithilfe von Farbschalensets (gelb, blau und weiß, Standdauer zwei Tage) erfasst (Abbildung 1). Da Mais erst spät und schon am Ende der Wildpflanzenblüte mit der Pollenabgabe begann und Silphie und Mais bereits in 1.1.1.1 verglichen wurden, soll an dieser Stelle besonders auf die Erfassungstermine zwischen Juli und August eingegangen werden, an denen die Silphie und die Wildpflanzenmischung gleichzeitig blühten. Dabei konnten in der ersten und zweiten Julihälfte auf beiden Versuchsstandorten Insektenerfassungen durchgeführt werden. Anfang August wurden dann aber am Standort Vehlow die Wildpflanzenmischungen schon geerntet, sodass nur noch eine Aufnahme in Fürstenhagen stattfand. Um zu überprüfen, ob sich die verschiedenen Biogaskulturen durch ihr Blütenangebot bzgl. des Blütenbesucherspektrums gegenseitig beeinflussen, wurden zusätzlich die Bestäubergemeinschaften auf weiteren Silphieflächen in der Umgebung untersucht, in deren Nähe keine Wildpflanzenmischungen angebaut wurden. Dafür standen insgesamt vier Vergleichsstandorte zur Verfügung, in der zweiten Hälfte im Juli zwei in der Nähe des Versuchsstandortes Vehlow, und in der ersten Augushälfte zwei in der Nähe des Versuchsstandortes Fürstenhagen. Deshalb wurden in Abbildung 7 die Aufnahmen, die sich am ehesten miteinander vergleichen lassen, rot umrandet.

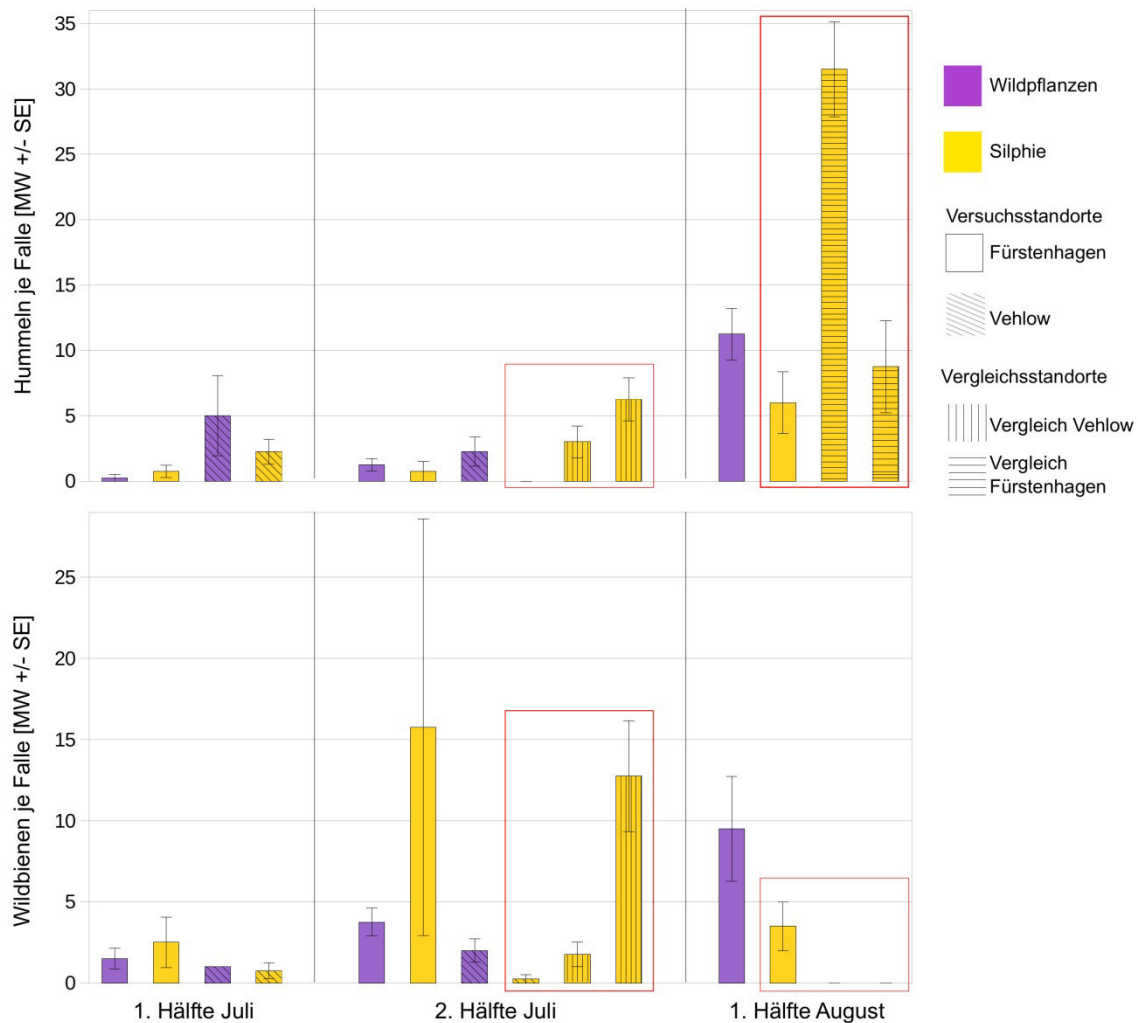


Abbildung 7: Anzahl an Hummeln und Wildbienen, die während der Blühperiode der Silphie und der Wildpflanzenmischungen im Jahr 2013 in Brandenburg erfasst wurden. Rot umrandet sind jene Versuchs- und Vergleichstandorte, für die ein Vergleich der Blütenbesucher möglich ist.

Wie in Abbildung 7 zu sehen, wurden in den Wildpflanzenmischungen tendenziell mehr Hummeln gefangen als in der Silphie. Dies war im Juli am Standort Vehlow und im August am Standort Fürstenhagen zu beobachten. Vergleicht man die Anzahl an Hummeln der Versuchsstandorte mit denen der Vergleichsstandorte, so wurden durchschnittlich mehr Hummeln in den Silphiefallen an den Vergleichsstandorten nachgewiesen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Wildpflanzenmischungen für Hummeln besonders interessant sind, die Silphie aber dann verstärkt Hummeln anzieht, wenn alternative Trachten fehlen. Oft spiegeln diese Häufigkeitsmuster aber den Trend der dominanten Arten wieder, weshalb auch ein genauerer Blick auf die gefangenen Arten erfolgen soll (Abbildung 8). Interessanterweise wurden vom Erdhummel-Komplex, der hier die meisten Individuen stellt, etwa gleich viele Tiere in den Feldern mit Silphie und Wildpflanzenmischungen gefangen. Hier zeigt sich also, dass die Präferenz von Hummeln für die Wildpflanzenmischung nicht auf einzelne, dominante Arten zurückzuführen ist, sondern dass mehrere Hummelarten deutlich häufiger in den Wildpflanzenfeldern nachgewiesen wurden (insbesondere *Bombus bohemicus*, *B. lapidarius*, *B. soroeensis*). Außerdem wurden dort insgesamt fünf Einzelnachweise erfasst, die in der Silphie gar nicht gefangen wurden.

Entgegen den Erwartungen zeigen gerade die Individuendichten der sonstigen Wildbienen kein so deutliches Muster. Beispielsweise wurden in der zweiten Juliaufnahme in Fürstenhagen mehr Wildbienen in der Silphie, in Vehlow mehr Wildbienen in den Wildpflanzen gefangen. Auch

innerhalb von einem Standort sind die Verhältnisse von Aufnahme zu Aufnahme unterschiedlich. In den Silphie-Vergleichsflächen in der Nähe vom Standort Vehlow wurden deutlich mehr Wildbienen nachgewiesen als an dem Versuchsstandort selbst, während in den Silphie-Vergleichsflächen in der Nähe von Fürstenhagen gar keine anderen Wildbienen gefangen wurden (Abbildung 7). Inwieweit die Kulturen von Wildbienen genutzt werden scheint also viel mehr daran zu liegen, welche Bienenart an einem Standort nistet oder gerade aktiv ist. So gab es in der zweiten Hälfte im Juli in Fürstenhagen ein Massenaufkommen von *Lasioglossum calceatum/albipes* in der Silphie, während in den Aufnahmen davor und danach nur 2-3 Tiere dieser Arten gefangen wurden und im August wurde *Dasypoda hirtipes* besonders häufig in den Wildpflanzen nachgewiesen, aber nicht in den Aufnahmen davor. Neben diesem unterschiedlichen Vorkommen der Wildbienen könnten die wechselnden Muster auch an einem wechselnden Angebot an blühenden Pflanzen in den Wildpflanzenmischungen liegen, da durch die Mischung immer wieder Wildpflanzenarten ihre Blüte beenden und dafür andere Pflanzen hochwachsen. Da die Wildbienen z.T. starke Präferenzen für bestimmte Pflanzenfamilien oder -gattungen zeigen, könnten also auch die Wildpflanzenmischungen über die Blühperiode hinweg mal mehr, mal weniger attraktiv sein. So hat *Dasypoda hirtipes* eine Präferenz für die Cichorioideae, also die „Zungenblütigen“ unter den Korbblütlern (Amiet und Krebs 2012), während z.B. *Andrena pilipes* Reseden bevorzugt, die auch Bestandteil der Wildpflanzenmischung waren.

1.1.1.4 Überprüfung der Qualität und Quantität der von der Silphie produzierten Nahrungsressourcen (Nektar und Pollen) für blütenbesuchende Insekten

produzierten Nahrungsressourcen der Silphie bewerten und mit anderen Pflanzen vergleichbar zu machen, wurde deshalb die Menge des produzierten Nektars und Pollens in einem Feldversuch und im Labor genau ermittelt. Aber nicht nur das Wissen über die Quantität der angebotenen Nahrungsressourcen sind nötig, um die Bedeutung der Silphie im Agrarökosystem beurteilen zu können, sondern auch die Qualität dieser Nahrungsressourcen. In einem Experiment konsumierten Honigbienen z.B. größere Mengen eines Nektar-Imitats, das neben Zucker auch reich an Aminosäuren war, im Vergleich zu dem Nektar-Imitat, das nur Zucker enthielt (Alm et al. 1990) und eine Ernährung mit Pollen, der sich durch einen hohen Gehalt an Proteinen auszeichnet, kann die Bienengesundheit und Resistenz gegen Schaderreger positiv beeinflussen (Di Pasquale et al. 2013).

Um die Ermittlung und Darbietung der Nahrungsressourcen zu verstehen, ist es wichtig, die Blütenbiologie der Silphie zu kennen. Die Durchwachsene Silphie gehört zu der botanischen Familie der Asteraceae, auch Korbblütler genannt. Jede ihrer Blütenstände, auch als Sammelblüten bezeichnet, besteht aus vielen kleinen Einzelblüten (Abbildung 9). Außen tragen die Sammelblüten der Silphie die sogenannten Zungenblüten, so genannt, weil ein Blütenblatt stark nach außen verlängert ist, was den „Sonnenblumeneffekt“ erzeugt. Die Zungenblüten der Silphie haben jeweils eine entwicklungsfähige Samenanlage, sie produzieren aber keinerlei Nahrungsressourcen, können also nicht zur Entlohnung eventueller Bestäuber dienen. Ihre Blüte kann also als die Zeit verstanden werden, in der die Griffel präsentiert werden. Demgegenüber sind, anders als beispielsweise bei der mit der Silphie nahe verwandten Sonnenblume, die Röhrenblüten steril, sie dienen also allein zu der Produktion von Nektar und Pollen. Dabei blühen jeden Tag neue Röhrenblüten einer Sammelblüte auf, die am Abend bereits verwelken und abfallen. Eine genaue Beschreibung der Blüte einer Sammelblüte mit besonderem Augenmerk auf die Überlappung von Griffel- und Pollenpräsentation erfolgt in 1.1.1.6 zur Bestäubungsökologie der Durchwachsenen Silphie. Den Blütenstand des Haupttriebes bezeichnen wir als Blütenstand oder Sammelblüte „erster Ordnung“, die Blütenstände der ersten Seitentriebe als „zweite Ordnung“. Verzweigen sich diese ersten Seitentriebe weiter, werden ihre Blütenstände als „dritte Ordnung“ bezeichnet usw.



Abbildung 9: Links: Die Zungenblüten präsentieren ihre Griffel, während die Röhrenblüten gerade morgens mit der Pollenpräsentation begonnen haben, indem sich ihr Griffel durch die braunen, verwachsenen Staubblätter schiebt und so den Pollen nach außen drückt. Rechts: Die Zungenblüten tragen die Samenanlagen, während die Röhrenblüten Nektar und Pollen produzieren.

Im Jahr 2012 wurde an zwei Beständen auf den Versuchsflächen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft in Dornburg, einem jüngeren mit Anlagejahr 2010 und einem älteren mit Anlagejahr 2005, je 10 Sammelblüten der 2. bis zur 6. Ordnung untersucht. Es wurden die Anzahl der Röhren- und Zungenblüten je Ordnung bestimmt sowie jeweils 5 noch geschlossene Röhrenblüten je Sammelblüte entnommen und einzeln in Ethanol gelagert. Diese 5 Röhrenblüten wurden im Labor weiter analysiert, indem der Pollen in Wasser durch manuelles bearbeiten und schütteln getrennt wurde. Das Wasser mit dem Pollen wurde in ein Reagenzglas überführt und zentrifugiert. Der Überstand wurde entnommen, sodass eine Probe am Ende aus dem Pollen von 5 Röhrenblüten derselben Sammelblüte in 100 µL Wasser bestand. Diese Probe wurde gut durchmischt und ein Teil in eine Neubauer Zählkammer gegeben. Dieses Häemocytometer hat 8 Zählkammern, in denen die Anzahl der Pollen ermittelt wurde. Durch das bekannte Volumen dieser Zählkammern kann anschließend auf die Pollenmenge in der Probe und damit in einer Blüte geschlossen werden.

Ein Blütenstand der Silphiepflanzen aus dem Anlagejahr 2005 enthielt durchschnittlich 117 Röhrenblüten ($n=50$), aus dem Anlagejahr 2010 128 Röhrenblüten ($n=50$). Diese Röhrenblüten produzierten wiederum durchschnittlich 14.106 bzw. 14.200 Pollen. Sowohl die Anzahl der Röhrenblüten je Sammelblüte, als auch die Anzahl des Pollen je Röhrenblüte nahmen mit zunehmendem Verzweigungsgrad signifikant ab. Kalkuliert man daraus die Anzahl an Pollen je Sammelblüte, so ergibt sich folglich ein deutlicher Unterschied zwischen den Ordnungen, sodass durchschnittlich 2,0 Mio. Pollen je Sammelblüte (Anlagejahr 2005) bzw. 2,5 Mio. Pollen je Sammelblüte (Anlagejahr 2010) in der zweiten Ordnung sich allmählich verringern auf 1,1 Mio. Pollen in der sechsten Ordnung (beide Anlagejahre) (Abbildung 10). Dieser Unterschied zwischen den Ordnungen ist statistisch signifikant (ANOVA: $F=17,63$, $p<0,001$), der Unterschied zwischen den Beständen unterschiedlicher Anlagejahre ist statistisch nicht signifikant (ANOVA: $F=3,03$, $p=0,85$).

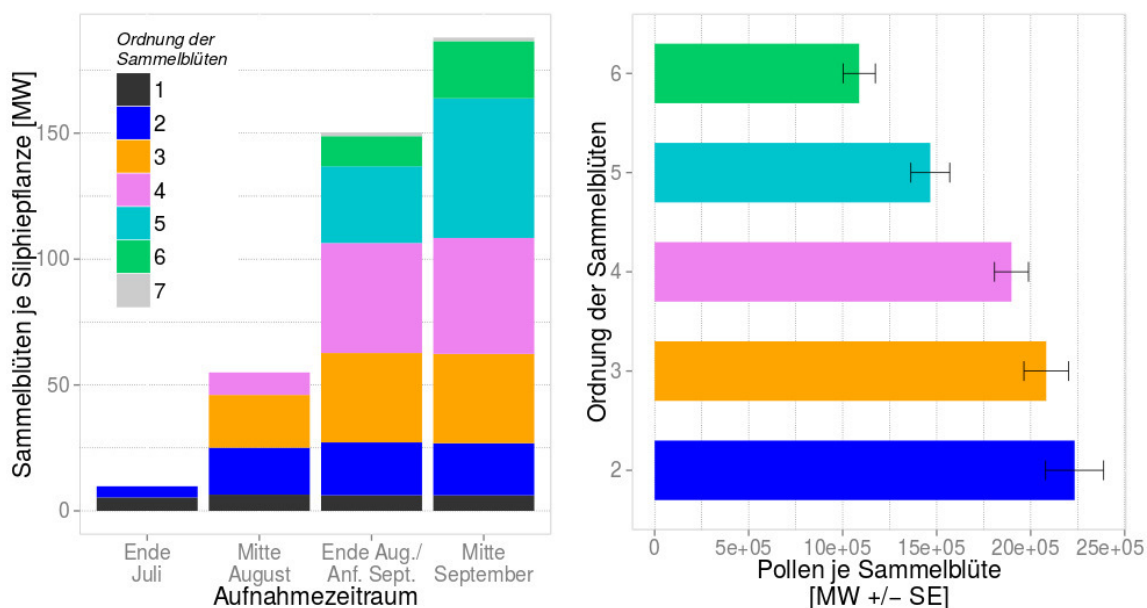


Abbildung 10: Durchschnittliche Anzahl der Sammelblüten je Silphiepflanze ($n=6$ je Standort) und Ordnung, wie sie in den 15 Praxisflächen in Niedersachsen während der Blüte in vier Aufnahmezeiträumen gemessen wurden, im Vergleich zu der Anzahl an Pollen je Sammelblüte und Ordnung, die in Silphiebeständen in Dornburg an zwei Silphiefeldern ermittelt wurden. Da der Unterschied zwischen den Silphiefeldern aus verschiedenen Anlagejahren (2005 und 2010) statistisch nicht signifikant war, sind hier die Mittelwerte aller Proben ($n=20$ je Ordnung) dargestellt.

Wie wirkt sich diese Abnahme der Pollenproduktion mit zunehmendem Verzweigungsgrad auf die Gesamtpollenproduktion aus und steht mit zunehmender Verzweigung einer Silphiepflanze auch weniger Pollen zur Verfügung? Dazu möchten wir auf die Anzahl an Blütenständen je Pflanze verweisen, die auf den niedersächsischen Praxisflächen zu jeder Aufnahmeperiode gezählt wurden (Abbildung 10). Wie hier zu sehen, hängt die Anzahl an Sammelblüten, die eine Silphiepflanze bis zu ihrer Ernte produzierte, vom Erntetermin ab, da etwa die Hälfte der 15 Standorte bei der letzten Aufnahme Mitte September bereits abgeerntet war (vgl. 1.1.1.1). Der Anteil an Blütenständen erster sowie siebter Ordnung war aber zu jedem Erntetermin sehr gering, da ein Haupttrieb jeweils mit nur einem Blütenstand abschließt (bei einem hier ermittelten Durchschnittswert von 6,3 Trieben je Pflanze) und sich nur noch wenige Pflanzen überhaupt bis zur siebten Ordnung verzweigten. Diese Ordnungen wurden deshalb bei der Pollenquantifizierung nicht berücksichtigt. Da sich ein Trieb und jeder neue Seitentrieb immer mehrmals verzweigte, wurden bis Ende August durchschnittlich 21 Blütenstände der zweiten Ordnung, 25 Blütenstände der dritten Ordnung und 44 Blütenstände der vierten Ordnung sowie bereits 30 Blütenstände fünfter Ordnung und 12 Blütenstände sechster Ordnung ausgebildet. Bis Mitte September kamen dann im Schnitt keine Blütenstände zweiter und dritter Ordnung mehr dazu, die Anzahl an Blütenständen vierter Ordnung stieg nur leicht auf durchschnittlich 46 an, dafür konnten aber schon durchschnittlich 55 Blütenstände fünfter Ordnung und noch 23 Blütenstände sechster Ordnung gezählt werden. In Hinblick auf die Verzweigung steht also dem Trend der abnehmenden Anzahl an Pollen je Sammelblüte der Trend einer zunehmenden Anzahl an Sammelblüten je Pflanze entgegen, der je nach Erntetermin bis zur vierten oder fünften Ordnung zu beobachten ist. Nutzt man nun die durchschnittliche Anzahl an Pollen je Ordnung und Sammelblüte, wie sie hier mit Hilfe des Hämocytometers bestimmt wurde, und die durchschnittliche Anzahl an Blütenständen je Ordnung und Pflanze, um zu sehen, welcher der beiden Trends überwiegt, zeigt sich aber, dass unter Annahme dieser Mittelwerte bei beiden Aufnahmen der meiste Pollen von der vierten Ordnung produziert worden wäre (32% bzw. 28% der Gesamtpollenproduktion), während die fünfte Ordnung bis zur letzten Aufnahme zwar die meisten Blütenstände ausgebildet hatte (31% der aller Blütenbestände), aber durch die verringerte Anzahl an Pollen nur 26% der Gesamtpollenproduktion ausmachen würde. Dennoch scheint der Trend der zunehmenden Anzahl an Blütenständen stärker zu sein, und so wurde während der Blüte der vierten Ordnung der meiste Pollen abgegeben. Im Jahr 2012 blühten diese Blütenstände bei den meisten Pflanzen der niedersächsischen Praxisflächen Ende August, bei den Versuchsflächen im thüringischen Dornburg, die schon etwas früher in Blüte gingen, schon Mitte August.

Im Gegensatz zur Pollenquantifizierung, bei der die Röhrenblüten zur späteren Analyse konserviert werden konnten, erfolgte die Nektarquantifizierung direkt im Feld. Deshalb wurde im Jahr 2012 auf einen Silphiebestand mittleren Alters (Anlagejahr 2008) zurückgegriffen, um genügend Nektarproben für einen Vergleich der zeitlichen Nektarsekretion sammeln zu können. Es konnten zwei Aufnahmeperioden durchgeführt werden, eine Anfang August, bei der vor allem Sammelblüten dritter Ordnung blühten, und eine Ende August, bei der gerade hauptsächlich Sammelblüten fünfter Ordnung blühten. Dabei wurden die zu analysierenden Sammelblüten am Tag vor der Beprobung mit Tomatenvlies isoliert (vgl. 1.1.1.6, Abbildung 19). So konnte der Nektar in den Röhrenblüten akkumulieren, ohne von blütenbesuchenden Insekten entnommen zu werden. Zwischen der Zeit, in der sich die Röhrenblüten morgens öffnen, bis zum Abend, wenn sie abfallen, wurden die Nektarsekretion gemessen (ca. 07:00 bis 17:00 Uhr). Zur Nektarentnahme wurde eine Drummond-Mikrokapillarpipette bekannten Volumens (0.25 oder 0.5 μL) genutzt, so konnte anhand der Höhe der Säule des eingesaugten Nektars das entnommene Nektarvolumen berechnet werden. Da nicht ausgeschlossen werden konnte, dass die Röhrenblüte bei dieser Entnahme unverletzt bleibt, wurde nicht eine Röhrenblüte mehrmals am Tag beprobt, sondern bei jeder Entnahme eine neue Röhrenblüte der Sammelblüte verwendet. Die Nektarsekretion selbst kann aber stark von der Temperatur oder der Wasserverfügbarkeit

beeinflusst werden und sagt so nicht zwangsweise etwas darüber aus, wie viel Energie damit in Form von Zucker zur Verfügung steht. Deshalb wurde mithilfe von zwei Refraktometern (Messbereich 0-50 und 50-80 Brix) die Zuckerkonzentration des Nektars gemessen. Mithilfe der Methode von Galetto und Bernardello (2005) kann bei bekanntem Nektarvolumen die Menge an Zucker je Röhrenblüte (Einheit: mg) ermittelt werden. Insgesamt konnte das Nektarvolumen an 201 Röhrenblüten aus 23 Sammelblüten bestimmt werden. An nicht allen dieser Proben gelang die Ermittlung der Zuckerkonzentration, v.a. weil nicht immer das Refraktometer mit dem Richtigen Messbereich genutzt wurde. Die Bestimmung der Zuckermenge erfolgte deshalb an insgesamt 163 Röhrenblüten aus 16 Sammelblüten.

Am Morgen, vor 9:00 Uhr, kurz nach der Öffnung der Blüten war sowohl die Nektar-, als auch die Zuckermenge in einer Röhrenblüte noch relativ gering, und nahm dann bis mittags deutlich zu (Abbildung 11). Während die durchschnittliche Nektarmenge mittags am höchsten war, nahm sie anschließend wieder ab. Im Gegensatz dazu lag die durchschnittliche Zuckermenge, die zwischen 11-13:00, 13-15:00 oder 15-17:00 Uhr gemessen wurde, jeweils bei etwa 0,09 mg je Röhrenblüte (Abbildung 11). Es scheint also so, dass ein Teil des Wassers aus dem Nektar verdunstet oder resorbiert wird, während die Zuckerkonzentration höher wird, der Zucker also in der Röhrenblüte verbleibt. Zwischen den beiden Aufnahmeperioden konnte kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die höchste gemessene Nektarmenge lag bei 0,38 μL und wurde an einer Röhrenblüte eines Blütenstandes fünfter Ordnung um 11:10 Uhr gemessen, die höchste gemessene Zuckermenge lag bei 0,21 mg, und wurde ebenfalls tags zuvor an einer Röhrenblüte eines Blütenstandes fünfter Ordnung um 11:15 gemessen.

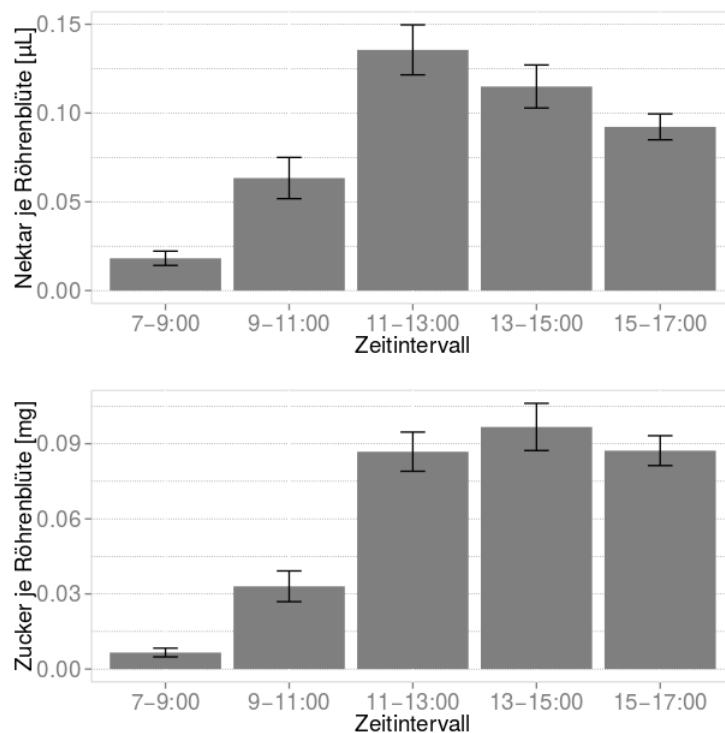


Abbildung 11: Akkumulierte Nektar- und Zuckermengen einer Röhrenblüte über den Tag aus einer vor blütenbesuchenden Insekten isolierten Sammelblüte der Durchwachsenen Silphie.

Die Qualität der floralen Ressourcen wurde im Jahr 2013 an den Silphiebeständen mit Anlagejahr 2010 und 2005 untersucht, die ein Jahr zuvor auch zur Pollenquantifizierung genutzt wurden (s.o.). Je Bestand wurden 9 Proben Nektar und Pollen entnommen, drei je zweiter, dritter

und vierter Ordnung. Diese wurden an das Institute of Neuroscience and School of Biology der Universität Newcastle verschickt. Dort gab es die Möglichkeit, mithilfe einer Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (high performance liquid chromatography, HPLC) den Gehalt von Zucker und Aminosäuren im Nektar sowie den Gehalt von freien und Protein-gebundenen Aminosäuren im Pollen zu analysieren. Die freien Aminosäuren im Pollen wurden durch eine Methanol-Extraktion und die Protein-gebundenen Aminosäuren im Pollen durch eine saure Hydrolyse gewonnen.

Es wurden 21 Protein-gebundene und 20 freie Aminosäuren im Pollen nachgewiesen. Die Summe aller nachgewiesenen Aminosäuren ergab einen durchschnittlichen Gehalt von 95 µg Protein-gebundene Aminosäuren je mg Pollen und 12 µg freie Aminosäuren je mg Pollen (n=18). Es wurden auch mehrere für die Honigbiene essentielle Aminosäuren nachgewiesen. Beispielsweise betrug der Anteil von Arginin an den Protein-gebundenen Aminosäuren 28%. Auch im Zucker wurden 21 Aminosäuren nachgewiesen, davon höhere Prozentanteile der essentiellen Aminosäuren Isoleucin (5%) und Valin (4%). Der Zucker im Nektar setzt sich etwa aus 48% Fruktose und 40% Glukose zusammen.

1.1.1.5 Auswirkungen von Trockenstress auf die Nektarproduktion der Durchwachsenen Silphie und auf den Blütenbesuch durch Bestäuberinsekten

Die Durchwachsene Silphie wird als trockentolerant bezeichnet (Grebe et al. 2012). Dies ist jedoch wissenschaftlich nicht ausführlich belegt. Andere Quellen wie der Natural Resources Conservation Service (NRCS) des Nordamerikanischen Landwirtschaftsamtes (USDA) stufen die Trockentoleranz der Durchwachsenen Silphie in der Wildnis als niedrig ein (NRCS 2015). Nach Pan et al. (2011) braucht die Silphie große Menge an Wasser zur Bewässerung in trockenen Jahren. Auch die im Feldversuch in Braunschweig gewonnenen Erkenntnisse belegen, dass der Wasserbedarf der Silphie als relativ hoch einzustufen ist (1.2.1). Zudem zeigte sich in jenem Feldversuch ein Minderertrag der unbewässerten Silphie gegenüber der bewässerten Variante (1.2.1). Da Wasser auch ein kritischer Faktor für das Wachstum der Knospe, die Öffnung der Blüten, die Nektarproduktion und den Turgordruck der Blütenorgane darstellt (Carroll et al. 2001), wurde im Feldversuch in Braunschweig überprüft, ob Trockenstress bei der Silphie auch Auswirkungen auf das Nahrungsangebot für heimische Bestäuberinsekten hat. Für diese Analyse wurden bewässerte und unbewässerte Silphieparzellen in Bezug auf die Nektarproduktion, Anzahl von Infloreszenzen sowie die Abundanz von Bestäuberinsekten miteinander verglichen.

Es wurden konkret folgende Fragen bearbeitet:

- Beeinflusst das Wasserregime die Nektarproduktion und den Zuckergehalt des Nektars?
- Beeinflusst das Wasserregime die Anzahl an Infloreszenzen?
- Werden die bewässerte oder die unbewässerte Variante von Bestäuberinsekten unterschiedlich bevorzugt?
- Wie verhalten sich die Insekten an der Blüte? Wie hoch ist ihr Beflughrhythmus? Und wie lange halten sich verschiedene Bestäuberinsekten an der Blüte der jeweiligen Varianten auf?

Die Erhebungen dieser Studie fanden auf Versuchsflächen des TV2 am Standort Braunschweig statt, welche im Abschnitt 1.2.1 detailliert dargestellt werden. Der Zeitraum der unterschiedlichen Erfassungen erstreckte sich von der 27. bis zur 32. Kalenderwoche (KW) des Jahres 2014. Für die Versuchsreihe wurden sechs der acht Einheiten genutzt, mit jeweils drei Parzellen pro Variante. Das sind in der Abbildung 12 die Felder mit den Nummern 2, 3, 4, 5, 6 und 8. Wegen des großen Zeitaufwands der Erhebungen war es nicht möglich, alle acht Felder zu berücksichtigen. Aussortiert wurden die Parzellen Nummer 1 und 7. Bei Parzelle Nr.1 erfolgte die Auslese aufgrund der Verortung empfindlicher Messinstrumente und bei Parzelle Nr. 7 wegen der nicht vorhandenen Nachbarschaft von einer Silphie- und einer Maisparzelle.

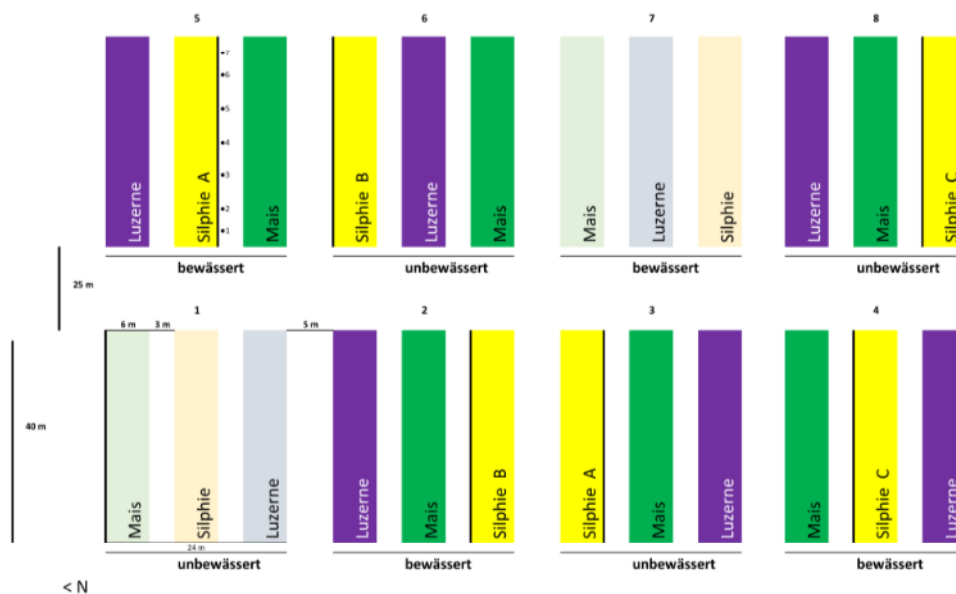


Abbildung 12: Plan des Versuchsfeldes am Standort Braunschweig. Die Erhebungen konzentrierten sich auf die Silphieparzellen mit der Nr. 2, 3, 4, 5, 6 und 8. Die Parzellen mit der Nr. 1 und 7, in dieser Abbildung heller dargestellt, wurden bei den Erhebungen nicht berücksichtigt. Die Erhebungen fanden an Silphieparzellen statt, die an Maisparzellen angrenzen. Sie sind jeweils mit einer dickeren Linie abgebildet. Exemplarisch dargestellt sind auf Feld Nr.5 die markierten Pflanzen auf den jeweiligen Parzellen. Die Buchstaben repräsentieren die bewässerte und unbewässerte Variante, die jeweils am gleichen Tag aufgenommen wurden.

Alle Erhebungen wurden am Rand dieser Parzellen getätigt. Messungen in den inneren Bereichen der Parzellen wurden nicht durchgeführt. Dies geschah um Beschädigungen der Pflanzen zu minimieren und um zu verhindern, dass andere Erhebungen und Messungen, die im TV2 durchgeführt wurden, beeinflusst werden. Um die Varianten trotzdem vergleichbar zu halten wurden die Silphieparzellen so ausgewählt, dass sie immer an eine Maisparzelle angrenzten. Da aus zeitlichen Gründen an einem Untersuchungstag immer nur eine der bewässerten und eine der unbewässerten Plots für die Erfassungen genutzt werden konnten, wurden drei Gruppen gebildet, bei denen die Varianten einer Gruppe immer nach derselben Himmelsrichtung ausgerichtet waren (siehe Abbildung 12: Gruppe A: Einheit 3 und 5, Gruppe B: Einheit 2 und 6, Gruppe C: Einheit 4 und 8). So wurde von Untersuchungs- zu Untersuchungstag zwischen den Gruppen rotiert. Pro Parzelle wurden sieben Silphiepflanzen markiert, um deren Entwicklung über die Blühperiode zu verfolgen. Wie oben erwähnt lagen alle Pflanzen an dem Längsrand des Versuchsfeldes innerhalb einer Linie, die an eine mit Mais angebaute Parzelle angrenzte. Die Abstände zwischen den Pflanzen wurden so gut es ging einheitlich gewählt. Dies ist exemplarisch für Feld 5 in Abbildung 12 dargestellt. Ab der 27. Kalenderwoche wurde die Anzahl der Sammelblüten pro Trieb und Triebe pro Pflanze wöchentlich aufgenommen. Da die unbewässerte Variante schon am Ende der 31. KW geerntet wurde, war diese somit die letzte Erfassung dieser Variante. Die Bewässerte Variante hingegen wurde am Anfang der 33. KW geerntet. Zusätzlich wurde pro Versuchsparzelle die Anzahl von blühenden Infloreszenzen an sieben jeweils 1 m² große Einheiten mit Hilfe eines Holzrahmens erfasst. Hierzu wurden konstante Erhebungspunkte an der rechten Seite der vor Beginn der Bonitur markierten Einzelpflanzen gewählt.

Darüber hinaus wurden wöchentlich vier Sammelblüten pro Parzelle für das Labor geerntet, um die Anzahl an Röhrenblüten und Zungenblüten je Sammelblüte zu zählen. Die Sammelblüten der

ersten Ordnung wurden in der 29. KW, der zweiten Ordnung in der 30. KW und der dritten Ordnung in der 31. KW gesammelt.

Die Quantifizierung von Nektar und Zucker je Röhrenblüte mithilfe von Mikrokapillarpipetten und zwei Refraktometern verschiedener Messbereiche fand, wie in 1.1.1.4 beschrieben, an vorher isolierten Sammelblüten statt. Zwischen 12 und 14 Uhr eines Erfassungstages wurden die Nektar- und Zuckerproduktion jeweils an einer bewässerten und einer unbewässerten Parzelle einer der o.g. Gruppen gemessen. Wurde an einem Tag mit der unbewässerten Variante begonnen, so wurde am folgenden Tag getauscht und die bewässerte Variante wurde zuerst beprobt.

Zur Beobachtung und Quantifizierung des Blütenbesuchs wurden die Bestäuberinsekten in folgende Kategorien aufgeteilt: Honigbiene (*Apis mellifera*); Hummeln (*Bombus*), Schwebfliegen (*Syrphidae*) und andere Insekten (andere Hymenoptera, Lepidoptera, etc.). Zur Erfassung der Frequenz des Blütenbesuchs wurden jeweils zehn Sammelblüten gleichzeitig, von einem festen Blickpunkt aus, beobachtet. Pro Parzelle wurden drei Erhebungspunkte gewählt, um die Variabilität innerhalb der Versuchsparzelle zu berücksichtigen. Das Beobachten pro Erhebungspunkt dauerte 5 Min., insgesamt also 15 Min. pro Parzelle. Es wurden die tatsächlichen Landungen von Insekten auf den Sammelblüten aufgenommen. Alle Individuen, auch diejenigen, die öfters innerhalb des Blickfeldes landeten, wurden notiert. Diese Beobachtungen wurden an jedem Erhebungstag an einer Gruppe, also einer bewässerten und einer unbewässerten Variante sowohl vormittags als auch nachmittags zwischen 09:00 – 17:00 Uhr durchgeführt, wenn die Temperatur > 18° C und die Windstärke < 3 Bft betrug. Zwischen der 29. und der 31. KW wurden insgesamt acht Erhebungen nachmittags und sechs vormittags durchgeführt. Dies entspricht insgesamt 84 Zählungen bzw. 42 Zählungen pro Variante. Weitere Details zur Methodik finden sich in Berger (2015).

In der 27. KW gingen die ersten Infloreszenzen auf den Versuchsfeldern auf. Im Durchschnitt wurden 0,14 blühende Infloreszenzen/qm (0-2, n=21) bei der bewässerten Variante und 0,33 blühende Infloreszenzen/m² (0-7, n=21) bei der unbewässerten Variante gezählt. In der 28. KW waren es 2,1 (0-6, n=21) blühende Infloreszenzen/m² bei der bewässerten Variante und 4,29 (0-32, n=21) blühende Infloreszenzen/m² bei der unbewässerten Variante. Der Trend einer höheren Anzahl von Infloreszenzen bei der unbewässerten Variante, verglichen mit der bewässerten Variante, blieb bis in die 29. KW bestehen. Die höchste durchschnittliche Anzahl an geöffneten Infloreszenzen wurde in der 30. KW mit 31,38 (12-67, n=21) bei der bewässerten und mit 16,24 (5-30, n=21) bei der unbewässerten Variante erreicht. Ab dieser KW ist die Anzahl von Blütenstände/m² höher bei der bewässerten Variante. Ab der 31. KW nimmt die Gesamtanzahl von Infloreszenzen ab. In der 32. KW wurde die unbewässerte Variante geerntet und damit der Vergleich beendet (Abbildung 13).

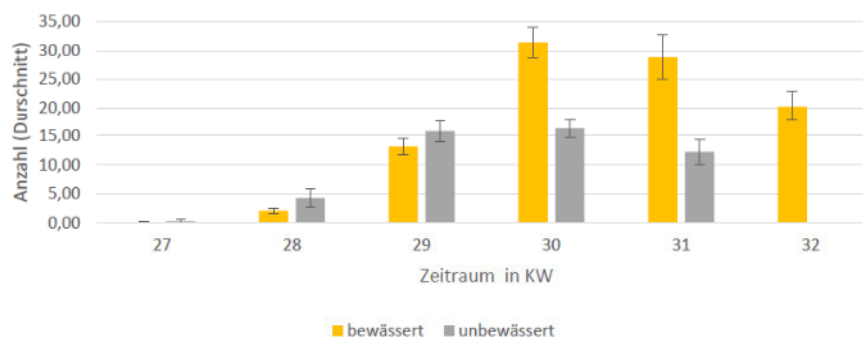


Abbildung 13: Anzahl blühender Infloreszenzen/m² der Durchwachsenen Silphie über den Zeitraum von der 27. bis zur 32. KW, 2014 im Feldversuch am Standort Braunschweig. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler an.

Neben diesem aktuellen Blütenangebot eines Bestandes wurde auch die Anzahl an insgesamt produzierten Sammelblüten je Pflanze stark von dem zur Verfügung stehenden Wasser beeinflusst. Während sich die Anzahl der Triebe je Pflanze zwischen den Varianten nicht unterschied (durchschnittlich 14 Triebe je Pflanze), hatte bis zur 31.KW, der letzten Aufnahme vor der Ernte der unbewässerten Variante, ein Trieb dieser Variante im Schnitt 2.6 Sammelblüten produziert, ein Trieb der bewässerten Variante im Schnitt 5.1 Sammelblüten. Bis zu der letzten Aufnahme der bewässerten Parzellen konnten die Triebe durchschnittlich weitere 2.6 Sammelblüten produzieren, sodass die Anzahl der insgesamt ausgebildeten Sammelblüten pro Trieb bis zur Ernte bei der unbewässerten Variante nur etwa einem Drittel der Anzahl der bewässerten Variante entsprach.

Die Pflanzen der bewässerten Variante hatten im Durchschnitt 193 (152-259, n=12) Röhrenblüten pro Infloreszenz der ersten Ordnung (Verzweigungsgrad), 145 (105-202, n=12) Röhrenblüten pro Infloreszenz der zweiten Ordnung und 146 (107-214, n=12) Röhrenblüten pro Infloreszenz der dritten Ordnung gebildet. Die Pflanzen der unbewässerten Variante hatten je Infloreszenz 174 (120-249, n=12) Röhrenblüten in der ersten, 151 (100-221, n=12) in der zweiten und 132 (99-178, n=12) in der dritten Ordnung gebildet. Das Bewässerungsregime hatte dabei keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Anzahl an Röhrenblüten je Blütenstand ($F=0,56$, $n=72$, $p=0,49$). Bei der unbewässerten Variante wurde oft die Bildung abnormaler Infloreszenzen beobachtet. Diese konnten sich nicht normal öffnen. Öfters waren die Zungenblüten wenig entwickelt oder nicht alle Röhrenblüten konnten sich entfalten (Abbildung 14).



Abbildung 14: Beispiele für vertrocknete Sammelblüten (links) und nicht ganz ausgebildete Blütenstände (rechts) in der unbewässerten Variante am Standort Braunschweig in der 30. KW.

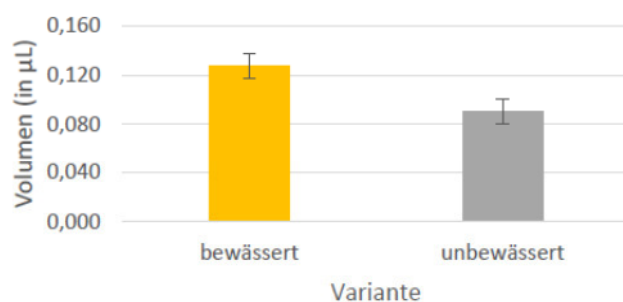


Abbildung 15: Durchschnittliches Nektarvolumen in µl pro Röhrenblüte. Vergleich zwischen der bewässerten und unbewässerten Variante am Standort Braunschweig. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler an.

Das Nektarvolumen zeigte statistisch signifikante Unterschiede zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten ($F=5,98$, $n=76$, $p=0,02$; Abbildung 15). Die bewässerte Variante enthielt ein höheres Nektarvolumen. Der Vergleich des Zuckergehalts pro Röhrenblüte der bewässerten und unbewässerten Varianten ergab keinen statistisch signifikanten Unterschied ($F=3,96$, $n=76$, $p=0,05$). Pro Röhrenblüte enthielt der Nektar in der bewässerten Variante im Mittel 0,0983 (0,033-0,227, n=38) mg Zucker und in der unbewässerten Variante im Mittel 0,078 (0,00-0,260, n=37) mg Zucker.

Bei der Beobachtung der Frequenz des Blütenbesuchs wurden insgesamt 805 Individuen gezählt (inklusive der Kategorie „andere Insekten“), von denen 487 (60%) an der bewässerten Variante und 318 (40%) an der unbewässerten Variante erfasst wurden. Der Durchschnitt bei der bewässerten Variante war 11,79 (5-27, $n=42$) Individuen an 10 Sammelblüten innerhalb von 15 Minuten und bei der unbewässerten Variante 8,27 (0-19, $n=42$). Das Bewässerungsregime hatte einen statistisch signifikanten Effekt ($F=13,29$, $n=84$, $p=0,002$). Mit 348 Individuen (43% der insgesamt erfassten Insekten) war die Honigbiene die am häufigsten beobachtete Blütenbesucherin. In der bewässerten Variante wurden 239 Individuen (69%) erfasst und 109 Individuen (31%) in der unbewässerten Variante. Im Mittel war der Blütenbesuch durch Honigbienen in der bewässerten Variante signifikant höher als in der unbewässerten Variante ($F=21,83$, $n=42$, $p=0,0002$) (Abbildung 16). Die Hummeln waren mit 214 gezählten Individuen die am zweithäufigsten erfasste Gruppe auf den beobachteten Blütenständen. Das entspricht 27% der insgesamt erfassten Insekten. Die Hummeln zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede im Blütenbesuch der Bewässerungsregime ($F=0,65$, $n=42$, $p=0,43$) (Abbildung 16). An Schwebfliegen (Syrphidae) wurden 157 Individuen gezählt. Das repräsentiert 19% der insgesamt erfassten Insekten. In der bewässerten Variante wurden 79 (50,31%) Individuen erfasst, sowie 78 (49,68%) in der unbewässerten Variante. Die Unterschiede sind nicht statistisch signifikant ($F=0,23$, $n=42$, $p=0,64$).

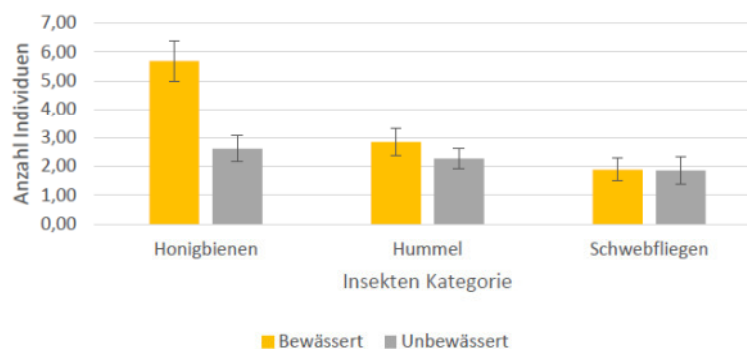


Abbildung 16: Durchschnittliche Anzahl an Blütenbesuchen durch Honigbienen, Hummeln und Schwebfliegen auf 10 Blütenständen der Silphie pro 15 min. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler an.

Die Studie zeigte, dass Trockenstress einen Einfluss auf die Durchwachsene Silphie als Nahrungsressource für blütenbesuchende Insekten hat. Die Unterschiede zwischen den zwei untersuchten Bewässerungsregimen zeigten sich sowohl in der Anzahl der gebildeten Infloreszenzen, im Nektarvolumen pro Röhrenblüte und der Frequenz des Blütenbesuchs durch Honigbienen.

Interessanterweise ergab die Nektarbeprobung, dass es signifikante Unterschiede zwischen den Wasserregimen bezüglich des Nektarvolumens gibt, aber nicht bezüglich der Zuckermenge. Ähnliche Ergebnisse gab es bei einer Studie über Trockenstress bei *Epilobium angustifolium* (Carroll et al. 2001). Diese zeigte signifikante Unterschiede bei Nektarquantität und Blütengröße zwischen Varianten, die unter Wassermangel litten und die genügend Wasser zu Verfügung hatten, aber es zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Varianten hinsichtlich der Zuckerkonzentration. Bei mehreren Studien mit *Echium vulgare* wurde festgestellt, dass eine höhere Nektarproduktion pro Blüte durch genetische Faktoren oder Umweltfaktoren wie Wasserverfügbarkeit beeinflusst werden kann (Leiss und Klinkhammer 2005). Scheinbar produzieren die Pflanzen bei genügend Wasser dünnflüssigen Nektar. Wenn Wassermangel herrscht, wird weniger Wasser zur Nektarproduktion investiert. Eine direkte Korrelation zwischen den Tagen an denen die Versuchsfelder bewässert wurden und dem Nektarvolumen, ist in dieser Arbeit nicht abzulesen, da die bewässerten Silphiebestände nicht unter Trockenstress litten.

Der Trockenstress wirkt sich also nicht auf die Menge an Energie aus, die eine einzelne Sammelblüte zur Verfügung stellt, da der Vergleich der Menge an Zucker je Röhrenblüte als auch der Anzahl an Röhrenblüten je Sammelblüte keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den bewässerten und unbewässerten Varianten ergab. Der Trockenstress wirkt sich aber deutlich auf die gesamte Produktion von Nahrungsressourcen aus, da deutlich weniger Sammelblüten je Pflanze der unbewässerten im Vergleich zur bewässerten Variante produziert wurden. Pflanzen in der unbewässerten Variante öffneten in den ersten drei Wochen der Boniturperiode eine höhere Zahl von Sammelblüten pro Quadratmeter als in der bewässerten Variante. Das könnte auch ein Indiz für Trockenstress sein, denn eine frühe Blüte ist eine Strategie, die bei Wassermangel das Überleben einer Pflanze gewährleisten kann (Schmalenbach et al. 2014). Die bewässerte Variante andererseits wuchs in dieser Zeit erst weiter in die Höhe um später mehr Sammelblüten zu entfalten. Die unbewässerte Variante beendete die Blüte früher und die bewässerte Variante blühte bis zur Ernte in der 33. KW.

Die bevorzugte Nutzung dichter, großer Blütenbestände durch die Honigbiene, aber auch durch Hummeln, wird durch zahlreiche Arbeiten belegt (z.B. Ginsberg 1983, Sudgen et al. 1996). Nach Nielsen et al. (2012) besuchen Honigbienen größeren Pflanzenbestände häufiger, während Schwebfliegen häufiger in weniger dichten Pflanzenbeständen auftreten. Das stimmt teilweise mit den Ergebnissen dieser Studie überein, da mehr Individuen von Honigbienen bei der bewässerten Variante erfasst wurden als in der unbewässerten Variante. Die Anzahl an Schwebfliegen differenzierte sich hingegen nicht, was für keine eindeutige Präferenzen der Familie zu größeren Blütenbeständen spricht. Es lässt sich vermuten, dass die Frequenz des Blütenbesuchs, insbesondere durch Honigbienen, mit der Anzahl von Blütenständen pro m² in Verbindung steht. Die unbewässerten Silphiefelder hatten ab der 30. KW ein niedrigeres Angebot an Blüten, was auch die geringere Anzahl an Blütenbesuchen erklären könnte. Die Zahl an Infloreszenzen pro m² könnte einen größeren Einfluss auf die Anzahl von erfassten Insekten haben als die Nektarproduktion. Klinkhammer und van der Lugt (2004) zeigten für dichte *Echium vulgare*-Bestände, dass es abgesehen von der Anzahl an Blüten, keine direkten Auswirkungen der Nektarproduktion auf das Verhalten von Bestäubern gab.

Ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Bedeutung als Nahrungsressource für Blütenbesucher ist der Zeitpunkt der Ernte. Wenn diese schon, wie in diesem Versuch, vor dem Ende der Blühperiode in der 32. bzw. in der 33. KW erfolgt, kann nicht das ganze Nahrungsangebot von den Insekten ausgeschöpft werden.

1.1.1.6 Bestäubungsökologische Aspekte der Durchwachsenen Silphie

Derzeit stellt eine begrenzte Saatgutverfügbarkeit eines der Hemmnisse für die Ansaat der Silphie dar (Biertümpfel und Conrad 2012). Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob bzw. inwieweit die Silphie für die Samenproduktion auf Insektenbestäubung angewiesen ist.

Die Zungenblüten, die in äußeren Ringen den Blütenstand der Durchwachsenen Silphie umgeben, tragen die Samenanlagen (ein entwicklungsfähiger Samen pro Zungenblüte). Voraussetzung für eine erfolgreiche Saatgutherstellung ist nun eine vorherige Bestäubung der Zungenblüten, also eine Übertragung des Pollens aus den Röhrenblüten auf die Griffel der Zungenblüten. Das Verständnis dieser Übertragungsmechanismen ist deshalb elementar wichtig, um mögliche Bestäubungsdefizite zu erkennen und notfalls regulierend eingreifen zu können, um das volle Saatgutpotenzial der Pflanze ausschöpfen zu können. Deshalb wurde zum einen untersucht, wann die Präsentation der Pollen und der Griffel stattfinden und inwieweit sich diese Präsentationen überlappen und zum anderen, wie die Übertragung des Pollens erfolgt, also abiotisch (z.B. durch Wind), oder biotisch (durch Insekten).

Dazu wurden im Jahr 2012 am Standort Dornburg in einem Silphiefeld des Anlagejahres 2010 zunächst 10 Blütenstände der 2. Ordnung markiert. Ab dem ersten Tag der Blüte, also wenn

mindestens eine Röhrenblüte einer Sammelblüte geöffnet war, wurden diese täglich morgens und abends fotografiert. Wie bereits unter 1.1.1.4 erwähnt, blüht eine einzelne Röhrenblüte nur einen Tag lang, sodass jeden Tag neue „Ringe“ an Röhrenblüten aufgehen. Deren Blüte zeichnet sich dadurch aus, dass Nektar und Pollen abgegeben werden. Demgegenüber kann eine Zungenblüte mehrere Tage lang blühen, d.h. der Griffel ist geöffnet und empfängnisbereit, also nicht verwelkt. Anhand der Dokumentation konnten nun drei verschiedene Blühphasen definiert werden, um den Blühverlauf einer Sammelblüte beschreiben zu können (Abbildung 17).



Abbildung 17: Die Blüte einer Sammelblüte der Durchwachsenen Silphie wurde in drei Phasen eingeteilt, je nachdem, ob nur die Röhrenblüten blühen während die Zungenblüten entweder noch nicht blühen oder schon verwelkt sind oder sowohl Röhren- als auch Zungenblüten gleichzeitig blühen.

Der Ablauf der Blüte einer Sammelblüte der Durchwachsenen Silphie ist in Abbildung 18 dargestellt. Insgesamt dauerte die Blühphase einer Sammelblüte im Schnitt 8,7 Tage (7-13 Tage). Am ersten Tag der Blüte durchliefen 8 der 10 Sammelblüten Blühphase 1, es wurden also die ersten Röhrenblüten geöffnet, während die Zungenblüten noch geschlossen waren. Besonders interessant ist nun Blühphase 2, denn hier sind sowohl die Röhrenblüten geöffnet und dazu einige bis alle Griffel der Zungenblüten. In dieser 2. Blühphase kann also die Bestäubung innerhalb einer Sammelblüte stattfinden. Diese Phase dauert 3-4 Tage. Wie zu sehen, waren in dieser Zeit auch die meisten Röhrenblüten gleichzeitig geöffnet. Blühphase 3, in der bereits alle Griffel verwelkt waren, aber immer noch Röhrenblüten geöffnet wurden, dauerte im Schnitt 4,5 Tage (3-8 Tage). Der Pollen dieser Röhrenblüten konnte also nur noch zur Bestäubung anderer Blütenstände von Nutzen sein.

Die hohe Anzahl an pollenproduzierenden Röhrenblüten während der Zeit, in der die Zungenblüten geöffnet waren ist ein Hinweis darauf, dass die Übertragung des Pollen auf die Griffel innerhalb einer Sammelblüte abiotisch, also einfach durch das Herabfallen des Pollens, stattfinden könnte. Andererseits ist vorstellbar, dass das Bestäubungspotenzial nur voll ausgeschöpft werden könnte, wenn eine gezielte Übertragung durch Insekten erfolgt, da am Ende der Blühphase noch Pollen produziert wurde, obwohl die Griffel der eigenen Sammelblüte bereits verwelkt waren.

Um die Bedeutung der Insektenbestäubung für den Samenansatz der Silphie zu testen, wurde auf dem Feldversuch des TV2 in Braunschweig (1.2.1) ein Bestäubungsexperiment durchgeführt. Für das Experiment wurde ein Silphie-Plot der bewässerten Variante ausgewählt um mögliche Einflüsse von Trockenstress auf den Samenansatz auszuschließen. In dem Experiment sollten zwei Hauptvarianten getestet werden: Zum einen die Bestäubung innerhalb einer Sammelblüte unter Ausschluss von blütenbesuchenden Insekten (S), zum anderen die offene Bestäubung (O).

Für Variante S wurden einzelne Sammelblüten kurz vor dem Öffnen der ersten Zungen- und Röhrenblüten vor potenziellen Bestäubern mit Beuteln aus Tomatenvlies isoliert. Ein Drahtgestell, das an einer Dachlatte befestigt wurde, verhinderte den Kontakt der Blüten mit dem Vlies (Abbildung 19). Die Beutel wurden bis zum Heranreifen der Samen um die Sammelblüten belassen, um ein Herabfallen der Samen zu verhindern.

Für die Variante O konnten die Sammelblüten frei abblühen und waren so für Bestäuber zugänglich. Dafür wurden die Sammelblüten nur markiert und erst nach der Blüte ebenfalls mit Vliesbeuteln versehen, um ggf. herausfallende Samen aufzufangen.

Zusätzlich zur offenen Bestäubung wurde eine Variante B getestet, bei der einzelne Sammelblüten zwar isoliert wurden, der Insektenbesuch dann aber unter Beobachtung zugelassen wurde. Diese Beobachtungen wurden an fünf aufeinanderfolgenden Tagen vom 20. bis 25. Juli 2015 jeweils zwischen 8.00 und 12.00 Uhr durchgeführt. An jedem dieser Tage wurden Sammelblüten, bei denen die Zungenblüten ihre Griffel präsentierten, für 20min aus den Beuteln ausgepackt und die Anzahl sowie die jeweilige Dauer der Besuche aufgenommen. Die Bestäuber wurden hierbei nach Großgruppen getrennt gezählt (Honigbiene, Wildbiene, Schwebfliege, Hummel etc.) und teils näher in Morphotypen (Steinhummel, Erdhummel, Ackerhummel; kleine oder große Schwebfliege) spezifiziert. Durch die genaue Kenntnis der Insektenaktivität auf einer Sammelblüte wird die Bestäubungsleistung durch Insekten quantifizierbar.

Insgesamt wurden neun Pflanzen an den beiden Längsseiten des Feldes randomisiert ausgesucht. Für Variante S und O wurden jeweils 2 Blütenstände pro Pflanze genutzt, für die zeitaufwendige Variante B konnten nur eine Sammelblüte je Pflanze verwendet werden.

Nach dem Heranreifen der Samen erfolgte die Auszählung der tauben Samen und Samen mit entwickelten Embryonen. Eine Unterscheidung war durch einfaches Abtasten der Samen

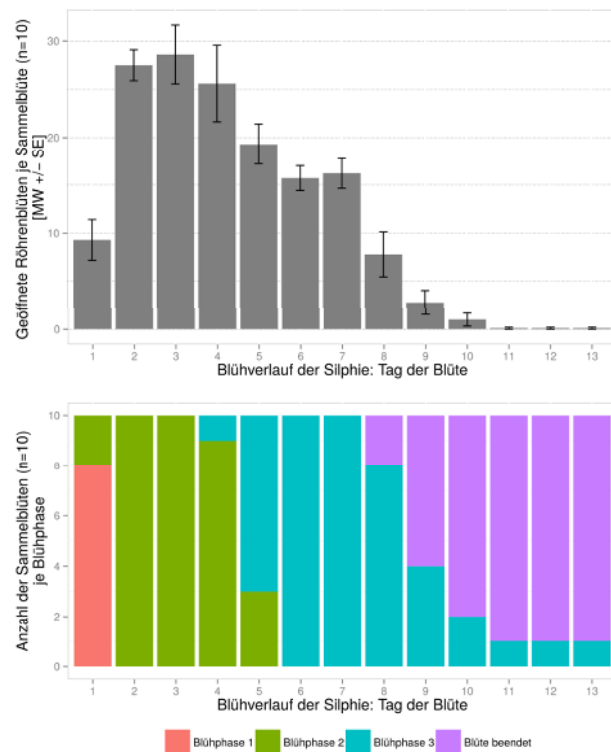


Abbildung 18: Ablauf der Blüte einer Sammelblüte der Durchwachsenen Silphie. Dargestellt sind die Anzahl der blühenden Röhrenblüten je Sammelblüte (oben) und Tag sowie Anzahl der Sammelblüten je Blühphase und Tag (unten).

möglich. So konnte der prozentuale Anteil der Samen mit entwickelten Embryonen an der Gesamtzahl der Samenanlagen berechnet werden.

Insgesamt konnten 34 der 45 Blütenstände ausgezählt werden. Bei den restlichen Blütenständen konnte aus verschiedenen Gründen (u.a. Abriss des Blütenstandes durch Wind oder Schimmelbefall) keine Auswertung stattfinden. Sammelblüten der offenen Bestäubungsvariante (O) bildeten im Schnitt etwa 40% mehr Samen aus als dauerhaft isolierte Sammelblüten der Variante S. Es kam also innerhalb einer Sammelblüte auch ohne die Aktivität von Insekten zur Bestäubung der Zungenblüten, die Gesamtbestäubung wurde durch die Isolation aber signifikant herabgesetzt (Tabelle 1). Da aber die Vliesbeutel den Pollenanflug durch Wind beeinträchtigen können, kann in

diesem Experiment nicht eindeutig zwischen der Bedeutung der Wind- und der Insektenbestäubung differenziert werden. Aber auch Sammelblüten der Variante B, welche nur zeitweise für blütenbesuchende Insekten geöffnet wurden, aber sonst wie die vollständig isolierten Sammelblüten der Variante S mit Vlies umhüllt waren, zeigten interessanterweise eine ebenso hohe Bestäubungsrate wie die Sammelblüten der Variante O (Tabelle 1). Dies weist auf eine hohe Bedeutung der bestäubenden Insekten hin, auch wenn zumindest in kleinerem Umfang die Übertragung des Pollens auf die Griffel durch „Schütteln“ der Sammelblüte beim Öffnen und Schließen des Vliesbeutels für die Beobachtungen verursacht worden sein könnten. Die Aktivität von Hummeln (205 von insgesamt 277 beobachteten Blütenbesuchen, davon 138 durch Steinhummeln) war deutlich höher als die von Honigbienen (41 Blütenbesuche), obwohl acht Bienenstöcke in unmittelbarer Nähe des Versuchsfeldes standen (vgl. jedoch Ergebnisse zum Blütenbesuch in 1.1.1.5). Diese Beobachtung unterstreicht die Bedeutung der Silphie als Trachtpflanze für Hummeln und umgekehrt die Bedeutung der Hummeln für die Bestäubung der Silphieblüten.



Abbildung 19: Verpackung der Blütenstände der Varianten S und B des Bestäubungsversuchs vor dem Aufblühen mit Beuteln aus Tomatenvlies. Ein Drahtgestell verhindert den Kontakt der Blüten mit dem Vlies. Dies wurde zusätzlich an Dachlatten befestigt, um ein Abknicken der Blütenstände durch das zusätzliche Gewicht des Vliesbeutels zu verhindern.

Tabelle 1: Mittlerer, prozentualer Anteil der Samen mit entwickelten Embryonen an der Gesamtanzahl an entwicklungsfähigen Samen einer Sammelblüte für die Varianten offene Bestäubung (O; n=18), Bestäubung nur innerhalb der Sammelblüte unter Ausschluss von Insekten (S; n=18) und Bestäubung mit Beobachtung des Blütenbesuchs (B; n=9).

Variante	Mittlerer Anteil an Samen mit entwickelten Embryonen (%)	Standardabweichung
O	85,7	12,6
S	46,3	16,3
B	85,3	14,4

Dem Wissen darüber, dass die Bestäubung innerhalb einer Sammelblüte abiotisch erfolgen kann, aber durch den Beflug von Insekten noch deutlich erhöht wird, soll noch ein weiterer Aspekt zur Seite gestellt werden. Dazu möchten wir noch einmal zu der Anzahl an produziertem Pollen je Sammelblüte zurückkehren (siehe 1.1.1.4): Wie erwähnt, nimmt die Anzahl an produziertem Pollen einer Sammelblüte mit zunehmendem Verzweigungsgrad ab. Demgegenüber bleibt aber die Anzahl der Zungenblüten mit durchschnittlich 25 +/- 4,1 (SD) (zweite Ordnung: 27 +/- 5,6, sechste Ordnung: 24 +/- 3,7) einigermaßen stabil. Deshalb wird das Verhältnis von Pollen zu Samenanlagen mit zunehmendem Verzweigungsgrad der Silphiepflanze enger, es stehen also weniger Pollen je Samenanlage zur Verfügung. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Bedeutung der Insektenbestäubung am Ende der Silphieblüte noch einmal deutlich zunehmen kann.

Die in diesem einfachen Bestäubungsexperiment erzielten Ergebnisse legen nahe, dass sich ein umfangreicheres Experiment zur Quantifizierung der Bestäubungsleistung und Ertragssteigerung für die Samengewinnung der Silphie lohnen würde. Hieraus könnten dann konkrete Maßnahmen zur Förderung der Bestäubung erarbeitet und im ökonomischen Kontext bewertet werden.

1.1.1.7 Untersuchung der Habitatqualität der Silphie für Nützlinge (epigäische Raubarthropoden, Parasitoide) und Schädlinge

Im Rahmen des Freilandversuchs des TV2 in Braunschweig (siehe 1.2.1) wurden die Pflanzenbonituren mit einer Bonitur des Befalls der Silphie durch Schadinsekten verbunden. Hierbei konnte kein Befall durch Blattläuse oder andere Schädlinge ermittelt werden. Auch bei allen anderen Untersuchungen auf den Praxisflächen in Niedersachsen und Thüringen konnte kein Befall mit Schadinsekten nachgewiesen werden.

Durch diesen Befund relativierte sich für unser Projekt die Frage nach dem Vorkommen von natürlichen Gegenspielern in der Silphie. Die für 2013 auf den Standorten der RuheAgrar geplanten Erfassungen der epigäischen Raubarthropoden überschneiden sich zudem mit nahezu identischen Erfassungen, die im Rahmen des Projekts EVA III auf diesen Flächen ablaufen sollten. Um Doppelbeprobungen zu vermeiden, wurde daher diese Fragestellung in unserem Projekt zugunsten der intensiveren Bearbeitung anderer Themenbereiche (1.1.1.3, 1.1.1.5 und 1.1.1.6) zurückgestellt. Die Ergebnisse der Beprobung im Rahmen von EVA III sind in Glemnitz et al. (2014) nachzulesen.

1.1.1.8 Erfassung des Ackerwildkrautspektrums in Silphiebeständen

Eine ökologischer Vorteil der Durchwachsene Silphie besteht darin, dass diese perennierende Pflanze, welche bis zu 15 Jahre lang auf einer Fläche genutzt werden kann (Gansberger et al. 2015), nach erfolgreicher Etablierung aufgrund eines raschen Bestandsschlusses in der Lage ist Ackerwildkräuter zu unterdrücken und daher nach erfolgreicher Etablierung keiner Herbizidanwendungen bedarf, zumindest nach dem derzeitigen Kenntnisstand (Gansberger et al. 2015). Lediglich im Anpflanzjahr ist die Jungpflanze sehr konkurrenzschwach und ein Freihalten der Fläche von Unkraut, mechanisch, durch Pflanzenschutzmittel oder einer Kombination beider Maßnahmen ist unabdingbar (Gansberger et al. 2015, Biertümpfel und Conrad 2012, TLL 2013). Dieser Anbaustrategie liegt die Hypothese zu Grunde, dass durch standortangepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen im ersten Anbaujahr die Voraussetzung für eine herbizidfreie Bewirtschaftung in den Folgejahren geschaffen wird. Die dann auftretenden Beikräuter werden toleriert, da sie durch den dichten Bewuchs der Silphie zwischen Mai und Juni auf eine natürliche Weise wieder verdrängt werden. Aufgrund dieser Toleranz ist zu erwarten, dass sich in Silphiebeständen eine Ackerbegleitflora etablieren kann, welche auf jene Segetalarten beschränkt ist, die sich außerhalb der Vegetationsperiode der Silphie auf dem Feld entwickeln können.

Die Vegetationsaufnahmen zur Ackerbegleitflora wurden auf insgesamt 19 Praxisflächen in Niedersachsen Anfang Mai 2012 durchgeführt. Eine der 20 Flächen, die insgesamt zur Verfügung standen (siehe 1.1.1.1 und Abbildung A1) konnte zu dieser Zeit, nach Absprache mit dem Landwirt, aus terminlichen Gründen nicht genutzt werden. Die Silphie befand sich auf allen Flächen im zweiten Anbaujahr. Die Aufnahmen wurden entlang von Transekten durchgeführt welche zwischen den Reihen der Durchwachsenen Silphie lagen. Je nach Reihenabstand auf den Feldern, welcher zwischen rund 30 und 90 cm variierte, wurde die Länge des zu untersuchenden Transekts so berechnet, dass jeweils eine Fläche von 100 m² des Feldes, aufgeteilt in vier Transektstrecken in vier verschiedenen Reihen, untersucht wurden. Dabei wurde ein Mindestabstand von 10 m zum Feldrand eingehalten, um Randeffekte durch Nachbarfelder oder Randstreifen nicht in die Vegetationsaufnahme mit einzubeziehen. Kartiert wurden die Artenzahlen und die Artmächtigkeiten nach Braun-Blanquet (1964). Zum Vergleich der Artengemeinschaften zwischen den Silphie-Feldern wurde der Sørensen-Koeffizient berechnet, welcher zwischen 0 und 1 schwankt und die Ähnlichkeit zweier Untersuchungsgebiete darstellt.

Zur weiteren Interpretation der Daten wurde an alle beteiligten Landwirte ein Fragebogen verteilt, um Informationen zum Düngemiteleinsatz, zum Unkrautmanagement, zur Vorbereitung des Feldes, zur Durchführung der Pflanzung sowie zur Vornutzung des Feldes zusammenzutragen. Der Rücklauf auf diesen Fragebogen betrug 79% (15 Standorte). Außerdem wurden abiotische Standortfaktoren berücksichtigt. Durch diese Daten über die Bewirtschaftung der Flächen und über die abiotischen Standortfaktoren wurden die Standorte und deren Ackerbegleitfloren miteinander verglichen.

Mit Hilfe der BioFlor Datenbank (<https://www.ufz.de/index.php?de=14718>) wurden Informationen über die Blühperioden der Unkrautarten zusammengestellt um zu beurteilen, ob es Hinweise auf eine mögliche zukünftige Begleitflora der Silphie gibt. Dazu wurden die Blühperioden der Ackerbegleitflora mit der Vegetationsperiode der Silphie verglichen.

Insgesamt wurden 71 Gefäßpflanzenarten auf den Silphie-Feldern identifiziert (Tabelle A2 und Abbildung 20). Im Durchschnitt kamen 18 Arten pro Fläche vor. Der Sørensen-Koeffizienten zeigte für die meisten der Feldvergleiche Werte zwischen 0,3 und 0,5, woraus abzulesen ist, dass die Zusammensetzung der Ackerbegleitflora auf den verschiedenen Praxisflächen sehr unähnlich war. Die am häufigsten gefundenen Arten waren das Einjährige Rispengras (*Poa annua* L.), die Gewöhnliche Vogelmiere (*Stellaria media* (L.) Vill. s. str.), der Weiße Gänsefuß (*Chenopodium album* L.) und das Gewöhnliche Hirtentäschelkraut (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Med.), welche auf mindestens 80 % der untersuchten Silphie-Felder vorkamen außerdem in den meisten Fällen die mit Abstand höchste Artenmächtigkeit erreichten. Auf 60 – 80 % der Felder wurden zudem Arten wie die Echte Kamille (*Matricaria recutita* L.), Weiß-Klee (*Trifolium repens* L.), Acker-Stiefmütterchen (*Viola arvensis* Murray), Winden-Knöterich (*Fallopia convolvulus* (L.) Å. Löve) und Kanadisches Berufskraut (*Conyza canadensis* (L.) Cronquist) nachgewiesen. Es handelt sich hierbei größtenteils um jene Arten, die laut Meyer et al. (2014) gut an die derzeitige Bewirtschaftung der Äcker angepasst und regelmäßig im Feldinneren anzutreffen sind.

Die untersuchten Silphie-Felder unterschieden sich neben ihren Artenspektren auch in Bezug auf die Individuenzahl der Ackerbegleitflora und deren Deckungsgrad, sowie im Deckungsgrad der Silphiepflanzen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Deckungsgrade der Ackerbegleitflora und der Silphie sowie Gesamtindividuenzahlen der Ackerbegleitflora und mittlere Größe [m³] der Silphiepflanzen auf den 19 Praxisflächen in Niedersachsen.

Stand- ort	Deckung Ackerwildkräuter [%]	Deckung der Silphie [%]	Gesamtindividuenzahl Ackerwildkräuter pro 100 m ²
1	22,50	83,75	1494
2	20,00	72,50	566
3	63,75	12,50	4462
4	70,00	50,00	1095
5	36,25	51,25	2180
6	0,10	95,00	247
7	40,00	60,00	3678
8	80,00	23,75	4596
9	90,75	60,00	2233
10	80,00	50,00	5131
11	40,00	28,75	3932
12	98,50	30,00	6550
14	92,50	56,25	10530
15	61,25	81,25	7061
16	76,50	35,00	912
17	98,00	30,00	9106
18	50,00	87,00	3226
19	7,25	97,25	1084
20	1,00	75,00	198

Die Ackerbegleitflora der Silphie war im zweiten Jahr vor dem Schließen des Silphie-Bestandes relativ artenreich aber je nach Standort sehr unterschiedlich zusammengesetzt. Ebenso stark unterschieden sich die Deckungsgrade der Ackerwildkräuter. Neben den Unterschieden in den abiotischen Standortfaktoren wurden die unterschiedliche Vornutzung der Felder, die unterschiedliche Bewirtschaftung der Flächen im Anpflanzjahr, insbesondere im Hinblick auf Zeitpunkt und Wiederholung im Einsatz und der jeweiligen Wirkung der Herbizide, als wichtige Parameter für die Ausprägung der Ackerbegleitflora, aber auch der Entwicklung der Silphie auf den Feldern ausgemacht (Schmitz 2012).

Ein Vergleich der Blühperioden der kartierten Ackerbegleitflora mit der Vegetationsperiode der Silphie zeigt (Abbildung 20), dass bei 46 % der kartierten Ackerwildkrautarten die Blühperiode erst beginnt, nachdem die Silphie ihre Bestände geschlossen hat. Der rote Balken in der Abbildung verdeutlicht den Zeitpunkt zwischen Mai und Juni, an dem die Silphie einen Deckungsgrad von nahezu 100 % einnimmt, bis hin zur Ernte gegen Ende August oder Anfang September, währenddessen der Boden nahezu vollständig beschattet wird. Durch eine Wiederholung der Erfassung auf den nun über mehrere Jahre etablierten Flächen wäre nun zu prüfen, ob bzw. welche der frühblühenden Arten der Ackerunkrautgesellschaft vor dem Bestandesschluss zur Samenreife gelangen und sich eventuell langfristig auf den Silphie-Feldern halten können.

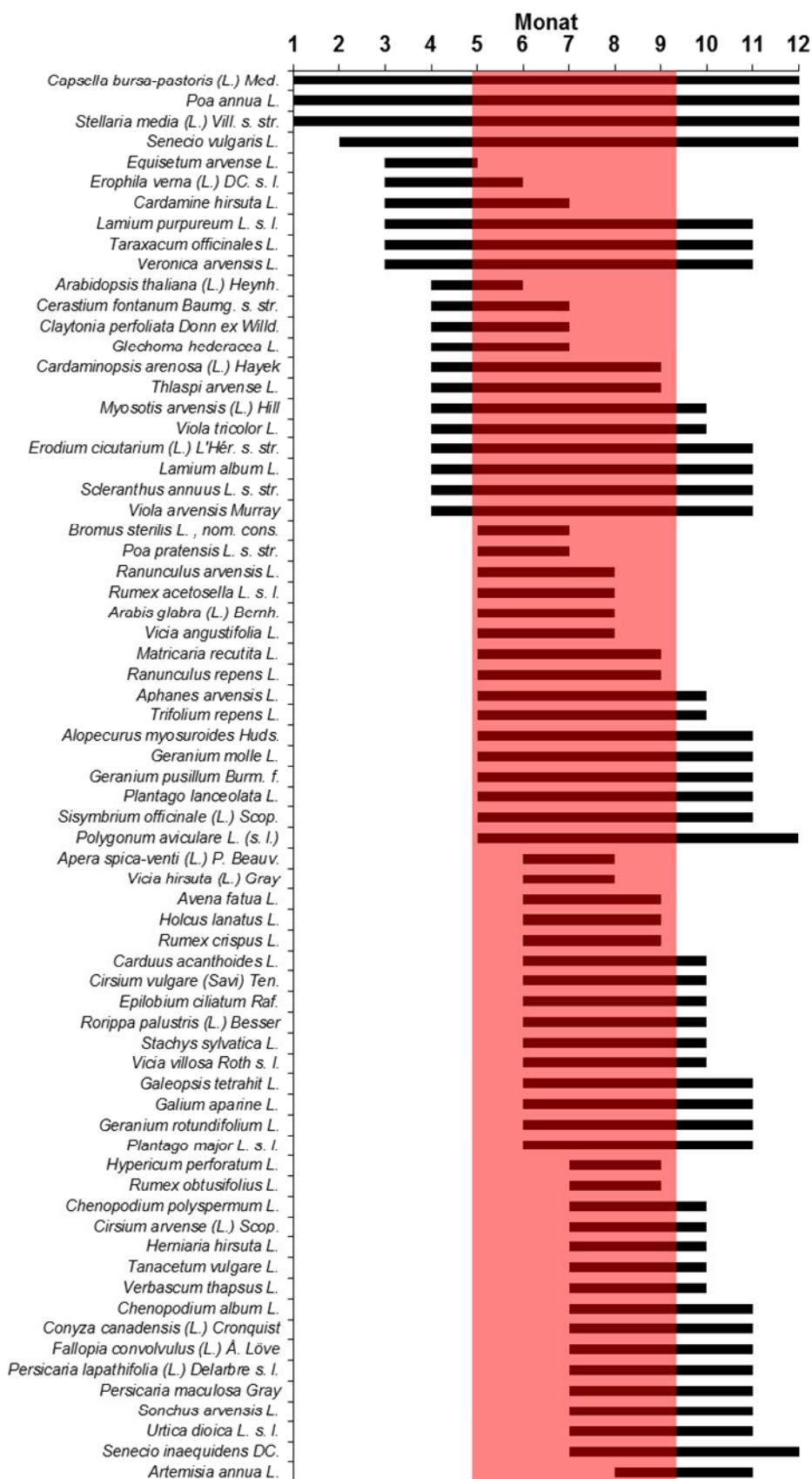


Abbildung 20: Blühperioden der auf den 19 Silphie-Feldern in Niedersachsen nachgewiesenen Ackerbegleitflora und Zeitraum des vollständigen Bestandsschlusses durch die Silphie (roter Balken).

1.1.2. Unterirdische Biodiversität (Schorpp, Schrader)

1.1.2.1 Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Regenwurmgemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände

Regenwürmer gehören auf Grund ihrer Größe zur Boden-Makrofauna. Durch ihre Grabaktivitäten tragen sie wesentlich zur Verbesserung von Bodeneigenschaften, wie z.B. Bodengasaustausch, Wasserinfiltration, Aggregatbildung oder Makroporosität bei. Während ihrer Fraß-Aktivitäten arbeiten sie organisches Material in den Boden ein und inokulieren es mit Mikroorganismen. Dadurch fördern sie auch die Humusbildung und verbessern die Bodenfruchtbarkeit.

In intensiv genutzten landwirtschaftlichen Böden sinkt die Artenvielfalt von Regenwürmern in der Regel ab, da vor allem größere und oberflächenaktive Arten dem Risiko letaler mechanischer Einwirkungen während der Bodenbearbeitung ausgesetzt sind (Ehrnsberger 1993). In landwirtschaftlichen Dauerkulturen, wie z.B. im Grünland, findet sich hingegen durch den Verzicht auf Bodenbearbeitung eine höhere Artenvielfalt. Solche Flächen dienen nicht nur als Refugien für seltenere Regenwurmart, eine zumeist erhöhte Ressourcenverfügbarkeit in solchen Systemen stimuliert auch vielfältige Zersetzungsprozesse. Eine reichere Artengemeinschaft hat dadurch nachweislich positive Auswirkungen auf ökosystemare Dienstleistungen des Bodens und trägt zu deren nachhaltiger Nutzung bei (Doran und Zeiss 2000).

Das Anbausystem der mehrjährigen Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum*) teilt viele Aspekte mit landwirtschaftlichen Dauerkulturen: weitgehender Verzicht auf Bodenbearbeitung, dauerhafte Durchwurzelung des Bodens und Eintrag organischer Ressourcen durch Streuabfall lassen positive Effekte auf die Regenwurmpopulationen erwarten. Jedoch handelt es sich bei der Silphie um eine Monokultur einer gebietsfremden Pflanzenart, deren größter Teil der erzeugten Biomasse am Ende einer Vegetationsperiode abgeerntet und damit dem Zersetzersystem des Bodens entzogen wird. Die Verwertbarkeit des Streumaterials durch die autochthone Bodenfauna ist unbekannt. Ein großer Teil der Bodenoberfläche liegt zudem zwischen den Vegetationsperioden ungeschützt offen und ist ohne Pflanzenbedeckung (Abbildung 21).



Abbildung 21: Silphiefeld im Oktober nach der Ernte. Ein großer Teil der Bodenoberfläche zwischen den Reihen ist ohne Bedeckung.

Ziel der Untersuchung war es, die Entwicklung der Regenwurmgemeinschaften in Böden unter Silphiebeständen über einen langjährigen Zeitraum zu verfolgen. Aus dem zeitlichen Muster der Populationsentwicklung soll die Eignung des Anbausystems der durchwachsenen Silphie als

Regenwurmhabitat festgestellt und ihr Beitrag zu einer nachhaltigen Verbesserung von Bodeneigenschaften bewertet werden.

Für die Flächenauswahl wurden Bestände unterschiedlichen Alters berücksichtigt, deren physiko-chemische Eigenschaften wenig Variation aufwiesen. Auf Grund der zeitlichen Begrenzung des Projekts auf 3 Jahre, wurden unterschiedliche Altersstufen, bezogen auf das Anlagejahr der Flächen, gewählt. So konnte eine Flächenentwicklung über einen Zeitraum von bis zu 9 Jahren künstlich abgebildet werden. Eine Übersicht über die Untersuchungsflächen und das Untersuchungsdesign kann Tabelle 3 entnommen werden. Die Untersuchungen wurden im Abstand von einem halben Jahr beginnend im September 2012 drei Mal wiederholt.

Tabelle 3: Übersicht über die Untersuchungsflächen mit Gruppierung der Altersstufen (O = old, I1 u. I2 = intermediate, Y = young). Bodentypen benannt nach World Reference Base WRB (2006).

ID	Standort	Feldfrucht	Anlagejahr	Alterstufe	Bodentyp
1	Dornburg	Silphie	2004	Sp_O	Mollic Leptosol
2	Hessberg	Silphie	2004	Sp_O	Terra Fusca
3	Dornburg	Silphie	2005	Sp_O	Mollic Leptosol
4	Dornburg	Silphie	2007	Sp_I2	Mollic Leptosol
5	Erfurt	Silphie	2007	Sp_I2	Chernozem
6	Pahren	Silphie	2007	Sp_I2	stagnic Luvisol
7	Dornburg	Silphie	2009	Sp_I1	Mollic Leptosol
8	Erfurt	Silphie	2009	Sp_I1	Chernozem
9	Burgstemmen	Silphie	2009	Sp_I1	Haplic Luvisol
10	Erfurt	Silphie	2011	Sp_Y	Chernozem
11	Niederdorla	Silphie	2011	Sp_Y	Stagnic Luvisol
12	Gehrden	Silphie	2011	Sp_Y	Haplic Luvisol
13	Dornburg	Mais	2012	Zm	Mollic Leptosol
14	Niederdorla	Mais	2012	Zm	Stagnic Luvisol
15	Gehrden	Mais	2012	Zm	Haplic Luvisol
16	Dornburg	Mais	2013	Zm	Mollic Leptosol
17	Pahren	Mais	2013	Zm	stagnic Luvisol
18	Gehrden	Mais	2013	Zm	Haplic Luvisol

Die Probennahme erfolgte nach DIN ISO Richtlinien (DIN ISO-23611-1, 2006). Auf jeder Fläche wurden 4 Beprobungen pro Termin durchgeführt. Dazu wurden der Boden auf 0.25 m² bis in 10 cm Tiefe ausgehoben, der Aushub per Hand nach Regenwürmern durchsucht und schließlich tiefer vorkommende Regenwürmer aus der Grube mittels Senflösung (AITC) ausgetrieben (Zaborski 2003). Alle Regenwürmer wurden lebend im Labor auf Art-Niveau bestimmt. Eine vollständige Artenliste kann Tabelle 4 entnommen werden.

Es zeigte sich, dass von 9 festgestellten Arten 4 Arten erst allmählich, mit zunehmendem Alter der Flächen auftraten. Ab einem Bestandesalter von 3 Jahren traten erstmals Vertreter der Gattung *Octolasion* auf, ihre Häufigkeit nahm dann zu älteren Flächen hin graduell zu. Oberflächenbewohnende Vertreter aus der Gattung *Lumbricus* wurden erstmals auf 5 Jahre alten Flächen beobachtet, auch ihre Häufigkeit war auf 8 Jahre alten Flächen weiter erhöht. Junge Silphieflächen zeigten ein deutlich geringeres Artenspektrum, das dem der Maisflächen sehr ähnlich war. Anhand der Artenzusammensetzung kann man sehen, dass die Artengemeinschaften im Laufe der Zeit denen von Grünland ähnlicher werden. Dennoch blieben die Artengemeinschaften der ältesten Flächen im Vergleich mit Grünland artenärmer.

Tabelle 4: Regenwurmarten in den Altersstufen. „X“ – Vorkommen des Taxons bestätigt. Zu Abkürzungen in den Spaltenüberschriften siehe Tabelle 3.

Gesamt	Sp_O	Sp_I2	Sp_I1	Sp_Y	Zm
<i>Lumbricus terrestris</i>	x	x	x	x	x
<i>Lumbricus castaneus</i>	x	x			
<i>Lumbricus rubellus</i>	x				
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	x	x	x	x	x
<i>Aporrectodea rosea</i>	x	x	x	x	x
<i>Aporrectodea longa</i>			x	x	
<i>Allolobophora chlorotica</i>	x		x	x	x
<i>Octolasion cyaneum</i>	x	x	x		
<i>Octolasion lacteum</i>	x	x			
Artenzahl	8	6	6	5	4



Abbildung 22: *Lumbricus terrestris*

Weiterhin konnte ein signifikanter Anstieg der Gesamt-Abundanz (Kruskal-Wallis; $df = 4$; $\chi^2 = 12$; $p = 0,02$) und der Gesamt-Biomasse (Kruskal-Wallis; $df = 4$; $\chi^2 = 15,4$; $p = 0,004$) von Regenwürmern mit dem Alter der Flächen festgestellt werden (Abbildung 23). Sp_O - Flächen nahmen im Vergleich mit Sp_Y - Flächen von 83 ± 20 auf 535 ± 353 Individuen pro m^2 zu. Die gesamte Biomasse stieg hier von 93 ± 16 g auf 352 ± 37 g. Die niedrigsten Werte mit 51 ± 20 Individuen pro m^2 und einer Biomasse von 30 ± 8 g/ m^2 zeigten in beiden Tests die Maisflächen.

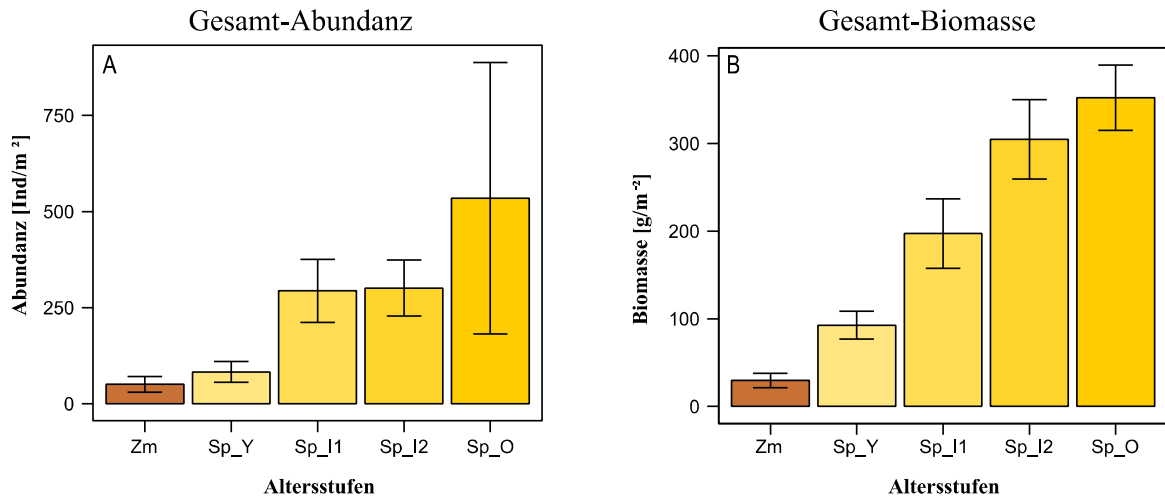


Abbildung 23: Ergebnisse der Regenwurmbeprobung. A, die Gesamt-Abundanzen (Kruskal-Wallis; $df = 4$; $\chi^2 = 12$; $p = 0,02$) und B, die Biomasse (Kruskal-Wallis; $df = 4$; $\chi^2 = 15,4$; $p = 0,004$) nehmen mit steigendem Alter der Flächen signifikant zu. Maisflächen (Zm) zeigen die geringsten Werte. Mittelwerte mit Standardfehler ($n=3$) der Altersstufen. Zu Abkürzungen der Beschriftungen siehe Tabelle 3.

Es ist anzunehmen, dass der weitgehende Verzicht auf Bodenbearbeitung und Einsatz von Pflanzenschutzmitteln sowie die mehrjährige Entwicklung der Silphie, die Habitat-Qualität für Regenwürmer stetig verbessert. Die Biomasse zeigt in jungen Altersstufen, in denen noch mechanische Unkrautbekämpfung stattfindet, bereits einen allmählichen Anstieg, während die Gesamt-Abundanz nach ca. 3 Jahren, wenn die mechanische Unkrautbekämpfung eingestellt wurde, abrupt zunimmt (Abbildung 23). Der Reproduktionserfolg der Würmer scheint demnach stärker von der Reduktion der Nutzungsintensität betroffen zu sein. Vermutlich kommt es auch durch einen stetigen Anstieg eingetragenen organischen Materials zu einer Verbesserung der Nahrungsverfügbarkeit. Die Eignung der Silphie als Habitat für Regenwürmer ist als gut einzustufen, da sie eine höhere Biodiversität aufweisen und auch für ackeruntypische Regenwurmartenspezies einen Lebensraum bieten. Auf Grund des Erstarkens der Regenwurmpopulationen ist anzunehmen, dass die Silphie einen substanziellen Beitrag zu einer nachhaltigen Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit leisten kann. Voraussetzung hierzu ist jedoch eine extensive Bewirtschaftung ohne den Einsatz von Pestiziden und der Verzicht auf mechanische Unkrautbekämpfung nach dem dritten Anbaujahr. Weiterhin zeigten auch die ältesten Flächen teilweise niedrigere Werte als intermediäre Flächen (Sp_I1, Sp_I2). Die Entwicklung einer Managementstrategie, um das Potential der Silphie voll auszuschöpfen, bedarf weiterführender Untersuchungen in Verbindung mit echten Langzeitbeobachtungen über einen Zeitraum von 10 Jahren.

1.1.2.2 Kartierung der Regenwurmlösung an der Bodenoberfläche in Beständen unterschiedlichen Alters

Die durch Regenwürmer induzierten Verbesserungen des Bodenzustands hängen wesentlich mit deren Aktivität zusammen. Die Gänge von Regenwürmern erleichtern die Durchwurzelung des Bodens und fördern das Pflanzenwachstum (Abbildung 24b). Es ist möglich, dass schwache und/oder artenarme Populationen in ungünstigen Habitaten ihre geringeren Effekte durch gesteigerte Aktivität kompensieren. Wenn beispielsweise bestimmte Arten auf Grund von Bodenbearbeitung auf landwirtschaftlichen Flächen fehlen, könnten bei ausreichender Verfügbarkeit von Nahrungsressourcen, die vorhandenen Arten über gesteigerte Aktivität dennoch einen großen Effekt auf Bodenprozesse ausüben. Umgekehrt können starke und artenreiche Populationen geringe Aktivität zeigen, wenn die Umweltbedingungen ungünstig sind.

Die Kartierung der Losungsproduktion an der Bodenoberfläche ist daher ein geeigneter Indikator für die Beurteilung der Habitat-Qualität und als Aktivitätsparameter außerdem gut geeignet um den Einfluss der Regenwürmer zwischen unterschiedlichen Feldfrüchten zu vergleichen.

Ziel der Losungskartierung war es, über die Bestimmung der Regenwurmaktivität indirekt den Effekt von Regenwürmern auf die Bodenprozesse Aggregat- und Makroporenbildung unter Silphiebeständen mit Maisflächen zu vergleichen. Muster in der Regenwurmaktivität lassen eine genauere Bewertung des Bodenzustandes zu. In Anlehnung an Fründ (2010) wurde entlang eines 10 m Transekts in jeder Fläche dazu die Regenwurmlösung in Intervallen von 50 cm auf einer Fläche von 50 x 20 cm gezählt (Abbildung 24a und b).



Abbildung 24: Losungskartierung. A - In einem 20 x 50 cm Quadrat werden entlang eines 10 m Transektes die Losungen von Regenwürmern gezählt. B Regenwurmlösung mit Silphiesproßling

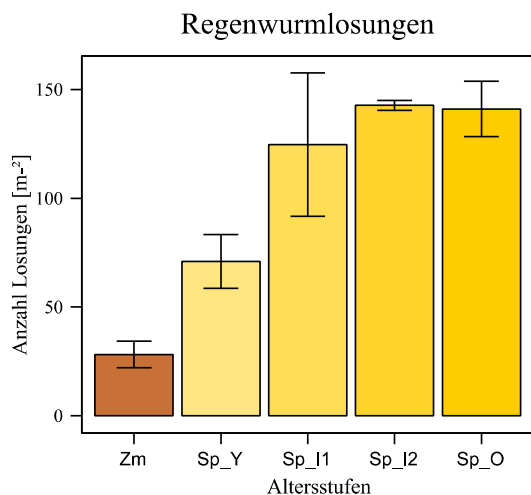


Abbildung 25: Ergebnisse der Losungskartierung. Mit steigendem Alter des Anbausystems nimmt die Anzahl an Losung pro m² signifikant zu (Kruskal-Wallis; $X^2 = 13,9$; $df = 4$; $p < 0,001$). Mittelwerte mit Standardfehler ($n=3$). Zu Abkürzungen der Beschriftungen siehe Tabelle 3.

Die Losungskartierung ergab einen signifikanten Anstieg der Regenwurmaktivität mit steigendem Alter der Flächen (Kruskal-Wallis; $X^2 = 13,9$; $df = 4$; $p < 0,001$). Der Unterschied von Sp_Y Flächen zu Sp_O Flächen betrug 70 ± 12 Losungshaufen pro m², d.h. die Anzahl an Losung verdoppelte sich. Damit konnte auch ein positiver Zusammenhang zwischen der Größe der Regenwurmpopulation, ihrer Artenvielfalt und der Aktivität nachgewiesen werden. Die Nahrungsverfügbarkeit in Silphiebeständen scheint über einen langen Zeitraum ausreichend hoch zu sein, um die Aktivität der Regenwurmpopulation zu fördern. Kompensationsmechanismen scheinen in Sp_Y-Flächen stattgefunden zu haben. Sie zeigten bei annähernd gleichen Populationsgrößen eine

deutlich höhere Regenwurmaktivität als Maisflächen. Der hohe Beschattungsgrad in den dichten Silphiebeständen könnte die Regenwurmaktivität zusätzlich fördern (Pauli et al. 2010). In alten Sp-O-Flächen kam es jedoch zu keiner weiteren Steigerung gegenüber intermediären Sp-I2 Flächen, obwohl die Populationsgröße scheinbar zunimmt. Durch welche Umwelteinflüsse die

Regenwürmer zu solch inaktivem Verhalten angeregt werden, ist jedoch zurzeit noch schwierig zu beantworten. Die stetig steigende Regenwurmmaktivität in frühen Altersstufen der Silphie zeigt, dass dort insbesondere die Bodenstruktur, d.h. die Aggregat- und Makroporenbildung als wesentliche Einflussgrößen auf den Gas- und Wasserhaushalt des Bodens nachhaltig verbessert werden.

1.1.2.3 Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Collembolengemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände

Collembolen sind Boden-Arthropoden und werden ihrer Größe entsprechend zur intermediären Gruppe der Boden-Mesofauna gezählt. Sie leben in allen Schichten des Oberbodens, wo sie den Porenraum besiedeln. Ihre Nahrung besteht vor allem aus dem Mikrobiom des Bodens, wie Pilzen und Bakterien, deren alte Zellen sie vorzugsweise abweiden und so deren Populationen regulieren bzw. ihre Wachstumsaktivität hoch halten (Hopkin 1997). Dadurch spielen sie eine fördernde Rolle in mikrobiellen Zersetzungs- und Mineralisierungsprozessen. Im Nahrungsnetz des Bodens dienen sie aber auch selbst anderen Bodenorganismen als Nahrung. Die Gruppe der Collembolen ist ausgesprochen artenreich und kann auch in landwirtschaftlich genutzten Flächen eine hohe Diversität entwickeln, auffällig ist jedoch, dass eine Reduktion der Bodenbearbeitung zu einer Abnahme der Populationen führen kann (van Capelle et al. 2012). Ihr Artenreichtum ist jedoch ein guter Indikator für die Komplexität des Bodennahrungsnetzes. Finden Zersetzungsprozesse toter organischer Substanz in einer breiten Schicht des Oberbodens und auf unterschiedlichen Wegen sowohl durch Pilze als auch durch Bakterien statt, ist auch mit einer hohen Diversität von Collembolen zu rechnen. Schonende Bewirtschaftungsmaßnahmen, die die natürliche Bodenfruchtbarkeit und damit eine nachhaltige Ertragsfähigkeit von Böden gewährleisten, fördern auch die Artenzahl und Abundanz von Collembolen (Friebe 1993).

Ziel der Erhebung der Collembolen war es die Komplexität der Bodenlebensgemeinschaften zu erfassen, um die Strukturvielfalt des Bodenhabitats und die Langzeitentwicklung des fruchtbaren Oberbodens nachvollziehen zu können.

Beprobung und Extraktion der Collembolen basierte auf DIN ISO 23611-2 (2006): Die Beprobung erfolgte im Feld durch die Entnahme von 8 Bodenkernen ($d = 4 \text{ cm}$, $h = 10 \text{ cm}$). Die Tiere wurden aus den Bodenkernen im Labor mittels dynamischer Hitzeabtreibung extrahiert (MacFadyen 1961). Anschließend fand eine Bestimmung der Collembolen auf Familienniveau statt. Die Bestimmungsarbeit musste während der Bearbeitung der dritten Probennahme jedoch abgebrochen werden, nachdem sich herausstellte, dass auf Grund nicht näher bestimmbarer Umwelteinflüsse, die Individuendichten in den Proben zu gering waren. Für die statistische Auswertung standen daher lediglich die Daten aus der Probennahme des Herbsts 2012 zur Verfügung.

Tabelle 5: Collembolen Familien in den Altersstufen. X – Vorkommen des Taxons bestätigt. Zu den Abkürzungen in den Spaltenüberschriften siehe Tabelle 3.

Familien	Sp_O	Sp_I2	Sp_I1	Sp_Y	Zm
Tullbergiidae	x	x	x	x	x
Onychiuridae	x	x	x	x	x
Katianidae	x	x	x	x	x
Isotomidae	x	x	x	x	x
Entomobryidae	x	x	x	x	x
Neanuridae	x	x	x	x	
Neelidae	x			x	x
Bourletiellidae	x	x	x		
Sminthuridae	x		x		
Hypogastruridae		x	x		
Oncopoduridae			x		
Symphyleona			x		
Gesamt	9	8	11	7	6



Abbildung 26: *Stenaphorura quadrispina*.
V: 400x

Es wurden insgesamt 12 Collembolen Familien festgestellt (Tabelle 5). Davon kamen 5 Familien ubiquitär in allen Altersstufen vor. Die meisten Familien kamen jedoch auf Sp_I1 Flächen vor, also Flächen mit einem Alter von 3-4 Jahren. Auf den Maisflächen fehlten 6 Familien gänzlich, dennoch konnte kein signifikanter Unterschied im Shannon Index zwischen den Altersstufen festgestellt werden. Der Shannon-Index misst die Biodiversität sowohl unter Berücksichtigung der Anzahl der Familien als auch ihrer Abundanzen. Die Gesamtabundanz aller Collembolen unterschied sich signifikant zwischen den Altersstufen (Kruskal-Wallis; $df=4$; $\chi^2 = 10,23$; $p = 0,04$). Die ältesten Untersuchungsflächen wiesen mit $163 \times 10^3 \text{ Ind/m}^2$ deutlich höhere Abundanzen auf, als junge Silphie (Sp_Y, $23 \times 10^3 \text{ Ind/m}^2$) oder Maisflächen (Zm, $7,9 \times 10^3 \text{ Ind/m}^2$). Die Gesamtabundanz zeigte zudem einen stetigen Anstieg über die Altersstufen (Abbildung 27a).

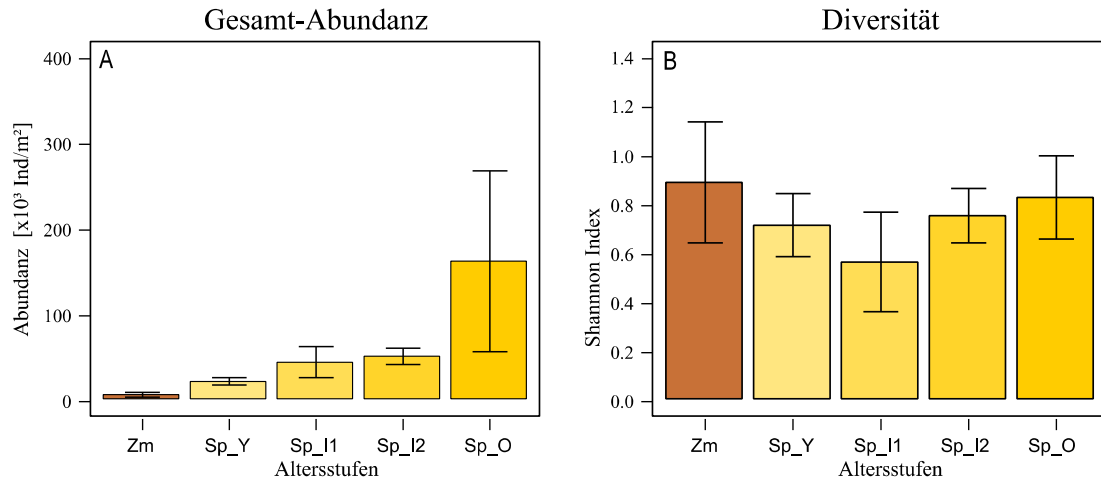


Abbildung 27: Ergebnisse der Collembolen-Beprobung. A, Gesamtabundanz der Collembolen für die Altersstufen. B, Shannon-Diversität. Mittelwerte mit Standardfehler (n=3). Zu Abkürzungen der Beschriftungen siehe Tabelle 3.

Die steigende Anzahl an Collembolen im Oberboden der Silphiebestände lässt auf eine ausgedehnte räumliche Verteilung von Zersetzungsprozessen im Bodenkompartment schließen. Im Laufe der Zeit dringt organisches Material während seiner Zersetzung immer weiter in den Oberboden ein und es kommt durch Aggregatbildung zu einer Ausdehnung des von Collembolen besiedelbaren Porenvolumens (Friebe 1993). Es kann davon ausgegangen werden, dass regulatorische Wirkungen von Collembolen auf mikrobielle Zersetzungsprozesse die Verfügbarkeit organischer Substanzen und mineralischer Nährstoffe im Oberboden des Silphie-Anbausystems langfristig erhöhen.

1.1.2.4 Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Nematodengemeinschaften durch Vergleich unterschiedlich alter Bestände

Nematoden sind Vertreter der Boden-Mikrofauna und spielen im Ökosystem von Böden eine Rolle bei der Umwandlung von organischem Material in mineralische und organische Nährstoffe. Außerdem beeinflussen sie das Pflanzenwachstum und die Produktivität in Agrarsystemen (Ingham et al. 1985, Ferris et al. 1998, 2004a). Da Nematoden ausgesprochen artenreich sind und in nahezu allen Böden in extrem hoher Anzahl vorkommen, eignen sie sich gut als Bodenindikatoren. Durch die Analyse von Nematoden-Gemeinschaftsstrukturen können Einflüsse von Umweltbelastungen, wie der Bodenbearbeitung auf Stoffkreisläufe in Böden gemessen werden (Yeates et al. 2009). Die Tatsache, dass Nematoden auf allen trophischen Ebenen Vertreter mit unterschiedlichen Lebenszyklen und Überlebensstrategien beherbergen, führt zu einer hohen Plastizität ihrer Reaktionen auf Umweltveränderungen (M.W. Trett et al. 2009). Des Weiteren sind Nematoden in Agrarsystemen auch wegen ihrer potenziellen Schädlingwirkung von großem Interesse. Eine Anreicherung phytopathogener Nematoden in Böden unter Silphiebeständen könnte großen Einfluss auf ein nachhaltiges Management der Energiepflanze haben.

Basierend auf DIN ISO 23611-4 (2007) erfolgte die Beprobung der Nematoden durch die Entnahme von Bodenkernen (d=2cm, h=10 cm) mit anschließender Nassausstreibung über Baermann-Trichter (Baermann 1917) nach vorhergehenden mehrstufigen Siebens des aufgeschwemmten Bodensubstrats nach Cobb (1918). Insgesamt wurden pro Fläche 25 Bodenkern entnommen und in eine Mischprobe überführt. Aus jeder dieser Mischproben wurden drei Teilproben deren Gewichte äquivalent zu 100g trockenen Bodens war, entnommen und extrahiert. Aus dem erhaltenen Nematoden-Extrakt (V = 100 ml) wurden wiederum in

dreimaliger Wiederholung die Nematoden lebend in Aliquots von 10ml gezählt. Im Anschluss wurden die Tiere mit heißem Formaldehyd fixiert und unter dem Mikroskop bei 1000facher Vergrößerung bestimmt. Die Bestimmung erfolgte auf Familien-Niveau.

Es wurden insgesamt 25 Familien festgestellt (Tabelle 6). Der überwiegende Teil waren freilebende Nematoden (FLN). Pflanzenparasitische Nematoden (PPN) aus den Familien Pratylenchidae, Telotylenchidae und Hoplolaimidae wurden jedoch ebenfalls gefunden. Ihre prozentualen Anteile in den Untersuchungsflächen variierten jeweils zwischen 1-7% (n=7), 1-56% (n=14) und 1-78% (n=27). In der Gesamtanzahl der Familien waren zwischen den Altersstufen keine Unterschiede zu erkennen. 13 Familien kamen ubiquitär in allen Altersstufen vor (Tabelle 6). Über diese Familien hinaus macht es den Anschein als seien die Altersstufen durch unterschiedliche Zusammenstellungen charakterisiert (Tabelle 6). Betrachtet man die Biodiversität zwischen den Altersstufen (Abbildung 28b), lassen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede feststellen (Kruskal-Wallis, n.s.). Bei Betrachtung der Abundanzen wird jedoch ein signifikanter Unterschied von 3000 Individuen pro 100g trockenen Bodens (TB) zwischen mäßig bis stark bewirtschafteten (Sp_Y, Zm) und kaum bewirtschafteten Flächen (Sp_I1, Sp_I2, Sp_O) erkennbar (Kruskal-Wallis; $X^2 = 10,82$; $df = 4$; $p = 0,03$) (Abbildung 28a)

Tabelle 6: Nematoden Familien in den Altersstufen. X – Vorkommen des Taxons bestätigt. Zu Abkürzungen in den Spaltenüberschriften siehe Tabelle 3.

Familien	Sp_O	Sp_I2	Sp_I1	Sp_Y	Zm
Aphelenchidae	x	x	x	x	x
Aphelenchoididae	x	x	x	x	x
Panagrolaimidae	x	x	x	x	x
Rhabditidae	x	x	x	x	x
Cephalobidae	x	x	x	x	x
Plectidae	x	x	x	x	x
Qudsianematidae	x	x	x	x	x
Aporcelaimidae	x	x	x	x	x
Thornenematidae	x	x	x	x	x
Mononchidae	x	x	x	x	x
Tylenchidae	x	x	x	x	x
Telotylenchidae	x	x	x	x	x
Hoplolaimidae	x	x	x	x	x
Diphterophoridae	x	x	x		x
Psilenchidae	x		x	x	x
Alaimidae			x	x	
Belondiridae	x			x	
Anatonchidae	x			x	
Discolaimidae			x	x	
Pratylenchidae		x			x
Leptonchidae	x				
Diplogasteridae			x		
Nordiidae					x
Nygolaimidae		x			
Criconematidae				x	
Gesamt	18	16	18	19	17

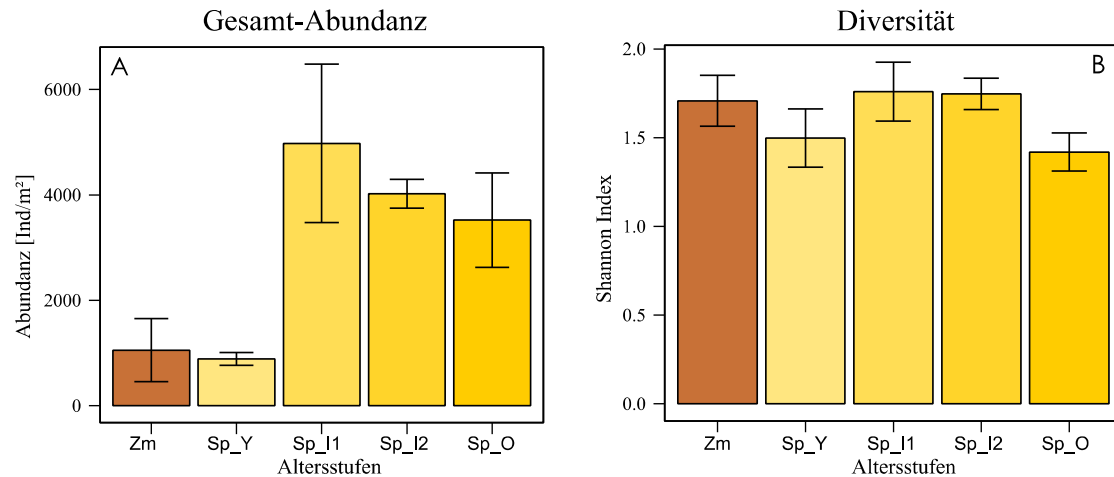


Abbildung 28: Ergebnisse der Nematoden-Beprobung. A, Gesamt-Abundanz: Mäßig bis stark bewirtschaftete Flächen (Sp_Y, Cm) unterscheiden sich signifikant von Flächen mit fehlender Bodenbearbeitung (Sp_I1, Sp_I2, Sp_O) (Kruskal-Wallis, $X^2 = 10,82$, $df = 4$, $p = 0,03$). B, Biodiversität gemessen durch Shannon-Index: Die Altersstufen zeigen keinen signifikanten Einfluss (Kruskal-Wallis, n.s.). Mittelwerte pro 100 g trockenen Bodens (TB) mit Standardfehler ($n=3$). Abkürzungen der Beschriftungen siehe Tabelle 3.

Die Analyse der Nematodengemeinschaften zeigt, dass die Silphie nach Verzicht auf Bodenbearbeitung die Vermehrung von Nematoden im Boden zwar fördert, jedoch keine Diversifizierung der Gemeinschaften stattfindet. Folglich wird deutlich, dass es sich bei der Silphie auch nach 8 Jahren noch um ackertypische Gemeinschaften handelt. Schadnematoden aus der Familie der Pratylenchidae wurden jedoch überwiegend in Maisflächen gefunden. Eingehendere Betrachtungen setzen die Zuordnung der Nematoden in Fraßtypen voraus (siehe Kap. 1.1.2.5).

1.1.2.5 Funktionelle Bewertung der unterirdischen Biodiversität in den Silphiebeständen anhand des Inventars an funktionellen Bodentiergruppen und ihres anteilmäßigen Auftretens

Bodenorganismen werden anhand ihrer Habitatansprüche in unterschiedliche funktionelle Gruppen eingeordnet. Morphologie und Physiologie spielen bei der Eingruppierung eine wesentliche Rolle, in ihnen spiegelt sich die Lebensweise wider. Funktionelle Gruppen besitzen individuelle Eigenschaften hinsichtlich ihrer wechselseitigen Beziehungen mit dem Lebensraum Boden. Sie liefern wesentliche ökosystemare Dienstleistungen, indem sie unterschiedlichen Einfluss auf Bodenfunktionen ausüben und somit selbst ein funktionaler Bestandteil des Bodens sind. Die Größe und der relative Anteil einzelner funktioneller Gruppen an der Gesamt-Gemeinschaft geben Aufschluss über die Strukturierung und die Zersetzer-Netzwerke des Bodens. Funktionell vielfältige und individuenstarke Bodenfaunagemeinschaften zeigen einen vitalen Bodenzustand und eine hohe Resilienz gegenüber schädlichen Umwelteinwirkungen an.

Regenwürmer werden anhand ihrer Lebensweise und ihrer Pigmentierung in drei funktionelle Gruppen eingeordnet:

1. Die stark pigmentierten *epigäischen* Regenwürmer leben in der Streuschicht und knapp unter der Bodenoberfläche in überwiegend horizontal verzweigten Röhrensystemen. Sie ernähren sich von abgestorbenem Pflanzenmaterial.
2. Die nur im vorderen Drittel pigmentierten *anektischen* Regenwürmer sind Tiefgräber, ihre vertikalen Wohnröhren reichen bis über 1m tief in den Boden. Zur Nahrungsaufnahme kommen sie an die Oberfläche, von wo sie Blattstreu in ihre Wohnröhren hineinziehen.

3. Die im Wesentlichen unpigmentierten *endogäischen* Regenwürmer leben im mineralischen Oberboden, wo sie sich überwiegend von durch Mikroorganismen stark zersetzter organischer Substanz ernähren. Sie bauen ein netzartig verzweigtes Röhrensystem.

Collembolen können ebenfalls anhand ihrer Lebensweise und Morphologie in drei funktionelle Gruppen unterschieden werden:

1. Die *atmobionten* Arten leben an der Bodenoberfläche und kommen auch auf der Vegetation vor. Ihre Nachkommen entwickeln sich jedoch aus Gelegen, die im Boden abgelegt werden. Sie sind stark pigmentiert. Ihre Antennen und Beine sind lang, auch die für Collembolen charakteristische Sprunggabel ist gut ausgeprägt.
2. Die *hemiedaphischen* Collembolen leben in der Streuschicht und im großporigen Bodengefüge. Sie sind kaum pigmentiert und besitzen kurze Antennen und eine Sprunggabel.
3. Die *euedaphischen* Collembolen leben in tieferen Bodenschichten im kleinporigen Bodengefüge. Sie sind unpigmentiert und blind, die Sprunggabel ist i.d.R. zurückgebildet.

Nematoden lassen sich anhand ihrer Ernährungsweise, die über die Mundwerkzeuge eindeutig bestimmbar ist, in fünf funktionelle Gruppen einteilen.

1. *Bacterivore* Nematoden ernähren sich von Bakterien.
2. *Fungivore* Nematoden tragen einen Saugstachel und ernähren sich von Pilzhyphen.
3. *Herbivore* Nematoden tragen ebenfalls einen Saugstachel und ernähren sich parasitisch von lebenden Pflanzen.
4. *Carnivore* Nematoden ernähren sich von anderen Nematoden und Kleinstlebewesen.
5. *Omnivore* Nematoden sind Allesfresser, die meist ebenfalls räuberisch leben

Im Anbausystem der Durchwachsenen Silphie sollen über eine funktionelle Bewertung der Bodenfauna die Bodenfunktionen beschrieben und die Nachhaltigkeit des Bewirtschaftungssystems gemessen werden. Außerdem kann die Betrachtung der funktionellen Gemeinschaftszusammensetzung auch der Entwicklung von Maßnahmenkonzepten zur gezielten Förderung von Bodenfunktionen dienen.

Die Klassifizierung der Arten erfolgte für Regenwürmer nach Bouché (1977), für Collembolen nach Gisin (1960) und für Nematoden nach Yeates et al. (1993)

In den Regenwurmgemeinschaften der Silphie nehmen die anektischen Regenwürmer deutlich zu. Zudem kommen in der Silphie auch epigäische Arten vor, die in Maisflächen gänzlich fehlen (Abbildung 29). Bei den Collembolen verdoppelt sich der Anteil an euedaphischen Arten während der Anteil atmobionter und hemiedaphischer Arten relativ zur Größe der Gesamt-Population sinkt (Abbildung 29). Es muss jedoch erwähnt werden, dass die atmobionten Arten auf Grund der Beprobungsmethode durch Bodenkern-Entnahme wahrscheinlich nicht realistisch abgebildet werden. Vielmehr spiegeln die Zahlen der atmobionten Arten die Menge der unmittelbar im Boden geschlüpften Individuen ab. Es ist jedoch möglich, dass atmobionte Arten in der Silphie auf Grund der höheren Strukturvielfalt andere Eiablageplätze wählen. Verglichen mit Mais zeigen die Nematodengemeinschaften der Silphie einen Rückgang bacterivorer Arten, einhergehend mit einem leichten Anstieg der fungivoren Arten. Weiterhin fällt jedoch deutlich auf, dass in Böden unter Silphie herbivore Arten in der Menge deutlich zunehmen (Abbildung 29). Dies konnte insbesondere in alten Silphiebeständen (Sp_O) beobachtet werden, in denen Vertreter aus der Gattung *Helicotylenchus* bis zu 78 % der Gemeinschaften ausmachten.

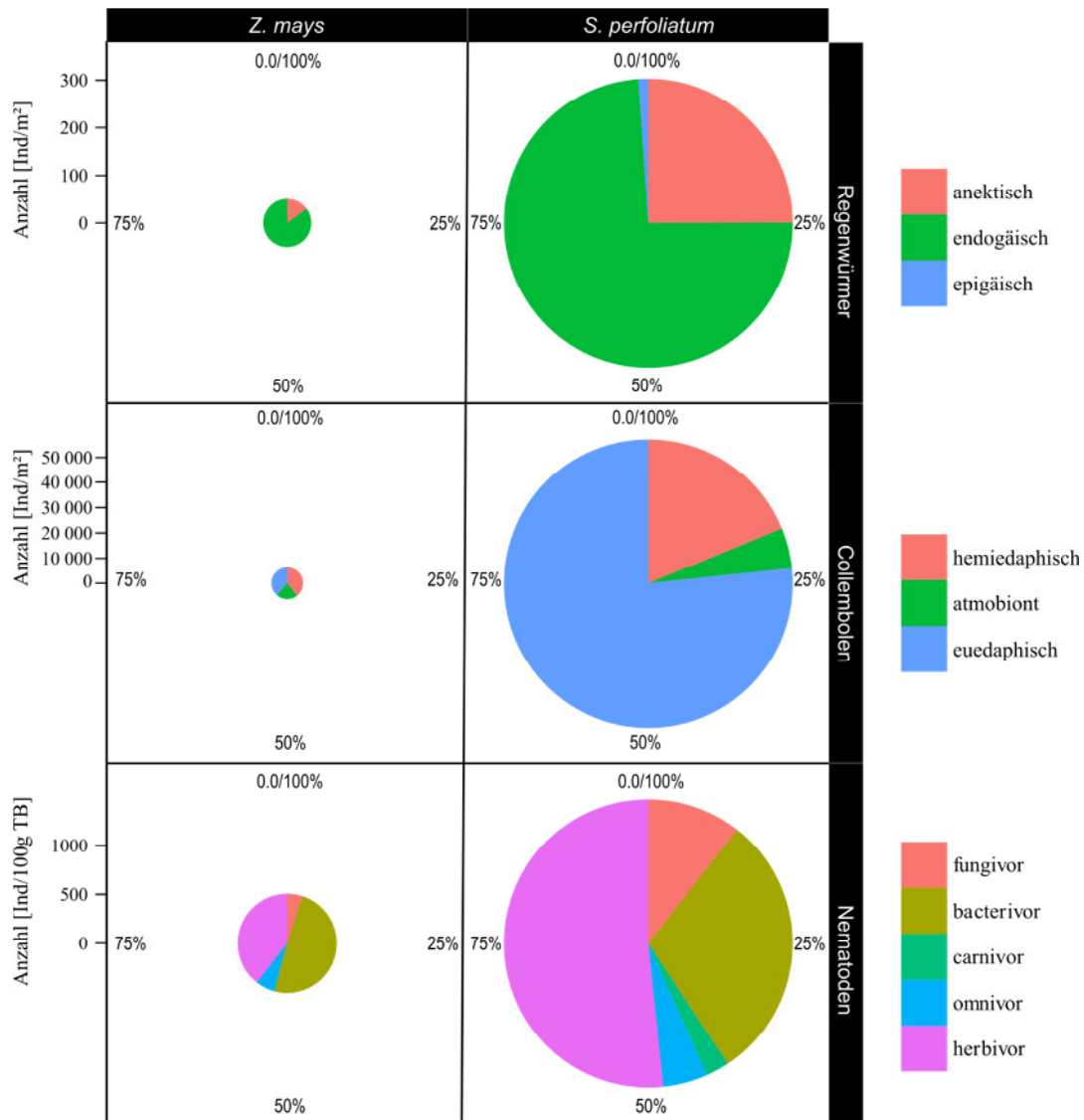


Abbildung 29: Relative Anteile der funktionellen Bodentier-Gruppen (oben: Regenwürmer; Mitte: Collembolen; unten: Nematoden) in den beiden Energiepflanzen (links: Mais; rechts: Durchwachsene Silphie). Der Radius der Kreisdiagramme entspricht der Gesamt-Abundanz der Bodentiergruppen. Mittelwerte für Mais (n = 6) und Silphie (n=12).

Die Zunahme anektischer Regenwürmer, die in der vorliegenden Untersuchung aus den großen Arten *L. terrestris* und *A. longa* bestanden, zeigt wie die Regenwurmgemeinschaften von der reduzierten Bodenbearbeitung profitieren. Ein geringeres mechanisches Verletzungsrisiko und der Verbleib pflanzlicher Streu auf dem Oberboden lässt diese Gruppe gedeihen. Da anektische Regenwürmer ihre Gänge bis in große Tiefe graben, verbessern sich die Wasserinfiltration und der Gasaustausch des Bodens (Edwards und Shipitalo 1998). Zusätzlich produzieren anektische Regenwürmer stabile Losung mit eingearbeiteter Streu an der Bodenoberfläche. So wird der Boden vor Erosion geschützt (Pitkanen und Nuutinen 1998). Das Vorkommen epigäischer Arten in der Silphie ist eine Besonderheit, die ihre Eignung als Refugium für artenreiche Gemeinschaften, wie sie in Ackerkulturen nur selten auftreten, zeigt.

Da die Collembolengemeinschaften vorwiegend von euedaphischen Vertretern dominiert werden, zeigt sich, dass vor allem der kleinporige Bodenraum an Habitatqualität für Collembolen gewinnt. Es ist zu vermuten, dass eine derartige Verbesserung durch eine Steigerung der biologischen Aktivität im Oberboden hervorgerufen wird, wodurch die Menge sich zersetzenden organischen Materials im kleinporigen Bodengefüge steigt. Daran könnten auch die zunehmende

Durchwurzelung und absterbende Wurzelteile beteiligt sein. Das organische Material, das im kleinporigen Bodengefüge Zersetzungsprozessen unterliegt, muss gut in das kleinporige Bodengefüge integriert sein. Primärzersetzer wie Regenwürmer, die organisches Material zerkleinern, in den Oberboden einarbeiten und Zersetzungsprozesse beschleunigen, könnten dabei eine wichtige Rolle spielen (Ehrnsberger 1993).

Die Zusammensetzung der Nematodengemeinschaft zeigt anhand der Erhöhung der fungivoren Nematoden, dass der pilzbasierte Zersetzerkanal an Bedeutung gewinnt. Dieser Zersetzerkanal ist langlebiger als ein auf Bakterien basierender und zeigt zeitlich separierte Aktivitäten im Nährstoffkreislauf des Bodens und ein höheres Potential zur Nährstoffspeicherung (Moore 1994). Die erhöhte Zahl pflanzenparasitischer Nematoden ist wahrscheinlich auf die dauerhafte Durchwurzelung des Bodens zurückzuführen. Durch direkte Verstoffwechselung von Pflanzenstoffen können Nematoden auch positiv zur Bodenfruchtbarkeit beitragen, sofern keine kritischen Populationsdichten erreicht werden (Freckman 1982). Auffällig bei der Untersuchung der pflanzenparasitischen Nematoden waren jedoch die extrem erhöhten Populationsdichten von *Helicotylenchus* spp. Eine Beurteilung seiner Schadwirkungen setzt jedoch noch weitere Untersuchungen im Feld voraus. Bislang sind jedenfalls keine Ertragseinbußen in den Sp_O Flächen aus den Untersuchungen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) bekannt. Auffällig war außerdem, dass Arten aus der Schädlingsfamilie der Pratylenchidae nur in Maisbeständen auftraten.

1.1.2.6 Begleitende Erfassung physiko-chemischer Boden-Parameter bei unterschiedlich alten Silphiebeständen

Eine begleitende Erfassung der abiotischen Bodeneigenschaften wurde durchgeführt, um deren Einfluss auf die Bodenfauna in den Datenanalysen zu berücksichtigen. Unterschiede in den abiotischen Eigenschaften von Böden können das Vorkommen von Arten mit spezifischen Habitatansprüchen einschränken oder fördern. Die Kriterien der Flächenauswahl sahen zwar vor, die abiotischen Eigenschaften der Böden möglichst gleich zu halten, dennoch sind Veränderungen der physiko-chemischen Parameter in Freilanduntersuchungen nicht immer voraussehbar. Zudem können Starkwetterereignisse die Bodenfauna beeinflussen und beispielsweise zu vertikaler Wanderung in tiefere Bodenschichten führen. Starker Regenfall an einem bestimmten Standort kann die Bodenfeuchte und den pH-Wert des Bodens verändern, und so die Effekte der Altersstufen lokal überschatten. Solche Ereignisse verfälschen die Auswertung der Untersuchung, wenn sie unberücksichtigt bleiben. Die Erfassung physikochemischer Parameter dient daher auch als Gewährleistung der Vergleichbarkeit der biotischen Flächendaten.

Bodenfeuchte, pH-Wert, C- und N-Gehalte wurden im Labor aus zusätzlich entnommenen Bodenkernen (d = 4 cm, h = 10 cm, n = 5) ermittelt. Die Korngrößenverteilung wurde extern von der LUFA Nord-West (Hameln) bestimmt. Tagesmittelwerte für die Klimadaten wie Temperatur (in 5 cm über dem Boden), Luftfeuchte und Niederschlag stammten von Messstationen, die den Standorten am nächsten lagen und wurden über eine Periode von 30 Tagen, endend am Tag der Probennahme, gemittelt.

Die abiotischen Parameter pH-Wert, Bodenfeuchte, C:N Verhältnis, Sand-, Schluff- und Tongehalt sowie die Klimadaten an den nächstgelegenen Messstationen wie Temperatur, Luftfeuchte und Niederschlag waren über den Untersuchungszeitraum weitestgehend konstant (Abbildung 30). Die Korngrößenverteilung zeigte jedoch höhere Werte im Tongehalt für Sp_O Flächen und höhere Werte im Sandgehalt für Sp_I2 Flächen. Zudem hatten die Sp-O Flächen einen leicht niedrigeren pH-Wert. Junge Sp_Y Flächen hatten hingegen teilweise ein sehr hohes C:N Verhältnis.

Unterschiede in den Kornfraktionen sind den unterschiedlichen Standorten des Freiland-Untersuchungsdesigns geschuldet. Die Sp_O Flächen, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung beprobt wurden, waren einmalig hinsichtlich ihres Alters und daher unverzichtbar für die vorliegende Untersuchung. Die Schwankungen im pH-Wert liegen in einer Skala, die für Bodenorganismen tolerierbar ist, sodass keine Einflüsse auf die Bodenlebensgemeinschaften zu erwarten sind. Starkregenperioden, die den Probennahmen vorausgegangen sind, traten nur vereinzelt an wenigen Standorten auf und überstiegen im Mittel nie 30 mm über einen Zeitraum von 30 Tagen. Eine tiefgreifende Veränderung in den Proben der Bodenfauna konnte nicht festgestellt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die begleitenden Umweltparameter keine verfälschenden Einflüsse auf die Erhebung der Bodentiergemeinschaften ausüben.

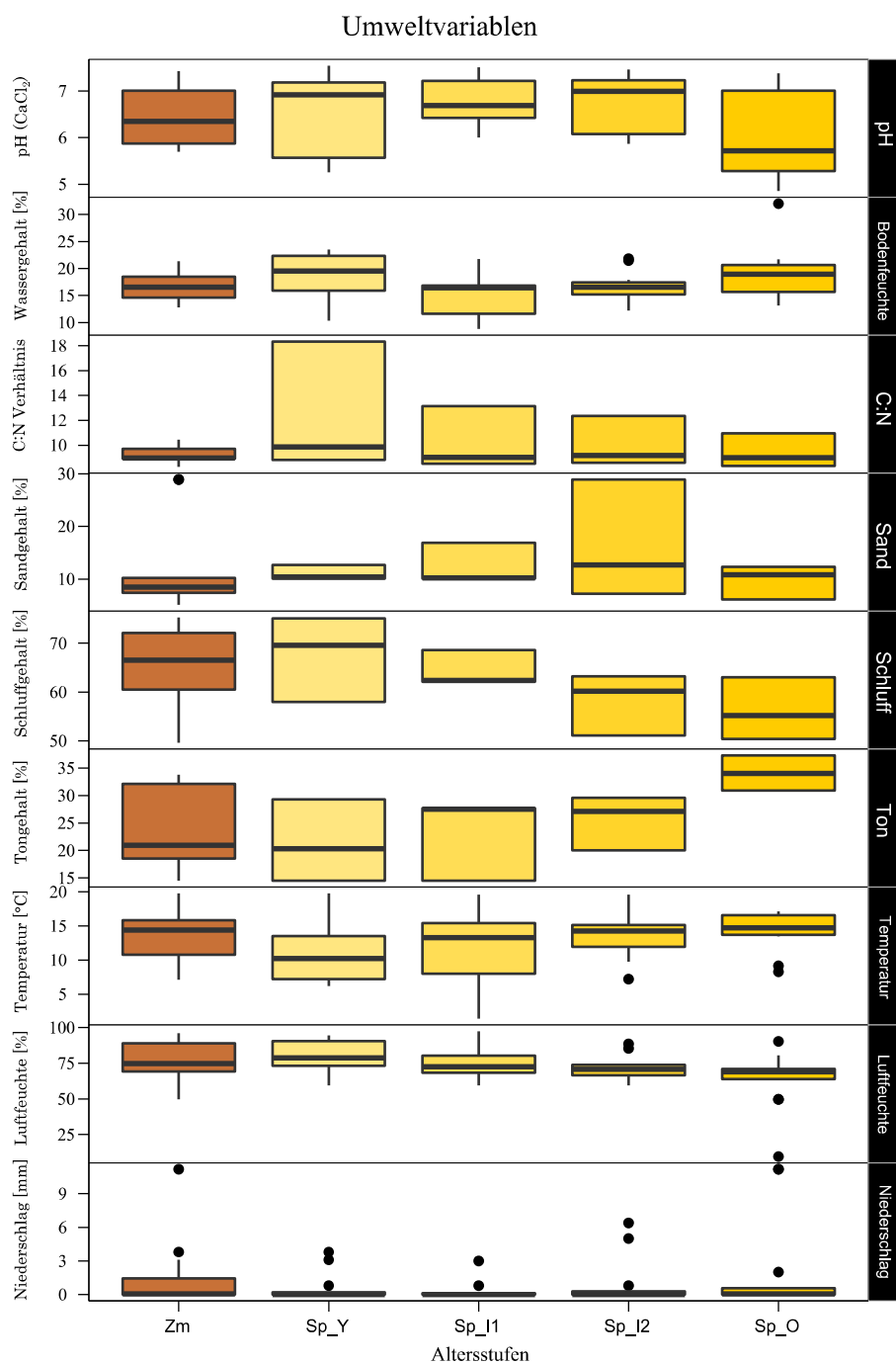


Abbildung 30: Variationsbreite der Umweltvariablen in Mais und den Altersstufen der Silphiebestände. Box-Whisker Darstellung. Die abiotischen Parameter zu den Altersstufen waren während des Untersuchungszeitraumes weitgehend konstant. Abkürzungen der Beschriftungen siehe Tabelle 3.

1.1.2.7 Analyse gasförmiger Stickstoff-Verluste bei Abbauprozessen von Ernterückständen der Silphie durch Bodentiere

Ziel der großflächigen Förderung von Biomasseproduktion zur Biogasgewinnung ist neben einer Reduktion fossiler Energieträger vor allem die Minderung von Treibhausgasemissionen. Neuere Forschungen haben ergeben, dass durch die Fraßaktivität von Regenwürmern, Lachgasemissionen signifikant ansteigen können (Lubbers 2013). Dieser Effekt ist auf die Fraßaktivität der Regenwürmer zurückzuführen. Da in Beständen der Silphie ein erhöhter Streueintrag zu erwarten ist, könnten durch Regenwurmaktivität steigende Treibhausgasemissionen zu einem wichtigen Aspekt im Management solcher Systeme werden. Ob der Effekt erhöhter Lachgasemissionen auftritt, hängt auch von der Nahrungsqualität und -attraktivität der Silphiestreu ab.

In einem Laborversuch mit Boden-Mesokosmen wurde die Eignung von Silphiestreu als Nahrungsressource gemeinsam mit den dabei entstehenden Lachgas- (N_2O) und Kohlenstoffdioxid- (CO_2) Emissionen untersucht. Zusätzlich wurde die Bodentextur variiert, die ein bestimmender Faktor für die Höhe von Treibhausgasemissionen aus Böden ist (Maag und Vinther 1996). Die Silphiestreu wurde isotopisch markiert (6,87 atom% ^{15}N) und als Futter für Regenwürmer und Collembolen angeboten. Als Vertreter der Regenwürmer wurde der anektische *Lumbricus terrestris* verwendet, bei den Collembolen kam die euedaphische Art *Folsomia candida* zum Einsatz. Die Tierbesätze bestanden aus Einzelbesatz der beiden Arten, beiden Arten in Kombination und Kontrollen ohne Bodenorganismen. Die Mesokosmen waren luftdicht verschließbare Weckgläser ($V=1,6\text{ l}$, Abbildung 31), die an ein offenes Durchflusssystem angeschlossen und mit 50 ml/min Außenluft kontinuierlich gespült wurden. Die Proben für die Gasmessungen wurden hinter den Mesokosmen aus dem Durchfluss entnommen. Um den Effekt der Bodentextur zu untersuchen, wurden die Mesokosmen jeweils mit lehmigem und sandigem Boden gefüllt. Jede Behandlung wurde in 4 Wiederholungen erstellt. Insgesamt ergaben sich 32 Mesokosmen. Der Versuch fand unter standardisierten Bedingungen bei 15 °C in einer Klimakammer über einen Zeitraum von 48 Tagen statt.



Abbildung 31: Gasdicht verschlossene Boden-Mesokosmen angeschlossen an ein Durchflusssystem. Probenflaschen sind den Mesokosmen nachgeschaltet.

Die kumulativen Treibhausgasemissionen für N₂O und CO₂ waren unter Anwesenheit von *L. terrestris* deutlich erhöht (ANOVA; $F_{(1,55)} = 43,6$; $p < 0,01$), während *F. candida* keine Auswirkungen hatte (ANOVA; $F_{(1,55)} = 0,02$; $p = n.s.$) (Abbildung 32). In sandigem Boden war die durch *L. terrestris* hervorgerufene Erhöhung der N₂O Emission deutlich geringer, in seiner Abwesenheit lagen sie jedoch über denen aus lehmigem Boden. Die CO₂ Emissionen waren ebenfalls geringer, die Unterschiede waren jedoch nicht so hoch (Abbildung 32). Bei der Anreicherung von ¹⁵N im Gewebe zeigten die beiden Tierarten gegensätzliche Effekte in Abhängigkeit von der Bodentextur (Abbildung 32). *F. candida* war in sandigem Boden stärker mit ¹⁵N angereichert, während das Gewebe von *L. terrestris* in lehmigem Boden höhere Anteile an ¹⁵N aufwies (ANOVA; $F_{(1,20)} = 31,8$; $p < 0,001$).

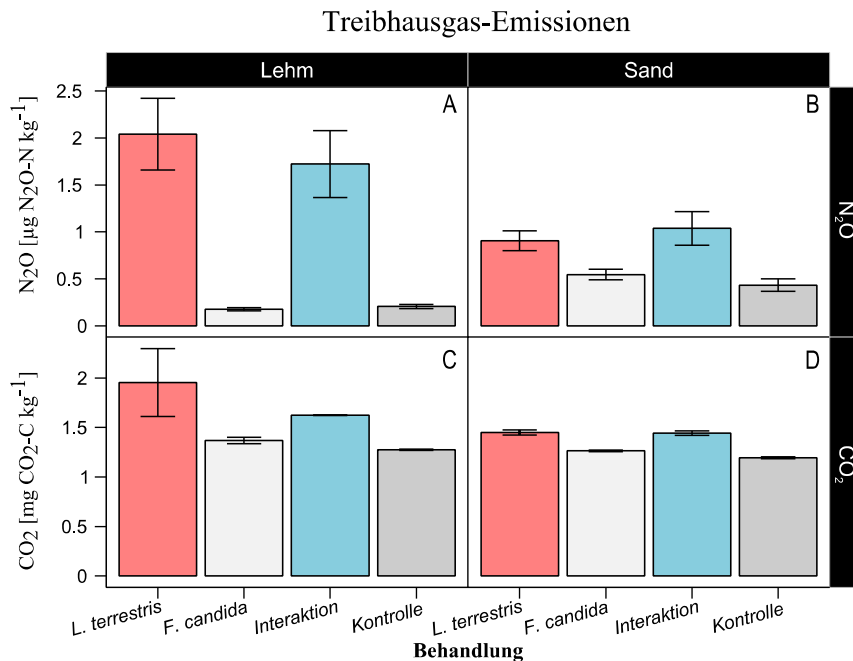


Abbildung 32: Ergebnisse der Treibhausgasmessungen. *L. terrestris* (Regenwürmer) erhöhte die kumulativen Emissionen sowohl bei N₂O als auch bei CO₂ (ANOVA; $F_{(1,55)} = 43,6$; $p < 0,01$). In sandigem Boden waren die Emissionen jedoch niedriger (ANOVA; $F_{(1,55)} = 5,3$; $p = 0,03$). Die CO₂ Emissionen waren generell um eine Skaleneinheit erhöht. Mittelwerte mit Standardfehler ($n=4$).

L. terrestris assimilierte in lehmigem Boden mehr Stickstoff aus Silphiestreu, das bedeutet die Fraßaktivität ist in lehmigem Boden höher gewesen. Da der N-Gehalt in sandigen Böden tendenziell geringer war, ist es unwahrscheinlich, dass dort eine Verwertung anderer Stickstoffquellen stattfand. Lehmiger Boden bietet mehr Stabilität für die Wohnröhren von *L. terrestris* und enthält in der Regel eine höhere Dichte an Mikroorganismen als sandiger Boden, da die besiedelbare Oberfläche der Bodenpartikel größer ist. Des Weiteren hält lehmiger Boden mehr Wasser und bietet Regenwürmern ein feuchteres Mikroklima. Es ist anzunehmen, dass das Streumaterial auf lehmigem Boden schneller vorzersetzt wurde und *L. terrestris* so höhere Mengen leicht assimilierbaren Stickstoffs verdaut hat. Zudem musste weniger Energie für den Bau neuer Gänge verwendet werden.

Die höheren Lachgasemissionen in Lehm sind vermutlich auf eine erhöhte Stimulation mikrobieller Zersetzung zurückzuführen. Der "Priming Effekt", d.h. das Einarbeiten von Blattstreu in den Boden bei gleichzeitiger Inokulation mit zersetzenden Bakterien durch Regenwürmer, stimulierte Denitrifikationsprozesse unter anaeroben Bedingungen in der Drilosphere und führte so zu erhöhten Lachgasemissionen. Im Sand hingegen liefen die Abbauprozesse langsamer und auf Grund der gröberen Porenstruktur unter stärker aeroben Bedingungen ab.

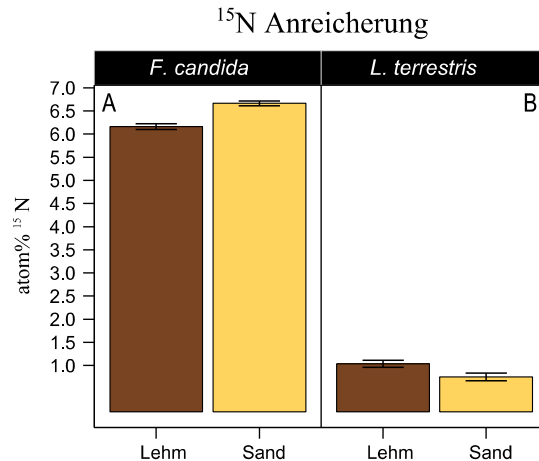


Abbildung 33: Verwertung von Silphiestreu durch Bodentiere. A, ¹⁵N-Anreicherung im Gewebe von *L. terrestris* (Regenwürmer). B, ¹⁵N-Anreicherung im Gewebe von *F. candida* (Collembolen). Beide Bodentiere zeigten unterschiedlich starke Verwertung der Streu in Abhängigkeit der Bodentextur (ANOVA; $F_{(1,20)} = 31,8$; $p < 0,001$). Mittelwerte mit Standardfehler (n=4).

F. candida war insgesamt sehr stark mit ¹⁵N angereichert, was vermuten lässt, dass pflanzlicher Stickstoff die Hauptstickstoffquelle für die euedaphische Collembolen Art war. Die Tatsache, dass die Anreicherung im Lehm jedoch niedriger war, zeigt, dass *F. candida* in lehmigem Boden alternative Stickstoffquellen genutzt hat, die durch die mikrobielle Gemeinschaft im Boden und den tendenziell höheren Stickstoffgehalt bereit gestellt wurden. Ein Einfluss von *F. candida* auf Treibhausgasemissionen war nicht feststellbar.

Wir konnten feststellen, dass Silphiestreu eine geeignete Nahrungsquelle für Bodentiere darstellt. Bei ihrer Verwertung durch Regenwürmer können gasförmige Stickstoffverluste durch Produktion des Treibhausgases N₂O auftreten. Um diesen Effekt aus dem Labor auf das Freiland zu übertragen, bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen im Feld. Klimarelevante Emissionen von Treibhausgasen aus Silphiefeldern sind aus unserer Sicht nicht zu erwarten, da die Streuschicht dann ganzjährig die Felder bedecken müsste. Hinzukommen jahreszeitliche Aktivitätsschwankungen der Regenwürmer und witterungsbedingte Einflüsse.

1.1.2.8 Einfluss von Wechselwirkungen zwischen Bodentieren und Energiepflanzen auf das Pflanzenwachstum in unterschiedlich texturierten Böden

Indem Bodentiere Einfluss auf Bodenbeschaffenheit und Bodenprozesse nehmen, verändern sie auch die Lebensbedingungen für die Pflanzen, die dort wachsen. Die Wurzelentwicklung der Pflanzen profitiert dabei von einem vergrößerten Porenraum und einer erhöhten Nährstoffverfügbarkeit aus Zersetzungsprozessen. Letztere stehen jedoch in engem Zusammenhang mit der Nährstoffqualität der Pflanzenstreu und hängen von der Bodentextur ab. Die Bodentextur bestimmt viele Bodeneigenschaften, wie Aggregatstabilität, Wasserhaltekapazität und mikrobielle Biomasse, Eigenschaften, die die Lebensbedingungen von Bodentieren maßgeblich beeinflussen. Ein sandiger Boden besitzt normalerweise eine niedrigere Wasserhaltekapazität, ist dadurch trockener und weist einen etwas niedrigeren pH-Wert auf. Lehmige Böden bieten Mikroorganismen eine größere besiedelbare Oberfläche und besitzen reichere mikrobielle Gemeinschaften.

Um die Wirkung von Bodenorganismen auf die Pflanzenentwicklung der beiden Energiepflanzenarten *Silphium perfoliatum* und *Zea mays* vergleichend zu untersuchen, wurde ein Phytokosmen-Experiment im Gewächshaus durchgeführt (Abbildung 34). Dazu wurden Plexiglasgläser (d = 11,5 cm, h = 22 cm) jeweils mit 2,4 kg sandigem oder lehmigem Boden befüllt. Anschließend wurden Setzlinge der beiden Energiepflanzenarten in die Phytokosmen

(PK) gepflanzt. In alle PK wurden 3 g Streu der jeweiligen Pflanze gegeben und Bodentiere eingesetzt. Die Tierbesätze mit den Arten *L. terrestris* (Regenwürmer) und *F. candida* (Collembola) bestanden aus Einzelartenbesatz, beiden Arten in Kombination und Kontrollen ohne Bodentiere. Jede Behandlung wurde für die beiden Boden- und Pflanzenarten fünf Mal wiederholt. Um die Bodentiere an der Flucht zu hindern, wurden die PK mit engmaschiger Gaze überspannt. Aus Gründen der Gewächshauskapazität wurde das Experiment für die beiden Bodenarten getrennt mit einem zeitlichen Abstand von 3 Monaten durchgeführt. Die Einzelexperimente dauerten 5 Wochen und fanden unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus statt. Die Tageslänge wurde simuliert und betrug durchgehend 13 h, die Temperatur schwankte im Mittel zwischen 13 °C in der Nacht und 26 °C am Tag.



Abbildung 34: Aufbau des Phytokosmenversuchs unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus.

Nach Ablauf des Experiments wurden die Biomasse der oberirdischen und unterirdischen Pflanzenteile, der Regenwürmer und die Anzahl der Collembolen in den PK bestimmt. Die Zunahme der einzelnen Variablen wurde aus der Differenz zu initialen Messungen zu Beginn des Experiments berechnet.

Es zeigte sich, dass das Wachstum der Wurzelbiomasse in Anwesenheit von *L. terrestris* signifikant zunimmt (ANOVA; $F_{(1,76)} = 20,5$; $p < 0,001$). Auch die Biomasse der Sprosslinge nahm in Anwesenheit von *L. terrestris* stärker zu, zeigte jedoch nur einen statistischen Trend (ANOVA; $F_{(1,76)} = 3,4$; $p = 0,07$). Hinsichtlich der Entwicklung der Bodentiergemeinschaften konnte ein starker positiver Einfluss von *S. perfoliatum* festgestellt werden. Die Biomasse von *L. terrestris* nahm im Verlauf des Experiments um durchschnittlich 0,5 g zu, während sie in den PK mit Mais eine Abnahme um durchschnittlich 0,1 g zeigte (ANOVA, $F_{(1,33)} = 24,9$; $p < 0,001$). Auch das Wachstum der Collembolenpopulation war in PK mit *S. perfoliatum* größer (ANOVA; $F_{(1,36)} = 16,3$; $p < 0,001$) (Abbildung 35).

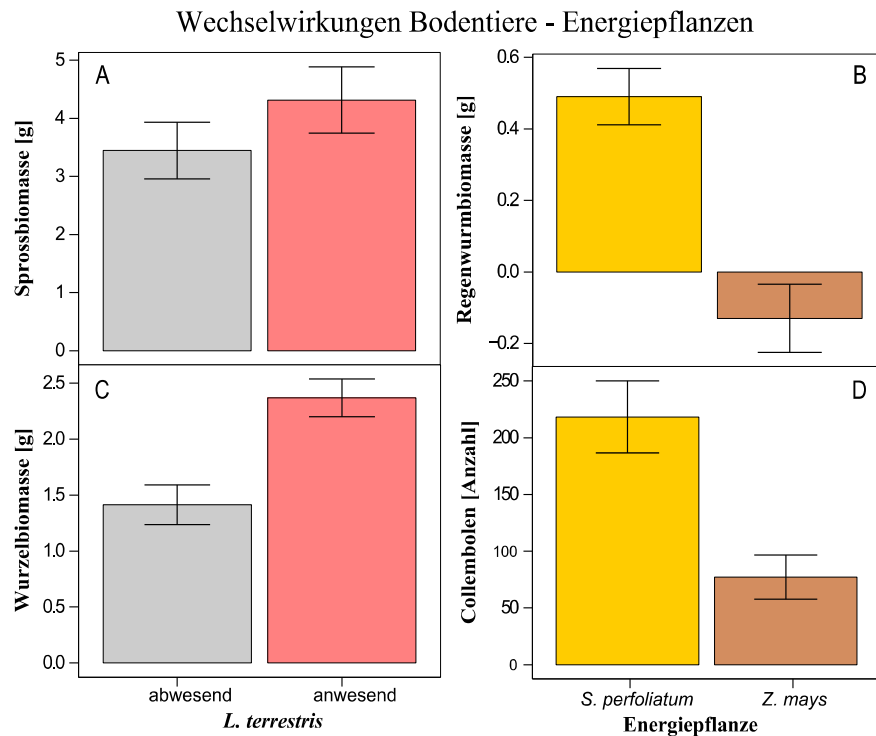


Abbildung 35: Ergebnisse des Phytokosmosversuchs. A, C, Einfluss von *L. terrestris* (Regenwürmer) auf das Sprosswachstum (ANOVA; $F_{(1,76)} = 3,4$; $p = 0,07$), und das Wurzelwachstum (ANOVA; $F_{(1,76)} = 20,5$; $p < 0,001$). B, D, Einfluss der Energiepflanzenart auf das Wachstum von *L. terrestris* (ANOVA, $F_{(1,33)} = 24,9$; $p < 0,001$) und die Populationsgröße von *F. candida* (Collembolen) (ANOVA; $F_{(1,36)} = 16,3$; $p < 0,001$).

Die Betrachtung des signifikant positiven Effekts von *L. terrestris* unter dem Gesichtspunkt der Bodentextur, zeigte, dass der Effekt in sandigem Boden signifikant größer war, als in lehmigem Boden (ANOVA; $F_{(1,74)} = 1,7$; $p < 0,01$) (Abbildung 36). Die Wurzelbiomasse nahm in Anwesenheit von *L. terrestris* in sandigem Boden um 1,7 g zu, während der Zuwachs in lehmigem Boden nur 0,4 g betrug.

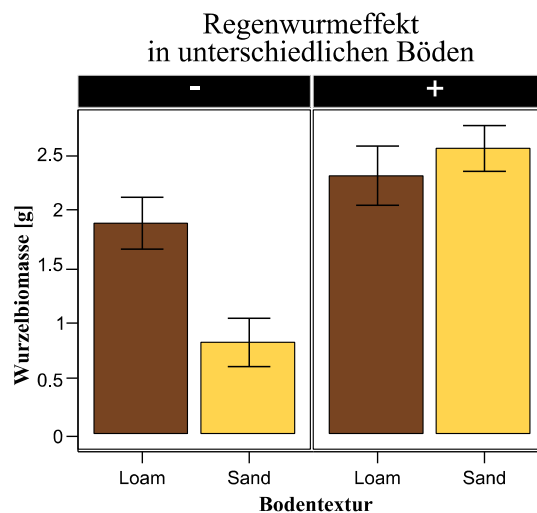


Abbildung 36: Einfluss von *L. terrestris* (Regenwürmer) auf das Wurzelwachstum in Abhängigkeit der Bodentextur (ANOVA; $F_{(1,74)} = 1,7$; $p < 0,01$). Mittelwerte mit Standardfehler (n=10). Links: Kontrolle ohne Regenwürmer; rechts: mit Regenwürmern.

Aus den durchgeführten Experimenten geht hervor, dass die Anwesenheit von *Lumbricus terrestris* das Pflanzenwachstum fördert. Es ist zu erwarten, dass die Silphie stärker von dem positiven Einfluss der Regenwürmer profitiert, da sie einen positiven Einfluss auf die Biomasse der Regenwürmer hat. Offensichtlich können Regenwürmer das Streumaterial der Silphie besser verwerten als das von Mais. Ebenso verhält es sich für *F. candida*. Die Populationen finden unter der Silphie ein stärker durchwurzeltes Bodengefüge vor, wodurch das Porenvolumen und folglich die besiedelbare Oberfläche für *F. candida* zunimmt. Auch teilweise absterbendes Wurzelmaterial und die durch Rhizodeposition an Nährstoffen angereicherte Bodensubstanz können die Nährstoffverfügbarkeit für *F. candida* positiv beeinflusst haben.

1.1.3 Zusammenfassung TV1

Durch die vorliegenden Arbeiten konnte ein differenziertes Bild über die potentielle Bedeutung der Durchwachsenen Silphie für oberirdische und unterirdische Biodiversität im Agrarökosystem gewonnen werden.

Es konnte gezeigt werden, dass Honigbienen die Silphie als Trachtquelle sehr gut annehmen. Während bei den niedersächsischen Praxisflächen, die sich im ersten Jahr der Blüte befanden, die Hauptblüte der Silphie im August zu verzeichnen war, also in einer Zeit, in der Imker für gewöhnlich bereits mit einer Varroa-Behandlung beginnen und das Nektarangebot für eine reiche Honigernte so zu spät kommt, konnte jedoch insbesondere die Nutzung des Silphiepollens durch die Honigbiene nachgewiesen werden. Da Honigbienen in der Zeit, in der die Silphie blüht, Pollen für das Fett-Eiweiß-Polster der Winterbienen benötigen, könnte die Silphie so einen wichtigen Beitrag für die Winterfestigkeit der Bienenvölker leisten.

Auch einige nicht domestizierte, wildlebende Bestäuber wie bestimmte Hummelarten und saprophage Schwebfliegen könnten von einem Anbau der Durchwachsenen Silphie verstärkt profitieren. Dieser positive Effekt hat aber zur Voraussetzung, dass in der Agrarlandschaft extensiv genutzte Habitate außerhalb der Ackerfläche erhalten bleiben, da diese den Bestäubern als Nisthabitat dienen können. Außerdem sollte bei einer weiteren Züchtung der Silphie berücksichtigt werden, dass sie für diese wildlebenden Insekten insbesondere als sehr späte Nahrungsquelle von Bedeutung ist, sodass ein optimaler Ertrag zu einem möglichst späten Erntetermin erreicht werden sollte.

Dennoch sei hier zu benoten, dass die Silphie zwar in kleinem Umfang auch von Wildbienen und aphidophagen Schwebfliegen genutzt wurde, die Nutzung aber im Vergleich zu anderen Habitaten in der Umgebung oder zu anderen Energiepflanzen mit multifloralem Blütenangebot doch recht eingeschränkt war. Auch Mais diente nachweislich als Pollenquelle für Honigbienen und einige aphidophage Schwebfliegen.

Es konnte gezeigt werden, dass die einzelnen Röhrenblüten der Blütenstände der Silphie zwar relativ geringe Mengen an Nektar und Pollen produzieren und die Menge je Blütenstand mit zunehmender Verzweigung der Triebe abnimmt, durch die hohe Anzahl an ausgebildeten Blütenständen das Trachtangebot aber doch recht üppig ist. Außerdem wurden auch einige für Honigbienen essentielle Aminosäuren in Nektar und Pollen nachgewiesen, sodass die Silphie auch zur Bienengesundheit einen Beitrag leisten könnte.

Dennoch sind die bisherigen Silphieflächen in der Regel noch recht klein (im Schnitt etwa ein Hektar groß) und dadurch, dass die Silphie diese insgesamt produzierten Mengen über einen vergleichsweise langen Zeitraum abgibt, ist die täglich angebotene Nektar- und Pollenmenge im Vergleich zu intensiven Massentrachten, wie es in dieser Zeit in nördlichen Regionen die Heideblüte darstellen kann, aber auch künstlich erzeugt durch Gründünger wie Senf zu finden ist, noch eher konkurrenzschwach, wie durch die Pollensammelaktivität der Honigbienen gezeigt werden konnte. Wir würden diesen Umstand aber eher positiv bewerten, denn so kann die Silphie in Landschaften, in denen ein reduziertes Nahrungsangebot vorliegt, einen wichtigen Beitrag zur Ernährung leisten, der Anbau der Durchwachsenen Silphie läuft aber auch wenig Gefahr, bestehende Bestäuberinteraktionen zu zerstören, wie es bspw. bei Raps gezeigt werden konnte, und so kein Bestäubungsdefizit bei Wildpflanzen entstehen würde.

Außerdem ist anzunehmen, dass die durchschnittliche Flächengröße in Zukunft zunimmt, wenn die Anlage der Silphiebestände nicht mehr durch Pflanzung, sondern durch Aussaat durchgeführt werden könnte. Hier geben unsere Ergebnisse einen Hinweis darauf, dass Insekten einen wichtigen Beitrag zur vollen Ausschöpfung des Saatgutpotentials leisten. Hier sehen wir noch weiteren Forschungsbedarf, insbesondere bei der Frage, ob bei abnehmender Pollenverfügbarkeit innerhalb der Sammelblüte die Bedeutung der Insektenbestäubung zunimmt.

und ob die Keimfähigkeit der Samen durch die biotische Fremdbestäubung durch Insekten zwischen verschiedenen Sammelblüten oder Pflanzen im Vergleich zur abiotischen Bestäubung, die wahrscheinlich vor allem innerhalb der Sammelblüte stattfindet, positiv beeinflusst werden kann.

Es hat sich außerdem gezeigt, dass Standortbedingungen, insbesondere im Hinblick auf die Wasserversorgung der Pflanzen nicht nur entscheidend für die Ertragsleistung der Durchwachsenen Silphie sind, sondern auch die Bedeutung der Biogaskultur für die oberirdische Biodiversität beeinflussen. So produzierte die Silphie unter Trockenstress deutlich weniger Nahrung, da im Vergleich zu Silphiebeständen mit ausreichendem Wasserangebot die Bildung von Blütenständen stark reduziert war und der Erntetermin früher ausfiel. Durch dieses reduzierte Nahrungsangebot wurden die unbewässerten Silphiebestände deutlich weniger häufig von Honigbienen besucht.

Auch können Standortbedingungen und Management der Flächen entscheidend für die Ausbildung einer Ackerwildkrautgesellschaft in den Silphiebeständen sein. Diese kann entstehen, weil die Silphie bei optimaler Bewirtschaftung im ersten Anlagejahr ab dem zweiten Anbaujahr extensiv ohne Herbizideinsatz auskommt, da im Frühjahr die Bestände schnell schließen und so Beikräuter unterdrückt werden. Wir nehmen an, dass nur ein Teil der Ackerwildkräuter, die noch in jungen Silphiebeständen nachgewiesen wurden, so zukünftig in den Silphiebeständen zur Blüte und Samenreife kommen könnten, sodass sich in älteren Silphiebeständen eine eigene Beikrautflora etablieren könnte. Diese könnte dann wieder Bestäuberinsekten als Nahrungsangebot im Frühjahr dienen, bevor die Silphiepflanzen den Boden beschatten.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass der Anbau der Durchwachsenen Silphie das Potential hat, die Bestäubergemeinschaften in der Agrarlandschaft positiv zu beeinflussen. Es wurde aber auch deutlich, dass der Anbau der Durchwachsenen Silphie allein nicht ausreichen würde, um dieses Potential voll auszuschöpfen, da sich die positiven Effekte eines Anbaus der Durchwachsenen Silphie nur in Zusammenhang mit einem größeren Landnutzungskonzept voll entfalten kann. Dies gilt sowohl für die Einbettung extensiver Strukturen in die landwirtschaftliche Nutzung, als auch eine weitreichende Diversifizierung des Energiepflanzenanbaus durch die Kombination verschiedener Biogaskulturen, da jede dieser Kulturen bestimmte Insektengruppen fördern kann. Unter diesen Voraussetzungen empfehlen wir den Anbau der Durchwachsenen Silphie, am besten in Kombination mit anderen blühenden Biogaskulturen (z.B. Wildpflanzenmischungen) und möchten betonen, dass schon die Integration kleinerer Schläge oder ein streifenförmiger Anbau zur Auflockerung größerer Maisschläge einen ersten positiven Effekt erzielen könnte.

Die Regenwurmpopulationen entwickeln sich in Böden unter der Silphie positiv, sowohl ihre Biomasse als auch ihre Abundanz nehmen zu. Die Regenwurm-Artengemeinschaften entwickeln sich in Richtung Grünland, bleiben gegenüber diesen jedoch verarmt. Die Regenwurmaktivität in der Silphie ist hoch und zeigt eine deutliche Verbesserung der Bodenstruktur hinsichtlich Aggregat- und Makroporenbildung an. Die Collembolen-Gemeinschaften entwickeln sich vor allem im kleinporigen Bodenvolumen, eine Zunahme euedaphischer Arten war deutlich zu erkennen. Dadurch zeigt die Silphie eine gesunde Entwicklung des Oberbodens an, mit erhöhter Zersetzungsaktivität und in Folge dessen einer Zunahme der Bodenfruchtbarkeit. Die Diversität von Collembolen-Gemeinschaften bleibt auf dem taxonomischen Niveau der Familien jedoch nahezu unbeeinflusst. Die Abundanz von Nematoden nimmt ebenfalls über die Jahre zu und lässt die Entwicklung eines pilzbasierten Zersetzerkanals beobachten. Dadurch können im Oberboden auf längere Zeit Nährstoffe gespeichert werden und es entsteht eine größere zeitliche Dynamik im Vergleich zu Maisanbausystemen, deren Zersetzerkanal vorwiegend durch Bakterien dominiert wird. Darüber hinaus konnte eine massive Vermehrung von Nematoden aus der Gattung *Helicotylenchus* in Silphiebeständen beobachtet werden. Wodurch diese Vermehrungen hervorgerufen werden, bleibt jedoch ungewiss, aber ein hohes Alter der Flächen

scheint ausschlaggebend zu sein. Darüber hinaus bleibt der Einfluss dieser Spezies auf das Bodennahrungsnetz ungeklärt. Es ist gut möglich, dass die direkte Verwertung pflanzlicher Stoffe eine Anreicherung leicht abbaubarer organischer Substanzen hervorruft. Ein schädlicher Einfluss auf die Biomasseproduktion wurde bislang nicht beobachtet.

Das Anbausystem der Silphie zeigt deutliche Anzeichen einer verbesserten Resilienz gegenüber Wind- und Wasser-Erosion durch die Grabaktivitäten von Regenwürmern. Darüber hinaus gibt es deutliche Anzeichen, dass die Abbauprozesse von organischem Material im Oberboden großflächiger stattfinden als in Maisanbausystemen. Dazu trägt sowohl die bessere Verwertbarkeit der Silphiestreu, als auch die höhere Nahrungsverfügbarkeit für Bodenlebewesen bei. Die an der Zersetzung beteiligten Energiekanäle weisen Eigenschaften auf, die Nährstoffe längere Zeit im Boden speichern und wieder zur Verfügung stellen.

Aus den Laborversuchen geht hervor, dass es bei hoher Regenwurmkaktivität und großer Ressourcenverfügbarkeit zu erhöhten Stickstoffverlusten durch die Entstehung von Treibhausgasen kommen kann. Wie sich dieses Phänomen jedoch im Freiland verhält, ist nur durch weitere Untersuchungen feststellbar. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass der Effekt von Regenwürmern insbesondere in sandigen Böden die Umweltbedingungen für die Silphie erheblich verbessern kann. Auch die Treibhausgasproduktion war in sandigen Böden deutlich geringer.

Ein gezieltes Management der Bodenfauna in Silphiebeständen durch erhöhten Streueintrag, könnte insbesondere auf sandigen Standorten die Biodiversität und Bodeneigenschaften nachhaltig verbessern und dabei positiv auf das Pflanzenwachstum einwirken, wie der Gewächshausversuch zeigt.

1.2 Ergebnisse des TV2 „Wasserhaushalt und Ökophysiologie der Durchwachsenen Silphie“ (Schittenhelm, Schoo, Schroetter)

1.2.1 Feldversuch in Braunschweig

In den Jahren 2012, 2013 und 2014 wurden drei Fruchtarten mit unterschiedlichen Anbausystemen (Silphie-Dauerkultur, Mais-Selbstfolge und mehrjähriges Luzernegras) ohne und mit Zusatzbewässerung auf dem Versuchsfeld des JKI in Braunschweig geprüft (Abbildung 37). Der Versuch war als zweifaktorielle Spaltanlage mit vier Wiederholungen angelegt. Die Wasserregime bildeten die Großteilstücke und die Anbausysteme die Kleinteilstücke. Jede der insgesamt 24 Parzellen hatte eine Größe von 240 m² (40 x 6 m). In den zusätzlich beregneten Parzellen sollte sichergestellt werden, dass die Bodenfeuchte nicht unter 50% nutzbarer Feldkapazität (nFK) absinkt. Die Bestandesdichte für Silphie und Mais betrug 4 bzw. 9 Pflanzen pro Quadratmeter. Die detaillierten Anbaudaten für die drei Kulturen in den drei Versuchsjahren sind aus den Tabelle A3, A4 und A5 im Anhang ersichtlich.

Der Mais diente als Vergleichskultur, weil er die derzeit leistungsstärkste und mit über 800.000 ha Anbaufläche (DMK 2013) auch die mit Abstand wichtigste Biogaspflanze darstellt. Darüber hinaus besitzt der Mais als C4-Pflanze eine hohe Wassernutzungseffizienz. Das Luzernegras (Artenzusammensetzung siehe Tabelle A3) hingegen zeichnet sich durch eine tiefe und intensive Durchwurzelung des Bodens aus. Dies lässt eine gute Ausschöpfung des Bodenwasservorrates erwarten. Mais und Luzernegras stellen mithin die Benchmarks für die Beurteilung der Silphie dar hinsichtlich der beiden Komponenten einer effizienten Wassernutzung: (a) hohe Wasseraufnahmeeffizienz durch eine intensive und tiefe Durchwurzelung (Luzernegras) sowie (b) effiziente Nutzung des aufgenommenen Wassers für die Produktion von Biomasse (C4-Pflanze Mais).



Abbildung 37: Fotodokumentation zum Bewässerungsfeldversuch in Braunschweig: (a) Luftaufnahme des Versuchs; (b) Auspenden und (c) Anwässern der Silphie; (d) etablierter Silphiebestand mit Messstelle für Bodenfeuchte; Maschinelle Ernte von (e) Luzernegras und (f) Silphie.

Im Etablierungsjahr (2012) der Silphie wurden die Jungpflanzen während mehrerer Wochen gewässert (Abbildung 37c). Die Anpflanzungen wurden per Handhacke von Unkraut freigehalten. Ab dem zweiten Standjahr konnte aufgrund des schnellen Bestandesschlusses auf eine

Unkrautregulierung verzichtet werden. Durch diese und auch nachfolgende intensive Pflegemaßnahmen standen sehr gut entwickelte und gleichmäßige Bestände zur Verfügung, die eine experimentell solide Basis für die Beantwortung der Versuchsfragen gewährleisteten. In allen drei Kulturen wurde lediglich der Kernbereich der Parzellen maschinell geerntet und für Ertragsbestimmungen, Batch-Tests und chemische Analysen genutzt. Die Größe dieser Kernparzellen betrug bei der Silphie 160 m², bei Mais und Luzernegras jeweils 120 m².

Die Wetterbedingungen in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 wichen teilweise deutlich von den langjährigen Mittelwerten am Standort Braunschweig ab (Tabelle 7). In der Vegetationsperiode 2012 bestand mit Ausnahme des Monats Juli ein deutliches Niederschlagsdefizit. Das hatte in Verbindung mit den über dem langjährigen Mittel liegenden Lufttemperaturen einen starken Trockenstress in den unbewässerten Parzellen zur Folge.

Das Versuchsjahr 2013 war aufgrund einer langanhaltend kühlen Witterung bis Ende März durch einen späten Vegetationsbeginn gekennzeichnet. Die ungünstigen Wachstumsbedingungen setzten sich im Mai mit einer 4-fach über dem langjährigen Mittel liegenden Niederschlagsmenge bei gleichzeitig niedrigen Lufttemperaturen fort. Aufgrund der ergiebigen Niederschläge wurde die Feldkapazität des Bodens überschritten, so dass größere Sickerwasserverluste auftraten. Durch anhaltend hohe Lufttemperaturen und ein deutliches Niederschlagsdefizit im Zeitraum Juni bis August wurde der zunächst gut gefüllte Bodenwasserspeicher sehr schnell aufgebraucht. Bereits im Juni 2013 war eine erste Zusatzbewässerung erforderlich.

Die Vegetationsperiode 2014 begann bereits Anfang März und damit deutlich früher als im Jahr 2013. Verantwortlich dafür waren hohe Lufttemperaturen von Februar bis April. Die milde Witterung wurde von einem ausgeprägten Niederschlagsdefizit begleitet. So fielen im März lediglich 15% des langjährigen Mittels an Regen. Die dadurch bedingte Frühsommertrockenheit wurde durch ergiebige Niederschläge im Mai beendet. Abgesehen von kurzzeitigen Hitzeperioden im Juni und Juli war die Hauptwachstumszeit von Juni bis August durch moderate Temperaturen und sehr gleichmäßig verteilte Niederschläge in Höhe der langjährig gemessenen Regenmengen gekennzeichnet. Im Monat September waren dagegen wieder hohe Lufttemperaturen und ein deutliches Niederschlagsdefizit zu verzeichnen.

Der auf dem Versuchsfeld vorherrschende Bodentyp ist als Parabraunerde bzw. Haplic Luvisol (FAO 1997) klassifiziert, wobei stellenweise typische Eigenschaften einer Bänderparabraunerde (Lamellic Luvisol) vorherrschen (Tabelle 8). Dem im Oberboden (bis 60 cm Tiefe) schluffig bis lehmige Sand mit einer relativ guten Wasserhaltefähigkeit folgt nach unten hin Sand mit lediglich geringen Schluffbeimengungen. Im Bereich der teils deutlich ausgeprägten Bänderung zwischen 60 und 90 cm Bodentiefe (Abbildung 38) liegen sowohl erhöhte Tongehalte als auch sehr hohe Lagerungsdichten vor, wodurch Staunässe sowie Einschränkungen in der Durchwurzelbarkeit auftreten können. Die nutzbare Feldkapazität in der Bodenschicht bis 150 cm Tiefe beträgt 185 mm.

Tabelle 7: Mittlere monatliche Lufttemperaturen und Niederschlagssummen sowie (in Klammern) Abweichungen von den langjährigen Monatsmittelwerten[†] in der Vegetationsperioden 2012 bis 2014 am Standort Braunschweig.

Monat	Lufttemperatur (°C) [‡]						Niederschlag (mm) [‡]					
	2012		2013		2014		2012		2013		2014	
März	7,8	(+3,4)	-0,4	(-4,8)	7,4	(+3,1)	9	(-37)	24	(-22)	7	(-39)
April	8,8	(+0,5)	8,6	(+0,4)	11,5	(+3,3)	35	(-10)	36	(-9)	40	(-5)
Mai	14,6	(+1,5)	12,4	(-0,6)	12,8	(-0,2)	45	(-8)	200	(+147)	88	(+35)
Juni	15,1	(-0,2)	16,2	(+0,3)	15,9	(0,0)	59	(-8)	15	(-52)	55	(-12)
Juli	17,5	(-0,2)	19,6	(+2,0)	20,2	(+2,5)	120	(+58)	33	(-30)	89	(+27)
August	18,7	(+1,3)	18,7	(+1,1)	16,4	(-1,1)	30	(-35)	44	(-20)	64	(0)
September	14,4	(+0,5)	13,6	(-0,4)	15,7	(+1,7)	21	(-29)	55	(+5)	16	(-34)
Mittelwert bzw. Summe	13,9	(+0,9)	12,7	(-0,3)	14,3	(+1,4)	318	(-68)	407	(+37)	360	(-27)

[†] Mittel der Jahre 1962 bis 2006.

[‡] Die Daten wurden vom Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienst in Braunschweig zur Verfügung gestellt.

Tabelle 8: Bodeneigenschaften des Versuchsfeldes in Braunschweig.

Bodentiefe	Sand	Schluff	Ton	Textur	Dichte	nFK	Mittelporen	Feinporen
(cm)	(%)	(%)	(%)		(g m ⁻³)	(Vol.-%)	(%)	(%)
0-20	59,8	33,2	7,0	Su3	1,5	23,0	14,6	4,3
20-40	59,9	34,4	5,7	Su3	1,5	24,2	15,2	4,6
40-60	72,4	24,5	3,1	Su2	1,6	15,4	8,2	3,1
60-80	82,9	8,9	8,2	St2	1,6	9,3	5,5	4,2
80-100	92,9	5,0	2,2	Ss	1,5	6,3	3,2	2,1
100-120	91,2	3,7	5,0	Ss	1,6	5,1	4,0	3,4
120-140	90,7	4,9	4,4	Ss	1,7	6,1	4,8	3,0
140-150	77,9	9,8	12,3	St2	1,7	8,0	6,9	9,1

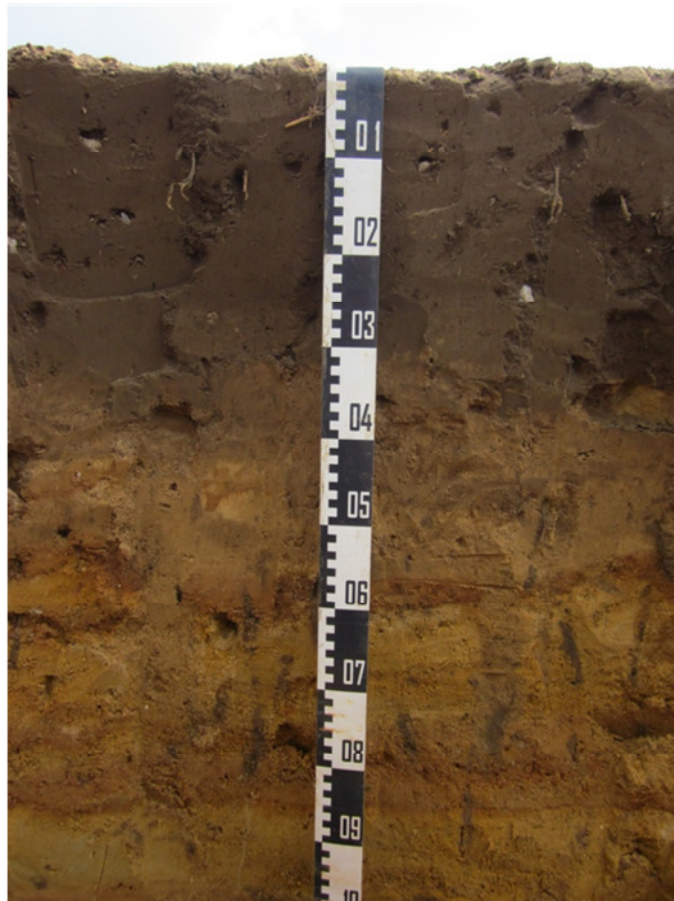


Abbildung 38: Bodenprofil des Versuchsfeldes in Braunschweig mit Tonbändern in etwa 60 und 90 cm Bodentiefe.

1.2.1.1 Bodenfeuchte, Wassereffizienz und Biomasseertrag

Das Bodenfeuchtemonitoring erfolgte mit dem kapazitiven Rohrsondenmesssystem Diviner 2000 (Sentek Technologies, Stepney, Australien). Dazu wurden in jedem der drei Versuchsjahre zu Vegetationsbeginn (Silphie, Luzernegras) bzw. nach der Aussaat (Mais) je zwei 200 cm lange PVC-Rohre in jede der insgesamt 24 Versuchspartzellen eingebaut. Die Bodenfeuchte wurde zweimal wöchentlich in 10 cm Tiefenintervallen gemessen. In den Jahren 2012, 2013 und 2014 erfolgten insgesamt 32, 42 bzw. 52 Bodenfeuchtemessungen.

Die Diviner 2000 Sonde gibt dimensionslose Werte, sog. „scale frequency readings“, für die Bodenfeuchte aus. Diese Werte werden mittels einer im Gerät abgelegten Kalibrationsgleichung in Volumenprozent (Vol.-%) Bodenwasser umgerechnet. Zum Zwecke einer feld- und tiefenspezifischen Kalibration wurden die Bodenwassergehalte beim Einbau der PVC-Rohre sowie zu mehreren nachfolgenden Terminen mit unterschiedlicher Bodenwassersättigung gravimetrisch bestimmt. Danach wurde für jede Bodentiefe (10 cm Schritte) eine separate Regressionsanalyse durchgeführt. Mit Hilfe dieser tiefenspezifischen Kalibration ließ sich das Bestimmtheitsmaß von 0,45 für die Werkskalibration auf $R^2 = 0,64$ erhöhen (Abbildung 39). In anderen Studien wurden zum Teil deutlich höhere Messgenauigkeiten erreicht (Geesing et al. 2004, Evett et al. 2006, Paraskevas et al. 2012). Der Grund hierfür dürfte in dem inhomogenen Bodenprofil am Standort Braunschweig liegen. Niedrigere Bestimmtheitsmaße wurden vorwiegend im Bereich der zum Teil verdichteten und wasserstauend wirkenden Tonbänder gefunden, die sich in wechselnden Tiefen befinden und damit eine variable Horizontabfolge innerhalb der Versuchsfläche bewirken.

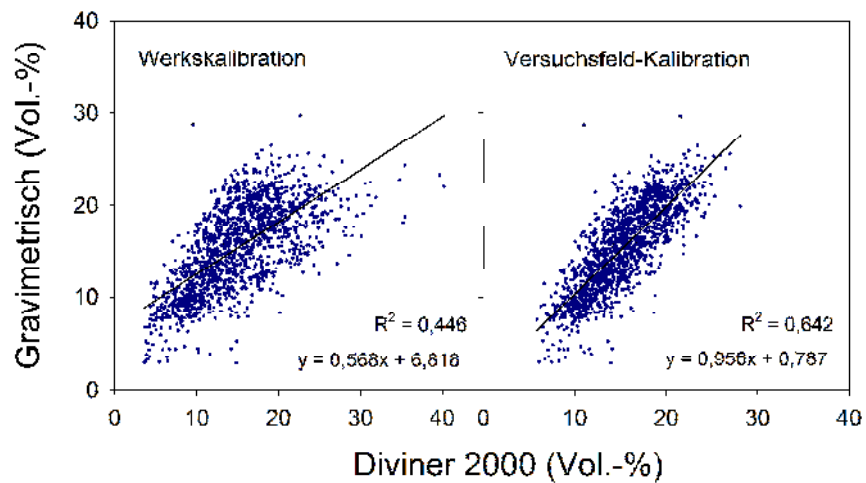


Abbildung 39: Vergleich der Werkskalibration des Diviner 2000 Bodenfeuchtemesssystems mit der tiefspezifischen Feldkalibration am Standort Braunschweig (n = 1.714).



Abbildung 40: Künstliche Beregnung der Großparzellen von Silphie, Mais und Luzernegrass mit einer Beregnungsmaschine (oben); Luftaufnahme der Wasserverteilung (unten; Quelle: Google Earth).

Die Beregnungssteuerung erfolgte anhand der Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen. Zusätzlich wurde das Beregnungsmodell „Agrowetter“ des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit Mais als Leitkultur herangezogen. Bei jeder Beregnungsmaßnahme wurden maximal 30 mm Wasser ausgebracht, um Oberflächenabfluß und Sickerung zu vermeiden und eine möglichst zuverlässige Schätzung der von den Pflanzen tatsächlich aufgenommenen Wassermengen über die Wasserhaushaltsgleichung zu erhalten. Detaillierte Angaben zu den Bewässerungsmaßnahmen sind den Tabellen A3, A4 und A5 im Anhang zu entnehmen. Die Bewässerungsgaben sollten eine ständige Bodenfeuchte von zumindest 50% der nutzbaren Feldkapazität sicherstellen. Dazu wurden in den Vegetationsperioden 2012 und 2013 alle Kulturen über eine Trommelberegnungsmaschine mit separatem Regnerwagen künstlich über Kopf beregnet (Abbildung 40). Trotz der geringen Biomasseentwicklung der Silphie im Etablierungsjahr zeichnete sich bereits ein gegenüber Mais und Luzernegras hoher Wasserverbrauch ab.

Der Verlauf der Bodenwassergehalte der bewässerten Parzellen zeigt, dass im ersten Nutzungsjahr der Silphie (2013) teilweise starke Unterschiede in der Bodenwasserverfügbarkeit gegenüber den Vergleichskulturen vorlagen (Abbildung 41).

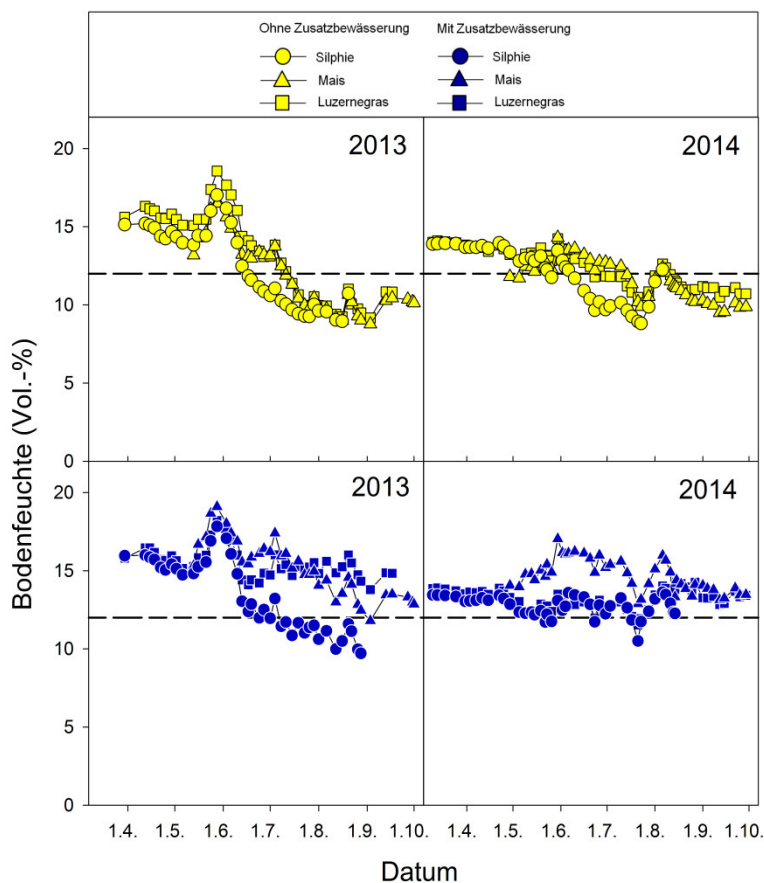


Abbildung 41: Bodenfeuchtedynamik in den unbewässerten und bewässerten Parzellen von Silphie, Mais und Luzernegras in den Versuchsjahren 2013 und 2014 am Standort Braunschweig. Dargestellt sind die Mittelwerte der Bodenfeuchte im durchwurzelten Boden. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Zielgröße von nFK = 50%.

Der Wassergehalt in dem durch ergiebige Niederschläge bis Anfang Juni 2013 stark wassergesättigten und zum Teil übersättigten Boden fiel durch den offenkundig sehr hohen Wasserverbrauch der Silphie, trotz sehr hoher zusätzlicher Wassergaben von 235 mm, bereits Mitte Juni zeitweilig unter das angestrebte Niveau von 50% nFK. Die praktizierte einheitliche

Bewässerungsstrategie war eine Gratwanderung zwischen zu viel (Mais und Luzernegras) und zu wenig Wasser (Silphie). Möglicherweise wurde dadurch das Ertragspotential der Silphie im Versuchsjahr 2013 nicht voll ausgeschöpft.

Der frühe Vegetationsbeginn im Versuchsjahr 2014 in Verbindung mit der geringen Ausgangsbodenfeuchte führte bei Silphie und Luzernegras zu einem raschen Absinken der nFK. Auch in diesem zweiten Nutzungsjahr der Silphie zeichnete sich ein deutlich höherer Wasserbedarf gegenüber den Vergleichskulturen ab.

Ausgehend von den Erfahrungen des ersten Nutzungsjahres wurde 2014 in den künstlich beregneten Silphieparzellen eine Tropfbewässerung installiert, um das Ertragspotential der Silphie möglichst weitgehend auszuschöpfen (Abbildung 42). Dadurch konnte die Silphie außer durch Über-Kopf-Beregnung zusätzlich noch individuell nach Bedarf bewässert werden. Mit dieser zweigleisigen Bewässerungsstrategie ließen sich die Bodenwassergehalte bei allen drei Kulturen im Zielkorridor von 50-80% nFK halten. Dazu war bei der Silphie mit 230 mm im Vergleich zu Mais und Luzernegras mit jeweils 120 mm die nahezu doppelte Bewässerungsmenge erforderlich.



Abbildung 42: Bewässerte Silphieparzelle mit Kopfeinheit für die Tropfbewässerung zur Sicherstellung einer konstanten Bodenfeuchte >50% nFK im Jahr 2014.

Anhand der im Feldversuch in Braunschweig gewonnenen Ertrags- und Wassernutzungsdaten ist der Wasserbedarf der Silphie als relativ hoch einzustufen. Es gibt bisher keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu den Wurzeleigenschaften der Silphie, die die verbreitete Vermutung einer Trockentoleranz stützen würden. Der Bewässerungsfeldversuch bot die Möglichkeit, das Adaptationsvermögen ihres Wurzelsystems an Wassermangelsituationen (z.B. durch ein intensiveres Wurzelwachstum) im Vergleich zu Mais und Luzernegras zu beurteilen und die relative Ertragsleistung unter Trockenstress abzuschätzen. Das Luzernegras fungierte als Bezugssystem zur Beurteilung der Wasseraufnahmeeffizienz der Silphie. Luzernegras erschließt das Wasser über ein gut verzweigtes und tiefgründiges Wurzelsystem (Kutschera et al.

2009, Ferchaud et al. 2015). In den Versuchsjahren 2013 und 2014 hatte Luzerngras bei mit der Silphie vergleichbaren Biomasseerträgen auch eine ähnlich niedrige WUE (Tabelle 9). Im Verlauf der Vegetationsperiode wurden folgende Wurzelparameter erfasst: Wurzeltiefgang, Wurzellängendichte (RLD), spezifische Wurzellänge (SRL), Feinwurzelverteilung und Wurzeltrockenmasse.

Tabelle 9: Trockenmasseertrag, Wasserverbrauch, Evapotranspirationskoeffizient (ETK) und Wassernutzungseffizienz (WUE) von Silphie, Mais und Luzerngras in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre 2013 und 2014 am Standort Braunschweig.

Wasserregime (W)	Kultur (K)	TM-Ertrag (t ha ⁻¹)	Wasser- verbrauch (mm)	ETK (L kg ⁻¹)	WUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
<u>2012</u>					
Ohne Bewässerung	Mais	18,0 ^{bt}	328 ^d	182 ^b	55 ^a
	Luzerngras	7,2 ^d	410 ^c	576 ^a	18 ^b
	Mittel	12,6 ^B	369 ^B	379 ^A	36 ^A
Mit Bewässerung	Mais	23,3 ^a	479 ^b	206 ^b	49 ^a
	Luzerngras	9,0 ^c	512 ^a	576 ^a	18 ^b
	Mittel	16,2 ^A	495 ^A	391 ^A	33 ^A
Mittel	Mais	20,7 ^A	403 ^A	194 ^B	52 ^A
	Luzerngras	8,1 ^B	461 ^A	576 ^A	18 ^B
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2012</i>					
W		*	***	ns	ns
K		***	***	***	***
W×K		**	*	ns	ns
<u>2013</u>					
Ohne Bewässerung	Silphie	9,9 ^d	353 ^e	355 ^c	28 ^c
	Mais	13,7 ^c	277 ^f	203 ^e	50 ^a
	Luzerngras	9,5 ^d	399 ^d	422 ^a	24 ^d
	Mittel	11,1 ^B	343 ^B	326 ^A	34 ^A
Mit Bewässerung	Silphie	15,5 ^b	595 ^a	385 ^b	26 ^{cd}
	Mais	20,9 ^a	502 ^c	240 ^d	42 ^b
	Luzerngras	14,0 ^c	572 ^b	409 ^{ab}	25 ^d
	Mittel	16,8 ^A	556 ^A	345 ^A	31 ^B
Mittel	Silphie	12,7 ^B	474 ^B	370 ^B	27 ^B
	Mais	17,3 ^A	389 ^C	221 ^C	46 ^A
	Luzerngras	11,8 ^C	486 ^A	415 ^A	24 ^C
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013</i>					
W		***	***	ns	*
K		***	***	***	***
W×K		***	***	*	***
<u>2014</u>					
Ohne Bewässerung	Silphie	11,7 ^d	266 ^e	228 ^{bc}	44 ^c
	Mais	21,6 ^a	362 ^d	168 ^d	60 ^a
	Luzerngras	15,0 ^c	348 ^d	232 ^b	43 ^c
	Mittel	16,1 ^B	325 ^B	209 ^B	49 ^A
Mit Bewässerung	Silphie	16,8 ^b	489 ^a	291 ^a	34 ^d
	Mais	22,4 ^a	460 ^b	206 ^c	49 ^b
	Luzerngras	14,5 ^c	407 ^c	299 ^a	34 ^d
	Mittel	17,9 ^A	452 ^A	265 ^A	39 ^B
Mittel	Silphie	14,3 ^B	378 ^B	259 ^A	39 ^B
	Mais	22,0 ^A	411 ^A	187 ^B	54 ^A
	Luzerngras	14,7 ^B	377 ^B	265 ^A	38 ^B

Tabelle 9: Trockenmasseertrag, Wasserverbrauch, Evapotranspirationskoeffizient (ETK) und Wassernutzungseffizienz (WUE) von Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre 2013 und 2014 am Standort Braunschweig.

Wasserregime (W)	Kultur (K)	TM-Ertrag (t ha ⁻¹)	Wasser- verbrauch (mm)	ETK (L kg ⁻¹)	WUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2014</i>					
	W	**	***	**	**
	K	***	***	***	***
	W×K	***	***	ns	ns
<i>2013 und 2014</i>					
Ohne Bewässerung	Silphie	10,8 ^f	309 ^e	291 ^c	36 ^c
	Mais	17,7 ^b	320 ^d	185 ^e	55 ^a
	Luzernegras	12,2 ^e	373 ^c	327 ^b	33 ^d
	Mittel	13,6 ^B	334 ^B	268 ^B	41 ^A
Mit Bewässerung	Silphie	16,1 ^c	542 ^a	338 ^{ab}	30 ^e
	Mais	21,7 ^a	481 ^b	223 ^d	45 ^b
	Luzernegras	14,2 ^d	489 ^b	354 ^a	29 ^e
	Mittel	17,3 ^A	504 ^A	305 ^A	35 ^B
Mittel	Silphie	13,5 ^B	426 ^A	315 ^B	33 ^B
	Mais	19,7 ^A	400 ^B	204 ^C	50 ^A
	Luzernegras	13,2 ^B	431 ^A	340 ^A	31 ^C
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013 und 2014</i>					
	W	***	***	**	**
	K	***	***	***	***
	J	***	***	***	***
	W×K	***	***	***	**
	W×J	***	***	**	***
	K×J	***	***	***	**
	W×K×J	***	***	ns	ns

*, **, *** Signifikant für $P < 0,05$, $P < 0,01$ bzw. $P < 0,001$; ns = nicht signifikant für $P < 0,05$.

[†] Merkmalsmittelwerte mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben sowie Wasserregime- bzw. Kulturmittelwerte mit unterschiedlichen Großbuchstaben innerhalb eines Jahres unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$; t-Test).

Angesichts ihres semi-domestizierten Status aufgrund der vergleichsweise geringen züchterischen Bearbeitung war der oberirdische Trockenmasseertrag der Silphie mit 10,8 und 16,1 t TM ha⁻¹ ohne bzw. mit Bewässerung im Mittel der beiden Nutzungsjahre erstaunlich hoch. Der durchschnittliche Trockenmasseertrag der Silphie lag mit relativ 97% auf dem Niveau von Luzernegras, jedoch mit relativ 66% deutlich unter dem von Mais. Die Zusatzbewässerung hatte 2013 bei allen Kulturen signifikant höhere Erträge zur Folge. Gegenüber der bewässerten Variante zeigte die unbewässerte Silphie einen Minderertrag von 36%. Die Ertragseinbußen bei Mais (34%) und Luzernegras (32%) fielen nur unwesentlich geringer aus. Bei diesem Vergleich ist allerdings zu berücksichtigen, dass die angestrebte Bodenfeuchte von mindestens 50% nFK in der Variante mit Zusatzbewässerung bei der Silphie aufgrund ihres hohen Wasserverbrauchs zeitweilig unterschritten wurde (Abbildung 41).

Der Trockenmasseertrag hätte demzufolge unter optimalen Bedingungen wahrscheinlich höher gelegen, wodurch die Ertragsreduktion unter Trockenstress deutlicher ausgefallen wäre. Da die Silphie insbesondere in den Monaten Mai und Juni hohe Biomassezuwächse mit einer entsprechend hohen Wasseraufnahme zeigt, konnte sie zunächst von den im Jahr 2013 in diesem Zeitraum gefallenen hohen Niederschlägen und der damit verbundenen vollständigen Wassersättigung des Bodens profitieren. Das durch mehrfachen Schnitt genutzte Luzernegras nutzte den Bodenwasserspeicher kontinuierlich über die gesamte Vegetationsperiode. Für Mais

dagegen sind die Bodenwasservorräte des Frühjahrs wegen seines vergleichsweise späten Massenzuwachses weniger relevant.

Die Evapotranspiration der Kulturen im Zeitraum von Wachstumsbeginn bis Ernte wurde anhand der Wasserhaushaltsgleichung nach Ehlers (1997) wie folgt ermittelt: $ET = N + B - A - S + \Delta R$ in mm. Der Evapotranspirationskoeffizient (ETK), als Verhältnis der benötigten Wassermenge zur gebildeten Trockenmasse, lag bei der Silphie in der Vegetationsperiode 2013 in den unbewässerten Parzellen um 43% über dem von Mais und 19% unter dem von Luzernegras. In der bewässerten Variante konnten bei Silphie und Mais signifikant höhere ETK-Werte aufgrund höherer Evaporationsverluste sowie einer geringeren Transpirationsnutzungseffizienz beobachtet werden. Zwischen Silphie und Luzernegras zeichneten sich keine signifikanten Unterschiede ab. Die WUE war bei Silphie geringfügig höher als bei Luzernegras, aber signifikant niedriger als bei Mais.

Die Vegetationsperiode 2014 war durch eine für die Ertragsbildung günstige Niederschlagsverteilung gekennzeichnet (vgl. Tabelle 7), weshalb sich bei Mais und Luzernegras keine signifikanten Unterschiede im Trockenmasseertrag zwischen den Wasserregimen einstellten. Bei der Silphie hingegen zeigte sich (wie bereits 2013) eine deutliche Reduktion des Trockenmasseertrages von 33% gegenüber der zusätzlich bewässerten Variante. Bezüglich des ETK und der WUE gab es innerhalb der Wasserregime keine signifikanten Unterschiede zwischen Silphie und Luzernegras. Der Mais hingegen wies eine wesentlich effizientere Nutzung des aufgenommenen Wassers auf.

In Zusammenarbeit mit Prof. Kage vom Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel wurde ein beschreibendes Pflanzenwachstumsmodell parametrisiert. In diesem von Wienforth (2011) detailliert beschriebenen Modells wurden u.a. die im Bewässerungsfeldversuch erfasste Dynamik für Blattfläche, Bestandeshöhe, Wurzellänge, Durchwurzelungstiefe und Bodenfeuchte zur Charakterisierung verschiedener Wasserhaushaltskomponenten für die Kulturen Silphie und Mais berücksichtigt (Tabelle 10).

Die Simulationsstudie ermöglichte eine um die Evaporation korrigierte Betrachtung der Transpiration und zeigte erwartungsgemäß eine noch stärkere Differenzierung der Kulturen hinsichtlich der Effizienz der Wassernutzung. Im Mittel der Jahre war die Transpirationsnutzungseffizienz (TUE) der Silphie sowohl unter Trockenstress als auch bei optimaler Wasserversorgung um 57% geringer als die von Mais.

Zur Quantifizierung der transpirationsmindernden Wirkung des Bodenwasserdefizits auf die Silphie wurde ein Stressfaktor aus dem Verhältnis von aktueller zu potentieller Transpiration (T_{act}/T_{pot}) berechnet. Im Mittel der Jahre 2013 und 2014 zeigte sich innerhalb beider Wasserregime eine signifikant höhere Trockenstressempfindlichkeit der Silphie im Vergleich zu Mais. Besonders auffällig war in diesem Zusammenhang die geringe aktuelle Transpiration der Silphie unter Zusatzbewässerung. So war in beiden Jahren kein signifikanter Unterschied zwischen der Transpirationsaktivität in den beiden Wasserversorgungsstufen zu beobachten. Die aktuelle Transpiration in den zusätzlich bewässerten Silphieparzellen lag trotz des hohen Wasserangebots in den Versuchsjahren 2013 und 2014 auf bzw. unter dem Niveau der unbewässerten Maisbestände. Die unter 1.2.1.4 dargestellten Ergebnisse zur stomatären Leitfähigkeit im Bewässerungsfeldversuch bestätigen die aus der Simulationsstudie gewonnenen Ergebnisse zur Transpiration.

Tabelle 10: Ergebnisse der Simulationsstudie für Wassernutzungseffizienz (WUE), Transpirationsnutzungseffizienz (TUE) und den Stressfaktor als Verhältnis von aktueller zu potentieller Transpiration (T_{act}/T_{pot}) für Silphie und Mais in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre am Standort Braunschweig.

Wasserregime (W)	Kultur (K)	WUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	TUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	T_{act}/T_{pot}
<u>2013</u>				
Ohne Bewässerung	Silphie	29 ^c	51 ^c	0,60 ^b
	Mais	58 ^a	122 ^a	0,62 ^b
	Mittel	44 ^A	87 ^A	0,61 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	28 ^c	38 ^d	0,62 ^b
	Mais	50 ^b	78 ^b	0,89 ^a
	Mittel	39 ^B	58 ^B	0,76 ^A
Mittel	Silphie	28 ^B	44 ^B	0,61 ^A
	Mais	54 ^A	100 ^A	0,76 ^A
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013</i>				
	W	*	**	**
	K	***	***	***
	W×K	**	***	***
<u>2014</u>				
Ohne Bewässerung	Silphie	22 ^c	57 ^c	0,58 ^c
	Mais	65 ^a	132 ^a	0,82 ^b
	Mittel	43 ^A	94 ^A	0,70 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	22 ^c	40 ^d	0,60 ^c
	Mais	56 ^b	105 ^b	0,93 ^a
	Mittel	39 ^A	73 ^B	0,77 ^A
Mittel	Silphie	22 ^B	49 ^B	0,59 ^B
	Mais	60 ^A	118 ^A	0,88 ^A
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2014</i>				
	W	ns	**	*
	K	***	***	***
	W×K	*	ns	ns
<u>2013 und 2014</u>				
Ohne Bewässerung	Silphie	26 ^c	54 ^c	0,59 ^c
	Mais	61 ^a	127 ^a	0,72 ^b
	Mittel	44 ^A	91 ^A	0,65 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	25 ^c	39 ^d	0,61 ^c
	Mais	53 ^b	91 ^b	0,91 ^a
	Mittel	39 ^B	65 ^B	0,76 ^A
Mittel	Silphie	25 ^B	47 ^B	0,60 ^B
	Mais	57 ^A	109 ^A	0,82 ^A
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013 und 2014</i>				
	W	*	**	**
	K	***	***	***
	J	ns	*	*
	W×K	***	***	***
	W×J	ns	ns	**
	K×J	***	**	***
	W×K×J	ns	*	**

*, **, *** Signifikant für $P < 0,05$, $P < 0,01$ bzw. $P < 0,001$; ns = nicht signifikant für $P < 0,05$.

[†] Merkmalsmittelwerte mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben sowie Wasserregime- bzw. Kulturmittelwerte mit unterschiedlichen Großbuchstaben innerhalb eines Jahres unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$; t -Test).

Da die Bewässerungsmengen bei der Silphie im Jahr 2013 zeitweilig nicht bedarfsdeckend waren (nFK <50%; Abbildung 41), könnte man darin die Ursache der eingeschränkten Transpiration vermuten. Betrachtet man jedoch die ebenfalls unterhalb des Potentials befindliche Transpirationsleistung im Jahr 2014 (nFK >50%), so muss vielmehr ein Defizit im Wasseraneignungsvermögen der Wurzeln, eventuell aufgrund einer geringeren Durchwurzelungsintensität oder unzureichende hydraulischer Leitfähigkeit des Xylems (1.2.1.2), als möglicher Grund in Betracht gezogen werden. Demzufolge hätte die angestrebte Untergrenze der nFK zur Vermeidung von Trockenstress bei der Silphie wahrscheinlich höher angesetzt werden müssen. In Abbildung 41 werden die Bodenwassergehalte des gesamten durchwurzelten Bodenprofils betrachtet, wobei die nFK innerhalb des effektiven Wurzelraumes möglicherweise deutlich geringere Werte aufgewiesen hat, während tiefer reichende Wurzeln der Silphie offenbar geringe Wasseraufnahmeraten realisierten.

1.2.1.2 Wurzelmerkmale von Silphie im Vergleich zu Mais und Luzernegras

Zur Gewinnung von Probenmaterial für die Untersuchung verschiedener Wurzeleigenschaften wurden im Bewässerungsfeldversuch in Braunschweig in den Vegetationsperioden 2013 und 2014 Bodenbeprobungen durchgeführt. Dazu wurden in jeweils zwei Wiederholungen der Varianten ohne und mit Zusatzbewässerung der drei Kulturen je sechs Bohrkerne ($n = 12$ je Kultur und Wasserregime) durch Rammkernsondierung entnommen. Die Beprobung erfolgte zum Zeitpunkt der Vollblüte der Silphie. Auch im Gefäßversuch (1.2.2) hatte sich gezeigt, dass die Silphie zur Vollblüte die maximale Wurzelausdehnung aufweist.

Zur Bestimmung des Wurzeltiefganges wurde bei der Probenahme im Feld die Bruchkernmethode angewandt (Smit et al. 2000). Daran anschließend wurden aus den Bohrkernsegmenten die Wurzeln in 10-cm-Intervallen wie von Smucker et al. (1982) beschrieben mit einer hydropneumatischen Wurzelwaschvorrichtung separiert und anschließend manuell von organischem Begleitmaterial getrennt. Die Bestimmung der Wurzellänge in Abhängigkeit vom Wurzeldurchmesser erfolgte durch Computer-Bildanalyse mit der Software WinRHIZO Pro 2012 (Regent Instruments Inc., Québec, Kanada) unter Berücksichtigung der Vorgaben von Himmelbauer (2004). Anschließend wurden die Wurzeln bei 80 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und nach Bodentiefen getrennt gewogen.

In beiden Versuchsjahren lag die maximale Durchwurzelungstiefe der drei Kulturen bei einheitlich 150 cm (Abbildung 43). Dieses Ergebnis ist vermutlich auf die ungünstigen Durchwurzelungsbedingungen des teils stark verdichteten Sandbodens in Braunschweig zurückzuführen. Unter diesen Gegebenheiten konnte selbst die Pfahlwurzel der Luzerne nicht tiefer in den Boden eindringen. Während Silphie und Luzernegras in beiden Versuchsjahren und unter beiden Wasserregimen eine ähnliche maximale Wurzeltiefe aufwiesen, waren in den bewässerten Parzellen von Mais im Jahr 2013 unterhalb von 120 cm Bodentiefe keine Wurzeln mehr nachweisbar. Für die Durchwurzelungsintensität existierten dagegen teilweise deutliche Unterschiede zwischen den drei Kulturen. Diese Unterschiede ließen sich allerdings wegen der für Wurzelparameter typischen hohen Standardabweichung statistisch nicht absichern. In der Vegetationsperiode 2013 hatte die Silphie eine fast durchgängig niedrigere RLD als der Mais. Ab 90 cm Bodentiefe wurde die nach Kage und Ehlers (1996) für einen zügigen Wasserentzug bis zum permanenten Welkepunkt erforderliche RLD von $0,5 \text{ cm cm}^{-3}$ bei Silphie und Mais nicht mehr erreicht.

Der bei Mais besonders hohe Standardfehler für die RLD könnte ein Hinweis sein auf eine gute Anpassung des Wurzelsystems an eine lokal unterschiedliche Wasserverfügbarkeit. Das Luzernegras zeigte wegen seines Mischungspartners Gras eine dem Mais vergleichbare intensive Durchwurzelung des Oberbodens. Dagegen wies die Luzerne in der sich anschließenden Bodenschicht bis 150 cm Tiefe die mit Abstand höchste RLD der drei Kulturen auf, so dass die Voraussetzung für eine vollständige Bodenwasserausschöpfung gegeben war.

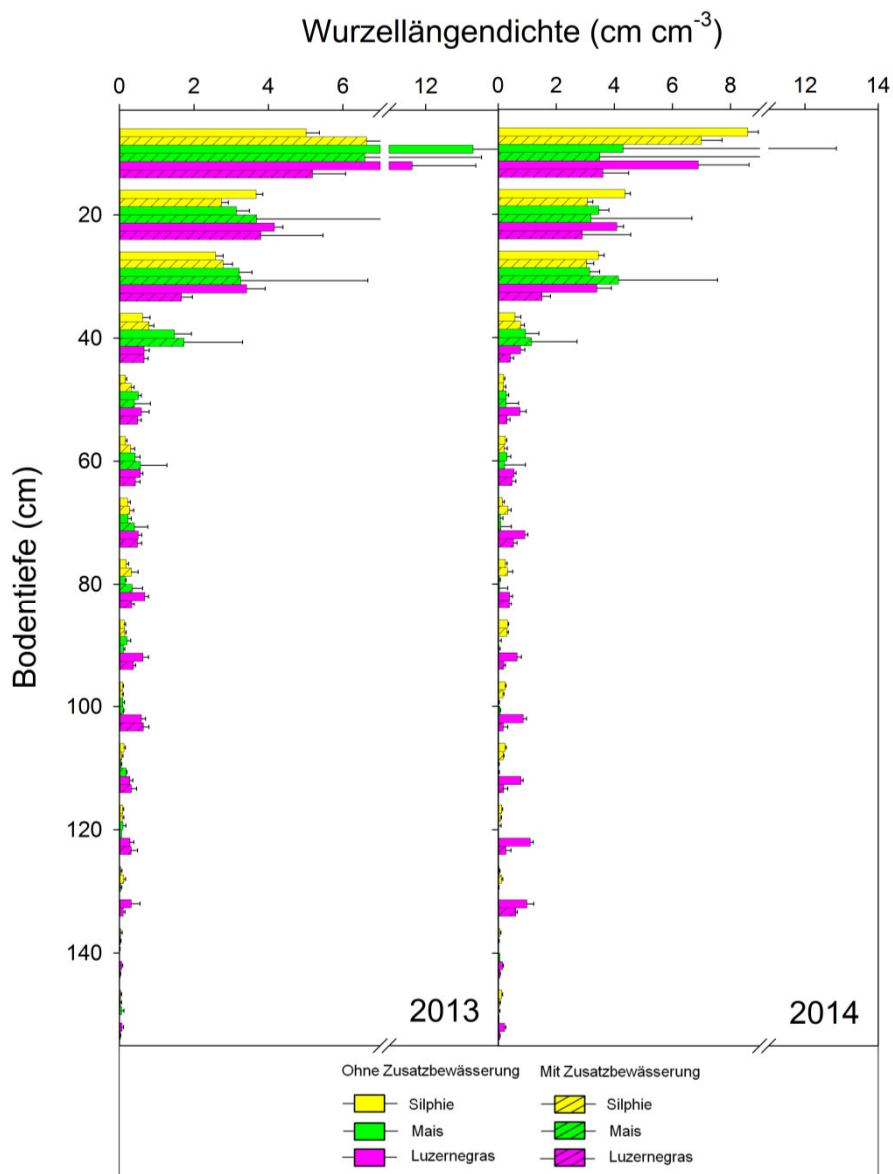


Abbildung 43: Wurzellängendichte von Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit von Bodentiefe und Wasserregime in den Versuchsjahren 2013 und 2014 am Standort Braunschweig ($n = 12$).

Die in Abbildung 44 dargestellten tiefenspezifischen Bodenwasserentzüge in den unbewässerten Parzellen bestätigen Annahmen bezüglich des durchwurzelungsbedingten Wasseraufnahmevermögens. Im Jahr 2013 entzog das Luzernegras aufgrund seiner höheren RLD deutlich mehr Wasser aus tieferen Bodenschichten als die Silphie. Ein hohes Aneignungsvermögen tiefer gelegener Bodenwasserreserven durch die Wurzeln der Luzerne wurde u.a. auch von Ferchaud et al. (2015) beobachtet. Die Silphie konnte trotz eines mit Luzernegras vergleichbaren Wasserbedarfs nicht dieselben großen Wassermengen aus dem Unterboden aufnehmen. Der Mais zeigte trotz seiner im Vergleich zu Silphie ebenfalls höheren RLD nur sehr geringe Bodenwasserentzüge unterhalb von 80 cm Bodentiefe. Eine Erklärung hierfür bietet die hohe Wassernutzungseffizienz der C4-Pflanze Mais, die einen Rückgriff auf diese tieferen Wasserressourcen nicht notwendig macht. An der unzureichend tiefen Durchwurzelung von bis zu 150 cm kann es zumindest nicht gelegen haben. Die relativ hohen

Bodenwasserdefizite, welche sich in den unbewässerten Parzellen im Verlauf des Jahres 2013 bei allen Kulturen einstellten, führten bei Mais und Luzernegras zu einer Adaptation an den Trockenstress durch eine gegenüber den bewässerten Parzellen insgesamt deutlich höhere Wurzellänge (Tabelle 11). Eine solche Anpassung des Wurzellängenwachstums von Mais an Trockenbedingungen wurde auch durch Sharp und Davies (1985) beobachtet. Im Gegensatz dazu wies die Silphie unter Trockenstress eine reduzierte Wurzellänge auf. Ihr Wurzelwachstum war also eher unflexibel.

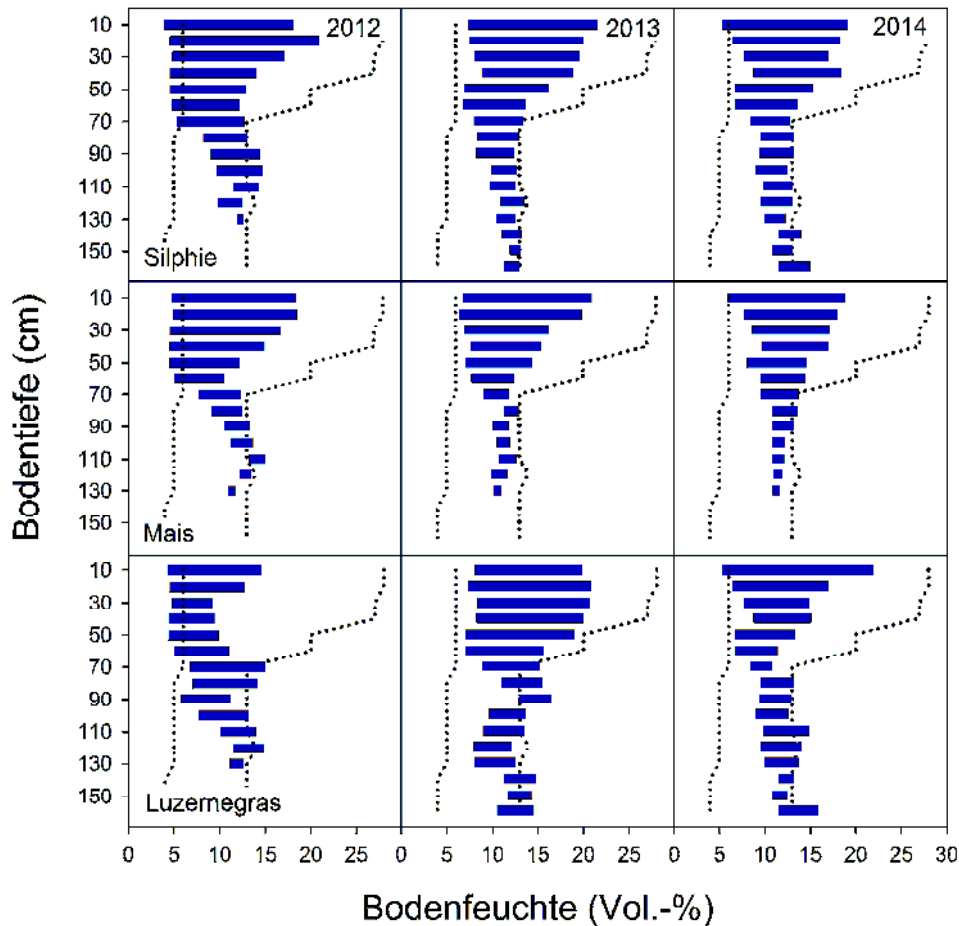


Abbildung 44: Tiefenspezifische Bodenwasserentzüge von Vegetationsbeginn bis Ernte für Silphie, Mais und Luzernegras ohne Zusatzbewässerung in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 am Standort Braunschweig. Die gepunkteten Linien umfassen den Bereich der nutzbaren Feldkapazität (FK-PWP).

Im Versuchsjahr 2014 zeigte sich aufgrund der günstigen Niederschlagsverteilung eine gegenüber dem Vorjahr zum Teil andere Wurzelentwicklung der Kulturen (Abbildung 43 und Tabelle 10). So hatte vor allem Mais, besonders in den tieferen Bodenschichten, ein insgesamt geringeres Wurzellängenwachstum. Das Luzernegras wies ohne Bewässerung eine Zunahme der Gesamtwurzellänge von 90% auf, wohingegen bei Silphie und Mais keine signifikante Änderung zu verzeichnen war. Obgleich die Silphie eine dem Luzernegras vergleichbare WUE erreichte, war die unbewässerte Silphie mit ihrem unflexiblen Wurzelwachstum weitaus stärker vom Trockenstress betroffen (Tabelle 9). So lag unter der Silphie (wie im Versuchsjahr 2013) ab einer Bodentiefe von 50 cm eine wesentlich niedrigere RLD vor als beim Luzernegras. Dadurch war keine vollständige Ausschöpfung der vorhandenen Bodenwasserreserven möglich und es trat Wassermangel auf (Abbildung 44). Durch den gleichmäßigen Niederschlag ließ sich 2014

gegenüber dem Versuchsjahr 2013 kein Unterschied in der Bodenwasserausschöpfung zwischen Silphie und Luzerngras feststellen.

Der Anteil Feinwurzeln als ein wichtiger wurzelmorphologischer Parameter war bei der Silphie in beiden Versuchsjahren und Wasserregimen signifikant niedriger als bei Mais und Luzerngras (Tabelle 11). Demzufolge war auch die SRL der Silphie signifikant niedriger als die der beiden Vergleichskulturen. Dieser Befund lässt nach Eissenstat (1992) und Ostonen et al. (2007) gewisse Rückschlüsse auf die Effizienz der untersuchten Wurzelsysteme zu. Danach bietet ein feingliedriges Wurzelsystem mit seiner größeren Wurzeloberfläche günstigere Voraussetzungen für die schnelle Aufnahme des pflanzenverfügbaren Bodenwassers. Im Oberboden kann durch eine rasche Wasseraufnahme nach Niederschlägen der Evaporationsverlust gesenkt werden (Passioura 1983) und lokale Wasserreserven können durch Feinwurzeln flexibler erschlossen werden. Feinwurzeln können wegen ihrer kurzen Lebensdauer gegenüber persistenteren Grobwurzeln unter Umständen einen zusätzlichen Assimilatebedarf verursachen (Eissenstat 1992). Der Vorteil dickerer Wurzeln liegt nach Einschätzung von Bengough et al. (2011) und Lynch (2012) in einem erhöhten Tiefenwachstumsvermögen auch bei Vorliegen von Bodenverdichtungen. Diese Hypothese ließ sich bei den Silphie- und Luzerngrasbeständen am Standort Braunschweig im Vergleich zum Wurzelsystem von Mais allerdings nicht bestätigen.

Tabelle 11: Wurzellänge, Wurzeltrockenmasse, mittlere spezifische Wurzellänge sowie mittlerer Anteil Feinwurzeln ($\varnothing < 0,5$ mm) an der Wurzellänge von Silphie, Mais und Luzerngras in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre am Standort Braunschweig.

Wasserregime (W)	Kulturart (K)	Wurzel- länge (cm cm ⁻²)	Wurzel- trocken- masse (t ha ⁻¹)	Spez. Wurzel- länge (cm mg ⁻¹)	Anteil Feinwurzeln (%)
<u>2013</u>					
Ohne Bewässerung	Silphie	154 ^b	5,0 ^{bc}	4,7 ^c	81 ^c
	Mais	270 ^{ab}	2,1 ^d	9,0 ^b	89 ^b
	Luzerngras	287 ^a	6,8 ^{ab}	10,3 ^b	95 ^a
	Mittel	237 ^A	4,6 ^A	8,0 ^A	89 ^A
Mit Bewässerung	Silphie	172 ^{ab}	7,7 ^a	3,6 ^c	80 ^c
	Mais	205 ^{ab}	2,3 ^d	11,3 ^{ab}	91 ^b
	Luzerngras	176 ^{ab}	3,1 ^{cd}	13,3 ^a	94 ^a
	Mittel	184 ^A	4,4 ^A	9,4 ^A	88 ^A
Mittel	Silphie	163 ^A	6,4 ^A	4,2 ^B	80 ^C
	Mais	237 ^A	2,2 ^B	10,2 ^A	90 ^B
	Luzerngras	231 ^A	5,0 ^A	11,8 ^A	95 ^A
<u>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013</u>					
	W	ns	ns	ns	ns
	K	ns	***	***	***
	W×K	ns	**	ns	ns
<u>2014</u>					
Ohne Bewässerung	Silphie	223 ^b	7,5 ^a	4,3 ^c	80 ^d
	Mais	148 ^{cd}	2,3 ^{bc}	19,5 ^a	88 ^c
	Luzerngras	264 ^a	4,0 ^b	5,1 ^c	95 ^a
	Mittel	212 ^A	4,6 ^A	9,6 ^A	88 ^A
Mit Bewässerung	Silphie	186 ^{bc}	7,9 ^a	5,3 ^c	75 ^e
	Mais	151 ^{cd}	1,4 ^c	15,2 ^b	91 ^b
	Luzerngras	139 ^d	2,6 ^{bc}	12,4 ^b	94 ^a
	Mittel	158 ^B	4,0 ^A	11,0 ^A	87 ^A
Mittel	Silphie	204 ^A	7,7 ^A	4,8 ^C	77 ^C

Tabelle 11: Wurzellänge, Wurzeltrockenmasse, mittlere spezifische Wurzellänge sowie mittlerer Anteil Feinwurzeln ($\varnothing < 0,5$ mm) an der Wurzellänge von Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre am Standort Braunschweig.

Wasserregime (W)	Kulturart (K)	Wurzel- länge (cm cm ⁻²)	Wurzel- trocken- masse (t ha ⁻¹)	Spez. Wurzel- länge (cm mg ⁻¹)	Anteil Feinwurzeln (%)
	Mais	150 ^B	1,8 ^B	17,4 ^A	90 ^B
	Luzernegras	201 ^A	3,3 ^B	8,8 ^B	95 ^A
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2014</i>					
	W	**	ns	ns	ns
	K	**	***	***	***
	W×K	***	ns	***	**
<i>Mittel 2013 und 2014</i>					
Ohne Bewässerung	Silphie	188 ^b	6,3 ^{ab}	3,6 ^d	81 ^d
	Mais	209 ^b	2,2 ^c	12,1 ^a	89 ^c
	Luzernegras	276 ^a	5,4 ^b	7,0 ^c	95 ^a
	Mittel	224 ^A	4,6 ^A	7,6 ^A	88 ^A
Mit Bewässerung	Silphie	179 ^b	7,8 ^a	4,8 ^d	78 ^e
	Mais	178 ^b	1,8 ^c	9,4 ^b	91 ^b
	Luzernegras	157 ^b	2,9 ^c	11,3 ^{ab}	94 ^a
	Mittel	171 ^A	4,2 ^A	8,5 ^A	88 ^A
Mittel	Silphie	184 ^A	7,1 ^A	4,2 ^C	79 ^C
	Mais	193 ^A	2,0 ^C	10,8 ^A	90 ^B
	Luzernegras	216 ^A	4,1 ^B	9,2 ^B	95 ^A
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013 und 2014</i>					
	W	ns	ns	ns	ns
	K	ns	***	***	***
	J	ns	ns	***	*
	W×K	*	**	***	**
	W×J	ns	ns	ns	ns
	K×J	*	*	***	ns
	W×K×J	ns	ns	**	ns

* , ** , *** Signifikant für $P < 0,05$, $P < 0,01$ bzw. $P < 0,001$; ns = nicht signifikant für $P < 0,05$.

† Merkmalsmittelwerte mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben sowie Wasserregime- bzw. Kulturmittelwerte mit unterschiedlichen Großbuchstaben innerhalb eines Jahres unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$; t-Test).

Im Mittel der Jahre und Wasserregime produzierte die Silphie die mit Abstand höchste Wurzeltrockenmasse, gefolgt von Luzernegras und Mais. Im Trockenjahr 2013 war die Wurzeltrockenmasse der Silphie ohne Zusatzbewässerung signifikant reduziert, während im Jahr 2014 nur geringfügige Unterschiede zwischen den Wasserregimen bestanden. Dies lässt auf ein im Gegensatz zu Mais und Luzernegras geringes Adaptationsvermögen der Silphie an Trockenheit schließen. Beim Vergleich der Jahre 2013 und 2014 zeigte sich bei der Silphie-Dauerkultur keine signifikante Zunahme für Durchwurzelungstiefe, Gesamtwurzellänge und Wurzeltrockenmasse. Demzufolge ist nicht von einer Ausdehnung des Wurzelsystems bzw. einer Steigerung des Wasseraufnahmevermögens mit zunehmender Anbaudauer auszugehen. In Tabelle 12 ist die zeitliche Entwicklung der RLD von Silphie in der Vegetationsperiode 2013 basierend auf Daten von Bruchkernanalysen dargestellt. Am Ende der Etablierungsphase bzw. zu Beginn des Längenwachstums hatte die Silphie bereits eine Durchwurzelungstiefe von 110 cm erreicht. Eine deutlich trockenstressbedingte Differenzierung hinsichtlich der RLD ergab sich zum Beginn der generativen Wachstumsphase bei einem einheitlichen Tiefenwachstum von 120 cm. Entsprechend des erwähnten wenig adaptiven Wurzelwachstums hatten die

Silphiepflanzen ohne Zusatzbewässerung geringere Wurzellängen als mit Zusatzbewässerung. In der Vollblüte wurzelte die Silphie bis zu einer Tiefe von 150 cm. Zu diesem Zeitpunkt hatte auch die RLD ihren maximalen Wert erreicht. In den einzelnen Tiefenabschnitten waren dabei sowohl Zu- als auch Abnahmen für die RLD zu verzeichnen. Es wurde jedoch deutlich, dass sich Unterschiede zwischen den Wasserregimen mit der Bruchkernmethode nicht zuverlässig feststellen lassen.

Die Silphie-Dauerkultur und das mehrjährige Luzernegrass konnten wegen des bereits zu Wachstumsbeginn zumindest teilweise funktionsfähigen Wurzelsystems sehr früh Wasser auch aus tieferen Bodenschichten aufnehmen (Abbildung 45). Bei dem wärmebedürftigen Mais begann die Nutzung der Winterbodenfeuchte erst relativ spät. Die Silphie erschloss den Bodenwasservorrat unterhalb 100 cm zum Teil wesentlich später als das Luzernegrass, welches offenbar mit einem tiefen und weit verzweigten Wurzelsystem zu überwintern scheint. Dahingegen musste sich das Wurzelsystem der Silphie in diesen Bodenschichten erst wieder neu etablieren (Tabelle 12 und Abbildung 56). Da sich die Erschließung der tieferen Bodenwasservorräte durch die Silphie im Jahr 2013 offensichtlich langsamer vollzog als 2014, kann neben klimatischen Gegebenheiten auch auf ein weniger umfangreiches Wurzelsystem der Silphie im Etablierungsjahr geschlossen werden.

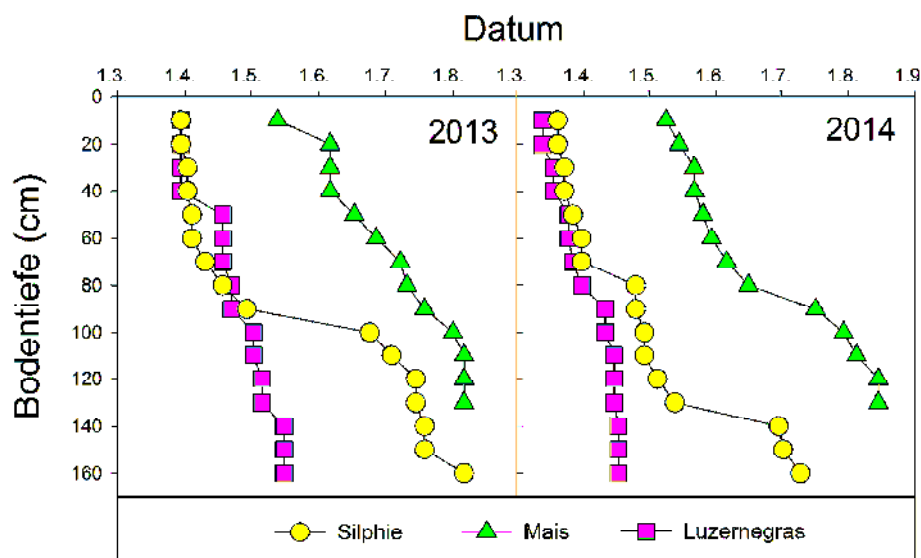


Abbildung 45: Zeitlicher Verlauf der Erschließung von Wasservorräten in unterschiedlichen Bodentiefen durch Silphie, Mais und Luzernegrass in den Versuchsjahren 2013 und 2014. Dargestellt sind die Mittelwerte der unbewässerten Parzellen.

Tabelle 12: Entwicklung der Wurzellängendichte von Silphie in Abhängigkeit von Wasserregime und Probennahmetermin in Braunschweig 2013.

Bodentiefe (cm)	Wasserregime	Wurzellängendichte [†] (cm cm ⁻³)		
		6. Mai	14. Juni	8. August
0-10	unbewässert	3,15 ^{ct}	3,35 ^c	4,64 ^b
	bewässert	3,24 ^c	4,17 ^{bc}	6,05 ^a
10-20	unbewässert	3,09 ^{ab}	2,69 ^{ab}	3,47 ^a
	bewässert	2,69 ^{ab}	3,72 ^a	2,20 ^b
20-30	unbewässert	2,87 ^{ab}	3,15 ^{ab}	2,98 ^{ab}
	bewässert	3,24 ^a	2,04 ^b	2,56 ^{ab}
30-40	unbewässert	0,20 ^b	1,00 ^{ab}	0,75 ^b
	bewässert	0,52 ^b	1,74 ^a	0,84 ^b
40-50	unbewässert	0,20 ^b	0,35 ^{ab}	0,42 ^{ab}
	bewässert	0,33 ^{ab}	0,29 ^{ab}	0,62 ^a
50-60	unbewässert	0,33 ^{ab}	0,42 ^{ab}	0,28 ^{ab}
	bewässert	0,16 ^b	0,52 ^a	0,38 ^{ab}
60-70	unbewässert	0,35 ^a	0,20 ^a	0,34 ^a
	bewässert	0,46 ^a	0,28 ^a	0,24 ^a
70-80	unbewässert	0,48 ^a	0,35 ^a	0,19 ^a
	bewässert	0,41 ^a	0,33 ^a	0,23 ^a
80-90	unbewässert	0,29 ^a	0,24 ^a	0,28 ^a
	bewässert	0,22 ^a	0,18 ^a	0,15 ^a
90-100	unbewässert	0,13 ^a	0,11 ^a	0,17 ^a
	bewässert	0,16 ^a	0,20 ^a	0,10 ^a
100-110	unbewässert	0,24 ^a	0,13 ^a	0,10 ^a
	bewässert	0,26 ^a	0,22 ^a	0,14 ^a
110-120	unbewässert	-	0,09 ^a	0,13 ^a
	bewässert	-	0,11 ^a	0,09 ^a
120-130	unbewässert	-	-	0,10 ^a
	bewässert	-	-	0,07 ^a
130-140	unbewässert	-	-	-
	bewässert	-	-	0,07
140-150	unbewässert	-	-	0,07 ^a
	bewässert	-	-	0,08 ^a
Mittel	unbewässert	0,76	0,81	0,93
	bewässert	0,78	0,92	0,92

[†] Die Wurzellängendichten wurden anhand von Bruchkernanalysen nach Smit et al. (2000) berechnet. Silphie am Standort Braunschweig: $y = 0,1112x + 0,0536$; $R^2 = 0,85$.

[‡] Mittelwerte mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben innerhalb eines Bodentiefenintervalls an einem Probennahmetermin unterscheiden sich signifikant bei $P < 0,05$.

1.2.1.3 Bedeutung der Blattbecher für den Wasserhaushalt der Silphie

Die Silphie bildet durch die gegenständigen am Blattgrund miteinander verwachsenen Blattpaare sogenannte „Becher“ aus (daher auch ihr englischer Pflanzename cup plant). Nach einer populärwissenschaftlichen Annahme sollen diese Blattbecher in einem für die Ertragsbildung relevanten Umfang Tauwasser aufnehmen welches die Silphie insbesondere während Trockenphasen für die Ertragsbildung nutzen kann (Neumerkel 1980, Conrad und Biertümpfel 2010). Um die Bedeutung dieses Becherwassers für den Wasserhaushalt der Silphie abzuschätzen, wurden beginnend mit der Ausbildung der ersten Blätter die täglich in den Blattbechern sämtlicher Triebe an vier repräsentativen Pflanzen je Parzelle gesammelten Wassermengen getrennt nach Tau- und Regenwasser mit einer Saugpipette gemessen (Tabelle 13). Die Messungen fanden in Parzellen mit und ohne Zusatzbewässerung während der

Vegetationsperioden 2013 und 2014 statt. Darüber hinaus wurde wöchentlich das maximale Wasserauffangvolumen der Becher dieser vier Pflanzen (1 m² Parzellenfläche) ermittelt. Dabei zeigte sich, dass die Silphie tatsächlich Tauwasser in den Bechern auffängt. Allerdings waren die gesammelten Wassermengen im Verhältnis zum gesamten Wasserverbrauch sehr gering. Das maximale Fassungsvermögen der Becher nahm parallel zum Blattflächenindex zu. Deshalb sammelten bewässerte Pflanzen tendenziell größere Mengen an Tau- und auch Regenwasser.

Tabelle 13: In den Blattbechern der Silphie gesammelte Wassermengen und deren Anteil am Gesamtwasserverbrauch in den Versuchsjahren 2013, 2014 sowie im Mittel der Jahre am Standort Braunschweig.

Bewässerung	Wasser- verbrauch (WV) (L m ⁻²)	Tau		Gesamtniederschlag [†]		Max. Bechervol. (L m ⁻²)
		Menge	Anteil am WV	Menge	Anteil am WV	
		(L m ⁻²)	(%)	(L m ⁻²)	(%)	
2013						
Ohne	295	0,31 ^{b†}	0,09	3,32 ^b	0,94	0,84 ^a
Mit	536	0,60 ^a	0,10	13,01 ^a	2,20	1,66 ^a
2014						
Ohne	334	0,71 ^a	0,27	6,81 ^a	2,56	0,76 ^b
Mit	561	1,33 ^a	0,27	11,48 ^a	2,35	1,28 ^a
Mittel						
Ohne	315	0,51 ^a	0,17	5,10 ^a	1,65	0,80 ^a
Mit	549	0,97 ^a	0,18	12,24 ^a	2,26	1,47 ^a

[‡] Tau-, Regen- und Bewässerungswasser.

[†] Merkmalsmittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben innerhalb eines Jahres unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$; t -Test).

Zur Abschätzung der auf Blattebene potentiell verfügbaren Tauwassermengen während der Vegetationszeit wurde durch Dr. Wittich (DWD) ein Modell des Deutschen Wetterdienstes parametrisiert. Dabei wurde ein 5 cm langes, horizontales Blatt angenommen, welches an der Bestandesobergrenze frei angeströmt wird und lediglich mit der Atmosphäre über dem Bestand im einseitigen Wärme- und Strahlungsaustausch steht. Aufgrund der hohen Bestandesdichte der Silphie wurden alle Nettoflusssdichten unterhalb des Blattes vernachlässigt. Die monatlichen Tausummen wurden mit Hilfe des DWD Modells errechnet, wobei die stündlichen Messdaten für Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung der DWD-Station Braunschweig verwendet wurden (Abbildung 46). Infolge der kurzen Nachtlängen weist der auf Blattebene simulierte Jahresgang der Taubildung in den Sommermonaten ein Minimum auf. Der Oktober ist dagegen der taureichste Monat. Da Silphie für die Biogasnutzung zu diesem Zeitpunkt bereits geerntet ist, sind monatliche Taumengen von >2 mm in der Wachstumsperiode der Silphie sehr unwahrscheinlich.

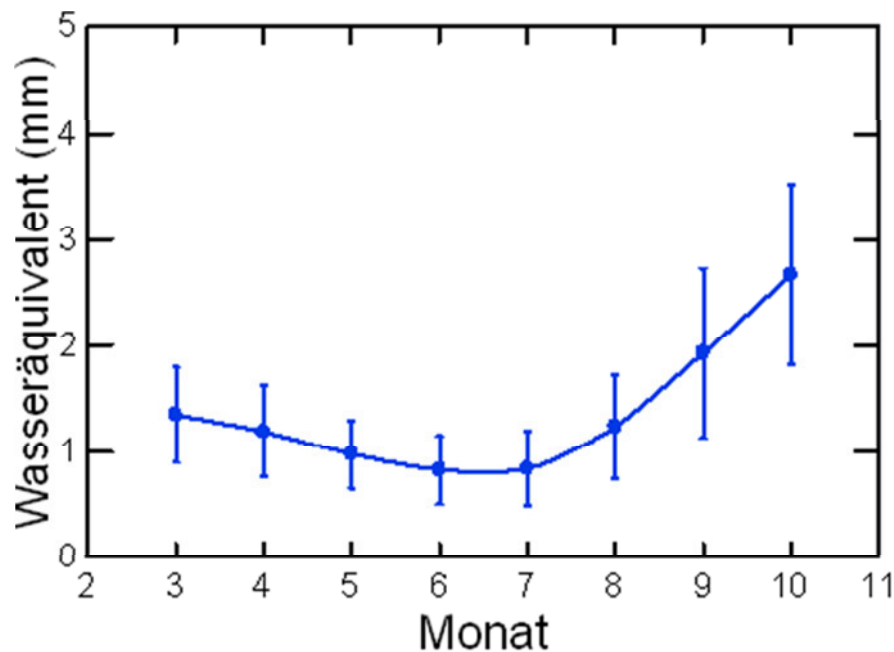


Abbildung 46: Berechnete monatliche Taumengen am DWD-Standort Braunschweig. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Jahre 1961-2013.

Um die Größenordnung der simulierten Taumengen zu validieren, wurde der Wassereintrag während einzelner regenfreier Nächte im Oktober 2014 mit einem Minilysimeter ermittelt, das mit einer künstlichen Grasfläche zur Tausammlung ausgestattet war. Die Messungen belegen, dass Wasseräquivalente von $>0,25 \text{ mm m}^{-2}$ während einer Taunacht kaum zu erwarten sind (Abbildung 47). Da Wassermangelsituationen in der Regel genau zu solchen Zeiten des Jahres auftreten, wenn der nächtliche Taufall aus klimatologischen Gründen bereits nachlässt und die im Feldversuch erfassten Taumengen entsprechend gering waren, stellt das Tauwasser keine ertragsrelevante Größe dar. Darüber hinaus ist es sehr unwahrscheinlich, dass insbesondere unter Trockenstress, Wasser in relevantem Umfang über das Blatt aufgenommen wird. Um Wasserverluste durch Diffusion über die Blattoberfläche zu vermeiden, bilden die Blätter bei anhaltendem Wassermangel eine dickere Kutikula mit dichten Wachsschichten aus. Auch die Stomata, welche unter Trockenstress tendenziell geschlossen sind (vgl. Abbildung 50) lassen eine nennenswerte Wasseraufnahme nicht zu.

Bezogen auf den Wasserhaushalt haben die Blattbecher aufgrund von Interzeptionsverlusten einen eher negativen Einfluss auf die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser. Bei einem maximalen LAI von 10, wie er in dem vorliegenden Projekt sowohl mit als auch ohne Zusatzberechnung gemessen wurde (Abbildung 53), erreichen Niederschläge von weniger als 2,5 mm in einem zuvor trockenen Bestand den Boden und damit die Wurzeln überhaupt nicht. Die Blattbecher fangen zusätzlich zwischen 0,7 mm (unbewässert) und 1,7 mm (bewässert) Wasser auf, so dass Niederschläge von weniger als 3,2 bzw. 4,2 mm unproduktiv verdunsten.

Denkbar wäre auch, dass sich durch Verdunstung des Becherwassers das Bestandesmikroklima verändert. Die Verdunstungskälte könnte die Bestandestemperatur herabsetzen und die Luftfeuchtigkeit erhöhen. Das derart veränderte Mikroklima könnte theoretisch einen Trockenstress abmildern. Während der Vegetationsperioden 2013 und 2014 wurden zu dieser Thematik, ebenfalls in Kooperation mit dem DWD, Messungen durchgeführt (Abbildung 48).

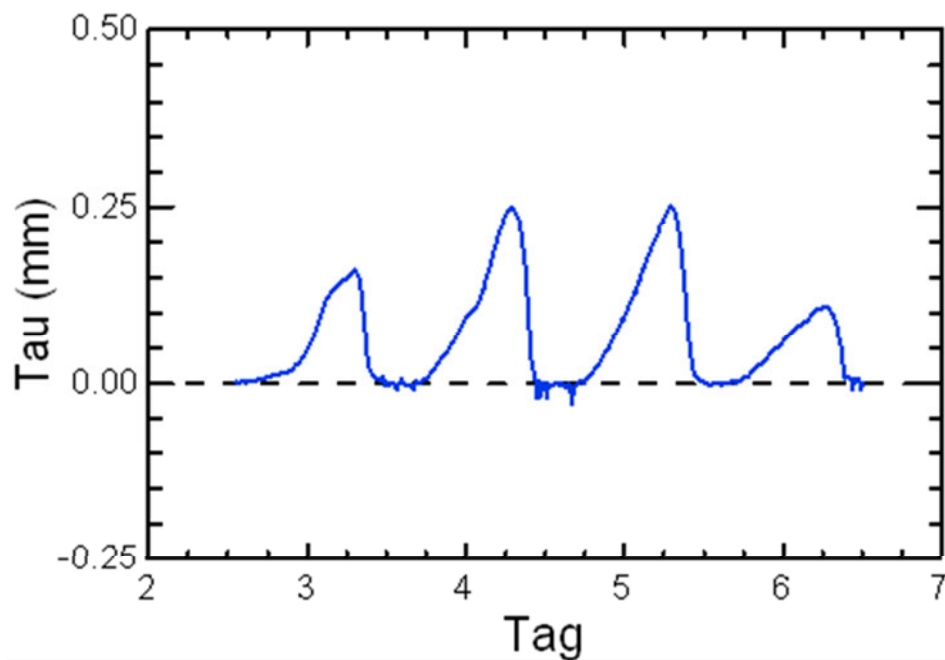


Abbildung 47: Tauwasserbildung im Zeitraum vom 2.10. bis 6.10.2014 am DWD-Standort Braunschweig.

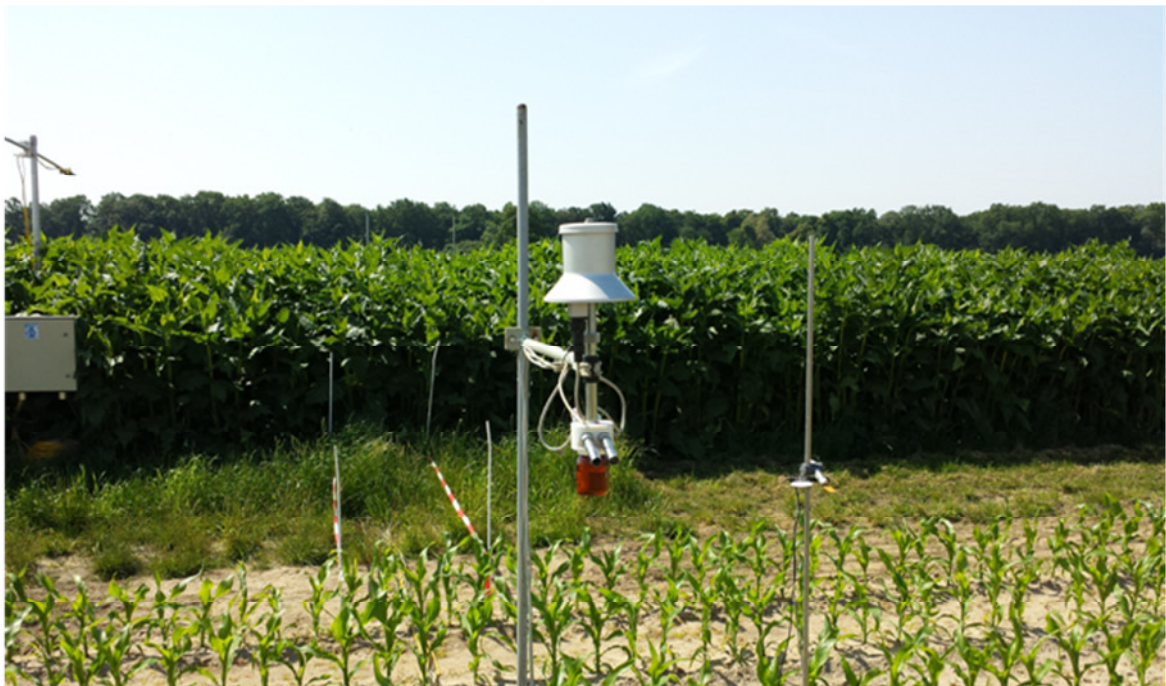


Abbildung 48: Meteorologische Messungen in Silphie- und Maisparzellen in Braunschweig 2014.

Unter leichtem Trockenstress waren die Bestandestemperaturen in der Silphie teilweise niedriger als im Mais. Unter stärkerem Trockenstress, wie er im Feldversuchsjahr 2013 vorherrschte, zeigte sich jedoch, dass die Silphiebestände infolge stark reduzierter Blattflächen und Triebzahlen keinen klar abgegrenzten mikroklimatischen Raum mehr bilden.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wird die Bedeutung der Blattbecher für den Wasserhaushalt der Silphie als sehr gering eingeschätzt. Damit bleibt die Frage, ob hinter der

Ausbildung von Blattbechern eine evolutionäre Strategie steht. Möglicherweise erhöhen die wassergefüllten Becher die Attraktivität der Silphie für Blütenbesucher welche sie als Tränke nutzen können. Die fakultativ fremdbefruchtete Silphie mit ihrer langen Blühdauer könnte von diesen zusätzlichen Bestäubern profitieren (vgl. 1.1.1.6).

1.2.1.4 Stomatäre Leitfähigkeit von Silphie im Vergleich zu Mais

Die stomatäre Leitfähigkeit (g_s) wurde in den Jahren 2013 und 2014 in jeweils einer bewässerten und unbewässerten Silphie- und Maisparzelle gemessen. Dazu wurden fünf repräsentative Triebe pro Parzelle markiert und ab Beginn der Beregnungssaison mehrfach mit einem SC-1 Blatt-Porometer (Decagon Devices Inc., Pullman, USA) gemessen (Abbildung 49). Die Messungen erfolgten bei beiden Kulturen an der Unter- und Oberseite der Blätter auf drei Blattetagen (oben, in der Mitte und unten). Die mittlere Blattetage bei der Silphie entsprach dem 4. Blattpaar und bei Mais dem 6. Blatt von unten.



Abbildung 49: Messung der stomatären Leitfähigkeit mit dem SC-1 Porometer an einem Silphieblatt in Braunschweig 2014.

Insgesamt wurden im Jahr 2013 zu 16 Terminen und 2014 zu 15 Terminen Datenerhebungen durchgeführt. Gemessen wurde zwischen 10:30 und 14:30 Uhr MESZ an Tagen mit geringer Bewölkung sowie Temperaturen $>20^{\circ}\text{C}$. Die insgesamt 20 Pflanzen wurden jeweils in einer zufälligen Reihenfolge untersucht, um den systematischen Fehler, resultierend aus der Variation von g_s im Tagesgang, zu minimieren. Die Größenordnung der g_s -Werte (Abbildung 50) war vergleichbar mit denen anderer Untersuchungen bei Silphie (Franzaring et al. 2014) und Mais (Zia et al. 2013).

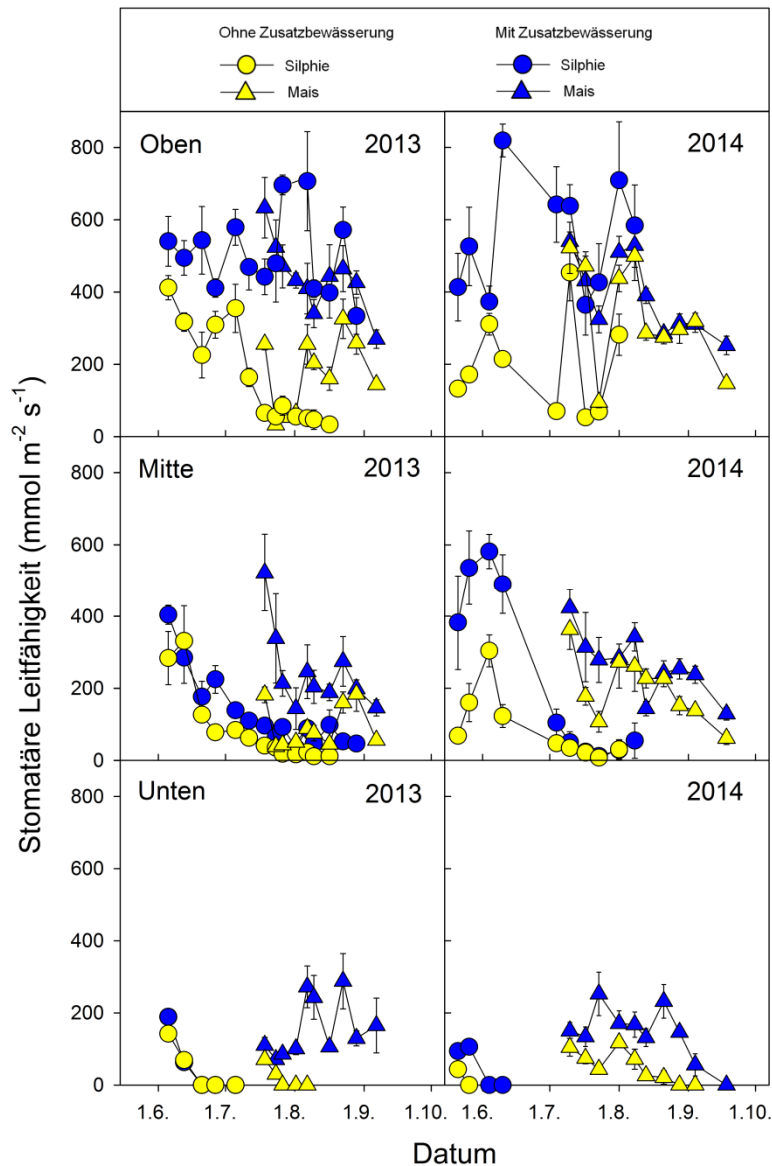


Abbildung 50: Stomatäre Leitfähigkeit gemessen am jeweils obersten, mittleren und untersten Blatt in unbewässerten und bewässerten Parzellen von Silphie und Mais in Braunschweig 2013 und 2014.

In der Vegetationsperiode 2013 zeigten die Silphieblätter in der unbewässerten Variante ab Mitte Juli eine nur noch geringe stomatäre Leitfähigkeit. Auch die jüngsten voll entwickelten Blätter reagierten aufgrund des geringen Bodenwassergehaltes bzw. des hohen Sättigungsdefizits der warmen Umgebungsluft mit der Schließung der Stomata. Ein ähnliches Verhalten war auch bei Mais zu beobachten. Nach der Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers durch stärkere Niederschläge von 33 mm zwischen dem 24.7. und 6.8.2013 reagierten die beiden Kulturen allerdings sehr unterschiedlich. Bei Mais war ein deutlicher Anstieg der Transpiration zu verzeichnen, während die Silphie keine stomatäre Reaktion mehr zeigte.

Die Verfügbarkeit des Bodenwassers hatte auf allen drei Blattoberflächen einen starken Einfluss auf die Transpiration von Silphie und Mais. Unabhängig von Kultur, Wasserregime und Jahr war der Rückgang in der stomatären Leitfähigkeit auf der obersten Blattoberfläche am stärksten ausgeprägt und auf der untersten Blattoberfläche am schwächsten. Bereits Anfang bis Mitte Juni transpirierten die

untersten Silphieblätter kaum noch. Sie waren aufgrund von Lichtmangel bereits weitgehend abgestorben. Beim Mais hingegen waren selbst die untersten Blätter, wenngleich auf einem niedrigen Niveau, fast bis zur Ernte photosynthetisch aktiv. Im Vergleich zur bewässerten Variante war die Transpiration der obersten Blätter von unbewässerter Silphie im Mittel der Jahre um 70%, bei Mais dagegen um lediglich 37% reduziert. Bei optimaler Wasserversorgung war die stomatäre Leitfähigkeit der oberen Blätter von Silphie um 28% höher als die von Mais, bei suboptimaler Wasserversorgung dagegen um 32% niedriger.

1.2.1.5 Blattflächenindex, Strahlungsinterzeption und Strahlungsnutzungseffizienz

Der LAI als ein wichtiges Maß der Bestandesentwicklung wurde in sämtlichen Parzellen des Bewässerungsfeldversuches in wöchentlichen Abständen gemessen. Zu Beginn des Pflanzenwachstums wurden bei den Reihenkulturen Silphie und Mais zunächst Digitalfotos von repräsentativen Teilflächen aufgenommen und diese mit Hilfe einer Bildanalysesoftware von Dr. Ulf Böttcher von der Christian Albrechts-Universität zu Kiel für die Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades verwendet. Der dazugehörige LAI wurde durch Regressionsanalysen von Bodenbedeckungs- und Blattflächendaten ermittelt. Nachdem sich im Verlauf des Wachstums Blattetagen ausgebildet hatten, wurde der LAI mit einem SunScan System (Delta-T Devices, Cambridge, UK) ermittelt (Abbildung 51).



Abbildung 51: Ermittlung von PAR-Interzeption und Blattflächenindex mit dem SunScan System bestehend aus Stabquantensensor und externem PAR-Sensor mit RadioLINK zur Messung der PAR oberhalb des Blätterdachs. Messung nur zu Demonstrationszwecken am Parzellenrand, sonst im Bestand.

Es wurden 20 Einzelmessungen je Parzelle durchgeführt. Bei der Silphie war zur korrekten Bestimmung des LAI durch die Gerätesoftware zunächst eine Abschätzung des sog. ELADP-Wertes (Ellipsoidal Leaf Angle Distribution Parameter) erforderlich. Vereinfacht ausgedrückt stellt der ELADP-Wert den artspezifischen Blattstellungswinkel als Verhältnis von horizontalen zu vertikalen Blättern dar. Vergleichsmessungen mit dem LI-COR 2000 (LI-COR, Nebraska, USA) sowie destruktive LAI-Bestimmungen ergaben, dass die Blattflächenentwicklung der Silphie mit einem ELADP-Wert von 4 sehr genau beschrieben wird. Die LAI-Messungen bei der Silphie erfolgten immer oberhalb der zuletzt abgestorbenen Blattetage (grüner LAI). Das SunScan

System erfasst unter anderem die Strahlung oberhalb und innerhalb eines Pflanzenbestandes, woraus sich die relative Interzeption der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) nach folgender Formel ableiten lässt:

$$\text{PAR-Interzeption (\%)} = [(\text{PAR einfallend} - \text{PAR transmittiert}) / \text{PAR einfallend}] \times 100$$

Ab Ende Juli bildete die Silphie einen geschlossenen Bestand mit einer hohen Strahlungsinterzeption (Abbildung 52). Bereits im Etablierungsjahr 2012 wurde unter Zusatzbewässerung ein hoher Blattflächenindex von 8 erreicht (Abbildung 53). Trotz der 2012 noch relativ geringen Biomassebildung war die Blattfläche in den unbewässerten Parzellen aufgrund erschöpfter Bodenwasserreserven bereits deutlich reduziert.

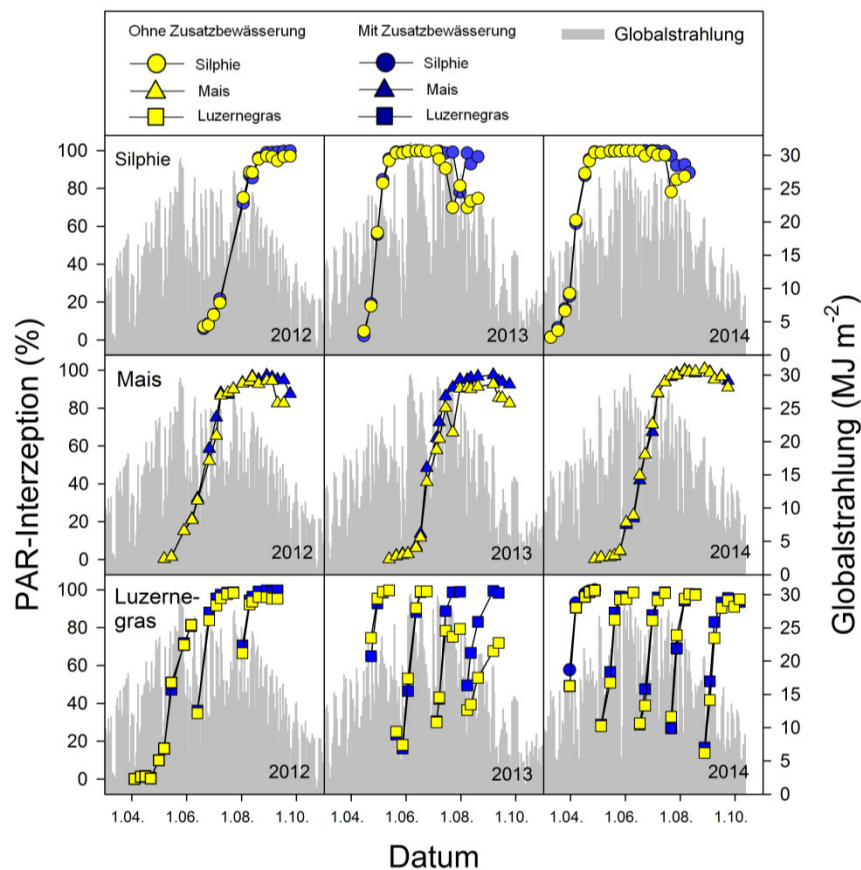


Abbildung 52: Globalstrahlung und Interzeption photosynthetisch aktiver Strahlung durch Silphie, Mais und Luzerne-gras in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.

Gleich mit Vegetationsbeginn im Jahr 2013 zeigten die perennierenden Kulturen Silphie und Luzerne-gras eine zügige Blattflächenentwicklung. Bereits Mitte Mai wurde eine nahezu vollständige Interzeption der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) erreicht. Ab dem dritten Aufwuchs wies das unbewässerte Luzerne-gras eine gegenüber der bewässerten Kontrolle reduzierte Blattfläche auf. Beim Mais erfolgte eine vergleichbar hohe Strahlungsaufnahme erst Anfang August. Zu diesem Zeitpunkt war die Globalstrahlung bereits wieder im Abnehmen begriffen. Im Versuchsjahr 2013 hatten alle drei Kulturen unter Trockenstress einen deutlich niedrigeren LAI als die jeweils zusätzlich bewässerten Bestände. In der Vegetationsperiode 2014 wurden die Beobachtungen aus dem Jahr 2013 bestätigt. Die Silphie zeigte nach Erreichen des

maximalen LAI aufgrund des geringen Strahlungseinfalls in die Bestände auch unter optimaler Wasserversorgung einen schnellen Verlust an grüner Blattfläche. Außerdem waren in den unbewässerten Silphieparzellen aufgrund des hohen Wasserverbrauchs, trotz der in diesem Jahr günstigen Niederschlagsverteilung, trockenheitsbedingte Blattflächenreduktionen zu beobachten. Bei Luzernegras und Mais wurde der LAI ohne Zusatzbewässerung nicht so stark reduziert wie bei der Silphie. Die Schwankungen im LAI zwischen den einzelnen Messterminen sind auf eine unterschiedliche Turgeszenz der Blätter in Abhängigkeit vom Niederschlag zurückzuführen.

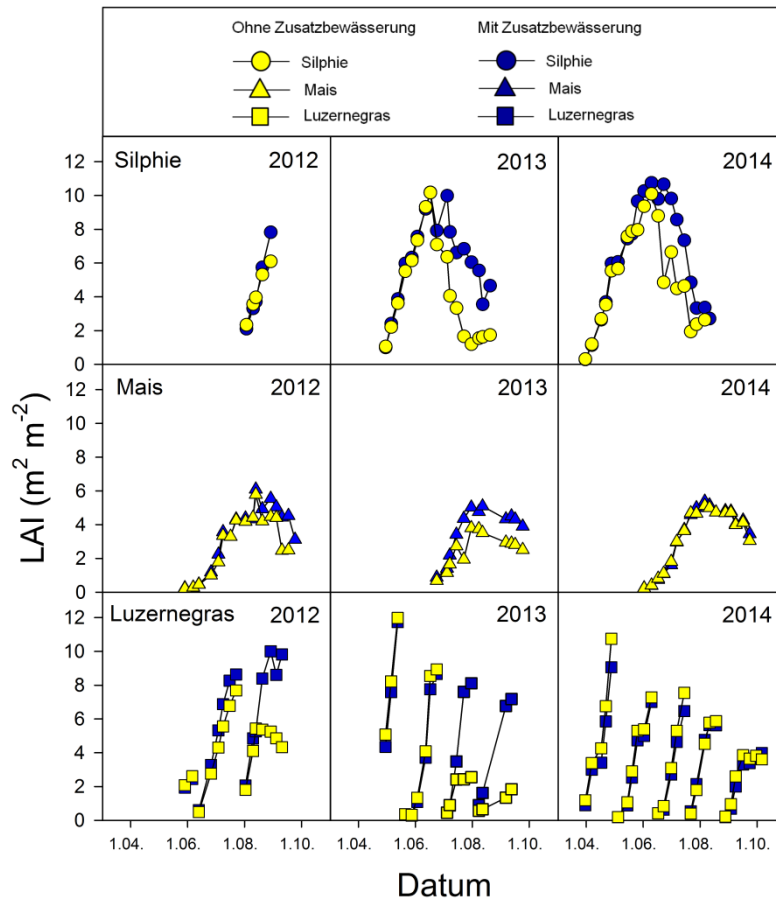


Abbildung 53: Entwicklung des Blattflächenindex (LAI) bei Silphie, Luzernegras und Mais in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.

Zur Bewertung der Effizienz der gebildeten Blattfläche bezüglich der PAR-Interzeption wurde der kritische LAI bestimmt, der zur Aufnahme von 95% PAR bei den untersuchten Kulturen erforderlich ist. Ende Juni erreichte die Silphie ihren maximalen Blattflächenindex von 10 (8-9 Nodien). Bereits Mitte Mai (3-4 Nodien) war der für eine 95%ige PAR-Interzeption kritische LAI von 3-4 erreicht, so dass der weitere Blattflächenzuwachs nicht mehr effizient zur Strahlungsaufnahme beitrug (Abbildung 54). Die ebenfalls im Frühjahr 2012 etablierten Luzernegrasbestände zeigten bereits im zweiten Aufwuchs einen raschen Blattflächenzuwachs mit entsprechend hoher PAR-Interzeption.

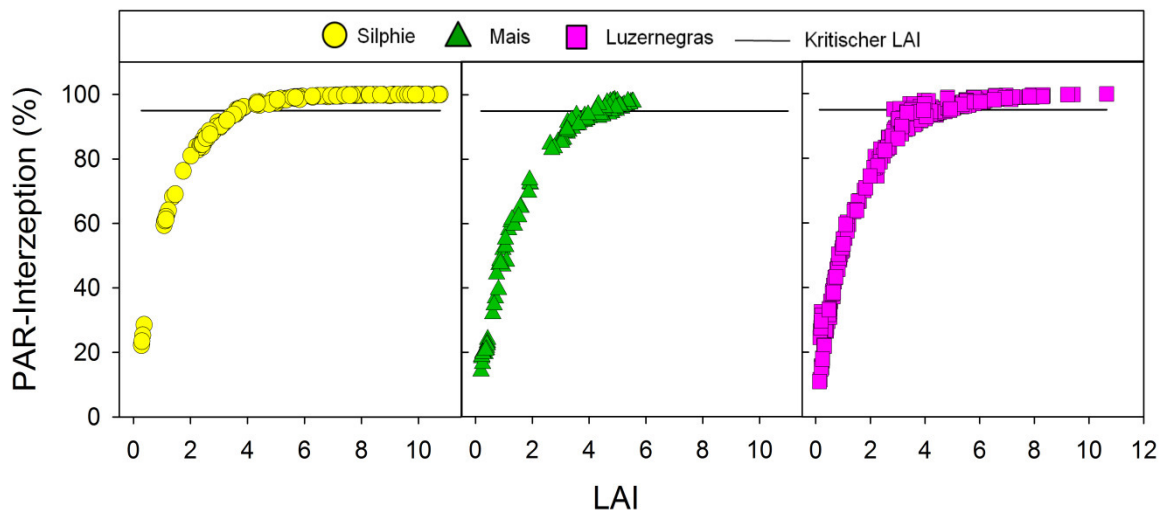


Abbildung 54: Interzeption photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) durch Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit vom Blattflächenindex (LAI) im Mittel der Jahre und Bewässerungsregime am Standort Braunschweig. Der kritische LAI kennzeichnet die für eine PAR-Interzeption von 95% notwendige Blattfläche.

Der kritische LAI von Mais und Luzernegras liegt Ergebnissen anderer Studien zufolge (Madonni und Otegui 1996, Teixeira et al. 2007) mit einem Wert von 4 auf einem vergleichbaren Niveau. Gegenüber der Silphie wurde die vorhandene Blattfläche bei Mais und Luzernegras wesentlich effizienter für die Ertragsbildung genutzt. So hatte der Mais maximal einen LAI von 6 während die große Blattfläche von Luzernegras durch mehrfache Beerntung zur Biomassegewinnung beitrug. Da die Silphie eine planophile Blatthaltung aufweist, nahm die einfallende Strahlung im Bestand rasch ab. Die unteren Blätter erreichten schon bald den Lichtkompensationspunkt nicht mehr und starben ab.

In den Parzellen ohne Zusatzbewässerung wurde die starke Blattflächenreduktion der Silphie noch dadurch verstärkt, dass komplette Triebe innerhalb der Stauden trockenheitsbedingt abstarben. Durch Unterschreiten des kritischen LAI waren deshalb auch Verluste bei der PAR-Interzeption zu verzeichnen. Diese Vorgänge laufen ab, noch bevor der Silphiebestand den für die Silierung erforderlichen Trockensubstanzgehalt von 24-26% erreicht hat. Die dem Anbauziel Biomasseproduktion entgegenstehende Blatt- und Triebreduktion tritt in den natürlichen Habitaten der Silphie kaum auf. Dort wächst die Silphie vereinzelt oder in lockeren Verbänden (Stanford 1990), so dass auch die unteren Blätterlagen ausreichende Strahlung aufnehmen können. Es stellt sich deshalb die Frage, ob die Ausbildung derart großer Blattflächen für eine angestrebte landwirtschaftliche Nutzung überhaupt wünschenswert ist. Dazu ist zunächst einmal festzustellen, dass der Silphie (neben Blättern, Wurzelstock und Samen) im Wesentlichen nur die Stängel als Assimilatspeicher zur Verfügung stehen. Voraussetzung für einen hohen Ertrag sind deshalb zahlreiche und lange Stängel. Angesichts der hohen Stängeldichte lässt sich nicht vermeiden, dass etwa die Hälfte der Blätter wegen Lichtmangel abstirbt und vor der Ernte abfällt. Bei einem angenommenen durchschnittlichen Blatt : Stängel-Verhältnis von 1:2 (Biertümpfel und Conrad 2013) stellen die Blätter einen Anteil von etwa einem Drittel an der oberirdischen Biomasse. Wenn etwa die Hälfte der Blattfraktion aufgrund von Lichtmangel vorzeitig abstirbt, dann entspricht der Anteil toter Blätter bei einer Ernte von 10-16 t ha⁻¹ oberirdischer Trockenmasse einem Ertragsverlust von ca. 1-2 t TM ha⁻¹.

Die oben für die Silphie skizzierten Probleme hat der Mais mit dem Kolben als großes generatives Speicherorgan ebenso wenig wie das mehrfach entblätterte Luzernegras. Ein wiederholter Schnitt der Silphie zur Optimierung der Bestandeslichtverhältnisse ist wegen des im Vergleich zur Luzerne schlechten Regenerationsvermögens und der mit der Ernte verbundenen

hohen Kosten ökonomisch nicht sinnvoll. Mit zunehmendem Alter der Silphiebestände nimmt (zumindest in den ersten Jahren) die Stängelzahl pro Flächeneinheit zu, während gleichzeitig Lichteinfall, Stängeldurchmesser und Standfestigkeit abnehmen. Um die Ertragsfähigkeit von Silphiebeständen längerfristig zu erhalten wäre zu untersuchen, ob sich die oben geschilderte negative Entwicklung durch eine gelegentliche kreuz-und-quer Bearbeitung mit einer Reihenfräse zur Auslichtung zu enger Bestände verhindern lässt. Angesichts der enorm hohen intraspezifischen phänotypischen Variabilität wäre auch zu prüfen, ob sich die Höhe und Stabilität der Biomasseerträge durch Selektion auf dickere und stabilere Stängel verbessern lässt.

Die Strahlungsnutzungseffizienz (RUE) als Maßzahl für die Assimilationsleistung eines Pflanzenbestandes wurde in dieser Studie aus den Berechnungen der PAR-Interzeption (hier als Anteil der durch die Pflanze aufgenommenen Globalstrahlung) auf der Basis von Tagesmittelwerten abgeleitet. Die RUE der Silphie war im Mittel der Versuchsjahre und Wasserregime signifikant niedriger als die von Mais (-55%) und Luzernegras (-7%) (Tabelle 14).

Tabelle 14: Kumulierte Globalstrahlung, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) sowie Strahlungsnutzungseffizienz (RUE) von Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre 2013 und 2014 am Standort Braunschweig.

Wasserregime (W)	Kulturart (K)	Kum. Globalstrahlung (MJ m ⁻²)	Kum. PAR (MJ m ⁻²)	RUE (g MJ ⁻¹)
2012				
Ohne Bewässerung	Mais	2.523	1.348	1,33 ^b
	Luzernegras	2.852	1.318	0,55 ^d
	Mittel	2.688	1.333	0,94 ^B
Mit Bewässerung	Mais	2.623	1.463	1,59 ^a
	Luzernegras	2.852	1.358	0,66 ^c
	Mittel	2.738	1.411	1,30 ^A
Mittel	Mais	2.573	1.406	1,46 ^A
	Luzernegras	2.852	1.338	0,60 ^B
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2012</i>				
	W	-	-	*
	K	-	-	***
	W×K	-	-	ns
2013				
Ohne Bewässerung	Silphie	2.302	1.887	0,53 ^e
	Mais	2.364	1.215	1,13 ^b
	Luzernegras	2.639	1.542	0,61 ^d
	Mittel	2.435	1.548	0,76 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	2.438	2.017	0,77 ^c
	Mais	2.364	1.347	1,55 ^a
	Luzernegras	2.639	1.729	0,81 ^c
	Mittel	2.480	1.968	1,04 ^A
Mittel	Silphie	2.370	1.952	0,64 ^C
	Mais	2.364	1.281	1,34 ^A
	Luzernegras	2.639	1.636	0,71 ^B
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013</i>				
	W	-	-	***
	K	-	-	***
	W×K	-	-	***

Tabelle 14: Kumulierte Globalstrahlung, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) sowie Strahlungsnutzungseffizienz (RUE) von Silphie, Mais und Luzernegras in Abhängigkeit vom Wasserregime in den Versuchsjahren 2012, 2013 und 2014 sowie im Mittel der Jahre 2013 und 2014 am Standort Braunschweig.

Wasserregime (W)	Kulturart (K)	Kum. Global- strahlung (MJ m ⁻²)	Kum. PAR (MJ m ⁻²)	RUE (g MJ ⁻¹)
<u>2014</u>				
Ohne Bewässerung	Silphie	2.548	2.097	0,56 ^e
	Mais	2.510	1.407	1,54 ^b
	Luzernegras	3.254	2.153	0,70 ^d
	Mittel	2.771	1.886	0,93 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	2.675	2.222	0,76 ^c
	Mais	2.510	1.395	1,60 ^a
	Luzernegras	3.254	2.096	0,69 ^d
	Mittel	2.813	1.904	1,02 ^A
Mittel	Silphie	2.612	2.160	0,66 ^C
	Mais	2.510	1.401	1,57 ^A
	Luzernegras	3.254	2.125	0,69 ^B
<u>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA</u>				
	W	-	-	**
	K	-	-	***
	W×K	-	-	***
<u>2013 und 2014</u>				
Ohne Bewässerung	Silphie	2.425	1.992	0,54 ^e
	Mais	2.437	1.311	1,33 ^b
	Luzernegras	2.946	1.847	0,66 ^d
	Mittel	2.603	1.717	0,84 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	2.556	2.119	0,76 ^c
	Mais	2.437	1.371	1,58 ^a
	Luzernegras	2.946	1.913	0,75 ^c
	Mittel	2.647	1.801	1,03 ^A
Mittel	Silphie	2.491	2.056	0,65 ^C
	Mais	2.437	1.341	1,46 ^A
	Luzernegras	2.946	1.880	0,70 ^B
<u>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013 und 2014</u>				
	W	-	-	***
	K	-	-	***
	J	-	-	***
	W×K	-	-	***
	W×J	-	-	***
	K×J	-	-	***

*, **, *** Signifikant für $P < 0,05$, $P < 0,01$ bzw. $P < 0,001$; ns = nicht signifikant für $P < 0,05$.

† Merkmalsmittelwerte mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben sowie Wasserregime- bzw. Kulturmittelwerte mit unterschiedlichen Großbuchstaben innerhalb eines Jahres unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$; t -Test).

In den unbewässerten Parzellen war die RUE unter Trockenstress infolge geringerer Trockenmasseerträge signifikant reduziert. Im Mittel der Jahre 2013 und 2014 hatte die Silphie mit einer TM-Ertragsminderung von 29% (Mais 16%, Luzernegras 12%) die höchste Trockenstressempfindlichkeit bzw. geringste RUE. Bei optimaler Wasserversorgung erreichte die RUE der Silphie das Niveau von Luzernegras.

Die erwartungsgemäß hohe RUE von Mais resultiert aus einer effizienten Assimilatproduktion über die C4-Photosynthese mit hohen Biomassezuwächsen innerhalb einer vergleichsweise kurzen Wachstumszeit. Das Luzernegras hingegen produziert während der gesamten Vegetationsperiode eine sehr energiereiche Biomasse. Obgleich die Silphie eine kürzere Wachstumszeit als Luzernegras aufweist, ist die Summe der aufgenommenen Strahlung höher. Der Grund dafür ist die konstant hohe PAR-Interzeption wegen fehlender Entblätterung. Die Ergebnisse bezüglich des Einflusses von Wassermangel und C4-Photosynthese auf die RUE decken sich mit Beobachtungen bei anderen Kulturpflanzen (Sinclair und Muchow 1999). Für die Silphie lagen bislang noch keine entsprechenden Untersuchungsergebnisse in der Literatur vor. Die RUE der Silphie ist als niedrig einzustufen, da sie noch unterhalb derjenigen der Leguminosen-Gräser-Mischung liegt. Die RUE von Leguminosen ist nach Sinclair und Muchow (1999) verglichen mit anderen C3-Pflanzen tendenziell geringer, da hohe Energiegehalte in der Biomasse akkumuliert werden.

1.2.1.6 Wirkung von Wassermangel auf den Methanertrag

In den unbewässerten Parzellen des Feldversuchs in Braunschweig war besonders unter spätem Trockenstress im Jahr 2013 zu beobachten, dass zahlreiche Triebe der Silphiestauden vorzeitig abstarben (Abbildung 55).



Abbildung 55: Üppig entwickelte und voll turgeszente Silphiepflanzen in einer Parzelle mit Zusatzberegnung (links) im Gegensatz zu welken und teilweise vertrockneten Pflanzen in der benachbarten unberegneten Parzelle (rechts) in Braunschweig 2013.

Da weder Schädlinge noch Krankheiten festgestellt werden konnten, handelt es sich bei dieser Art der Triebreduktion offenkundig um eine rigorose Anpassung der Pflanze an Wassermangel. Für den Methanhektarertrag könnte das bedeuten, dass dieser nicht nur wegen des trockenheitsbedingt niedrigeren Biomasseertrages geringer ausfällt, sondern darüber hinaus auch noch wegen der verminderten Methanausbeute eines qualitativ schlechteren Biogassubstrates. Um gesicherte Aussagen zur Bedeutung dieses Phänomens (das von anderen Energiepflanzen in dieser Deutlichkeit nicht bekannten ist) für den spezifischen Methanertrag der Silphie machen zu können, wurde die Gasausbeute von unterschiedlich mit Wasser versorgten Aufwüchsen anhand standardisierter Gasertragstests (Batch-Tests) gemessen. Dadurch eröffnete sich zudem die Möglichkeit, die Auswirkung von Trockenstress auf die Methanausbeute und den Methanhektarertrag der Silphie im Vergleich zu entsprechend erzeugtem Mais und Luzernegras zu beurteilen. Unserem Wissen nach liegen für die Silphie bislang noch keine

Ergebnisse standardisierter Gasertragstests zur Charakterisierung der Methanpotentiale bei unterschiedlicher Wasserversorgung vor.

Insgesamt wurden am JKI-Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde 48 Batch-Tests durchgeführt. Verwendet wurde Probenmaterial von sämtlichen untersuchten Kulturen und Erntejahren aus dem Bewässerungsfeldversuch. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse wurden zusätzlich Weender-Nährstoffanalysen durchgeführt. Bei der Ernte von Silphie und Mais mit dem Feldhäcksler sowie bei jedem Schnitttermin von Luzernegras mit dem Grünfutterschredder wurden pro Versuchsparzelle drei Stichproben zu je 1 kg Frischmasse in PE-Beutel verpackt und bis zur Ermittlung des Gasbildungspotentials bei -20 °C gelagert. Die Biogastests erfolgten in 20 L PE-Batchbehältern im institutseigenen Biogaslabor entsprechend den Empfehlungen der VDI-Richtlinie 4630 (Vergärung organischer Stoffe). Von sämtlichen Proben wurden zuvor die Gehalte an organischer Trockenmasse (oTS) bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung der bei den Batch-Tests angewandten Methoden findet sich bei Pfitzner et al. (2010).

Bei der Silphie hatte die Wasserversorgung einen größeren Einfluss auf den Trockensubstanzgehalt als bei Mais und Luzernegras (Tabelle 15). Im Mittel der Jahre 2013 und 2014 war der TS-Gehalt bei Silphie ohne Zusatzbewässerung um 5,1 Prozentpunkte höher als mit Zusatzbewässerung. Den mit 29,9% höchsten TS-Gehalt hatte die Silphie bei ausschließlich natürlichem Niederschlag im Trockenjahr 2013. In diesem Versuchsjahr waren besonders viele Triebe aufgrund von Wassermangel abgestorben. Dieses tote Pflanzenmaterial hatte im Mittel der unbewässerten Parzellen einen Anteil von 29% am oberirdischen Biomasseertrag.

Im Mittel der Jahre und Wasserregime war die Methanausbeute der Silphie um 15% geringer als die von Mais sowie um 8% geringer als die von Luzernegras. Für das gegenüber den beiden Vergleichskulturen signifikant niedrigere Gasbildungspotential der Silphie scheint vor allem ihr mit 35,3% vergleichsweise hoher Rohfasergehalt verantwortlich zu sein (Mais und Luzernegras: 21,8 bzw. 25,9%). Dagegen ergaben sich im Vergleich zu Mais nur leicht höhere Rohprotein-, aber deutlich niedrigere NfE- und Rohfettgehalte. Der Methanhektarertrag der Silphie war um 42% niedriger als der von Mais und um 6% niedriger als der von Luzernegras.

Tabelle 15: Wuchshöhe, Rohnährstoffgehalte in der Trockenmasse, Methanausbeute sowie Biomasse- und Methanerträge von Silphie, Mais und Luzernegras[†] in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.

Wasserregime (W)	Kultur (K)	Wuchs- höhe (cm)	TS- Gehalt (%)	Roh- asche (%)	Roh- fett [†] (%)	Roh- protein (%)	Roh- faser (%)	NfE (%)	Methan- ausbeute [NL (kg oTS) ⁻¹]	FM- Ertrag (t ha ⁻¹)	TM- Ertrag (t ha ⁻¹)	Methan- ertrag (Nm ³ ha ⁻¹)
<u>2012</u>												
Ohne Bewässerung	Mais	251 ^{b§}	38,6 ^a	4,6 ^b	36,0	6,7 ^b	24,1 ^a	62,5 ^b	328 ^a	46,6 ^b	18,0 ^b	5.899 ^b
	Luzernegras	50 ^c	26,4 ^b	10,0 ^a	34,0	17,5 ^a	25,1 ^a	44,6 ^c	297 ^b	29,5 ^c	7,2 ^d	2.137 ^c
	Mittel	151 ^A	32,5 ^A	7,3 ^A	35,0	12,1 ^A	24,6 ^A	53,5 ^A	313 ^A	38,0 ^B	12,6 ^B	4.018 ^B
Mit Bewässerung	Mais	284 ^a	38,0 ^a	3,9 ^c	36,0	6,2 ^b	20,8 ^b	67,0 ^a	329 ^a	61,7 ^a	23,3 ^a	7.685 ^a
	Luzernegras	74 ^c	21,2 ^c	10,3 ^a	34,0	18,4 ^a	25,8 ^a	42,8 ^c	304 ^{ab}	42,5 ^b	9,0 ^c	2.731 ^c
	Mittel	179 ^A	29,6 ^B	7,1 ^A	35,0	12,3 ^A	23,3 ^A	54,9 ^A	317 ^A	52,1 ^A	16,2 ^A	5.208 ^A
Mittel	Mais	268 ^A	38,3 ^A	4,3 ^B	36,0	6,4 ^B	22,5 ^B	64,8 ^A	329 ^A	54,1 ^A	20,7 ^A	6.792 ^A
	Luzernegras	62 ^B	23,8 ^B	10,1 ^A	34,0	18,0 ^A	25,4 ^A	43,7 ^B	301 ^B	36,0 ^B	8,1 ^B	2.434 ^B
<u>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2012</u>												
W		*	*	ns	-	ns	ns	ns	ns	*	**	**
K		***	***	***	-	***	*	***	**	***	***	***
WxK		**	**	*	-	*	*	**	ns	ns	**	*
<u>2013</u>												
Ohne Bewässerung	Silphie	211 ^b	29,9 ^b	11,7 ^a	16,7	9,2 ^b	34,1 ^a	43,2 ^b	290 ^d	33,4 ^e	10,0 ^d	2.889 ^c
	Mais	198 ^b	35,7 ^a	4,0 ^b	36,0	7,1 ^c	21,2 ^d	65,1 ^a	351 ^a	38,5 ^d	13,7 ^c	4.807 ^b
	Luzernegras	50 ^d	18,8 ^d	11,4 ^a	34,0	23,4 ^a	24,6 ^c	37,3 ^c	334 ^{ab}	56,6 ^c	9,5 ^d	3.166 ^c
	Mittel	153 ^B	28,1 ^A	9,1 ^A	28,9	13,2 ^A	26,6 ^B	48,6 ^A	325 ^A	42,8 ^B	11,1 ^B	3.621 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	277 ^a	26,0 ^c	11,4 ^a	16,7	7,4 ^c	34,8 ^a	44,7 ^b	310 ^c	59,8 ^{bc}	15,5 ^b	4.789 ^b
	Mais	291 ^a	34,3 ^a	3,6 ^b	36,0	5,8 ^d	23,3 ^c	64,7 ^a	333 ^{ab}	61,1 ^b	20,9 ^a	6.955 ^a
	Luzernegras	74 ^c	15,7 ^e	11,6 ^a	34,0	22,9 ^a	28,2 ^b	33,9 ^d	329 ^b	70,7 ^a	14,0 ^c	4.618 ^b
	Mittel	214 ^A	25,3 ^B	8,9 ^A	28,9	12,0 ^B	28,8 ^A	47,7 ^A	324 ^A	63,9 ^A	16,8 ^A	5.454 ^A
Mittel	Silphie	244 ^A	27,9 ^B	11,6 ^A	16,7	8,3 ^B	34,5 ^A	44,0 ^B	300 ^B	46,6 ^C	12,7 ^B	3.839 ^B
	Mais	245 ^A	35,0 ^A	3,8 ^B	36,0	6,4 ^C	22,2 ^C	65,0 ^A	342 ^A	49,8 ^B	17,3 ^A	5.881 ^A
	Luzernegras	62 ^B	17,3 ^C	11,5 ^A	34,0	23,2 ^A	26,4 ^B	35,6 ^C	331 ^A	63,7 ^A	11,8 ^C	3.892 ^B
<u>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013</u>												
W		**	**	ns	-	*	*	ns	ns	***	***	***
K		***	***	***	-	***	***	***	***	***	***	***
WxK		***	ns	ns	-	*	**	***	*	***	***	**

Tabelle 15: Wuchshöhe, Rohnährstoffgehalte in der Trockenmasse, Methanausbeute sowie Biomasse- und Methanerträge von Silphie, Mais und Luzernegras[†] in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.

Wasserregime (W)	Kultur (K)	Wuchs- höhe (cm)	TS- Gehalt (%)	Roh- asche (%)	Roh- fett [†] (%)	Roh- protein (%)	Roh- faser (%)	NfE (%)	Methan- ausbeute [NL (kg oTS) ⁻¹]	FM- Ertrag (t ha ⁻¹)	TM- Ertrag (t ha ⁻¹)	Methan- ertrag (Nm ³ ha ⁻¹)
2014												
Ohne Bewässerung	Silphie	223 ^b	26,1 ^b	11,0 ^a	16,7	8,0 ^a	33,9 ^b	45,5 ^b	303 ^c	44,9 ^d	11,7 ^d	3.543 ^e
	Mais	281 ^a	36,7 ^a	4,0 ^b	36,0	7,0 ^c	21,4 ^d	65,1 ^a	376 ^a	58,9 ^c	21,6 ^a	8.134 ^b
	Luzernegras	65 ^c	17,3 ^d	11,3 ^a	34,0	24,7 ^a	25,3 ^c	35,3 ^d	338 ^b	92,0 ^a	15,0 ^c	5.080 ^{cd}
	Mittel	190 ^b	26,7 ^A	8,7 ^A	28,9	13,2 ^A	26,9 ^B	48,6 ^A	339 ^A	65,3 ^B	16,1 ^B	5.586 ^A
Mit Bewässerung	Silphie	292 ^a	19,8 ^c	11,2 ^a	16,7	6,7 ^c	38,3 ^a	42,1 ^c	321 ^{bc}	85,1 ^b	16,8 ^b	5.399 ^c
	Mais	290 ^a	35,7 ^a	3,7 ^b	36,0	7,0 ^c	21,3 ^d	65,5 ^a	389 ^a	62,8 ^c	22,4 ^a	8.714 ^a
	Luzernegras	65 ^c	17,1 ^d	10,8 ^a	34,0	24,8 ^a	25,4 ^c	35,6 ^d	336 ^b	88,3 ^{ab}	14,5 ^c	4.864 ^d
	Mittel	216 ^A	24,2 ^B	8,6 ^A	28,9	12,8 ^A	28,3 ^A	47,7 ^A	349 ^A	78,7 ^A	17,9 ^A	6.326 ^B
Mittel	Silphie	258 ^B	23,0 ^B	11,1 ^A	16,7	7,3 ^B	36,1 ^A	43,8 ^B	312 ^C	65,0 ^B	14,3 ^B	4.471 ^C
	Mais	65 ^C	36,2 ^A	3,8 ^B	36,0	7,0 ^B	21,3 ^C	65,3 ^A	383 ^A	60,9 ^B	22,0 ^A	8.424 ^A
	Luzernegras	286 ^A	17,2 ^C	11,1 ^A	34,0	24,8 ^A	25,4 ^B	35,5 ^C	337 ^B	90,1 ^A	14,7 ^B	4.972 ^B
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2014</i>												
	W	**	**	ns	-	ns	*	ns	ns	**	**	**
	K	***	***	***	-	***	***	***	***	***	***	***
	W×K	***	***	ns	-	**	***	***	ns	***	***	***
Mittel der Jahre 2013 und 2014												
Ohne Bewässerung	Silphie	217 ^c	28,0 ^c	11,3 ^a	16,7	8,6 ^b	34,0 ^b	44,4 ^b	296 ^d	39,1 ^e	10,8 ^f	3.216 ^f
	Mais	240 ^b	36,2 ^a	4,0 ^b	36,0	7,0 ^c	21,3 ^e	65,1 ^a	363 ^a	48,7 ^d	17,7 ^b	6.471 ^b
	Luzernegras	58 ^e	18,1 ^e	11,3 ^a	34,0	24,1 ^a	24,9 ^d	36,3 ^c	336 ^b	74,3 ^b	12,2 ^e	4.123 ^e
	Mittel	172 ^b	27,4 ^A	8,9 ^A	28,9	13,2 ^A	26,7 ^B	48,6 ^A	332 ^A	54,0 ^B	13,6 ^B	4.603 ^B
Mit Bewässerung	Silphie	285 ^a	22,9 ^d	11,3 ^a	16,7	7,1 ^c	36,6 ^a	43,4 ^b	315 ^c	72,4 ^b	16,1 ^c	5.094 ^c
	Mais	290 ^a	35,0 ^b	3,7 ^b	36,0	6,4 ^d	22,3 ^e	65,1 ^a	361 ^a	61,9 ^c	21,7 ^a	7.835 ^a
	Luzernegras	70 ^d	16,4 ^f	11,2 ^a	34,0	23,8 ^a	26,8 ^c	34,7 ^d	333 ^b	79,5 ^a	14,2 ^d	4.741 ^d
	Mittel	215 ^A	24,8 ^B	8,7 ^A	28,9	12,4 ^B	28,6 ^A	47,7 ^A	336 ^A	71,3 ^A	17,3 ^A	5.890 ^A
Mittel	Silphie	251 ^B	25,4 ^B	11,3 ^A	16,7	7,8 ^B	35,3 ^A	43,9 ^B	306 ^C	55,8 ^B	13,5 ^B	4.155 ^C
	Mais	265 ^A	35,6 ^A	3,8 ^B	36,0	6,7 ^C	21,8 ^C	65,1 ^A	362 ^A	55,3 ^B	19,7 ^A	7.153 ^A
	Luzernegras	64 ^C	17,2 ^C	11,3 ^A	34,0	24,0 ^A	25,9 ^B	35,5 ^C	334 ^B	76,9 ^A	13,2 ^B	4.432 ^B

Tabelle 15: Wuchshöhe, Rohnährstoffgehalte in der Trockenmasse, Methanausbeute sowie Biomasse- und Methanerträge von Silphie, Mais und Luzernegras[†] in Abhängigkeit vom Wasserregime in Braunschweig 2012, 2013 und 2014.

Wasserregime (W)	Kultur (K)	Wuchshöhe (cm)	TS-Gehalt (%)	Rohasche (%)	Rohfett [‡] (%)	Rohprotein (%)	Rohfaser (%)	NfE (%)	Methanausbeute [NL (kg oTS) ⁻¹]	FM-Ertrag (t ha ⁻¹)	TM-Ertrag (t ha ⁻¹)	Methanertrag (Nm ³ ha ⁻¹)
<i>Signifikanz der F-Werte aus der ANOVA 2013 und 2014</i>												
	W	**	**	ns	-	*	*	ns	ns	***	***	***
	K	***	***	***	-	***	***	***	***	***	***	***
	J	**	*	ns	-	ns	ns	ns	*	***	***	***
	W×K	***	***	ns	-	***	ns	ns	*	***	***	***
	W×J	***	ns	ns	-	*	ns	ns	ns	***	***	***
	K×J	***	***	ns	-	***	***	ns	***	***	***	***
	W×K×J	***	**	ns	-	ns	***	***	ns	***	***	***

*, **, *** Signifikant bei $P < 0,05$, $P < 0,01$ bzw. $P < 0,001$; ns = nicht signifikant bei $P < 0,05$.

[†] Mittelwert sämtlicher Aufwüchse im jeweiligen Jahr.

[‡] Für die Rohfettgehalte wurden, beruhend auf chemischen Analysen von je drei repräsentativen Stichproben pro Kultur, Werte von 16,7, 36,0 und 34,0% für Silphie, Mais bzw. Luzernegras angenommen.

[§] Merkmalsmittelwerte mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben sowie Wasserregime- bzw. Kulturmittelwerte mit unterschiedlichen Großbuchstaben innerhalb eines Jahres unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$; t -Test).

Über die Versuchsjahre war eine signifikante Interaktionen zwischen Wasserregime und Kultur festzustellen. Die Methanausbeute der unter Trockenstress gebildeten Biomasse war bei der Silphie gegenüber optimaler Wasserversorgung in den Jahren 2013 und 2014 jeweils signifikant um 6% vermindert. Obgleich das abgestorbene Pflanzenmaterial 2013 im Mittel der unbewässerten Parzellen einen Anteil von 29% an der Gesamtbiomasse aufwies, war die Zusammensetzung der Rohnährstoffe interessanterweise nur unwesentlich verändert. Im Gegensatz zur trockenheitsbedingten Verschlechterung der Substratqualität bei Silphie waren die Methanausbeuten von unbewässertem und bewässertem Mais und Luzernegras im Mittel dieser beiden Versuchsjahre nicht signifikant verschieden. Bei der Silphie resultierte aus der Kombination von verminderter Substratqualität und niedrigerem Biomasseertrag unter Wassermangel eine mit -40% deutlich stärkere Reduktionen des Methanhektarertrages als bei Mais (-17%) und Luzernegras (-13%).

Bei Verwendung von tiegefrorenem frischem (unsiliertem) Ausgangsmaterial lagen die für die Silphie ermittelten Methanausbeuten von $290\text{--}321 \text{ NL (kg oTS)}^{-1}$ etwas über den Werten anderer Autoren. So fanden Conrad und Biertümpfel (2010) spezifische Methanerträge von $222\text{--}279 \text{ NL (kg oTS)}^{-1}$, Dandikas et al. (2014) von $231\text{--}233 \text{ NL (kg oTS)}^{-1}$, Mast et al. (2014) von $232\text{--}274 \text{ NL (kg oTS)}^{-1}$ sowie Haag et al. (2015) von $251 \text{ NL (kg oTS)}^{-1}$. Die Größenordnungen der Methanausbeuten der im eigenen Versuch verwendeten Referenzfrüchte Mais und Luzernegras bewegten sich im Bereich der Werte anderer Untersuchungen (Schittenhelm 2008, Weiland 2010, Hengelhaupt und Gödeke 2011, Haki et al. 2012, Dandikas et al. 2014, Mast et al. 2014). Deshalb werden die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zum Methanbildungspotential der Silphie als zuverlässig eingeschätzt.

1.2.1.7 Vitalität der Wurzelsysteme der Dauerkulturen nach Winter

Ein wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt der Silphie ist die Funktionsfähigkeit des Wurzelsystems ausgangs des Winters, d.h. die Frage ob bzw. inwieweit das Wurzelsystem den Winter in den verschiedenen Bodentiefen unbeschadet überdauert. Es wäre für die Pflanze natürlich wesentlich günstiger, wenn sie die Assimilate aus der wieder anlaufenden Photosynthese unmittelbar für die Produktion oberirdischer Biomasse nutzen könnte und nicht erst in die Bildung neuer Wurzeln zur erneuten Erschließung des Bodenraums investieren müsste. Der Zustand des Wurzelsystems ausgangs des Winters ist auch von Bedeutung dafür, wie die Silphie mit frühem Trockenstress zurechtkommt. Situationen mit Frühjahrs- bzw. Frühsommertrockenheit wie in den zurückliegenden Jahren öfter beobachtet werden zukünftig voraussichtlich häufiger auftreten. Entsprechend wichtig ist ein gleich ab Beginn der Vegetationsperiode funktionierendes Wurzelsystem, das die vollständige Ausschöpfung der Herbst- und Winterniederschläge ermöglicht, zumal diese auch in Zeiten des Klimawandels als relativ sicher gelten können.

Die zur Klärung dieser Frage erforderlichen Wurzeluntersuchungen wurden kurz vor Vegetationsbeginn 2015 auf dem Bewässerungsfeldversuch in Braunschweig durchgeführt. Dazu wurde Wurzelmaterial aus unbewässerten Parzellen von Silphie und Luzernegras mittels Rammkernsondierung ($n = 6$) entnommen. Der Anteil lebender Wurzeln an der Gesamtwurzellänge wurde durch Anfärben mit 2,3,5-Triphenyl-tetrazoliumchlorid und anschließender Computer-Bildanalyse nach Stürte et al. (2005) ermittelt (Abbildung 56). Bei beiden Kulturen konnten bis maximal 150 cm Tiefe vitale Wurzeln festgestellt werden. Die Gesamtlänge der physiologisch aktiven Wurzeln im Bodenprofil (10-150 cm Tiefe) betrug bei der Silphie 40 und beim Luzernegras 48 cm cm^{-2} . Die RLD der Silphie war unterhalb 40 cm Bodentiefe sehr niedrig. Das Luzernegras hatte tendenziell höhere Durchwurzelungsintensitäten als die Silphie. Es wies im Bereich von 120-130 cm Bodentiefe eine RLD von durchschnittlich $0,4 \text{ cm cm}^{-3}$ auf, so dass vermutlich bereits mit Wachstumsbeginn aus diesem Tiefenbereich zügig Wasser aufgenommen werden kann. Die Silphie hingegen muss zunächst neue Wurzeltriebe

bilden. Dieser Befund steht im Einklang mit den Beobachtungen zur Erschließung des Bodenwasserspeichers im zeitlichen Verlauf der Vegetation (Abbildung 45).

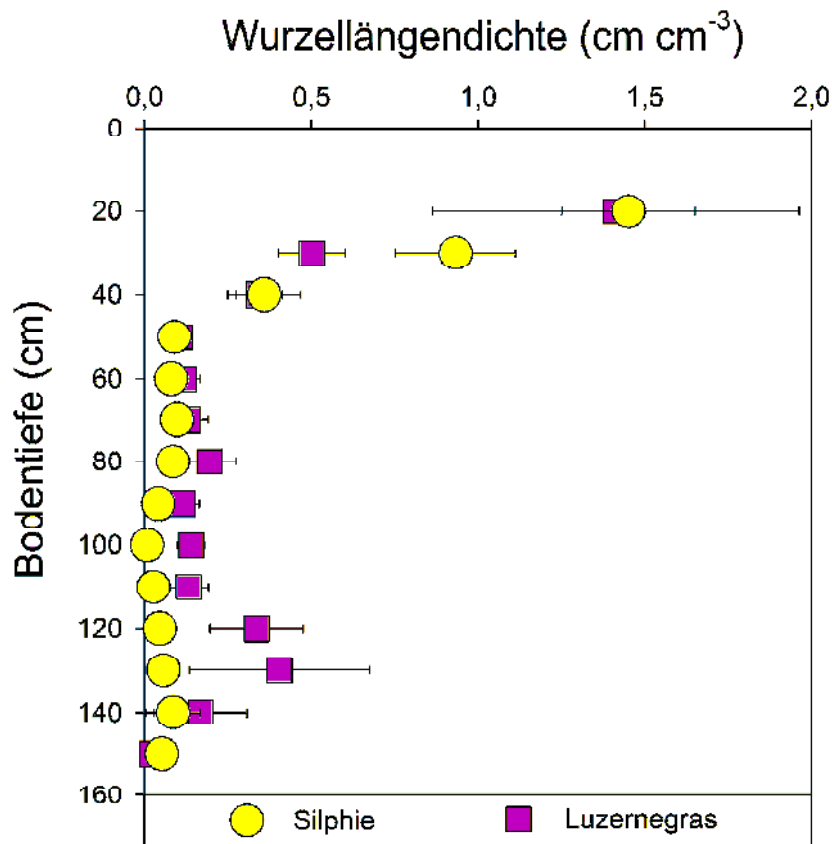


Abbildung 56: Physiologisch aktive Wurzellängendichte von Silphie und Luzernegrass in verschiedenen Bodentiefen der unbewässerten Parzellen vor Vegetationsbeginn in Braunschweig 2015. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.

Das Wurzelsystem der Silphie war mit einem Anteil von 41% lebensfähiger Wurzeln offenbar zu einem geringeren Grad abgestorben als das vom Luzernegrass (33%). Bei dieser Betrachtung bleiben mögliche Unterschiede in der Abbaugeschwindigkeit der abgestorbenen Wurzelteile unberücksichtigt. Im Luzernegrass waren zudem vornehmlich die homorhizien und mit hohen Anteilen an der Gesamtwurzellänge beteiligten Gräserwurzeln abgestorben. Die im Vergleich zur Wurzelentwicklung zum Zeitpunkt der Blüte insgesamt geringe Gesamtwurzellänge von Silphie und Luzernegrass zeigt, dass beide perennierenden Kulturen im Frühjahr erhebliche Anteile an Assimilaten aus der wieder anlaufenden Photosynthese in die Wurzelentwicklung investieren müssen.

1.2.2 Gefäßversuche in der Vegetationshalle

Der zeitliche Verlauf des Wurzelwachstums in Abhängigkeit von der Sprossentwicklung der Silphie wurde in Großgefäßen in der Vegetationshalle untersucht (Abbildung 57). Die Gefäßversuche sollten zudem Erkenntnisse über die bislang noch nicht bekannten morphologischen Eigenschaften des Wurzelsystems der Silphie liefern. Dazu wurden am 9.5.2012 (zeitgleich mit der Anlage des Feldversuchs) Jungpflanzen in 20 mit Feinkies (Körnung 2,0-6,3 mm) gefüllten 110 L Gefäßen (Bodentiefe 70 cm) gepflanzt. Die Gefäße wurden in der Vegetationshalle des Instituts aufgestellt und lediglich während Regenphasen automatisch auf

Schienen unter Glas gefahren. Die Wasser- und Nährstoffversorgung erfolgte bedarfsdeckend. Da die 110 L Gefäße bereits gegen Ende des Etablierungsjahres bis zur maximalen Tiefe durchwurzelt waren, wurden die Silphiepflanzen zu Beginn der Vegetationsperiode 2013 in größere, 310 L Gefäße (Bodentiefe 120 cm) umgesetzt. Die Untersuchung von Wurzeltyp, Wurzeltiefgang und Wurzelverteilung an den aus dem Feinkies ausgewaschenen Wurzeln sowie die Ermittlung des Spross : Wurzel-Verhältnisses erfolgte zu folgenden sechs Entwicklungsphasen: (1) Jungpflanzenstadium 2012, (2) Ende Etablierungsjahr 2012, (3) Wiederaustrieb 2013, (4) Blüte 2013, (5) Ernte erstes Nutzungsjahr 2013, (6) Wiederaustrieb 2014.



Abbildung 57: Fotodokumentation zum Gefäßversuch in Braunschweig: (a) für die Pflanzung der Silphie vorbereitetes 110 L Gefäß; (b) Gefäßversuch in der Vegetationshalle; (c) Auswaschen der Wurzeln aus einem Gefäß; (d) für die Bildverarbeitung aufgelegte Wurzeln; (e) Silphiepflanzen in 310 L Gefäßen; (f) Wurzelstock mit Erneuerungsknospen zum Vegetationsende; (g) Büschelwurzel der Silphie; (h) Wassergefüllter „Blattbecher“ der scheinbar vom Stängel „durchwachsen“ wird.

Das allorhize Wurzelsystem der Silphie zeigt, ähnlich wie das der Sonnenblume welche zur selben Pflanzenfamilie gehört, die morphologischen Eigenschaften einer Büschelwurzel. Die aus den Perizykeln der Hauptwurzeln austretenden Seitenwurzeln erreichen Längen und Durchmesser der Haupttriebe. Die Adventivwurzeln weisen dagegen bis 30 cm Tiefe deutlich größere Durchmesser auf. Die Ausbildung einer tiefwachsenden und verdickten Pfahlwurzel ließ sich entgegen einer verbreiteten Annahme nicht feststellen. Das Spross : Wurzel-Verhältnis betrug zum Zeitpunkt des Vegetationsendes im Etablierungsjahr 2012 (Rosettenstadium) 0,75. Diese weist auf eine zügige und intensive Wurzelentwicklung im Etablierungsjahr hin. Die auf 120 cm Tiefe begrenzte Durchwurzelbarkeit der 310 L Großgefäße wurde von den Pflanzen bis zur Blüte 2013 voll erschlossen. Zu diesem Entwicklungsstadium lag die maximale Durchwurzelungsintensität vor. Die Hauptwurzelmasse konzentrierte sich auf den Oberboden bis

50 cm Tiefe. Das Spross : Wurzel-Verhältnis verschob sich im Laufe der Vegetationsperiode 2013 zugunsten der oberirdischen Biomasse (0,17 bei Wiederaustrieb; 1,52 zur Blüte), blieb jedoch vergleichsweise niedrig und bestätigt damit die *in situ* ermittelten, hohen Durchwurzelungsintensitäten bei verhältnismäßig geringer oberirdischer Biomasse. Bei der abschließenden Untersuchung der Durchwurzelung zum Wiederaustrieb 2014 zeigte sich, dass die Haupt- und Seitenwurzeln weiterführender Ordnungen, möglicherweise bedingt durch den milden Winter (vgl. Tabelle 7), tendenziell physiologisch aktiv überdauern, während die Feinwurzeln absterben. Dieser Befund wurde im Vitalitätstest mit Wurzelmaterial aus dem Freilandversuch (1.2.1.7) bestätigt.

1.2.3 Vergleich der Wurzelsysteme von Silphie und Mais auf Standorten mit unterschiedlichen Bodenarten

Ergänzend zu den Wurzeluntersuchungen im Rahmen des Feld- und Gefäßversuchs in Braunschweig wurden zusätzliche Wurzelproben mit einer Rammkernsonde an sechs hinsichtlich Boden und Klima stark unterschiedlichen Standorten in Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Thüringen entnommen (Abbildung 58 und 59).



Abbildung 58: Standorte an denen Rammkernsondierungen in Silphie und nahegelegendem Mais durchgeführt wurden.

Die Entwicklung des Wurzelsystems ist zwar für jede Pflanzenart genetisch vorgegeben, die phänotypische Ausprägung unterliegt jedoch zahlreichen Einflussfaktoren wie beispielsweise Bodenart, Bodendichte, Wassergehalt sowie bodenchemischen Eigenschaften. Das hier untersuchte bodensystematisch breite Spektrum (Tabelle 16) von sandigen, über stark lehmige, bis hin zu tiefgründigen Schluffböden mit günstigen Voraussetzungen für das Wurzelwachstum ermöglichte eine Absicherung und Ergänzung der Erkenntnisse welche aus dem Bewässerungsfeldversuch und Gefäßversuch in Braunschweig bezüglich des Durchwurzelungsverhaltens der Silphie gewonnen wurden.

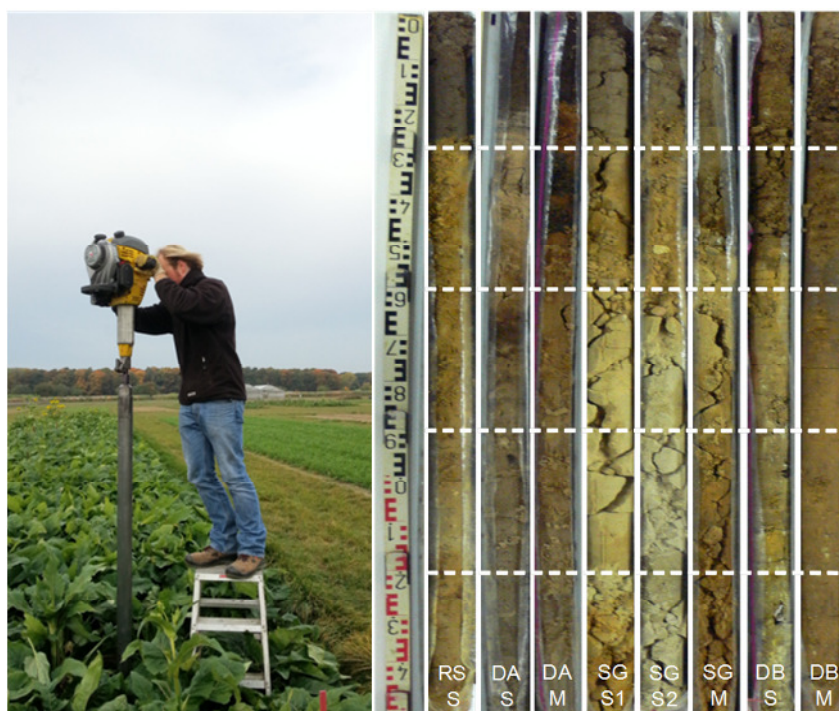


Abbildung 59: Links: Entnahme eines Bohrkerns mit der Rammkernsonde aus einer Silphieparzelle in Braunschweig 2012. Die Beprobung auf den externen Standorten erfolgte hingegen zum Zeitpunkt der Vollblüte. Rechts: Bohrkern aus Beständen mit Silphie (S) und Mais (M) von den Standorten Rockstedt (RS), Dasselsbruch (DA), Straguth (SG) und Dornburg (DB).

Tabelle 16: Geographische sowie bodensystematische Charakterisierung der sechs beprobten Standorte.

Standort	Kulturart	Geographische Lage; Höhe über Normalhöhennull	Bodenart [†]	Bodentyp
<u>2012</u>				
Rockstedt	Silphie	53,329° N, 9,196° O; 29 m	SI2	Vergleyte Braunerde
	Mais	53,329° N, 9,196° O; 29 m	SI2	aus Geschiebesand
Dasselsbruch	Silphie	52,560° N, 10,021° O; 41 m	fSms	Treposol aus Gley-
	Mais	52,564° N, 10,016° O; 41 m	fSms	Podsol (Tiefumbruch) aus Schmelzwassersand
Straguth	Silphie	52,028° N, 12,159° O; 81 m	Su2	Braunerde aus
	Mais	52,038° N, 12,183° O; 81 m	Su2	Geschiebedecksand über tiefem glazifluvialtem Sand
Dornburg	Silphie	51,003° N, 11,655° O; 270 m	Ut3	Parabraunerde aus
	Mais	51,001° N, 11,657° O; 270 m	Ut3	Lösslehm über tiefem Löss
<u>2013</u>				
Ronnenberg	Silphie	52,295° N, 9,609° O; 93 m	Uls	Pseudovergleyte
	Mais	52,295° N, 9,609° O; 93 m	Uls	Parabraunerde
Parmen	Silphie	53,323° N, 13,562° O; 65 m	Lts	Pseudogley
	Mais	53,323° N, 13,562° O; 65 m	Lts	

[†] SI2 = schwach toniger Sand; fSms = reiner Sand; Su2 = schwach toniger Sand; Ut3 = stark schluffiger Ton; Uls = reiner Schluff; Lts = stark lehmiger Sand.

Mit Hilfe einer Rammkernsonde wurden in Silphie- und benachbarten Maisbeständen bis 1,5 m Tiefe je drei Bohrkern innerhalb und zwischen den Pflanzenreihen gezogen. Die Silphie erreichte an allen Standorten eine Durchwurzelungstiefe von zumindest 150 cm, wohingegen der

Mais vergleichsweise geringere Bodentiefen erschloss (Abbildung 60). Die mit 270 cm maximale Wurzeltiefe von Silphie wurde auf dem tiefgründigen Lössstandort Ronnenberg gemessen. Die in Straguth gefundenen abweichenden Ergebnisse sind, aufgrund der stark unterschiedlichen Bodenwassergehalte zwischen den beprobten Silphie- und Maisbeständen, mit Vorsicht zu behandeln.

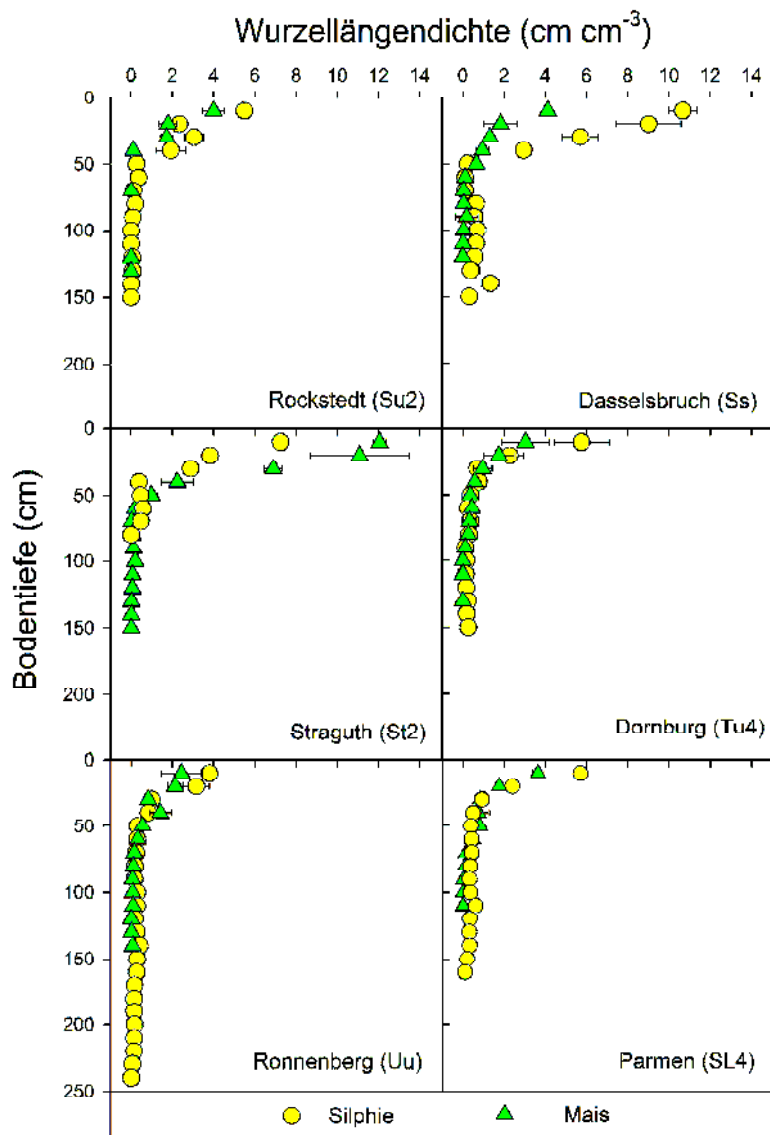


Abbildung 60: Vergleich der Wurzellängendichte von Silphie und Mais in Abhängigkeit von der Bodentiefe für die in den Jahren 2012 und 2013 beprobten sechs Standorte. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.

Ähnlich wie der Mais zeigte auch die Silphie eine exponentiell abnehmende RLD vom A_p -Horizont (0-30 cm) zum Unterboden hin. Bei der Silphie war im Vergleich zu Mais eine nicht signifikante, aber tendenziell intensivere Durchwurzelung der tieferen Bodenschichten festzustellen. So lagen bei der Silphie 27% der Gesamtwurzellänge außerhalb des A_p -Horizontes, beim Mais dagegen lediglich 17%. Der gegenüber Mais tiefgründiger erschlossene Boden ist jedoch durch eine geringere RLD gekennzeichnet. Nach Kage und Ehlers (1996) reicht bereits eine RLD von 0,5 cm cm⁻³ für eine mit höheren RLD-Werten vergleichbare zügige und vollständige Erschließung des vorhandenen Bodenwasservorrates bis zum permanenten Welkepunkt aus. Das tiefgründige Wurzelwachstum der Silphie könnte daher, trotz der niedrigen RLD in tieferen Bodenschichten, von Vorteil sein. Die Gesamtwurzellänge im Bodenprofil war bei der Silphie, mit

Ausnahme von Straguth, an allen Standorten deutlich höher als bei Mais (Abbildung 61). Beim Vergleich der Gesamtwurzellängen über die Standorte lagen bei der Silphie keine signifikanten Unterschiede vor, wenn man einmal vom stark humosen und grundwassernahen Sandboden in Dasselsbruch absieht.

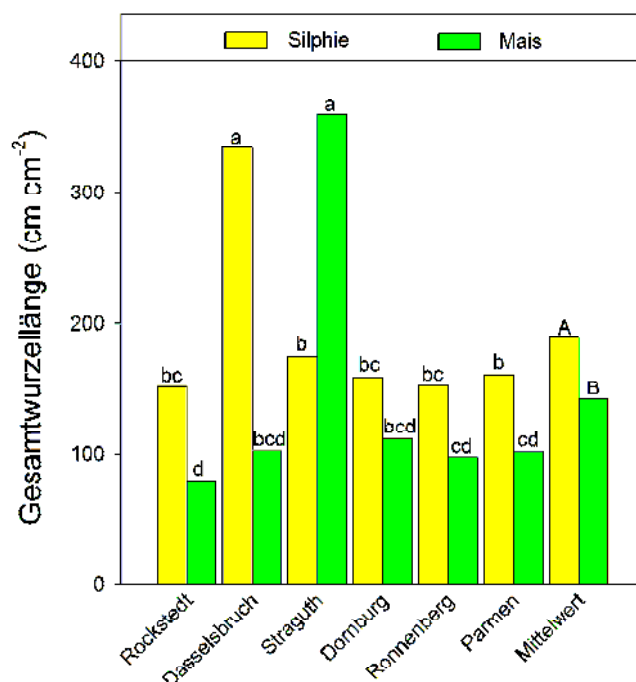


Abbildung 61: Vergleich der Gesamtwurzellänge von Silphie und Mais an sechs Standorten sowie im Mittel der Standorte. Dargestellt sind Mittelwerte von $n = 6$ Bohrkernen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante ($P < 0.05$) Unterschiede.

Neben der Wurzellänge sind weitere für die Wasseraufnahme entscheidende morphologische Eigenschaften des Wurzelsystems von Bedeutung, wie beispielsweise der Anteil der Feinwurzeln (Tabelle 17).

Tabelle 17: Prozentualer Anteil der Wurzellänge an drei Durchmesserklassen ± 1 Standardfehler über das gesamte Bodenprofil ($n = 90$) für Silphie und Mais an den 2012 und 2013 beprobten Standorten.

Standort	Kulturart	Anteil der Durchmesserklasse (%)		
		<0,5 mm	0,5-1 mm	>1 mm
Dasselsbruch	Silphie	84 $\pm$ 1 ^{abct†}	13 $\pm$ 1 ^{bode}	3 $\pm$ 0 ^{bc}
	Mais	86 $\pm$ 1 ^{ab}	12 $\pm$ 1 ^{cde}	2 $\pm$ 0 ^{bc}
Dornburg	Silphie	76 $\pm$ 3 ^{bcd}	17 $\pm$ 2 ^{abc}	7 $\pm$ 1 ^{ab}
	Mais	87 $\pm$ 2 ^a	10 $\pm$ 1 ^{de}	3 $\pm$ 1 ^{bc}
Parmen	Silphie	76 $\pm$ 5 ^{cd}	22 $\pm$ 4 ^a	2 $\pm$ 0 ^c
	Mais	87 $\pm$ 3 ^a	11 $\pm$ 2 ^{cde}	2 $\pm$ 1 ^c
Rockstedt	Silphie	73 $\pm$ 4 ^d	21 $\pm$ 2 ^{ab}	6 $\pm$ 1 ^a
	Mais	89 $\pm$ 0 ^a	10 $\pm$ 1 ^{de}	1 $\pm$ 0 ^c
Ronnenberg	Silphie	74 $\pm$ 3 ^d	24 $\pm$ 2 ^a	2 $\pm$ 1 ^{bc}
	Mais	85 $\pm$ 2 ^{ab}	13 $\pm$ 1 ^{bcd}	1 $\pm$ 1 ^c
Straguth	Silphie	76 $\pm$ 4 ^{bcd}	18 $\pm$ 2 ^{abcd}	6 $\pm$ 2 ^a
	Mais	93 $\pm$ 2 ^a	6 $\pm$ 2 ^e	1 $\pm$ 0 ^c

† Merkmalsmittelwerte mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben innerhalb eines Jahres unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$; t -Test).

Während auf dem stark humosen Feinsand in Dasselsbruch bei der Silphie eine intensive Feinwurzelbildung auf dem Niveau von Mais gefunden wurde, war an den anderen Standorten ein im Vergleich zu Mais signifikant niedrigerer Feinwurzelanteil zu verzeichnen. Die Betrachtung der spezifischen Wurzellänge (SRL) bestätigt diese unterschiedliche Strategie der Assimilatallokation der beiden Kulturen (Abbildung 62). Die SRL der Silphie war an allen Standorten deutlich niedriger als die von Mais. Zudem gibt die geringe SRL Hinweise auf einen relativ grobgliedrigen Wurzelapparat (Eissenstat 1992, Ostonen et al. 2007). Der gegenüber der Silphie sehr hohe Standardfehler der SRL für die Maiswurzeln deutet auf ein opportunistisches Wurzelwachstum hin, d.h. eine hohe Plastizität des Maises zugunsten einer temporären Nutzung lokaler Wasser- und Nährstoffreserven.

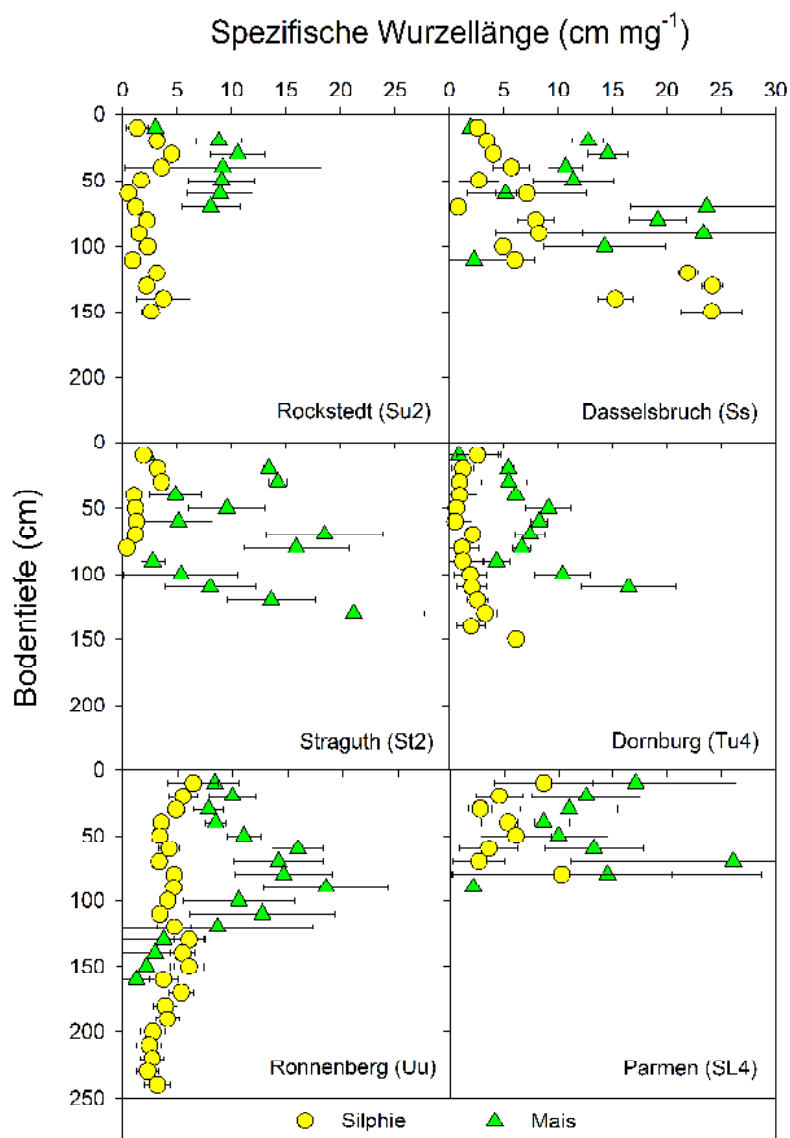


Abbildung 62: Vergleich der spezifischen Wurzellänge von Silphie und Mais in Abhängigkeit von der Bodentiefe an den in den Jahren 2012 und 2013 beprobten Standorten. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.

Die Silphie-Dauerkultur bildet auch in tieferen Bodenschichten mehr Wurzeltrockenmasse als Mais (Abbildung 63). Im Mittel aller Standorte produzierte die Silphie $8,4 \text{ t ha}^{-1}$ Wurzeltrockenmasse, der Mais dagegen nur $4,0 \text{ t ha}^{-1}$. Möglicherweise leistet die Silphie trotz der intensiven Abfuhr oberirdischer Biomasse bei der Ernte einen positiven Beitrag zur Humusbilanz

und Sequestrierung des atmosphärischen Kohlenstoffs. Aus dem Produkt der gebildeten Wurzelmassen und den entsprechenden Gesamtkohlenstoffgehalten (Silphie: 48,0%; Mais: 48,6%) ergibt sich rechnerisch ein C-Input von $4,4 \text{ t C ha}^{-1}$ für Silphie und $2,1 \text{ t C ha}^{-1}$ für Mais.

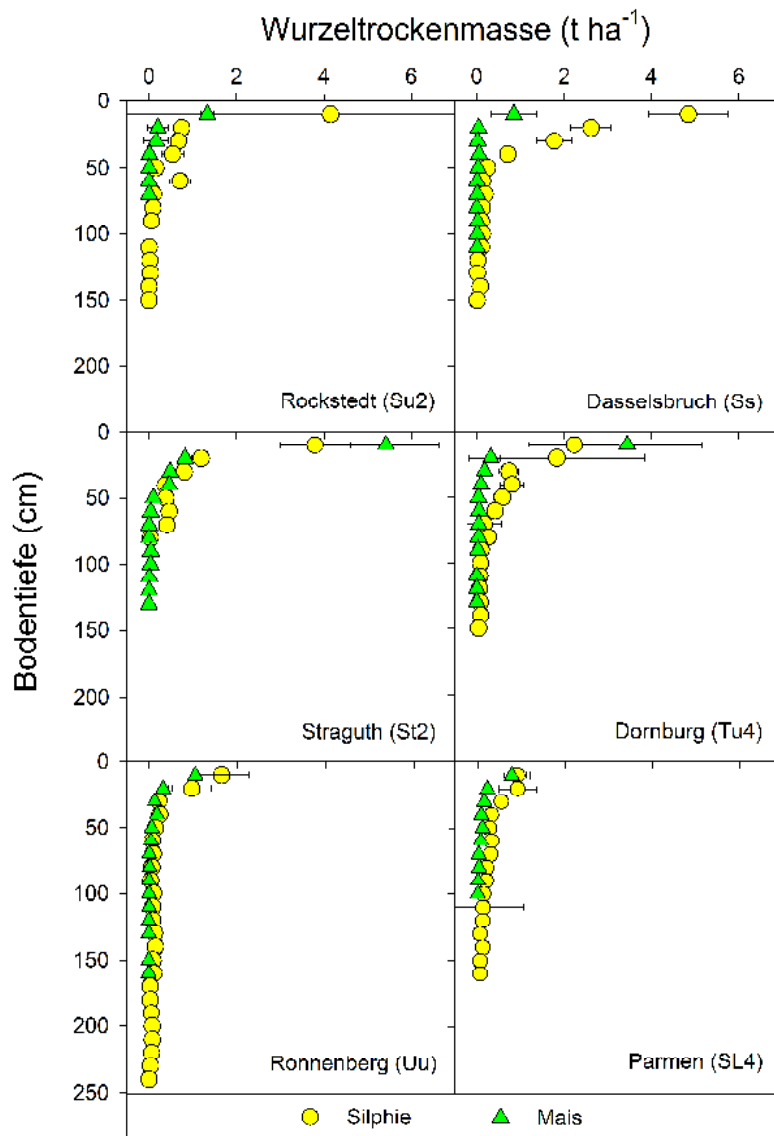


Abbildung 63: Vergleich der Wurzeltrockenmasse von Silphie und Mais in Abhängigkeit von der Bodentiefe an den sechs in den Jahren 2012 und 2013 beprobten Standorten. Dargestellt sind Mittelwerte ± 1 Standardfehler von $n = 6$ Bohrkernen.

Aufgrund ihres tief reichenden Wurzelsystems kann die Silphie auch Wasservorräte tieferer Bodenschichten erschließen. Die sich zum Teil widersprechenden Ergebnisse bezüglich Tiefenwachstum und RLD an den externen Standorten im Vergleich zu Braunschweig lässt die Schlussfolgerung zu, dass sich Bodenverdichtungen stark limitierend auf das Wurzelwachstum der Silphie auswirken. Die vergleichsweise dicken Wurzeln der Silphie lassen wegen Suberinisierung, Ausbildung einer Exodermis und der kleinen Wurzelhaarzone eine geringe Wasseraufnahme je Längeneinheit erwarten. Deshalb benötigt die Silphie zur Erzielung hoher Biomasseerträge Böden mit einer guten Wasserführung.

1.2.4 Zusammenfassung TV2

Die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.; kurz: Silphie) wird als ein alternatives bzw. ergänzendes Biogassubstrat für Mais diskutiert. Neben ökologischen Vorteilen wird bei der Silphie auch eine gewisse Trockentoleranz vermutet. Das Ziel dieses Teilprojektes war die Bestimmung wichtiger ertrags- und ökophysiologischer Kenngrößen der Silphie. Dazu wurden am Julius Kühn-Institut in Braunschweig in den Jahren 2012, 2013 und 2014 in einem Feldversuch mit zwei Wasserregimen (ohne und mit Zusatzbewässerung) drei Feldfrüchte bzw. Anbausysteme (Silphie-Dauerkultur, Mais-Selbstfolge und mehrjähriges Luzernegras) in Form einer zweifaktoriellen Spaltanlage mit vier Wiederholungen in Großparzellen (240 m²) vergleichend untersucht. Die Verwendung der C4-Pflanze Mais als Referenzfrucht erfolgte aufgrund ihres hohen Ertragspotentials und der guten Wassernutzungseffizienz. Das tief und stark verzweigt wurzelnde Luzernegras fungierte hingegen als Bezugssystem zur Beurteilung der Wasseraufnahmeeffizienz der Silphie. Während der Vegetation und nach der Ernte wurden mehrere phänologische, agronomische, physiologische, morphologische (Wurzel und Spross) und chemische Eigenschaften untersucht.

Während das Wasserregime keinen signifikanten Einfluss auf die Methanausbeute von Mais und Luzernegras hatte, war der spezifische Methanertrag von Silphie beim Anbau mit ausschließlich Niederschlagswasser [296 NL (kg oTS)⁻¹] gegenüber einer Zusatzberechnung [315 NL (kg oTS)⁻¹] um 6% reduziert. Wesentlich stärker als die trockenheitsbedingte Qualitätsminderung des Biogassubstrats fiel mit -33% die Einbuße im Trockenmasseertrag der Silphie aus. Deutlich geringer waren dagegen die entsprechenden Ertragseinbußen bei Mais (-18%) und Luzernegras (-14%). Im Mittel der Wasserregime und Versuchsjahre lag der Methanertrag von Silphie (4.155 Nm³ ha⁻¹) um 38% unter dem von Mais (7.153 Nm³ ha⁻¹) und 6% unter dem von Luzernegras (4.432 Nm³ ha⁻¹).

Die Wassernutzungseffizienz (WUE) der Silphie lag im Mittel der Versuchsjahre und Wasserregime mit 33 kg ha⁻¹ mm⁻¹ nur unwesentlich über der des bekanntermaßen stark wasserbedürftigen Luzernegras (31 kg ha⁻¹ mm⁻¹), aber deutlich unter der von Mais (50 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Der mittlere Evapotranspirationskoeffizient der Silphie war deutlich höher als der von Mais (315 vs. 204 L kg⁻¹). Im Vergleich zur Silphie bildete der Mais pro mm verbrauchten Wassers 54% mehr Trockenmasse. Hinsichtlich der um die Evaporation bereinigten Transpirationsnutzungseffizienz (TUE) war der Mais der Silphie sogar noch deutlicher überlegen (109 vs. 47 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Die Ergebnisse der stomatären Leitfähigkeitsmessungen bestätigten den im Vergleich zu Mais hohen Wasserbedarf der Silphie. Ohne Zusatzbewässerung lag die Transpiration der Silphie aufgrund erschöpften Bodenwassers fast permanent unter ihrem Potential.

Durch die rasche Blattflächenentwicklung ab Vegetationsbeginn erreicht die Silphie frühzeitig eine optimale Aufnahme der photosynthetisch aktiven Strahlung mit entsprechend geringen Evaporationsverlusten bei einem Blattflächenindex von LAI = 4. Der ungebremsste Blattflächenzuwachs im weiteren Verlauf der Vegetation führte jedoch zu einem extrem hohen LAI von 10. Da ein Großteil der unteren Blätter aufgrund von Lichtmangel vorzeitig abstarb, sanken die Werte bis zum Zeitpunkt der Ernte wieder auf einen LAI <4. Mit einem Anteil von bestenfalls 2,5% am Gesamtwasserverbrauch der Silphie, stellt das in den „Blattbechern“ aufgefangene Wasser (Tau-, Niederschlags- und Beregnungswasser), selbst unter der Annahme einer nennenswerten Wasseraufnahme über das Blatt, keine für die Ertragsbildung relevante Größe dar.

Angesichts ihres hohen Wasserbedarfs müsste die Silphie über ein außergewöhnlich leistungsfähiges Wurzelsystem verfügen, um lange Trockenphasen ohne stärkere Ertragseinbußen überstehen zu können. Zur Beantwortung der Frage nach der Tiefe und Intensität der Durchwurzelung wurden im Bewässerungsfeldversuch in Braunschweig sowie an

sechs weiteren, hinsichtlich Klima und Boden unterschiedlichen, Standorten im Norden und Osten Deutschlands Rammkernsondierungen in Silphie (Anlagejahre 2005 bis 2012) und nahegelegenen Maisbeständen bis zur maximalen Durchwurzelungstiefe durchgeführt. Während in Braunschweig kein Unterschied im Wurzeltiefgang gegenüber Mais gefunden wurde, wurzelte die Silphie an den externen Standorten überwiegend tiefer als der Mais. An allen Standorten war die Wurzellänge der Silphie insbesondere in tieferen Bodenschichten allerdings zu gering, um die Bodenwasserreserven vollständig ausschöpfen zu können. Deshalb wird der effektiv nutzbare Wurzelraum der Silphie durch das tiefere Wurzelwachstum auch nur geringfügig erweitert. Dagegen erreichte das Luzernegras im Bewässerungsfeldversuch in Braunschweig eine deutlich höhere Wurzellängendichte als die Silphie, so dass tiefe Bodenwasservorräte während Trockenphasen auch tatsächlich genutzt werden konnten. Während bei der Silphie unter Trockenheit keine Adaptation des Wurzelwachstums an den Wassermangel festzustellen war, bildeten Mais und Luzernegras gegenüber der bewässerten Kontrolle deutlich längere Wurzeln aus. Den vorliegenden Ergebnissen zufolge verfügt die Silphie über keine nennenswerte Trockentoleranz. Ein mit Silomais vergleichbares Ertragsniveau erreicht die Silphie trotz tieferreichender Durchwurzelung aufgrund ihres hohen Wasserbedarfs nur an Standorten mit guter Wasserversorgung, sei es über hohen natürlichen Niederschlag, großen Bodenwasserspeicher, Zusatzbewässerung oder Grundwasseranschluss.

Mit der Dauerkultur von Silphie ist durch den Wegfall der Bodenbearbeitung und die permanente Zufuhr größerer Mengen an organischer Substanz eine starke C-Sequestrierung zu erwarten. So fallen schätzungsweise $1\text{--}2\text{ t TM ha}^{-1}$ in Form von abgestorbenen Blättern an die bei der Ernte nicht erfasst werden. Der mit einer Zwischenfrucht vergleichbare Wiederaustrieb nach der Ernte (Ende August bis Anfang September) ist mit ca. 1 t TM ha^{-1} zu veranschlagen. Noch größer ist die C-Zufuhr über die Wurzelbiomasse. Im Mittel von sechs Standorten wurden $8,4\text{ t TM ha}^{-1}$ (zum Vergleich: Mais $4,0\text{ t TM ha}^{-1}$) gemessen, von denen, basierend auf den zum Vegetationsbeginn 2015 durchgeführten Lebensfähigkeitstests, jährlich 60% ($4\text{--}5\text{ t TM ha}^{-1}$) neu gebildet werden. Die Zufuhr von insgesamt $6\text{--}8\text{ t TM pro Hektar und Jahr}$ in Form von Pflanzenrückständen aus Silphie-Dauerkulturen trägt in hohem Maße zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit bei und dient zugleich durch temporäre Stickstoffspeicherung im Wiederaustrieb dem Boden- und Grundwasserschutz.

1.3 Literatur

- Alm J, Ohnmeiss TE, Lanza J, Vriesenga L (1990) Preference of cabbage white butterflies and honey bees for nectar that contains amino acids. *Oecologia* 84, 53–57.
- Amiet F, Krebs A (2012) Bienen Mitteleuropas - Gattungen, Lebensweise, Beobachtung, 1. Aufl. Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien.
- Aurbacher J, Benke M, Formowitz B, Glauert T, Heiermann M, Hermann C, Idler C, Kornatz P, Nehring A, Riekman C, Riekman G, Reus D, Vetter A, Vollrath B, Wilken F, Willms M (2012) Energiepflanzen für Biogasanlagen (Broschüre 553). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Rostock.
- Baermann G (1917) eine einfache Methode zur Auffindung von Anklystomum (Nematoden) larven in Erdproben. *Geneeskunde Tijdschrift vor Nederlandsch-Indie* 57, 131–137.
- Baserga U (1998) Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen. Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras. *FAT-Berichte* Nr. 512, 1–11.
- Bengough A, McKenzie B, Hallett P, Valentine T (2011) Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany* 62, 59–68.
- Berger C (2015) Ökologische Bewertung der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum*) unter unterschiedlichen Wasserregimen. Unveröffentlichte Masterarbeit im Fachbereich 1 – Life Sciences and Engineering der FH Bingen, 50 S.
- Biertümpfel A, Conrad M (2012) Gefundenes Fressen. Die Durchwachsene Silphie Trachtpflanze der Zukunft? *ADIZ/db/IF* 08/2012, 14–15.

- Biertümpfel A, Conrad M (2013) Optimierung des Anbauverfahrens und Bereitstellung von Selektionsmaterial. Abschlussbericht der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zum Forschungsprojekt FKZ 22012809 gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Bigler F, Waldburger M, Frei G (1995) Important insects and spiders as natural enemies in maize / Wichtige Insekten und Spinnen als Nützlinge im Mais. *Agrarforschung* 2, 383-386.
- Bouché MB (1977) Strategies Lombriciennes. In: *Soil Organisms as Components of Ecosystems* (Ed. Lohm M, Persson T). *Ecological Bulletin*, Stockholm. 122-132.
- Brauckmann HJ, Krell K, Broll G, Ruhe K (2013) Energy on Farm – Optimierte Energiepflanzen-Anbausysteme zur nachhaltigen Biogaserzeugung. 4. Symposium für Energiepflanzen. Berlin 22-23.10.2013. Online verfügbar unter http://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Energiepflanzenkongress_2013/Brauckmann_23.10.13_01.pdf (zuletzt geprüft am 21.10.2015).
- Braun-Blanquet J (1964): *Pflanzensoziologie*. 3. Aufl. Wien.
- Brodtschneider R, Crailsheim K (2010) Nutrition and health in honey bees. *Apidologie* 41, 278–294.
- Carroll AB, Pallardy SG, Galen C (2001) Drought stress, plant water status, and floral trait expression in fireweed, *Epilobium angustifolium* (Onagraceae). *American Journal of Botany* 88, 438-446.
- Cobb NA (1918) Estimating the nematode population of the soil. *USDA* 1, 1-48.
- Conrad M, Biertümpfel A (2010) Optimierung des Anbauverfahrens für Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*) als Kofermentpflanze in Biogasanlagen sowie Überführung in die landwirtschaftliche Praxis. Abschlussbericht der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zum Forschungsprojekt FKZ 22004307 gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Dandikas V, Heuwinkel H, Lichti F, Drewes JE, Koch K (2014) Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technology* 174, 316-320.
- Danner N, Härtel S, Steffan-Dewenter I (2014) Maize pollen foraging by honey bees in relation to crop area and landscape context. *Basic and Applied Ecology* 15, 677–684.
- Decourtye A, Mader E, Desneux N (2010) Landscape enhancement of floral resources for honey bees in agro-ecosystems. *Apidologie* 41, 264–277.
- Deim F, Mayr J, Liebhard P (2014) *Silphium perfoliatum* L. – Eine Alternative in der Produktion nachwachsender Rohstoffe in Österreich. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.* 26, 114-115.
- Di Pasquale G, Salignon M, Le Conte Y, Belzunces LP, Decourtye A, Kretzschmar A, Suchail S, Brunet J-L, Alaux C (2013) Influence of pollen nutrition on honey bee health: Do pollen quality and diversity matter? *PLoS ONE* 8, e72016.
- DIN ISO 23611-1 (2006) Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 1: Handauslese und Formalinextraktion von Regenwürmern.
- DIN ISO 23611-2 (2006) Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 2: Probenahme und Extraktion von Mikroarthropoden (Collembolen und Milben).
- DIN ISO 23611-4 (2007) Bodenbeschaffenheit – Probenahme von Wirbellosen im Boden – Teil 4: Probenahme, Extraktion und Bestimmung von bodenbewohnenden Nematoden.
- DMK (2013) Ein Drittel der Maisanbaufläche für Biogas. Deutsches Maiskomitee e.V. News 11/2013.
- Doran JW, Zeiss MR (2000) Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15, 3-11.
- Edwards WM, Shipitalo MJ (1998) Consequences of Earthworms in Agricultural Soils: Aggregation and Porosity. In: *Earthworm Ecology* (Ed. Edwards CA). CRC Press LLC.
- Ehlers W (1997) Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. *Pflanzenbauwissenschaften* 1, 97-108.
- Ehrnsberger R (1993) *Bodenzoologie und Agrarökosysteme*. Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege 6, 11-41.
- Eissenstat DM (1992) Costs and benefits of constructing roots of small diameter. *Journal of Plant Nutrition* 15, 763-782.
- Evelt SR, Tolk JA, Howell TA (2006) Soil Profile Water Content Determination: Sensor Accuracy, Axial Response, Calibration, Temperature Dependence, and Precision. *Vadose Zone Journal* 5, 894-907.

- FAO (1997) FAO/UNESCO Soil Map of the World. Revised legend, with corrections and updates. World Soil Resources Report 60, FAO, Rome. Reprinted with updates as Technical Paper 20, ISRIC, Wageningen, Niederlande.
- Ferchaud F, Vitte G, Bornet F, Strullu L, Mary B (2015) Soil water uptake and root distribution of different perennial and annual bioenergy crops. *Plant and Soil* 388, 307-322.
- Ferris H, Venette RC, Scow KM (2004) Soil management to enhance bacterivore and fungivore nematode populations and their nitrogen mineralization function. *Applied Soil Ecology* 24, 19-35.
- Ferris H, Venette RC, van der Meulen HR, Laus SS (1998) Nitrogen mineralization by bacterial-feeding nematodes: verification and measurement. *Plant and Soil* 203, 159-171.
- Franzaring J, Schmid I, Bäuerle L, Gensheimer G, Fangmeier A (2014) Investigations on plant functional traits, epidermal structures and the ecophysiology of the novel bioenergy species *Sida hermaphrodita* Rusby and *Silphium perfoliatum* L.. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 87, 36-45.
- Freckman DW (1982) *Nematodes in Soil Ecosystems*. University of Texas Press.
- Friebe B (1993) Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodentiere und ihre Abbauleistungen. *Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege* 6, 171-187.
- Fründ HC (2010) Verfahrensvorschlag bodenbiologische Standortindikation. *Berichte der DBG* (online Publikation: <http://www.dbges.de>)
- Galetto L, Bernardello G (2005) 5.3 Nectar. In: *Practical Pollination Biology*, Dafni A, Kevan PG, Husband BC (eds.), Enviroquest, Cambridge, Ontario, Canada, 261-313.
- Gansberger M, Montgomery LFR, 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* 63, 362-372.
- Geesing D, Bachmaier M, Schmidhalter U (2004) Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. *Australian Journal of Soil Research* 42, 289-299.
- Ginsberg H S (1983) Foraging ecology of bees in an old field. *Ecology* 64, 165-175.
- Gisin H, (1960) *Collembolenfauna Europas*. Muséum d'Histoire Naturelle, Geneva, 312 pp.
- Glemnitz M, Willms M, Platen R, Peter C, Prescher A-K, Buttlar C v (2014) Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus: Zwischenbericht zu Teilprojekt II des FNR-Projektes EVA III; FKZ 220-061-12, Stand 30.04.2015. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg.
- Grebe S, Beletu T, Döhler H, Eckel H, Frisch J, Fröba N, Funk M, Grube J, Hartmann S, Horlacher D, Horn C, Klopfer F, Lorbacher FR, Sauer N, Schroers JO, Wirth B, Witzel E (2012) *Energiepflanzen: Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus*, 2nd ed. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- Haag NL, Nägele HJ, Reiss K, Biertümpfel A, Oechsner H (2015) Methane formation potential of cup plant (*Silphium perfoliatum*). *Biomass and Bioenergy* 75, 126-133.
- Haaland C, Naisbit RE, Bersier L-F (2010) Sown wildflower strips for insect conservation: a review. *Insect Conservation and Diversity* 4: 60-80.
- Hakl J, Fuksa P, Habart J, Šantrůček J (2012) The biogas production from lucerne biomass in relation to term of harvest. *Plant Soil and Environment* 58, 289-294.
- Hengelhaupt F, Gödeke K (2011) *Tätigkeitsbericht 2011 Arbeitsgruppe Biogas*. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Himmelbauer ML, Loiskandel W, Kastanek F (2004) Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different image analyses systems. *Plant and Soil* 260, 111-120.
- Hopkin SP (1997) Chapter 7 Interactions between Collembola and the biotic environment. In: *Biology of Springtails* (Ed. Hopkin SP). Oxford University Press, Oxford.
- Ingham RE, Trofymow JA, Ingham ER, Coleman DC (1985) Interactions of bacteria, fungi and their nematode grazers on nutrient cycling and plant growth. *Ecological monographs* 55, 119-140.
- Kage H, Ehlers W (1996) Does transport of water to roots limit water uptake of field crops? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 159, 583-590.
- Klein A-M, Vaissiere BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 274, 303-313.
- Klinkhamer PGL, van der Lugt PP (2004) Pollinator service only depends on nectar production rates in sparse populations. *Oecologia* 140, 491-494.

- Kutschera L, Lichtenegger E, Sobotik M (2009) Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. DLG-Verlag Frankfurt.
- Leiss KA, Klinkhamer PGL (2005) Spatial distribution of nectar production in a natural *Echium vulgare* population: implications for pollinator behaviour. *Basic and Applied Ecology* 6, 317-324.
- Lubbers IM, van Groenigen KJ, Fonte SJ, Six J, Brussaard L, van Groenigen JW (2013) Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms *Nature Climate Change* 3, 187-194.
- Lynch J (2012) Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany* 112, 347-357.
- Maag M, Vinther FP (1996) Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures. *Applied Soil Ecology* 4, 5-14.
- MacFadyen A (1961) Improved funnel-type extractors for soil arthropods. *Journal of Animal Ecology* 30, 171-184.
- Madonni G, Otegui M (1996) Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research* 48, 81-87.
- Meyer S, Wesche K, Krause B, Brütting C, Hensen I, Leuschner C (2014): Diversitätsverluste und floristischer Wandel im Ackerland seit 1950. *Natur und Landschaft* 89, 392-398.
- Moore JC (1994) Impact of agricultural practices on soil food web structure: Theory and application. *Agriculture Ecosystems & Environment* 51, 239 – 247.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS): Plants Database, Conservation Plant Characteristics, *Silphium perfoliatum* L. cup plant SIPE2, <http://plants.usda.gov/java/charProfile?symbol=SIPE2>, 14.01.2015.
- Neumerkel W (1980) Botanik, Anbau und Futterwert der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). Dissertation Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Neumerkel W, Martin B (1982) *Silphium* (*Silphium perfoliatum* L.) – a new feed plant. *Archives of Agronomy and Soil Science* 26, 261-271.
- Nielsen A, Dauber J, Kunin WE, Lamborn E, Jauker B, Moora M, Potts SG, Reitan T, Roberts S, Söber V, Settele J, Steffan-Dewenter I, Stout JC, Tscheulin T, Vaitisa M, Vivarelli D, Biesmeijer JC, Petanidou T (2012) Pollinator community responses to the spatial population structure of wild plants: A pan-European approach. *Basic and Applied Ecology* 13, 489-499.
- Ostonen I, Püttsepp Ü, Biel C, Alberton O, Bakker MR, Lohmus K, Majdii H, Metcalfe D, Olsthoorn AFM, Pronk A, Vanguelva E, Weih M, Brunner I (2007) Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems* 141, 426-442.
- Pan G, Ouyang Z, Luo Q, Yu Q, Wang J (2011) Water use patterns of forage cultivars in the North China Plain. *International Journal of Plant Production* 5, 181-194.
- Paraskevas C, Georgiou P, Ilias A, Panoras A, Babajimopoulos (2012) Calibration equations for two capacitance water content probes. *International Agrophysics* 26, 285-293.
- Passioura J (1983) Roots and Drought Resistance. *Agricultural Water Management* 7, 265-280.
- Pauli N, Oberthür T, Barrios E, Conacher AJ (2010) Fine-scale spatial and temporal variation in earthworm surface casting activity in agroforestry fields, western Honduras. *Pedobiologia* 53, 127-139.
- Pfützner C, Höppner F, Greef JM (2010) Bewertung des Gasbildungspotentials von nachwachsenden Rohstoffen (Nawaros) mit der Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS). *Journal für Kulturpflanzen* 62, 451-460.
- Pichard G (2012) Management, production, and nutritional characteristics of cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) in temperate climates of southern Chile. *Ciencia e investigación agraria* 39, 61-77.
- Pitkanen J, Nuutinen V (1998) Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. *Applied Soil Ecology* 9, 411-415.
- Schittenhelm S (2008) Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy* 29, 72-79.
- Schmalenbach I, Zhang L, Reymond M, Jimenez-Gomez JM (2014) The relationship between flowering time and growth responses to drought in the *Arabidopsis Landsberg erecta* x Antwerp-1 population. *Frontiers in Plant Science* 5, 609.
- Schmitz H (2012) Untersuchungen zur Ackerbegleitflora von *Silphium perfoliatum* L. in Niedersachsen. Unveröffentlichte Bachelorarbeit am Institut für Geoökologie, Abteilung Umweltsystemanalyse der TU Braunschweig, 33 S.

- Sharp R, Davies W (1985) Root growth and water uptake by maize roots in drying soil. *Journal of Experimental Botany* 36, 1441-1456.
- Smit AL, Bengough AG, Engels C, Noordwijk M van, Pellerin S, Geijn SC van de (2000) *Root Methods: a Handbook*. Springer.
- Smucker AJM, McBurney SL, Srivastava AK (1982) Quantitative Separation of Roots from Compacted Soil Profiles by the Hydropneumatic Elutriation System. *Agronomy Journal* 74, 500-503.
- Speight MCD, Castella E, Sarthou JP (2013) StN 2013. In: Speight MCD, Castella E, Sarthou JP, Vanappelghem C (Eds.), *Syrph the Net on CD*, Issue 9. The database of European Syrphidae. Syrph the Net Publications, Dublin.
- Ssymank A, Gilbert F (1993) Anemophilous pollen in the diet of Syrphid flies with special reference to the leaf feeding strategy occurring in Xylotini (Diptera, Syrphidae). *Deutsche Entomologische Zeitschrift* 40(2), 245-258.
- Ssymank A (2001) Vegetation und blütenbesuchende Insekten in der Kulturlandschaft. - Pflanzengesellschaften, Blühphänologie, Biotopbindung und Raumnutzung von Schwebfliegen (Diptera, Syrphidae) im Drachenfelser Ländchen sowie Methodenoptimierung und Landschaftsbewertung. BfN, Bonn Bad-Godesberg.
- Stanford G (1990) *Silphium perfoliatum* (cup plant) as a new forage species. *Proceedings of the 12th North American Prairie Conference*, 33-38.
- Stockmann F, Fritz M (2013) Einfluss von Standort und Herkunft auf das Ertragspotential der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) unter bayerischen Anbaubedingungen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.* 25, 146-147.
- Stolzenburg K, Monkos A (2012) Erste Versuchsergebnisse mit der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) in Baden-Württemberg. *Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe*.
- Stürte I, Henriksen T, Breland T (2005) Distinguishing between metabolically active and inactive roots by combined staining with 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride and image colour analysis. *Plant and Soil* 271, 75-82.
- Sudgen EA, Thorp RW, Buchmann S. (1996) Honey bee - native bee competition: focal point for environmental change and apicultural response in Australia. *Bee World* 77, 26-44.
- Teixeira E, Moot D, Brown H, Pollock K (2007) How does defoliation management impact on yield, canopy forming processes and light interception of Lucerne (*Medicago sativa* L.) crops? *European Journal of Agronomy* 27, 154-164.
- Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL; 2013) *Anbautelegramm Durchwachsene Silphie (Silphium perfoliatum L.)*, Jena 03/2013.
- Trett MW, Urbano BC, Forster SJ, Trett SP (2009) Commercial Aspects of the Use of Nematodes as Bioindicators. In: *Nematodes as Environmental Indicators* (Eds. Wilson MJ, Kakouli-Duarte T). CAB International, Oxfordshire.
- Tscharntke T, Tylianakis JM, Rand TA, Didham RK, Fahrig L, Batáry P, Bengtsson J, Clough Y, Crist TO, Dormann CF, Ewers RM, Fründ J, Holt RD, Holzschuh A, Klein A-M, Kleijn D, Kremen C, Landis DA, Lurance W, Lindenmayer D, Scherber C, Sodhi N, Steffan-Dewenter I, Thies C, van der Putten WH, Westphal C (2012) Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. *Biological Reviews* 87, 661-685.
- Van Capelle C, 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* 50, 165 – 181.
- Vollrath B, Kuhn W (2010) Wildpflanzen für Biogas – Die Zukunft? *Veitshöchheimer Berichte* 141, 33-39.
- von der Ohe W (2004) Pollen – ein wichtiger Bestandteil der Bienenernährung. *LAVES - Institut für Bienenkunde, Celle*.
- von Hagen E, Aichhorn A (2014) *Hummeln - bestimmen, ansiedeln, vermehren, schützen*, 6. neu bearb. Aufl. *Fauna Verlag, Nottuln*.
- Weiland P (2010) Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiological Biotechnology* 85, 849-860.
- Wienforth B (2011) Cropping systems for biomethane production: a simulation based analysis of yield, yield potential and resource use efficiency. *Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Christian-Albrechts-Universität zu Kiel* 77.

- Wilken F, Benke M (2013) Durchwachsene Silphie in Niedersachsen. Online verfügbar unter <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/2/nav/74/article/21404.html> (zuletzt geprüft am 19.10.2015).
- WRB (2006) IUSS Working Group - World Reference Base for Soil Resources 2006. In: World Soil Resources Report No. 103. FAO, Rome.
- Yeates GW, Bongers T, De Goede RGM, Freckman DW, Georgieva SS (1993) Feeding Habits of Soil Nematode Families and Genera. *Journal of Nematology* 25, 315-331.
- Yeates GW, Ferris H, Moens T, Van der Putten WH (2009) The Role of Nematodes in Ecosystems. In: *Nematodes as Environmental Indicators* (Eds. Wilson MJ, Kakouli-Duarte T). CAB International, Oxfordshire.
- Zaborski ER (2003) Allyl isothiocyanate: an alternative chemical expellant for samling earthworms. *Applied Soil Ecology* 22, 87-95.
- Zia S, Romano G, Spreer W, Sanchez C, Cairns J, Araus L, Müller J (2013) Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress tolerant maize genotypes of different phenology. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199, 75-84.

2. Verwertung

Eines der Ziele des Teilvorhabens 1 war es zu prüfen ob und unter welchen Bedingungen der Anbau der Durchwachsene Silphie als Bioenergiepflanze in der Lage ist, die Biodiversität sowie regulierende Ökosystemdienstleistungen, insbesondere in intensiven, von Mais dominierten Biogasregionen, zu fördern oder zu erhalten. Die Erkenntnisse zur oberirdischen Biodiversität im Teilvorhaben 1 weisen darauf hin, dass Honigbienen und verschiedene Hummelarten die Silphie als Trachtquelle sehr gut annehmen. Insbesondere die Nutzung des Silphiepollens durch die Honigbiene könnte einen wichtigen Beitrag für die Winterfestigkeit der Bienenvölker leisten. Die einzelnen Röhrenblüten der Blütenstände der Silphie produzieren zwar relativ geringe Mengen an Nektar und Pollen und die Menge je Blütenstand nimmt mit zunehmender Verzweigung der Triebe ab, durch die hohe Anzahl an ausgebildeten Blütenständen ist das Trachtangebot aber doch recht üppig. Außerdem wurden auch einige für Honigbienen essentielle Aminosäuren in Nektar und Pollen nachgewiesen, sodass die Silphie auch zur Bienengesundheit einen Beitrag leisten könnte. Der Anbau der Durchwachsenen Silphie hat das Potential, die Bestäubergemeinschaften in der Agrarlandschaft positiv zu beeinflussen. Es wurde aber auch deutlich, dass der Anbau der Durchwachsenen Silphie allein nicht ausreichen würde, um dieses Potential voll auszuschöpfen, da sich die positiven Effekte eines Anbaus der Durchwachsenen Silphie nur in Zusammenhang mit einem größeren Landnutzungskonzept voll entfalten kann. Dies gilt sowohl für die Einbettung extensiver Strukturen in die landwirtschaftliche Nutzung, als auch eine weitreichende Diversifizierung des Energiepflanzenanbaus durch die Kombination verschiedener Kulturpflanzen, da jede dieser Kulturen bestimmte Insektengruppen fördern kann. Unter diesen Voraussetzungen empfehlen wir den Anbau der Durchwachsenen Silphie, am besten in Kombination mit anderen blühenden Nahrungs- oder Biogaskulturen (z.B. Wildpflanzenmischungen) und möchten betonen, dass schon die Integration kleinerer Schläge oder ein streifenförmiger Anbau zur Auflockerung größerer Maisschläge einen ersten positiven Effekt erzielen könnte.

Die Erkenntnisse zur unterirdischen Biodiversität im Teilvorhaben 1 weisen den mehrjährigen Anbau der Durchwachsenen Silphie als wichtigen Beitrag zur Förderung der biologischen Vielfalt in landwirtschaftlich genutzten Böden aus. Neben der strukturellen Vielfalt steigt insbesondere auch die funktionelle Vielfalt bei allen untersuchten Bodentiergruppen: Bodenmakrofauna (hier: Regenwürmer), Bodenmesofauna (hier: Collembolen), Bodenmikrofauna (hier: Nematoden). Hieraus lässt sich hinsichtlich des Pflanzenwachstums auf eine Verbesserung der ökosystemaren Dienstleistungen durch die Organismengemeinschaften im Boden schließen, wie auch der Gewächshausversuch zeigt. Im Vergleich zu einjährigen Energiepflanzen wie Mais lässt sich aus den Ergebnissen zur unterirdischen Biodiversität und begleitend erhobenen abiotischen Bodenparametern auf einen wertvollen Beitrag des Silphie-Anbaus zum Bodenschutz und

Umweltschutz in der Agrarlandschaft schließen. Die Entwicklung des Porenraums in alternden Silphie-Beständen durch die nachgewiesene höhere Aktivität der Regenwürmer ist eine noch offene wichtige Forschungsfrage hinsichtlich des Gas- und Wasserhaushalts bei verschiedenen Böden. Weiterhin ist die Bedeutung der Interaktionen zwischen den untersuchten Bodentier-Gemeinschaften untereinander und mit oberirdischen Gemeinschaften hinsichtlich ihres gemeinsamen Beitrags zum Wachstum der Silphie ungeklärt.

Im Teilvorhaben 2 wurden wichtige Erkenntnisse gewonnenen zur Einschätzung des pflanzenbaulichen Potentials der Silphie als alternativer Energiepflanze unter verschiedenen Standortbedingungen. Für die Praxis ergeben sich daraus wichtige Informationen für die Wahl geeigneter Anbaustandorte sowie der unter den gegebenen Bedingungen zu erwartenden Erträge. Entgegen einer verbreiteten Meinung ist die Silphie nicht trockentolerant. Sie erreicht oder übertrifft den Trockenmasseertrag von Mais nur auf Standorten mit guter Wasserversorgung. Auch das Nahrungsangebot für Honigbienen und andere blütenbesuchende Insekten hängt von der Wasserversorgung ab. Zudem hängen die Biomasseerträge der Silphie stark von der Wuchshöhe ab. Deshalb geht eine hohe Ertragsleistung mit einem hohen Lagerrisiko einher. Unter hohen Bestandesdichten bilden die Pflanzen, vermutlich aufgrund von Lichtkonkurrenz, nur vergleichsweise dünne und instabile Stängel. Bei dem zum Ende des Versuchs drei Jahre alten Silphiebestand in Braunschweig waren es bereits 382.000 Stängel pro Hektar. Durch den frühzeitigen Biomassezuwachs kann die Silphie auf Flächen die stark zur Frühsommertrockenheit neigen und somit keine sichere Grundlage für den Maisanbau gewährleisten, wegen der Ausnutzung der Winterbodenfeuchte stabilere Erträge erbringen. Die Untersuchungen zum Wurzelwachstum zeigen aber, dass die Silphie empfindlich auf Bodenverdichtungen reagiert und unter entsprechenden Standortgegebenheiten nicht das volle Wasseraufnahmepotential entfalten kann. Die Berechnung der Methanausbeuten der Silphie anhand der Inhaltsstoffzusammensetzung des Erntematerials (Baserga 1998) lieferte zum Teil erhebliche und nicht nachvollziehbare Abweichungen gegenüber den in Batch-Tests ermittelten Werten. In diesem Zusammenhang sind die von Neumerkel und Martin (1982) angegebenen Verdaulichkeitsquotienten zu überprüfen und die auf deren Grundlage berechneten Methanausbeuten für Silphie zu hinterfragen.

3. Erkenntnisse von Dritten

Im Projektzeitraum sind zum Thema unterirdische Biodiversität des Teilvorhabens 1 im Kontext des Anbaus der Durchwachsenen Silphie lediglich zwei Forschungsarbeiten publiziert worden. In einer tschechischen Feldstudie verglichen Hedenec et al. (2014) Bodenmesofauna- und Bodenmakrofauna-Gemeinschaften zwischen Versuchsflächen, die mit heimischen und gebietsfremden Energiepflanzenarten kultiviert waren. Diversität und Abundanz beider Gemeinschaften waren höher bei Flächen mit heimischen (Korb-Weide, Rohrglanzgras) als solchen mit gebietsfremden Energiepflanzenarten (Durchwachsene Silphie, Staudenknöterich, Topinambur). Unter den gebietsfremden Pflanzenarten zeigten Silphiebestände die höchste Diversität bei geringster Abundanz der Bodentier-Gemeinschaften. Im Rahmen von Feldversuchen zu Energiepflanzen in Rheinland-Pfalz berichtete Emmerling (2014) über höhere Individuendichten und Biomasse bei Regenwürmern in Silphiebeständen ungenannten Alters im Vergleich zu Mais. Er fand, wie auch im vorliegenden Projektbericht festgestellt, vier Regenwurmartentypen unter Mais im Vergleich zu sechs Arten unter Silphie. Letzteres entspricht dem Ergebnis zu den Silphie-Flächen mittleren Alters im vorliegenden Projektbericht.

Zum Thema oberirdische Biodiversität des Teilvorhabens 1 sind uns keine neuen Kenntnisse von Dritten bekannt. Dr. Ingrid Illies untersucht an der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) an verschiedenen Standorten in Bayern die Ergiebigkeit der Durchwachsenen Silphie als Bienenweide. Konkrete Ergebnisse aus dem Projekt liegen uns nicht vor.

Zum Thema Wasserhaushalt und Ökophysiologie der Silphie sind während der Projektlaufzeit nur wenig neue Erkenntnisse bekannt geworden. Franzaring et al. (2014) führten im Rahmen eines FNR-Projektes (FKZ 22400511) vergleichende ökophysiologische Untersuchungen an Silphie und Sida (*Sida hermaphrodita* L.) durch. Dabei wurden bei der Silphie u.a. eine geringere Stomatadichte und eine niedrigere Photosyntheserate im Vergleich zu Sida beobachtet. Bei einer ebenfalls durchgeführten $\Delta^{13}\text{C}$ -Isotopendiskriminierung wurden geringer negative Diskriminierungsraten für die Silphie (-27,3‰) gegenüber Sida (-30,2‰) festgestellt. Die Silphie könnte demnach eine höhere Wassernutzungseffizienz als Sida aufweisen. Aussagen zur Wassernutzung unter Trockenheit sind aber basierend auf diesen Untersuchungen nicht möglich, weil die Versuche bei ausschließlich optimaler Wasserversorgung durchgeführt wurden. Die Silphie besitzt nach unseren Erkenntnissen keine gute Wassernutzungseffizienz. Den Ergebnissen von Franzaring et al. (2014) zufolge dürfte dies somit auch auf Sida zutreffen.

Der Großteil der publizierten neuen Forschungsarbeiten zu Silphie befasst sich mit rein agronomischen Aspekten, insbesondere zum Trockenmasseertrag (Aurbacher et al. 2012, Pichard 2012, Stolzenburg und Monkos 2012, Biertümpfel und Conrad 2013, Brauckmann et al. 2013, Stockmann und Fritz 2013, Wilken und Benke 2013, Deim et al. 2014, Mast et al. 2014). Trotzdem lassen sich auch aus diesen Untersuchungen, wegen der großen Unterschiedlichkeit der Versuchsstandorte hinsichtlich Klima und Boden, indirekt auch Erkenntnisse zum Wasserbedarf der Silphie ableiten. Mit Mais vergleichbare oder sogar höhere Trockenmasseerträge erreichte die Silphie nur an Standorten mit guter Wasserversorgung, sei es aufgrund hoher Niederschläge während der Vegetationsperiode, eines großen Bodenwasserspeichers im durchwurzelten Bodenraum oder durch Grundwasseranschluss (Stolzenburg und Monkos 2012, Biertümpfel und Conrad 2013, Stockmann und Fritz 2013, Mast et al. 2014). An Standorten mit suboptimaler Wasserversorgung lagen die Trockenmasseerträge von Silphie dagegen deutlich unter denen von Mais (Aurbacher et al. 2012, Brauckmann et al. 2013, Wilken und Benke 2013). Die Auswirkungen von Wassermangel auf die Methanausbeute und den Methanhektarertrag wurden in keiner der oben genannten Studien untersucht. Gansberger et al. (2015) betonen den weiter bestehenden, dringenden Forschungsbedarf bei Silphie in den Bereichen Anbauverfahren, Standortpotential, Züchtung und Methanausbeute.

- Aurbacher J, Benke M, Formowitz B, Glauert T, Heiermann M, Hermann C, Idler C, Kornatz P, Nehring A, Riekman C, Riekman G, Reus D, Vetter A, Vollrath B, Wilken F, Willms M (2012) Energiepflanzen für Biogasanlagen (Broschüre 553). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Rostock.
- Biertümpfel A, Conrad M (2013) Optimierung des Anbauverfahrens und Bereitstellung von Selektionsmaterial. Abschlussbericht der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zum Forschungsprojekt FKZ 22012809 gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Brauckmann HJ, Krell K, Broll G, Ruhe K (2013) Energy on Farm – Optimierte Energiepflanzen-Anbausysteme zur nachhaltigen Biogaserzeugung. 4. Symposium für Energiepflanzen. Berlin 22-23.10.2013. Online verfügbar unter http://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Energiepflanzenkongress_2013/Brauckmann_23.10.13_01.pdf (zuletzt geprüft am 21.10.2015).
- Deim F, Mayr J, Liebhard P (2014) *Silphium perfoliatum* L. – Eine Alternative in der Produktion nachwachsender Rohstoffe in Österreich. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V. 26, 114-115.
- Emmerling C (2014) Impact of land-use change towards perennial energy crops on earthworm population. *Applied Soil Ecology* 84, 12-15.
- Franzaring J, Schmid I, Bäuerle L, Gensheimer G, Fangmeier A (2014) Investigations on plant functional traits, epidermal structures and the ecophysiology of the novel bioenergy species *Sida hermaphrodita* Rusby and *Silphium perfoliatum* L.. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 87, 36-45.

- Gansberger M, Montgomery LFR, 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* 63, 362-372.
- Hedenec P, Novotny D, Ustak S, Cajthaml T, Slejka A, Simackova H, Honzik R, Kovarova M, Frouz J (2014) The effect of native and introduced biofuel crops on the composition of soil biota communities. *Biomass and Bioenergy* 60, 137-146.
- Mast B, Lemmer A, Oechsner H, Reinhardt-Hanis A, Claupein W, Graeff-Hönninger S (2014) Methane yield potential of novel perennial biogas crops influenced by harvest date. *Industrial Crops and Products* 58, 194-203.
- Pichard G (2012) Management, production, and nutritional characteristics of cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) in temperate climates of southern Chile. *Ciencia e investigación agraria* 39, 61-77.
- Stockmann F, Fritz M (2013) Einfluss von Standort und Herkunft auf das Ertragspotential der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) unter bayerischen Anbaubedingungen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.* 25, 146-147.
- Stolzenburg K, Monkos A (2012) Erste Versuchsergebnisse mit der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) in Baden-Württemberg. *Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Karlsruhe*.
- Wilken F, Benke M (2013) Durchwachsene Silphie in Niedersachsen. Online verfügbar unter <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/2/nav/74/article/21404.html> (zuletzt geprüft am 19.10.2015).

4. Veröffentlichungen

Der bisher aus dem Verbundprojekt heraus erfolgte Wissenstransfer in Form von Publikationen in Zeitschriften, Vorträgen, Postern und Interviews ist nachfolgend dargestellt.

Zeitschriften

- Dauber J, Bolte A (2014) Bioenergy: Challenge or support for the conservation of biodiversity? *Global Change Biology – Bioenergy* 6, 180-182
- Müller AL, 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.. *Mitt. Entomol. Verein Stuttgart* 49, 42-43
- Schoo B, Schroetter S, Böttcher U, Kage H, Schittenhelm S (2015) Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Durchwachsenen Silphie. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.* 27, 19-20
- Schoo B, Wittich KP, Böttcher U, Kage H, Schittenhelm S (2016) Drought tolerance and water-use efficiency of biogas crops: A comparison of cup plant, maize and lucerne grass. *Journal of Agronomy and Crop Science* (im Druck).
- 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* 87, 61-68
- Schittenhelm S, Schoo B (2015) Mit Silphie gegen Erosion. *DLZ-Agrarmagazin* 12/2015, 29-31

Vorträge

- Dauber J (2014) Bioenergy: Challenge or support for the conservation of farmland biodiversity? Workshop "Bioenergy from Agricultural Land in Sweden", Lund, Schweden, 27. – 28.02.2014
- Dauber J (2014) Bioenergie: Chance oder Risiko für die biologische Vielfalt in Agrarlandschaften? Zoologisch-ökologisches Seminar an der Universität für Bodenkultur Wien, Österreich, 18.11.2014
- Dauber J (2014) The importance of novel energy crops and cropping systems for farmland biodiversity. Workshop "Biomass for energy - lessons from the Bioenergy Boom", UFZ Leipzig, 24.-25.11.2014

Müller AL, Dauber J (2015) *Silphium perfoliatum* L. – a new energy crop as food resource for pollinators? DGaE Entomologentagung, 02.-05. März 2015, Frankfurt am Main

Müller AL, Schmitz H, Dauber J (2013) Agrarökologische Bewertung der Durchwachsenen Silphie als Nahrungsressource für blütenbesuchende Insekten. Niedersächsisch-Thüringer Silphietag in Walsrode: 14.01.2013

Schoo B, Schroetter S, Böttcher U, Kage H, Schittenhelm S (2015) Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Durchwachsenen Silphie. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V., Braunschweig, 22.-24.09.2015.

Schoo B (2015) Vergleichende ökophysiologische Untersuchungen an Silphie, Mais und Luzerne. Seminar an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 26.01.2015.

Schorpp Q, Boley S, Schrader S (2013) Funktionelle Biodiversität im Boden. Niedersächsisch-Thüringer Silphietag in Walsrode: 14.01.2013

Schorpp Q, Schrader S (2013) Mehr Vielfalt im Agrarökosystem: Funktionelle Untersuchung der Bodenfauna (Nematoda, Collembola, Lumbricidae) in Beständen der neuen Bioenergiepflanze *Silphium perfoliatum*. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG) in Rostock: 09. bis 12.09.2013

Schorpp Q, Havertz S, Boley S, Schrader S (2014) Potential of long term perennial biomass cropping (*Silphium perfoliatum*) on diversification of soil fauna communities, Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie (GfÖ) in Hildesheim: 08. bis 12.09.2014.

Schorpp Q, Riggers C, Lewicka-Szcebak D, Well R, Giesemann A, Schrader S (2015) Regenwürmer steuern Lachgas-Emissionen während der Streuzersetzung in Abhängigkeit von der Bodentextur. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG) in München: 07. bis 11.09.2015

Poster

Müller AL, Schorpp Q, Schoo B, Schittenhelm S, Schrader S, Schroetter S, Dauber J (2012) Agroecological assessment of the cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) as a biomass crop of the future. 4. International Energy Farming Congress in Papenburg vom 13. bis zum 15. März 2012

Müller AL, Schorpp Q, Schoo B, Schittenhelm S, Schrader S, Schroetter S, Dauber J (2012) Agroecological assessment of the cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) as a biomass crop of the future. GfÖ-Jahrestagung Lüneburg: 10. bis 14.09.2012

Müller AL, Dauber J (2013) Energiewende und Biodiversität: Nachwachsende Rohstoffe als Nahrungsressource für blütenbesuchende Insekten. Veranstaltung Bienenweiden, Blühflächen und Agrarlandschaft - Möglichkeiten, Wege und Perspektiven zur Kombination von moderner Landwirtschaft und Biodiversitäts-Vorsorge, Berlin, 26.-27.11.2013

Müller AL, Dauber J (2015) Can climate and biodiversity targets be harmonised by a diversification of the energy crop production? 8th International Symposium on Syrphidae, 04.-08. Juni 2015, Monschau

Müller AL, Dauber J (2015) Visitation of the energy plant *Silphium perfoliatum* L. (Asteraceae) by hoverflies (Diptera: Syrphidae) in landscapes of different farming intensity. Int. Biogeogr. Soc., 7th biennial Conference, 08.-12. Januar 2015, Bayreuth; veröffentlicht als Frontiers of Biogeography 6, Suppl.1, 152-153.

Schittenhelm S, Schoo B, Schroetter S, Dauber J (2013) Ertragsphysiologische Untersuchungen bei Silphie: Wasser, Wurzeln, Licht. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzower Fachgespräche, Band 45, Seite 405.

Schoo B, Wessel-Terharn M, Schroetter S, Schittenhelm S (2013) Vergleichende Untersuchung von Wurzelmerkmalen bei Silphie und Mais. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 25, 241-242.

Schoo B, Schittenhelm S, Wittich KP (2014) Bedeutung der Taubildung für den Wasserhaushalt der Durchwachsenen Silphie. In: Goldberg V, Bernhofer C. (Hrsg.) 8. BIOMET-Tagung –

„Mensch-Pflanze-Atmosphäre“ im 21. Jahrhundert. Eigenverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden, Seite 87-88.

Schorpp Q, Havertz S, Boley S, Schrader S (2014) Functional assessment of soil fauna communities in perennial biomass cropping systems with the cup plant (*Silphium perfoliatum*), The First Global Soil Biodiversity Conference in Dijon (Frankreich): 02. bis 05.12.2014.

Schroetter S, Schoo B, Schittenhelm S (2013) Wurzelentwicklung der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.), Gülzower Fachgespräche, Band 45, Seite 406

Interviews

Schittenhelm S (2014) Silphie – neue Energiepflanze mit Potential? Die Durchblicker - Wissens-Reportagen von der Ostsee bis zum Bodensee (BR, NDR, SWR, WDR). Online verfügbar unter <http://www.swr.de/blog/diedurchblicker/2014/09/12/silphie-neue-energiepflanze-mit-potential/> (zuletzt geprüft am 20.10.2015).

Interview mit J. Dauber und S. Schittenhelm sowie Projektmitarbeiterinnen zum Thema Bedeutung der Silphie für die Biogasproduktion und als Bienenweide von Kerstin Neumann (Redakteurin des Fachmagazins für Imker ADIZ, die biene, Imkerfreund im DLV). Beitrag erschienen in *die biene* 11.2014.

Interview mit S. Schrader (Projektleiter für „unterirdische Biodiversität“) und dem Projektmitarbeiter Q. Schorpp zur Biologie und ökologischen Bedeutung der Regenwürmer für die Wissensreihe bei SWR 2 am 26.08.2014; „Erdarbeiter Regenwurm“ gesendet am 26.01.2015.

30. April 2013, Schleswig-Holsteinischer Zeitungsverlag SHZ.de, „Es muss nicht immer Mais sein“ von Till H. Lorenz. Enthält Auszüge aus einem Interview mit J. Dauber.

Geplante Veröffentlichungen:

Müller AL, Dauber J: 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* (eingereicht)

Müller AL: Dissertation an der TU Braunschweig

Schittenhelm S, Schoo B, Schroetter S: Ertragsphysiologie von Biogaspflanzen: Vergleich von Durchwachsener Silphie, Mais und Luzernegrass. *Journal für Kulturpflanzen* (in Vorbereitung)

Schoo B, Schroetter S, Kage H, Schittenhelm S: Root traits of biogas crops grown under different soil and soil moisture conditions. *Plant and Soil* (in Vorbereitung)

Schoo B, Kage H, Schittenhelm S: Radiation use efficiency, chemical composition and methane yield of cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) in comparison with maize and lucerne-grass. *European Journal of Agronomy* (in Vorbereitung)

Schoo B: Dissertation an der CAU Kiel

Schorpp Q, Riggers C, Lewicka-Szczebak D, Giesemann A, Well R, Schrader S: Influence of *L. terrestris* and *F. candida* on N₂O forming pathways with particular focus on N₂ emissions in two different soils. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* (eingereicht).

Schorpp Q, Schrader S: Diversity of Nematodes and Collembolans including their function groups respond to the perennial energy cropping system of the cup plant (*Silphium perfoliatum* L.). *Internationale Fachzeitschrift* (in Vorbereitung)

Schorpp Q: Dissertation an der TU Braunschweig

Anhang

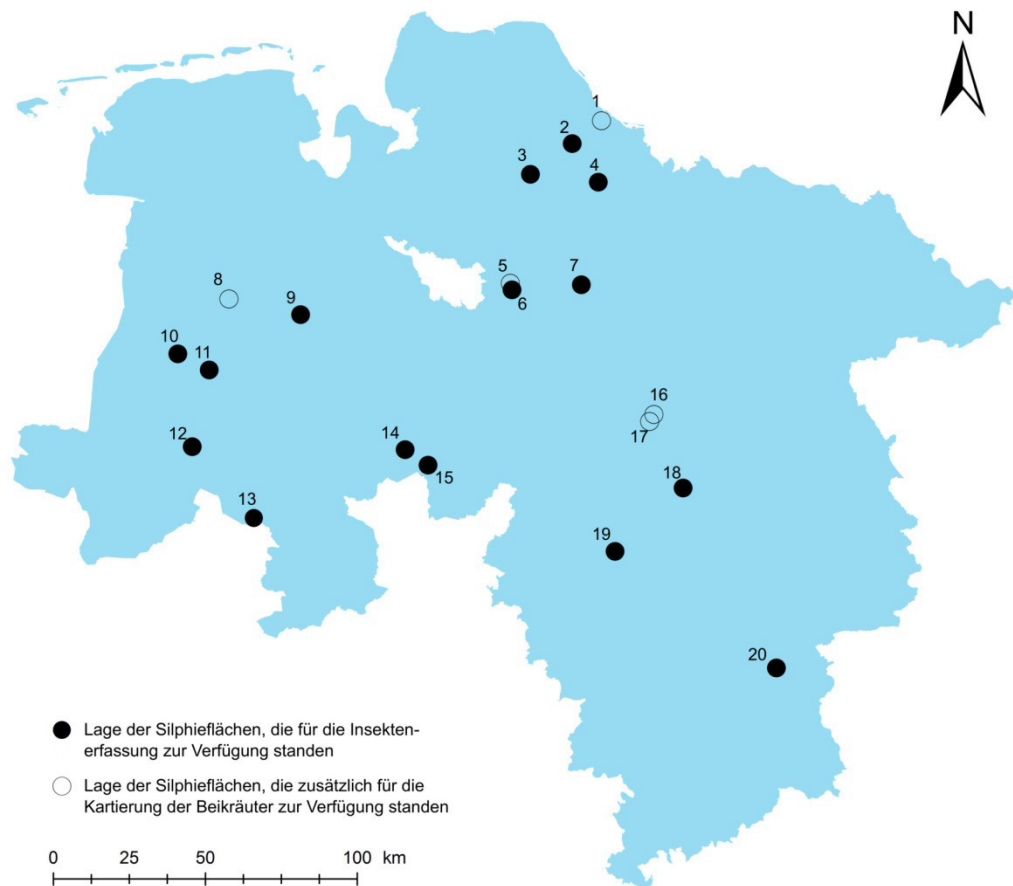


Abbildung A1: Karte der Untersuchungsflächen 2012 in Niedersachsen

Tabelle A1: Artenliste der nachgewiesene Schwebfliegen auf den Praxisflächen der Durchwachsenen Silphie (siehe Abbildung A1) sowie den benachbarten Maisflächen und linearen Habitaten (Gewässer und Waldränder) im Untersuchungsjahr 2012 mit Angabe des Larvalernährungstypen (s=saprophag, p=phytophag, z=zoophag).

Larvalernäh- rungstyp	Taxon	Silphie	Mais	Lineare Habitats
s	<i>Chalcosyrphus nemorum</i> (Fabricius), 1805	0	2	3
p	<i>Cheilosia bergenstammi</i> Becker, 1894	0	1	0
p	<i>Cheilosia vernalis</i> agg.	1	1	3
z	<i>Chrysotoxum bicinctum</i> (L.), 1758	0	1	0
z	<i>Chrysotoxum verralli</i> Collin, 1940	0	0	1
z	<i>Dasysyrphus albostrigatus</i> (Fallen), 1817	0	0	4
z	<i>Epistrophe grossulariae</i> (Meigen), 1822	0	0	1
z	<i>Episyrphus balteatus</i> (DeGeer), 1776	76	240	384
s	<i>Eristalinus sepulchralis</i> (L.), 1758	3	12	5
s	<i>Eristalis abusiva</i> Collin, 1931	2	8	0
s	<i>Eristalis arbustorum</i> (L.), 1758	39	38	36
s	<i>Eristalis intricaria</i> (L.), 1758	10	3	1
s	<i>Eristalis horticola</i> (De Geer), 1776	2	0	0
s	<i>Eristalis nemorum</i> (L.), 1758	32	11	13
s	<i>Eristalis pertinax</i> (Scopoli), 1763	2	0	2
s	<i>Eristalis tenax</i> (L.), 1758	107	28	18
p	<i>Eumerus</i> cf. <i>strigatus</i> (Fallen), 1817	0	3	2
z	<i>Eupeodes corollae</i> (Fabricius), 1794	40	182	72
z	<i>Eupeodes latifasciatus</i> (Macquart), 1829	1	2	2
z	<i>Eupeodes luniger</i> (Meigen), 1822	4	1	4
s	<i>Ferdinandea cuprea</i> (Scopoli), 1763	0	2	12
s	<i>Helophilus hybridus</i> Loew, 1846	3	0	0
s	<i>Helophilus pendulus</i> (L.), 1758	45	25	43
s	<i>Helophilus trivittatus</i> (Fabricius), 1805	95	126	66
z	<i>Melanostoma mellinum</i> (L.), 1758	3	70	26
z	<i>Meliscaeva auricollis</i> (Meigen), 1822	0	0	4
z	<i>Meliscaeva cinctella</i> (Zetterstedt), 1843	0	0	10
s	<i>Myathropa florea</i> (L.), 1758	13	47	34
s	<i>Neoascia podagrica</i> (Fabricius), 1775	2	8	8
s	<i>Orthonevra intermedia</i> Lundbeck, 1916	0	1	0
z	<i>Parasyrphus annulatus</i> (Zetterstedt), 1838	0	0	1
z	<i>Pipiza noctiluca</i> L., 1758	1	0	0
z	<i>Platycheirus albimanus</i> (Fabricius), 1781	2	0	4
z	<i>Platycheirus clypeatus</i> (Meigen), 1822	1	1	0
z	<i>Platycheirus granditarsus</i> (Forster), 1771	0	1	1
z	<i>Platycheirus peltatus</i> (Meigen), 1822	0	8	5
z	<i>Platycheirus scutatus</i> (Meigen), 1822	0	1	0
s	<i>Rhingia campestris</i> Meigen, 1822	3	4	11
z	<i>Scaeva pyrastris</i> (L.), 1758	5	4	2
s	<i>Sericomyia silentis</i> (Harris), 1776	0	1	2
z	<i>Sphaerophoria interrupta</i> agg.	2	7	3
z	<i>Sphaerophoria scripta</i> (L.), 1758	20	45	21
s	<i>Syrphoctonus pipiens</i> (L.), 1758	0	1	1

Tabelle A1: Fortsetzung

Larvalernäh- rungstyp	Taxon	Silphie	Mais	Lineare Habitats
z	<i>Syrphus ribesii</i> (L.), 1758	7	3	14
z	<i>Syrphus torvus</i> Osten-Sacken, 1875	2	0	0
z	<i>Syrphus vitripennis</i> Meigen, 1822	20	3	65
s	<i>Xylota abiens</i> Meigen, 1822	0	0	1
s	<i>Xylota segnis</i> (L.), 1758	30	29	62
s	<i>Xylota sylvarum</i> (L.), 1758	0	0	1
Anzahl an Individuen		573	920	948
Anzahl an Arten		30	35	39

Tabelle A2: Vegetationsaufnahme der Ackerbegleitflora mit Schätzungen der Artmächtigkeiten nach Braun-Blanquet. Standort-Nr. vgl. Abbildung A1.

Standort-Nr.	2	1	5	14	8	12	6	9	20	4	7	19	3	18	16	25	11	15	10
Artenzahl	23	15	19	19	27	16	16	15	19	16	21	13	17	18	21	15	14	16	14
<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	.	.	.	1	+	.	1	r	r	.	.	.	+	.	.	r	.	r	.
<i>Apera spica-venti</i> (L.) P. Beauv.	.	.	.	.	1	.	.	r	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	+
<i>Aphanes arvensis</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.
<i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.	1m	1	1	+	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.	1	1	r	.
<i>Artemisia annua</i> L.	+	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
<i>Avena fatua</i> L.	.	.	.	r	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r
<i>Bromus sterilis</i> L., nom. cons.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Med.	1	1	.	3	1	1m	+	2a	1m	2b	.	2a	2b	3	3	.	+	2a	1
<i>Cardamine hirsuta</i> L.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cardaminopsis arenosa</i> (L.) Hayek	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Carduus acanthoides</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	+	+	.	.	.
<i>Carex</i> sp.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cerastium fontanum</i> Baumg. s. str.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Chenopodium album</i> L.	r	2a	1	1m	3	.	1	2b	.	1	4	2a	3	1	3	1	4	.	1m
<i>Chenopodium polyspermum</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	1m	.
<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	1	2a	+	.	+	1	.	.	.	1	r	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cirsium vulgare</i> (Savi) Ten.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Claytonia perfoliata</i> Donn ex Willd.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	1	.	+	+	+	.	+	1	.	+	1	.	1	.	.	.	1	r	+
<i>Epilobium ciliatum</i> Raf.	r	.	+	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	3	.	.	.	.
<i>Equisetum arvense</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	1	.	1	.	.	.	.
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Hér. s. str.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	1	.	.
<i>Erophila verna</i> (L.) DC. s. l.	r	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	+	r	.
<i>Fallopia convolvulus</i> (L.) Å. Löve	.	.	1	.	+	+	r	r	.	.	1m	.	3	+	1	1m	2a	1m	.
<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	.	1	+	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Galium aparine</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.
<i>Geranium molle</i> L.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Geranium pusillum</i> Burm. f.	.	.	.	1	.	.	.	.	+	1	r	.	.	.	1	.	.	.	1
<i>Geranium rotundifolium</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.
<i>Glechoma hederacea</i> L.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Herniaria hirsuta</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Holcus lanatus</i> L.	1	+	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	+	.	.	.
<i>Hypericum perforatum</i> L.	.	.	.	.	.	1m	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus</i> sp.	.	.	1m	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.
<i>Lamium album</i> L.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lamium purpureum</i> L. s. l.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
<i>Leucanthemum</i>	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Matricaria recutita</i> L.	r	+	.	1m	1	2a	1m	1	1	2a	1	1	1m	.	r	.	.	1	+
<i>Myosotis arvensis</i> (L.) Hill	1	.	.	.	1	.	.	.	.	.	+	.	+	+	.	+	.	.	.
<i>Persicaria lapathifolia</i> (L.) Delarbre s. l.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	+	.	.	.	.
<i>Persicaria maculosa</i> Gray	1	2b	3	.	+	1	1	.	.	1	.	r	+	1	.	+	.	.	.
<i>Plantago lanceolata</i> L.	r	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Plantago major</i> L. s. l.	.	.	.	1	+	1m	.	+	.	.	.	.	.	r	r	.	.	.	+
<i>Poa annua</i> L.	+	1	1	4	2b	1	1	1	r	1	1	2a	1	.	4	.	2a	5	3
<i>Poa pratensis</i> L. s. str.	r	.	.	.	.	.	1	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Polygonum aviculare</i> L. (s. l.)	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+	.	+	.	.	.	.
<i>Ranunculus arvensis</i> L.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus repens</i> L.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Rorippa palustris</i> (L.) Besser	.	1	1	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	1m	.	.	.	1
<i>Rumex acetosella</i> L. s. l.	+	.	+	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	1m	+	.	.
<i>Rumex crispus</i> L.	.	.	.	.	1	1	.	.	r	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+
<i>Rumex obtusifolius</i> L.	.	1	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
<i>Scleranthus annuus</i> L. s. str.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Senecio inaequidens</i> DC.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Senecio vulgaris</i> L.	+	.	.	.	.	.	1	+	.	.	r	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Sisymbrium officinale</i> (L.) Scop.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
<i>Sonchus arvensis</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.
<i>Stachys sylvatica</i> L.	.	.	.	.	.	1	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Stellaria media</i> (L.) Vill. s. str.	.	1	.	4	4	5	1	3	.	r	+	1	2a	3	3	2b	2a	2a	4
<i>Tanacetum vulgare</i> L.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	1m	r	.	.	.	1	.	r	.
<i>Taraxacum officinale</i> L.	+	+	+	+	1	+	+	r	.	.	.	.	.	.	.	.	r	+	.
<i>Thlaspi arvense</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	1	.	1	.	.	.	.	.
<i>Trifolium repens</i> L.	1	.	1	2a	1	1m	r	r	+	1	.	.	r	.	1	r	.	r	1m
<i>Turritis glabra</i> (L.) Bernh.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2a	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Urtica dioica</i> L. s. l.	.	.	.	r	+	1m	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r
<i>Verbascum thapsus</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.
<i>Veronica arvensis</i> L.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	+	+	.	.	.	.	.	.	.

Tabelle A2: Fortsetzung

<i>Vicia angustifolia</i> L.	1m	.	.	.	.	.	.	.	r	1m	+	.	1	.	.	.	r	.	.
<i>Vicia hirsuta</i> (L.) Gray	.	.	.	.	r	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Vicia villosa</i> Roth s. l.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Viola arvensis</i> Murray	1m	.	.	1m	1	.	+	1	+	1	1	.	2a	+	1	1	1	.	.
<i>Viola tricolor</i> L.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Tabelle A3: Bestandesführung im Feldversuchsjahr 2012.

Maßnahme	Silphie	Mais	Luzernegras
Sorte	Silphie russischer Herkunft (N.L. Chrestensen)	Atletas (KWS)	COUNTRY 2056 bestehen aus 80% Luzerne, 15% Wiesen-schwingel und 5% Lieschgras (DSV)
Auspflanzung/Aussaat	9.5.2012 (3-reihige Gemüsepflanzmaschine)	25.4.2012	21.3.2012
Bestandesdichte	4 Pflanzen m ⁻² (0,50 m Quadratverband)	9 Pflanzen m ⁻² (Reihenabstand 0,75 m)	Aussaatstärke: 20 kg ha ⁻¹
Grunddüngung (kg ha ⁻¹)	Einheitlich P ₂ O ₅ : 65; K ₂ O: 162; MgO: 26; S: 39 (15.2.2012)		
N-Düngung als KAS (kg ha ⁻¹)	100 (10.5.2012)	180 (26.4.2012)	60 (22.3.2012), 30 (9.6.2012)
Unkrautbekämpfung	Mehrfache Handhacke	Tankmischung aus Callisto (1 L ha ⁻¹), Milargo forte (0,72 L ha ⁻¹) und Peak (20 g ha ⁻¹) am 24.5.2012	Nebeneffekt wiederholter Schnittnutzung
Bewässerung (nur Kontrolle)	20 mm (19.6.), 15 mm (2.7.), 20 mm (30.7.), 20 mm (9.8.), 20 mm (14.8.), 20 mm (21.8.), 20 mm (3.9.), 20 mm (11.9.) <u>Total: 155 mm</u>		
Ernte	Keine (Etablierungsjahr)	19.9. (unbewässert) und 2.10.2012 mit Maishäcksler in Bigbags	3 Schnitte am 8.6., 24.7. und 10.9.2012 mit HALDRUP Grün-futternvollernter

Tabelle A4: Bestandesführung im Feldversuchsjahr 2013.

Maßnahme	Silphie	Mais	Luzernegras
Sorte	Siehe Tabelle A1.		
Auspflanzung/Aussaat	Dauerkultur	26.4.2013	Mehrfährig
Grunddüngung (kg ha ⁻¹)	22.3.2013		
P ₂ O ₅	70	95	70
K ₂ O	240	305	330
MgO	100	50	100
S	39	39	39
N-Düngung als KAS (kg ha ⁻¹)	170 (27.3.2013)	180 (3.5.2013)	30 (27.3.2013)
Unkrautbekämpfung	Keine	Tankmischung aus Callisto (1 L ha ⁻¹), Milargo forte (0,72 L ha ⁻¹) und Peak (20 g ha ⁻¹) am 6.6.2013	Nebeneffekt wiederholter Schnittnutzung
Fungizidbehandlung	Gegen Botrytis: Cantus (0,5 L ha ⁻¹) und Signum (1,5 L ha ⁻¹) am 4.6. und 21.6.2013	Keine	Keine
Bewässerung (nur Kontrolle)	20 mm (18.6.), 20 mm (25.6.), 20 mm (2.7.), 20 mm (9.7.), 20 mm (16.7.), 15 mm (18.7.), 20 mm (22.7.), 20 mm (25.7.), 20 mm (2.8.), 20 mm (5.8.), 20 mm (15.8.), 20 mm (4.9.) Total: 235 mm		
Ernte	20.8. (unbewässert) und 29.8.2013 (bewässert) mit Feldhäcksler in Bigbags	1.10.2013 mit Feldhäcksler in Bigbags	4 Schnitte (14.5., 24.6., 1.8. und 17.9.2013) mit HALDRUP Grünfuttervollernter

Tabelle A5: Bestandesführung im Feldversuchsjahr 2014.

Maßnahme	Silphie	Mais	Luzernegras
Sorte	Siehe Tabelle A1.		
Auspflanzung/Aussaat	Dauerkultur	16.4.2014	Mehrfährig
Grunddüngung (kg ha ⁻¹)	7.3.2014		
P ₂ O ₅	70	95	70
K ₂ O	240	305	330
MgO	100	50	100
S	39	39	39
N-Düngung als KAS (kg ha ⁻¹)	170 (10.3.2014)	180 (30.4.2014)	30 (10.3.2014)
Unkrautbekämpfung	Keine	Tankmischung aus Callisto (1 L ha ⁻¹), Milargo forte (0,72 L ha ⁻¹) und Peak (20 g ha ⁻¹) am 21.5.2014	Nebeneffekt wiederholter Schnittnutzung
Fungizidbehandlung	Gegen Botrytis: Cantus (0,5 L ha ⁻¹) und Signum (1,5 L ha ⁻¹) am 5.5. und 15.5.2014	Keine	Keine
Bewässerung (nur Kontrolle)	20 mm (22.5.), 20 mm (3.6.), 30 mm (4.6.), 20 mm (13.6.), 20 mm (24.6.), 20 mm (4.7.), 20 mm (8.7.), 30 mm (21.7.), 20 mm (22.7.), 30 mm (24.7.) <u>Total: 230 mm</u>	20 mm (22.5.), 20 mm (13.6.), 20 mm (24.6.), 20 mm (21.7.), 20 mm (24.7.), 20 mm (25.8.) <u>Total: 120 mm</u>	
Ernte	Am 6.8. (unbewässert) und 14.8.2014 mit Feldhäcksler in Bigbags	Am 29.9.2014 mit Maishäcksler in Bigbags	5 Schnitte (28.4., 14.6., 15.7., 18.8. und 6.10.2014) mit HALDRUP Grün- futtersvollernter