

Endbericht



„Erhaltung und Restituierung der Artenvielfalt in den Bergwiesen des Biosphärenreservats Rhön – Management der invasiven Stauden-Lupine (*Lupinus polyphyllus* Lindl.) in einem komplexen Schutzgebietssystem“

Berichtszeitraum	Projektbeginn	Projektlaufzeit	Aktenzeichen
01.04.2017 bis 30.11.2019	01.04.2017	24+8 Monate	33637/01-33/2

Prof. Dr. Dr. habil. Dr. h.c. (TSU) Annette Otte
Dr. Kristin Ludewig
M.Sc. Yves Klinger
M.Sc. Wiebke Hansen

Justus-Liebig-Universität Gießen
Professur für Landschaftsökologie und
Landschaftsplanung
IFZ - Interdisziplinäres Forschungszentrum
Heinrich-Buff-Ring 26-32
35392 Gießen

Prof. Dr. Michael Wachendorf
Dr. Frank Hensgen
Dr. Thomas Astor (geb. Möckel)
Dr. Kathrin Stenchly
M.Sc. Damian Schulze-Brüninghoff

Universität Kassel
Fachbereich Ökologische
Agrarwissenschaften
Steinstr. 19
37213 Witzenhausen

Kooperationspartner:

Biosphärenreservat Rhön
Bayerische Verwaltungsstelle
Oberwaldbehunger Str. 4
97656 Oberelsbach
Ansprechpartner:
Regierungsdirektor Michael Geier
und Dipl. Biol. Torsten Kirchner

Biosphärenreservat Rhön
Hessische Verwaltungsstelle
Groenhoff Haus Wasserkuppe
36129 Gersfeld
Ansprechpartner:
Dipl.-Ing. agr. Torsten Raab und Ewald
Sauer

Landschaftspflegeverband Rhön-Grabfeld
Spörleinstraße 11
97616 Bad Neustadt a.d.S
Ansprechpartnerin: Dr. Susanne Wüst

Gießen, den 26.2.2020

.....
Prof. Dr. Dr. habil. Dr. h.c. (TSU) Annette Otte

Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33637/01	Referat	33/2	Fördersumme	459.000 €
Antragstitel		Erhaltung und Restituierung der Artenvielfalt in den Bergwiesen des Biosphärenreservats Rhön - Management der invasiven Stauden-Lupine (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.) in einem komplexen Schutzgebietssystem			
Stichworte		Bergwiesen, <i>Lupinus polyphyllus</i> , Neophyten, Mittelgebirge, Rhön			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 + 8 Monate	01.06.2017	30.11.2019			
Zwischenbericht	nach 12 Monaten				
Bewilligungsempfänger		Justus-Liebig-Universität Giessen Professur für Landschaftsökologie und Landschaftsplanung Heinrich-Buff-Ring 26-32 35392 Giessen		Tel	0641 99 37160
				Fax	0641 99 37169
				Projektleitung Prof. Dr. Dr. A. Otte	
				Bearbeiter Y. Klinger, W. Hansen, Dr. K. Ludewig	
Projektpartner		AG Prof. Dr. Michael Wachendorf - Universität Kassel, Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe, Steinstr. 19, 37213 Witzenhausen Bearbeiter: D. Schulze-Brüninghoff, Dr. F. Hensgen, Dr. K. Stenchly, Dr. T. Astor			
Kooperationspartner		Biosphärenreservat Rhön – Bayerische Verwaltungsstelle Biosphärenreservat Rhön – Hessische Verwaltungsstelle Landschaftspflegeverband Rhön Grabfeld			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>In der Rhön führt die invasive Stauden-Lupine (<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.) zu dauerhaften Veränderungen von Ökosystemprozessen und -funktionen (z. B. Stickstoffeintrag und Veränderung der Vegetationsstruktur). Auf den invadierten Wiesen sind eine Verschiebung der Pflanzenarten hin zu hochwüchsigen, ruderalen Artengruppen sowie ein Rückgang der Artenzahl festzustellen. In diesem Projekt wird ein Konzept zur dauerhaften Restituierung und Erhaltung des artenreichen Grünlands entwickelt und erprobt. In zwei Explorationsvorhaben von 2015-2016 wurden bereits das Ausmaß der aktuellen Verbreitung von <i>L. polyphyllus</i> quantifiziert, die Potentiale zur Restituierung der artenreichen Bergwiesen für die Erhaltung der Artenvielfalt abgeschätzt sowie eine mögliche energetische Nutzung des Aufwuchses analysiert. In der jetzt abgeschlossenen, ersten Hauptphase wurde die Bergwiesen-Restituierung durch die Aktivierung der Samenbank und die Übertragung diasporenhaltigen Mahdguts erprobt (AP 1), die Ausbreitungsprozesse von <i>L. polyphyllus</i> auf Landschaftsebene analysiert (AP 2), die Effekte eines für die Reduktion von <i>L. polyphyllus</i> geeigneten Schnittregimes auf die bioenergetische Verwendung des jährlichen Grünschnitts von Bergwiesen untersucht (AP 3) und die Erfassung der Dynamik von <i>L. polyphyllus</i> durch Methoden der Fernerkundung erprobt (AP 4).</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Das Untersuchungsgebiet liegt im Naturraum der Hohen Rhön.</p> <p>AP 1: Mögliche Spenderflächen für die Mahdgutübertragung wurden identifiziert. In einem Feldexperiment wurde die Bergwiesen-Restituierung durch die Aktivierung der Samenbank und die Übertragung diasporenhaltigen Mahdguts erprobt.</p> <p>AP 2: Für die Untersuchungen zur Ausbreitungsbiologie von <i>L. polyphyllus</i> wurden unterschiedliche Vektoren und Ausbreitungswege (Ballochorie, Hemerochorie, Zoochorie, Hydrochorie) analysiert.</p> <p>AP 3: Die Auswirkungen des Schnittzeitpunktes und des <i>L. polyphyllus</i>-Anteils wurde unter Berücksichtigung der Grünlandvegetationstypen auf die Parameter der energetischen Verwertbarkeit untersucht.</p> <p>AP 4: Die Untersuchungsflächen wurden mit Hilfe eines 3D-Laser, eines Feldspektrometers sowie drohnenbasierter RGB-, Thermal- und Hyperspektralsensoren fernerkundlich vermessen.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de</small>					

Ergebnisse und Diskussion

AP 1 - Bergwiesen-Restituierung durch Mahdgutübertragung und Aktivierung der Samenbank

Geeignete Spender- und Empfängerflächen für die Bergwiesen-Restituierung wurden identifiziert. Dadurch konnte der Versuch zur Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung wie geplant durchgeführt werden. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Vegetationstypen trotz der starken Eingriffe erhalten blieben. Weiterhin zeigt sich eine große Variabilität hinsichtlich der Deckung von *L. polyphyllus* auf den Untersuchungsflächen. Dies weist darauf hin, dass neben den angewandten Behandlungen der Flächen die Witterung einen großen Einfluss auf die *L. polyphyllus*-Deckung hat.

AP 2 - Ausbreitungsprozesse von *L. polyphyllus* auf Landschaftsebene:

Das Selbstausbreitungspotential (Ballochorie) von *L. polyphyllus* ist sehr hoch, die Samen werden im Freiland über drei Meter weit geschleudert, die Samenschüttung erfolgt über mehrere Monate. Bei der Ausbreitung über Schafkot (Zoochorie) konnten nur wenige Individuenzahlen nachgewiesen werden. Bei der Beprobung der Mähwerke (Hemerochorie) wurden im ersten Untersuchungsjahr nur wenige Individuen nachgewiesen. Bei einer erneuten Beprobung im Jahr 2019 wurden bei späteren Mahdterminen allerdings deutlich mehr *L. polyphyllus*-Samen nachgewiesen, das Ausbreitungspotential ist also stark von der Phänologie zum Zeitpunkt der Mahd abhängig. Bei der Ausbreitung über Gewässer (Hydrochorie) konnte nur eine mäßige Schwimmfähigkeit von *L. polyphyllus*-Samen nachgewiesen werden, auch im Freiland wurden nur wenige Samen nachgewiesen.

AP 3 - Effekte des Schnittregimes auf die bioenergetische Verwendung des Bergwiesen-Grünschnitts

Der Schnittzeitpunkt hatte keinen maßgeblichen Effekt auf den Heizwert der Biomassen, welcher im Mittel zwischen 15.5 (Goldhaferwiese) und 17.8 MJ·kg⁻¹ TM (Borstgrasrasen, BGR) lag. Einen Effekt des *L. polyphyllus*-Vorkommens auf den Heizwert gab es nur für die Biomassen aus BGR. Durch Aufbereitung der lupinendurchsetzten Biomassen mittels IFBB-Verfahren konnte deren Heizwerte signifikant erhöht werden. Die Vergärung der Biomasse in Batchversuchen erbrachte eine Methanausbeute der Silage von 190 bis 230 IN·kg⁻¹ oTS. Hierbei hatte weder der Schnittzeitpunkt noch das Vorkommen von *L. polyphyllus* einen signifikant negativen Effekt. Eine anaerobe Vergärung des Presssaftes (IFBB) erbrachte eine Methanausbeute zwischen 260 und 330 IN·kg⁻¹ oTS. Ein Dauerversuch konnte zusätzlich zeigen, dass der spezifische Biogasertag des lupinendurchsetzten Materials höher war als des Reinbestandes von BGR.

AP 4 - Erfassung der Dynamik von *L. polyphyllus* durch Methoden der Fernerkundung

Für die Auswertung der Fernerkundungsdaten wurde einerseits auf Daten der Explorationsphase zurückgegriffen, als auch auf neu erhobene Daten aus dem Jahr 2017 und 2018. Mit Hilfe multivariater statistischer Methoden und diverser aus den 3D Laser- sowie hyperspektralen Drohnen Daten abgeleiteten Informationen, konnte ein sehr guter Zusammenhang mit destruktiv gemessenen Biomassewerten (Frisch und Trocken) identifiziert werden. Die bisherigen Ergebnisse liefern eine Grundlage für die Erstellung eines Prognosemodells sowie für einen potentiellen Monitoringansatz der Lupine (AP5 im folgenden Projekt).

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

In der ersten Hauptphase wurde eine gemeinsam gestaltete Website für das Projekt auf den Plattformen der Universitäten JLU Gießen und Kassel eingerichtet. Insgesamt wurden neun Bachelor- und vier Masterarbeiten betreut. Drei internationale und zwei deutschsprachige Veröffentlichungen wurden publiziert. Sechs weitere Artikel sind eingereicht oder in Bearbeitung. Zwei Workshops wurden 2019 organisiert: im Mai "Fernerkundung im Naturschutz - Kontrolle invasiver Arten und Erhalt der Biodiversität" und im Juni „Management invasiver Pflanzenarten in Bergwiesen-Ökosystemen“.

Fazit

Die erste Hauptphase des Projekts zur Erhaltung und Restituierung der Artenvielfalt in den Bergwiesen des Biosphärenreservats Rhön ist planmäßig und erfolgreich verlaufen.

AP 1: Bergwiesen-Restituierung durch Mahdgutübertragung und Aktivierung der Samenbank ist möglich, allerdings ist zu beachten, dass die Witterung einen starken Einfluss auf den Ansiedlungsverlauf hat.

AP 2: Das Potential zur Selbstausbreitung der Lupine ist hoch, eine späte Mahd trägt stark zur Ausbreitung bei. Die Ausbreitung über Schafkot findet im Gelände zwar statt, ist aber deutlich seltener, die Ausbreitung über Gewässer spielt keine übergeordnete Rolle.

AP 3: Mittels IFBB wird die Qualität der flüssigen und festen Bestandteile erhöht sowie weist das Verfahren über alle Grünlandstandorte hinweg eine höhere Umwelt- und Primärenergieeinsparungen auf. Damit stellt das IFBB eine bessere Option im Vergleich zur bisher alleinigen anaeroben Vergärung dar.

AP 4: Die Nutzung von 3D Laser- sowie Hyperspektralinformationen ermöglicht die Berechnung sehr guter Ertragsmodelle. Diese können weiterführend in ein zukünftiges Prognosemodell einfließen und zu potenziellem Lupine-Monitoring eingesetzt werden.

Die Voraussetzungen für die Durchführung von AP 5 (Synthese der Daten) und AP 6 (Akteursnetzwerk-Bildung) wurden geschaffen.

Inhalt

Zusammenfassung	1
Anlass und Zielsetzung	3
Arbeitsschritte und angewandte Methoden	5
AP 1: Restituierung von Bergwiesen durch die Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung	5
AP 2: Analyse der Ausbreitungsprozesse von <i>L. polyphyllus</i> auf Landschaftsebene	7
AP 3: Energetische Verwertung von extensivem Grünland unter Berücksichtigung von <i>L. polyphyllus</i>	11
AP 4: Nicht destruktive, fernerkundliche Beurteilung des Zeitpunktes von Schnittmaßnahmen zur Bekämpfung des invasiven Neophyten <i>L. polyphyllus</i> und dessen Auswirkung auf die energetischen Parameter von Grünlandbeständen	21
Ergebnisse	26
AP 1: Restituierung von Bergwiesen durch die Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung	26
AP 2: Analyse der Ausbreitungsprozesse von <i>L. polyphyllus</i> auf Landschaftsebene	32
AP 3: Energetische Verwertung von extensivem Grünland unter Berücksichtigung von <i>L. polyphyllus</i>	37
AP 4: Nicht destruktive, fernerkundliche Beurteilung des Zeitpunktes von Schnittmaßnahmen zur Bekämpfung des invasiven Neophyten <i>L. polyphyllus</i> und dessen Auswirkung auf die energetischen Parameter von Grünlandbeständen	47
Diskussion	53
AP 1: Restituierung von Bergwiesen durch die Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung	53
AP 2: Analyse der Ausbreitungsprozesse von <i>L. polyphyllus</i> auf Landschaftsebene	54
AP 3: Energetische Verwertung von extensivem Grünland unter Berücksichtigung von <i>L. polyphyllus</i>	56
AP 4: Nicht destruktive, fernerkundliche Beurteilung des Zeitpunktes von Schnittmaßnahmen zur Bekämpfung des invasiven Neophyten <i>L. polyphyllus</i> und dessen Auswirkung auf die energetischen Parameter von Grünlandbeständen	59
Öffentlichkeitsarbeit	61
1.1 Veröffentlichungen	61
1.2 Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern	63
Ausblick	64
Fazit	65
Literaturverzeichnis	67

Abbildungen:

Abbildung 1: Versuchsdesign des Experiments mit Mahdgutübertragung und Aktivierung der Diasporebank im Split-Plot-Design. Das Experiment wird auf zwei frischen Goldhaferwiesen, zwei feuchten Goldhaferwiesen und zwei Borstgrasrasen durchgeführt werden.....	6
Abbildung 2: Lupinenentfernung (a), Aktivierung der Bodensamenbank mit der Kreiselegge (b), Übertragung des Mahdguts auf die Empfängerflächen (c).....	6
Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Ballochorie mit Lupinus-Einzelpflanze	10
Abbildung 4: Samenfalle zur Untersuchung der Samenschüttung von Lupinus-Beständen unterschiedlicher Deckung	10
Abbildung 5: Mähwerk eines beprobten Traktors.....	10
Abbildung 6: Schwimmfähige Samenfalle zur Untersuchung der Hydrochorie.....	10
Abbildung 7: Überblick Feldversuchsdesign für die Arbeitspakete 3 und 4, und Luftbildaufnahme von einer Versuchsfläche der Universität Kassel im Bayrischen Teil der Rhön direkt vor dem 2.Schnitttermin (05.07.2017) (© Torsten Kirchner)	11
Abbildung 8: Integrierte Festbrennstoff – und Biogasproduktion aus Biomasse (IFBB).....	13
Abbildung 9: Biogaslabor des Fachbereichs Grünlandwissenschaften und Nachwachsende Rohstoffe der Universität Kassel.....	14
Abbildung 10: Simulation der Aufkonzentrierung eines Störstoffes im Reaktor bei geplanter Fütterung von Lupinensilage.....	16
Abbildung 11: Versuchssamen von <i>L. polyphyllus</i> zu den drei verschiedenen Sammelzeitpunkten. Fotos: Juliane Baltés	17
Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Vergärung der Samen (S) von <i>L. polyphyllus</i> . Dunkelgraue Kreise zeigen einen Reaktor (R) an. Hellgraue Rechtecke zeigen eine Wasserwanne an	18
Abbildung 13: Diagramm zu den Systemgrenzen für das IFBB (oben) und die Anaerobe Vergärung (AD; unten). Die Kästchen veranschaulichen die wichtigsten Vordergrundprozesse im System. Die Pfeile kennzeichnen den Fluss von Rohstoffen, Produkten, Wärme und Strom. Gärreste wurden als Ersatz für den lokalen Wärmemix, Netzstrom und Mineraldünger betrachtet.	20
Abbildung 14: Trägerplattform mit Hyperspektralkamera	25
Abbildung 15: FireFLY6 Pro	25
Abbildung 16: Lage der Spenderflächen für den Bergwiesen-Restituierungsversuch (BG = Borstgrasrasen, GF = frische Goldhaferwiese, GN = nasse Goldhaferwiese)	26
Abbildung 17: Lage der Empfängerflächen für den Bergwiesen-Restituierungsversuch (BG = Borstgrasrasen, GF = frische Goldhaferwiese, GN = nasse Goldhaferwiese)	27
Abbildung 18: Versuch zur Aktivierung der Samenbank (Plots links im Bild) und Übertragung diasporenhaltigen Mahdguts (Streifen rechts im Bild) auf einem Borstgrasrasen. (© Torsten Kirchner)	27
Abbildung 19: NMDS der zwei floristischen Hauptgradienten der Vegetationsaufnahmen auf den Empfängerflächen der Jahre 2017 (a), 2018 (b) und 2019 (c). Die Pfeile zeigen in die Richtung der größten Veränderung mit AVH: mittlere Vegetationshöhe, CH: Vegetationsdeckung, CR: Deckung durch offenen Boden, CL: Deckung durch Streu,	

SpNumber: Artenanzahl. Die Länge der Pfeile repräsentiert die Beziehung zwischen Ordination und Gradient mit einem Signifikanzlevel von $p \leq 0.05$	30
Abbildung 20: Barplots der Deckung von <i>L. polyphyllus</i> . Spalte a: Mahdgutübertragung, Spalte b: keine Mahdgutübertragung	31
Abbildung 21: Ordinationsdiagramm einer Primärkomponentenanalyse (PCA) der Flächeneigenschaften (Fläche, Umfang, Shape-Index, Distanz zu Straße und Distanz zu Lesesteinriegel) der vier häufigsten Grünlandtypen (HM mesophiles Grünland; NG trockenes, mageres Grünland; WHM Nassgrünland und WNG feuchtes, mageres Grünland). Die Punkte repräsentieren Wiesen-Patches, die Beschriftungen zeigen die Zentroide (Mittelwerte) der Grünlandtypen. Die erste Achse (51.2% erklärte Varianz) repräsentiert Veränderungen in Wiesengröße und -umfang. Die zweite Achse (19.3% erklärte Varianz) repräsentiert Veränderungen in der euklidischen Distanz zum nächstgelegenen Weg und Lesesteinriegel bzw. Veränderungen der Form des Grünland-Patches.....	33
Abbildung 22: Das Box-Whisker Plot zeigt Unterschiede im Anteil an durch <i>L. polyphyllus</i> invadierter Grünlandfläche für die vier häufigsten Grünlandtypen (mesophiles Grünland; trockenes, mageres Grünland; feuchtes, mageres Grünland; Nassgrünland) zwischen den Jahren 1998 (hellgrau) und 2016 (dunkelgrau). Die Unterschiede wurden innerhalb der Jahre mittels GLMs und Post-hoc Tukey-Tests überprüft. Während der invadierte Flächenanteil im Jahr 1998 für alle Grünlandtypen vergleichbar war, sind im Jahr 2016 Grünland mit mittlerer Wasserversorgung stärker invadiert als feuchtes, mageres Grünland und Nassgrünland.....	33
Abbildung 23: Anzahl und Entfernung der ausgeschleuderten <i>L. polyphyllus</i> -Samen in acht Entfernungsklassen zur Mutterpflanze im Verlauf des Versuchs	34
Abbildung 24: Anzahl ausgeschütteter Samen von <i>L. polyphyllus</i> -Beständen niedriger, mittlerer und hoher Deckung im Verlauf der Vegetationsperiode im Vergleich.....	35
Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der Anzahl an schwimmfähigen <i>L. polyphyllus</i> -Samen mit zwei Messreihen.....	36
Abbildung 26: Einfluss des Schnittzeitpunktes auf den Heizwert (in MJ·kg ⁻¹ Trockenmasse) von Biomassen aus Goldhaferwiesen (links) und Borstgrasrasen (rechts) unter Berücksichtigung der Abundanz von <i>L. polyphyllus</i> sowie einer Aufbereitung der Biomassen durch das IFBB-Verfahren (Presskuchen). Linien repräsentieren den mittleren Heizwert der in 2017 hergestellten Silage (durchgehende Linie) und des Presskuchens (IFBB; gestrichelte Linie) mit und ohne <i>L. polyphyllus</i>	38
Abbildung 27: Änderung des Gesamtalkaloidgehaltes in den Pflanzenorganen von <i>L. polyphyllus</i> während der Vegetationsperiode in 2017 (links) sowie der Vergleich des Gesamtalkaloidgehaltes von Lupine aus Borstgrasrasen und Goldhaferwiesen (rechts). Gestrichelte Linie repräsentiert den mittleren Gesamtalkaloidgehalt über beide Vegetationstypen und über alle Zeitpunkte.....	39
Abbildung 28: Einfluss des Schnittzeitpunktes auf die Methanausbeute (in lN·kg ⁻¹ oTS) von Biomassen aus Goldhaferwiesen (links) und Borstgrasrasen (rechts) unter Berücksichtigung der Abundanz von <i>L. polyphyllus</i> sowie einer Aufbereitung der Biomassen durch das IFBB-Verfahren (Presssaft). Linien repräsentieren die mittlere Methanausbeute der in 2017 hergestellten Silage (durchgehende Linie) und des Presssaftes (IFBB; gestrichelte Linie) mit und ohne <i>L. polyphyllus</i>	40

Abbildung 29: Verlauf der Raumbelastung im Versuchszeitraum (links) und Simulation der Aufkonzentrierung eines Störstoffes im Reaktor entsprechend der tatsächlich realisierten Fütterung von Lupinensilage (rechts).	41
Abbildung 30: Gasproduktionsraten in der Umstellung (oben) und gegen Ende (unten) von Gras auf die Mischungen.	42
Abbildung 31: Tagessummen Biogas (oben) und Methan (unten).	43
Abbildung 32: Kumulierter Biogasertrag in Normlitern. Prozentangaben über den Balken entsprechen dem Ertrag im Vergleich zum Durchschnittsertrag.....	43
Abbildung 33: Gesamtkeimungsraten der Samen von <i>L. polyphyllus</i> unterschiedlicher Altersstadien nach dem Vergärungsprozess bei 37°C und 50°C.	45
Abbildung 34: Gesamtkeimungsraten der Samen von <i>L. polyphyllus</i> des Altersstadiums 3 in Abhängigkeit von Vergärungsdauer bei 37°C und 50°C.	45
Abbildung 35: Primärenergieverbrauch für Inputprozesse (links) und Einsparungen durch den Ersatz von Energie und Düngemittelproduktion (rechts). Die weißen Balken zeigen die Netto-Primärenergiebilanz für jede der Optionen an, wobei der größere positive Wert die günstigere Option anzeigt. Zu den Biomassearten gehören Borstgras (<i>Nardus stricta</i> , NS) und Goldhafer (<i>Trisetum flavescens</i> , TF), die entweder frei von Lupine (NS und TF) oder von Lupine (NS+L und TF+L) befallen sind. AD: Anaerobe Gärung; IFBB: Integrierte Erzeugung von Festbrennstoffen und Biogas aus Biomasse.	46
Abbildung 36: Treibhausgasemissionen aus Inputprozessen (rechts) und Treibhausgas-einsparungen durch den Ersatz von Energie- und Düngemittelproduktion (links). Die weißen Balken zeigen den Netto-THG-Saldo für jede der Optionen an, wobei der größere negative Wert die günstigere Option anzeigt. Zu den Biomassearten gehören Borstgras (<i>Nardus stricta</i> , NS) und Goldhafer (<i>Trisetum flavescens</i> , TF), die entweder frei von Lupine (NS und TF) oder von Lupine (NS+L und TF+L) befallen sind. AD: Anaerobe Gärung; IFBB: Integrierte Erzeugung von Festbrennstoffen und Biogas aus Biomasse.	47
Abbildung 37: Lineare Modelle für Trockenbiomasse (A-D) und Frischbiomasse (E-B).	49
Abbildung 38: Schätzgenauigkeit (adj. R ²) für die Modelle: Summe der Voxel, Mittlere 3d-Raster-Höhe, Vegetationshöhe und Volumen der konvexen Hülle. Jeweils in Korrelation mit Frischmasseertrag und Trockenmasseertrag. Jede Methode des Weiteren unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde.....	50
Abbildung 39: Mittelwerte der Schätzgenauigkeit (adj. R ²) aller vorgestellten Methoden unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde. .	50
Abbildung 40: Schätzgenauigkeit (adj. R ²) der Methode Vegetationshöhe in Korrelation mit Frischmasseertrag und Trockenmasseertrag. Unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde.....	51
Abbildung 41: Mittlere Kalkulationsdauer der Methoden Summe der Voxel, Mittlere 3d-Raster-Höhe, Vegetationshöhe und Volumen der konvexen Hülle. Unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde und korreliert mit Frischmasseertrag und Trockenmasseertrag.	51

Tabellen:

Tabelle 1: Mahdtermine des ersten und zweiten Schnitts auf den Versuchsflächen der Universität Kassel im Bayrischen Teil der Rhön in den Untersuchungsjahren 2017, 2018 und 2019.....	12
Tabelle 2: Einfluss des Schnittzeitpunktes unter Berücksichtigung der Abundanz von <i>L. polyphyllus</i> und des Vegetationstyps auf energetische Parameter für die Verbrennung des Schnittgutes entweder direkt oder nach Vorbehandlung mit dem IFBB-Verfahren (Presskuchen).	38
Tabelle 3: Lebensfähigkeit, durchschnittliche Samenlänge und –breite sowie Tausendkorngewicht und Farbe der Samen unterschiedlicher Altersstadien (AS; Sammelzeitpunkte) von <i>L. polyphyllus</i>	44
Tabelle 4: Ergebnisse (R^2 , rRMSE, nRMSE) der besten vier multivariaten Methoden aus Laserdaten, Hyperspektraldaten und der Kombination beider Sensordaten für den Trockenmasseertrag (TM).....	52

Erhaltung und Restituierung der Artenvielfalt in den Bergwiesen des Biosphärenreservats Rhön – Management der invasiven Stauden-Lupine (*Lupinus polyphyllus* Lindl.) in einem komplexen Schutzgebietssystem

Zusammenfassung

Die Hohe Rhön zeichnet sich durch landschaftsprägende Grünlandbestände aus, die durch Jahrhunderte lange extensive Bewirtschaftung entstanden sind. Diese extensive Nutzung führte zur Ausbildung magerer und artenreicher Bergwiesen-Ökosysteme, die durch eine Vielzahl stark gefährdeter Arten geprägt sind und somit besondere Schutzgüter des Naturschutzes darstellen. Nach der Ausweisung des Biosphärenreservats Rhön 1991 änderte sich das Nutzungsregime auf den Bergwiesen deutlich. So förderten spätere Mahdtermine und eine geringere Beweidungsintensität die Ausbreitung der aus Nordamerika stammenden Stauden-Lupine (*Lupinus polyphyllus* Lindl.). *L. polyphyllus* bedroht die Struktur und Biodiversität des Extensivgrünlands, da sie die vertikale Struktur und die funktionellen Prozesse in den betroffenen Flächen stark verändert. Die Folge ist eine Verdrängung charakteristischer und gefährdeter Arten. In den zwei Explorationsvorhaben von 2015-2016 wurden u. a. das Ausmaß der aktuellen Verbreitung von *L. polyphyllus* quantifiziert, die Potentiale zur Restituierung der artenreichen Bergwiesen für die Erhaltung der Artenvielfalt abgeschätzt sowie eine mögliche energetische Nutzung des Aufwuchses analysiert. In der jetzt abgeschlossenen, ersten Hauptphase wurde die Bergwiesen-Restituierung durch die Aktivierung der Samenbank und die Übertragung diasporenhaltigen Mahdguts erprobt (AP 1), die Ausbreitungsprozesse von *L. polyphyllus* auf Landschaftsebene analysiert (AP 2), die Effekte eines für die Reduktion von *L. polyphyllus* geeigneten Schnittregimes auf die bioenergetische Verwendung des jährlichen Grünschnitts von Bergwiesen untersucht (AP 3) und die Erfassung der Dynamik von *L. polyphyllus* durch Methoden der Fernerkundung erprobt (AP 4).

Im AP 1 wurden geeignete Spender- und Empfängerflächen für die Bergwiesen-Restituierungsversuche identifiziert. Dadurch konnte der Versuch zur Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung wie geplant durchgeführt werden. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Vegetationstypen trotz der starken Eingriffe erhalten blieben. Weiterhin zeigt sich eine große Variabilität hinsichtlich der Lupinendeckung auf den Untersuchungsflächen. Dies weist darauf hin, dass neben den angewandten Behandlungen der Flächen das Wetter einen großen Einfluss auf die Lupinendeckung hat.

Die Arbeiten in AP 2 verliefen ebenfalls planmäßig. Die Ergebnisse zeigen, dass große Wiesen mittlerer Wasserversorgung stärker invadiert wurden als kleine und nasse Wiesen. Zudem ergaben die Untersuchungen, dass *L. polyphyllus* häufiger in der Nähe von Lesesteinriegeln und Wegen vorkommt als weit entfernt von diesen Strukturen. Die Versuche zur Ballochorie zeigen, dass die Anzahl an geschleuderten Samen und die Flugweite sich im Verlauf der Samenreife verändern, generell aber Samen über sechs Meter weit geschleudert werden können. Im Feld konnten bis Ende September Lupinensamen in den Fallen gefunden werden. Die Lupinensamen sind nur mäßig schwimmfähig. Während Schafe ein relativ geringes Potential

zur endozoochoren Lupinenausbreitung zeigen, ist eine Verschleppung von *Lupinus*-Samen durch Mähwerke in manchen Jahren wahrscheinlicher.

Arbeiten im AP3 zeigten, dass der Schnitzeitpunkt keinen maßgeblichen Effekt auf den Heizwert der Biomassen hatte, welcher im Mittel zwischen 15.5 (Goldhaferwiese) und 17.8 MJ·kg⁻¹ TM (Borstgrasrasen, BGR) lag. Einen Effekt des Lupinenvorkommens auf den Heizwert gab es nur für die Biomassen aus BGR. Durch Aufbereitung der lupinendurchsetzten Biomassen mittels IFBB-Verfahren konnte deren Heizwerte signifikant erhöht werden. Die Vergärung der Biomasse in Batchversuchen erbrachte eine Methanausbeute der Silage von 190 bis 230 l_N·kg⁻¹ oTS. Hierbei hatte weder der Schnitzeitpunkt noch das Vorkommen von Lupine einen signifikant negativen Effekt. Eine anaerobe Vergärung des Presssaftes (IFBB) erbrachte eine Methanausbeute zwischen 260 und 330 l_N·kg⁻¹ oTS. Ein Dauerversuch konnte zusätzlich zeigen, dass der spezifische Biogasertrag des lupinendurchsetzten Materials höher war als des Reinbestandes von BGR. Ein Experiment zur Auswirkung der anaeroben Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen von *L. polyphyllus* erbrachte, dass Samen, welche im Juni geerntet wurden, ihre Keimfähigkeit nach der Vergärung bei 37°C und 50°C vollständig verloren hatten. Samen welche jedoch erst am 05.08.2019 gesammelt wurden, hatten noch eine mittlere Gesamtkeimung von 4% (37°C) bzw. von 2% (50°C). Eine Lebenszyklusanalyse zeigte auf, dass eine energetische Verwertung mit dem IFBB-Verfahren eine bessere Option im Vergleich zur anaeroben Vergärung darstellt, da es über alle Grünlandstandorte hinweg höhere Umwelt- und Primärenergieeinsparungen aufweist.

Für die Auswertung der Fernerkundungsdaten (AP4) wurde einerseits auf Daten der Explorationsphase zurückgegriffen als auch auf neu erhobene Daten aus dem Jahr 2017 und 2018. Mit Hilfe multivariater statistischer Methoden und diverser aus den 3d Laser- sowie hyperspektralen Drohnendaten abgeleiteten Informationen, konnte ein sehr guter Zusammenhang mit destruktiv gemessenen Biomassewerten (Frisch und Trocken) identifiziert werden. Die bisherigen Ergebnisse liefern eine Datengrundlage für die Erstellung eines Prognosemodells sowie für einen potentiellen Monitoringansatz der Lupine (AP5).

In der zweiten Hauptphase (12 Monate) sollen schließlich die Ergebnisse aus allen Arbeitspaketen in einer Synthese in Form eines Prognosemodells zusammengeführt (AP 5) und die Weitergabe der Erkenntnisse über den Aufbau eines Netzwerkes mit anderen Akteuren, durch die gemeinsame Erarbeitung einer Broschüre und über eine Projektwebsite sichergestellt werden (AP 6).

Anlass und Zielsetzung

Die Hohe Rhön zeichnet sich neben ausgedehnten Hutungen (Hessen) durch landschaftsprägende gemähte Grünlandbestände (Bayern) aus, welche durch die seit Jahrhunderten durchgeführte extensive Mahd ohne Düngung und durch weitflächige Entsteinungsmaßnahmen entstanden sind. Diese Nutzung führte zur Ausbildung magerer und sehr artenreicher Bergwiesen-Ökosysteme, die eine Vielzahl stark gefährdeter oder vom Aussterben bedrohter Pflanzenarten beherbergen. Die Pflanzengesellschaften, die durch diese Arten gekennzeichnet sind, stellen somit besondere Schutzgüter des Naturschutzes dar. Mit fast 8.900 ha extensiv genutztem Grünland bildet die Rhön eine Schwerpunktregion in Mitteleuropa für die Erhaltung der folgenden prioritären Lebensraumtypen der FFH-Richtlinie (92/43/EWG): „Artenreiche montane Borstgrasrasen“ (LRT 6230) und „Berg-Mähwiesen“ (LRT 6520). Dies war einer der Gründe für die Ausweisung der Rhön als Biosphärenreservat im Jahr 1991.

Nach Ausweisung des Biosphärenreservats förderten das teilweise Brachfallen der Wiesen und eine verminderte Beweidungsintensität sowie eine zum Schutz des Birkhuhns angeordnete Verschiebung und Staffelung des ersten Mahdtermins (50 % der Fläche ab 10. Juli, 25 % ab 01. August, 25 % ab 01. September) die flächige Ausbreitung der Stauden-Lupine (Volz 2003; Otte & Maul 2005). Dieser aus Nordamerika stammende Neophyt dringt zunehmend in die geschützten Flächen ein. Die Ausbreitung von *L. polyphyllus* bedroht die Struktur und Biodiversität des Grünlands, da diese Art in Bergwiesen und Borstgrasrasen zu deutlichen Veränderungen der vertikalen Struktur führt und charakteristische Arten der Bergwiesen verdrängt. Als weitere Folge ist zudem eine Verschlechterung der Mahdgut- und Futterqualität der Bergwiesen zu verzeichnen, da *L. polyphyllus* durch hohe Alkaloidgehalte gekennzeichnet ist. Weiterhin führen die hohen Wassergehalte in der Biomasse rasch zu Schimmelbildung im Heu.

Vor diesem Hintergrund umfasst dies Projekts folgende Arbeitspakete und Fragestellungen:

AP 1: Restituierung von durch *L. polyphyllus* invadierten Bergwiesen durch die Aktivierung der Samenbank sowie die Übertragung von artenreichem Mahdgut. Folgende Fragestellung wurde hierbei untersucht:

- 1a) Wo liegen geeignete Spender- und Empfängerwiesen für die Mahdgutübertragung?
- 1b) Stellen die Aktivierung der Samenbank und die Mahdgutübertragung geeignete Maßnahmen zur Restituierung von artenreichen Bergwiesen dar?
- 1c) Wann ist der optimale phänologische Erntezeitpunkt hinsichtlich des Abreife- und Ausbreitungsverhaltens der Pflanzenarten der Borstgrasrasen und Goldhaferwiesen?

AP 2: Analyse der Verbreitung und Ausbreitungsprozesse von *L. polyphyllus* auf Landschaftsebene. Folgende Fragestellung wurde hierbei untersucht:

2a) Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Grad der *L. polyphyllus*-Invasion und den in der GIS-Datenbank erhobenen Raumdaten? Welche Habitate sind besonders stark durch die *L. polyphyllus*-Invasion betroffen?

2b) Wie funktioniert die Ausbreitung von *L. polyphyllus* in der Rhön?

AP 3: Energetische Verwertung von extensivem Grünland unter Berücksichtigung von *L. polyphyllus*. Folgende Fragestellung wurde hierbei untersucht:

3a) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die energetischen Parameter für die Verbrennung des Schnittgutes entweder direkt oder nach dem IFBB-Verfahren (Presskuchen) aus?

3b) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung von Lupinenabundanz und Vegetationstyp auf die energetischen Parameter hinsichtlich der anaeroben Vergärung des silierten Schnittgutes bzw. des nach dessen Abpressung (mit dem IFBB-Verfahren) gewonnenen Presssaft aus? Wie wirkt sich die anaerobe Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen von *L. polyphyllus* aus?

3c) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die Lebenszyklusanalyse der unterschiedlichen möglichen (energetischen) Verwertungsrichtungen aus?

AP 4: Nicht destruktive, fernerkundliche Beurteilung des Zeitpunktes von Schnittmaßnahmen zur Bekämpfung des invasiven Neophyten *L. polyphyllus* und dessen Auswirkung auf die energetischen Parameter von Grünlandbeständen. Folgende Fragestellung wurde hierbei untersucht:

4a) Wie hoch ist die Genauigkeit einer fernerkundlichen Erfassung von *L. polyphyllus*-Abundanz im Grünland?

4b) Wie wirkt sich die Deckung von *L. polyphyllus* im Grünland auf die Schätzgenauigkeit energetischer Parameter mit Hilfe fernerkundlicher Messungen aus?

Arbeitsschritte und angewandte Methoden

AP 1: Restituierung von Bergwiesen durch die Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung

1a) Wo liegen geeignete Spender- und Empfängerwiesen für die Mahdgutübertragung?

Anhand der in der Explorationsphase des Projekts erstellten Karte der 'Aktuellen Verbreitung der Lupine', wurde eine Vorauswahl an potenziellen Spender- und Empfängerflächen für den Bergwiesen-Restituierungsversuch getroffen. Die Flächen gehören den drei Vegetationstypen Borstgrasrasen sowie Goldhaferwiesen frischer und feuchter Ausprägung an. Von jedem Vegetationstyp wurden jeweils eine Spender- und zwei Empfängerflächen ausgewählt. Die Spenderflächen weisen dabei keinen Befall mit der Lupine auf, die Empfängerflächen sind hingegen stark von der Lupine invadiert. Die Eignung der Flächen wurde nach der Erstausswahl anhand der Verbreitungskarte im Gelände überprüft.

1b) Stellen die Aktivierung der Samenbank und die Mahdgutübertragung geeignete Maßnahmen zur Restituierung von artenreichen Bergwiesen dar?

Auf den ausgewählten Empfängerflächen wurden Anfang Juni 2017 vor dem Beginn der ersten Mahdperiode Vegetationsaufnahmen erstellt und der Befall durch die Lupine anhand ihrer Deckung abgeschätzt. Um die Effekte der verschiedenen Behandlungen (Bodenstörung, Lupinenentfernung, Mahdgutübertragung, sowie deren Kombination) überprüfbar zu machen, wurden die Aufnahmen jeweils auf den Sub-Plots der Mahdgutübertragungstreifen (Abbildung 1) durchgeführt. Auf diese Weise ergaben sich jeweils zwölf Aufnahmen pro Empfängerfläche also insgesamt 72 Vegetationsaufnahmen. Die Schätzung der Vegetationsdeckung erfolgte nach der Methode von Braun-Blanquet (1964). Die Taxonomie richtet sich nach Wisskirchen und Haeupler (1998). Die Empfängerflächen wurden im Anschluss an die Vegetationsaufnahmen nach dem in der Explorationsphase erarbeiteten Versuchsdesign vorbereitet (Abbildung 1).

Die Lupinenentfernung wurde im Frühsommer manuell mit Ampferstechern durchgeführt (Abbildung 2a). Zur Aktivierung der Bodendiasporenbank wurde die Grasnarbe auf den entsprechenden Plots anschließend mit einer Kreiselegge angerissen und der Boden in einer Tiefe von bis zu 10 cm aufgelockert (Abbildung 2b). Die jeweilige Mahd der Spenderflächen erfolgte am 18.07.2017 (Borstgrasrasen, BG), 08.08. (frische Goldhaferwiese, GF) und am 30.08. (nasse Goldhaferwiese, GN). Die Übertragung des Mahdguts fand zeitnah jeweils am selben Tag, bzw. im Falle des Borstgrasrasens am darauffolgenden Tag (BG 19.07.) statt; so konnten möglichst viele Diasporen auf die Empfängerfläche gebracht werden (Abbildung 2c).

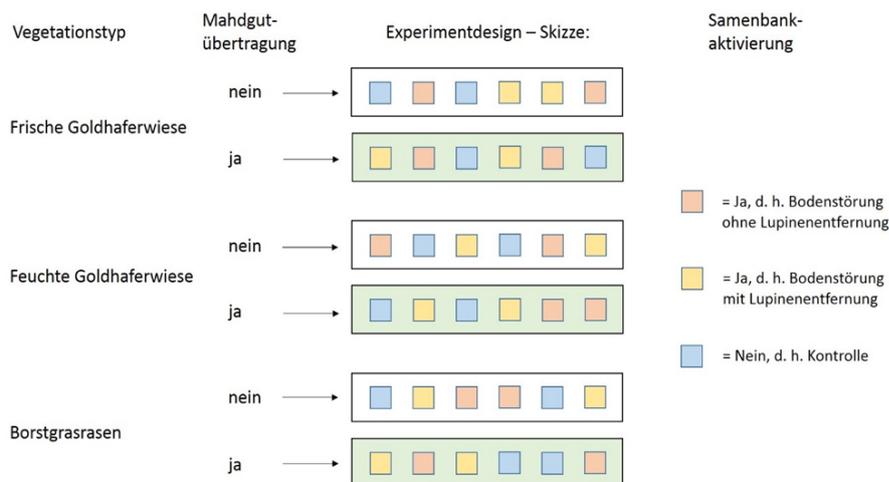


Abbildung 1: Versuchsdesign des Experiments mit Mahdgutübertragung und Aktivierung der Diasporebank im Split-Plot-Design. Das Experiment wird auf zwei frischen Goldhaferwiesen, zwei feuchten Goldhaferwiesen und zwei Borstgrasrasen durchgeführt werden.



Abbildung 2: Lupinenentfernung (a), Aktivierung der Bodensamenbank mit der Kreiselegge (b), Übertragung des Mahdguts auf die Empfängerflächen (c)

Auf den Empfängerflächen wurden in den Vegetationsperioden der Jahre 2018 und 2019 jeweils Ende Mai Vegetationsaufnahmen durchgeführt, um die Entwicklungen auf den Flächen zu dokumentieren. Eine bisherige statistische Auswertung erfolgte durch eine Ordination (NMDS, non-metric multidimensional scaling), bei der die floristischen Hauptgradienten identifiziert werden. Im Gegensatz zu anderen Ordinationsmethoden werden bei der NMDS Rangfolgen verwendet, sodass das Verfahren sehr flexibel, robust und auf unterschiedliche Datentypen anwendbar ist. Für die Analyse wurden drei Dimensionen und 20 zufällige Starts verwendet, sowie die Bray-Curtis-Distanz als Distanzmaß. Als Gruppierungsvariable wurden die Behandlung (Bodenstörung, Lupinenentfernung, Kontrolle), Mahdgutauftrag (Ja/Nein) und der Vegetationstyp (Borstgrasrasen, frische und nasse Goldhaferwiese) verwendet. Zudem wurden die mittlere Höhe der Vegetation, die Deckung der Krautschicht, sowie der Anteil an Streu und offenem Boden in die Analyse, zur weiteren Interpretation der Vegetationsentwicklung eingebracht. Um statistisches Rauschen zu vermeiden, wurden Arten, die weniger als dreimal vorkamen von der Analyse ausgeschlossen.

Um die Entwicklung der Lupinendeckung im Untersuchungszeitraum abzubilden wurden zunächst Balkendiagramme erstellt; gruppiert wurde ebenfalls nach Behandlung, Mahdgutübertragung und Vegetationstyp.

1c) Wann ist der optimale phänologische Erntezeitpunkt hinsichtlich des Abreife- und Ausbreitungsverhaltens der Pflanzenarten der Borstgrasrasen und Goldhaferwiesen?

Die Erhebung des phänologischen Status der Vegetation erfolgte wöchentlich in der Vegetationsperiode von Ende Mai bis Mitte August 2018. Hierbei wurde der vegetative und generative Zustand der Gräser und Kräuter auf den Vegetationstypen Borstgrasrasen und Goldhaferwiese nach Dierschke (1972) dokumentiert.

AP 2: Analyse der Ausbreitungsprozesse von *L. polyphyllus* auf Landschaftsebene

2a) Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Grad der Lupineninvasion und den in der GIS-Datenbank erhobenen Raumdaten? Welche Habitate sind besonders stark durch die Lupineninvasion betroffen?

Um herauszufinden, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Grad der Invasion von *L. polyphyllus* und den in der GIS-Datenbank erhobenen Raumdaten gibt, wurde die Verbreitung von *L. polyphyllus* in Bezug zu den vorkommenden Biotoptypen, der Landschaftsstruktur sowie dem Vorhandensein von linearen Strukturen als mögliche Ausbreitungskorridore gesetzt. Im Fokus stand bei den Analysen das Gebiet Leitgraben, da hier ein zeitlicher Vergleich der Verbreitung von *L. polyphyllus* zwischen 1998 und 2016 möglich war. Als Grundlage dienten für den Zeitpunkt 1998 die Kartierung von *L. polyphyllus* von Otte und Maul (2005) und für den Zeitpunkt 2016 die Kartierung von *L. polyphyllus* des Explorationsprojekts (Klinger et al. 2019). Dabei wurden zunächst die in beiden Jahren vorkommenden *L. polyphyllus*-Bestände bezüglich ihrer Größe, Form und Nähe zueinander charakterisiert. Als Grundlage der Analyse der vorkommenden Wiesentypen wurden CIR-Luftbildkartierungen im Auftrag des Biosphärenreservats Rhön aus den Jahren 1998 und 2006 verwendet (Luftbild, Umwelt und Planung GmbH 2008). Die Analyse konzentrierte sich auf die vier im Leitgraben dominanten Grünlandtypen: mesophiles Grünland (38 % der Fläche des Leitgrabens), trockenes, mageres Grünland (21 %), feuchtes, mageres Grünland (14 %) sowie Nassgrünland (9 %). Für jeden Grünlandpatch wurde der Flächenanteil ermittelt, der durch Bestände der Stauden-Lupine bedeckt war. Basierend darauf wurde analysiert, ob ein Zusammenhang zwischen dem Grad der *L. polyphyllus* -Invasion (Anteil an Habitatpatch, der durch *L. polyphyllus* bedeckt ist) und dem Wiesentyp, den Eigenschaften des jeweiligen Wiesenpatches (Größe, Form, Randlinienlänge) sowie der Entfernung der Wiese zu den nächstgelegenen linearen Strukturen (zu Lesesteinriegeln, Straßen, Wegen) besteht. Zur statistischen Analyse wurden Generalisierte Lineare Modelle (GLMs) herangezogen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden im August 2019 in der Fachzeitschrift „Biological Invasions“ publiziert (Klinger et al. 2019).

2b) Wie funktioniert die Ausbreitung von *L. polyphyllus* in der Rhön?

Für die Analyse der Ausbreitungsvektoren der Samen von *L. polyphyllus* wurden Versuche zu Ballochorie, Hemerochorie, Zoochorie und Hydrochorie durchgeführt. Zur Analyse der Ballochorie (Ausschleudern von Samen) wurden zwei Versuche durchgeführt. Im ersten Versuch wurde analysiert, wie weit die Samen von *L. polyphyllus* im Freiland schleudern, da bisher durchgeführte Versuche meist im Gewächshaus stattfanden (vgl. Volz 2003). Dazu wurden zwei *L. polyphyllus*-Einzelpflanzen mit reifen Samenständen auf dem Versuchsfeld der Universität Gießen aufgestellt. In unterschiedlichen Abständen (mit 0,5 m und in Meterschritten von 1 m - 6 m Abstand zur Pflanze) wurden um die Pflanzen herum konzentrische Kreise aufgezeichnet (Abbildung 3). Es wurde täglich notiert, bis zu welcher Entfernung um die Mutterpflanze wie viele Samen von *L. polyphyllus* geschleudert wurden. Der Versuch wurde beendet, sobald die Einzelpflanzen keine Samen mehr abgaben. Im zweiten Versuch wurde die Samenschüttung von *L. polyphyllus*-Beständen niedriger, mittlerer und hoher Deckung untersucht. Dazu wurden im NSG Lange Rhön auf zwei Versuchsfeldern insgesamt vier 5 m x 5 m-Versuchsplots pro Deckungsklasse angelegt. Pro Plot wurden jeweils zehn Samenfallen (Ø 20 cm) in den Boden eingegraben (Abbildung 4). Diese Fallen wurden zwischen dem 1. August und dem 30. September 2017 wöchentlich geleert und die in den Fallen vorkommenden *L. polyphyllus*-Samen ausgezählt.

Zur Untersuchung der Hemerochorie (Fremdausbreitung) wurden im NSG Lange Rhön in den Jahren 2017 und 2019 Beprobungen an Mähwerken durchgeführt. Diese Beprobungen erfolgten in Kooperation mit der Landschaftspflegevereinigung Rhön-Grabfeld, die den Kontakt zu Landwirten herstellte, die im NSG Lange Rhön Wiesen im Rahmen des Vertragsnaturschutzes bewirtschaften. Am 4. Juli 2017 wurden insgesamt zwölf Beprobungen durchgeführt. Aufgrund der phänologischen Bedingungen (vergleichsweise späte *L. polyphyllus*-Blüte im Jahr 2017) wurden im Jahr 2019 erneut Beprobungen durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Mahdtermine erfasst (15. Juni und 1. Juli 2019), es wurden pro Termin 14-15 Proben genommen und die vorkommenden Samen von *L. polyphyllus* ausgezählt. Bei jeder Beprobung wurden Mähwerktyp, Lage und Vegetationstyp der jeweiligen Wiese sowie Vorkommen von *L. polyphyllus* (Ja/Nein) erfasst. Um ausschließlich das Material zu erfassen, das potentiell auf weitere Flächen übertragen werden kann, erfolgte die Beprobung direkt nach Abschluss der Mahd und dem Verlassen der jeweiligen Wiesen durch den Landwirt (Abbildung 5). Die Proben aus 2017 wurden bei 4 °C im Kühlschrank gelagert, um ab Ende September 2017 ihre Auskeimung im Gewächshaus der JLU zu untersuchen. Bei den Proben aus dem Jahr 2019 lag der Fokus auf der Quantifizierung des Ausbreitungspotentials von *L. polyphyllus* durch Mähwerke. Deswegen wurden die in diesen Proben vorkommenden *L. polyphyllus*-Samen ausgezählt, die Erfassung des Samenpotentials erfolgte nicht.

Um festzustellen, ob die Schafe der durch die Rhön ziehenden Wanderschäfer potentielle Ausbreitungsvektoren für *L. polyphyllus* darstellen und in welchem Ausmaß wertvolle Bergwiesenarten endozoochor durch Schafe ausgebreitet werden, wurden zwischen dem 4.07.2017 und dem 30.09.2017 wöchentlich Kotproben von drei Schafherden, die sich während des gesamten Sommers im NSG Lange Rhön aufhielten, genommen. Auch diese Proben

wurden bei 4 °C im Kühlschrank gelagert, um ab Ende September 2017 im Gewächshaus der JLU zum Auskeimen gebracht zu werden.

Die Anzahl der in den Proben vorhandenen keimfähigen Samen wurde mit Hilfe der Emergence-Methode (Ter Heerdt et al. 1996) bestimmt. Dazu wurden die Proben zum Auskeimen in Pflanzschalen der Innenmaße 19 cm x 29 cm auf eine 4 cm dicke Schicht eines sterilen Blumenerde-Sand-Gemisches (Verhältnis 2:1) aufgetragen. Da die ausgebrachte Schicht dünn genug sein sollte, um die Keimung aller Samen zu gewährleisten, wurden die Proben auf mehrere Schalen pro Probe aufgeteilt. Bei den Mähwerkproben wurde jeweils das gesamte Probenmaterial zum Auskeimen gebracht (pro Probe zwei bis vier Schalen). Bei den Schafkotproben wurden pro Woche und Schafherde 100 ml einer Mischprobe auf jeweils vier Pflanzschalen aufgeteilt. Insgesamt ergab sich bei dem verwendeten Probenvolumen und den Schalenmaßen eine Schichtdicke von ca. 3 mm. Die Pflanzschalen wurden im Gewächshaus aufgestellt. Die kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus waren die gleichen wie im AP 1. Um den Sameneintrag aus der Umgebung zu erfassen, wurden zusätzlich sechs mit Substrat gefüllte Pflanzschalen gleichmäßig zwischen den Probenschalen verteilt. Arten, die in diesen Schalen keimten, wurden aus der Auswertung ausgeschlossen. Die erste Auskeimphase fand zwischen September 2017 und Januar 2018 statt. Im Januar wurden die Proben dann unter ein engmaschiges Drahtgestell im Außenbereich des Versuchsfelds der JLU gestellt. Dadurch wurden sie bei winterlicher Witterung feucht-kalt stratifiziert, um die potentielle Dormanz der Samen einiger Arten zu brechen. Die zweite Auskeimphase fand von März bis August 2018 statt. Der Versuch wurde beendet, als keine neuen Keimlinge mehr in den Schalen aufliessen.

Bäche und Gräben stellen als lineare Strukturen in der Landschaft verbindende Elemente und potentielle Ausbreitungswege für schwimmfähige Samen dar. Um herauszufinden, ob und in welchem Maß *L. polyphyllus*-Samen schwimmfähig sind, wurde ein Schwimmversuch nach Römermann et al. (2005) durchgeführt. Dafür wurden jeweils 100 Samen von *L. polyphyllus* in zwei Bechergläsern mit je 200 ml H₂O_{Dest} gegeben und eine Woche lang auf einem Probenrüttler geschüttelt. Zu festgelegten Zeitpunkten (nach 0; 5; 60; und 120 Minuten; 6 und 24 Stunden sowie nach 7 Tagen) wurde die Anzahl noch schwimmender *L. polyphyllus*-Samen gezählt. Der Schwimmversuch wurde im Dezember 2018 mit 4 Replikaten à 100 Samen wiederholt. Um im Gelände die hydrochore Ausbreitung von *L. polyphyllus* zu untersuchen, wurden in einem Bach unterhalb von bachnahen *L. polyphyllus*-Beständen neun schwimmfähige Samenfallen (Abbildung 6) im Abstand von je fünf Metern zueinander ausgebracht. Diese wurden zwischen August und September wöchentlich geleert und die darin vorkommenden *L. polyphyllus*-Samen gezählt.



Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Ballochorie mit Lupinus-Einzelpflanze



Abbildung 4: Samenfalle zur Untersuchung der Samenschüttung von Lupinus-Beständen unterschiedlicher Deckung



Abbildung 5: Mähwerk eines beprobten Traktors



Abbildung 6: Schwimmfähige Samenfalle zur Untersuchung der Hydrochorie

AP 3: Energetische Verwertung von extensivem Grünland unter Berücksichtigung von *L. polyphyllus*

3a) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die energetischen Parameter für die Verbrennung des Schnittgutes entweder direkt oder nach dem IFBB-Verfahren (Presskuchen) aus?

Versuchsaufbau im Feld

Zur Untersuchung des Effektes des Schnittzeitpunktes (Fragen 3 a bis 3c) unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* auf die Ertragsparameter sowie auf die energetischen Parameter für die Verbrennung, wurde ein Feldversuch im bayrischen Teil der Rhön implementiert (Abbildung 7). Insgesamt wurden vier Versuchsflächen eingerichtet, zwei Flächen mit Lupine und zwei Flächen ohne Lupine, jeweils im Vegetationstyp Borstgrasrasen (BGR) und Goldhaferwiese (GHW). Um Schafe und Wildschweine aus den Versuchsflächen fernzuhalten, wurden Weidezäune und Stromgeräte inkl. Photovoltaikanlagen installiert. Diese Versuchsflächen wurden in den Jahren 2017, 2018 und 2019 beprobt.

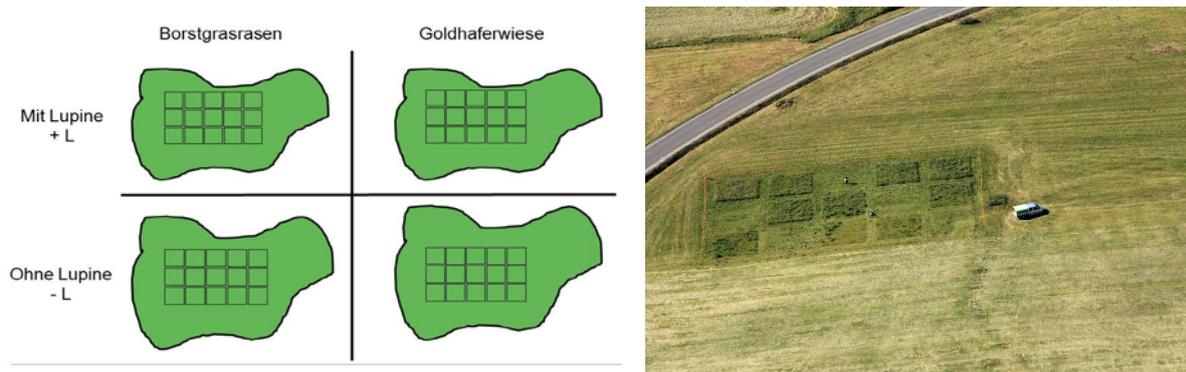


Abbildung 7: Überblick Feldversuchsdesign für die Arbeitspakete 3 und 4, und Luftbildaufnahme von einer Versuchsfläche der Universität Kassel im Bayrischen Teil der Rhön direkt vor dem 2. Schnitttermin (05.07.2017) (© Torsten Kirchner)

Bestimmung der Schnittzeitpunkte

Da ein einmaliger Schnitt nicht ausreicht, um *L. polyphyllus* in ihrer Ausbreitung wirksam zurückzudrängen, wurde auf jeder Versuchsfläche ein Zweischnitt-Regime simuliert. Für den ersten Schnitt wurden drei verschiedene Zeitpunkte (ZP) erprobt (Tabelle 1). Der erste ZP entspricht einem frühen Mahdtermin (Mitte Juni), wie er in den letzten Jahren teilweise im Biosphärenreservat eingeführt wurde, um *L. polyphyllus* vor der ersten Samenbildung zu entfernen. Der zweite ZP entspricht einem von der Landwirtschaftskammer für die Flächen im Biosphärenreservat empfohlenen Mahdtermin (Ende Juni/Anfang Juli). Der dritte ZP entspricht einem Termin der gängigen Praxis (Mitte Juli), denn oftmals kommt es aus terminlichen oder meteorologischen Gründen zu einer späteren Mahd als zu dem empfohlenen Termin.

Der zweite Schnitt fand für alle Versuchsplots am selben Termin statt (Tabelle 1). Dieser Termin lag immer im August, bevor die zum ersten Zeitpunkt geschnittenen Lupine-Pflanzen Samen ausbilden konnten.

Tabelle 1: Mahdtermine des ersten und zweiten Schnitts auf den Versuchsfeldern der Universität Kassel im Bayrischen Teil der Rhön in den Untersuchungsjahren 2017, 2018 und 2019.

Jahr	1. Schnitt - Simulation drei verschiedener Mahdtermine			2. Schnitt
	<i>"Früh"</i>	<i>"Empfohlen"</i>	<i>"Gängige Praxis"</i>	
2017	15.06.2017	05.07.2017	19.07.2017	29.08.2017
2018	15.06.2018	27.06.2018	11.07.2018	16.08.2018
2019	15.06.2019	27.06.2019	11.07.2019	15.08.2019

Zu jedem ZP wurden also pro Fläche und Schnitttermin fünf Plots geerntet, beim 2. Schnitt-Termin im August entsprechend alle 15 Plots pro Fläche. Zu den ersten Schnittterminen wurden drei Ertragsschnitte (1 m²) in den fünf Plots (8 x 8 m) geerntet, um den Frischmasseertrag zu bestimmen und Proben genommen, um den Trockenmassegehalt und den Trockenmasseertrag zu bestimmen. In Plots mit *L. polyphyllus* wurde die Biomasse jeweils in Lupine und Lupine-frei aufgeteilt und separat beprobt. Eine weitere Probe wurde entnommen, getrocknet und auf weitere Inhaltsstoffe analysiert. Dann wurde der gesamte Plot geerntet und die Biomasse zur Silierung in Fässer gefüllt, verdichtet und luftdicht verschlossen. Jeweils im August jeden Jahres wurde jeder Plot auf Frischmasse- und Trockenmasseertrag sowie auf dessen Anteil an *L. polyphyllus* beprobt.

Weiterverarbeitung der Proben mit dem IFBB-Verfahren

Die in Fässern silierten Proben (60) wurden im Herbst 2017 (Oktober/November) auf dem Versuchsgut der Universität Kassel in Neu-Eichenberg nach dem IFBB-Verfahren verarbeitet (Abbildung 8). Hierzu wurde jede Probe zunächst geöffnet, gut durchmischt und Proben zur Bestimmung der Trockensubstanzgehalte und für weitere Analysen genommen. Im Falle einer Schimmelbildung wurde dieser entfernt und entsorgt. Daraufhin wurden Proben für die Biogastests entnommen. Diese wurden sofort tiefgefroren zur späteren Anwendung [→ AP 3b]. Mit der verbleibenden Biomasse wurde das IFBB-Verfahren durchgeführt. Die Mengen an Biomasse schwankten stark zwischen 4 kg Biomasse (trockene Borstgrasrasen-Biomasse) und 20 kg Biomasse (feuchte Biomasse mit hohem Anteil an *L. polyphyllus*). Die Proben wurden entsprechend ihres Gewichts mit der 4-fachen Menge Wasser vermischt. Im Falle der Borstgrasrasenproben aus Hessen wurde die 8-fache Menge Wasser verwendet, da hier die 4-fache Gewichtsmenge aufgrund des geringen Gewichtes und des hohen Volumens der Biomasse nicht ausgereicht hätte, um eine Mischung zu gewährleisten.

Die Maische (Wasser + Silage) wurde in einen umgebauten Betonmischer eingefüllt, auf 40°C erhitzt und bei konstanter Temperatur 15 Minuten gerührt. Anschließend wurde die Maische in eine Schneckenpresse der Firma Vetter Tec / Anhydro gefüllt und dort mit ca. 7 Umdrehungen pro Minute, einer Steigung von 1:6 und einer Siebkorbblöschung von 1,5 mm entwässert (Abbildung 8). Der entstandene Presssaft sowie der Presskuchen wurden beprobt. Die Presssaftproben wurden für spätere Gärtests tiefgefroren [→ AP 3b].



Abbildung 8: Integrierte Festbrennstoff – und Biogasproduktion aus Biomasse (IFBB)

Verarbeitung der Proben im Labor

Trockensubstanzbestimmung

Die Proben zur Trockensubstanzbestimmung wurden bei 105°C im Trockenschrank für mindestens 48 h getrocknet. Aus der Gewichts­differenz zwischen Frischmasse und getrockneter Probe wurde der Wasser-/Trockenmassegehalt berechnet.

Chemische Analysen der Feldproben

Entsprechend des Versuchsplans wurden 60 Proben ohne *L. polyphyllus* und 25 Proben mit *L. polyphyllus* genommen. Diese Proben wurden im Trockenschrank bei 60°C getrocknet, mittels einer Schneidmühle auf 4 mm zerkleinert, und anschließend in einer Feinmühle auf 1 mm gemahlen. Im Mai 2018 wurden diese Proben dann auf die folgenden Parameter analysiert: Gehalt an C, H, N, Aschegehalt und eine Untersuchung mittels Nahinfrarot-Sensorik im Labor zum Abgleich der sensorischen Labor-Daten mit den gemessenen Daten und den sensorischen Daten aus dem Feld [→ AP 4].

Chemische Analysen der IFBB-Proben

Sowohl die Silage der Feldproben vor dem IFBB-Verfahren als auch der erzeugte Presskuchen wurden wie die Feldproben getrocknet und gemahlen. Sie wurden auf folgende Parameter untersucht: C-, H- und N-Gehalte, Trockensubstanzgehalte, Aschegehalte, Lignin-, Hemicellulose- und Cellulose-Gehalte sowie Mineralstoffgehalte.

3b) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung von Lupinenabundanz und Vegetationstyp auf die energetischen Parameter hinsichtlich der anaeroben Vergärung des silierten Schnittgutes bzw. des nach dessen Abpressung (mit dem IFBB-Verfahren) gewonnenen Presssaft aus? Wie wirkt sich die anaerobe Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen von *L. polyphyllus* aus?

Proben im Biogaslabor - Batchversuche

Beginnend im Dezember 2017 wurden die Proben des Presssaftes und der Silage im Biogaslabor der Universität Kassel in Anlehnung an die VDI-Norm 4630 vergoren (Abbildung 9). Als Gärbehälter (Reaktor) dienten gasdicht verschließbare Polyethylen-Kunststoffbehälter mit 20 l Volumen. Am Deckel dieser Behälter befand sich ein 12 V – Elektromotor und ein von diesem angetriebenes Rührwerk, das in den Innenraum des Behälters reichte. An den Motor war eine Zeitschaltuhr angeschlossen, die es erlaubt, Zeitspanne und Rhythmus für das Aufrühren des Behälterinhalts einzustellen. Ebenfalls im Deckel, bzw. in einigen Fällen im oberen Bereich des Behälters, befand sich eine Tülle, über welche Gas entweichen konnte. An diese Tülle wurde ein Schlauch gekoppelt, der über einen Absperrhahn verfügte, mit dessen Hilfe der Gärbehälter gasdicht verschlossen werden kann. Über den Schlauch wurde eine Verbindung zu einem 20 l fassenden Gasbeutel (Tecobags, Tesseraux Spezialverpackungen GmbH) hergestellt, in dem das entstehende Gas aufgefangen wurde. Auch der Gasbeutel verfügte an seiner Öffnung über ein Absperrventil. Mit Hilfe dieser beiden Schließvorrichtungen an Behälter und Beutel konnte die Verbindung zwischen diesen zeitweise getrennt werden, ohne dass Gas aus dem System entwich. Diese Funktion diente dazu, dass im Beutel gesammelte Gas zu messen und zu dokumentieren. Die Versuche wurden als sog. Batchversuche durchgeführt. Das bedeutet, dass nur einmalig, beim Ansetzen des Versuches, Substrat in den Reaktor gegeben wurde, und auch während des Versuches bis auf das entstehende Gas nichts aus dem Reaktor entnommen wurde. Als Zeitraum für die Gärversuche wurden für Silagen 35 Tage festgelegt, für Presssäfte 21 Tage. Nach diesen Zeiträumen entstand kaum noch zusätzliches Methan und die Proben galten nach der VDI-Norm als ausgegoren (pro Tag weniger als 0,5% des bis dahin gemessenen Methans).



Abbildung 9: Biogaslabor des Fachbereichs Grünlandwissenschaften und Nachwachsende Rohstoffe der Universität Kassel

Die Vergärungsversuche wurden auf folgende Weise angesetzt: In jeden Reaktor wurde ein Inokulum eingewogen. Dieses stammte aus dem Nachgärer der Biogasanlage in Obernjesa bei Göttingen, welcher mit Schweinegülle und Mais betrieben wird. Zu diesem Inokulum wurde jeweils die Silage oder der Presssaft als Substrat hinzugefügt. Jede Silageprobe wurde in zweifacher Wiederholung, jeder Presssaft in dreifacher Wiederholung angesetzt. Mit jedem

Gärversuch wurden zudem zwei Nullvarianten (blank) und zwei Standardvarianten durchgeführt. Bei den Nullvarianten wurde ausschließlich Inokulum, bei den Standardvarianten Inokulum + Cellulose eingesetzt. Der Gasertrag von Cellulose ist bekannt. Die Nullvariante diente der Überprüfung der Gasentstehung aus dem Inokulum selbst. Die gemessene Gasmenge aus dieser Probe wurde von den Messwerten der Gasbildung aus den Substraten abgezogen. Die Standard-Variante diente als Referenzprobe zur Überprüfung der biologischen Aktivität des Inokulums. Die Batch-Reaktoren standen in einem 37°C warmen Wasserbad und wurden pro Stunde für 10 Minuten automatisch durchmischt. Über den Zeitraum des Versuches, wurde das dabei entstandene Biogas in einem Beutel aufgefangen und kontinuierlich gemessen. Die entstandenen Biogaskolumina wurden mit einem Trommelgaszähler (TG 5, Ritter) gemessen und der jeweilige Methangehalt des Gases mit einem Infrarot-Gasanalysator (GS IRM 100, GS Messtechnik GmbH) bestimmt. Zum Zeitpunkt der Gasmessung wurden Luftdruck und Lufttemperatur gemessen und festgehalten. Mit diesen Werten wurden anschließend die ermittelten Gasvolumina (l) auf Volumina bei Normbedingungen (l_N ; 273 K, 1013 hPa) umgerechnet. Schließlich wurden diese Volumina auf die Masse der organischen Trockensubstanz (oTS) des Substrates bezogen ($l_N \cdot \text{kg}^{-1}$ oTS).

Langzeitversuch

Da spezifische Inhaltsstoffe von *L. polyphyllus* (z.B. Alkaloiden) auf Mikrobewachstum hemmend wirken und damit den Einsatz dieses Materials im Biogasprozess ausschließen könnten, wurden zusätzlich kontinuierliche Gärversuche durch den Landesbetrieb Hessisches Landeslabor, Standort Bad Hersfeld, durchgeführt. Diese Versuche waren ergänzend zu den durchgeführten Batchversuchen am Fachbereich für Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe der Universität Kassel. In den kontinuierlichen Gärversuchen wurden Substratmischungen aus Material von Borstgrasrasen und *L. polyphyllus* in Verhältnissen von 100:0, 67:33, 33:67 und 0:100, bezogen auf die eingesetzte Trockensubstanz, eingesetzt.

Die Untersuchungen fanden in temperierten (38°C ± 2°C) Gärbehältern mit einem Gärvolumen von 30 l statt. Die Gärbehälter wurden kontinuierlich gerührt und die Fütterung erfolgte arbeitstäglich. Das produzierte Biogas wurde hinsichtlich Qualität und Quantität beständig automatisiert analysiert. Die Mengenerfassung erfolgte mittels Trommelgaszählern (TG 05, Fa. Ritter). Die Messung der Gaszusammensetzung (Methan und Kohlendioxid) erfolgte diskontinuierlich (produktionsmengenabhängig ca. 1 x je produzierte 3 l) mittels infrarotbasierter Gasqualitätsmessung (Awiflex, AWITE Bioenergie GmbH). Die Inbetriebnahme der Versuche erfolgte mit einem Inokulum aus der Biogasanlage (BGA) des Landesbetriebs Landwirtschaft Hessen (Eichhof, Bad Hersfeld). Zum Zeitpunkt der Entnahme wurde die BGA mit verschiedenen landwirtschaftlichen Substraten beschickt (Silagen, Gülle). Die Beschickung erfolgte für die dem Versuch vorangehende Inbetriebnahmephase ausschließlich mit dem Borstgrasrasenmaterial, um den gleichförmigen Betrieb aller vier Fermenter zu erreichen und sicherzustellen. Nach dieser Phase erfolgte der Substratwechsel auf die o.g. Mischungen.

Das Substrat (Borstgrasrasenschnitt / *L. polyphyllus*) wurde durch die Universität Kassel vor dem Einsatz auf einem Bandtrockner getrocknet und in einer Hammermühle zerkleinert. Dieser

Schritt war für die Verhinderung technischer Probleme (problematische Beschickung, Aufwickeln langer Fasern um die Rührwerke, Schwimmschichtbildung, Verstopfung von Zu- und Abläufen und Rührwerken) notwendig. Vor der Durchführung der Untersuchungen wurden Simulationsrechnungen zur Anreicherung eines fiktiven Stoffes durchgeführt, um die notwendige Untersuchungsdauer abzuschätzen. Da Einwaschprozesse bis zur Erreichung des „steady state“ sehr lange dauern, wurden als Ziel 2/3 der theoretischen Maximalkonzentration angestrebt. Dabei wurde von einer Raumbelastung von ca. 3,5 g oTS/l und der ausschließlichen Fütterung von frischer *L. polyphyllus*-Silage ausgegangen. Wie in Abbildung 10 ersichtlich, hätte dies zu einem Erreichen von 2/3 der maximal erreichbaren Konzentration nach ca. 90 Tagen geführt.



Abbildung 10: Simulation der Aufkonzentrierung eines Störstoffes im Reaktor bei geplanter Fütterung von Lupinensilage

*Auswirkung der anaeroben Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen von *L. polyphyllus**

Um die Frage zu klären inwiefern sich die anaerobe Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen auswirkt, wurden im Rahmen einer Masterarbeit (Titel: „Keimungserfolg von *L. polyphyllus* nach dem Vergärungsprozess im Biogasreaktor“) Samen von *L. polyphyllus* im Naturschutzgebiet „Lange Rhön“ gesammelt. Die Fläche befand sich im Süden des Naturschutzgebietes und wies eine Größe von ca. 2.100 m² auf. Vor Ort wurden einzelne Blütenstände abgebrochen und die Samen per Hand aus den Hülsen entfernt. Bis zum Versuchsbeginn wurden die Samen zwischen ein und acht Tagen kühl und dunkel in offenen Glasgefäßen gelagert. Das Versuchsdesign umfasste drei Reifegrade der Samen von *L. polyphyllus*: grüne Samen, grün-braune Samen und braune Samen (Abbildung 11), welche an drei unterschiedlichen Terminen (07.07.2019, 22.07.2019 und 05.08.2019) gesammelt wurden. Für das Versuchsdesign wurden demnach die Samen nach dem Reifegrad, nachfolgend Altersstadium 1- 3 (AS1-3) genannt, klassifiziert (Abbildung 11).



Abbildung 11: Versuchssamen von *L. polyphyllus* zu den drei verschiedenen Sammelzeitpunkten. Fotos: Juliane Baltes

Die durchschnittliche Samenlänge und –breite sowie das Tausendkorngewicht wurden an 100 Samen pro AS gemessen. Die Lebensfähigkeit der Samen wurde mittels Tetrazoliumtest, einer invasiven Methode, ermittelt. Hierzu wurden jeweils 25 Samen pro AS (zweifacher Ansatz) mit einer Rasierklinge angeritzt, so dass die inneren Gewebeschichten mit der Tetrazoliumchloridlösung in Berührung kommen kann. Für die Herstellung der Lösung wurde Tetrazoliumchlorid (2,3,5-Triphenyltetrazoliumchlorid) als Pulver mit 70 % EtOH in einem kleinen Behältnis bis zur Lösung gut durchmischt. Anschließend wurde diese Lösung mit H₂O bis zu einer Endkonzentration von 0.5 % verdünnt. Die trockenen Samen von *L. polyphyllus* wurden zum Quellen mehrere Stunden auf mit Wasser getränktes Filterpapier gelegt. Danach wurden die Samen in eine Petrischale (25 Samen pro Petrischale, 2facher Ansatz, n = 50 pro Alterstadium) mit Deckel gegeben und mit der Tetrazolium-Lösung bedeckt. Die Petrischalen wurden abgedunkelt und für ca. 24 h bei 22-24°C inkubiert. Anschließend wurden die Samenschalen vorsichtig entfernt und der Embryo bzw. das entsprechende aussagekräftige Gewebe heraus präpariert.

Das Versuchsdesign dieser Arbeit bestand aus zwei Vorgängen. Zuerst fand der Vergärungsprozess an der Universität Kassel statt, anschließend wurde das Keimungsexperiment an der Universität Gießen durchgeführt. Die Vergärung der Samen von *L. polyphyllus* fand in luftdicht verschließbaren Kunststoffbehältern (Reaktoren) mit 20 l Fassungsvermögen statt. Am Verschlussdeckel wurde ein Rührwerk befestigt, das im Behälter für stetige Durchmischung gesorgt hat. Das Rührwerk wurde an eine Zeitschaltuhr angeschlossen und schaltete sich alle 75 Minuten für 15 Minuten ein. Aus dem Reaktor austretendes Gas wurde über einen Gummischlauch in einen Gas auffangbeutel geleitet und nach Versuchsende entsorgt. Die einzelnen Versuchsreaktoren wurden in beheizten Wasserwannen konstant auf Temperatur (37°C und 50°C) gehalten. In einer Wasserwanne fanden vier Reaktoren Platz. Zu Versuchsbeginn wurden jeweils 50 Samen in einen Polyesterbeutel gefüllt und mit einem Kabelbinder fest verschlossen. An jedem Rührwerk wurden fünf dieser Polyesterbeutel mit Kabelbindern angebracht (Abbildung 12). Anschließend wurden die Biogasreaktoren mit 12 l Schweinegülle befüllt, zuerst ohne Rührwerk luftdicht verschlossen und auf die entsprechende Temperatur gebracht. Nach ca. 24 Stunden wurde die gewünschte Vergärungstemperatur erreicht und die Rührwerke mit den Polyesterbeuteln wurden in die Reaktoren eingesetzt. In diesem Moment begann der Vergärungsprozess von 35 Tagen. Dieses Vorgehen wurde für die Samen der Altersstadien 1 (AS1) und 2 (AS2)

durchgeführt. Die Samen des Altersstadiums 3 (AS3) wurden in die Reaktoren des AS1 eingesetzt, nachdem diese keine Polyestersäckchen mit Samen mehr beinhalteten. Um den Einfluss der Vergärungsdauer auf die Keimfähigkeit der Samen von *L. polyphyllus* zu testen, wurden zweimal wöchentlich (Montag und Donnerstag) 200 Samen für jede Faktorkombination (Altersstadium, Temperatur) aus den Reaktoren entnommen. Montags wurde jeweils ein Polyestersäckchen aus den Reaktoren mit gerader Zahl einer Faktorkombination entnommen (R2, R4, R6, R8, vgl. Abbildung 12). Donnerstags wurde jeweils ein Polyestersäckchen aus den vier Reaktoren mit ungerader Zahl einer Faktorkombination entnommen (R1, R3, R5, R7, vgl. Abbildung 12). Im Verlauf der 35 Vergärungstage fanden somit zehn Entnahmen der Polyestersäckchen statt.

Versuchsaufbau des Vergärungsprozesses

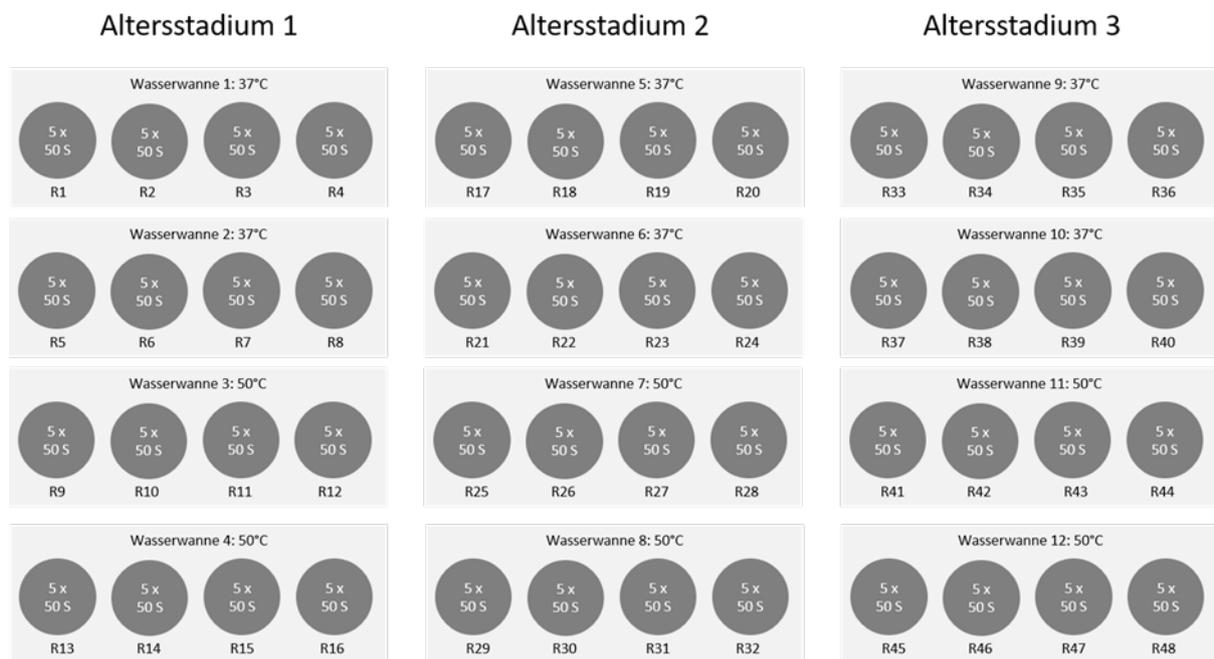


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Vergärung der Samen (S) von *L. polyphyllus*. Dunkelgraue Kreise zeigen einen Reaktor (R) an. Hellgraue Rechtecke zeigen eine Wasserwanne an

Für das Keimungsexperiment wurden Petrischalen mit Filterpapier ausgelegt, die vergorenen Samen mit Leitungswasser gespült und der Klimaschrank auf einen Temperaturrhythmus von 15°C bei Tag und 5°C bei Nacht eingestellt. Eine Petrischale wurde mit destilliertem Wasser befeuchtet, mit 25 vergorenen Samen einer Kategorie (Altersstadium, Vergärungstemperatur) bestückt und anschließend in den Klimaschrank gestellt. Jeweils acht Petrischalen wurden mit einer Plastiktüte verschlossen, um die Verdunstung zu reduzieren. Die Petrischalen wurden zweimal in der Woche (Montag und Donnerstag) zur Kontrolle der Keimung aus dem Klimaschrank genommen. Gekeimte Samen wurden gezählt und entnommen. Ein Samen wurde mit dem Austreten der Keimwurzel als gekeimt anerkannt. Im Zuge dieser Kontrolle wurde ebenfalls die Feuchtigkeit des Filterpapiers überprüft und nach Bedarf erneut befeuchtet. Das Keimungsexperiment lief über eine Dauer von 10 Wochen.

Keimungsparameter

Um das Keimungsverhalten auszuwerten wurde für jedes Replikat die Gesamtkeimung in Prozent, die mittlere Keimzeit in Tagen und die Synchronität der Keimung berechnet (nach Ranal *et al.* 2009). Die Gesamtkeimung in Prozent (germination seed percentage; *grp*) errechnet sich aus der Anzahl der gekeimten Samen und der Anzahl der angesetzten Samen. Dafür gilt:

$$grp = \left(\frac{100}{N}\right) * \sum n_i$$

wobei N die Gesamtanzahl der angesetzten Samen pro Replikat bedeutet und n_i für die Anzahl der gekeimten Samen an Tag i steht. Die mittlere Keimzeit (\bar{t}) und Synchronität der Keimung (Z) wurden anhand der Anzahl gekeimter Samen über die Zeitspanne des Experimentes errechnet (Ranal *et al.* 2009). Dabei steht die mittlere Keimzeit für die gewichtete Durchschnittszeit in Tagen bis zur Keimung und wird wie folgt definiert:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i t_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$$

wobei n_i für die Anzahl der gekeimten Samen an Tag i steht, t_i die Zeit vom Start des Experimentes bis zum Beobachtungstag i anzeigt und k der letzte Tag der Keimung ist. Die Einheit der mittleren Keimzeit ist abhängig von dem Beobachtungsintervall. Das Beobachtungsintervall dieser Arbeit ist in Tagen gemessen. Die Synchronität der Keimung (Z) eines Samens mit einem anderen innerhalb der gleichen Versuchseinheit definiert sich wie folgt:

$$Z = \frac{\sum C_{n_i,2}}{N}, \text{ wobei } C_{n_i,2} \text{ und } N \text{ folgendermaßen definiert sind:}$$

$$C_{n_i,2} = \frac{n_i(n_i-1)}{2} \quad \text{und} \quad N = \frac{\sum n_i(\sum n_i-1)}{2}$$

Dabei steht $C_{n_i,2}$ für die Kombination der gekeimten Samen innerhalb von i Tagen. Z ist ein Index von 0-1 ohne Einheit. $Z = 1$, wenn die Keimung aller Samen zur gleichen Zeit stattfindet und $Z = 0$, wenn mindestens zwei Samen zu unterschiedlichen Zeitpunkten gekeimt sind. Hohe Werte beschreiben eine hohe Synchronität der Keimung.

3c) Wie wirkt sich der Schnitzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die Lebenszyklusanalyse der unterschiedlichen möglichen (energetischen) Verwertungsrichtungen aus?

Zur Durchführung der Lebenszyklusanalyse (LCA) der unterschiedlichen möglichen energetischen Verwertungsrichtungen wurden ebenfalls die im Feldversuch gesammelten Daten verwendet. Das Ziel der LCA war die Analyse der Umwelteinflüsse unterschiedlicher Managementoptionen für die Flächen der Hochrhön. Hierzu wurde eine vergleichende LCA durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie können genutzt werden, um die umweltfreundlichste Nutzungsoption zu identifizieren. Hierzu wurden sowohl

lupineninviadierte als auch lupinenfreie Biomassen untersucht. Die Umweltweinflüsse für beide Biomassen wurden unter Berücksichtigung derselben Bedingungen und Grenzen der Untersuchung berücksichtigt. Diese Vorgehensweise erlaubt auch Rückschlüsse auf die Nutzung der naturschutzfachlich wertvollen Flächen nach der Zurückdrängung der Lupine. Das genutzte LCA-Prinzip nennt sich „Cradle to gate“ („von der Wiege bis zum Tor“). Es beginnt mit der Ernte der Biomasse und endet mit der Produktion von Wärme und Strom (Abbildung 13). Die Methodik ist in den ISO-Normen 14040 und 14044 definiert und wurde hier entsprechend angewandt. Lebenszyklusinventare (LCI) wurden nach dem Verfahren der „attributional LCI“ modelliert, d.h. die Inputs und Outputs wurden direkt zu den Prozessen zugerechnet, ohne Marktbedingungen zu berücksichtigen, wie es in einem „consequential LCI“ Verfahren gemacht wird. Die funktionelle Einheit war 1 ha, auf den alle Ergebnisse bezogen wurden. Die Erzeugung erneuerbarer Energien aus Naturschutzgrünland wurde im Zuge der LCA mit der Energieerzeugung aus fossilen Quellen verglichen. Die Wirkungskategorien („impact categories“) wurden anhand der ILCD „Midpoint Indicators“ zum Beispiel anhand des Globalen Erwärmungspotentials (GWP), des Versauerungspotentials von Ökosystemen (AP) sowie des Eutrophierungspotentials (EP) bestimmt.

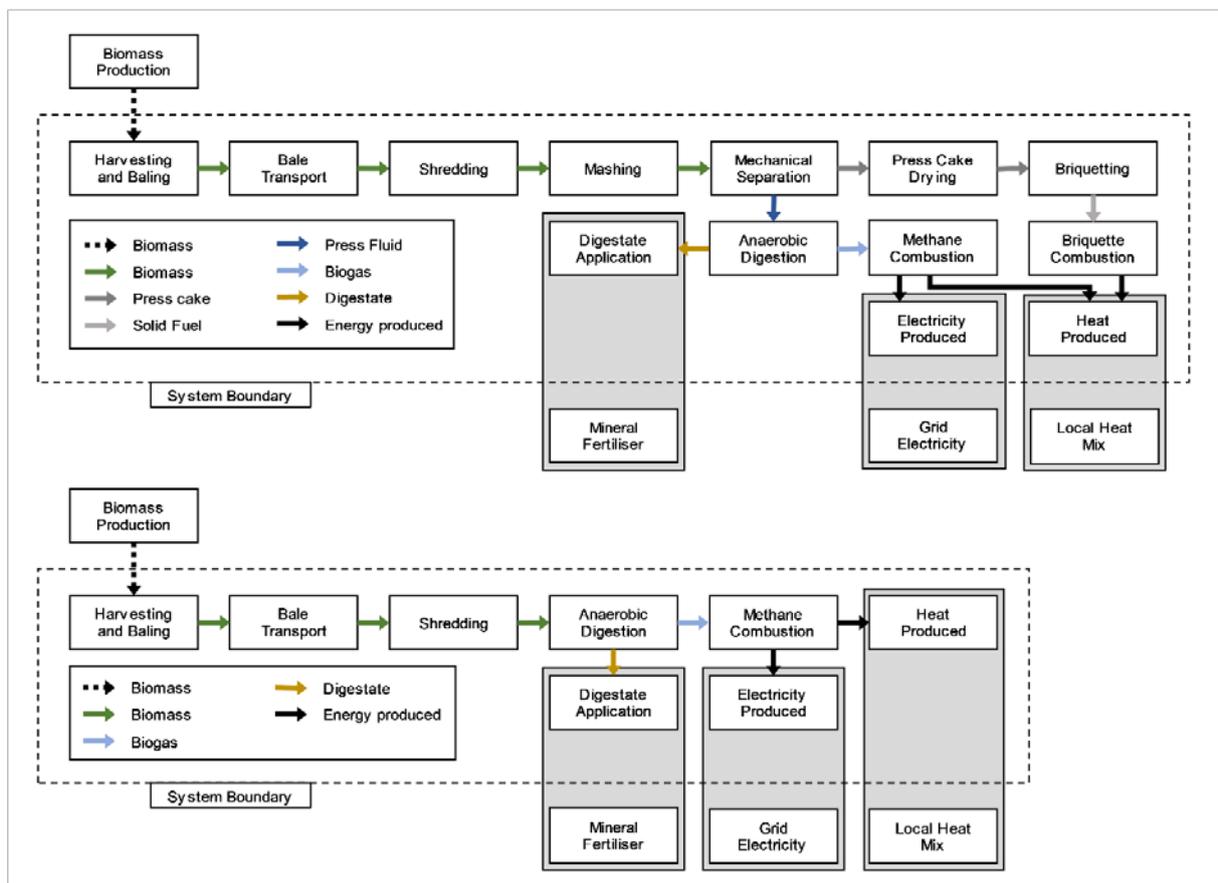


Abbildung 13: Diagramm zu den Systemgrenzen für das IFBB (oben) und die Anaerobe Vergärung (AD; unten). Die Kästchen veranschaulichen die wichtigsten Vordergrundprozesse im System. Die Pfeile kennzeichnen den Fluss von Rohstoffen, Produkten, Wärme und Strom. Gärreste wurden als Ersatz für den lokalen Wärmemix, Netzstrom und Mineraldünger betrachtet.

AP 4: Nicht destruktive, fernerkundliche Beurteilung des Zeitpunktes von Schnittmaßnahmen zur Bekämpfung des invasiven Neophyten *L. polyphyllus* und dessen Auswirkung auf die energetischen Parameter von Grünlandbeständen

4a) Wie hoch ist die Genauigkeit einer fernerkundlichen Erfassung von *L. polyphyllus*-Abundanz im Grünland?

4b) Wie wirkt sich die Deckung von *L. polyphyllus* im Grünland auf die Schätzgenauigkeit energetischer Parameter mit Hilfe fernerkundlicher Messungen aus?

Vorphase

Bereits in der Vorphase des Projektes wurden fernerkundliche Methoden zur Abschätzung der Gesamtbiomasse von Flächen des Borstgrasrasen und der Goldhaferwiese erprobt. Dieser Schritt kann später für die Quantifizierung von *L. polyphyllus* angewendet werden. Hierfür wurden je ein Standort mit Borstgrasrasen und ein Standort mit Goldhaferwiese mit je drei 8 x 8 m Plots mit einem terrestrischen Laser am 25.05.2016, 13.06.2016 und am 12.09.2016 gescannt. Eine Messung im Frühling (04.05.2016) diente zur Erzeugung eines digitalen Höhenmodells.

Auf die fernerkundliche Messung jedes Plots von allen vier Seiten folgte eine Unterteilung der Plots in 64 Subplots. Drei randomisiert gewählte Subplots wurden daraufhin geerntet und die entsprechenden destruktiven Biomassewerte erfasst.

Die vorangegangenen Lasermessungen wurden mit einer Leica Scan Station P30 durchgeführt. Anschließend wurden die vier Scans je Plot mithilfe des Programms Cyclon 9.1 (Leica) zur Erzeugung einer hochauflösenden, dreidimensionalen Punktwolke mit reduzierten Schatteneffekten, zusammengeführt. Jeder Punkt dieser Wolke enthält eine x, y, und z Koordinate sowie einen Intensitätswert des reflektierten Lasersignals. Der Zusammenführungsprozess wurde für jeden Plot zusätzlich wiederholt mit verringerter Anzahl einfließender Scans. So entstanden für jeden Plot vier Punktwolken mit vier, drei, zwei und einem Scan.

Für eine Optimierung der Prozesskette wurden die Daten der Punktwolken im Programm R-Studio in ihre 64 1 m²-Subplots unterteilt. Somit konnten jedem destruktiv gemessenen Biomassewert eine korrespondierende 1 m² große Punktwolke zugeteilt werden.

Die Biomassemodelle wurden folgend untersucht hinsichtlich ihrer Bewertungsgenauigkeit für die Grünlandbiomasse, der benötigten Zeit für Modellberechnung und des Datenvolumens. Um das bestmögliche Modell zur Abschätzung von Grünlandbiomasse zu identifizieren, wurden die folgenden fünf Analysemethoden hinsichtlich der Korrelation von Grünlandbiomasse und dem jeweiligen Modellparameter untersucht.

Vegetationshöhe

Um den Höhenwert jedes einzelnen Punktes innerhalb einer Punktwolke zu erhalten, muss von seinem z-Koordinatenwert der zugehörige (selbe x- und y- Koordinate) z-Koordinatenwert des digitalen Höhenmodells abgezogen werden. Dies geschah durch die Nutzung von Funktionen aus dem Paket *raster* (Hijmans & van Etten 2012) in R-Studio. Da der Laserscanner in der Lage ist, tiefere Vegetationsschichten zu penetrieren, müssen entsprechend aufgezeichnete Punkte ausgeschlossen werden, um die mittlere Vegetationshöhe nicht fälschlich zu verringern. Für weitere Analysen wurden somit die Höhenwerte der Punkte auf einen bestimmten Höhenabschnitt reduziert und alle anderen Punkte ausgelassen. Daraufhin wurde aus den verbleibenden Punkten eine mittlere Höhe ermittelt (bspw. der oberen 25 % aller Punkte). Die resultierenden Höhenmittelwerte wurde hinsichtlich ihrer Korrelation mit den korrespondierenden, destruktiven Biomassewerten untersucht. Zur Identifikation der besten Modellvariante wurde der Höhenbereich zur Bildung eines Höhenmittelwertes variiert und die Güte der Modellvarianten untereinander verglichen.

Summe der Voxel

Eine Gruppe von Voxeln ist eine dreidimensionale, digitale Repräsentation eines volumetrischen Objektes (Würfel). Um Voxel zur Biomassebestimmung zu nutzen, muss der 1 m²-Subplot in Voxel mit einer willkürlich, aber konstant definierten Kantenlänge unterteilt werden. Nun wird für jeden Voxel innerhalb des Untersuchungsraumes eine Abfrage hinsichtlich der Abundanz von Punkten gemacht. Sobald mindestens ein Punkt der Punktwolke in einem Voxel verortet ist, wird dieser Voxel gezählt. Die Summe aller gezählter Voxel wird daraufhin in Korrelation zur destruktiv bestimmten Biomasse gesetzt. Um das ideale Modell der Voxel-Methode zu finden, wurden die Kantenlängen der Voxel variiert und die resultierenden Voxel-Summen hinsichtlich ihrer Korrelation mit destruktiver Biomasse verglichen.

Mittlere der 3d-Raster-Höhe

Eine horizontale Rasterebene wurde in die Punktwolken implementiert. Für jede Rasterzelle wurde der höchstgelegene Punkt erfasst. Dieser Höhenwert ging folgend in einen Mittelwert aller identifizierten Höchswerte jeder Rasterzelle ein. Dieser Gesamtwert wurde in Korrelation mit der korrespondierenden, destruktiv bestimmten Biomasse gesetzt. Zur Identifikation der stärksten Modell-Variante wurden die Kantenlängen der Raster variiert.

Volumen der konvexen Hülle

Für diese Kalkulation kam der *Quickhull*-Algorithmus zum Einsatz (*convhulln* Funktion aus dem Paket *geometry* (Habel et al. 2015)). Hierbei wird eine Linie zwischen dem Punkt mit dem niedrigsten und dem höchsten x-Wert gezogen. Folgend wird auf beiden Seiten der Linie der Punkt mit der größten Distanz identifiziert und dieser mit den ersten beiden Punkten zu einem Dreieck verbunden. Alle Punkte, die innerhalb dieses gebildeten Dreieckes liegen, werden fortan ignoriert. Nun wird ausgehend von den neu entstandenen Linien der Punkt mit dem jeweils größten Abstand außerhalb des Dreiecks gesucht. Dieser wird wieder mittels zweier Linien mit der vorangegangenen Linie zu einem Dreieck verbunden. Dieser Vorgang wird so

lange wiederholt, bis alle Punkte innerhalb der konvexen Hülle liegen. Nun wird das Volumen der konvexen Hülle errechnet und in Korrelation zur destruktiv ermittelten Biomasse gesetzt.

Modell-Evaluation

Die Veränderung der einzelnen Parameter innerhalb jeder Methode, also die Variation des Höhenabschnittes zur Ermittlung der mittleren Vegetationshöhe, die Variation der Kantenlänge innerhalb der Voxel-Methode und die Variation der horizontalen Rastergröße in der 3d-Raster-Methode, wurden hinsichtlich ihrer Schätzgenauigkeit verglichen. Um maximale Methoden-Stabilität zu garantieren, wurde für die Methode *Summe der Voxel* jener Parameter gewählt, bei dem die Zunahme des angepassten R^2 mindestens 1 % größer ist als das angepasste R^2 des vorangegangenen Parameterwerten (siehe Abb. 25). Dies war nötig, da mit steigendem Parameterwert (Voxel-Kantenlänge) die Schätzgenauigkeit nicht mehr konstant zunimmt, sondern stark schwankt.

Die Kalkulationsdauer wurde für jedes Modell mit Hilfe der *microbenchmark* Funktion aus dem R-Paket *microbenchmark* (Mersmann 2015) ermittelt. Jede Kalkulation wurde 10-mal wiederholt und ein Mittelwert errechnet. Die Berechnungsdauer wurde zunächst hinsichtlich der in den Zusammenführungsprozess eingegangenen Scananzahl verglichen unter der Annahme einer abnehmenden Kalkulationsdauer mit abnehmender Scananzahl (von 4 bis 1). Hierfür wurden die Modelle ihrer Scananzahl zugeordnet und ihre Schätzgenauigkeit zusammengefasst. Danach wurden innerhalb der schnellsten Scananzahl die Methoden hinsichtlich ihrer Kalkulationsdauer und Schätzgenauigkeit für Frisch- und Trockenmasseertrag verglichen um die stabilsten, stärksten und schnellsten Methoden zu identifizieren.

Hauptphase

Im ersten Jahr der Hauptphase (2017) wurden die Flächen aus dem Experiment aus AP 3 verwendet. Zeitnah vor jedem Mahdtermin (15.06, 05.07, 18.07) wurden die Kleinflächen des Experiments mit einer terrestrischen Leica P30 Scanstation und einem Tec5 Feldspektrometer vermessen. Das Feldspektrometer wurde hierfür von Hand seitlich in die jeweilige Kleinfläche gehalten und dann wurden bei kontinuierlichen Messabständen die vier Seiten der Kleinfläche abgescritten. Der terrestrische Laser wurde an zwei gegenüberliegenden Spitzen der jeweiligen Kleinfläche aufgestellt, die Fläche wurde in einer Auflösung von 1,6 mm vermessen. Durch drei eingemessene Zielmarken konnten die zwei einer Kleinfläche zugehörigen Scans in Cyclone 9.1 (Leica) zusammengeführt und georeferenziert werden.

2018 wurden die Messungen des Feldspektrometers durch Messungen einer drohnenbasierten Hyperspektralkamera (Abb. 14) ersetzt. Diese Messung fand zum jeweiligen Schnitttermin vor den Lasermessungen statt. Hierbei kam eine Cubert FireFly S185 Hyperspectral Snapshot Camera (Cubert-gmbh.com) zum Einsatz. Sie verfügt über einen Wellenlängenbereich von 450 bis 950 nm, mit 125 spektralen Kanälen. Die räumliche Auflösung der hyperspektralen Bänder liegt bei 50 x 50 Pixel. Zusätzlich besitzt die Kamera ein panchromatisches Band mit einer Auflösung von 1000 x 1000 Pixel. Die Kamera wurde mittels eines Co-Axial Multi-Rotor Octocopters in 20 m Höhe über die Versuchspartellen gesteuert. Die räumliche Auflösung der hyperspektralen Bilder lag bei etwa 20 x 20 cm. Zur Georeferenzierung und Zusammenführung der Einzelbilder wurden GCP's (Ground Control Points) auf dem Boden zwischen den

Versuchspartellen verteilt. Das Zusammenführen der Einzelbilder zu einem hyperspektralen Orthomosaik erfolgte in Agisoft PhotoScan Professional Version 1.3.4 (Agisoft LLC Russia).

Schätzung des Ertrags extensiver Grünlandbestände durch die Kombination von laserbasierten und hyperspektralen Informationen

Zunächst wurden die Erkenntnisse zur Gesamtbiomasseschätzung aus der Vorphase genutzt und um die Informationen der Hyperspektralkamera erweitert. Die Referenzwerte (Trockenmasse) lieferten hierbei die Biomasse-Schnitte aus AP3. Aus den Punktwolken der Laserdaten wurden die Bereiche ausgeschnitten, die räumlich denen der Biomasseentnahme entsprachen. Die mittlere Vegetationshöhe in unterschiedlichen Höhenabschnitten sowie die mittlere Summe der Voxel, wie in der Vorphase beschrieben, wurden berechnet. Zusätzlich wurden Funktionen zur Berechnung der Oberflächenneigung, -hebung und -krümmung der Punktwolke angewendet (Autor: Fabio Veronesi,- nach Florinsky (1998)). Hierbei wird eine Submatrix aus 3 mal 3 Elementen (neun Punkten) erzeugt. Jeder Punkt der Submatrix ((-w, w, z1), (0, w, z2), (w, w, z3), (-w, 0, z4), (0, 0, z5), (w, 0, z6), (-w, -w, z7), (0, -w, z8) (w, -w, z9)) hat gemessene Koordinaten. Für das Zentrum der Matrix lassen sich folgende Werte errechnen.

$$r = \frac{z1 + z3 + z4 + z6 + z7 + z8 - 2(z2 + z5 + z8)}{3w^3}$$

$$t = \frac{z1 + z2 + z3 + z7 + z8 + z9 - 2(z4 + z5 + z6)}{3w^2}$$

$$s = \frac{z3 + z7 - z1 - z9}{4w^2}$$

$$p = \frac{z3 + z6 + z9 - z1 - z4 - z7}{6w}$$

$$q = \frac{z1 + z2 + z3 - z7 - z8 - z9}{6w}$$

Aus diesen Werten können Neigung (G), Hebung (A), horizontale (k_h) und vertikale (k_v) Oberflächenkrümmung berechnet werden.

$$G = \tan^{-1}(\sqrt{p^2 + q^2})$$

$$A = \tan^{-1}\left(\frac{q}{p}\right)$$

$$k_h = \frac{q^2r - 2pqs + p^2t}{(p^2 + q^2)\sqrt{1 + p^2 + q^2}}$$

$$k_v = \frac{p^2r + 2pqs + q^2t}{(p^2 + q^2)\sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$$

Eine weitere Funktion diversifiziert G, A, k_h und k_v um für jedes einen Mittelwert und Variationsbereich zu erzeugen.

Aus den georeferenzierten, hyperspektralen Orthomosaiken wurden jene Bereiche extrahiert, die räumlich denen der Biomasseentnahme entsprechen. Für jeden dieser 1 m² wurde der

spektrale Wert jedes Wellenlängenbandes gemittelt. Die spektralen Reflektionskurven wurden anschließend normalisiert (Vektor Normalisierung).

$$x_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sum \|x_i\|^2}}$$

Dabei ist x_i der spektrale Vektor von $i = 1, 2, \dots, n$.

Für eine Modellierung der Trockenmasse wurden vier verschiedene multivariate Methoden eingesetzt: Support Vector Regression (SVR), Random Forest Regression (RFR), Partial Least Square Regression (PLSR) und Gradient Boosting Machine Regression (GBMR).

Im Jahr 2019 wurde erstmalig auch ein Starrflüglersystem, die FireFLY6 Pro (Abb. 15) von BirdsEyeView Aerobotics (<https://www.birdseyeview.aero>), ausgestattet mit einer Micasense Red Edge Multispektralkamera (<https://www.micasense.com>) eingesetzt. Hierfür wurde auf den Versuchsflächen aus AP3, als auch auf einer größeren, benachbarten Fläche (~15 ha) eine Überfliegung in 100 m Höhe durchgeführt. Anschließend an die Überfliegung wurde auf randomisierten 1 m² Plots die Lupinendeckung visuell geschätzt. Die Modellentwicklung zur Deckungsschätzung von *L. polyphyllus* aus Multispektraldaten ist Anfang 2020 geplant.



Abbildung 14: Trägerplattform mit Hyperspektralkamera



Abbildung 15: FireFLY6 Pro

Des Weiteren wurden im Jahr 2019 die Versuchsflächen aus AP3 mittels einer Phantom4, ausgerüstet mit einer 20 Megapixel RGB-Kamera, in 10 m und 20 m überflogen. Die hochauflösenden RGB-Bilder werden derzeit analysiert. Hierbei werden Methoden des maschinellen Lernens, sogenannte künstliche, neuronale Netze (CNN = Convolutional Neural Network) zur Objekterkennung eingesetzt. Ziel ist eine Lupine-Erkennung auf Einzelpflanzenebene. Eine weitere Drohnenplattform, ausgerüstet mit einem RGB und Thermalsensor (FLIR Vue Pro R (FLIR, www.flir.com)) wurde 2019 auf den AP3 Versuchsflächen eingesetzt. Hierbei sollen verschiedene Parameter aus den RGB Daten abgeleitet und diese mit Thermaldaten kombiniert werden. Die Überfliegung wurde in 20 m Höhe durchgeführt. Aus diesen Daten werden mittels Structure from Motion (SfM) dreidimensionale Punktwolken erzeugt. Aus diesen können Punkthöhen und Punktdichten abgeleitet werden. Des Weiteren werden die RGB Informationen der Bilder in HSI-Werte (Farbwert, Farbsättigung, Lichtintensität) umgewandelt. Diese Parameter werden in Methoden des maschinellen Lernens (z. B. Random Forest) eingesetzt und eine Erweiterung mittels Thermaldaten hinsichtlich einer Modellverbesserung überprüft. Ziel ist hierbei, die Klassifikation von Lupinepflanzen mittels kostengünstiger Trägerplattform und Sensorsystem.

Ergebnisse

AP 1: Restituierung von Bergwiesen durch die Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung

1a) Wo liegen geeignete Spender- und Empfängerwiesen für die Mahdgutübertragung?

Geeignete Spender- und Empfängerflächen für die Restituierung der Bergwiesen konnten anhand einer *Lupinus polyphyllus*-Verbreitungskarte und Geländebegehungen identifiziert werden (Abbildung 16, Abbildung 17).

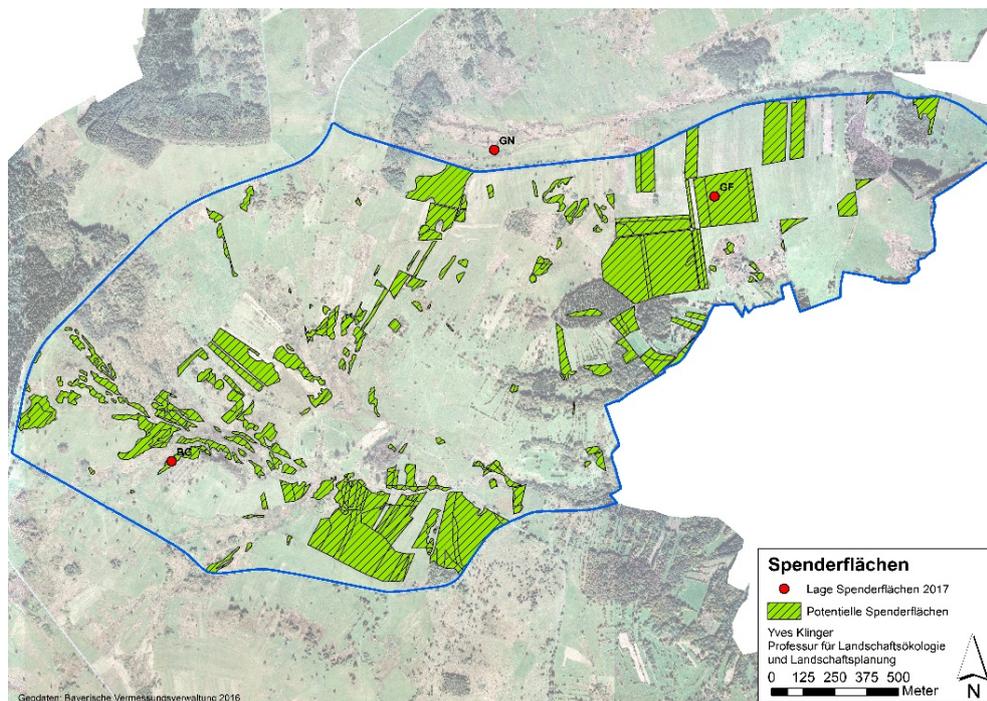


Abbildung 16: Lage der Spenderflächen für den Bergwiesen-Restituierungsversuch (BG = Borstgrasrasen, GF = frische Goldhaferwiese, GN = nasse Goldhaferwiese)



Abbildung 17: Lage der Empfängerflächen für den Bergwiesen-Restituierungsversuch (BG = Borstgrasrasen, GF = frische Goldhaferwiese, GN = nasse Goldhaferwiese)

1b) Stellen die Aktivierung der Samenbank und die Mahdgutübertragung geeignete Maßnahmen zur Restituierung von artenreichen Bergwiesen dar?

Der Versuch zur Aktivierung der Samenbank und Übertragung diasporenhaltigen Mahdguts konnte auf allen Versuchsfächen erfolgreich durchgeführt werden (Abbildung 18).

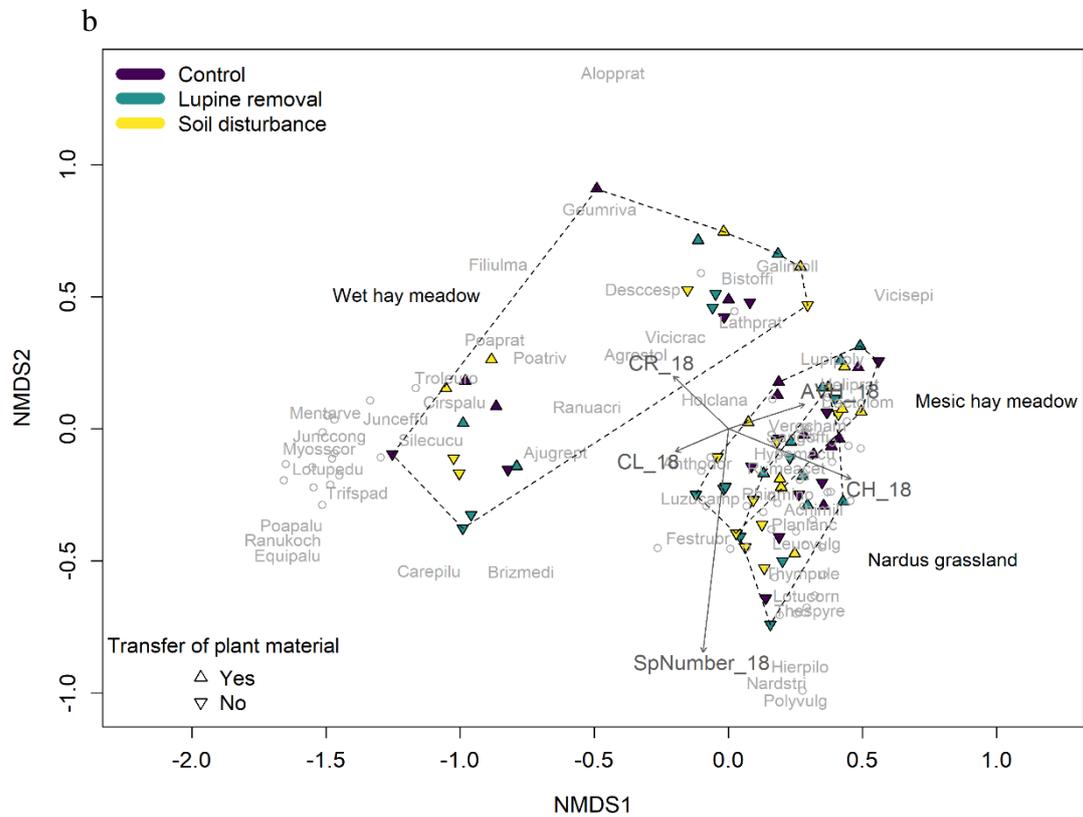
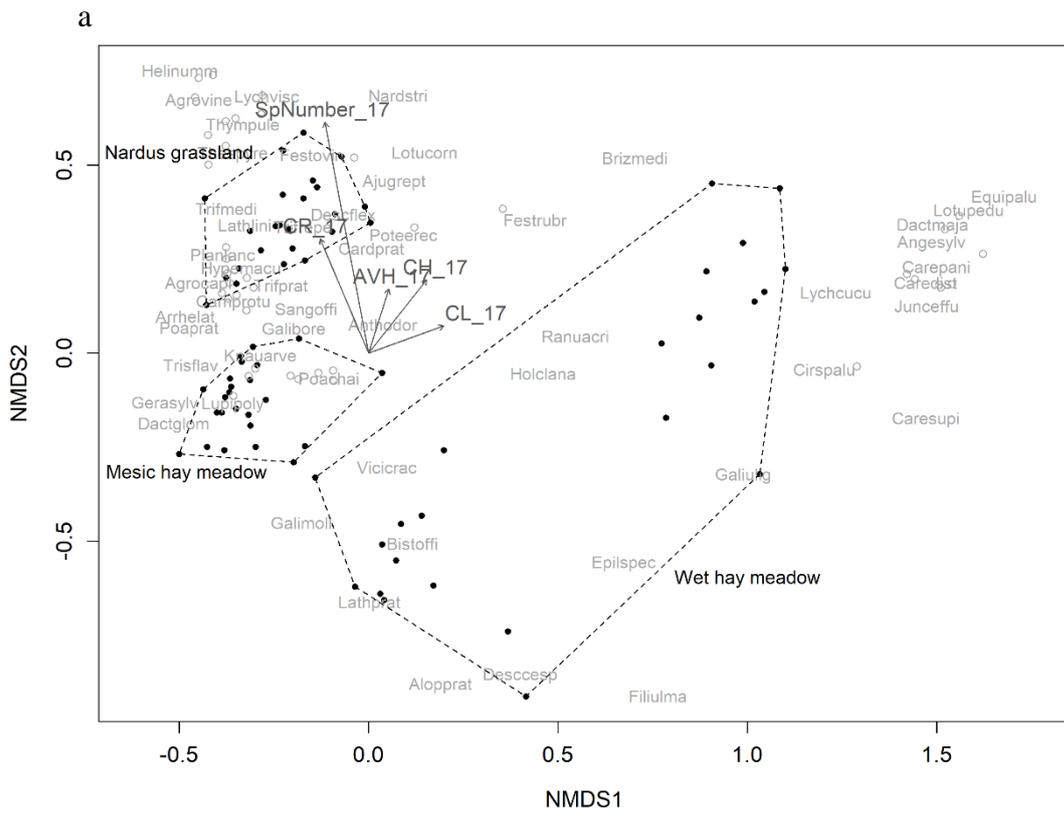


Abbildung 18: Versuch zur Aktivierung der Samenbank (Plots links im Bild) und Übertragung diasporenhaltigen Mahdguts (Streifen rechts im Bild) auf einem Borstgrasrasen. (© Torsten Kirchner)

Die NMDS-Ordination zeigt die zwei floristischen Hauptgradienten mit einem Stresslevel von 9 % (2017), 10 % (2018) und 11 % (2019). Die Abbildungen zeigen, dass sich die Vegetationstypen anhand der zweiten Achse auftrennen. Die nassen Goldhaferwiesen weisen eine große Streuung auf und lassen sich daher ebenfalls anhand der ersten Achse auftrennen (Abbildung 19 a, b und c).

Ein Vergleich der drei Abbildungen zeigt, dass die Vegetationstypen im Jahr 2017 noch sehr deutlich voneinander getrennt sind; hingegen zeigen mesische Goldhaferwiesen und Borstgrasrasen Überschneidungen der Arten in 2018 und 2019. In 2018 liegen 12 Plots im Überschneidungsbereich; im Jahr 2019 sind es 11. Arten, die sich in diesem Bereich befinden sind z. B. *Luzula campestre*, *Sanguisorba officinalis*, *Trisetum flavescens*, *Trifolium pratense*, *Galium aparine* und *Rumex acetosa*.

Der höchste Anteil an offenem Boden liegt im Jahr 2017 in den Borstgrasrasenflächen, im darauffolgenden Jahr hingegen in den nassen Goldhaferwiesen. Die durchschnittliche Pflanzenhöhe ist im Jahr 2017 im Bereich der Borstgrasrasen, in 2018 in den mesischen und in 2019 in den nassen Goldhaferwiesen am höchsten. Die Artenzahl ist in allen drei Jahren in den Borstgrasrasen am höchsten. Der Streuanteil ist zwischen 2017 und 2018 unverändert und nimmt in Richtung der nassen Goldhaferwiesen zu. Die Vegetationsdeckung ist im Jahr 2017 in den mesischen Goldhaferwiesen am niedrigsten, im Jahr 2019 hingegen am höchsten (Abbildung 19 a, b und c).



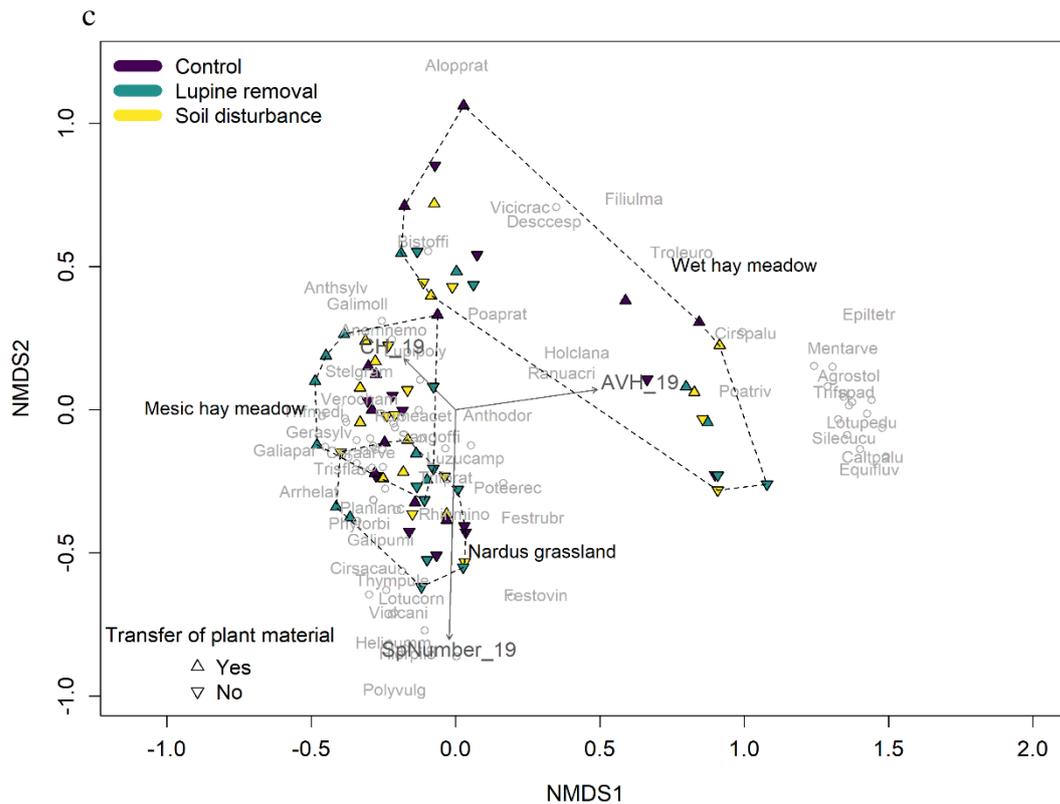


Abbildung 19: NMDS der zwei floristischen Hauptgradienten der Vegetationsaufnahmen auf den Empfängerflächen der Jahre 2017 (a), 2018 (b) und 2019 (c). Die Pfeile zeigen in die Richtung der größten Veränderung mit AVH: mittlere Vegetationshöhe, CH: Vegetationsdeckung, CR: Deckung durch offenen Boden, CL: Deckung durch Streu, SpNumber: Artenanzahl. Die Länge der Pfeile repräsentiert die Beziehung zwischen Ordination und Gradient mit einem Signifikanzlevel von $p \leq 0.05$.

Die bisherige Auswertung der Deckung von *L. polyphyllus* stellt sich über die Laufzeit des Versuchs sehr variabel dar und auch die Kontrollflächen weisen diesbezüglich starke Schwankungen auf (Abbildung 20). Die Borstgrasrasen ohne Mahdgutübertragung zeigen bei allen drei Behandlungen eine Abnahme der Deckung von *L. polyphyllus* im Laufe des Versuchs. Die Flächen mit Mahdgutübertragung und Bodenstörung bzw. Entfernung von *L. polyphyllus* zeigen hingegen eine Zunahme der Deckung von *L. polyphyllus* gegenüber 2017. Ein klares Muster bezüglich der Deckung von *L. polyphyllus* ist bei den mesischen Goldhaferwiesen nicht vorhanden. Dennoch zeigt sich, dass die Deckung von *L. polyphyllus* bei allen Behandlungen in 2018 und 2019 geringer ist als 2017. Auch die nassen Goldhaferwiesen weisen kein deutliches Muster auf. Es lässt sich jedoch feststellen, dass hier auf den Flächen ohne Mahdgutübertragung und mit Entfernung von *L. polyphyllus* der deutlichste Effekt auf die Deckung von *L. polyphyllus* zu sehen ist: im Jahr 2019 ist sie auf diesen Flächen am niedrigsten. Auf den Flächen mit Mahdgutübertragung und Bodenstörung ist sie hingegen am höchsten.

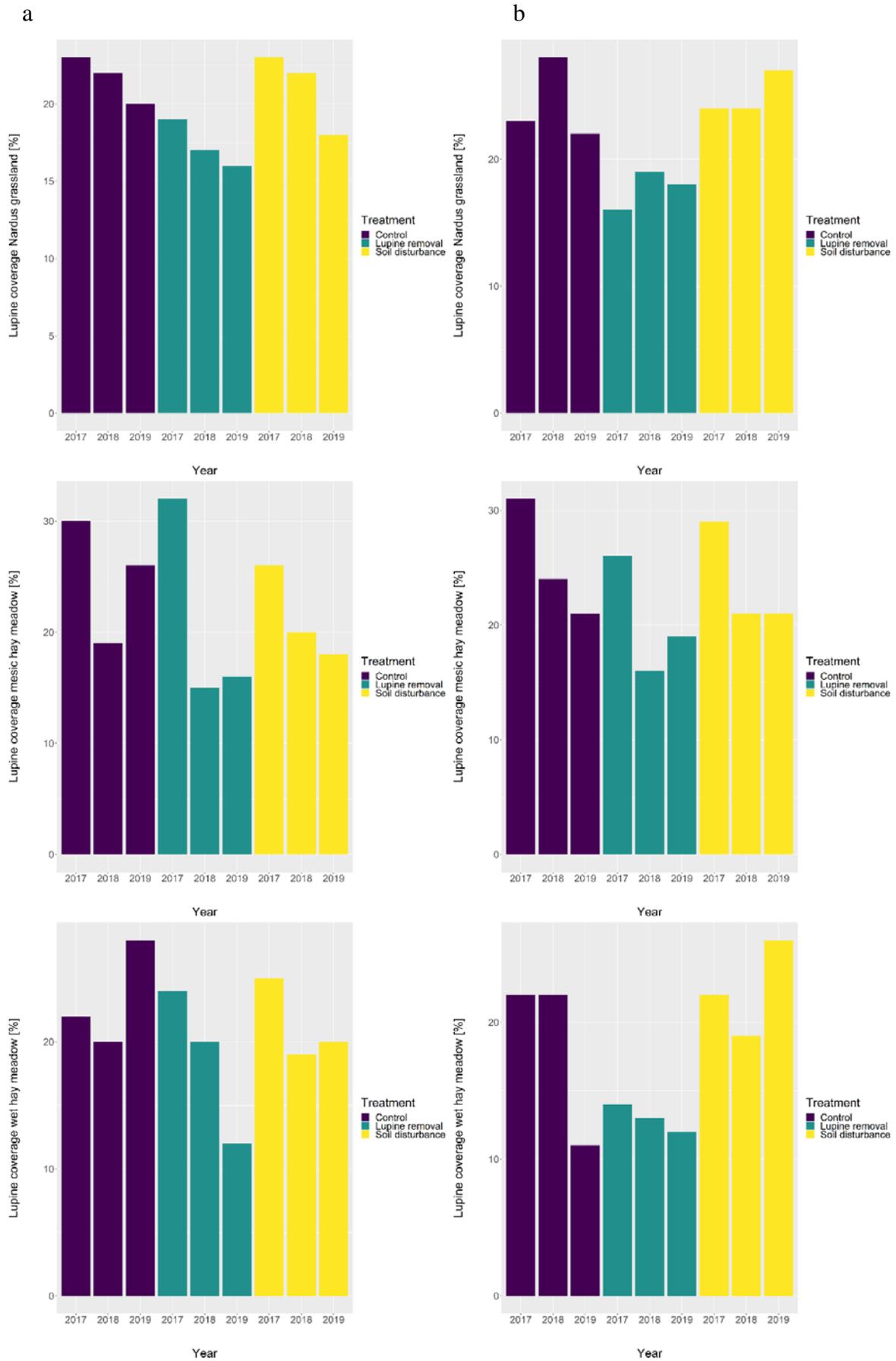


Abbildung 20: Barplots der Deckung von *L. polyphyllus*. Spalte a: Mahdgutübertragung, Spalte b: keine Mahdgutübertragung

1c) Wann ist der optimale phänologische Erntezeitpunkt hinsichtlich des Abreife- und Ausbreitungsverhaltens der Pflanzenarten der Borstgrasrasen und Goldhaferwiesen?

Die bisherigen Untersuchungen weisen darauf hin, dass der optimale phänologische Zeitpunkt hinsichtlich des Abreife- und Ausbreitungsverhaltens vieler Bergwiesenarten im Jahr 2018 zwischen Mitte und Ende Juli lag.

AP 2: Analyse der Ausbreitungsprozesse von *L. polyphyllus* auf Landschaftsebene

2a) Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Grad der *L. polyphyllus*-Invasion und den in der GIS-Datenbank erhobenen Raumdaten? Welche Habitate sind besonders stark durch die *L. polyphyllus*-Invasion betroffen?

Im Untersuchungsgebiet Leitgraben waren mesophile Grünlandtypen in beiden Jahren durch höhere mittlere Flächengrößen, kompaktere Schläge und geringe Distanzen zum Wegenetz charakterisiert als feuchte und nasse Grünlandtypen (Abbildung 21). Die Analyse des Vorkommens von *L. polyphyllus* im Leitgraben 1998 und 2016 zeigte bezogen auf diese Grünlandtypen unterschiedliche Invasionsmuster zwischen den beiden Jahren. Während 1998 alle Grünlandtypen in etwa gleich stark durch *L. polyphyllus* invadiert waren, sind 2016 mesophiles Grünland und trockenes, mageres Grünland stärker invadiert als feuchtes, mageres Grünland und Nassgrünland. Der mittlere Anteil invadierter Biotopfläche hat sich auf diesen Biotoptypen seit 1998 in etwa verdoppelt. Auf nassem Grünland konnte hingegen nur eine geringe Ausbreitung von *L. polyphyllus* nachgewiesen werden (Abbildung 22). Zudem waren große, nahe an Wegenetz und Lesesteinriegeln gelegene Wiesen 2016 stärker invadiert als kleine, weit von diesen linearen Strukturen entfernte Wiesen. Bei der Analyse der durch *L. polyphyllus* invadierten Lesesteinriegel und Wegränder konnte allerdings nicht nachgewiesen werden, dass sich auf linearen Strukturen *L. polyphyllus*-Bestände häufiger oder in höherer Deckung finden als in anderen Bereichen des Gebiets. So sind etwa 21 % der Lesesteinriegel und 22 % der Wegränder von *L. polyphyllus*-Beständen bewachsen.

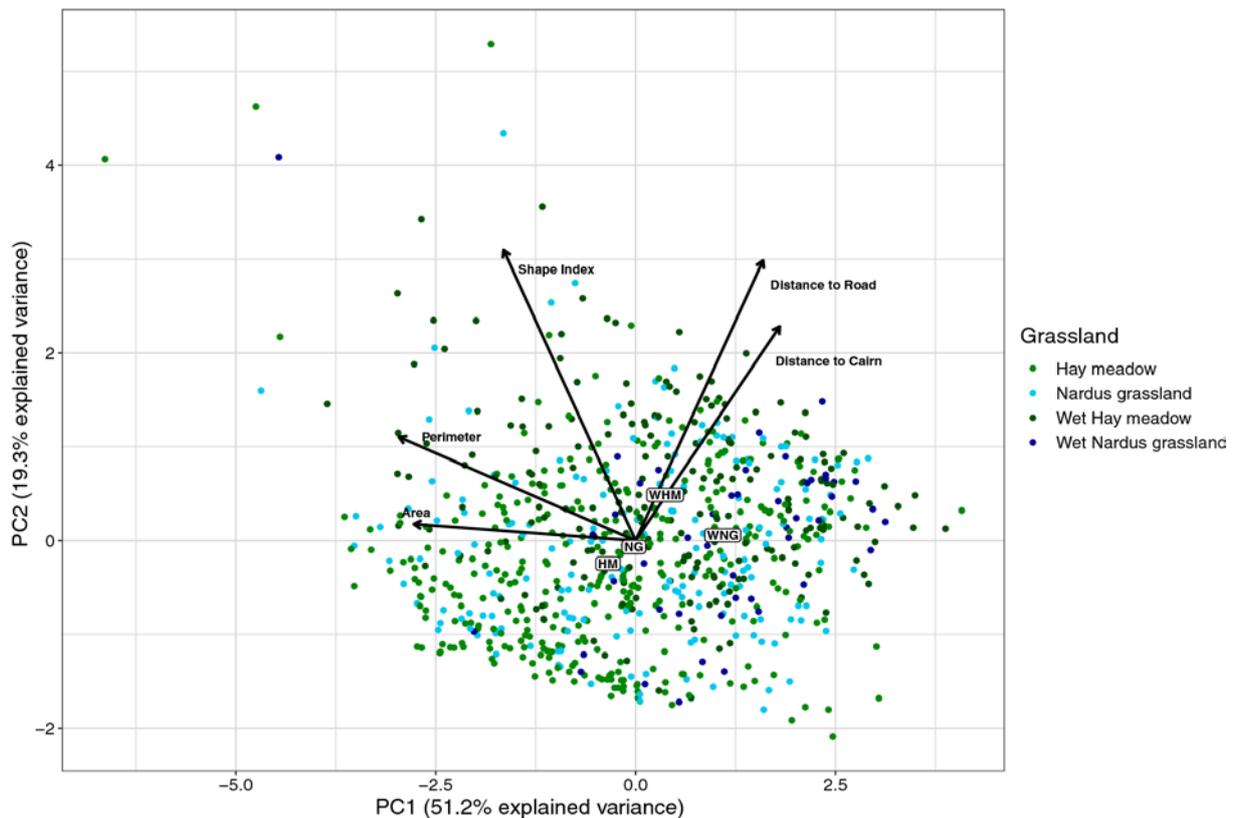


Abbildung 21: Ordinationsdiagramm einer Primärkomponentenanalyse (PCA) der Flächeneigenschaften (Fläche, Umfang, Shape-Index, Distanz zu Straße und Distanz zu Lesesteinriegel) der vier häufigsten Grünlandtypen (HM mesophiles Grünland; NG trockenes, mageres Grünland; WHM Nassgrünland und WNG feuchtes, mageres Grünland). Die Punkte repräsentieren Wiesen-Patches, die Beschriftungen zeigen die Zentroide (Mittelwerte) der Grünlandtypen. Die erste Achse (51.2% erklärte Varianz) repräsentiert Veränderungen in Wiesengröße und -umfang. Die zweite Achse (19.3% erklärte Varianz) repräsentiert Veränderungen in der euklidischen Distanz zum nächstgelegenen Weg und Lesesteinriegel bzw. Veränderungen der Form des Grünland-Patches.

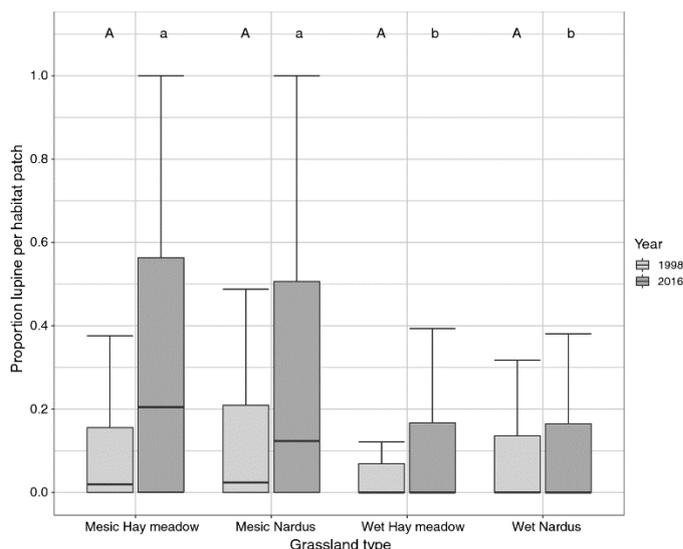


Abbildung 22: Das Box-Whisker Plot zeigt Unterschiede im Anteil an durch *L. polyphyllus* invadierter Grünlandfläche für die vier häufigsten Grünlandtypen (mesophiles Grünland; trockenes, mageres Grünland; feuchtes, mageres Grünland; Nassgrünland) zwischen den Jahren 1998 (hellgrau) und 2016 (dunkelgrau). Die Unterschiede wurden innerhalb der Jahre mittels GLMs und Post-hoc Tukey-Tests überprüft. Während der invadierte Flächenanteil im Jahr 1998 für alle Grünlandtypen vergleichbar war, sind im Jahr 2016 Grünland mit mittlerer Wasserversorgung stärker invadiert als feuchtes, mageres Grünland und Nassgrünland.

2b) Wie funktioniert die Ausbreitung von *L. polyphyllus* in der Rhön?

Der Versuch zur Selbstausbreitung von *L. polyphyllus* über Ballochorie zeigt, dass die Anzahl an ausgeschleuderten Samen und die Flugweite sich im Verlauf der Samenreife verändern (Abbildung 23). Festgestellt wurde, dass die *L. polyphyllus*-Samen mehr als drei Meter weit geschleudert werden können. Im Verlauf des Versuchs sind die Samen der dritten Versuchswoche am weitesten geschleudert worden, teilweise sogar über sechs Meter hinaus.

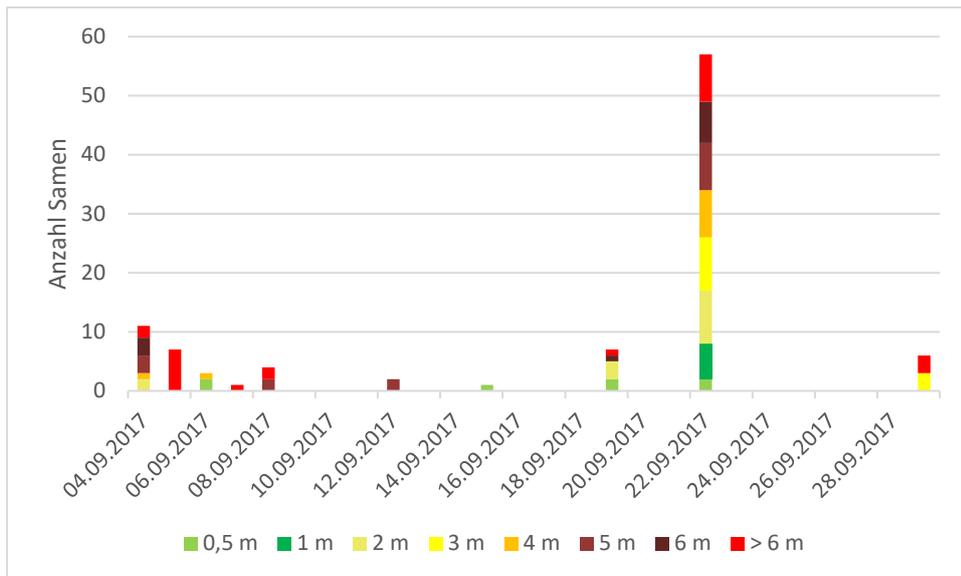


Abbildung 23: Anzahl und Entfernung der ausgeschleuderten *L. polyphyllus*-Samen in acht Entfernungsklassen zur Mutterpflanze im Verlauf des Versuchs

Der Versuch zur Samenstreuung von *L. polyphyllus*-Beständen niedriger, mittlerer und hoher Deckung im Verlauf der Vegetationsperiode zeigt, dass zwei Wochen nach Samenreife die meisten Samen gestreut werden (Abbildung 24). Bis Ende September konnten *L. polyphyllus*-Samen in den Fallen nachgewiesen werden. Besonders hoch ist die Samenschüttung bei den hohen Deckungsklassen in den ersten beiden Wochen des Versuchs, gegen Anfang August. Hier werden bis zu 180 Samen pro Plot ausgeschüttet. In Plots der niedrigen Deckungsklassen werden die höchsten Samenzahlen in der vierten Versuchswoche ausgeschüttet. Bei allen Deckungsklassen ist ab September eine deutliche Abnahme der ausgeschütteten Samen zu verzeichnen.

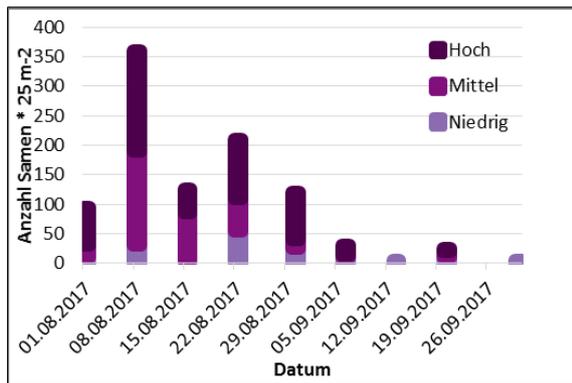


Abbildung 24: Anzahl ausgeschütteter Samen von *L. polyphyllus*-Beständen niedriger, mittlerer und hoher Deckung im Verlauf der Vegetationsperiode im Vergleich

Die Versuche zur Ermittlung des hemerochoren und endozoochoren Ausbreitungspotentials über Mähwerke und Schafkot wurden im August 2018 abgeschlossen. In den beiden Probensätzen wurden unterschiedliche Artenzahlen und -kompositionen vorgefunden. Es wurde jeweils lediglich ein Individuum der Stauden-Lupine nachgewiesen. In den Mähwerkproben wurden 19.175 Individuen von 108 Arten nachgewiesen. Häufig handelte es sich dabei um typische Wiesen- und Ruderalarten (oft Süßgras-Arten), es wurden aber auch vereinzelt Segetalarten nachgewiesen. Die häufigsten Arten waren Quell-Hornkraut (*Cerastium holosteoides*) mit ca. 3700 Keimlingen, Wolliges Honiggras (*Holcus lanatus*) mit 1600 Keimlingen und Gemeines Rispengras (*Poa trivialis*) mit 1300 Keimlingen. Es konnten zudem Rote-Liste-Arten (nach Ludwig und Schnittler 1996) nachgewiesen werden, darunter Moor-Klee (*Trifolium spadicum*) mit 46 Keimlingen, Bach-Nelkenwurz (*Geum rivale*) mit 25 Keimlingen und Trollblume (*Trollius europaeus*) mit einem Keimling. Diese Arten waren im Mittel jedoch in deutlich geringeren Individuenzahlen vertreten als weitverbreitete Arten.

Im Jahr 2017 wurde nur ein Samen von *L. polyphyllus* bei den Mähwerkbehebungen nachgewiesen. Im Jahr 2019 wurden nochmals Mähwerkbehebungen durchgeführt und die vorkommenden *L. polyphyllus*-Samen ausgezählt. Es wurden vor allem Scheibenmähwerke beprobt, drei Behebungen fanden an Messerbalken statt. Beim ersten Mahdtermin (15.6.) wurden in fünf von 15 Proben im Mittel 13 *L. polyphyllus*-Samen nachgewiesen, im Großteil der Proben fanden sich jedoch keine Samen. Zum zweiten Mahdtermin (1.7.) wurden in neun von 14 Proben *L. polyphyllus*-Samen nachgewiesen, die Zahl an vorgefunden Samen lag bei diesen im Mittel bei 55 Samen und schwankte zwischen einem und 357 Samen. In fünf Proben fanden sich keine *L. polyphyllus*-Samen.

In den Schafkotproben wurden knapp 3000 Keimlinge von 56 Arten nachgewiesen. Sowohl die Artenzahl als auch die Individuenzahlen lagen damit deutlich unter denen der Mähwerkproben. Unter den nachgewiesenen Arten waren typische Wiesen- und Ruderalarten. Die häufigsten Arten waren Große Brennnessel (*Urtica dioica*) mit 1760 Keimlingen und Flatterbinse (*Juncus effusus*) mit 400 Keimlingen. An Rote-Liste-Arten wurden der Echte Wiesenhafer (*Helictotrichon pratense*) mit acht Keimlingen und der Moor-Klee (*Trifolium spadicum*) mit einem Keimling nachgewiesen.

Der Versuch zur Schwimmfähigkeit (Abbildung 25) zeigte, dass zwischen 65 % und 75 % Prozent der Samen von *L. polyphyllus* unmittelbar untergehen, sobald sie ins Wasser geworfen werden. Die verbleibenden 25 % der Samen waren allerdings schwimmfähig, sodass nach einer Woche im Wasser im Mittel noch 17 % der Samen schwammen. Zwischen den beiden durchgeführten Messreihen gab es keine gravierenden Unterschiede. Beim Wiederholungsversuch im Dezember 2019 waren nach einem Tag alle 400 Samen untergegangen. Beim Geländeversuch zur hydrochoren Samenausbreitung konnten insgesamt nur vier *L. polyphyllus*-Samen nachgewiesen werden.

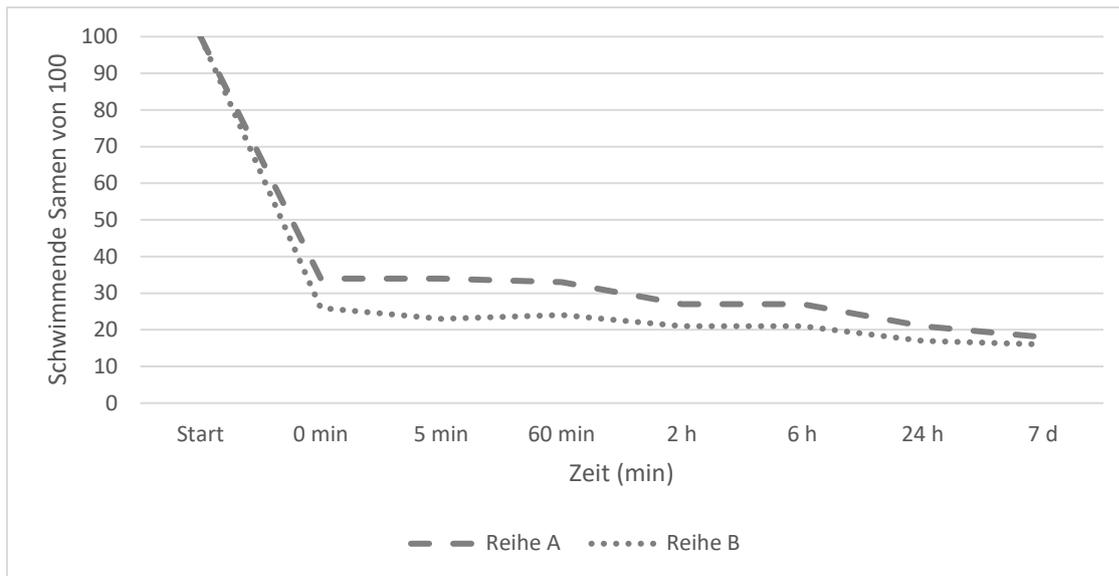


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der Anzahl an schwimmfähigen *L. polyphyllus*-Samen mit zwei Messreihen

AP 3: Energetische Verwertung von extensivem Grünland unter Berücksichtigung von *L. polyphyllus*

3a) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die energetischen Parameter für die Verbrennung des Schnittgutes entweder direkt oder nach Vorbehandlung mit dem IFBB-Verfahren (Presskuchen) aus?

Die Wirkung des Schnittzeitpunktes unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die energetischen Parameter für die Verbrennung des Schnittgutes entweder direkt oder nach dem IFBB-Verfahren (Presskuchen) wurde mit Proben aus dem Jahr 2017 untersucht.

Wirkung des Schnittzeitpunktes auf energetische Parameter der geernteten Biomasse

Im Rahmen dieses Projektes wurden verbrennungstechnisch relevante Inhaltsstoffe (e.g. C, H, O, N, S, Cl) sowie der Aschegehalt, der Ligningehalt und der Heizwert der geernteten Biomassen ermittelt und analysiert, inwiefern sich die beiden Vegetationstypen in diesen Parametern unterscheiden, inwiefern der Schnittzeitpunkt eine Rolle spielt und ob das Vorkommen von *L. polyphyllus* hierbei einen Einfluss nimmt. Zudem sollte geklärt werden, wie stark die Mineralstoffgehalte der Biomassen durch das IFBB-Verfahren reduziert und der Heizwerte erhöht werden könnten.

Im Durchschnitt betrug der Kohlenstoffanteil (C) 46 % der TM (± 1.4 %) und war abhängig vom Schnittzeitpunkt und dem Anteil von *L. polyphyllus* (Tabelle 2). Hierbei sank der Kohlenstoffanteil je später der Schnittzeitpunkt war und je höher der Anteil von *L. polyphyllus* in der Biomasse war. Durch das IFBB-Verfahren wurde der Kohlenstoffanteil in der Biomasse (Presskuchen) wieder aufkonzentriert. Ebenso wurden die anderen gemessenen Elemente durch Schnittzeitpunkt sowie durch das Auftreten von *L. polyphyllus* beeinflusst, in einigen Fällen hatte auch der Vegetationstyp einen Einfluss auf die Ergebnisse. Die Durchschnittswerte der Elemente lagen bei: Wasserstoff (H) 5.5 % TM (± 0.3), Sauerstoff (O) 39 % TM (± 2), Stickstoff (N) 1.3 % TM (± 0.3), Schwefel (S) 0.11 % TM (± 0.03), Chlor (Cl) 0.14 % TM (± 0.12), Kalium (K) 0.51 % TM (± 0.38), Magnesium (Mg) 0.28 % TM (± 0.16), Kalzium (Ca) 0.84 % TM (± 0.41), Phosphor (P) 0.13 % TM (± 0.06), Natrium (Na) 0.04 % TM (± 0.03), Kupfer (Cu) 5.5 mg·kg⁻¹ TM (± 2.4), Eisen (Fe) 2700 mg·kg⁻¹ TM (± 4060), Mangan (Mn) 470 mg·kg⁻¹ TM (± 325), Zink (Zn) 53 mg·kg⁻¹ TM (± 22.5). Somit wurde auch der Aschegehalt stark vom Schnittzeitpunkt und dem Vorkommen von *L. polyphyllus* beeinflusst und lag im Mittel bei 7.8 % TM (± 5). Der Ligninanteil der untersuchten Biomassen war durchschnittlich 6.6 % TM (± 3).

Tabelle 2: Einfluss des Schnittzeitpunktes unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf energetische Parameter für die Verbrennung des Schnittgutes entweder direkt oder nach Vorbehandlung mit dem IFBB-Verfahren (Presskuchen).

Einflussfaktoren	C	H	O	N	S	Cl	K	Mg	Ca
Schnittzeitpunkt	↘	↘	↘	↘	↘	–	↘	↗	–
Vegetationstyp	–	–	–	√ (GH > BG)	√ (GH > BG)	√ (GH < BG)	√ (GH > BG)	–	√ (GH > BG)
Lupinenanteil	↘	↘	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↗
IFBB Verfahren	↗	↗	↗	↘	↘	↘	↘	↘	↘

	P	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	Asche	Lignin
Schnittzeitpunkt	–	–	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Vegetationstyp	√ (GH > BG)	–	√ (GH < BG)	–	√ (GH < BG)	√ (GH < BG)	–	–
Lupinenanteil	↗	↗	↘	↗	↘	↘	↗	↗
IFBB Verfahren	↘	↘	↗	–	↘	↘	↘	↗

Entgegen unserer Annahmen hatte der Schnittzeitpunkt keinen maßgeblichen Effekt auf den Heizwert der Biomassen, welche von Flächen der Goldhaferwiese und Borstgrasrasen geerntet wurden (Abbildung 26). Im Mittel lag der Heizwert zwischen 15.5 (Goldhaferwiese) und 17.8 MJ·kg⁻¹ TM (Borstgrasrasen). Einen Effekt von *L. polyphyllus* auf den Heizwert gab es nur für die Biomassen aus Borstgrasrasen. Entgegen unserer Vermutungen nahm hierbei jedoch der Heizwert mit späterem Mahdtermin signifikant ab. Der Anteil von *L. polyphyllus* lag hierbei zwischen 20 und 30 % des Gesamtvolumens und änderte sich von Juni bis Juli 2017 nicht signifikant. Durch Aufbereitung der lupinendurchsetzten Biomasse durch das IFBB-Verfahren konnte deren Heizwerte durchschnittlich um 1 MJ·kg⁻¹ TM erhöht werden.

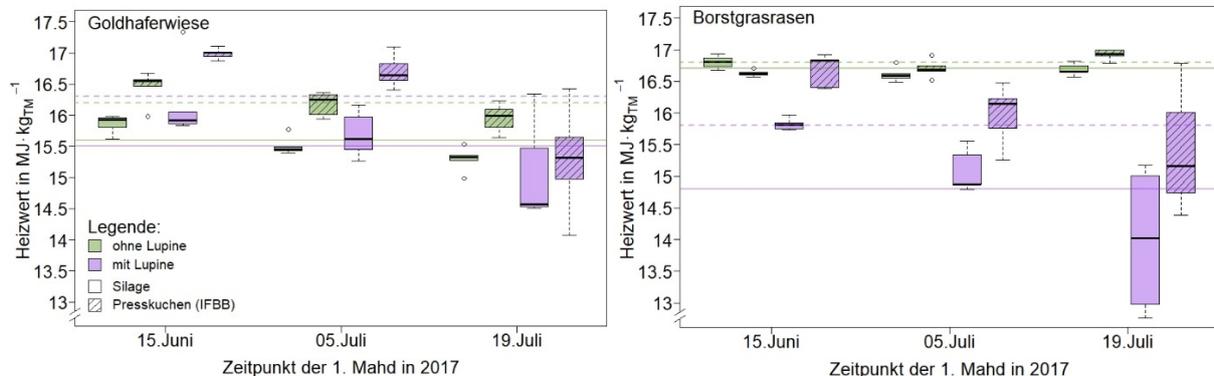


Abbildung 26: Einfluss des Schnittzeitpunktes auf den Heizwert (in MJ·kg⁻¹ Trockenmasse) von Biomassen aus Goldhaferwiesen (links) und Borstgrasrasen (rechts) unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* sowie einer Aufbereitung der Biomassen durch das IFBB-Verfahren (Presskuchen). Linien repräsentieren den mittleren Heizwert der in 2017 hergestellten Silage (durchgehende Linie) und des Presskuchens (IFBB; gestrichelte Linie) mit und ohne *L. polyphyllus*.

Effekte des Schnittzeitpunktes auf den Alkaloidgehalt von *L. polyphyllus*

Zur Untersuchung des Alkaloidgehaltes in *L. polyphyllus* wurden im Rahmen einer Masterarbeit Proben von den Pflanzenorganen Blatt, Blüte, Stängel und Samen von Mitte Juni bis Mitte Juli 2018 in einem 14 tägigen Turnus gesammelt, anschließend getrocknet und deren Alkaloidgehalt im Labor ermittelt. Hierbei wurde festgestellt, dass der Alkaloidgehalt in den Blättern Mitte Juni am höchsten war (Schutz vor Schädigung durch Herbivorie) und im Laufe der Vegetationsperiode stark abnahm (Abbildung 27; links). Dagegen stieg der Alkaloidgehalt

in den Samen von Mitte Juni bis Mitte Juli stetig an. Der Alkaloidgehalt im Stängel war Anfang Juni etwas erhöht, in der Blüte hingegen war der Alkaloidgehalt während des gesamten Untersuchungszeitraumes konstant.

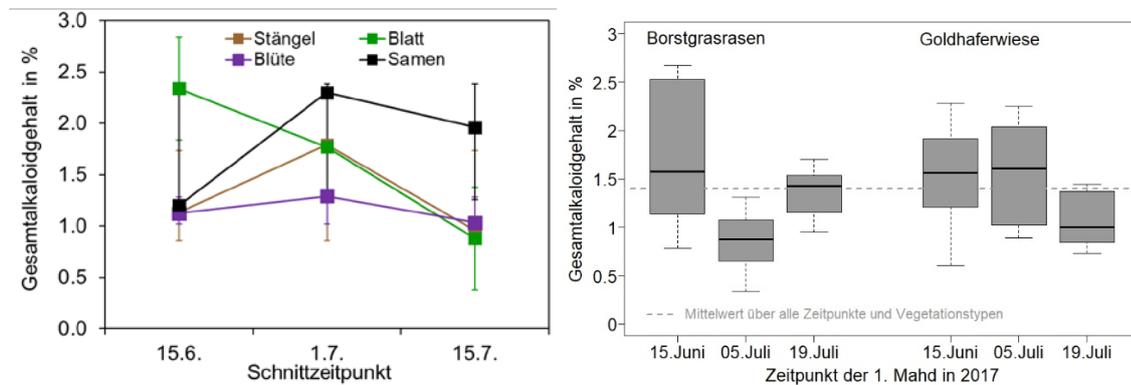


Abbildung 27: Änderung des Gesamtalkaloidgehaltes in den Pflanzenorganen von *L. polyphyllus* während der Vegetationsperiode in 2017 (links) sowie der Vergleich des Gesamtalkaloidgehaltes von Lupine aus Borstgrasrasen und Goldhaferwiesen (rechts). Gestrichelte Linie repräsentiert den mittleren Gesamtalkaloidgehalt über beide Vegetationstypen und über alle Zeitpunkte.

Es gab weder einen signifikanten Unterschied im Gesamtalkaloidgehalt von *L. polyphyllus* aus Borstgrasrasen und Goldhaferwiese noch einen signifikanten Einfluss des Schnitzeitpunktes.

3b) Wie wirkt sich der Schnitzeitpunkt unter Berücksichtigung von Lupinenabundanz und Vegetationstyp auf die energetischen Parameter hinsichtlich der anaeroben Vergärung des silierten Schnittgutes bzw. des nach dessen Abpressung (mit dem IFBB-Verfahren) gewonnenen Presssaftes aus? Wie wirkt sich die anaerobe Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen von *L. polyphyllus* aus?

Batchversuche im Biogaslabor

Im Dezember 2017 wurden die Proben des Presssaftes und der Silage im Biogaslabor der Universität Kassel in Anlehnung an die VDI-Norm 4630 vergoren. Die Versuche wurden als sog. Batchversuche durchgeführt. Das bedeutet, dass nur einmalig beim Ansetzen des Versuches Substrat in den Reaktor gegeben wurde und dass auch während des Versuches bis auf das entstehende Gas nichts aus dem Reaktor entnommen wurde. Als Zeitraum für die Gärversuche wurden für Silagen 35 Tage festgelegt, für Presssäfte 21 Tage. In jedem Reaktor wurde ein Inokulum eingewogen. Dieses stammte aus dem Nachgärer der Biogasanlage in Obernjesa bei Göttingen, welcher mit Schweinegülle und Mais betrieben wird. Die entstandenen Biogasvolumina wurden mit einem Trommelgaszähler (TG 5, Ritter) gemessen und der jeweilige Methangehalt des Gases mit einem Infrarot-Gasanalysator (GS IRM 100, GS Messtechnik GmbH) bestimmt. Zum Zeitpunkt der Gasmessung werden auch Luftdruck und -temperatur gemessen und festgehalten. Mit diesen Werten wurde anschließend die ermittelten Gasvolumina [l] auf Volumina bei Normbedingungen [l_N] (273 K, 1013 hPa) umgerechnet. Schließlich wurden diese Volumina auf die Masse der Trockensubstanz des Substrates bezogen (l_N/kg oTS).

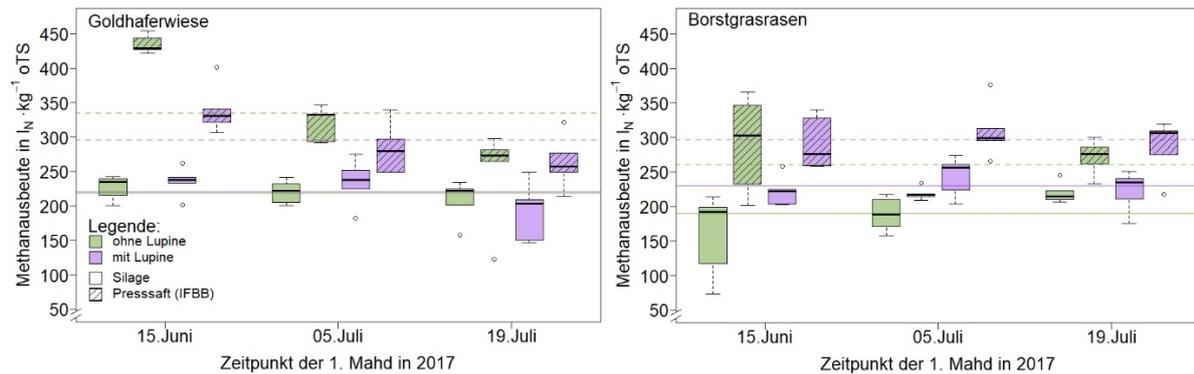


Abbildung 28: Einfluss des Schnittzeitpunktes auf die Methanausbeute (in lN·kg⁻¹ oTS) von Biomassen aus Goldhaferwiesen (links) und Borstgrasrasen (rechts) unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* sowie einer Aufbereitung der Biomassen durch das IFBB-Verfahren (Presssaft). Linien repräsentieren die mittlere Methanausbeute der in 2017 hergestellten Silage (durchgehende Linie) und des Presssaftes (IFBB; gestrichelte Linie) mit und ohne *L. polyphyllus*.

Ausgewertet wurden diese Daten im Rahmen einer Masterarbeit (Lücke, M. 2019. Anaerobe Vergärung der Biomasse von Extensivgrünland unter Berücksichtigung des Einflusses der invasiven Art *L. polyphyllus*. Universität Kassel). Im Mittel lag die Methanausbeute der Silage zwischen 190 und 230 lN·kg⁻¹ oTS. Hierbei hatte das Vorkommen von *L. polyphyllus* keinen signifikant negativen Effekt auf die Methanausbeute. Auch der Schnittzeitpunkt zeigte keinen eindeutigen Einfluss auf die mittlere Methanausbeute. Eine anaerobe Vergärung des Presssaftes erbrachte im Mittel eine Methanausbeute zwischen 260 und 330 lN·kg⁻¹ oTS und lag somit durchschnittlich um 80 lN·kg⁻¹ oTS höher als die Methanausbeute bei der anaeroben Vergärung der Silage.

Langzeitversuch

Zusätzlich wurde 2019 in Zusammenarbeit mit dem LLH in Bad Hersfeld ein Langzeitversuch zur Vergärung von *L. polyphyllus* durchgeführt. Hierzu wurden vier Fermenter mit Gras (Borstgrasrasen aus der Rhön) und Lupine sowie zwei Mischungsstufen für ca. 100 Tage beschickt und die entstehende Gasmenge gemessen.

Im Versuchsverlauf zeigte sich, dass der Einsatz von frischer Silage zu technischen Problemen führte. Daher wurde, wie oben beschrieben, im Hauptversuch getrocknetes und zerkleinertes Material eingesetzt. In der Versuchsphase wurde zusätzlich Wasser hinzugegeben, um die Fütterung von Frischmaterial mit einem TS-Gehalt von 26 % zu simulieren und um eine technisch nicht vertretbare Aufkonzentrierung der Trockenmasse zu verhindern. Bei der angestrebten Raumbelastung von knapp 3,5 g oTS/l kam es wiederholt zur Schaumbildung, einem Anzeichen einer Überlastung der Prozessbiologie. Daher wurde die Raumbelastung sukzessiv bis auf 2,2 g oTS/l abgesenkt.

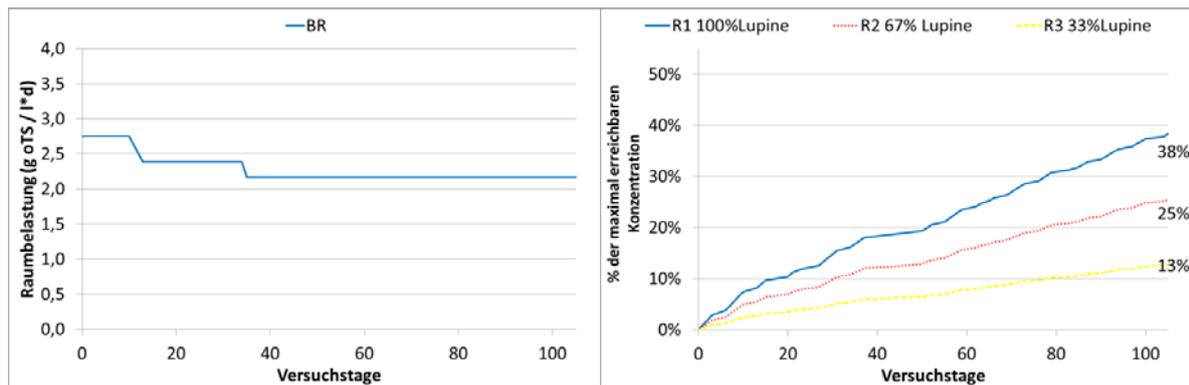


Abbildung 29: Verlauf der Raumbelastung im Versuchszeitraum (links) und Simulation der Aufkonzentrierung eines Störstoffes im Reaktor entsprechend der tatsächlich realisierten Fütterung von Lupinensilage (rechts).

Aufgrund der geänderten Mengen in der Fütterung konnte daher im Versuchsverlauf nicht die angestrebte theoretische Konzentration von 2/3 der Maximalkonzentration erreicht werden. Ein inerte Störstoff hätte sich im Versuchsverlauf daher nur auf ca. 38 % des theoretisch erreichbaren Wertes angereichert. Diese Angabe gilt für den betriebenen Reaktor mit lupinendurchsetzten Material, in den anderen Reaktoren wurden entsprechend geringerer Werte erreicht (Abbildung 29).

Die Beurteilung des Prozesses wurde hauptsächlich anhand der Gasertragsdaten durchgeführt. Am Versuchstag 13 kam es in Reaktor 4 (nur Borstgras) zu Schaumbildung mit der Folge der Verstopfung der Gasleitung und dem resultierenden Druckaufbau und damit dem Verlust von Gärmaterial über den Überlauf. Zur Wiederherstellung vergleichbarer Verhältnisse in allen Reaktoren, wurde bei den übrigen Reaktoren die gleiche Menge an Gärmaterial entnommen und das fehlende Volumen in allen Reaktoren durch sehr stark ausgefaulten und abgeseihten Gärrest (aus der BGA) ersetzt. Die verlorene und ersetzte Menge belief sich auf ca. 2 l und wurde bei 30 l Gesamtvolumen als für den weiteren Versuchsverlauf unschädlich eingestuft. In der Folge wurde die Raumbelastung von 2,75 g oTS / l*d und um Tag 35 aufgrund eines Anstiegs der Gärsäuren in Reaktor 1 auf 2,2 g oTS / l*d herabgesetzt.

Mit Beginn der Fütterung unterschiedlicher Substratmischungen begannen die Biogaserträge der Reaktoren voneinander abzuweichen. Wie in Abbildung 30 zu sehen ist, wirkte sich der Umstieg von Borstgras auf die Mischungen direkt auf die Gasproduktionsverläufe im Tagesgang aus. Hierbei führte ein erhöhter Anteil von *L. polyphyllus* in der Fütterung zu verlängerten Phasen höherer Gasproduktion nach der Fütterung.

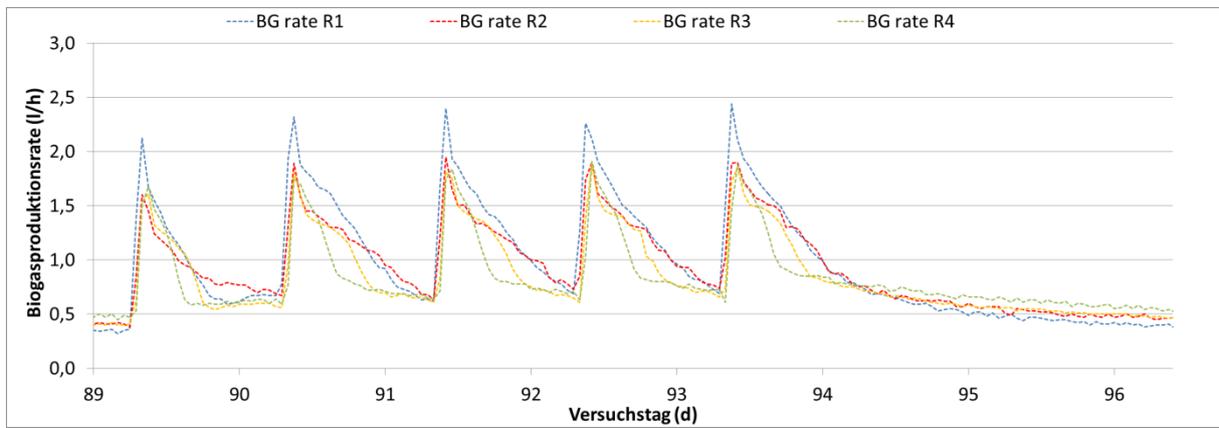
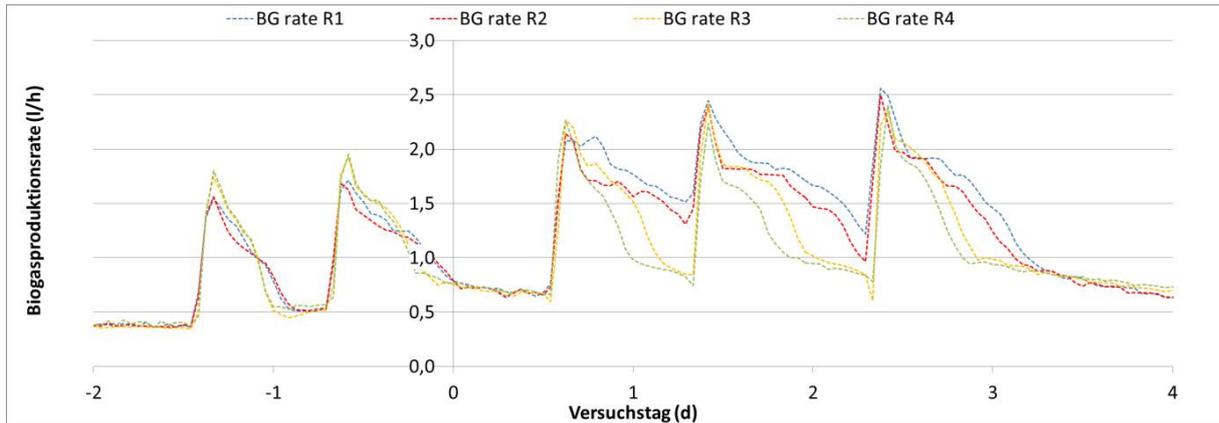


Abbildung 30: Gasproduktionsraten in der Umstellung (oben) und gegen Ende (unten) von Gras auf die Mischungen.

Diese Änderung hielt sich über den gesamten Versuchszeitraum und resultierte in dauerhaft unterschiedlich hohen Tagessummen (Abbildung 31). An Wochentagen, an denen die Fütterung stattfand, war eine eindeutige Staffelung zu erkennen. An den Wochenenden ohne Fütterung und resultierender niedrigerer Gasproduktion drehte sich die Rangfolge leicht um. Dies ist auf unterschiedliche Abbaugeschwindigkeiten zurückzuführen. Offenbar war Material von *L. polyphyllus* leichter vergärbar, wodurch eine schnellere Umsetzung erfolgte und die Gasproduktion entsprechend schneller abfiel. Dahingegen fiel die Gasproduktionsrate von dem reinen Grasmaterial außerhalb der Fütterungstage schwächer ab, da noch mehr unverdautes Material zurückblieb (Tage 95 und 96, Abbildung 30).

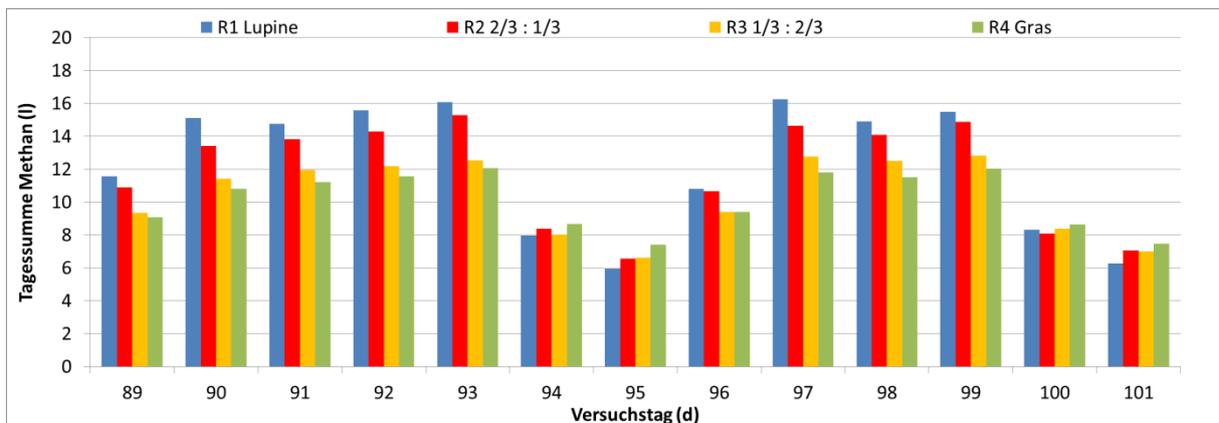
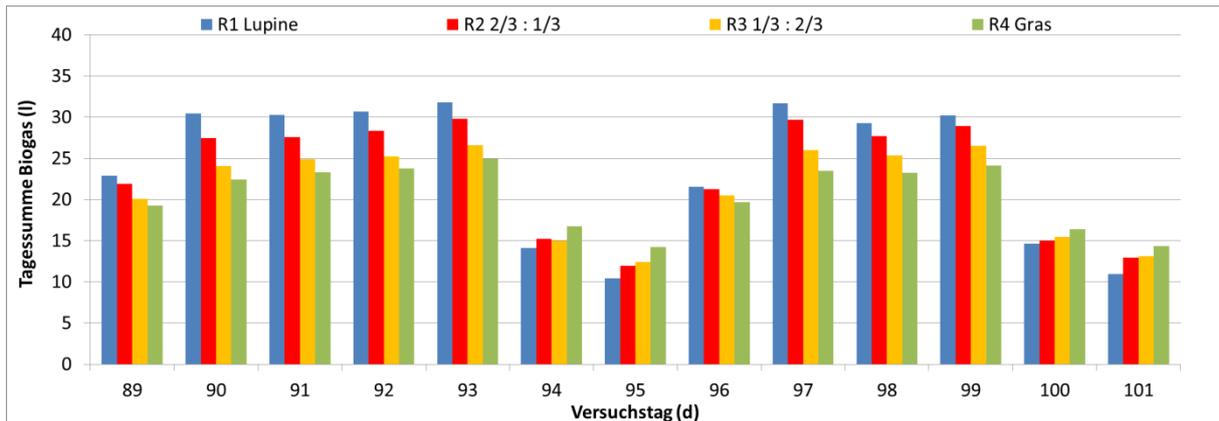


Abbildung 31: Tagessummen Biogas (oben) und Methan (unten).

Insgesamt zeigte sich, dass aus dem Material mit *L. polyphyllus* mehr Biogas produziert wurde. Die zugefütterten Mengen an organischer Substanz waren zwar in allen Varianten gleich, die aufsummierten Erträge von der Fütterung mit reinem Borstgras und lupinendurchsetzten Borstgras unterschieden sich jedoch um ca. 10 % und es war eine Staffelung über die Mischungsvarianten hinweg zu erkennen (Abbildung 32). Der spezifische Biogasertrag des Grasmaterials mit *L. polyphyllus* lag damit über dem des reinen Borstgrasmaterials.

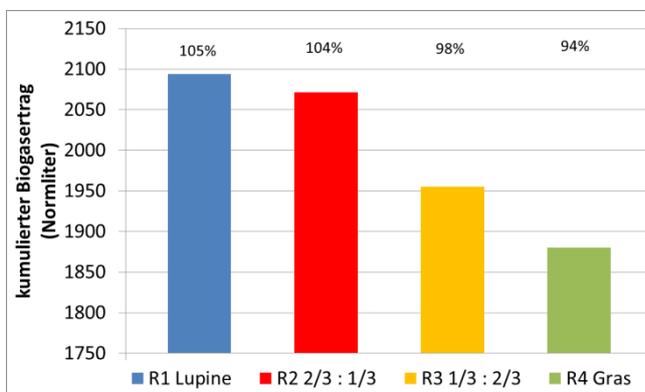


Abbildung 32: Kumulierter Biogasertrag in Normlitern. Prozentangaben über den Balken entsprechen dem Ertrag im Vergleich zum Durchschnittsertrag.

Zur Betrachtung des Einflusses des Substratwechsels auf das Mikrobiom konnte das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig als Versuchspartner gewonnen werden. Hierzu wurden mehrfach im Versuchsverlauf Proben aus allen Reaktoren gezogen. Die dort in Eigenleistung durchgeführten Arbeiten sind aber derzeit noch nicht abgeschlossen.

Auswirkung der anaeroben Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen von L. polyphyllus

Um der Frage nachzugehen, inwiefern Samen von *L. polyphyllus* nach der Vergärung noch keimfähig sind, wird derzeit in Zusammenarbeit mit der Universität Münster und der Universität Gießen eine Masterarbeit [→ Arbeitsschritte und angewandte Methoden; AP3] durchgeführt. Da die Masterarbeit noch läuft, handelt es sich im Folgenden um vorläufige Ergebnisse.

Vor dem Vergärungsprozess unterschieden sich die Samen von *L. polyphyllus* der drei Altersstadien (AS) in Form und Keimfähigkeit (Tabelle 3). Die Samenlänge der braunen Samen (AS3) war mit 4,2 mm signifikant kürzer als die Länge der Samen im AS1 (5,6 mm) und AS2 (5,4 mm). Samen im AS1 waren mit einer durchschnittlichen Dicke von 2,7 mm dicker als Samen im AS2 und AS3. Die Lebensfähigkeit der Samen war für alle Altersstadien über 94 %.

Tabelle 3: Lebensfähigkeit, durchschnittliche Samenlänge und –breite sowie Tausendkorngewicht und Farbe der Samen unterschiedlicher Altersstadien (AS; Sammelzeitpunkte) von *L. polyphyllus*.

	Lebensfähigkeit (%)	Ø-Samenlänge (mm)	Ø-Samenbreite (mm)	Tausendkorngewicht (g pro Korn)	Farbe
AS1	98	5.58	2.66	4.33	grün
AS2	94	5.38	2.52	4.33	grün-braun
AS3	100	4.16	2.39	2.23	braun

In Form gebliebene Samen von L. polyphyllus nach dem Vergärungsprozess

Tests ermittelten einen signifikanten Effekt der Altersstadien auf das in Form bleiben der Samen nach dem Vergärungsprozess. Bei einer Vergärungstemperatur von 37°C überlebten über den gesamten Vergärungszeitraum von 35 Tagen insgesamt 88.75 % der Samen des AS3. Dies stellt einen höchst signifikanten Unterschied zum AS1 (21.85 %) und AS2 (19.70 %) dar. Nach der Vergärung bei 50°C blieben ebenfalls höchst signifikant mehr Samen des AS3 (84.75 %) in Form, als Samen der AS1 (23.15 %) und AS2 (29.15 %). Ein Zeitpunkt, ab dem keine Samen im AS3 mehr in den Reaktoren waren, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht ermittelt werden. Nach den gesamten 35 Vergärungstagen blieben im Schnitt 70 % der reifen Samen (AS3) in Form. Für die unreifen Samen (AS1, AS2) wurden hingegen bei einer Vergärungstemperatur von 37°C nach 14 Tagen keine Samen mehr in den Reaktoren gefunden. Für die Vergärungstemperatur von 50°C lag dieser Zeitpunkt nach 24 Tagen.

Keimungsraten von L. polyphyllus nach dem Vergärungsprozess - Einfluss des Samenalters, der Temperatur während der Vergärung sowie der Vergärungsdauer

Samen des AS1 und AS2 hatten ihre Keimfähigkeit nach der Vergärung bei 37°C und 50°C vollständig verloren (0 %; Abbildung 33). Die Samen im AS3 wiesen jedoch bei der Vergärungstemperatur von 37°C immerhin noch eine mittlere Gesamtkeimung von 4 % auf.

Bei der Vergärungstemperatur von 50°C erreichten die vergorenen Samen eine mittlere Gesamtkeimung von 2 %.

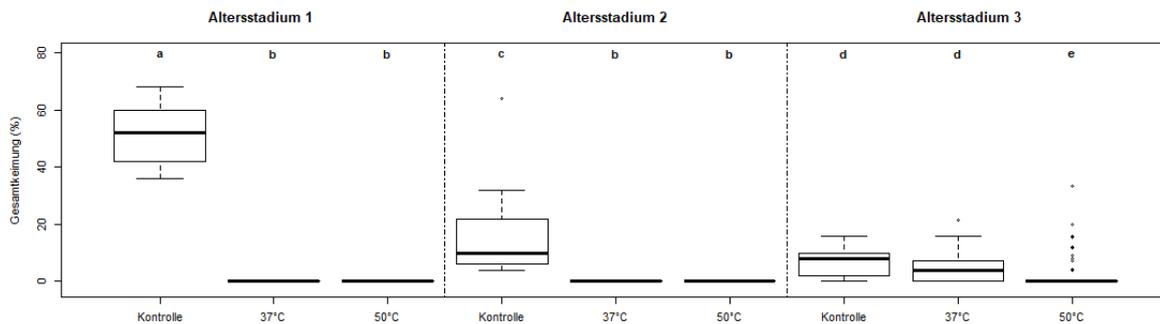


Abbildung 33: Gesamtkeimungsraten der Samen von *L. polyphyllus* unterschiedlicher Altersstadien nach dem Vergärungsprozess bei 37°C und 50°C.

Betrachtet man den Einfluss der Vergärungsdauer bei einer konstanten Temperatur von 37°C hinsichtlich der Gesamtkeimungsrate der Samen von *L. polyphyllus* des AS3, so sank diese zwar anfänglich ab (bis Tag 14), stieg jedoch wieder bis zum Ende des Vergärungsversuches an (35 Tage; Abbildung 34). Somit war die Keimungsfähigkeit der Samen nicht durch eine verlängerte Vergärungsdauer signifikant minimiert. Dieses Keimverhalten zeigte sich auch bei der Vergärung der Samen bei einer Temperatur von 50°C.

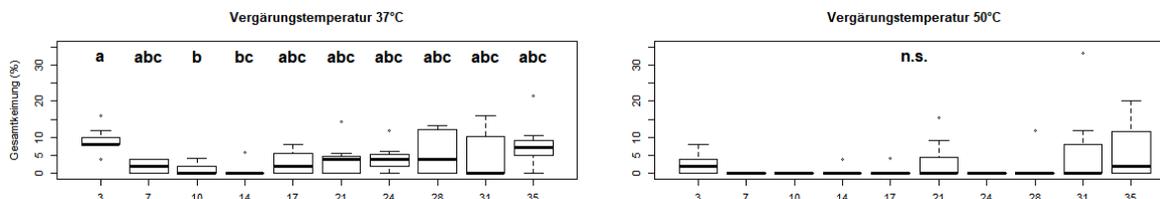


Abbildung 34: Gesamtkeimungsraten der Samen von *L. polyphyllus* des Altersstadiums 3 in Abhängigkeit von Vergärungsdauer bei 37°C und 50°C.

3c) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die Lebenszyklusanalyse der unterschiedlichen möglichen (energetischen) Verwertungsrichtungen aus?

Zur Durchführung der Lebenszyklusanalyse (LCA) der unterschiedlichen möglichen energetischen Verwertungsrichtungen wurden ebenfalls die im Feldversuch gesammelten Daten verwendet. Das Ziel der LCA war die Analyse der Umwelteinflüsse unterschiedlicher Managementoptionen für die Flächen der Hochrhön. Ausgehend davon, dass zur Beseitigung der Invasion durch *L. polyphyllus* eine regelmäßige Entlaubung erforderlich ist, stellen die integrierte Erzeugung von Festbrennstoffen und Biogas aus Biomasse (IFBB) und anaerober Vergärung (AD) zwei Möglichkeiten dar, um diese Biomasse sinnvoll zu nutzen und in Energie umzuwandeln. Jedoch, der Energie- und Ressourcenverbrauch bei der Umwandlung der Biomasse in Kraftstoff und bei der Verwendung von Kraftstoffen und Nebenprodukten, die nach der Umwandlung gewonnen werden, ist mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden. Somit verglich diese LCA die Möglichkeiten des IFBB und AD, um die beste

Option in Bezug auf Umweltauswirkungen und Primärenergieverbrauch zu identifizieren. Darüber hinaus untersuchte diese Studie auch Alternativen für Prozessparameter entlang des Lebenszyklus, die die Umweltauswirkungen reduzieren würden.

Es wurde festgestellt, dass das IFBB eine bessere Option im Vergleich zu AD war, da es über alle Grünlandstandorte hinweg höhere Umwelt- und Primärenergieeinsparungen aufweist (Abbildung 35). Die höhere Energieumwandlungseffizienz des IFBB führte zu höheren Energieeinsparungen, obwohl der Energieverbrauch für die Verarbeitungsschritte im Vergleich zu AD höher war. Die Biomasseerträge standen hierbei in einem positiven Zusammenhang mit den Einsparungen und ermöglichten bessere Treibhausgas- und Energieeinsparungen für Grünland, das invasive Arten enthält (Abbildung 36).

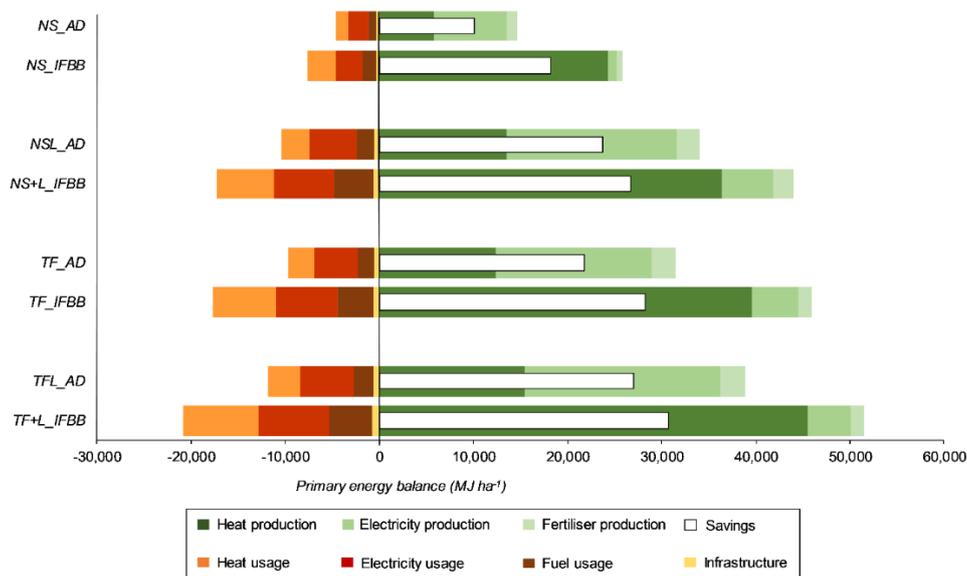


Abbildung 35: Primärenergieverbrauch für Inputprozesse (links) und Einsparungen durch den Ersatz von Energie und Düngemittelproduktion (rechts). Die weißen Balken zeigen die Netto-Primärenergiebilanz für jede der Optionen an, wobei der größere positive Wert die günstigere Option anzeigt. Zu den Biomassearten gehören Borstgras (*Nardus stricta*, NS) und Goldhafer (*Trisetum flavescens*, TF), die entweder frei von Lupine (NS und TF) oder von Lupine (NS+L und TF+L) befallen sind. AD: Anaerobe Gärung; IFBB: Integrierte Erzeugung von Festbrennstoffen und Biogas aus Biomasse.

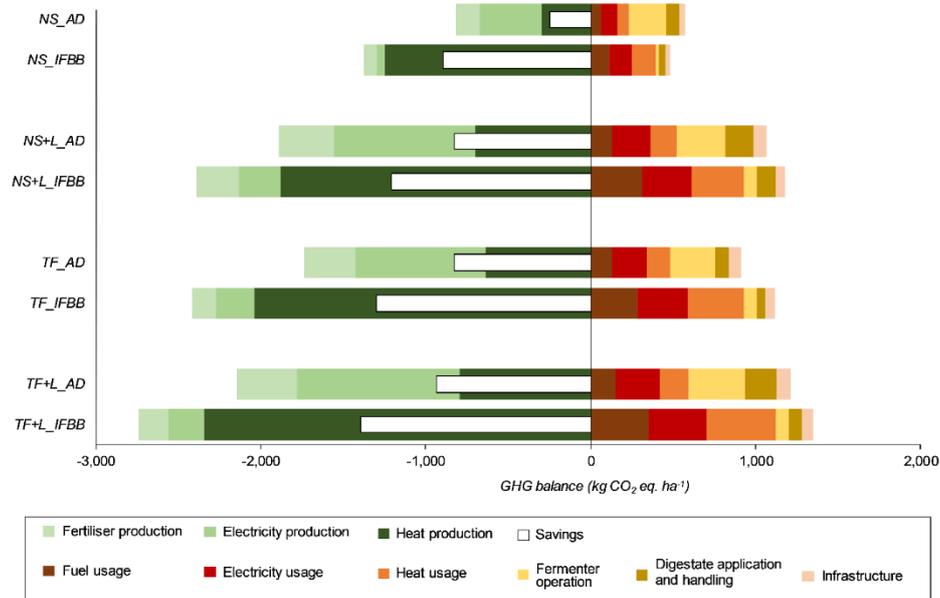


Abbildung 36: Treibhausgasemissionen aus Inputprozessen (rechts) und Treibhausgaseinsparungen durch den Ersatz von Energie- und Düngemittelproduktion (links). Die weißen Balken zeigen den Netto-THG-Saldo für jede der Optionen an, wobei der größere negative Wert die günstigere Option anzeigt. Zu den Biomassearten gehören Borstgras (*Nardus stricta*, NS) und Goldhafer (*Trisetum flavescens*, TF), die entweder frei von Lupine (NS und TF) oder von Lupine (NS+L und TF+L) befallen sind. AD: Anaerobe Gärung; IFBB: Integrierte Erzeugung von Festbrennstoffen und Biogas aus Biomasse.

Die vorgenommene Wirkungsabschätzung zeigte, dass es zu keinen Einsparungen bei der Versauerung von Ökosystemen (AP) oder dem Eutrophierungspotenzial (EP) sowohl für IFBB als auch für AD kam. Jedoch waren AP und EP bei der Verwendung von IFBB im Vergleich zu AD etwas geringer. Zusammenfassend zeigte die Lebenszyklusanalyse, dass mit dem IFBB die Biomasse aus Bergwiesen mit *L. polyphyllus* effektiv genutzt werden kann, da diese Option im Vergleich zu AD geringere Umweltauswirkungen und höhere Energieeinsparungen aufweist. Biomasse aus nicht invadiertem Grünland könnte ebenfalls mit dem IFBB effektiv umgewandelt werden, so dass das IFBB zur Nutzung der geernteten Biomasse in der Situation, in der die Invasion beseitigt wird, gut verwendbar ist.

AP 4: Nicht destruktive, fernerkundliche Beurteilung des Zeitpunktes von Schnittmaßnahmen zur Bekämpfung des invasiven Neophyten *L. polyphyllus* und dessen Auswirkung auf die energetischen Parameter von Grünlandbeständen

4a) Wie hoch ist die Genauigkeit einer fernerkundlichen Erfassung von *L. polyphyllus*-Abundanz im Grünland?

4b) Wie wirkt sich die Deckung von *L. polyphyllus* im Grünland auf die Schätzgenauigkeit energetischer Parameter mit Hilfe fernerkundlicher Messungen aus?

Zur Beantwortung der Fragen 4a) und 4b) muss zunächst sichergestellt sein, dass der Laser und der Spektroskop in der Lage sind, die Gesamtbiomasse in ausreichender Güte abzuschätzen. Daher konzentrierten wir uns zunächst auf die Auswertung der grundlegenden Daten aus der Vorphase, die hier dargestellt werden sollen. Darauf aufbauend wurden, unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Vorphase, optimierte Ertragsabschätzungs-methoden für die Daten aus 2018 entwickelt. Hierfür wurden die optimalen Ansätze der Lasermethode um die mittels Hyperspektralkamera gewonnenen Informationen ergänzt und verbessert. Anschließend werden wir uns im nächsten Schritt einer Beantwortung der Forschungsfragen 4a) und 4b) widmen.

Ergebnisse der Vorphase – Bestimmung der Gesamtbiomasse mittels 3-D Laserdaten

Die Forschungsergebnisse zur Bestimmung der Gesamtbiomasse mittels 3-D Laserdaten wurden bereits veröffentlicht (Schulze-Brüninghoff et al. 2019). Für einen Vergleich der einzelnen Methoden wurden diese in Gruppen zusammengefasst. Diese Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl an Scans, aus denen die zu untersuchenden Punktwolken bestehen. Der direkte Methodenvergleich wurde innerhalb der Gruppe mit der maximalen Scananzahl von vier Scans pro Punktwolke vorgenommen.

Vegetationshöhe

Die beste Korrelation zwischen Vegetationshöhe und Ertrag an Frischmasse wurde bei einer gemittelten Vegetationshöhe in einem Höhenabschnitt der oberen 5 % erreicht (adj. $R^2 = 0.72$). Für den Ertrag an Trockenmasse erreichte die gemittelte Vegetationshöhe im Höhenbereich der oberen 6 % die beste Schätzgenauigkeit mit einem angepassten R^2 von 0.58.

Summe der Voxel

Eine Voxel-Kantenlänge von 0.045 m erzielte die höchste Schätzgenauigkeit bei der Korrelation zwischen Voxel-Summe und Frischmasseertrag (adj. $R^2 = 0.69$). In Korrelation zum Trockenmasseertrag erzielte die Voxel-Summe bei gleicher Kantenlänge die stärkste Schätzgenauigkeit mit einem angepassten R^2 von 0.56.

Mittlere 3d-Raster-Höhe

Das stärkste Modell der 3d-Raster-Höhen-Methode in Korrelation mit dem Frischmasseertrag wurde bei einer Rastergröße von 0.185 m erreicht (adj. $R^2 = 0.72$). Das optimale Modell in Korrelation mit dem Trockenmasseertrag erlangte die 3d-Raster-Höhen-Methode mit derselben Raster-Größe (adj. $R^2 = 0.54$).

Volumen der konvexen Hülle

Der *Quickhull*-Algorithmus wurde nicht über die Variation eines Parameters verändert. Somit formte die Methode lediglich eine Korrelation mit dem Frischmasseertrag (adj. $R^2 = 0.67$) und eine Korrelation mit dem Trockenmasseertrag (adj. $R^2 = 0.53$).

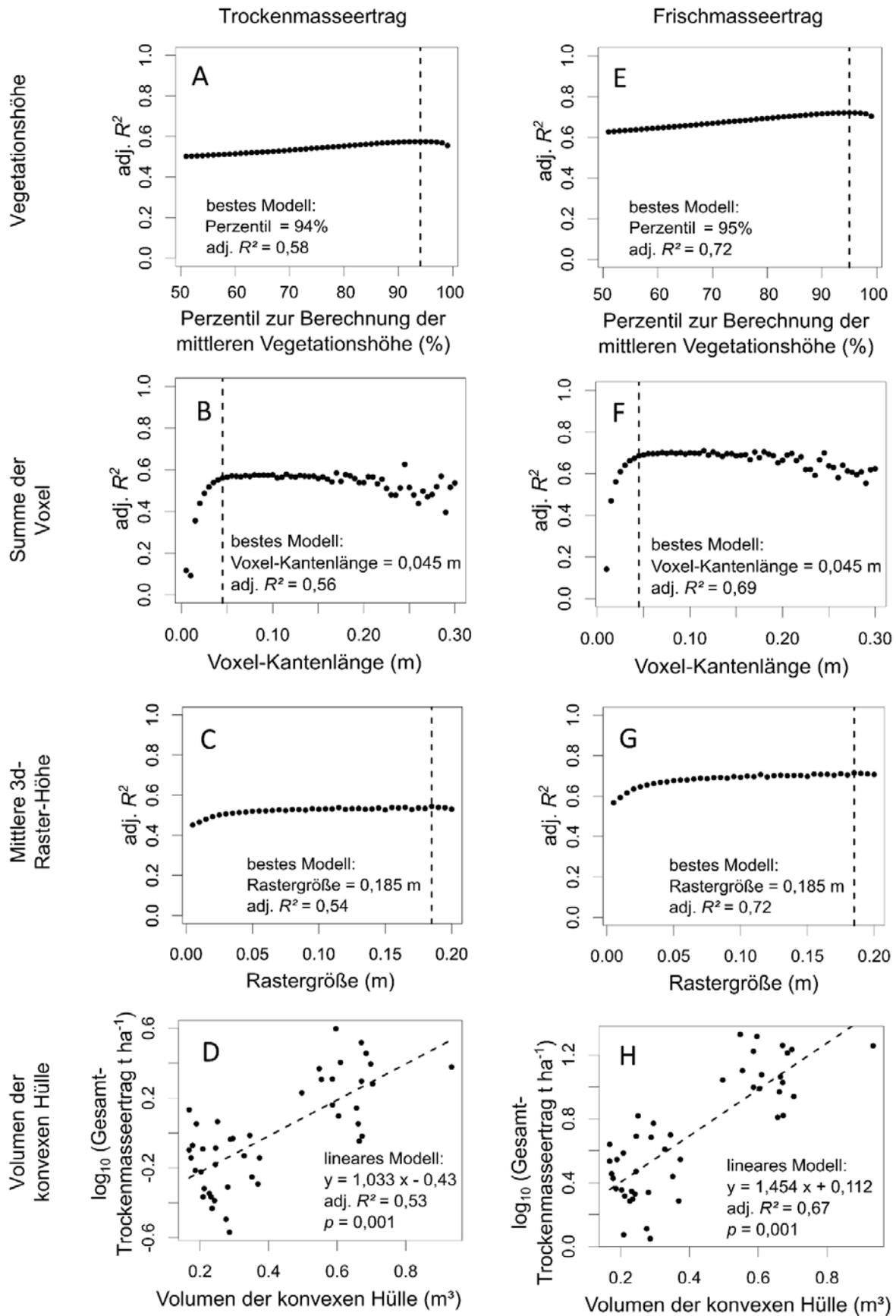


Abbildung 37: Lineare Modelle für Trockenbiomasse (A-D) und Frischbiomasse (E-H). (A) Angepasste R^2 der linearen Modelle für Trockenbiomasse und Vegetationshöhe (Mittelwerte unterschiedlicher Höhen-

abschnitte); (B) Angepasste R^2 der linearen Modelle für Trockenbiomasse und Voxel-Summe unterschiedlicher Voxel-Kantenlängen); (C) Angepasste R^2 der linearen Modelle für Trockenbiomasse und Mittlere 3d-Raster-Höhe (unterschiedlicher Rastergröße); (D) Lineares Modell für Trockenbiomasse und konvexe Hülle; (E) Angepasste R^2 der linearen Modelle für Frischbiomasse und Vegetationshöhe (Mittelwerte unterschiedlicher Höhenabschnitte); (F) Angepasste R^2 der linearen Modelle für Frischbiomasse und Voxel-Summe unterschiedlicher Voxel-Kantenlängen); (G) Angepasste R^2 der linearen Modelle für Frischbiomasse und Mittlere 3d-Raster-Höhe (unterschiedlicher Rastergröße); (H) Lineares Modell für Frischbiomasse und konvexe Hülle

Modell-Evaluation

Für die Identifikation der optimalen Scananzahl wurde diese innerhalb jeder Methode hinsichtlich der Schätzgenauigkeit gegenübergestellt. Die mittlere Schätzgenauigkeit aller Methoden war mit zwei Scans am besten. Separat betrachtet erzielte die Methode der mittleren Vegetationshöhe mit einer Scananzahl von zwei die insgesamt beste Schätzgenauigkeit (adj. $R^2 = 0.72$).

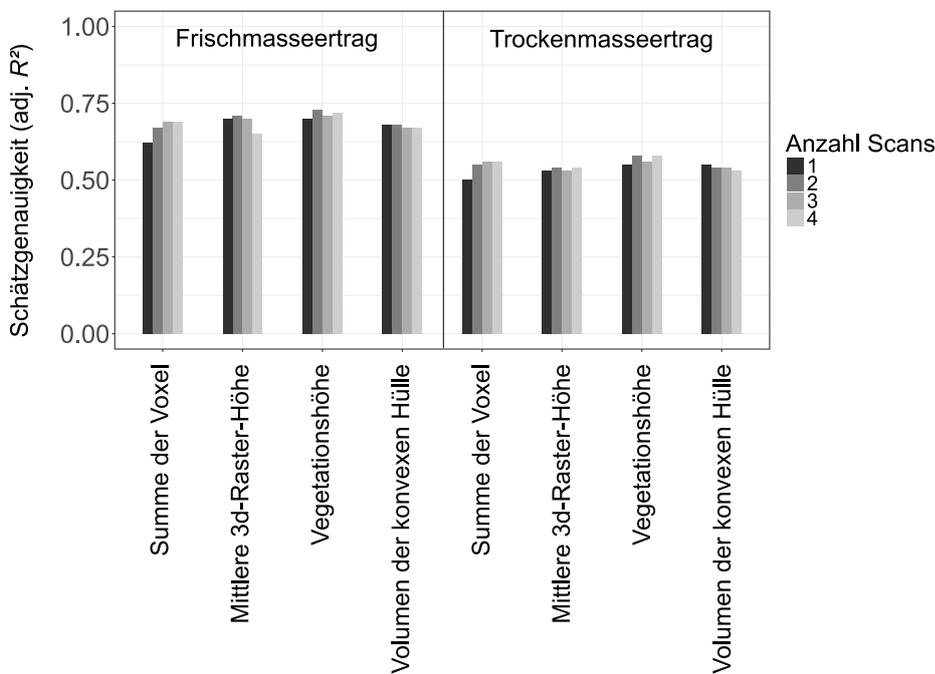


Abbildung 38: Schätzgenauigkeit (adj. R^2) für die Modelle: Summe der Voxel, Mittlere 3d-Raster-Höhe, Vegetationshöhe und Volumen der konvexen Hülle. Jeweils in Korrelation mit Frischmasseertrag und Trockenmasseertrag. Jede Methode des Weiteren unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde.

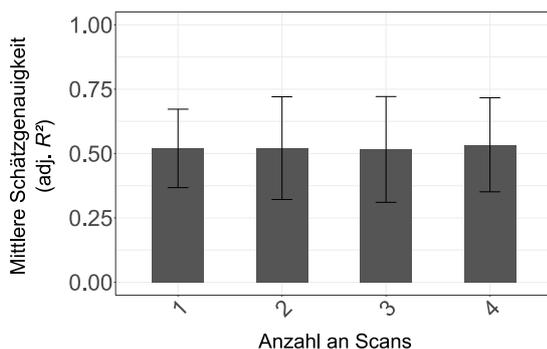


Abbildung 39: Mittelwerte der Schätzgenauigkeit (adj. R^2) aller vorgestellten Methoden unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde.

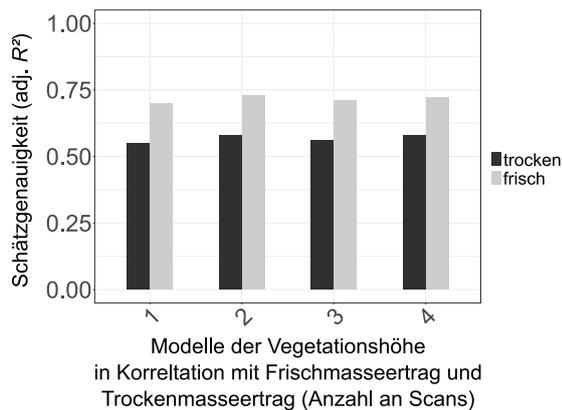


Abbildung 40: Schätzgenauigkeit (adj. R^2) der Methode Vegetationshöhe in Korrelation mit Frischmasseertrag und Trockenmasseertrag. Unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde.

Die mittlere Kalkulationsdauer zeigte einen meist linearen Anstieg mit zunehmender Scananzahl. Unter Berücksichtigung der Modellstärke, der Kalkulationsdauer, der Datenmengen und des Arbeitsaufwandes im Feld, wurde eine Anzahl von zwei Scans als Optimum identifiziert. Die Kalkulationsdauer innerhalb der Methoden mit zwei Scans wurde verglichen. Die bei weitem höchste Kalkulationsdauer benötigte die Methode des *Volumens der konvexen Hülle* mit einer zehnfach höheren mittleren Kalkulationsdauer (491 ms) verglichen mit allen anderen Methoden. Die zweithöchste Kalkulationsdauer benötigte die *Methode der mittleren Vegetationshöhe*, welche doppelt so hoch war, wie die der *Summe der Voxel* und zehnmal höher, als die der *Mittleren 3d-Raster-Höhe*.

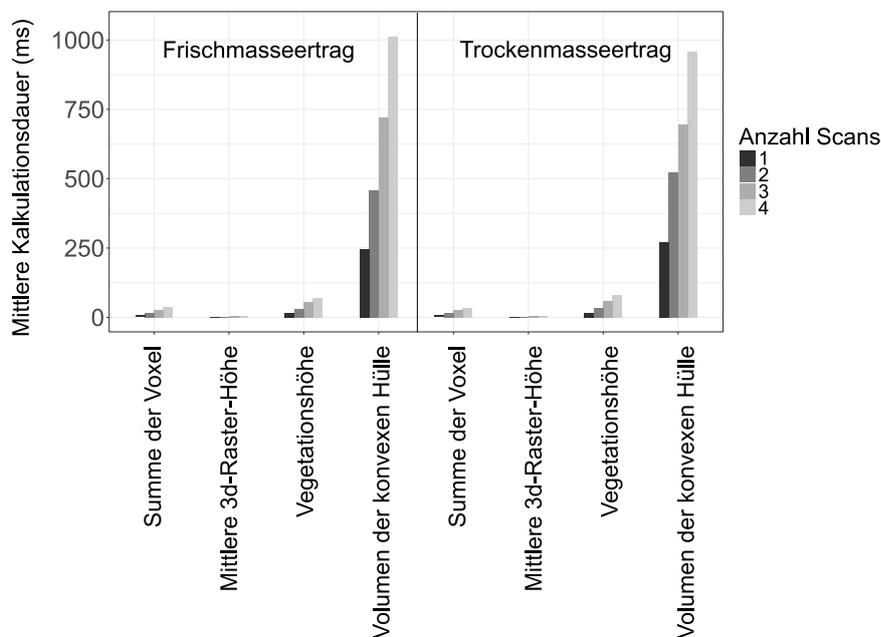


Abbildung 41: Mittlere Kalkulationsdauer der Methoden Summe der Voxel, Mittlere 3d-Raster-Höhe, Vegetationshöhe und Volumen der konvexen Hülle. Unterschieden nach der Anzahl Scans, aus denen die Punktwolke zusammengesetzt wurde und korreliert mit Frischmasseertrag und Trockenmasseertrag.

Ergebnisse der Hauptphase – Bestimmung der Gesamtbiomasse mittels 3d-Laserdaten und hyperspektraler Luftbilder

Die besten Ergebnisse (Tabelle 4) aus Laserdaten zur Abschätzung der Trockenmasse erzielte die SVMR-Methode (Median nRMSEP: 3.9 %, RMSE: 0.07 kg/m²). Das beste Modell aus Hyperspektraldaten erzielte ebenfalls die SVMR-Methode, blieb jedoch unter den Genauigkeiten der Modelle aus Laserdaten (Median nRMSEP: 4.5 %, RMSE: 0.08 kg/m²). Durch eine Kombination der Sensorsysteme (Laser- und Hyperspektraldaten) konnten die Ergebnisse für alle methodischen Ansätze verbessert werden. Das beste Ergebnis erzielte erneut die SVMR (Median nRMSEP: 3.2 %, RMSE: 0.06 kg/m²).

Tabelle 4: Ergebnisse (R², rRMSE, nRMSE) der besten vier multivariaten Methoden aus Laserdaten, Hyperspektraldaten und der Kombination beider Sensordaten für den Trockenmasseertrag (TM).

Sensor	Bestes Modell	R ²	nRMSE (%)*	RMSE (kg/m ²)
3d-Laser	SVMR/(PLSR)**	0.74	3.9	0.07
Spektralkamera	SVMR	0.62	4.5	0.08
Kombination	SVMR/(RFR)**	0.82	3.2	0.06

* Normalisiert durch Intervalllänge der Beobachtung

**Methode in Klammern erzielte vergleichbare Modellgüte

Diskussion

AP 1: Restituierung von Bergwiesen durch die Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung

1a) Wo liegen geeignete Spender- und Empfängerwiesen für die Mahdgutübertragung?

Die angewendete Herangehensweise erwies sich als sehr erfolgreich, da geeignete Flächen identifiziert werden konnten.

1b) Stellen die Aktivierung der Samenbank und die Mahdgutübertragung geeignete Maßnahmen zur Restituierung von artenreichen Bergwiesen dar?

Die NMDS der Vegetationsaufnahmen zeigt, dass sich die Vegetationstypen in allen drei Untersuchungsjahren an der zweiten Achse auftrennen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Vegetationstypen generell erhalten geblieben sind. Im Jahr 2018 und 2019 weisen die Borstgrasrasen und mesischen Goldhaferwiesen-Flächen Überschneidungen von Arten auf. Dies könnte mit der großen Trockenheit im Jahr 2018 (DWD 2018) zusammenhängen, da hier Arten, die eine gewisse Trockenresistenz aufweisen, eher gefördert wurden. Die zusätzlich in die Analyse eingebrachten Faktoren mittlere Vegetationshöhe, Deckung der Vegetation, Streuanteil, Anteil an offenem Boden und Artenzahl sind bis auf letztere sehr variabel. Einzig die Artenzahl ist in den Borstgrasrasen-Flächen in allen Jahren am höchsten. Hier könnte ebenfalls das Wetter in Kombination mit den unterschiedlichen Vegetationstypen einen starken Einfluss auf die jeweilige Ausprägung der Faktoren in den Untersuchungsjahren haben.

Ein klares Muster der Entwicklung der Deckung von *L. polyphyllus* ist nicht vorhanden und es lässt sich insgesamt eine große Variabilität feststellen. Dennoch zeigt sich, dass die Flächen auf denen *L. polyphyllus* ausgestochen wurde, eher eine geringere Deckung von *L. polyphyllus* als die Flächen, auf denen lediglich der Boden gestört wurde, aufweisen. Da sich auch die Kontrollflächen in Bezug auf die Deckung von *L. polyphyllus* sehr variabel zeigen, kann vermutet werden, dass auch für diesen Faktor äußere Einflüsse, wie z. B. das Wetter oder der Mahdtermin- und die Häufigkeit eine große Rolle spielen.

1c) Wann ist der optimale phänologische Erntezeitpunkt hinsichtlich des Abreife- und Ausbreitungsverhaltens der Pflanzenarten der Borstgrasrasen und Goldhaferwiese?

Die Untersuchungen zeigen, dass der Reifezeitpunkt der Bergwiesenarten stark vom jeweiligen Vegetationstyp und vom Wetter abhängt. Daher können hier von Jahr zu Jahr große Unterschiede auftreten und die Untersuchung sollte daher vor jeder potenziellen Ernte zum Zwecke einer Mahdgutübertragung nach dem gewählten Verfahren durchgeführt werden.

AP 2: Analyse der Ausbreitungsprozesse von *L. polyphyllus* auf Landschaftsebene

2a) Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Grad der *L. polyphyllus*-Invasion und den in der GIS-Datenbank erhobenen Raumdaten? Welche Habitate sind besonders stark durch die *L. polyphyllus*-Invasion betroffen?

Die Analyse der im Gebiet vorkommenden Lesesteinriegel und Wegränder hat gezeigt, dass *L. polyphyllus*-Bestände nicht häufiger oder in höherer Deckung in diesen Randbereichen vorkommen als in flächigen Grünlandbiotopen. Allerdings konnte ein Zusammenhang zwischen dem Grad der *L. polyphyllus*-Invasion von Grünland und ihrer Entfernung zum Wegenetz nachgewiesen werden. So waren Wiesen in Straßennähe oft deutlich stärker invadiert als Wiesen in größerer Entfernung zu Straßen. Zudem kam *L. polyphyllus* häufiger auf Wiesen mit angrenzenden Lesesteinriegeln vor als auf Wiesen ohne diese Strukturen. Dies ist damit zu begründen, dass diese weniger intensiv gepflegten Bereiche Ausgangshabitate darstellen, in denen *L. polyphyllus* persistieren kann und von denen eine Wiederausbreitung in die angrenzenden Flächen stattfinden kann. Insbesondere das Wegenetz bietet sich so als Ausbreitungskorridor an. Dies deckt sich mit den Beobachtungen anderer Studien, dass die Fernausbreitung von invasiven Arten häufig entlang des Wegenetzes erfolgt (With 2002). Dies kann entweder direkt über die Besiedelung von Randbereichen her erfolgen oder indirekt, wo Straßen und Wege von Ausbreitungsvektoren wie Weidetieren oder diversen Fahrzeugen genutzt werden.

Im Gebiet Leitgraben waren im Vergleich zu 1998 im Jahr 2016 besonders mesische Goldhaferwiesen- und Borstgrasrasen-Flächen von *L. polyphyllus* invadiert, während Feucht- und Nassgrünland weniger stark betroffen war. Obwohl *L. polyphyllus* auch nasse Bereiche besiedelt (vgl. Meier et al. 2013), ist es möglich, dass sie dort weniger konkurrenzfähig ist als auf frischen Standorten, da sie als Leguminose auf aerobe Bodenverhältnisse zur Stickstofffixierung angewiesen ist (Dracup et al. 1998). Neben dem Zusammenhang zum vorkommenden Wiesentyp konnte gezeigt werden, dass im Leitgraben große Wiesenschläge in Straßennähe stärker invadiert waren als kleine, isoliert liegende Wiesen. Tendenziell fanden sich zudem nasse Wiesen im Untersuchungsgebiet weiter entfernt von Wegen und Lesesteinriegeln als frische Wiesen. Es ist deswegen wahrscheinlich, dass diese Flächen sowohl aufgrund ihrer Standortbedingungen weniger stark invadiert waren als frische Goldhaferwiesen- und Borstgrasrasen-Flächen, als auch aufgrund der isolierten Lage im Untersuchungsgebiet. So wurden einige dieser isolierten Flächen möglicherweise noch nicht von *L. polyphyllus* erreicht, obwohl sie prinzipiell besiedelt werden können.

2b) Wie funktioniert die Ausbreitung von *L. polyphyllus* in der Rhön?

Die Untersuchungen zur Samenschüttung und Ausbreitung von *L. polyphyllus* zeigen ein hohes Selbstausbreitungspotential. Das Potential der Selbstausbreitung durch Ballochorie war bei den durchgeführten Versuchen im Freiland etwas höher als bei den in der Vergangenheit durchgeführten Gewächshausversuchen (vgl. Volz 2003). So wurde ein Großteil der Samen deutlich weiter als drei Meter geschleudert, während bei dem Versuch von Volz (2003) nur 7 % der *L. polyphyllus*-Samen weiter als 1,5 m geschleudert wurden. Die Versuche zur Ballochorie geben zudem Indiz dafür, dass sich die Menge an geschleuderten Samen und die Flugweite im

Verlauf der Samenreife verändern. Die Untersuchungen zur Samenschüttung zeigen, dass *L. polyphyllus*-Samen über einen langen Zeitraum ausgeworfen werden. So konnten bis Ende September *L. polyphyllus*-Samen in den Samenfallen gefunden werden; d. h. es findet bis spät in die Vegetationsperiode (bis Ende September) noch eine Ausschüttung von Samen über ballochore Ausbreitung statt, wenn die Pflanzen nicht entfernt werden.

Insgesamt wurde bei den Versuchen zur Hemerochorie und Zoochorie im Jahr 2017 jeweils nur ein Individuum von *L. polyphyllus* nachgewiesen. Es wurde aber deutlich, dass die Ausbreitung von *L. polyphyllus* sowohl über Schafkot als auch über Mähwerke prinzipiell möglich ist und *L. polyphyllus* über beide Wege potentiell weite Strecken zurücklegen kann. Trotz der Seltenheit tragen diese Ausbreitungsereignisse über weite Strecken zur Überwindung von Ausbreitungsbarrieren bei und ermöglichen so die Etablierung neuer Populationen (With 2002). Insbesondere Arten, die ein hohes Selbstausbreitungspotential besitzen wie *L. polyphyllus*, können so das Verbreitungsgebiet schnell vergrößern. Zudem hatten aufgrund der vergleichsweise späten *L. polyphyllus*-Blüte 2017 nur relativ wenige Individuen zum Zeitpunkt der Probenahme der Mähwerkproben reife Samen. Bei der zweiten Beprobung der Mähwerke im Juli 2019 kamen deutlich mehr *L. polyphyllus*-Individuen mit reifen Samen im Gebiet vor, vor allem zum zweiten Mahdtermin (1.7.). Erwartungsgemäß wurden dann auch deutlich mehr *L. polyphyllus*-Samen in den Mähwerken nachgewiesen. Die Anzahl potentiell ausgebreiteter keimfähiger *L. polyphyllus*-Samen schwankt demnach je nach Witterung und Phänologie zwischen den Jahren und es ist möglich, dass auch bei frühen Mahdterminen in einigen Jahren eine Verschleppung von *L. polyphyllus*-Samen erfolgen kann. Darüber hinaus breiten sowohl Mähwerke als auch Schafe eine Vielzahl von typischen und wertvollen Arten aus und übernehmen damit bei der Vernetzung der Grünlandbiotope im Biosphärenreservat Rhön eine wichtige Funktion.

Bei den Versuchen zur Hydrochorie konnten nur sehr wenige *Lupinus*-Samen in den Fallen nachgewiesen werden. Dies ist möglicherweise darin begründet, dass der ausgewählte Bach während des Sommers zeitweise kein Wasser führte. Die Versuche zur Schwimmfähigkeit zeigten aber dennoch ein begrenztes Potential zur Ausbreitung über Hydrochorie.

AP 3: Energetische Verwertung von extensivem Grünland unter Berücksichtigung von *L. polyphyllus*

3a) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die energetischen Parameter für die Verbrennung des Schnittgutes entweder direkt oder nach dem IFBB-Verfahren (Presskuchen) aus?

Die im Rahmen dieser Studie erfassten energetischen Parameter waren vergleichbar mit Werten, welche in ähnlichen Studien zur energetischen Umwandlung von Grünlandsilagen gefunden wurden (Richter et al. 2010, 2011). Bei biogenen Festbrennstoffen liegt der Heizwert bezogen auf die wasserfreie Masse normalerweise zwischen 16,5 und 19 MJ·kg⁻¹ TM. Der Heizwert trockener biogener Festbrennstoffe ist hauptsächlich durch den Gehalt an oxidierbaren Elementen, primär Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H), festgelegt. Obgleich diese Elemente im Laufe der Vegetationsperiode abnahmen (vgl. Tabelle 2), konnte grundsätzlich kein signifikanter Effekt des Schnittzeitpunktes auf den Heizwert der reinen Bestände der Goldhaferwiese und des Borstgrasrasens festgestellt werden. Einen Effekt von *L. polyphyllus* auf den Heizwert zeigte sich für die Biomassen aus Borstgrasflächen, welcher mit späteren Mahdtermin deutlicher wurde. So erhöhte das Vorkommen von *L. polyphyllus* den Aschegehalt des Festbrennstoffes und verringerte somit dessen Heizwert. Das hier angewandte IFBB-Verfahren konnte diese erhöhten Mineralstoffgehalte insbesondere in Biomassen, welche zum ersten Zeitpunkt geschnitten wurden, auslaugen und damit den Heizwert des Presskuchens (Festbrennstoff) erhöhen. Durch die Einlagerung von Ligninen in die Zellwände im Laufe der Vegetationsperiode war die Auslaugung von mineralischen Elementen aus den Biomassen des zweiten und dritten Schnitttermins während des IFBB-Prozesses etwas erschwert und der Aschegehalt war höher. Darüber hinaus könnten Sekundärverunreinigungen zu einem erhöhten Anteil der mineralischen Elemente in den Proben mit *L. polyphyllus* des zweiten und dritten Schnittzeitpunktes geführt haben. Nichtsdestotrotz konnten die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass mit dem IFBB-Verfahren eine vielversprechende Nutzungsalternative für schwierig zu verwertende Biomassen zur Verfügung steht. Bei der Erzeugung der Biomasse können naturschutzfachliche Gesichtspunkte (z.B. später Erntetermin, Erhalt von artenreichen Habitaten durch Nutzung) und geopolitische Ziele (Schonung fossiler Ressourcen, Klimaschutz) miteinander verknüpft werden.

3b) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung von Lupinenabundanz und Vegetationstyp auf die energetischen Parameter hinsichtlich der anaeroben Vergärung des silierten Schnittgutes bzw. des nach dessen Abpressung (mit dem IFBB-Verfahren) gewonnenen Presssaft aus? Wie wirkt sich die anaerobe Vergärung auf die Keimfähigkeit der Samen von *L. polyphyllus* aus?

Batchversuch

Die ermittelten Methanausbeuten der Silageproben lagen innerhalb der in bereits früheren Studien beobachteten Spanne für Silagen aus extensiv bewirtschafteten Grünlandflächen. Beispielsweise konnten Wachendorf *et al.* (2009) für Materialien von fünf naturnahen Grünlandflächen eine mittlere Methanausbeute von $218 \text{ l}_N \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTS}$ ermitteln und Piepenschneider *et al.* (2016) von $222 \text{ l}_N \cdot \text{CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTS}$ für städtisches Straßenrand-Schnittmaterial aus der Stadt Kassel. In dieser Untersuchung hatte weder der Schnittzeitpunkt noch der Vegetationstyp einen signifikanten Einfluss auf die Methanausbeute, welche mittels Batchversuche im Labormaßstab ermittelt wurde. Ebenso zeigte sich kein Einfluss von *L. polyphyllus* auf die Methanausbeute bei der Silage und den Grad des Abbaus. Die in der Literatur erwähnte Hemmung von Mikroorganismen durch Alkaloide tritt bei Konzentrationen zwischen 5 und 25 mmol/l auf (De La Vega *et al.*, 1996). Der Anteil an *L. polyphyllus* in den Proben lag maximal bei 58 %, im Schnitt jedoch nur bei rund 30 %. Untersuchungen zum Gesamtalkaloidgehalt von *L. polyphyllus* konnte zeigen, dass der Anteil jedoch maximal 2,5 % war. Somit lag die maximale Konzentration an Alkaloiden etwa bei 2,3 mmol/l, und damit weit unter der Konzentration, welche die Aktivität von Mikroorganismen und damit die Methanausbeute beeinträchtigen könnte. Im Gegenzug führte die höhere Stickstoffkonzentration in der lupinendurchsetzten Biomasse nicht zu höheren Methanerträgen. Dies ist vermutlich auf eine geringere Konzentration anderer leicht abbaubarer Komponenten in dieser Biomasse zurückzuführen. Durch die hydrothermale Konditionierung der Silagen (Maischung mit warmem Wasser) vor der Entwässerung war es möglich, die Massenflüsse der Inhaltsstoffe in den Presssaft zu beeinflussen, sodass dieses Substrat für die Vergärung zu Biogas weiter optimiert wurde. Damit zeigten die Presssäfte beider Biomassen, der reinen und der lupinendurchsetzten, eine gute Eignung als Gärsubstrat. Die Methanausbeuten der Presssäfte lagen in dieser Untersuchung nahe denen von Maissilage ($300\text{-}350 \text{ l}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTS}$), dem am häufigsten genutzten Gärsubstrat in Biogasanlagen.

Langzeitversuch zur Vergärung von Lupine

Die Laborbedingungen konnten die Praxisbedingungen hinsichtlich der Fütterungsverteilung nur teilweise abbilden. Im Labor fand die Fütterung arbeitstäglich einmalig statt, während in der Praxis die Biogasanlagen mehrere Fütterungen täglich erhalten. Somit wurde im Labor die Wochenmenge durch fünf Einzelfütterungen dem Reaktor zugeführt. Diese Stoßbelastungen sind bei niedrigeren Raumbelastungen problemlos durchführbar und im Laborbetrieb die Regel. Erst höhere Raumbelastungen können problematisch werden. Die fütterungsfreie Phase erlaubt jedoch einen weitgehenden Abbau der potenziell angestauten Intermediärprodukte. Weiterhin hat diese Art der Fütterung den Vorteil, dass Schwankungen in der Gasproduktion durch unterschiedliches Verhalten der Reaktoren schneller und deutlicher ermittelt werden. Von jeder Fütterungsvariante wurde nur eine Wiederholung durchgeführt. Somit konnten eventuelle

Abweichungen, beispielsweise durch Fehler in der Messtechnik, nicht über mehrere Wiederholungen kompensiert werden. Nichtsdestotrotz konnte die Vergärung von reinem Borstgrasmaterial sowie Mischungen mit *L. polyphyllus* im Langzeitversuch erfolgreich durchgeführt werden. Auch konnte während der Versuchsdauer keine ertragsmindernde Akkumulation eines potenziellen Hemmstoffes durch die Fütterung mit lupinendurchsetztem Material festgestellt werden. Eine Abstufung der kumulierten Gaserträge baute sich von Beginn des Hauptversuches an auf und blieb während der Versuchsdauer in seinem Verhältnis konstant. Unterschiede in der Gasproduktion waren daher auf das Gasertragspotential der beiden Einsatzstoffe zurückzuführen und nicht auf eventuelle Hemmstoffe.

3c) Wie wirkt sich der Schnittzeitpunkt unter Berücksichtigung der Abundanz von *L. polyphyllus* und des Vegetationstyps auf die Lebenszyklusanalyse der unterschiedlichen möglichen (energetischen) Verwertungsrichtungen aus?

Die energetische Umwandlung der lupinendurchsetzten Berggrasland-Biomasse hat im Vergleich zu Netzstrom und Fernwärmequellen, eine Nettoeinsparung beim Primärenergieverbrauch und Treibhausgasemissionen ergeben. Damit bietet dieses System eine Lösung für den effektiven Umgang mit Grasland mit invasiven Arten, die in Europa immer häufiger vorkommen. Aus dieser Studie ging hervor, dass das IFBB im Vergleich zur anaeroben Vergärung eine bessere Option in Bezug auf Umwelt- und Primärenergieeinsparungen bietet. Darüber hinaus macht die Flexibilität des IFBB-Verfahrens bei der Nutzung von Grünlandbiomasse mit unterschiedlicher Artenzusammensetzung und unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften dieses System zu einer bevorzugten Lösung. Ferner kann dieses Verfahren auf den meisten Grünlandgebieten Europas eingesetzt werden. Somit schafft die Herstellung von lagerfähigen Presskuchenbriketts und die Biogaserzeugung aus leicht verdaulicher Pressflüssigkeit interessante Perspektiven für ein flexibles System erneuerbarer Energien in abgelegenen Gebieten. Mit alternativen Energiequellen für die Presskuchentrocknung, die als energieintensivster Prozess identifiziert wurde, könnten die Umweltauswirkungen weiter reduziert werden. Der höhere Ertrag vom durch Lupine invadiertem Grünland führte zu einer höheren Energieproduktion sowie zu Treibhausgaseinsparungen, was diese Biomasse zu einem besseren Ausgangsmaterial für die Erzeugung erneuerbarer Energien machte. Die Tatsache, dass auch lupinenfreie Biomasse mit geringerem Ertrag mit THG- und Primärenergieeinsparungen umgewandelt werden konnten, deutet darauf hin, dass IFBB langfristig genutzt werden kann, auch für die angestrebte Situation, dass die Lupineninvasion beseitigt wurde.

AP 4: Nicht destruktive, fernerkundliche Beurteilung des Zeitpunktes von Schnittmaßnahmen zur Bekämpfung des invasiven Neophyten *L. polyphyllus* und dessen Auswirkung auf die energetischen Parameter von Grünlandbeständen

4a) Wie hoch ist die Genauigkeit einer fernerkundlichen Erfassung von *L. polyphyllus*-Abundanz im Grünland?

4b) Wie wirkt sich die Deckung von *L. polyphyllus* im Grünland auf die Schätzgenauigkeit energetischer Parameter mit Hilfe fernerkundlicher Messungen aus?

Vorphase

Die Modelle zeigten bessere Korrelationen mit dem Frischmasseertrag als mit dem Trockenmasseertrag. Dies war zu erwarten aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen pflanzlichen Habitus-Eigenschaften und dem Wassergehalt der Biomasse. Die *Methode der mittleren Vegetationshöhe* erzielte die besten Ergebnisse, ähnlich erfolgreich war die *Mittlere 3d-Raster-Höhe* und das *Volumen der konvexen Hülle*. Für die Methoden *Mittlere 3d-Raster-Höhe* sowie *Summe der Voxel* konnten bereits vergleichbare Ergebnisse in ähnlichen Vegetationsklassen erreicht werden (Olsoy et al. 2014; Greaves et al. 2015; Wallace et al. 2017).

Die hohe Schätzgenauigkeit der Methoden bestehend aus Punktwolken mit zwei Scans lässt sich dahingehend erklären, dass der Beschattungseffekt gegenüber einer Einzel-Scan Punktwolke aufgehoben ist. Zudem können Bewegungen der Vegetation durch Windeinflüsse zu erhöhtem Rauschen in den Punktwolken führen. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Anzahl an Scans. Gegenüber den 3- und 4-Scan Varianten profitiert die 2-Scan Variante also von einem reduzierten Rauscheffekt. Dieser Rauscheffekt generiert zusätzliche Punkte derselben Biomasse, welche durch Windeinflüsse in Bewegung geraten kann, woraus nicht nur kein zusätzlicher Informationsgewinn, sondern die Information geradezu reduziert wird.

Bedingt durch die komplexe Berechnungsstruktur benötigte die Methode des *Volumens der konvexen Hülle* weit mehr Kalkulationszeit als die anderen Methoden. Im Vergleich der ähnlich hohen Schätzgenauigkeiten dieser Methoden, gilt es die Methode des *Volumens der konvexen Hülle* wegen ihrer hohen Kalkulationsdauer für Einsätze bei der Abschätzung größerer Datenmengen zu optimieren, oder auf die Methoden *Vegetationshöhe*, *Summe der Voxel* oder *Mittlere 3d-Raster Höhe* zurückzugreifen.

Der lineare Anstieg der Kalkulationsdauer mit steigender Scananzahl deutet auf einen linearen Anstieg der Punkte innerhalb der Punktwolke hin. Dies lässt vermuten, dass beim Zusammenführen der Punktwolke aus Einzelscans kaum Fusionen überlagernder Punkte stattfinden oder ein erhöhtes Rauschen durch Windeinflüsse die absolute Anzahl an Punkten in der Punktwolke erhöht.

Hauptphase

Eine Kombination aus Laser- und Hyperspektraldaten sorgte für eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu Modellansätzen aus solitären Sensordaten. Die wichtigsten Variablen für das beste Ertragsmodell aus Laserdaten waren die der mittleren Vegetationshöhe, hierbei nahm mit verkleinertem Höhenabschnitt zur Berechnung des Höhenmittelwertes auch die Wichtigkeit der Variable ab. Die wichtigsten Variablen aus Hyperspektraldaten waren die Wellenlängen aus dem Nahinfrarotbereich (714-926 nm). Aus den 307 Laser- und Hyperspektralparametern, trugen ebenfalls die mittlere Vegetationshöhe am stärksten zum besten Modell der kombinierten Sensordaten bei. Auch die Variablen der Summe der Voxel und die mittlere Hebung waren wichtiger als die Variablen aus Hyperspektraldaten.

Da die wichtigsten Variablen für die Sensorkombination den wichtigsten Variablen der Einzelsensor-Modelle entsprechen, zeigt sich, dass Ertragsspezifische Eigenschaften über Pflanzenhöhe und den Wellenlängenbereichen von 700 bis 950 nm abgeschätzt werden können.

Da die Laserdaten schon als Einzelsensormodell eine stärkere Aussagekraft besitzen und sich dies auch in der Sensorkombination widerspiegelt, sollten kostengünstigere und praktikablere Alternativen zur Erzeugung von 3d-Punktwolken erprobt werden. Einen Ansatz liefern hier das Structure from Motion-Verfahren (SfM), welches 3d-Punktwolken aus kostengünstigen Drohnen und RGB-Kamerasystemen erzeugen kann. Eine Extraktion der Punkthöhenwerte und vor allem der Punktdichte setzt hier eine geringe Flughöhe bzw. eine hochauflösende Kamera voraus. Die Kosten und der Aufwand belaufen sich jedoch auf Bruchteile, verglichen mit einem terrestrischen Lasersystem. Eine zusätzliche Nutzung des RGB Farbraums der Kamera kann die detaillierten Informationen des Hyperspektralsensors zwar nicht ersetzen, jedoch könnten spektrale Informationen aus dem sichtbaren Bereich bereits zur Modellverbesserung beitragen und diese Farbwerte auch mittels Umwandlung in andere Koordinatensysteme wie etwa HSI beigesteuert werden.

Öffentlichkeitsarbeit

1.1 Veröffentlichungen

Website

Eine gemeinsam gestaltete und formulierte Website für das Projekt wurde auf den Plattformen der Universitäten JLU Gießen und Kassel eingerichtet. Die Links zur den Projektwebseiten lauten:

<http://www.uni-kassel.de/fb11agrar/de/fachgebiete-einrichtungen/gnr/forschung/forschungsprojekte.html>

<https://www.uni-giessen.de/fbz/fb09/institute/ilr/loek/forschung/currproj/lupinus>

Im Rahmen dieses Projekts wurden folgende Abschlussarbeiten erarbeitet:

Baltes, Juliane (2017) Ist *Lupinus polyphyllus* ein geeigneter Wirt für den Halbparasiten *Rhinanthus minor*? BSc, JLU Gießen

Horlemann, David (2017) Analyse der Bestandesentwicklung von *Lupinus polyphyllus* in der Rhön seit 1998, BSc, JLU Gießen

Rothen, Sabrina (2017) Effekte des Erntezeitpunktes auf die Samenkeimung von *Lupinus polyphyllus*, BSc, JLU Gießen

Witzmann, Heidelinde (2017) Wachstum und Vitalität von *Vaccinium myrtillus* L. in Abhängigkeit von ausgewählten Umweltbedingungen in der Hohen Rhön, BSc, JLU Gießen

Saba, Maria (2018) Die vegetative Ausbreitung von *Lupinus polyphyllus* Lindl. in Bergwiesen der Rhön, BSc, JLU Gießen

Sander, Anna-Lena (2018) Artenzusammensetzung von Spenderflächen bei einem Mahdgutübertragungsexperiment in der Rhön, BSc, JLU Gießen

Bartels, Wiebke (2018) Untersuchung der Alkaloidgehalte in der vielblättrigen Lupine (*Lupinus polyphyllus* Lindl.) unter Berücksichtigung des Erntezeitpunktes, MSc, Universität Kassel

Lücke, Matthias (2019) Anaerobe Vergärung der Biomasse von Extensivgrünlandwiesen unter Berücksichtigung des Einflusses der invasiven Art *Lupinus polyphyllus*, MSc, Universität Kassel

Lübke, Paul (2019) Stauden-Lupine im Grünland des Biosphärenreservats Rhön. Schätzung von Stickstoff- und Fasergehalt mittels Nahinfrarotspektroskopie in von Lupinen invadierten Bergwiesen, BSc, Universität Kassel

Reuter, Elena (2019) Experimentelle Bekämpfung von *Lupinus polyphyllus* im Biosphärenreservat Rhön, BSc, JLU Gießen

Weber, Rosina Ulrike (2019) Luftbildkartierung und GIS-gestützte Analyse des Bestands von *Lupinus polyphyllus* im NSG Lange Rhön, BSc, JLU Gießen

Theato, Till (in Bearbeitung) Entwicklung eines Klassifikationsmodells zur Identifikation von *Lupinus polyphyllus* im Biosphärenreservat Rhön aus RGB-Luftbildern, MSc, Universität Kassel

Baltes, Juliane (in Bearbeitung) Keimfähigkeit von Samen der Stauden-Lupine (*Lupinus polyphyllus*) nach Vergärung in der Biogasanlage, MSc, Universität Münster in Kooperation mit JLU Gießen und Universität Kassel

Veröffentlichungen (inkl. Daten aus der Explorationsphase):

Hensgen, F., & Wachendorf, M. (2018). Aqueous leaching prior to dewatering improves the quality of solid fuels from grasslands. *Energies*, 11, 846.

Klinger, Y.P., Harvolk-Schöning, S., Eckstein, R.L., Otte, A. & Ludewig, K. (2019) Applying landscape structure analysis to assess the spatio-temporal distribution of an invasive legume in the Rhön UNESCO Biosphere Reserve. *Biological Invasions* 21, 2735-2749.

Schulze-Brüninghoff D., Hensgen F., Wachendorf M. & Astor T. (2019). Methods for LiDAR-based estimation of extensive grassland biomass. *Computer and Electronics in Agriculture*, 156, 693-699.

Ben, J., Hensgen, F. & Wachendorf, M. Life cycle assessment of bioenergy production from mountainous grasslands invaded by Lupine (*Lupinus polyphyllus* Lindl.). (eingereicht)

Hansen, W. Wollny, J., Otte, A., Eckstein, R. L. & Ludewig, K.: Invasive legume affects species composition and functional diversity of mountain meadow plant communities (eingereicht)

Klinger, Y.P., Horlemann, D., Eckstein, R.L., Otte, A. & Ludewig, K.: Germination of the invasive legume *Lupinus polyphyllus* depends on cutting date and seed morphology (eingereicht)

Ludewig, K., Hansen, W., Klinger, Y.P., Eckstein, R.L. & Otte, A.: Soil seed bank offers potential for the restoration of mountain meadows invaded by *Lupinus polyphyllus* (eingereicht)

Wijesingha, J., Astor, T., Schulze-Brüninghoff, D. & Wachendorf, M. Mapping invasive *Lupinus polyphyllus* Lindl. in semi-natural grasslands using object-based analysis of UAV-borne images. Eingereicht bei *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, (eingereicht)

Schulze-Brüninghoff D., Wachendorf M. & Astor T. Sensor fusion as a tool for biomass estimation in grasslands invaded by *Lupinus polyphyllus* Lindl. (in Bearbeitung)

Deutschsprachige Veröffentlichungen:

Hansen, Klinger, Otte & Ludewig (2019) Erprobung von Maßnahmen zur Wiederherstellung artenreichen Grünlands in einer niederschlagsreichen Mittelgebirgsregion. BfN-Skripten 527: 161-166

Klinger, Hansen, Otte & Ludewig (2019) Ausbreitungsvektoren und Ausbreitungswege der invasiven Stauden-Lupine im UNESCO Biosphärenreservat Rhön. BfN-Skripten 527: 167-172

1.2 Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern

Die Zusammenarbeit zwischen allen Projektpartnern verlief engagiert und konstruktiv. Am 29.05.2017 wurde das erste interne Auftakttreffen mit den Kooperationspartnern durchgeführt, bei dem die Pläne für die Untersuchungen besprochen wurden. Im Vorfeld der Feldarbeit wurden Abstimmungstreffen zur Auswahl der Untersuchungsflächen mit Torsten Kirchner (Biosphärenreservat Rhön - Bayerische Verwaltungsstelle) und Ewald Sauer (Biosphärenreservat Rhön – Hessische Verwaltungsstelle) durchgeführt.

Vom 05.10.- 06.10.2017 fand ein zweitägiger Projektworkshop statt. Am Abend des 05.10. wurde zu einer öffentlichen Informationsveranstaltung in die Elstalhalle in Oberelsbach geladen, bei dem Prof. Dr. Dr. habil. Dr. h.c. (TSU) Annette Otte und Prof. Dr. Michael Wachendorf über die Ergebnisse der Projektvorphase sowie die bereits durchgeführten und noch anstehenden Untersuchungen im laufenden Projekt informierten. Die Veranstaltung war rege besucht, mit Interessierten aus der Landwirtschaft, der lokalen Politik, Presse, Ehrenamtlichen, die sich in der Lupinenbekämpfung engagieren und weiteren Akteuren aus der Region. Im Anschluss an den Vortrag ergab sich eine rege Diskussion mit vielen relevanten Erkenntnissen aus unterschiedlichen Perspektiven, konstruktiven Beiträgen sowie anregenden und weiterführenden Fragen.

Am 06.10.2017 fand das Kick-Off-Meeting des Projekts mit Teilnehmenden der beiden Universitäten, der hessischen und bayerischen Verwaltung des Biosphärenreservats und ersten Netzwerkpartnern statt. Dabei wurden der Sachstand der bereits durchgeführten Feldarbeit, Probleme bei der Einrichtung einer dauerhaften Website und die Pläne für das Expertennetzwerk besprochen.

Am 11.10.2018 fand in Oberelsbach ein Projekttreffen mit allen Kooperationspartnern statt, bei dem aktuelle Arbeiten und Ergebnisse, sowie die Pläne für die zweite Hauptphase, diskutiert wurden. Der Antrag für die zweite Hauptphase wurde gemeinsam mit den Partnern der Universität Kassel formuliert und im Februar 2019 bei der DBU eingereicht. Bei einem Projekttreffen am 27.03.2019 in Gießen wurden weitere Ergebnisse und Pläne für den weiteren Verlauf des Projekts mit allen Projektpartnern besprochen.

Zudem wurden 2019 zwei Workshops organisiert:

Im Mai 2019 wurde der Workshop "Fernerkundung im Naturschutz - Kontrolle invasiver Arten und Erhalt der Biodiversität" in Oberelsbach durchgeführt. Mehr als 20 Teilnehmende aus den Bereichen Naturschutz, Wissenschaft und Verwaltung waren vertreten. Im Rahmen eines Worldcafé wurden unterschiedliche Perspektiven und Ansätze zur breiteren Nutzung der Fernerkundung im Naturschutz erarbeitet. Die Ergebnisse des Worldcafé können auf Rückfrage, eingesehen werden.

Im Juni 2019 trafen sich knapp 30 Teilnehmende zur Fachtagung „Management invasiver Pflanzenarten in Bergwiesen-Ökosystemen“ in Oberelsbach. Aus den Biosphärenreservaten, und anderen Verwaltungsstellen, aus der Wissenschaft und aus der Naturschutzpraxis wurden Erfahrungen in der Bekämpfung von Stauden-Lupinen und anderen invasiven Arten ausgetauscht.

Ausblick

Ziel der zweiten Hauptphase ist es, ein Konzept zur dauerhaften Restituierung und Erhaltung großflächigen artenreichen Grünlands in Mittelgebirgsregionen zu entwickeln und zu erproben. In der nun beendeten ersten Hauptphase wurde hierfür die Bergwiesen-Restituierung durch die Aktivierung der Samenbank und die Übertragung diasporenhaltigen Mahdguts erprobt und die Ausbreitungsprozesse von *L. polyphyllus* auf Landschaftsebene analysiert. Die Effekte eines für die Reduktion von *L. polyphyllus* geeigneten Schnittregimes auf die bioenergetische Verwendung des jährlichen Grünschnitts von Bergwiesen wurden untersucht und die Erfassung von *L. polyphyllus* durch Methoden der Fernerkundung erprobt. In der zweiten Hauptphase (12 Monate) werden schließlich die Ergebnisse aus allen Arbeitspaketen in einer Synthese in Form eines Prognosemodells zusammengeführt und die Weitergabe der Erkenntnisse wird durch das bereits aufgebaute Lupinen-Netzwerkes mit anderen Akteuren sichergestellt. Schließlich wird gemeinsam eine Broschüre erarbeitet.

AP 1

Die Daten des Mahdgutübertragungsversuchs werden weiterhin ausgewertet und die bisherige grafische Darstellung der Ergebnisse mit schließenden statistischen Tests gestützt. Die Ergebnisse sollen dann verwendet werden, um Entscheidungshilfen im Bergwiesenmanagement und zur Lupinenbekämpfung zu entwickeln.

AP 2

Im weiteren Verlauf des Projekts werden die Daten zur Ausbreitungsökologie von *L. polyphyllus* weiter ausgewertet und in Bezug zur lokalen Flora der Rhön gesetzt. Die Ergebnisse des AP 2 werden im Folgeprojekt verwendet, um lokalen Akteuren Entscheidungshilfen im Bergwiesen-Management und zur Bekämpfung von *L. polyphyllus* zu geben. So soll eine weitere Ausbreitung der Pflanzenart verhindert bzw. verlangsamt werden.

AP 3

Der Feldversuch wird unverändert im Jahr 2020 fortgeführt. Hierzu werden die Flächen weiterhin von den Landwirten gepachtet und umzäunt, um die Flächen vor Wildfraß und ungewollter Beerntung oder Beweidung zu schützen. Die Feldertragsdaten, d. h. Frischmasse- und Trockenmasseertrag werden erhoben, jeweils differenziert in Lupineertrag und sonstiger Ertrag. Ziel dieser vierjährigen Erhebung ist die Entwicklung eines für die Reduktion von *L. polyphyllus* geeigneten Schnittregimes unter der Berücksichtigung einer effizienten bioenergetischen Verwertung des jährlichen Grünschnitts von Bergwiesen.

Weiterhin planen wir für das Jahr 2020 eine Kooperation mit fachgebietsansässigen Projekten welche sich mit integrierten Stadt-Land-Konzepten aus bislang ungenutzte städtischen und ländlichen Restbiomassen (z.B. Landschaftspflegematerial) und ihre Umwandlung in hochwertige Energieträger und Aktivkohlen beschäftigen (bspw. CoAct-Projekt, www.coact.uni-kassel.de). So ist geplant im Rahmen einer Masterarbeit die im Jahr 2020 geernteten Biomassen (mit und ohne Lupine) mittels IFBB-Verfahren aufzubereiten, die hergestellten Pellets zu pyrolysieren und die entstandene Pflanzenkohle hinsichtlich ihrer Eigenschaften (e.g. Kohlenstoffanteil, molares H/C_{org} - und O/C_{org} -Verhältnis, Nährstoffgehalte

von Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Kalzium, pH, Wassergehalt & Wasserhaltevermögen) im Labor zu analysieren. So soll die Pyrolyse der kritischen Biomasse als erweiterte Option der IFBB-Technologie getestet werden. Ziel dieser Untersuchung könnte zusätzlich sein, die Pflanzenkohle, welche aus einem „minderwertigen“ Landschaftspflegematerial hergestellt wird, auf ihre Anwendungsmöglichkeiten, bspw. als Einstreuzusatz in der Geflügelhaltung oder zur Abwasseraufbereitung, zu evaluieren.

Die bisherigen Ergebnisse und Ergebnisse aus den fortgeführten Versuchen werden auf wissenschaftlichen Konferenzen und in wissenschaftlichen Artikeln einem Fachpublikum präsentiert werden. Zudem werden sie so aufbereitet, dass auch die breite interessierte Öffentlichkeit in der Rhön und darüber hinaus auf den geplanten Öffentlichkeitsveranstaltungen von den Erkenntnissen profitieren kann.

AP 4

Der Ansatz zur Nutzung einer kostengünstigen RGB Kamera kann weiterführend auch in Lupinen-Klassifikationsmodellen eingesetzt werde, wobei optimierte Segmentierungsalgorithmen und anschließende Methoden des maschinellen Lernens einen wichtigen Beitrag zu Beantwortung der Fragen 4a) und 4b) liefern können. Neben dem Einsatz klassischer Klassifikationsalgorithmen werden die Daten, so sie denn in hoher räumlicher Auflösung vorliegen auch mittels künstlicher neuronaler Netze zur Objekterkennung eingesetzt. Weitere Erfolgchancen versprechen die Analysen aus den Multispektraldaten, welche einen Kompromiss zwischen Spektralen Informationen, hoher räumlicher Auflösung (Einzelpflanzenenerkennung) und einer großen Flächenabdeckung darstellen.

Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes werden in wissenschaftlichen Fachzeitschriften und auf wissenschaftlichen Konferenzen einem Fachpublikum präsentiert. Gerade die Fernerkundungsdaten eignen sich sehr gut zur Visualisierung und zur Präsentation auf öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen. Daher werden auch die Daten dieses APs auf den geplanten öffentlichen Veranstaltungen und den Netzwerktreffen präsentiert.

Fazit

Die erste Hauptphase des Projekts konnte zielgerecht und erfolgreich abgeschlossen werden. Die notwendigen Feldversuche der beiden beteiligten Universitäten konnten in vollem Umfang wie geplant durchgeführt werden. Dies war vor allem durch die vertrauensvolle und kooperative Zusammenarbeit mit den entscheidenden Akteuren der Biosphärenreservats-Verwaltungen vor Ort möglich und bildet die Grundlage für das weitere Vorgehen im Projekt!

Im AP 1 wurden geeignete Spender- und Empfängerflächen für die Restituierungsversuche der Bergwiesen identifiziert. Dadurch konnte der Versuch zur Aktivierung der Samenbank und Mahdgutübertragung wie geplant durchgeführt werden. Dabei blieben die Vegetationstypen trotz der starken Eingriffe erhalten, während *L. polyphyllus* reduziert wurde. Weiterhin zeigt sich eine große Variabilität hinsichtlich der Deckung von *L. polyphyllus* auf den Untersuchungsflächen. Dies weist darauf hin, dass neben den angewandten Behandlungen der

Flächen die jährlichen Witterungsverhältnisse einen großen Einfluss auf die Deckung von *L. polyphyllus* haben. In AP 2 wurde die in der Vorphase erstellte GIS-Datenbank verwendet, um die Beziehungen der *L. polyphyllus*-Vorkommen im Hinblick auf Umweltparameter zu analysieren und Feldexperimente zu bedeutsamen Ausbreitungsvektoren (Ballochorie, Zoochorie, Hydrochorie) durchzuführen. Die Versuche zur Ballochorie zeigen, dass die Anzahl an ausgeschleuderten Samen und die Flugweite sich im Verlauf des Samenreifeprozesses verändern: Bemerkenswert ist, dass Samen über sechs Meter hinaus geschleudert werden können. Im Feld konnten bis Ende September *L. polyphyllus*-Samen in Bodenfallen gefunden werden. Auch sind *L. polyphyllus*-Samen teilweise schwimmfähig, obwohl ein großer Prozentsatz der Samen sofort untergeht, kann ein kleinerer Anteil über eine Woche schwimmen. In den Schwimmfallen im Gelände ließen sich nur wenige *L. polyphyllus*-Samen nachweisen, was aber nicht bedeutet, dass keine hydrochore Ausbreitung der Art stattfindet. Die in AP 3 erhobenen Ertragsdaten liegen im normalen Bereich für extensives Naturschutz-Grünland höherer Lagen; allerdings zeigte der Borstgrasrasen ohne Lupine sehr niedrige Erträge im Vergleich zu den anderen Flächen. Die von Lupine invadierte Borstgrasrasen- und die beiden Goldhaferwiesen-Flächen zeigen gleiche Erträge, wobei die Variabilität des Ertrages in der Fläche durch die Invasion der Lupine zunahm. Der Anteil am Trockenmasseertrag der Lupine in den Flächen schwankte sehr stark zwischen 1,5 % und 56,7 %. Der zweite Mahdtermin erwies sich als notwendig, da die Lupine in den Flächen zum zweiten Schnitttermin bereits wieder Blütenstände und Samen ausgebildet hatte. Für die Auswertung der Fernerkundungsdaten (AP4) wurden sowohl Daten aus dem vorhergehenden Explorationsprojekt als auch neu erhobene Felddaten verwendet. Auswertungsmethoden konnten identifiziert werden, wobei die Methode der mittleren Vegetationshöhe den besten Zusammenhang zwischen Laserdaten und destruktiv gemessenen Daten darstellte. Wichtige Parameter, wie bspw. die optimale Anzahl der Laserscans pro Plot (zwei) konnten bestimmt werden. Diese Erkenntnisse aus der Vorphase fanden innerhalb der Hauptphase ihre Anwendung. Die Kombination aus Parametern von Laserdaten und Hyperspektraldaten verbesserte diesen Ansatz weiter. Modelle zur Lupinendeckung und -Klassifikation werden mittels Thermal- und RGB-Sensor bearbeitet. Auch eine (Lupine-) Objekterkennung mittels künstlicher neuronaler Netze wird bearbeitet. Ein Multispektralsystem zur Abdeckung erheblich größerer Flächen wurde eingesetzt. Die bisherigen Ergebnisse liefern erste Datengrundlagen für die Erstellung eines Prognosemodells zur Abschätzung der Dynamik der Bestandesentwicklung von *L. polyphyllus* (AP 5 in der nächsten Phase).

Im Bereich Öffentlichkeitsarbeit wurden zahlreiche Schritte für den Aufbau des Lupinen-Netzwerks durchgeführt. Nach der Durchführung einer öffentlichen Veranstaltung in Oberelsbach am 5.10.2017 mit zahlreichen interessierten Landwirten, Kommunalpolitikern, freiwillige Lupinenbekämpfern, Naturschützern und Beamten aus den für das Biosphärenreservat zuständigen Behörden teilnahmen und dem ersten Netzwerktreffen am 6.10.2017 unter Beteiligung von Interessierten aus der Rhön und dem Erzgebirge, haben insbesondere die beiden durchgeführten Workshops im Mai und Juni 2019 zur Vernetzung beigetragen.

Literaturverzeichnis

- Bakker, J.P., & Berendse, F. (1999) Constraints in the restoration of ecological diversity in grassland and heathland communities. *Trends in Ecology & Evolution* 14: 63–68.
- Bossuyt, B., & Honnay, O. (2008) Can the seed bank be used for ecological restoration? An overview of seed bank characteristics in European communities. *Journal of Vegetation Science* 19: 875–884.
- Braun-Blanquet, J. (1964). *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde*. Springer, Wien-New York.
- De La Vega, R., et al. (1996) *Bactericide-like effect of Lupinus alkaloids*. Madrid, Oxford, Elsevier, 1996, S. 141 - 148.
- Dierschke, H. (1972) Zur Aufnahme und Darstellung Phänologischer Erscheinungen in Pflanzengesellschaften. In R. Tüxen & E. van der Maarel (Hrsg.), *Grundfragen und Methoden in der Pflanzensoziologie / Basic Problems and Methods in Phytosociology* (pp. 291–311). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7241-5_21
- Dracup, M., Turner, N.C., Tang, C., Reader, M., Palta, J. (1998) Responses to abiotic stresses. In: Gladstones, J.S., Atkins, C.A., Hamblin, J. (eds) *Lupins as crop plants: biology, production and utilization*. CAB International, Wallingford, pp 227–261
- DWD. (2018). *Deutscher Wetterdienst* 2018. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2018/8/6.html
- Edwards, A.R., Mortimer, S.R., Lawson, C.S., Westbury, D.B., Harris, S.J., Woodcock, B.A., & Brown, V.K. (2007) Hay strewing, brush harvesting of seed and soil disturbance as tools for the enhancement of botanical diversity in grasslands. *Biological Conservation* 134: 372–382.
- Florinsky, I. V. (1998) Accuracy of Local Topographic Variables Derived from Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science* 12:1, 47–62.
- Greaves, H.E., Vierling, L.A., Eitel, J.U.H., Boelman, N.T., Magney, T.S., Prager, C.M., & Griffin, K.L. (2015) Estimating aboveground biomass and leaf area of low-stature Arctic shrubs with terrestrial LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 164: 26–35.
- Habel, K., Grasman, R., Gramacy, R.B., Stahel, A., & Sterratt, D.C. (2015) geometry: Mesh Generation and Surface Tesselation.
- Harnisch, D.-I.M., Otte, P.D.A., Schmiede, R., & Donath, D.T.W. (2014) *Verwendung von Mahdgut zur Renaturierung von Auengrünland*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Hijmans, R.J., & van Etten, J. (2012) raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2.0-12.
- Hopfensperger, K. (2007) A review of similarity between seed bank and standing vegetation across ecosystems. *Oikos* 116: 1438–1448.

- Kiehl, K., Kirmer, A., Donath, T.W., Rasran, L., & Hölzel, N. (2010) Species introduction in restoration projects – Evaluation of different techniques for the establishment of semi-natural grasslands in Central and Northwestern Europe. *Basic and Applied Ecology* 11: 285–299.
- Klimkowska, A., Van Diggelen, R., Bakker, J.P., & Grootjans, A.P. (2007) Wet meadow restoration in Western Europe: A quantitative assessment of the effectiveness of several techniques. *Biological Conservation* 140: 318–328.
- Klinger, Y.P., Harvolk-Schöning, S., Eckstein, R.L., Otte, A. & Ludewig, K. (2019) Applying landscape structure analysis to assess the spatio-temporal distribution of an invasive legume in the Rhön UNESCO Biosphere Reserve. *Biological Invasions* 21, 2735-2749.
- Ludwig, G. & Schnittler, M. (1996) Rote Liste gefährdeter Pflanzen Deutschlands, *Schriftenreihe für Vegetationskunde* 28, Bundesamt für Naturschutz, Bonn – Bad Godesberg.
- Meier, C.I., Reid, B.L., & Sandoval, O. (2013) Effects of the invasive plant *Lupinus polyphyllus* on vertical accretion of fine sediment and nutrient availability in bars of the gravel-bed Paloma river. *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters* 43: 381–387.
- Mersmann, O. (2015) microbenchmark: Accurate Timing Functions.
- Olsoy, P.J., Glenn, N.F., Clark, P.E., & Derryberry, D.W.R. (2014) Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 88: 166–173.
- Otte, A., & Maul, P. (2005) Verbreitungsschwerpunkte und strukturelle Einnischung der Stauden-Lupine (*Lupinus polyphyllus* Lindl.) in Bergwiesen der Rhön. *Tuexenia* 25: 151–182.
- Piepensneider M., Bühle L., Hensgen F., Wachendorf M. (2016): Energy recovery from grass of urban roadside verges by anaerobic digestion and combustion after pre-processing. *Biomass and Bioenergy* 85, 278-287.
- Ranal, M. A., Santana, D. G. de, Ferreira, W. R., & Mendes-Rodrigues, C. (2009). Calculating germination measurements and organizing spreadsheets. *Revista Brasileira de Botânica*, 32, 849–855.
- Richter F., Fricke T., Wachendorf M. (2010): Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass.III. Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on solid fuel properties and on energy and greenhouse gas balances. *Grass and Forage Science*, 65, 185-199.
- Richter F., Fricke T., Wachendorf M. (2011): Influence of sward maturity and pre-conditioning temperature on the energy production from grass silage through the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB): 2. Properties of energy carriers and energy yield. *Bioresource Technology*, 102, 4866-4875.
- Römerman C., Tackenberg O., Poschlod P. (2005): Dispersibility Traits: Buoyancy, LEDA Data Standards Section 3.6.3, 124-127. URL (Stand 19.10.2005):

https://uol.de/fileadmin/user_upload/biologie/ag/landeco/download/LEDA/Standards/Leda-S3-6_dispersability_traits.pdf

- Schulze-Brüninghoff D., Hensgen F., Wachendorf M., Astor T. (2019): Methods for LiDAR-based estimation of extensive grassland biomass. *Computer and Electronics in Agriculture* 156, 693-699.
- Ter Heerd, G. N. J., Verweij, G. L., Bekker, R. M., & Bakker, J. P. (1996). An improved method for seed-bank analysis: seedling emergence after removing the soil by sieving. *Functional Ecology*, 10, 144–151.
- Volz, H. (2003) Ursachen und Auswirkungen der Ausbreitung von *Lupinus polyphyllus* Lindl. im Bergwiesenökosystem der Rhön und Maßnahmen zu seiner Regulierung. Doktorarbeit, JLU Gießen.
- Wachendorf M., Richter F., Fricke T., Graß R., Neff R. (2009): Utilisation of semi-natural grassland through an integrated generation of solid fuel and biogas from biomass I: Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on mass flows of organic and mineral plant compounds, and nutrient balances. *Grass and Forage Science*, 64/2, 132-143.
- Wallace, L., Hillman, S., Reinke, K., & Hally, B. (2017) Non-destructive estimation of above-ground surface and near-surface biomass using 3D terrestrial remote sensing techniques. *Methods in Ecology and Evolution* 8: 1607–1616.
- Wisskirchen, R., & Haeupler, H. (1998) *Standardliste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands mit Chromosomenatlas von Focke Albers*. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart (Hohenheim).
- With, K. A. (2002), The Landscape Ecology of Invasive Spread. *Conservation Biology*, 16: 1192-1203.