

## Bodenqualität beim Anbau von Dauerkulturen für die Biomasseproduktion am Beispiel der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) – ein innovatives Agrarsystem der Zukunft

Soil quality through the cultivation of perennial bioenergy crops by example of *Silphium perfoliatum* – an innovative agro-ecosystem in future

### Zusammenfassung

Der Anteil des Energiepflanzenanbaus zur Vergärung oder thermischen Verwertung steigt in Europa kontinuierlich an. Seit einigen Jahren etablieren sich verstärkt ligno-cellulosereiche Dauerkulturen der sogenannten zweiten Generation (2G) als Alternative zum aktuell noch vorherrschenden Maisanbau. Zu den Auswirkungen auf den Boden ist derzeit noch wenig bekannt. Am Beispiel der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum*) wurden in zwei Feldstudien in Rheinland-Pfalz die Auswirkungen auf die Bodenqualität (organische Bodensubstanz, bodenmikrobiologische Eigenschaften, Aggregatstabilitäten sowie Regenwurm- und Fraßaktivität im Feld) nach fünfjähriger Anbaudauer im Vergleich zu Mais untersucht. Der Anbau von Dauerkulturen ist insbesondere aufgrund der fehlenden Bodenbearbeitung, des vermehrten Eintrages an organischer Substanz und der damit verbundenen höheren Aktivität der Bodenorganismen allgemein als positiv zu bewerten. Allerdings sind die Ergebnisse standortsbedingt zu differenzieren. So zeigten sich zum Beispiel bei sandigen Böden und trockenen Standortbedingungen zum Teil niedrigere Humusgehalte und biologische Aktivitäten als unter Maisanbau. Im Mittel aller Standorte zeigte sich aber, dass Dauerkulturen, wie zum Beispiel Durchwachsene Silphie, ein zugleich ‚grünes‘, effizientes und innovatives Agrarsystem der Zukunft darstellen können.

**Stichwörter:** Durchwachsene Silphie, Bodenqualität, Ökosystemdienstleistungen, Dauerkulturen, Bioenergie, innovative Agrarsysteme

### Abstract

Bioenergy crops are increasingly cultivated in Europe in the context of the EU initiative to produce 20% of primary energy supply by renewable resources by the year 2020. In the past decade some perennial bioenergy crops such as *Silphium perfoliatum* have been newly introduced. Until now, little is known about the impact of the cultivation of these new 2G bioenergy crops on soil health and quality. In this context, two on-farm experiments were conducted in W-Germany, Rhineland-Palatinate. In general, after five years of cultivation most of the tested soil properties were significantly increased relative to the cultivation of silage maize, such as carbon storage, microbial biomass, activity and community, aggregate stability, and earthworm and bait-lamina activity. However, as revealed from the variety of the different study sites, it can be further concluded that the local and regional soil properties and climatic conditions may impact soil quality significantly. In sandy soils and under dry growth conditions for example, carbon storage and biological activity was lower compared to silage maize. All in all, it is supposed that introducing *Silphium perfoliatum* and even

### Institut

Universität Trier, FB VI Raum- und Umweltwissenschaften, Fach Bodenkunde

### Kontaktanschrift

Prof. Dr. Christoph Emmerling, Universität Trier, FB VI Raum- und Umweltwissenschaften, Fach Bodenkunde, Campus II, 54292 Trier, E-Mail: emmerling@uni-trier.de

### Zur Veröffentlichung angenommen

31. Oktober 2016

other perennial bioenergy crops would make European agriculture as well more green, effective and innovative in future.

**Key words:** *Silphium perfoliatum*, soil quality, ecosystem services, perennials, bioenergy crops, innovative agro-ecosystems

## 1 Einleitung

Die weltweit angestrebte langfristige Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien hat zu einer erheblichen Ausweitung des Energiepflanzenanbaus in Deutschland beigetragen. Mit der Entwicklung nationaler Klimaschutzstrategien ist der Anbau und die Nutzung von Biomasse in den Fokus zur Schonung natürlicher Ressourcen und zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Beitrags zur Treibhausgasemission gelangt. Energiepflanzen sind Bestandteil der nachwachsenden Rohstoffe (NaWaRo). Diese sich ständig erneuernden Ressourcen stehen als wertvolle Rohstoff- und Energiequellen zur Verfügung.

Mit dem Anbau der Energiepflanzen und dessen Intensivierung entstehen allerdings auch zahlreiche Konflikte, zum Beispiel bezüglich der Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion als auch bezüglich Bodeneigenschaften und -funktionen (UBA, 2008). Letzteres betrifft im Wesentlichen den in den letzten Dekaden verstärkten Maisanbau, der mit einer Ausweitung der Biogasproduktion gekoppelt ist (KRUSKA und EMMERLING, 2008). Diese, zu den Energiepflanzen der ersten Generation (1G) zählende Kultur, besitzt zumindest tendenziell ein erhöhtes Potential an Bodenverdichtung, Humusverlust sowie Erosionsdisposition. Außerdem hat der Maisanbau regional und lokal zur Monotonisierung in der Landnutzung beigetragen (KRUSKA und EMMERLING, 2008). Dem gegenüber stehen mittlerweile einige Dauerkulturen der zweiten Generation (2G) zur Verfügung, die ein hohes biochemisches Methanpotential für die Biogasproduktion besitzen (MAYER et al., 2014), zur Diversifizierung in der Landnutzung beitragen (HAUGHTON et al., 2016) und die Biodiversität in der Agrarlandschaft fördern (blütenbesuchende Insekten, Säugetiere) sowie aufgrund von Bodenruhe und extensiver Bewirtschaftung zum Bodenschutz beitragen. Hierzu zählen insbesondere Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum*), Szarvasi (*Agropyron elongatum*), Sida (*Sida hermaphrodita*), Switchgras (*Panicum virgatum*), Igniscum (*Fallopia sachalinensis*), Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*), Miscanthus (e.g. *Miscanthus × giganteus*) oder Wildpflanzenmischungen. Diese zumeist ligno-cellulosereichen Pflanzen werden für eine Dauer von 10 bis 20 Jahren angebaut und gelten allgemein als anspruchslose Kulturen, die lediglich Anbauprobleme in einer 1–3-jährigen Etablierungsphase aufweisen. Sie gelten weiterhin allgemein als trockenresistent, besitzen einen geringen Nährstoffbedarf und können in der Praxis mit vorhandenen Maschinen bewirtschaftet werden. Als besondere Ökosystemdienstleistungen dieser Kulturen sind Kohlenstoff-(CO<sub>2</sub>-)Speiche-

rung, Gefügestabilisierung, Förderung der Bodenorganismen, Erosionsschutz sowie Grundwasserschutz zu nennen. Die Auswirkungen eines Anbaus dieser Dauerkulturen auf den Boden sind mit Ausnahme von Miscanthus und Switchgras noch weitgehend unerforscht, bzw. es sind bisher nur sehr wenige Forschungsergebnisse publiziert.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Auswirkungen des Anbaus von Durchwachsene Silphie unter Praxisbedingungen in Rheinland-Pfalz auf ausgewählte Parameter der Bodenqualität zu untersuchen und damit einen Blick auf die Bodenbedingungen bei künftigen Landnutzungssystemen zu wagen. Zentrale Ziele des Anbaus von 2G Bioenergiepflanzen aus bodenkundlicher Sicht sind Humusspeicherung und Gefügestabilisierung sowie die Förderung der (Boden)Biodiversität mit den hiermit gekoppelten nachgeschalteten Ökosystemdienstleistungen. Hierzu wurden für den vorliegenden Beitrag Ergebnisse aus Feldvergleichen insbesondere von Humusgehalten, Aggregatstabilitätswerten und bodenbiologischen Eigenschaften zwischen Mais- und Silphieflächen ausgewertet.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Standorte

Die hier vorgestellten Vergleichsuntersuchungen von Mais und einigen Dauerkulturen zur Biomasseproduktion entstammen zum Teil dem Landwirtschaftlichen Versuchswesen Rheinland-Pfalz und wurden im Jahr 2011 an drei Standorten mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften und klimatischen Standortbedingungen eingerichtet. In Tab. 1 sind wichtige Angaben zu den Versuchsfeldern in Altrich, Simmern und Speyer aufgeführt.

Der Standort **Altrich** liegt nahe Wittlich, 40 km NE von Trier entfernt auf 170 m NN. Dominante Böden sind Braunerden aus Löss (WRB, 2014). Die Bodenart im Ap-Horizont ist ein schluffiger Lehm (Lu). Der Untersuchungsstandort **Simmern** liegt im Hunsrück, östlich von Trier, auf 365 m NN. Die Böden sind Pseudogleye und Derivate aus Devonschiefer; entsprechend ist die vorherrschende Bodenart im Ap-Horizont ein tonreicher Lehm (Lt3). Standort **Speyer** liegt in der Nähe der LUFA Speyer auf 99 m in der Rheinebene. Dominante Böden sind Auenbraunerden (Fluvisole) aus dem Rhein-Alluvium. Als Bodenart dominiert ein schluffiger Sand (Su2). Alle drei Standorte unterscheiden sich darüber hinaus deutlich in der Jahresmitteltemperatur und den Jahresniederschlägen (Tab. 1).

Des Weiteren werden ausgewählte Ergebnisse einer regionalen Erhebung von perennierenden Energiepflanzen unter Praxisbedingungen in der Region Trier/Saarland/Luxemburg vorgestellt.

### 2.2 Versuchsaufbau

Die Versuche zu den Dauerkulturen des Versuchswesens Rheinland-Pfalz starteten im Frühjahr 2011 an den drei verschiedenen Standorten. An jedem Standorte wurden

Tab. 1. Ausgewählte Kenndaten der drei Untersuchungsstandorte in Rheinland-Pfalz

Ort	Bodentyp (Ausgangsmaterial)	Bodenart Ap Hor. (0–25 cm)	Vorfrucht (2010)	NN	NS	T	Mais/GrRo	Silphie
				m	mm	°C	Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> ) #	
Altrich	Braunerde (Löss)	Lu	WW	170	710	8,9	139,7	153,8
Simmern	Pseudogley (Devonschiefer)	Lt3	WG	365	664	7,8	141,7	108,3
Speyer	Fluvisol (Alluvium)	Su2	WR	99	583	10,0	56,2	80,5

#: Mittel von 5 Jahren (2011 bis 2015; Quelle: Jahresbericht des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz, 2016)

die Kulturen in vierfacher Wiederholung beprobt. Silphie (*Silphium perfoliatum*) wurde ebenso wie eine Reihe weiterer Dauerkulturen mit Mais (*Zea mays*; in Rotation mit Grünroggen (*Secale cereale*)) verglichen. Die jeweilige Versuchsfläche jeder Wiederholung betrug 15 m Länge und 4,5 m Breite, somit 67,5 m<sup>2</sup>. Bodenbewirtschaftungsmaßnahmen, wie Bodenbearbeitung, Saat, Düngung und Ernte wurden in ortsüblicher Weise durch das Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz durchgeführt. So wurden zu Versuchsbeginn zum Beispiel 160 kg ha<sup>-1</sup> N gedüngt.

Für die Praxisuntersuchungen im Großraum Trier/Saarland/Luxemburg stehen insgesamt 115 Vergleichsflächen in einem Nutzungsgradienten von Mais, einigen Dauerkulturen sowie Grünlandbeständen zur Verfügung und umfassen ein breites Spektrum an Ausgangssubstraten und klimatischen Gegebenheiten (MAKSELON, 2016). Für diesen Beitrag wurden von den verschiedenen Dauerkulturen ausschließlich die Ergebnisse der Kulturen Mais und Durchwachsene Silphie ausgewertet.

### 2.3 Probennahme

Die Bodenprobennahme für die bodenchemischen und -mikrobiologischen Analysen erfolgte im Frühjahr 2015. Insgesamt wurden im Versuchswesen jeweils 4 Feldwiederholungen beprobt. Die Entnahme von Proben für die Streuanalysen erfolgte im Herbst 2014. Hierzu wurden Stoppelreste von Mais und Durchwachsene Silphie von der Bodenoberfläche gesammelt. Die Felduntersuchungen der Regenwurm-Losung, als auch der Bait-lamina Fraßtest, wurden ebenfalls im Herbst 2014 durchgeführt. Für die Praxisuntersuchungen im Großraum Trier/Saarland/Luxemburg standen jeweils 12 Feldwiederholungen zur Verfügung. Die Bodenproben wurden auf < 2 mm gesiebt. Teilproben wurden entweder für bodenchemische Analysen luftgetrocknet oder feldfrisch auf 40–60% WHK<sub>max</sub> für bodenmikrobiologische Analysen eingestellt. Die Pflanzenstreu wurde bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend gemahlen (Fritsch Pulverisette, Idar-Oberstein).

### 2.4 Analysenmethoden

**2.4.1 Labormethoden.** Die pH Werte wurden potentiometrisch in 0,01 M CaCl<sub>2</sub> mittels Glaselektrode gemessen. Die Gehalte an organischem Gesamtkohlenstoff und Gesamtstickstoff in Böden (C-Boden, N-Boden) und Residualstreu (C-Res, N-Res) wurden simultan mittels CHN EuroEA Elementaranalyse erfasst (HekaTech, Wegberg, Germany). Die Bestimmung der Aggregatstabilität wurde nach HARTGE und HORN (1989) durchgeführt. Die Messung beruht auf der Widerstandskraft natürlicher Bodenaggregate gegenüber der zerstörenden Wirkung von Niederschlagswasser. Als Messgröße für den Zerfall wird der gewogene mittlere Durchmesser ( $\Delta$ GMD) bestimmt, der mit sinkender Aggregatstabilität steigt.

Die Gehalte an mikrobieller Biomasse (C-mik) und mikrobiell gebundenem N (N-mik) wurden an feldfrischen Proben mittels Chloroform-Fumigations-Extraktionsmethode nach VANCE et al. (1987) bestimmt. Die Gehalte an organischem C und N in den Extrakten wurden mit einem TOC-TN Analysator (Shimadzu TOC-V + TNN) gemessen.

Für die Biodiversitätsuntersuchungen der Bodenmikroflora wurden einige funktionelle Gene sowie bedeutende Bakterien-Phyla im Boden mittels qPCR an den Proben der Praxisuntersuchungen aus der regionalen Studie ermittelt. Bei den funktionellen Genen wurden amoA (Nitrifikation; NH<sub>4</sub><sup>+</sup> zu NH<sub>2</sub>OH) und nifH (N-Fixierung; N<sub>2</sub> zu NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) analysiert (ROTHAUWE et al., 1997; RÖSCH et al., 2002). Ebenfalls mittels qPCR und entsprechender Primer wurden die Bakteriengruppen Bacteroidetes, Acidobacteria, Firmicutes, Verrucomicrobia und  $\beta$ -Proteobacteria bestimmt.

**2.4.2 Felduntersuchung der Regenwurmaktivität.** Die Untersuchung der Regenwurmaktivität wurde an den drei Standorten in den Varianten Mais/Grünroggen (Mais/GrRo)-, Silphie- und zusätzlich in Szarvasi-Beständen durchgeführt. Die Regenwurmaktivität wurde näherungsweise anhand der Masse der Regenwurmlosung auf der Bodenoberfläche erfasst. Hierzu wurden in allen Test-

flächen die Losungen in einem 1 m<sup>2</sup> Rahmen gesammelt und anschließend im Labor bei 105°C für 24 Stunden getrocknet und danach gewogen (g TS m<sup>-2</sup>).

**2.4.3 Bait-lamina Fraßaktivität.** Die Bestimmung der Fraßaktivität als Maß für die allgemeine biologische Aktivität wurde mittels Köderstreifentest (Bait-lamina Test) nach VON TÖRNE (1990) erfasst. Die Messungen waren aufgrund beschränkter Kapazitäten auf die beiden Vergleichspaare Mais/GrRo und Durchwachsene Silphie und auf den Standort Altrich beschränkt. Auf jeder Testfläche wurde ein Set aus 16 baits (4 × 4) mit jeweils 16 gefüllten Löchern vertikal in die oberen 10 cm Boden exponiert. Nach 14 Tagen Expositionsdauer wurden die Teststäbe entnommen und im Labor die Anzahl offener Löcher gezählt. Für jede Testfläche lagen demnach Informationen über die Fraßaktivität der Bodenorganismen aus jeweils 256 Ja/Nein-Zählungen vor. Die Ergebnisse werden in Prozent Fraßaktivität angegeben.

**2.4.4 Statistische Analyse.** Da die ermittelten Daten weder normal verteilt waren (Shapiro-Wilk-Test) noch Varianzhomogenität aufwiesen (Levene-Test) wurden generell nicht-parametrische Tests verwendet (SPSS 20.1). Paarweise Vergleiche der beiden Kulturen Mais und Durchwachsene Silphie erfolgten mittels Mann-Whitney U-Test. Multiple Vergleiche der drei Standorte erfolgten mittels Kruskal-Wallis H-Test und nachgeschaltetem post-hoc U-Test. Als Signifikanzniveau wurde  $\alpha = 0,05$  festgelegt.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Bodenreaktion und C-Gehalte verschiedener Kompartimente

Die pH-Werte der Versuchsböden variierten standortbedingt zwischen 4,6 und 5,9. Signifikante Unterschiede

zwischen den beiden Kulturen Mais/GrRo und Durchwachsene Silphie waren nicht zu erkennen (Tab. 2). Dagegen wiesen an allen drei Standorten die Stoppelreste der Silphiebestände hoch signifikant erhöhte (25 bis 40%) C-Gehalte auf. Die absoluten Boden-C-Gehalte waren in dem fünfjährigen Versuchszeitraum leicht um 0,3 (Altrich) bis deutlich um 1,4 mg g<sup>-1</sup> TS (Simmern) erhöht. Dies entspricht einer relativen Veränderung im Corg-Gehalt der Böden von 2 bis 8% in nur fünf Jahren. Am Standort Speyer waren die Corg-Gehalte unter Durchwachsene Silphie allerdings geringer, als unter Mais/GrRo (Tab. 2). An allen Standorten zeigten sich wiederum deutlich und signifikant erhöhte Gehalte an mikrobieller Biomasse unter Silphieanbau. Sowohl die Gehalte an Boden-C als auch an mikrobieller Biomasse zeigten eine signifikante Abhängigkeit zu den unterschiedlichen Standortbedingungen (Tab. 2).

#### 3.2 N-Gehalte und C/N-Verhältnisse verschiedener Kompartimente

Im Gegensatz zu den C-Gehalten der Reststreu in den beiden Beständen, waren die N-Gehalte in den Silphiebeständen niedriger als in den Mais/GrRo-Beständen. Aufgrund der Streuung in den Messwerten waren diese Unterschiede nicht signifikant (Tab. 3). In der Konsequenz waren die C/N-Verhältnisse der Stoppelreste in den Silphiebeständen deutlich und signifikant erhöht. Auch die Boden-N-Gehalte waren an allen drei Versuchstandorten unter Durchwachsene Silphie signifikant geringer als unter Mais/GrRo (Tab. 3). Dadurch zeigte sich auch an allen Standorten ein leicht erhöhtes C/N-Verhältnis in den Böden unter Durchwachsene Silphie. Die Unterschiede im mikrobiellen Biomasse-N waren insgesamt sehr gering und nicht signifikant. Signifikante standortkundliche Unterschiede zeigten sich für die Boden-N und N-mik Gehalte, indem die geringsten Gehalte am Standort Speyer gemessen wurden (Tab. 3).

**Tab. 2. Boden pH-Werte und C-Gehalte verschiedener Kompartimente in den Kulturen Mais/Grünroggen (Mais/GrRo) und Durchwachsene Silphie: Stoppelreste (C-Res), Boden (C-Boden) und bodenmikrobielle Biomasse (C-mik). Nicht-parametrischer Mann-Whitney U-Test der Effekte der beiden Kulturen (n = 4) und Standortvergleiche mittels Kruskal-Wallis H-Test (n = 12). Ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (p < 0,05)**

Standort	Kultur	pH	C-Res	C-Boden	C-mik
		0.01 M CaCl <sub>2</sub>	mg g <sup>-1</sup> TS		mg kg <sup>-1</sup> TS
Altrich (A)	Mais/GrRo	5,9 ± 0,05 a	334,5 ± 24,5 a	12,3 ± 0,31 a	181,6 ± 13 a
	Silphie	5,7 ± 0,06 a	413,8 ± 6,6 b	12,6 ± 0,34 a	199,8 ± 10 b
Simmern (S)	Mais/GrRo	5,4 ± 0,09 a	314,5 ± 9,1 a	16,8 ± 0,90 a	171,7 ± 5 a
	Silphie	5,4 ± 0,12 a	439,2 ± 18,8 b	18,2 ± 0,70 a	176,4 ± 8 a
Speyer (Sp)	Mais/GrRo	4,6 ± 0,11 a	305,7 ± 19,0 a	11,0 ± 0,46 a	65,9 ± 6 a
	Silphie	4,8 ± 0,03 a	430,9 ± 10,3 b	10,0 ± 0,34 a	76,3 ± 2 b
H-Test Standorte (n = 12)		,000 (A, S > Sp)	,331	,000 (S > A > Sp)	,000 (A, S > Sp)

**Tab. 3.** N-Gehalte und C/N-Verhältnisse verschiedener Kompartimente in den Kulturen Mais/Grünroggen (Mais/GrRo) und Durchwachsene Silphie: Stoppelreste (N-Res, C/N-Res), Boden (N-Boden; C/N-Boden), und bodenmikrobiell gebundener Biomasse-N (N-mik). Nicht-parametrischer Mann-Whitney U-Test der Effekte der beiden Kulturen (n = 4) und Standortvergleiche mittels Kruskal-Wallis H-Test (n = 12). Ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten (p < 0,05)

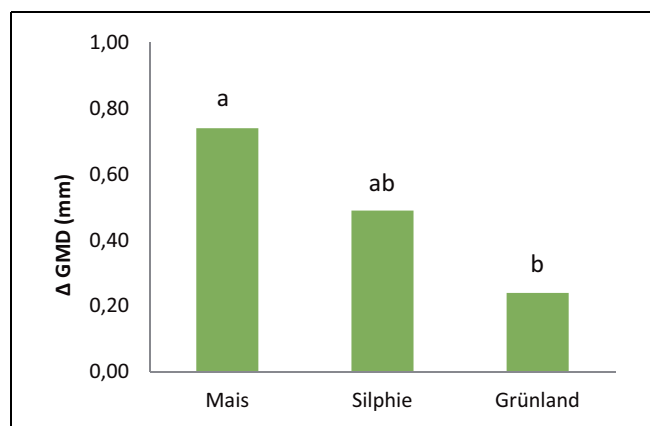
Standort	Kultur	N-Res	C/N-Res	N-Boden	C/N-Boden	N-mik
		----- mg g <sup>-1</sup> TS -----				mg kg <sup>-1</sup> TS
Altrich (A)	Mais/GrRo	12,7 ± 2,3a	26,3 ± 5,3a	1,58 ± 0,04b	7,8 ± 0,84a	37,4 ± 1,4a
	Silphie	10,0 ± 0,73a	41,4 ± 4,0b	1,31 ± 0,04a	9,6 ± 1,1a	38,1 ± 1,7a
Simmern (S)	Mais/GrRo	9,4 ± 0,50 a	33,5 ± 8,6a	2,01 ± 0,08a	8,1 ± 0,13a	35,9 ± 1,7a
	Silphie	8,5 ± 0,79 a	51,8 ± 8,0b	1,98 ± 0,01a	9,2 ± 0,14a	32,0 ± 1,1a
Speyer (Sp)	Mais/GrRo	8,7 ± 0,43 a	37,7 ± 2,5a	1,20 ± 0,03b	9,2 ± 0,27a	9,7 ± 0,44 a
	Silphie	10,3 ± 0,63a	43,9 ± 1,9b	1,00 ± 0,02a	10,0 ± 0,2a	8,7 ± 1,1 a
H-Test Standorte (n = 12)		,404	,382	,039 (A, S > Sp)	,547	,000 (A, S > Sp)

### 3.3 Aggregatstabilität des Bodens

Die Ergebnisse der Aggregatstabilität der Böden entstammen den Praxisuntersuchungen (Nutzungsgradient Mais – Durchwachsene Silphie – Grünland) in der Region Trier/Saarland/Luxemburg. Die Maisflächen wiesen mit einem mittleren gewogenen Durchmesser von 0,73 mm die geringste Aggregatstabilität auf (Abb. 1). Grünland hingegen kennzeichnete sich im Vergleich dazu durch eine signifikant höhere Aggregatstabilität mit  $\Delta$ GMD = 0,24 mm aus. Die Silphiebestände befanden sich mit  $\Delta$ GMD = 0,43 mm zwischen diesen beiden Landnutzungssystemen. Aufgrund der methodisch bedingten Streuung der Messwerte war der Unterschied zwischen Grünland und Durchwachsene Silphie sowie zwischen Durchwachsene Silphie und Mais statistisch nicht signifikant (Abb. 1).

### 3.4 Mikrobielle und funktionelle Diversität

Alle untersuchten mikrobiellen Parameter DNA-Gesamtgehalte und absolute Anzahl an Kopien der Gene sowie



**Abb. 1.** Aggregatstabilität der Böden verschiedener Landnutzungssysteme. Ungleiche Buchstaben kennzeichnen statistisch signifikante Unterschiede (p < 0,05; Bonferroni-Test; n = 22).

der einzelnen Bakteriengruppen waren in den Silphiebeständen im Vergleich zu Mais deutlich erhöht (Tab. 4). Einzige Ausnahme bildete das Nitrifikations-Gen amoA, deren Kopienzahl unter Durchwachsene Silphie leicht verringert war. Die DNA-Gehalte waren relativ um 30%, die der einzelnen Bakteriengruppen um 25 bis 45% in den Silphiebeständen erhöht (Tab. 4).

### 3.5 Losungsproduktion von Regenwürmern

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen zur Losungsproduktion in den Beständen der drei Kulturpflanzen an den drei Standorten des Versuchswesens waren insgesamt sehr indifferent (Abb. 2). Die höchste Losungsmasse wurde in der Mais/GrRo-Fläche in Altrich gemessen, während die Losungsmasse in den Silphie- und Szarvasi-Beständen in Simmern und Speyer signifikant höher war. Die mittlere Losungsmasse aller drei Standorte nahm in der Reihenfolge Altrich > Simmern > Speyer ab.

### 3.6 Bait-lamina Fraßaktivität

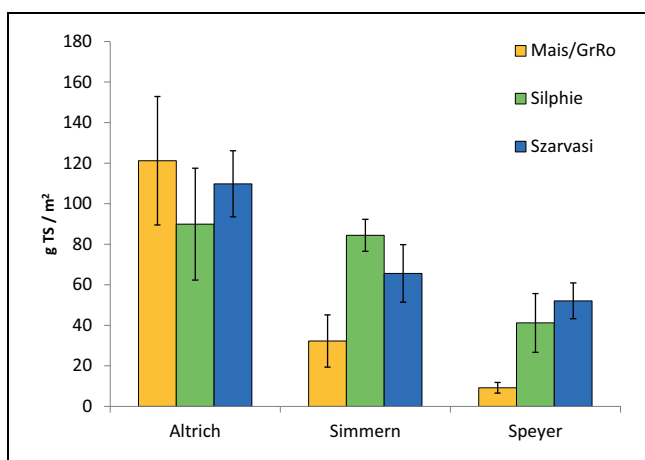
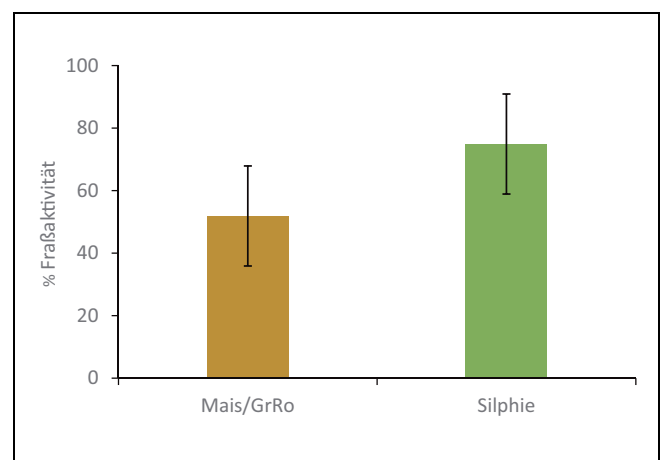
Die prozentuale Fraßaktivität in den Mais/GrRo- und Silphiebeständen am Standort Altrich variierte zwischen 50 und 75% (Abb. 3). Damit war die allgemeine biologische Aktivität der Bodenorganismen unter beiden Kulturen insgesamt sehr hoch. Unter Durchwachsene Silphie war sie im Vergleich zur Mais/GrRo-Variante absolut um 25% erhöht. Aufgrund der großen Streuung der Messwerte ergaben sich allerdings keine signifikanten Unterschiede.

## 4 Diskussion

Kulturlandschaften unterliegen einer dynamischen Entwicklung durch die vielfältigen Ansprüche der Menschen an ihre Lebensräume, dem Klimawandel und durch Biodiversitätsverluste. Die Förderung des Anbaus von Energiepflanzen zur Biomasseproduktion und die dadurch bedingte Schonung fossiler Ressourcen ist eine politische

**Tab. 4.** Mittlere ( $\pm$  S.D.) Gehalte an DNA und Kopienzahl funktioneller Gene sowie Bakterien-Phyla in Böden unter Mais- und Silphieanbau ( $n = 5-12$ ) in der Großregion Trier/Saarland/Luxemburg

		Mais	Silphie
DNA	(mg g <sup>-1</sup> Boden)	17,3 $\pm$ 2,5	22,9 $\pm$ 4,2
amoA	(Kopien g <sup>-1</sup> Boden)	29,0 $\pm$ 8,2	24,6 $\pm$ 8,6
nifH	(Kopien g <sup>-1</sup> Boden)	73,7 $\pm$ 15,8	97,6 $\pm$ 18,7
Bacterioidetes	(Kopien g <sup>-1</sup> Boden)	6034,3 $\pm$ 1251	7669,6 $\pm$ 1536
Acidobacter	(Kopien g <sup>-1</sup> Boden)	3656,8 $\pm$ 724	6155,8 $\pm$ 1391
Firmicutes	(Kopien g <sup>-1</sup> Boden)	6334,2 $\pm$ 1345	10741,9 $\pm$ 2899
Verrucomicrobia	(Kopien g <sup>-1</sup> Boden)	3858,9 $\pm$ 731	5939,4 $\pm$ 1155
$\beta$ -Proteobacteria	(Kopien g <sup>-1</sup> Boden)	3362,1 $\pm$ 588	4879,9 $\pm$ 844

**Abb. 2.** Mittlere Masse der Regenwurmlosung (g TS m<sup>-2</sup>  $\pm$  S.D.) in Mais/Grünroggen (Mais/GrRo)-, Silphie- und Szarvasibeständen an den drei Untersuchungsstandorten Altrich, Simmern und Speyer. Ungleiche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ; Mann-Whitney-U-Test;  $n = 4$ ).**Abb. 3.** Mittlere prozentuale Fraßaktivität ( $\pm$  S.D.) im Köderstreifenfest nach VON TÖRNE (1990) in Mais/Grünroggen (Mais/GrRo)- und Silphiebeständen am Untersuchungsstandort Altrich.

Folge des Klimawandels. Vor diesem Hintergrund zielt der Anbau von perennierenden Energiepflanzen auf einen Beitrag zum standortgerechten Anbau regenerativer Energien und auf die Förderung der Biodiversität in der Landwirtschaft (SCHRAMA et al., 2016).

In diesem Kontext haben die Ergebnisse der vorliegenden Vergleichsuntersuchungen von Mais (1G) und Durchwachsene Silphie (2G) unter Praxis- oder praxisnahen Anbaubedingungen nach fünfjähriger Versuchsdauer zum Teil einen deutlichen Trend gezeigt, sind andererseits aber auch noch indifferent und in der Aussage eingeschränkt, und es bedarf hier noch längerfristiger Untersuchungen.

Dauerkulturen für die Biomasseproduktion hinterlassen nach der Ernte verglichen mit Mais ligno-cellulose-reiche Stoppelreste. Dies zeigte sich auch in der vorliegenden Untersuchung an den stark erweiterten C/N-Verhältnissen der Reststreu in den Silphiebeständen an allen drei Versuchsstandorten. Da gleichfalls die Erträge von Durchwachsene Silphie hoch und standortsbedingt höher

als bei Mais liegen können (siehe hierzu Tab. 1), wird dem Boden eine große Menge cellulosereicher Reststreu zurückgeführt. Aus früheren Untersuchungen (EMMERLING, 2014) und aus SCHORPP und SCHRADER (2016) ist bekannt, dass unter Durchwachsene Silphie und anderen Dauerkulturen die Regenwurmfaua gefördert wird, so dass ein Einbau dieser Streu in den Boden speziell durch anezische Organismen angenommen werden kann. Hierdurch wird erklärlich, dass bei gleichzeitiger Zunahme der mikrobiellen Biomasse und ihrer Aktivität sowie weiterer Organismen der Humusgehalt der Böden unter Dauerkulturen zunimmt (FELTEN und EMMERLING, 2012). In den vorliegenden Vergleichsuntersuchungen war der Humus-(Corg-)Gehalt der Böden unter Durchwachsene Silphie relativ um 2–8% im Versuchszeitraum von lediglich fünf Jahren angestiegen. Am Standort Speyer, der durch sandige Böden und trockene Witterung gekennzeichnet ist, lagen die Corg-Gehalte unter Durchwachsene Silphie im Mittel um absolut 1% oder relativ um 10% niedriger als unter Mais. Dieses Ergebnis ist eventuell

dadurch zu erklären, dass der Aufwuchs von Durchwachsene Silphie insbesondere in den ersten Versuchsjahren im Vergleich zum Mais unbefriedigend war und sich somit nach fünfjähriger Versuchsdauer kein erhöhter Humusaufbau zeigte.

Gewöhnlich weisen Böden einen stabilen Humusspiegel auf, der sich am gleichen Standort lediglich langfristig durch Nutzungsänderung, intensive organische Düngung, pfluglose Bearbeitung oder Zwischenfrüchte/Begrünung erhöhen lässt. Insofern ist die nachgewiesene Steigerung der Humusgehalte unter Durchwachsene Silphie im genannten Versuchszeitraum als sehr hoch einzuschätzen. Lange bevor eine Erhöhung der Corg-Gehalte nachweisbar ist, steigen gewöhnlich die Gehalte an mikrobieller Biomasse in Böden an. Dieser Umstand wird häufig durch das Verhältnis Cmik/Corg (%) ausgedrückt. In Ackerböden liegt dieses Verhältnis in Abhängigkeit von den Standortbedingungen im Mittel zwischen 0,6 und 2%; d.h. der Anteil der mikrobiellen Biomasse am gesamten organischen Kohlenstoff beträgt lediglich maximal 2%. Während sich für den Standort Simmern kein Unterschied im Cmik/Corg-Verhältnis zwischen Mais- und Silphiebestände zeigte (beide 1%), war das Verhältnis unter Durchwachsene Silphie in Altrich und Speyer deutlich erhöht (1,47/1,59; 0,60/0,76; siehe auch Tab. 2). Dies ist als ein Hinweis zu deuten, dass der Humusgehalt der Böden unter Durchwachsene Silphie künftig weiter ansteigen wird, und dass darüber hinaus die Qualität der organischen Bodensubstanz zunimmt, denn die mikrobielle Biomasse repräsentiert den aktiven, leicht umsetzbaren Pool an Corg im Boden.

Eine Erhöhung der organischen Bodensubstanz und eine bessere Qualität kann auch für die erhöhten Kopienzahlen an ausgewählten Bakteriengruppen und funktioneller Gene in Zusammenhang gebracht werden, da sowohl Bodenbakteriengemeinschaften als auch wichtige Stoffwechselprozesse in Böden, wie zum Beispiel Nitrifikation oder N-Fixierung, direkt und indirekt mit der organischen Substanz des Bodens gekoppelt sind.

Langjährige Bodenruhe, erhöhter Streuanfall auf der Bodenoberfläche und extensive Bewirtschaftung in den Beständen von Dauerkulturen führen zu einer höheren Anzahl wichtiger Bodentiere, wie zum Beispiel Regenwürmer oder Collembolen, sogenannter Schlüsselorganismen in Böden (GARDINER et al., 2010; EMMERLING, 2014; FELTEN und EMMERLING, 2011; SCHORPP und SCHRADER, 2016). Auch in den hier vorgestellten Vergleichsuntersuchungen war eine deutliche Förderung der Regenwurmartivität (Losungsgewichte) und der allgemeinen biologischen Aktivitäten (Fraßaktivität) im Feld zu erkennen.

Wie die Ergebnisse der Aggregatstabilitätsmessungen in der vorliegenden Studie belegen, führen sämtliche Faktoren wie Bodenruhe, Streuauflage, höhere Gehalte an organischer Bodensubstanz sowie erhöhte Aktivität von Mikroorganismen und Bodentieren zu einer Gefügestabilisierung der Böden unter Dauerkulturen und damit zu einer signifikant geringeren Erosionsdisposition (CHIMENTO et al., 2016). Aus Untersuchungen von weiteren Dauerkulturen ist darüber hinaus bekannt, dass die

Auswaschung von Stickstoff- und Phosphorverbindungen in das Grundwasser oder angrenzende Fließgewässer im Vergleich zu einjährigen Kulturen drastisch reduziert ist und somit der Anbau von Dauerkulturen einen aktiven Beitrag zum Gewässerschutz darstellt (DIMITRIOU et al., 2012).

Insgesamt konnte mit der vorliegenden Untersuchung auch der besondere Stellenwert von Standortfaktoren für die Beurteilung der Auswirkung des Anbaus von Dauerkulturen am Beispiel von Durchwachsene Silphie für den Boden gezeigt werden. Insbesondere durch die Berücksichtigung verschiedener Böden und Bodenarten sowie unterschiedlicher klimatischer Wachstumsbedingungen ergaben sich zum Teil divergierende, standortabhängige Ergebnisse, die für manche Indikatoren keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen zulassen. Im Mittel der drei Standorte des Versuchswesens Rheinland-Pfalz sowie aus dem Großraum Trier/Saarland/Luxemburg lässt sich aber festhalten, dass der Anbau von Durchwachsene Silphie (sowie weiterer 2G Dauerkulturen) einen signifikanten Beitrag zum Boden- und Klimaschutz zu leisten vermag.

### Schlussfolgerungen

Der Anbau von Dauerkulturen für die Biomasseproduktion, wie zum Beispiel die Durchwachsene Silphie, wirkt sich allgemein positiv bezüglich zahlreicher Ökosystemdienstleistungen aus: Bodenschutz (Humusspeicherung, Gefügestabilisierung, Bodenbiologie), Erosionsschutz, Gewässerschutz sowie Biodiversitäts- und Nützlingsförderung. Da die Kulturen darüber hinaus auch ein hohes Ertrags- und Methanpotenzial aufweisen – das biochemische Methanpotenzial liegt zumeist bei 80% von Silomais und höher – stellt der Anbau von Durchwachsene Silphie und weiterer Dauerkulturen zugleich ein ‚grünes‘, effizientes und innovatives Agrarsystem der Zukunft und damit eine förderwürdige Alternative zum vorherrschenden Bioenergieanbau dar.

### Danksagung

Für die vielfältige Unterstützung bei den Untersuchungen gilt mein besonderer Dank den Mitarbeitern/in Anna-Lena GRÜN, Axel SCHMIDT, Thorsten RUF sowie einigen HiWis und Studierenden im Fach Bodenkunde der Universität Trier, insbesondere Jennifer MAKSELON. Herrn Dr. VON FRANCKEN-WELZ und Herrn THIEHLEN (DLR Bitburg) sei ebenfalls für die vielfältige Unterstützung im Versuchswesen R-P gedankt.

### Literatur

CHIMENTO, C., M. ALMAGRO, S. AMADUCCI, 2016: Carbon sequestration potential in perennial bioenergy crops: the importance of organic inputs and its physical protection. *GCB Bioenergy* 8, 111-121.

- DIENSTLEISTUNGSZENTRUM LÄNDLICHER RAUM (DLR) RHEINLAND-PFALZ, 2016: Versuchsbericht Biomasse 2015, Bad Kreuznach, 35 S.
- DIMITRIOU, I., B. MOLA-YUDEGO, P. ARONSSON, 2012: Impact of short rotation coppice on water quality. *Bioenergy Research* **5**, 537-545.
- EMMERLING, C., 2014: Impact of land-use change towards perennial energy crops on earthworm population. *Applied Soil Ecology* **84**, 12-15.
- FELTEN, D., C. EMMERLING, 2011: Effects of bioenergy crop cultivation on earthworm communities – A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land-use intensity. *Applied Soil Ecology* **49**, 167-177.
- FELTEN, D., C. EMMERLING, 2012: Accumulation of *Miscanthus*-derived carbon in soils in relation to soil depth and duration of land-use under commercial farming conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **175**, 661-670.
- GARDINER, M.A., J.K. TUELL, R. ISAACS, J. GIBBS, J.S. ASCHER, D.A. LANDIS, 2010: Implications of three biofuel crops for beneficial arthropods in agricultural landscapes. *Bioenergy Research* **3**, 6-19.
- HARTGE, K.-H., R. HORN, 1989: Die physikalische Untersuchung von Böden. Stuttgart, Enke-Verlag.
- HAUGHTON, A.J., D.A. BOHAN, S.J. CLARK, M.D. MALLOTT, V. MALLOTT, R. SAGE, A. KARP, 2016: Dedicated biomass crops can enhance biodiversity in the arable landscape. *GCB Bioenergy*, doi: 10.1111/gcbb.12312.
- KRUSKA, V., C. EMMERLING, 2008: Flächennutzungswandel durch Biogaserzeugung – Regionale und lokale Erhebungen in Rheinland-Pfalz. *Naturschutz & Landschaftsplanung* **40**, 69-72.
- MAKSELON, J., 2016: Räumliche Darstellung von Bodeneigenschaften beim Anbau von Energiepflanzen/Dauerkulturen im Großraum Trier. Bachelorarbeit im Fachbereich VI Raum- und Umweltwissenschaften im Studiengang Umweltgeowissenschaften im Fach Bodenkunde, Universität Trier, 99.
- MAYER, S., F., P.A. GERIN, A. NOO, S. LEMAIGRE, D. STILMANT, T. SCHMIT, N. LECLECH, L. RUELLE, J. GENNEN, H. VON FRANCKEN-WELZ, G. FOUCART, J. FLAMMANG, M. WEYLAND, P. DELFOSSE, 2014: Assessment of energy crops alternative to maize for biogas production in the Greater Region. *Bioresource Technology* **166**, 358-367.
- RÖSCH, C., A. MERGEL, H. BOTHE, 2002: Biodiversity of denitrifying and dinitrogen-fixing bacteria in an acid forest soil. *Applied and Environmental Microbiology* **68**, 3818-3829.
- ROTHAUWE, J.H., K.P. WITZEL, W. LIESACK, 1997: The ammonia monooxygenase structural gene *amoA* as a functional marker: molecular fine-scale analysis of natural ammonia-oxidizing populations. *Applied and Environmental Microbiology* **63**, 4704-4712.
- SCHORPP, Q., S. SCHRADER, 2016: Earthworm functional groups respond to the perennial energy cropping system of the cup plant (*Silphium perfoliatum* L.). *Biomass and Bioenergy* **87**, 61-68.
- SCHRAMA, M., B. VANDECASTELLE, S. CARVALHO, H. MUYLLE, W.H. VAN DER PUTTEN, 2016: Effects of first- and second-generation bioenergy crops on soil processes and legacy effects on a subsequent crop. *GCB Bioenergy* **8**, 136-147.
- UBA, 2008: Umweltbundesamt (Hrsg.): Bodenschutz beim Anbau nachwachsender Rohstoffe. Empfehlung der „Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt“. Dessau, April 2008, 81 S.
- VANCE, E.D., P.C. BROOKES, D.S. JENKINSON, 1987: An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* **19**, 703-707.
- VON TÖRNE, E., 1990: Assessing feeding activities of soil-living animals. I: Bait-lamina-tests. *Pedobiologia* **34**, 89-101.
- WRB, 2014: World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO (Hrsg.), *World Soil Resources Report* **106**, Rome.