



Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde

Masterarbeit

Prüfung der Anbaueignung verschiedener Futterleguminosen
und Futterleguminosen-Gras-Gemenge für den Standort
Brandenburg unter dem Einfluss des Klimawandels

vorgelegt bei: Prof. Dr. Ralf Bloch
Prof. Dr. Inga Schleip

vorgelegt von: Amanda Birkmann
Matrikelnummer: 19212763
Studiengang: M. Sc. Öko-Agrarmanagement
Fachbereich Landschaftsnutzung und Naturschutz

Eberswalde, den 19.04.2022

Zusammenfassung

In einem Parzellenfeldversuch auf der Lehr- und Forschungsstation Gut Wilmersdorf der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde wurden im Jahr 2021 insgesamt fünf trocken-tolerante Futterleguminosenarten in Reinsaatbeständen und fünf Futterleguminosen(FLG)-Gras-Artengemenge auf ihre standortspezifischen Anbaueignung hin untersucht. Bei den betrachteten Arten handelt es sich um den Erdklee (*Trifolium subterraneum* L.), den Weißen Steinklee (*Melilotus albus* Medik.), den Gewöhnlichen Hornklee (*Lotus corniculatus* L.) sowie den Gelbklee (*Medicago lupulina* L.). Weiterhin wurde die Art Luzerne (*Medicago sativa* L.) mit der Sorte Luzelle und dem Sorten-Mix DSV 2060 aus den Sorten Planet, Fleetwood und Fraver in den Versuch miteinbezogen. Unter den FLG-Gras-Gemengen befanden sich die trocken-toleranten Gemenge DSV 2215, DSV M4 und das Camena Luzerne Gras 100 sowie die nicht trocken-toleranten Gemenge DSV M5 und DSV 2256. Zum Zweck der Untersuchung erfolgte im Verlauf der Vegetationsperiode in regelmäßigen Abständen eine Bonitur der Bestandsentwicklung der Frühjahrssaatens. Nach 119 Wachstumstagen wurden zudem Ertragsschnitte durchgeführt aus deren Schnittgut die Ertragsanteile der Leguminosen, Gräser und Kräuter sowie die Frisch- und Trockenmasseertragsleistung eines jeden Bestandes bestimmt wurden. Weiterhin fand die Berechnung der N₂-Fixierungsleistungen der Aufwüchse statt. Zur Ableitung der Anbaueignungen wurden im Zuge der Datenauswertung und Diskussion die FLG-Reinsaatens sowie die FLG-Gras-Gemenge jeweils untereinander hinsichtlich ihrer Etablierungs- und Ertragsleistung verglichen. Es erfolgte zudem ein Vergleich zwischen beiden Gruppen bezüglich der Etablierungs- und Trockenmasseertragsleistung.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es durch die Untersuchung trocken-resistenter Alternativen zu den etablierten Futterleguminosenarten Rotklee, Weißklee und Luzerne vor dem Hintergrund des Klimawandels zu einer Erhöhung der Resilienz von FLG-Anbausystemen im Land Brandenburg beizutragen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dabei einen Beitrag zur Identifizierung geeigneter Arten, Sorten und Gemenge für den Anbau unter den hiesigen Standortbedingungen leisten.

Unter den FLG-Reinsaatens zeigte der Weiße Steinklee die beste Etablierung und N₂-Fixierung. Der Erdklee erreichte die höchste Ausschöpfung des artspezifischen Trockenmasseertragspotenzials, während der Gewöhnliche Hornklee den höchsten absoluten Trockenmasseertrag erzielte. Hinsichtlich der prozentualen Verunkrautung zeigten sich zwischen den einzelnen Beständen der Reinsaatens auffällige Unterschiede, wohingegen die Verunkrautung aller Gemengeaufwüchse auf einem ähnlichen Niveau lag. Mit Ausnahme der Mischung DSV 2256 zeigten alle

Gemenge eine zufriedenstellende Etablierung am Versuchsstandort. Das Gemenge DSV M5 erbrachte zudem die höchste N₂-Fixierung sowie den höchsten TM-Ertrag, welcher sich nur unwesentlich von dem des Camena Luzerne Gras 100 unterschied. Die höchsten Anbaueignungen für den Standort Brandenburg unter dem Einfluss des Klimawandels konnten im Rahmen der Untersuchung für den Weißen Steinklee und das Gemenge DSV M5 herausgestellt werden. Mit vereinzelt Einschränkungen konnte eine gute Anbaueignung auch für den Großteil der restlichen Arten bzw. Sorten und Gemenge dokumentiert werden. Eine Ausnahme bildet dabei lediglich die Mischung DSV 2256.

Im Vergleich der FLG-Reinsaaten und FLG-Gras-Gemenge konnte bezüglich des Trockenmasseertrages kein Unterschied festgestellt werden. Jedoch zeigten die Gemenge eine signifikant geringere Verunkrautung. Dies weist auf eine effizientere Ressourcennutzung aufgrund der Kombination komplementärer Arteigenschaften hin, die insbesondere unter ungünstigen Umweltbedingungen einen Anbauvorteil für Gemenge im Vergleich zu FLG-Reinsaaten bedeuten kann.

Die durchschnittlichen Trockenmasse-Hektarerträge für FLG- und FLG-Gras-Bestände in Brandenburg konnten von keinem Aufwuchs im Versuch erreicht werden.

Summary

In 2021, in a plot field trial at the Gut Wilmersdorf Teaching and Research Station of the Eberswalde University for Sustainable Development, a total of five drought-tolerant forage legume species in pure stands and five forage legume-grass mixtures were studied regarding their site-specific suitability for cultivation. The species observed include subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.), white sweet clover (*Melilotus albus* Medik.), birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) and Black medic (*Medicago lupulina* L.). Furthermore, the species alfalfa (*Medicago sativa* L.) was included in the trial with the cultivar Luzelle and the cultivar mix DSV 2060 consisting of the cultivars Planet, Fleetwood and Fraver. Forage legume-grass-mixtures included the drought-tolerant mixtures DSV 2215, DSV M4 and Camena alfalfa grass 100, as well as the non-drought-tolerant mixtures DSV M5 and DSV 2256.

For the purpose of the study, an assessment of the stand development of the spring sowings was carried out at regular intervals during the growing season. Moreover, yield cuts were made after 119 growing days, the cuttings of which were used to determine the yield percentages of legumes, grasses and herbs, as well as the fresh and the dry matter yield performance of each stand. Furthermore, the calculation of the N₂-fixation performances of the growths was carried out. To derive the suitability for cultivation, the forage legume pure seeds and the forage legume-grass mixtures were compared with each other regarding their establishment and yield performance during data evaluation and discussion. Furthermore, the two groups were compared in terms of establishment and dry matter yield performance.

The aim of the present work was to contribute to an increase in the resilience of forage legume cropping systems in the federal state of Brandenburg by investigating drought-resistant alternatives to the established forage legume species red clover, white clover and alfalfa against the background of climate change. In doing so, the information gained should contribute to the identification of suitable species, cultivars and mixtures for cultivation under the local conditions.

Among the forage legume pure seeds, white sweet clover showed the best establishment and N₂-fixation. Subterranean clover achieved the highest utilization of the species-specific dry matter yield potential, while birdsfoot trefoil achieved the highest absolute dry matter yields. With regard to weed percentage, there were noteworthy differences between the individual stands of pure seed, whereas the weed percentage of all mixed growths was at a similar level. Except of mixture DSV 2256, all mixtures showed satisfactory establishment at the trial site.

The mixture DSV M5 also produced the highest N₂-fixation as well as the highest dry matter yield, the latter differing only insignificantly from that of the Camena alfalfa grass 100. The results of the study showed the highest cultivation suitability for the Brandenburg location under the influence of climate change for white sweet clover and the mixture DSV M5. With minor restrictions, a good suitability for cultivation could also be documented for most of the remaining species, cultivars and mixtures, with the only exception being the mixture DSV 2256.

Comparing forage legume pure stands and forage legume-grass mixtures, no difference was found in terms of dry matter yield. However, the mixtures showed significantly lower weed percentages. This indicates a more efficient use of resources due to the combination of complementary species characteristics, which suggest a cultivation advantage for mixtures compared to forage legume pure stands, especially under unfavorable environmental conditions.

The average dry matter yields per hectare for forage legumes and forage legume-grass stands in the federal state of Brandenburg could not be reached by any growth in the trial.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ackerbaulich relevante Eigenschaften der Bodentypen in Brandenburg.	6
Tabelle 2: Potenzielle Anbaueignung verschiedener Futterleguminosen für den Standort Brandenburg unter dem Einfluss des Klimawandels.	41
Tabelle 3: Einordnung der Monitoring-Punkte auf Feldblock 2 in Bodengruppen, ihre bodenchemischen Parameterwerten sowie Zuordnung der Gehaltsklassen.	46
Tabelle 4: Zusammenfassung des statistischen Vorgehens in den Gruppenvergleichen.	54
Tabelle 5: Stichprobenumfang der Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge sowie Median, arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Variationskoeffizient für das Prüfmerkmal des Kulturdeckungsgrades [%] am 17.08.2021.	60
Tabelle 6: Testergebnis des Medianvergleiches für das Prüfmerkmal des Kulturdeckungsgrades [%] am 17.08.2021 zwischen den Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge.	60
Tabelle 7: Entwicklungsstadien der Futterleguminosen-Reinsaatbestände zu den vier Boniturterminen.	61
Tabelle 8: Entwicklungsstadien der Gemengepartner der Futterleguminosen-Gras-Gemenge zu den vier Boniturterminen.	62
Tabelle 9: Gesamtfrischmasse [dt ha ⁻¹], Frisch- und Trockenmasseertrag [dt ha ⁻¹] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände und deren Mittelwerte, Trockensubstanz [%] der Futterleguminosenkomponente des Schnittguts sowie Mittelwert [dt ha ⁻¹], Standardabweichung [dt ha ⁻¹] und Variationskoeffizient [%] der Trockenmasseerträge einer Art bzw. Sorte.	64
Tabelle 10: Gesamtfrischmasse [dt ha ⁻¹], Frisch- und Trockenmasseertrag [dt ha ⁻¹] der Futterleguminosen-Gras-Bestände und deren Mittelwerte, Trockensubstanz [%] der Futterleguminosen-Gras-Komponente des Schnittguts sowie Mittelwert [dt ha ⁻¹], Standardabweichung [dt ha ⁻¹] und Variationskoeffizient [%] der Trockenmasseerträge eines Gemenges.	65
Tabelle 11: Testergebnis des Mittelwertvergleiches für das Prüfmerkmal des Trockenmasseertrages [dt ha ⁻¹] zwischen den Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge.	66
Tabelle 12: Stichprobenumfang der Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge sowie arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Variationskoeffizient für das Prüfmerkmal der Verunkrautung [%].	69
Tabelle 13: Testergebnis des Mittelwertvergleiches für das Prüfmerkmal der Verunkrautung [%] zwischen den Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge.	69
Tabelle 14: Berechnete N ₂ -Bindung der Futterleguminosen-Reinsaatbestände, relevante Größen zur Berechnung sowie die zur Berechnung verwendeten Formeln.	71

Tabelle 15: Berechnete N₂-Bindung der Futterleguminosen-Gras-Bestände, relevante Größen zur Berechnung sowie die zur Berechnung verwendeten Formeln. 72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Anbaufläche von Futter- und Körnerleguminosen sowie Silomais auf Ackerstandorten der BRD von 1950 bis 2021	16
Abbildung 2: Skizze der Versuchsanlage und Anordnung der Prüffaktorstufen in den Blocks.....	44
Abbildung 3: Standorte zur Bestimmung des Bodentyps und Monitoring-Punkte auf Feldblock 2 der LFS Gut Wilmersdorf.	45
Abbildung 4: Niederschlags- und Temperaturwerte am Versuchsstandort (Wetterstation Angermünde) im Jahr 2021 sowie im langjährigen Mittel der Jahre 1981 – 2010.	46
Abbildung 5: Braune Knospen der Luzelle zum Erntetermin.....	47
Abbildung 6: Mittlere Aufwuchshöhen [cm] der Bestände zu den vier Boniturterminen.....	55
Abbildung 7: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Futterleguminosen an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände zum ersten Boniturtermin am 06.07.2021.	56
Abbildung 8: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Futterleguminosen an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände zum vierten Boniturtermin am 17.08.2021.	57
Abbildung 9: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Kulturarten an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Gras-Gemeengebestände zum ersten Boniturtermin am 06.07.2021.	58
Abbildung 10: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Kulturarten an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Gras-Gemeengebestände zum vierten Boniturtermin am 17.08.2021.	59
Abbildung 11: Erfasste Beikräuter und -gräser in den Aufwüchsen der Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemeenge sowie die Anzahl ihrer Nennungen im Verlauf des Boniturzeitraumes.	63
Abbildung 12: Trockenmasseertragsanteile [%] der Futterleguminosen, Gräser und Kräuter an der Gesamt-Trockenmasse [dt ha ⁻¹] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände.	67
Abbildung 13: Trockenmasseertragsanteile [%] der Futterleguminosen, Gräser und Kräuter an der Gesamt-Trockenmasse [dt ha ⁻¹] der Futterleguminosen-Gras-Gemeengebestände.	68
Abbildung 14: Trockenmasseertrag [dt ha ⁻¹] der Bestände in Abhängigkeit vom Futterleguminosen-Ertragsanteil [%].	70

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Arten- bzw. Sortenzusammensetzung der Prüffaktorstufen, Aussaatstärke sowie Eigenschaften des Saatguts nach Hersteller*innenangaben.	108
Anhang 2: Signifikante Unterschiede zwischen den Aufwuchshöhen der Prüfglieder zum vierten Boniturtermin (Paarweise Vergleiche, $\alpha = 0,05$).	109
Anhang 3: Daten zur N ₂ -Fixierleistung der Futterleguminosen-Reinsaatbestände und Abgleich dieser mit ausgewählten Literaturwerten.	109
Anhang 4: Trockenmasseertragsdaten der Futterleguminosen-Reinsaatbestände und Abgleich dieser mit ausgewählten Literaturwerten.	110

Abkürzungsverzeichnis

BG	Bodenartengruppe
BHK	Bockshornklee
BSA	Bundessortenamt
DWD	Deutscher Wetterdienst
EA	Ertragsanteil
FLG	Futterleguminosen
FM	Frischmasse
GDG	Gesamtdeckungsgrad
GHK	Gewöhnlicher Hornklee
HNEE	Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
HNJ	Hauptnutzungsjahr
K	Kelvin
KAK	Kationenaustauschkapazität
KDG	Kulturdeckungsgrad
KLG	Körnerleguminosen
LBGR	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
LF	landwirtschaftlich genutzte Fläche
LFS	Lehr- und Forschungsstation
MO	Monitoring-Punkte
N	Stickstoff
N _t	Gesamt-Stickstoff
N ₂	molekularer Luftstickstoff
OA	osmotische Anpassung
ÖVF	ökologische Vorrangfläche
RCP	representive concentration pathway (repräsentativer Konzentrationspfad)
ROS	reactive oxygen species (Reaktive Sauerstoffspezies)
SBA	Statistisches Bundesamt
TM	Trockenmasse
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VK	Variationskoeffizient
WSK	Weißer Steinklee
WUE	Water Use Efficiency (Wassernutzungseffizienz)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Summary	III
Tabellenverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Anhangsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielstellung	3
2 Stand des Wissens	5
2.1 Standort Brandenburg	5
2.1.1 Pedologische Bedingungen	5
2.1.2 Klimatische Bedingungen und Klimaprojektionen	7
2.1.3 Schlussfolgerungen Standorteigenschaften.....	9
2.2 Anbaubedeutung der Futterleguminosen	11
2.2.1 Gemengeanbau	14
2.3 Anbausituation der Futterleguminosen in Deutschland und Brandenburg.....	15
2.3.1 Rotklee <i>Trifolium pratense</i> L.	18
2.3.2 Luzerne <i>Medicago sativa</i> L.....	19
2.3.3 Weißklee <i>Trifolium repens</i> L.....	21
2.3.4 Perserklee <i>Trifolium resupinatum</i> L.	22
2.3.5 Alexandrinerklee <i>Trifolium alexandrinum</i> L.....	23
2.3.6 Schwedenklee <i>Trifolium hybridum</i> L.....	24
2.3.7 Inkarnatklee <i>Trifolium incarnatum</i> L.....	25
2.4 Charakterisierung alternativer Futterleguminosen	26
2.4.1 Gewöhnlicher Hornklee <i>Lotus corniculatus</i> L.....	27
2.4.2 Gelbklee <i>Medicago lupulina</i> L.	30
2.4.3 Bockshornklee <i>Trigonella foenum-graecum</i> L.....	32
2.4.4 Weißer Steinklee <i>Melilotus albus</i> Medik.	34
2.4.5 Erdklee <i>Trifolium subterraneum</i> L.....	37
2.4.6 Serradella <i>Ornithopus sativus</i> Brot.	39
2.5 Potenzielle Anbaueignung verschiedener Futterleguminosen	40
3 Material und Methoden	42

3.1	Operationalisierung der Forschungsfrage.....	42
3.2	Auswahl der Futterleguminosen.....	42
3.3	Versuchsaufbau.....	43
3.4	Versuchsstandort und Witterung.....	44
3.5	Versuchsdurchführung.....	48
3.6	Datenerhebung im Feld.....	49
3.7	Datenerhebung im Labor	50
3.8	Berechnung der N ₂ -Fixierleistung	52
3.9	Auswertung und Darstellung der Daten	52
4	Ergebnisse.....	55
4.1	Aufwuchshöhe	55
4.2	Bodendeckung.....	56
4.3	Bestandsentwicklung	60
4.4	Rhizobienbesatz und -aktivität.....	62
4.5	Arten der Segetalflora	63
4.6	Frisch- und Trockenmasseertrag.....	64
4.7	Ertragsanteile im Schnittgut.....	67
4.8	N _t -Gehalt und N ₂ -Fixierleistung.....	70
5	Diskussion.....	73
5.1	Futterleguminosen-Reinsaaten.....	73
5.2	Futterleguminosen-Gras-Gemenge	82
5.3	Vergleich zwischen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge	87
5.4	Methodendiskussion.....	90
6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	92
7	Literaturverzeichnis.....	94
8	Anhang	108
	Eidesstattliche Erklärung	111

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Leguminosenanbau gilt als das Fundament der ökologischen Landwirtschaft (Leithold et al. 2017). Insbesondere der mehrjährige Anbau von kleinkörnigen Futterleguminosen birgt eine Reihe von Vorteilen und erfüllt in Anbausystemen eine Vielzahl wichtiger Funktionen (Annicchiarico et al. 2015). Zu diesen zählen neben der Reduzierung des Beikrautdrucks auf der Ackerfläche (Spiegel et al. 2014) und der Eindämmung der Vermehrung fruchtartenassoziiierter Pathogene (Böhm et al. 2020) die Verbesserung der Bodenstruktur durch eine tiefreichende und intensive Durchwurzelung (Sheaffer et al. 2018) sowie die Reproduktion der organischen Bodensubstanz (Urbatzka und Beck 2015). Ferner stellen Futterleguminosen auf viehhaltenden Betrieben ein hochwertiges Futtermittel (Sheaffer et al. 2018) und eine wichtige Proteinquelle dar (Phelan et al. 2015). Der wohl bedeutendste Mehrwert des Anbaus von Futterleguminosen liegt jedoch in ihrer Fähigkeit zur Stickstofffixierung. Durch eine Symbiose mit den sogenannten Knöllchenbakterien ist es den Arten der Pflanzenfamilie der Fabaceae möglich, elementaren Luftstickstoff in reduzierter Form, als Ammonium, zu binden (Zehner und Göttfert 2015; Wippel et al. 2019) und ihn damit für eine pflanzliche Nutzung und Ertragsbildung verfügbar zu machen. Da eine Anwendung leichtlöslicher mineralischer Stickstoffdünger nach Europäischen Richtlinien (Europäisches Parlament 2018) auf ökologisch bewirtschafteten Acker- und Grünlandflächen nicht zulässig ist, fungiert der Futterleguminosenanbau hier als zentrales Element zur Stickstoffversorgung (Leithold et al. 2017). Die Arten mit der aktuell größten Anbaubedeutung sind dabei der Weißklee (*Trifolium repens* L.) im Grünland (Komainda et al. 2019), sowie der Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und die Luzerne (*Medicago sativa* L.) im Feldfutterbau (BSA 2020). Diese Arten zeichnen sich durch hohe Futter- und Nährwerte aus und erzielen unter optimalen Anbaubedingungen die höchsten Erträge unter den Futterleguminosen (Freyer et al. 2005). Angesichts der voranschreitenden Klimakrise und den sich verstärkenden Auswirkungen dieser auf den Ackerbau und die Grünlandbewirtschaftung (Schimmelpfennig et al. 2018) wird zukünftig jedoch insbesondere die Performance der Kulturarten unter ungünstigen Bedingungen, wie einer unzureichenden Wasserversorgung in der Vegetationsperiode, immer relevanter werden. Leguminosen gelten im Allgemeinen als trockenstressempfindlich (Nadeem et al. 2019). Tritt ein Wassermangel bereits während der Ansaat auf, kann eine verminderte Keimungsrate (McWilliam et al. 1970) die ohnehin herausfordernde Etablierung der Bestände weiter erschweren. Eine reduzierte stomatäre Leitfähigkeit, fotosynthetische Aktivität (Bell et al. 2007) und Nährstoffaufnahme führen zu empfindlichen Ertragsverlusten (Nadeem et al. 2019). Durch eine eingeschränkte Nodulation der Wurzeln sowie ein vermindertes Wachstum und eine reduzierte

Aktivität der Rhizobien wird die symbiotische Stickstofffixierung begrenzt (Lipiec et al. 2013; Bargaz et al. 2015), was den Rückgang der Ertragsbildung weiterhin verstärkt. In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zu anderen Futterleguminosen insbesondere Rot- und Weißklee hohe Ertragsverluste unter restriktiven Bodenfeuchtigkeitsbedingungen verzeichnen (Peterson et al. 1992; Komainda et al. 2019; Staniak 2019) und folglich eine geringe Trockentoleranz aufweisen. Die Luzerne zeigt sich aufgrund ihres tiefreichenden Wurzelsystems, welches sie zur Wasseraufnahme aus tieferen Bodenschichten befähigt, zwar als sehr trocken-tolerant. Dabei kann ihr hoher und ineffizienter Wasserverbrauch auf Standorten mit einem geringen Wasserdargebot jedoch einen Wassermangel für die Folgekulturen bedingen (Kolbe et al. 2006), was ihre Anbaueignung auf entsprechenden Standorten begrenzt. In Bezug auf die vorab beschriebene Bedeutung eines ertragreichen Futterleguminosenanbaus in der ökologischen Landwirtschaft wird an dieser Stelle die Notwendigkeit einer Adaption dürregefährdeter Anbausysteme ersichtlich. Insbesondere für das Land Brandenburg wird eine solche Anpassung von Bedeutung sein, da es einerseits durch einen hohen Anteil an ökologischer Anbaufläche von 14,4 % (im Jahr 2020) geprägt ist (BLE 2022) und andererseits der Klimakrise aufgrund seiner klimatisch-geologischen Gegebenheiten mit einer gesteigerten Vulnerabilität gegenübersteht (Zebisch et al. 2005). So gehört Brandenburg mit einer jährlichen Niederschlagsmenge von 554 mm im langjährigen Mittel (1971 – 2000) (DWD 2019) zu den niederschlagsärmsten Regionen in Deutschland. Obwohl laut Deutschem Wetterdienst (2019) die aktuellen Klimaprojektionen einen leichten Anstieg der brandenburgischen Jahres- und Frühjahrsniederschläge bis ins Jahr 2100 beschreiben und auch von den bislang projizierten starken Niederschlagsrückgängen im Sommer Abstand nehmen, weisen Gömann et al. (2015) auf die beobachtete zunehmende Häufigkeit von trockenen Vorsommern in der Region hin. Zusätzlich wird für das Land eine Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur um bis zu 1,5 K bis 2050 erwartet (DWD 2019), was einen Anstieg der Evapotranspiration zur Folge haben (Seneviratne et al. 2010) und die bereits heute ungünstige klimatische Wasserbilanz weiter reduzieren wird (Zebisch et al. 2005). In Hinblick auf die beschriebene geringe Trockentoleranz beziehungsweise ungünstige Wassernutzungseffizienz der im Anbau bislang dominierenden Arten, verdeutlichen diese zu erwarteten Folgen der Klimakrise den Handlungsbedarf in Brandenburg. Eine Anpassung insbesondere der ökologischen Anbausysteme für Futterleguminosen ist notwendig, um einer steigenden Ertragsvariabilität und Ertragsverlusten (Schimmelpfennig et al. 2018) vorzubeugen. Dabei stellen die Erprobung und Bereitstellung leistungsfähiger und an die neuen Bedingungen angepasster Arten und Sorten eine wichtige Anpassungsstrategie dar (Achilles et al. 2009; Titze 2015; Schimmelpfennig et al. 2018).

1.2 Zielstellung

Hinsichtlich der dargestellten Situation ist es Ziel der vorliegenden Arbeit, einen Beitrag zur Klimawandelanpassung des (ökologischen) Futterleguminosenanbaus in Brandenburg zu leisten. Vor dem Hintergrund der geringen Trockentoleranz des Weiß- und des Rotkleees einerseits und der ungünstigen Wassernutzungseffizienz der Luzerne andererseits soll die Arbeit der Betrachtung und Beurteilung alternativer Futterleguminosen und Futterleguminosen-Gras-Gemenge bezüglich ihrer Anbaueignung für den Standort Brandenburg unter dem Einfluss des Klimawandels dienen. Die Ergebnisse der Arbeit und daraus resultierende Erkenntnisse sollen helfen, geeignete Arten, Sorten und Futterleguminosen-Gras-Artengemenge für den Anbau auf leichten und trockenen Standorten zu identifizieren. Hierdurch soll die Klimawandelanpassung der Anbausysteme in der klimasensitiven Region Brandenburg vorangetrieben werden. Auf diese Weise soll eine langfristige Stabilisierung der Futterleguminosenerträge bewirkt werden, um die mit dem Anbau verbundenen Funktionen, insbesondere in der ökologischen Landwirtschaft, auch zukünftig gewährleisten zu können. In diesem Kontext stellen der betrachtete Anbauversuch und dessen Auswertung den Beginn einer Versuchsserie dar, für welche sie in Bezug auf das Design und die Durchführung eine richtungsweisende Grundlage bieten sollen. Die Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit lautet:

Welche Futterleguminosenarten bzw. -sorten und Futterleguminosen-Gras-Artengemenge sind unter dem Einfluss des Klimawandels auch zukünftig für einen Anbau in Brandenburg geeignet?

Im Feldversuch auf der Lehr- und Forschungsstation Gut Wilmersdorf werden folgende Forschungshypothesen betrachtet:

I. Futterleguminosen-Reinsaaten

- A *Die Art mit der höchsten potenziellen Anbaueignung, der Erdklee, lässt sich am besten etablieren und weist daher einen höheren Kulturdeckungsgrad [%] sowie eine geringere Verunkrautung [%] auf als der Gewöhnliche Hornklee, der Gelbklee, der Weiße Steinklee, die Luzernesorten und der Bockshornklee.*
- B *Die Art mit der höchsten potenziellen Anbaueignung, der Erdklee, zeigt hinsichtlich des Trockenmasseertrages [dt ha^{-1}] und der N_2 -Fixierleistung [kg ha^{-1}] eine höhere Ausschöpfung des artspezifischen Ertragspotenzials als der Gewöhnliche Hornklee, der Gelbklee, der Weiße Steinklee, die Luzernesorten und der Bockshornklee.*

II. Futterleguminosen-Gras-Gemenge

- C *Die Gemenge mit einer besseren potenziellen Anbaueignung, DSV M4, DSV 2215 und Camena Luzerne Gras 100, lassen sich besser etablieren und weisen daher einen höheren Kulturdeckungsgrad [%] und eine geringere Verunkrautung [%] auf als die Gemenge DSV M5 und DSV 2256.*
- D *Die Gemenge mit einer besseren potenziellen Anbaueignung, DSV M4, DSV 2215 und Camena Luzerne Gras 100, erbringen höhere Trockenmasseerträge [dt ha⁻¹], weisen einen höheren Leguminosen-Ertragsanteil [%] sowie eine höhere N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹] auf als die Gemenge DSV M5 und DSV 2256.*

III. Vergleich der Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge

- E *Die Futterleguminosen-Gras-Gemenge lassen sich besser etablieren und weisen daher einen höheren Kulturdeckungsgrad [%] und eine geringere Verunkrautung [%] auf als die Futterleguminosen-Reinsaaten.*
- F *Die Futterleguminosen-Gras-Gemenge erbringen unter den brandenburgischen Standortbedingungen einen höheren Trockenmasseertrag [dt ha⁻¹] als die Futterleguminosen-Reinsaaten.*

Im zweiten Kapitel der Arbeit *Stand des Wissens* wird eine Charakterisierung des Pflanzenstandortes Brandenburg vorgenommen, es werden die Anbaubedeutung sowie die hiesige Anbausituation der Futterleguminosen beleuchtet, bevor eine Reihe verschiedener Futterleguminosenarten vorgestellt wird. Im Abschnitt *Material und Methoden* werden der betrachtete Parzellenfeldversuch beschrieben sowie die Datenaufnahme und -auswertung erläutert. Im vierten Kapitel *Ergebnisse* werden die Versuchsergebnisse kondensiert dargestellt, bevor diese im fünften Abschnitt der Arbeit *Diskussion* vor dem Hintergrund der Forschungsfrage besprochen werden. Abschließend werden praxisrelevante *Schlussfolgerungen* abgeleitet und ein *Ausblick* für die Weiterführung des Versuches gegeben.

2 Stand des Wissens

2.1 Standort Brandenburg

Die Eignung einer landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Anbau unterschiedlicher Kulturarten ist abhängig von ihren Standorteigenschaften. So stehen die sich wechselseitig beeinflussenden pedologischen und klimatischen Bedingungen eines Standortes den Standortansprüchen einer Kulturart gegenüber und können sich, je nach Kompatibilität, positiv oder negativ auf deren Wachstum und die Ertragsbildung auswirken. Hinsichtlich der Ziel- und Fragestellung der vorliegenden Arbeit werden folgend die pedologischen und klimatischen Gegebenheiten Brandenburgs erläutert, um diese anschließend mit den Standortansprüchen ausgewählter Futterleguminosen (FLG) abgleichen zu können.

2.1.1 Pedologische Bedingungen

Aus landwirtschaftlicher Perspektive fungiert der Boden, welcher als oberster belebter Teil der Erdkruste definiert werden kann, als Wuchs- und Standort für Pflanzen (Fiedler 2001; Diepenbrock et al. 2016). Über die sich im Boden entwickelnden Wurzelsysteme ist es der Vegetation möglich, pflanzenverfügbares Wasser, Nährstoffe und Sauerstoff aus dem Bodenraum aufzunehmen (Helal 1991). Die mit dem Wurzelwachstum einhergehende Verankerung im Boden befähigt die Pflanzen zudem zur Nutzung der Sonnenenergie und des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids für die Photosynthese, wodurch schließlich die Biomassebildung realisiert wird (Diepenbrock et al. 2016). Die Fähigkeit eines Bodens diese Funktionen als Pflanzenstandort zu erfüllen, ist dabei abhängig von seinen physikalischen (z.B. Gründigkeit, Wasserspeicherfähigkeit), chemischen (z.B. Bodenreaktion, KAK) sowie biologischen (z.B. Bodenleben) Eigenschaften. Diese Eigenschaften, die zwischen verschiedenen Bodentypen variieren und entweder weitgehend stabil (Korngrößenverteilung des Bodens) oder durch Bodenbearbeitungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen (Anhebung des pH-Wertes durch Kalkung) veränderbar sein können, bestimmen die Fruchtbarkeit des Bodens (Fiedler 2001). Das Land Brandenburg ist durch eine Vielfalt an Bodentypen und eine groß- sowie kleinräumige Heterogenität an Bodeneigenschaften charakterisiert, was u.a. auf die glaziale Prägung der Landschafts- und Bodengese des Landes zurückzuführen ist. Während der Elster-, Saale- und Weichsel-Kaltzeit ist das im norddeutschen Tiefland gelegene Bundesland wiederholt von Eismassen bedeckt worden (MLUK 2020). Im Zuge der Gletscherbewegungen und verschiedener Materialverlagerungsprozesse bildete sich zum einen ein *vielgestaltiges Relief* aus Grundmoränen, Eisrandlagen, Niederungen und Urstromtälern heraus (Lutze 2014; MLUK 2020). Zum anderen hinterließen die Eismassen nach dem Abschmelzen deckschichtartig unterschiedliche Lockersedimente auf der Erdoberfläche, die später

als *vielfältige Ausgangssubstrate* der Bodenbildung dienen (Dalchow 2005; Stahr 2018). Zudem bedingte eine unterschiedlich lange Vereisung der brandenburgischen Regionen (Lutze 2014) eine *uneinheitliche Verwitterungsdauer* für die entstandenen Böden. In der Genese der brandenburgischen Bodengesellschaften können diese drei Aspekte als heterogenitätsfördernde Faktoren betrachtet werden, aufgrund derer heute sowohl fruchtbare bis sehr fruchtbare als auch für den Ackerbau wenig prädestinierte Böden in BRB zu finden sind. Ein Teil der vor allem landwirtschaftlich genutzten Bodentypen und eine Auswahl ihrer ackerbaulich relevanten Eigenschaften sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Tabelle 1: Ackerbaulich relevante Eigenschaften der Bodentypen in Brandenburg.

Bodentyp	Bodenart	Gründigkeit*	Wasserhaltefähigkeit	Pufferkapazität / Bodenreaktion	Nährstoffhaushalt
Auengley	Lehm oder Ton über Sand (Oderbruch)	k. A.	hoch; Neigung zur Staunässe	hohe Pufferkapazität	hoher Nährstoffvorrat, mittlere Verfügbarkeit
Bänderfahlerde	Sand	tiefgründig	erhöht (durch Tonbänder)	geringe Pufferkapazität (geringer Kalkgehalt)	geringer Nährstoffvorrat
Braunerde	Sand	tiefgründig	gering	saure Bodenreaktion, da kalkfreies Ausgangsgestein	geringer Nährstoffvorrat
Braunerde-Fahlerde	Sand über Lehm	k. A.	hoch (im Unterboden), wasserstauend durch Tonhorizont	geringe Pufferkapazität, natürliche Versauerung des Oberbodens	hohe Nährstoffspeicherungsfähigkeit des Unterbodens
Gley	Sand	k. A.	gering	geringe Pufferkapazität; natürliche Versauerung	geringer Nährstoffvorrat
Kolluvisol	Lehm	tiefgründig	hoch	hohe Pufferkapazität	hohes Nährstoffspeichervermögen
Lessivés aus Sandlöss	stark sandiger Lößlehm	sehr tiefgründig	hoch	k. A.	hoher Nährstoffvorrat, hohe Verfügbarkeit
Parabraunerde	Lehm	tiefgründig	hoch	hohe Pufferkapazität; kalkhaltig	hoher Nährstoffvorrat, gute Verfügbarkeit
Parabraunerde-Tschernosem	Lehm	tiefgründig	hoch	hohe Pufferkapazität	hoher Nährstoffvorrat
Pararendzina	Lehm	flachgründig	gering	leicht basische Bodenreaktion (kalkhaltig)	hoher Nährstoffvorrat, geringe Verfügbarkeit
Podsol-Braunerde	Sand	k. A.	gering	saure Bodenreaktion	geringe Nährstoffspeicherungsfähigkeit

* durchwurzelte Tiefe der Böden: > 60 cm – tiefgründig; 60-30 cm – mittelgründig; 30-15 cm – flachgründig; > 15 cm – sehr flachgründig (Fiedler, 2001)

Bodentypen mit weiträumiger Verbreitung in Brandenburg

Alle Angaben der Zusammenstellung wurden der 3. Auflage der Sammelmappe *Steckbriefe Brandenburger Böden* (MLUK 2020) entnommen und beziehen sich daher auf die hiesige Ausprägung der einzelnen Bodentypen. Die landwirtschaftliche Nutzfläche des Landes Brandenburg ist insbesondere durch leichte Böden charakterisiert (Bachinger 2002; Drastig et al. 2010). So stellt nach VDLUFA-Einteilung Sand (S; Bodenartengruppe (BG) 1) bzw. schwach lehmiger Sand (I'S; BG 2) in weiten Teilen des Landes die Hauptbodenart im Oberboden dar (LBGR 2022). **Tabelle 1** zeigt, dass Bodentypen aus Sand, wie die *Bänderfahlerde*, der *Gley* und die *Podsol-Braunerde*, durch eine mittlere bis geringe Wasserspeicherungsfähigkeit und geringe Nährstoffvorräte

charakterisiert sind. Grund dafür ist ein erhöhter Anteil von Grobporen in der Bodenstruktur, in denen das Wasser aufgrund einer zu geringen Saugspannung nicht gehalten werden kann und folglich versickert (Drastig et al. 2010). Zudem verfügen Sandkörner aufgrund ihrer Neutralität über eine nur geringe Kationenaustauschkapazität (KAK), weshalb Sandböden zumeist begrenzte Nährstoffvorräte aufweisen. Weiterhin haben Böden der BG 1 und 2 grundsätzlich einen niedrigeren optimalen pH-Wert als ton- und schluffreichere Böden (von Wulffen et al. 2008). So liegen nach Ergebnissen einer Untersuchung von Zimmer und Ellmer (2012), in der Bodenproben von etwa 42 % der brandenburgischen Äcker auf ihre Nährstoff- und Kalkversorgung hin ausgewertet wurden, die durchschnittlichen pH-Werte dieser BG in BRB bei 5,6 (BG 1) bzw. 5,9 (BG 2) und damit im Bereich der optimalen Kalkversorgung (von Wulffen et al. 2008). Mittlere und schwere Böden der BG 3 bis 5 sollten hingegen pH-Werte zwischen 6,1 und 7,2 zeigen (von Wulffen et al. 2008). Neben den leichten Sandböden haben sich in Brandenburg auch mittlere Böden der BG 3 und Böden aus Lehm der BG 4 und 5 entwickelt, die u.a. den Bodentypen *Parabraunerde*, *Pararendzina*, *Lessivés aus Sandlöss* und *Auengley* zuzuordnen sind (MLUK 2020). Aufgrund höherer Ton- und Schluffanteile in der Textur unterscheiden sich diese in ihren Eigenschaften von den Sandböden. So weisen sie, wie bereits beschrieben, höhere optimale pH-Werte auf (von Wulffen et al. 2008). Im Durchschnitt liegt die Bodenreaktion der mittleren und schweren Böden in BRB jedoch, mit einer Tendenz zur Kalkunterversorgung, nur noch knapp im optimalen Bereich und zeigt für alle drei Bodenartengruppen mittlere Werte von unter 6,5 (Zimmer und Ellmer 2012). Weiterhin sind die genannten Bodentypen, mit Ausnahme der Pararendzina, die aufgrund ihrer Flachgründigkeit herausfällt, durch ein gutes Wasserhaltevermögen gekennzeichnet. Grund hierfür ist auf ein erhöhter Anteil an Fein- und Mittelporen in der Bodenstruktur. Aus der Fähigkeit tonreicherer Böden Ton-Humus-Komplexe mit einer hohen KAK zu bilden, resultieren neben der hohen Wasserhaltefähigkeit zudem eine gute Pufferkapazität sowie ein hohes Nährstoffspeichervermögen.

2.1.2 Klimatische Bedingungen und Klimaprojektionen

Das Land Brandenburg liegt innerhalb der gemäßigten Breiten im Wirkungsbereich des Kontinentalklimas, welches durch trockene Sommer und kalte Winter geprägt ist. Im Westen des Landes zeigt sich durch feuchte und kühle Sommer sowie mildere Winter zudem ein maritimer Klimaeinfluss, der nach Osten hin abfällt (Drastig et al. 2010). Innerhalb Deutschlands stellt Brandenburg eines der niederschlagsärmsten Gebiete dar. Im langjährigen Mittel der Jahre 1971 - 2000 liegt die Jahresniederschlagsmenge hier bei lediglich 554 mm, wobei teilweise große Schwankungen zwischen den einzelnen Jahren und den verschiedenen Regionen zu verzeichnen sind (DWD 2019). So fallen die mittleren Jahresniederschlagssummen (1961 – 1990), mit

weniger als 500 mm, im Nordosten des Landes sowie im Oderbruch besonders gering aus. Die Differenz zu den niederschlagsreicheren Regionen, dem Norden der Prignitz und der Elsterniederung, beträgt dabei bis zu 250 mm (DWD 2019). Im linearen Trend seit 1881 ist eine Zunahme des mittleren Jahresniederschlags in BRB um 14,3 mm bis in das Jahr 2021 zu erkennen (DWD o. J.e). Die zeitliche Verteilung der Niederschläge im Jahreslauf ist in Brandenburg durch eine regelmäßig auftretende Vorsommertrockenheit (Bachinger 2002; Schultz-Sternberg et al. 2012; Gömann et al. 2015) und niederschlagsreichere Sommer- als Winterhalbjahre (DWD 2019) gekennzeichnet. Wie für weite Teile Ostdeutschlands typisch (Zebisch et al. 2005), liegt die jährliche Niederschlagsmenge auch in Brandenburg großräumig unterhalb des Niveaus der potenziellen Verdunstung (Grünewald 2010). Die überwiegende Landesfläche ist daher im langjährigen Mittel (1961 – 1990), durch negative klimatische Wasserbilanzen gekennzeichnet (DWD o. J.d), die sich negativ auf das Wasserdargebot der Standorte auswirken können. Der vieljährige Mittelwert (1981 – 2010) der Lufttemperatur liegt in Berlin/Brandenburg bei 9,3 °C und damit 0,4 K über dem bundesweiten Durchschnitt. Der vom Jahr 1881 ausgehende lineare Trend der mittleren Jahrestemperatur, zeigt bis ins Jahr 2021 einen Anstieg um 1,5 K (DWD o. J.e).

Im regionsbezogenen *Klimareport Brandenburg* stellt der DWD (DWD 2019) vor dem Hintergrund des Klimawandels neben den aktuellen klimatischen Bedingungen auch die potenziell zu erwartenden Veränderungen einzelner Klimaparameter für einen kurzfristigen (bis 2050) sowie einen langfristigen Planungshorizont (bis 2100) dar. Die Entwicklungen wurden unter Anwendung eines regionalen Klimamodellensembles jeweils für ein Klimaschutz-Szenario (RCP 2.6) sowie ein Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP 8.5) simuliert. Die Bezugsperiode, welche die Basis für die relativen Änderungswerte bietet, umfasst die Jahre 1971 bis 2000 (DWD 2019). Die Projektionen für die mittlere Jahresniederschlagsmenge in Brandenburg zeigen für beide Szenarien innerhalb beider Horizonte keinen bzw. einen leichten Anstieg um bis zu 6 % auf 587 mm, der von einer natürlichen Klimavariabilität nicht zu unterscheiden wäre (DWD 2019). Damit weichen die aktuellen von den früheren Projektionen ab, die einen wesentlichen Rückgang der jährlichen Niederschlagsmengen beschrieben haben (Szenario A1B) (Gerstengarbe et al. 2003). Für die einzelnen Jahreszeiten werden deutlichere Änderungen prognostiziert. So ist ohne eine Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen langfristig mit einer Steigerung der Winterniederschläge um 19 % und der Frühjahrsniederschläge um 11 % zu rechnen (DWD 2019). Dabei wird die in der Vergangenheit beobachtete Häufung der trockenen Frühsommer, insbesondere ein Anstieg der niederschlagsfreien Tage im April, von aktuellen Klimaprojektionen nicht dargestellt (Gömann et al. 2015). Die von älteren Klimaprojektionen projizierte starke Abnahme der Sommerniederschläge reduziert sich in den aktuellen Modellen auf eine negative Änderung um 10 %

(DWD 2019). Laut Gömann et al. (2015) erhöht sich zudem das Risiko für Starkregenereignisse im Winterhalbjahr, während es im Sommerhalbjahr stagniert. Bezüglich des Parameters Temperatur ist nach dem bis heute zu verzeichnenden Anstieg (1,5 K seit 1881) auch zukünftig mit einer Erwärmung Brandenburgs zu rechnen. Bis 2050 ist ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1,1 (RCP 2.6) bis 1,5 K (RCP 8.5) zu erwarten (DWD 2019). Ein Niveau, das in einem Klimaschutz-Szenario auch langfristig gehalten werden kann. Bei ausbleibender Emissionsreduktion wird bis 2100 eine Änderung der Temperatur um 3,8 K projiziert. Die Erwärmung in Brandenburg wirkt sich sowohl auf die winterklimatischen als auch auf die sommerklimatischen Verhältnisse aus. So nimmt die Anzahl der Frost- und Eistage sowie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens längerer Frostperioden voraussichtlich ab, während die Anzahl der Sommer- und heißen Tage steigt und das Auftreten von Hitzewellen wahrscheinlicher wird (DWD 2019).

2.1.3 Schlussfolgerungen Standorteigenschaften

Die vorangegangenen Ausführungen zu den pedologischen sowie klimatischen Gegebenheiten in Brandenburg zeigen, dass das Land hinsichtlich seiner Eigenschaften als Pflanzenstandort durch eine große Heterogenität geprägt ist. So variieren über die Landesfläche hinweg neben den jährlichen Niederschlagsmengen in einzelnen Regionen (Drastig et al. 2010; DWD 2019) auch die Bodenarten, die Bodentypen (MLUK 2020) und damit einhergehend die Bodeneigenschaften. Die Heterogenität der Böden besteht dabei nicht nur auf regionaler Ebene, sondern ist durch wechselnde Texturen, Humusgehalte und pH-Werte bis auf die kleinräumige Schlagebene zu erkennen (Bachinger 2002; Dalchow 2005; Gebbers und Kramer 2017; Kling et al. 2019). In Bezug auf den Anbau von Futterleguminosen stellt dabei insbesondere die Bodenreaktion eine pflanzenbauliche Herausforderung dar. So zeigen FLG im Vergleich zu anderen Kulturarten eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber (leicht) sauren pH-Werten unterhalb von 6,0 (Frame 2005), die u.a. in der Beeinträchtigung des Rhizobienwachstums und der dadurch reduzierten Stickstofffixierung begründet liegt (Ferguson et al. 2013). Für die in BRB weiträumig verbreiteten leichten Sandböden zeigen pH-Werte zwischen 5,4 und 6,3 jedoch eine optimale Kalkversorgung an (von Wulffen et al. 2008), sind daher häufig vorzufinden und tendieren ohne ackerbauliche Kalkungsmaßnahmen zu einem weiteren Absinken durch natürliche Versauerungsprozesse (Gebbers und Kramer 2017). Ferner ist eine optimale Entwicklung eines FLG-Bestandes nur in mehr oder weniger engen artspezifischen Grenzen des pH-Wertes gegeben, was hinsichtlich der kleinräumigen Variabilität der Bodenreaktion in BRB (ebd.) in ungleichmäßigen Aufwüchsen resultieren kann.

Ein Großteil der brandenburgischen Acker- und Grünlandstandorte ist zudem durch das Zusammenwirken von Sandböden und geringen mittleren Jahresniederschlagsmengen gekennzeichnet. Vor dem Hintergrund des begrenzten Wasserhaltevermögens der sandigen Bodensubstrate resultiert für die Pflanzenstandorte aus dieser Kombination ein Bodenwasserhaushalt, der durch ein starkes Absinken des Bodenwasservorrates charakterisiert ist. Berechnungen von (Schultz-Sternberg et al. 2012) zeigen, dass es in der Vergangenheit auf den brandenburgischen Sandböden bereits zu einem Absinken des Bodenwassergehalts bis auf 0 mm, also zu einer vollkommenen Austrocknung des Bodens innerhalb der frühen Vegetationsperiode (April bis Juni), gekommen ist. Die Bodenfeuchte, die im Allgemeinen als die in den oberen Bodenschichten enthaltene Wassermenge definiert ist, in einem pflanzenbaulichen Kontext jedoch auch als Verhältnis des gegenwärtig pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalts zur nutzbaren Feldkapazität (nFK) beschrieben werden kann (Seneviratne et al. 2010) und als „prozentualer Anteil an der nFK“ (Schultz-Sternberg et al. 2012) ausgedrückt wird, beträgt bei einer vollkommenen Austrocknung 0 % nFK. Die Bodenfeuchte als hydrologische Variable spielt eine wesentliche Rolle in der Entwicklung und Ertragsbildung von Kulturpflanzen (Gömann et al. 2015) und dient als Indikator für den Versorgungszustand eines Pflanzenaufwuchses mit Wasser. So zeigen Bodenfeuchtwerte zwischen 80 und 100 % nFK eine optimale Wasserversorgung an, während 50 % nFK den Schwellenwert für einen beginnenden Trockenstress darstellen (DWD o. J.b). Die Definition eines Stresses impliziert dabei eine von dem betreffenden Umweltfaktor ausgehende Beeinträchtigung des Wachstums und der Entwicklung der betroffenen Pflanzen (Araújo et al. 2015). Als Grenzwert für einen starken Trockenstress der Pflanzen gilt eine Bodenfeuchte von ≤ 30 % nFK (DWD o. J.b). An diesem Punkt kann das Wurzelsystem nicht mehr hinreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt (Gömann et al. 2015) und der reibungslose Ablauf der Pflanzenphysiologie nicht mehr gewährleistet werden (Ridolfi et al. 2000b). Es ist von einer Schädigung der Kulturpflanzenbestände auszugehen (Schultz-Sternberg et al. 2012). Bei Erreichen des permanenten Welkepunktes (0 % nFK) wirkt die maximale wasserbedingte Stressintensität auf die Pflanzen (Ridolfi et al. 2000a). Die zu erwartenden Folgen solcher Trockenstressperioden sind dabei von der betroffenen Pflanzenart, der Dauer und Schwere der Periode sowie dem zeitlichen Verlauf der Stresseinwirkung abhängig (Bradford und Hsiao 1982; Ridolfi et al. 2000b). Wie eingangs erwähnt, bestehen in BRB bereits heute und insbesondere im Frühjahr restriktive Bodenfeuchtigkeitsbedingungen (Schindler et al. 2007), bei denen kritische Schwellenwerte der Bodenfeuchte (0 % nFK, 30 % nFK) zeitweise unterschritten werden und infolgedessen ein Trockenstress auf die Kulturpflanzenbestände wirkt. Hinsichtlich der für die Zukunft projizierten Temperaturerhöhung und jahreszeitlichen Verschiebung der Niederschläge ist von einer weiteren Zuspitzung dieser Situation durch verschiedene Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozesse

auszugehen. So werden die rückläufigen Sommerniederschläge (DWD 2019) die Gewährleistung einer adäquaten Wasserversorgung der Pflanzen in der Vegetationsperiode erschweren. Ein Anstieg der Lufttemperatur (ebd.) wird zudem einen erhöhten Evaporations- und Transpirationsanspruch bedingen, was zu einer Reduktion der Bodenfeuchte führt (Seneviratne et al. 2010). Der daraus resultierende geringere Bodenwassergehalt begrenzt gleichzeitig die Evapotranspiration und damit den von ihr ausgehenden Kühlungseffekt für Boden und Pflanzen, was wiederum einen Anstieg der Lufttemperatur nach sich zieht (ebd.) und die Prozessabläufe intensiviert. Angesichts dieser zu erwartenden Entwicklungen lässt sich zusammen, dass für den Pflanzenstandort Brandenburg, unter dem Einfluss des Klimawandels, zukünftig FLG-Arten bzw. -sorten und FLG-Gras-Artengemeinde von Relevanz sein werden, die sich durch eine erhöhte Hitze- und insbesondere Trockentoleranz auszeichnen. Die Arten sollten zudem an leichte Böden der BG 1 und 2 und an den für diese Böden in BRB erfassten pH-Wertbereich von 5,6 bis 5,9 (Zimmer und Ellmer 2012) angepasst sein.

2.2 Anbaubedeutung der Futterleguminosen

Futterleguminosen gehören wie die Körnerleguminosen (KLG) zur Familie der Schmetterlingsblütler (Fabaceae) (Sheaffer und Seguin 2003). Dabei repräsentieren die Bezeichnungen keine taxonomische Untergliederungsstufe (z.B. Gattung, Art), sondern fassen einzelne Arten verschiedener Gattungen der Familie entsprechend ihrer Nutzung in zwei Gruppen zusammen. So beläuft sich die Nutzung von KLG (z.B. Linse, Erbse, Sojabohne) auf die Ernte und Weiterverarbeitung der Samen bzw. Körner (Böhm et al. 2020), bspw. für die menschliche Ernährung (Leithold et al. 2017). FLG, welche deutlich kleinere Samen ausbilden als KLG, werden hingegen als Ganzpflanze und in der Regel vor einer beginnenden Fruchtreife geerntet und finden zum Beispiel in der Tierfütterung Verwendung (Sheaffer und Seguin 2003; Freyer et al. 2005). Zu ihnen zählen u.a. Arten der Gattungen Klee (*Trifolium* L.), Schneckenklee (*Medicago* L.), Hornklee (*Lutus* L.) und Steinklee (*Melilotus* Mill.) Eine Gemeinsamkeit aller Arten der Schmetterlingsblütler besteht in der Fähigkeit eine Symbiose mit N₂-fixierenden Bakterien der Ordnung Rhizobiales, den sogenannten Rhizobien oder Knöllchenbakterien, einzugehen (Oberdorfer 2001; Wippel et al. 2019). Diese infizieren die Wurzelhaare der Leguminosen, woraufhin sich die Wurzelknöllchen, je nach Leguminosenart in einer determinierten (rundlichen) oder nicht determinierten (länglichen) Form, ausbilden. Unter hohem Energieaufwand (Verbrauch von 16 ATP-Molekülen) wird innerhalb dieser Knöllchen der elementare Luftstickstoff (N₂) von den Bacteroiden zunächst in Ammoniak (NH₃) umgewandelt und dann zu dem von den Pflanzen nutzbaren Ammonium (NH₄⁺) reduziert und diesen zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Sauerstoffempfindlichkeit des

am Prozess beteiligten Enzyms Nitrogenase kann die Reaktion lediglich unter Anwesenheit des sauerstoffbindenden Leghämoglobins ablaufen, welches den Knöllchen eine charakteristische rote Farbe verleiht und die aktive N₂-Fixierung markiert (Zehner und Göttfert 2015). In Symbiose mit artspezifischen Rhizobienstämmen (Wippel et al. 2019) sind Leguminosen in ihrer Ertragsbildung folglich unabhängig vom häufig ertragslimitierenden N-Gehalt des Bodens (Wiggering et al. 2012; Vrignon-Brenas et al. 2016) und ferner in der Lage diesen mit dem N anzureichern, der über den Eigenbedarf hinaus aus der Luft fixiert oder aus abgestorbenem Pflanzengewebe frei wird. Im Hinblick auf das Anwendungsverbot für mineralischen N-Dünger in der ökologischen Landwirtschaft (Europäisches Parlament 2018) stellt der Anbau von Leguminosen in den betreffenden Betrieben daher das zentrale Element zur Gewährleistung einer adäquaten N-Versorgung der Fruchtfolge dar (Baresel und Reents 2006; Leithold et al. 2017). Da KLG lediglich einjährig angebaut werden und daher nur begrenzt Wurzel- und Sprossbiomasse bilden können, eine geringere N₂-Fixierungsrate aufweisen und den betrieblichen Nährstoffkreislauf als Markterfrüchte zumeist verlassen, liegt das Niveau ihrer Humusreproduktionsleistung sowie ihrer N-Bereitstellung für den Betrieb unterhalb dem der FLG (Loges et al. 2002a; Urbatzka und Beck 2015). Für ökologisch wirtschaftende Betriebe ist daher insbesondere der ein- bis dreijährige Anbau von FLG bzw. FLG-Gras-Gemengen zu Beginn der Fruchtfolge von Bedeutung (Kolbe 2008; Leithold et al. 2017). Neben der Leguminosenart beeinflussen dabei jedoch auch zahlreiche Umweltfaktoren wie z.B. der N_{min}-, Wasser-, Nährstoff- (insbesondere der Schwefelgehalt) und Sauerstoffgehalt des Bodens, der pH-Wert, die Lufttemperatur, das Entwicklungsstadium und der Gesundheitszustand der Pflanze sowie das prozentuale Verhältnis zwischen legumen und nicht-legumen Gemengepartnern im Bestand und dessen Nutzungsdauer die N₂-Fixierleistung (Loges et al. 2002a; Friedel et al. 2003; Pietsch 2004; Leithold et al. 2017). Zusätzlich zur Stickstoffversorgung der Fruchtfolge sind mit dem FLG-Anbau weitere zahlreiche Funktionen verknüpft. So dient die Einbindung von FLG als Haupt- oder Zwischenfrucht u.a. der Beikrautregulierung im Anbausystem, wobei mehrere Wirkmechanismen zum Tragen kommen (Sheaffer und Seguin 2003; Kocira et al. 2020). Zum einen begrenzt die Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe die Ausbreitung von Beikräutern, insbesondere in dichten mehrjährigen FLG-Beständen (Kolbe et al. 2006). Zum anderen unterbindet die für FLG-Aufwüchse typische regelmäßige Schnittnutzung die Ausbildung reifer Samen durch die Individuen der Segetalflora, die die Grundlage für ein Populationswachstum darstellen (Sheaffer und Seguin 2003). Latif et al. (2019) heben zudem die Bedeutung allelopathischer Effekte in der Beikrautunterdrückung hervor. So konnten die Autor*innen einen positiven Zusammenhang zwischen der Ausscheidung phytotoxischer Flavonoide über die Wurzel und dem Beikrautunterdrückungspotential verschiedener Leguminosenarten feststellen (ebd.). Weiterhin wirkt die durch die Eingliederung von FLG erreichte

Diversifizierung der Arten in der Fruchtfolge der Etablierung vergesellschafteter Beikräuter entgegen (Sheaffer und Seguin 2003), indem typische Ressourcennutzungs- und Entwicklungsmuster durchbrochen werden. Dieser Break-Crop-Effekt ist vor allem in konventionellen Anbausystemen mit tendenziell engeren und getreidebetonten Fruchtfolgen in Bezug auf die Regulierung von fruchtartenspezifischen Pathogenen von Bedeutung, die auf diese Weise in ihrem Vermehrungszyklus gestört werden können (Böhm et al. 2020). Weiterhin wird mit dem Anbau von FLG eine Verbesserung der Bodenstruktur fokussiert (Kocira et al. 2020). Tiefwurzelnde Arten, wie der Gewöhnliche Hornklee, der Weiße Steinklee und die Luzerne (Freyer et al. 2005) können Schadverdichtungen aufbrechen und damit den pflanzenbaulich relevanten Unterboden erschließen (Spiegel et al. 2014). Leguminosen zählen zu den humusmehrenden Pflanzen. Nach dem Umbruch eines FLG-(Gras-)Bestandes verbleiben die Ernte- und Wurzelrückstände als organische Primärschicht auf der Anbaufläche und bedingen eine Aktivierung des Bodenlebens sowie eine Mehrung der organischen Bodensubstanz (Leithold et al. 2017). Die durch Mikroorganismen vorangetriebene Zersetzung der organischen Primärschicht resultiert in der Bildung von Nähr- und Dauerhumus, welcher zu einer Stabilisierung des Bodengefüges und damit zum Schutz vor wind- und wasserbedingter Erosion sowie vor Verdichtungen beiträgt (Kocira et al. 2020). Durch die Quellfähigkeit und hohe Kationenaustauschkapazität von Humuspartikeln kann zudem die Wasser- und Nährstoffhaltekapazität von Böden, insbesondere auf Sandstandorten (Kolbe et al. 2006), verbessert werden. Walter et al. (2015) konnten weiterhin ein Wachstum der Regenwurmpopulation in Verbindung mit einem ökologischen FLG-Anbau nachweisen. Die dadurch stimulierte Bioturbation verbessert das Infiltrationsvermögen des Bodens und vermindert dessen Anfälligkeit gegenüber Starkregenereignissen (Spiegel et al. 2014). Die genannten Effekte werden durch einen mehrjährigen FLG-Anbau und die damit verbundene längere Bodenruhe sowie höhere Wurzelbiomasse zusätzlich intensiviert (Kolbe et al. 2006; Spiegel et al. 2014; Leithold et al. 2017). Auch Castell et al. (2018) schreiben dem mehrjährigen im Vergleich zum einjährigen FLG-Anbau, hinsichtlich höherer Erträge der Nachfrüchte, einen besseren Vorfruchtwert zu. Auf viehhaltenden Betrieben stellen FLG als Frischfutter, Heu oder Silage ein protein- und rohfaserreiches Futtermittel für Rinder und andere Wiederkäuer dar (Julier et al. 2017; Schättler 2020), welches bei Einbindung in die Ration, im Vergleich zu einer Fütterung mit reiner Grassilage, eine Steigerung der Futteraufnahme und Milchleistung der Tiere bewirken kann (Steinshamn 2010). Neuere Untersuchungen beschäftigen sich zudem mit dem Einsatz von FLG in der Monogastrier-Fütterung. So stellen bspw. Luzernesilage oder die Blattmasse verschiedener FLG ein Futtermittel dar, das zur adäquaten Versorgung von Legehennen, Masthühnern und -schweinen mit essenziellen Aminosäuren, Omega-3-Fettsäuren, Carotinoiden und Mineralstoffen beiträgt (Weltin et al. 2014; Sommer und Sundrum 2015; Julier et al. 2017). Für viehlose

Betriebe ist eine FLG-(Gras-)Verwertung in der Tierfütterung nicht möglich. Hier werden die Aufwüchse häufig in überbetrieblichen Kooperationen gegen Mist und Gülle getauscht, als Biogas-Substrat verwendet oder verbleiben, im Sinne einer Mulchnutzung, auf der Anbaufläche (Leithold et al. 2017; Maaß et al. 2017). Mit voranschreitender Mineralisation des N-reichen Mulchs erhöht sich jedoch der N_{\min} -Gehalt des Bodens, was wiederum eine Verringerung der energieaufwendigen symbiotischen N_2 -Fixierung und einen bevorzugten Verbrauch des mineralischen Bodenstickstoffs zur Regeneration des Leguminosenbestandes bedingt. Folge ist eine Reduktion des betrieblichen N-Ertrages um bis zu 30 % im Vergleich zu einer TransfERNutzung der Aufwüchse (Friedel et al. 2003; Kolbe et al. 2006), bei der diese nicht auf der jeweiligen Anbaufläche verbleiben. Die Erprobung verschiedener Formen der innerbetrieblichen Transferdüngung, z.B. über Kompostierung, Silagebereitung und Cut and Carry-Systeme, gewinnt damit insbesondere für reine Ackerbaubetriebe an Relevanz (Maaß et al. 2017). Eine Übersicht, über die mit einem Futterleguminosenanbau einhergehenden Ökosystemleistungen geben Spiegel et al. (2014) im Praxishandbuch *Leguminosen nutzen*. Hierzu zählen neben der Aufwertung des Landschaftsbildes und der Bereitstellung eines Lebensraumes und Brutplatzes für Feldvogelarten, Kleinsäuger und Froschlurche vor allem die Förderung von Hummeln, Wildbienen und weiteren für die Landwirtschaft essenziellen bestäubenden Insektenarten durch ein vielfältiges Blüten- und Nahrungsangebot (Spiegel et al. 2014).

2.2.1 Gemengeanbau

Der Anbau von FLG kann sowohl in Reinsaat als auch im Gemenge mit weiteren legumen oder nicht-legumen Komponenten, wie Süßgräsern (Poaceae) vorgenommen werden. Ein Gemengeanbau bietet dabei verschiedene Vorteile. So sind beispielsweise eine verbesserte Ertragssicherheit (Freyer et al. 2005) und Ertragssteigerungen im Vergleich zu FLG-Monokulturen gut dokumentiert (Vasileva und Vasilev 2012; Finn et al. 2013; Sturludóttir et al. 2013). Diese sind auf die sich einstellende Nischenkomplementarität in den Mischkulturen zurückzuführen. Die einzelnen Arten eines Gemenges zeigen u.a. durch variierende Wurzeltiefen, Nährstoffansprüche und zeitlich differierende Hauptwachstumsphasen unterschiedliche Muster in der Ressourcennutzung. Die beobachteten Mehrerträge werden somit durch eine effizientere Beanspruchung und Umsetzung des vorhandenen Lichts, Wassers und der Bodennährstoffe in Biomasse ermöglicht (Phelan et al. 2015). Auf Grundlage dieses Effektes benennen Hofer et al. (2016) den Gemengeanbau aus legumen und nicht-legumen Arten auch als eine mögliche Anpassungsstrategie der Futtermittelproduktion an den Klimawandel, die zur Kompensation dürrerbedingter Ertragsverluste beitragen kann. In mehreren Anbauversuchen konnten die Autor*innen ein vergleichbares Ertragsniveau für unter Trockenstress stehende Mischkulturen und ungestresste FLG-

Monokulturen nachweisen (Hofer et al. 2016). Neben der verbesserten Ertragsleistung und -stabilität zeichnen sich FLG-Gras-Gemenge durch eine erhöhte Konkurrenzkraft gegenüber Beikräutern aus (Freyer et al. 2005; Sturludóttir et al. 2013; Connolly et al. 2017), welche ebenfalls auf die funktionale Komplementarität innerhalb der Artengemenge zurückzuführen ist (Ranaldo et al. 2020). Von Bedeutung sind hier bspw. die Kombinationen verschiedener allelopathischer Wirkungsweisen und Beschattungsmuster (Kocira et al. 2020). Ist eine Futternutzung der Aufwüchse vorgesehen, lässt sich durch einen kombinierten Anbau zudem das Energie-Protein-Verhältnis der Ration verengen, ein unproduktiver Eiweißverlust in der Fütterung vermeiden (Freyer et al. 2005) sowie, durch die Erhöhung des Kohlenhydratgehaltes, die Silierbarkeit der Biomasse verbessern (Loges et al. 2002b). Laut Nußbaum (2007) sollte der Grasanteil hierfür bei mindestens 50 % liegen. Hinsichtlich einer möglichst ertragreichen N_2 -Fixierung schlagen Friedel et al. (2003) ein Verhältnis von 80 % Leguminosen zu 20 % Nicht-Leguminosen im Bestand vor. Aufgrund einer durch die Gräser erhöhten Konkurrenz um den Bodenstickstoff, werden die Leguminosen zu einer Steigerung ihrer N_2 -Fixierung zur Deckung ihres N-Bedarfs angeregt (Carlsson und Huss-Danell 2003). Durch die Aufnahme des überschüssigen und des aus abgestorbenem Pflanzengewebe freigesetzten N_{\min} durch die nicht legumen Gemengepartner wird gleichzeitig eine effizientere Gesamtverwertung des fixierten Luftstickstoffs erreicht (Phelan et al. 2015) sowie einer möglichen Nitratauswaschung vorgebeugt. Gräserarten die sich für den Gemengeanbau in feuchten Lagen und auf schweren Böden eignen sind u.a. das Wiesenlieschgras (*Phleum pratense* L.), der Wiesenschwingel (*Festuca pratensis* Huds.), das Einjährige Weidelgras (*Lolium multiflorum* Lam. var. *westerwoldicum* Wittm.) sowie das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne* L.). In trockenen Lagen sind das Knaulgras (*Dactylis glomerata* L.), der Glatthafer (*Arrhenaterum elatius* L.), die Wehrlose Treppe (*Bromus inermis* Leyss.) oder der Rotschwingel (*Festuca rubra* L.) vorzuziehen (Freyer et al. 2005).

2.3 Anbausituation der Futterleguminosen in Deutschland und Brandenburg

Dem Anbau von Leguminosen kommt in Deutschland aktuell nur eine geringe Bedeutung zu (Wiggering et al. 2012; Böhm et al. 2020). Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (SBA) entfielen im Jahr 2020 nur knapp 3,4 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Bundesgebiet (16.595.024 ha im Jahr 2020) auf den Anbau von Futter- und Körnerleguminosen (DESTATIS 2021b). Das Anbauniveau der FLG, die in den Veröffentlichungen des SBA und des Amtes für Statistik Berlin-Brandenburg zumeist als *Leguminosen zur Ganzpflanzenernte* gelistet sind und unter denen Klee, Luzerne und Futterleguminosen-Gras-Gemenge (Leguminosenanteil ≥ 80 %) zusammengefasst werden, liegt dabei über dem der Körnerleguminosen. Erbsen, Süßlupinen,

Acker- und Sojabohnen sowie andere Hülsenfrüchte und Gemenge zur Körnergewinnung machten mit einer Anbaufläche von insgesamt 223.947 ha im Jahr 2020 etwa 1,4 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche aus, während die Futterleguminosen mit 331.317 ha auf 2,0 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bzw. 2,8 % des bundesweiten Ackerlandes angebaut wurden (DESTATIS 2021b). Betrachtet man ausschließlich die Betriebe des Ökologischen Landbaus, wird ersichtlich, dass der Anteil der mit FLG bestellten Anbaufläche hier mit 9,2 % deutlich höher ist (DESTATIS 2021a). Obwohl nur knapp ein Zehntel der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland auf den Ökologischen Landbau entfällt (BÖLW 2021), werden hier, in Bezug auf die Anbaufläche, knapp 44,4 % der FLG angebaut (DESTATIS 2021a). Ausgehend vom Jahr 1950 verzeichnet die Anbaufläche der FLG in der Bundesrepublik Deutschland bis heute einen starken Rückgang, welcher in **Abbildung 1** dargestellt ist. Während zur Mitte des 20. Jahrhunderts noch knapp 840.000 ha Ackerland dem Anbau von FLG dienten, waren es 1980 nur noch etwa 206.000 ha und damit weniger als ein Viertel der ursprünglichen Fläche (DESTATIS 2022).

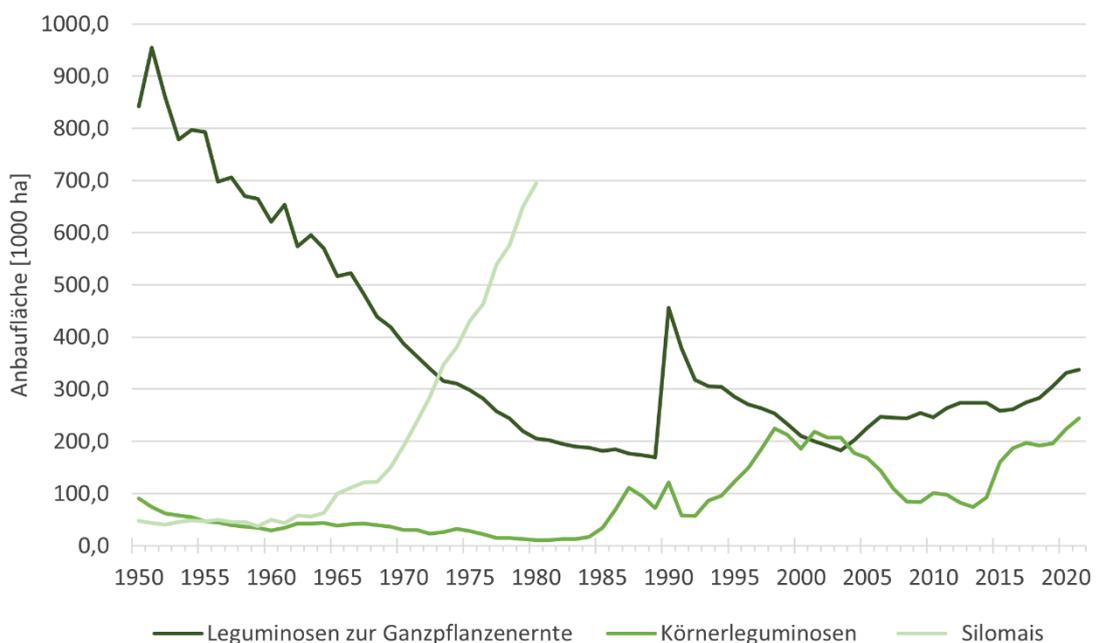


Abbildung 1: Entwicklung der Anbaufläche von Futter- und Körnerleguminosen sowie Silomais auf Ackerstandorten der BRD von 1950 bis 2021 (DESTATIS o. J., 2022).

Eine der Hauptursachen für diese Entwicklung liegt laut Wiggering et al. (2012) in der gestiegenen Bedeutung des Silomais als alternative Futterpflanze seit den 1960er Jahren. Zudem ermöglichte die Anfang des 20. Jahrhunderts gelungene Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens zur Ammoniaksynthese eine kostengünstige Herstellung von mineralischen N-Düngemitteln. Landwirt*innen konnten damit, bei der Sicherstellung der N-Versorgung ihrer Ackerkulturen und Grünlandbestände, eine größere Unabhängigkeit von der biologischen N₂-Fixierung durch

Leguminosen erlangen (Umwelt Bundesamt o. J.), was bereits vor der Verbreitung des Silomaises den Rückgang des FLG-Anbaus bedingt haben könnte. Der in **Abbildung 1** ersichtliche sprunghafte Anstieg der FLG-Anbaufläche im Jahr 1990 ist mit der Wiedervereinigung der beiden deutschen Staaten und die Aufnahme der neuen Bundesländer in die Datenerhebung des SBA zu begründen. Im Jahr 2003 erreichte der deutsche FLG-Anbau mit 182.206 ha Fläche sein bislang niedrigstes Niveau. Seither ist ein kontinuierlicher leichter Anstieg der Anbaufläche zu konstatieren. Seit 2015 ist insbesondere auch für KLG ein positiver Trend bezüglich der Anbaufläche zu verzeichnen, was mitunter auf eine Novellierung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) zurückzuführen sein könnte. Zu den 2013 beschlossenen und seit dem 1. Januar 2015 in Kraft getretenen Reformen zählte auch die Einführung des sogenannten *Greening* (Nitsch et al. 2017). Dieses koppelt den Anspruch von Landwirt*innen auf bestimmte Direktzahlungen der 1. Säule (Basisprämie) verpflichtend an die Umsetzung von klima- und umweltschutzdienlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen (BMEL 2015). Neben einer Anbaudiversifizierung und dem Erhalt von Dauergrünland ist dabei auch die Auszeichnung von ökologischen Vorrangflächen (ÖVF) auf insgesamt 5 % des betrieblichen Ackerlandes vorzunehmen. Auch Flächen, die dem Anbau von stickstoffbindenden Pflanzen dienen, können als ÖVF ausgezeichnet werden (ebd.), wodurch der Körner- und Futterleguminosenanbau betriebswirtschaftlich an Bedeutung gewinnt. In Brandenburg wurden 2015 zwischen 20 und 40 % der gesamten Leguminosenanbaufläche als ÖVF angemeldet (Nitsch et al. 2017). Im Jahr 2020 umfasste die Anbaufläche für FLG in Brandenburg, nach einer Steigerung um 8,3 % zum Vorjahr, 39.748 ha und damit 3,0 % der gesamten LNF im Land. Innerhalb Deutschlands weisen nur Bayern (3,6 %), Baden-Württemberg (3,3 %) und das Saarland (3,2 %) einen höheren Anteil von FLG an der landwirtschaftlichen Nutzfläche des jeweiligen Bundeslandes auf (DESTATIS 2021b). Insgesamt werden in diesen vier Bundesländern etwa 59 % der deutschen Leguminosen zur Ganzpflanzenernte angebaut (ebd.). 2020 wurden mit einem durchschnittlichen Hektarertrag von 73,1 dt TM bundesweit insgesamt 2,4 Millionen Tonnen Futterleguminosen geerntet (DESTATIS 2021c). In Brandenburg liegen die Erträge mit mittleren 53 dt TM ha⁻¹ unter dem deutschlandweiten Durchschnitt (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2021).

Angaben zu den Anbauanteilen einzelner FLG-Arten sind nach Kenntnisstand der Autorin nicht verfügbar. Jedoch gelten Rotklee, Luzerne und Weißklee als die bedeutendsten FLG-Arten für den Feldfutterbau und die Grünlandbewirtschaftung in Deutschland und der gemäßigten Klimazone (Freyer et al. 2005; BSA 2020; Rognli et al. 2021). Diese und weitere Arten, die insbesondere für den Gemengeanbau relevant sind, werden folgend vorgestellt.

2.3.1 Rotklee *Trifolium pratense* L.

Der Rotklee ist eine aus Südeuropa und Asien stammende, mehrjährige, jedoch kurzlebige Art der Gattung *Trifolium* L. (Oberdorfer 2001; Sheaffer et al. 2018). Sie ist eine der wichtigsten Arten im Dauergrünland und Feldfutterbau der gemäßigten Klimazone (Kolbe et al. 2006; BSA 2020; Rognli et al. 2021) und die in Deutschland am häufigsten angebaute FLG (Annicchiarico et al. 2015). Die einjährigen Triebe des Rotkleees zeigen eine aufrechte Wuchsform und bilden dreizählige Laubblätter aus, deren behaarte eiförmige Fiederblättchen durch eine weiße sichelförmige Zeichnung charakterisiert sind. Die karminroten Blütenköpfe setzen sich aus bis zu 120 Einzelblüten zusammen (Kolbe et al. 2006). Das Wurzelsystem der Art zeichnet sich durch eine etwa 2 m tief reichende Pfahlwurzel aus (Freyer et al. 2005), die sich in zahlreiche Nebenäste verzweigt (Sheaffer et al. 2018) und so zur intensiven Lockerung des Bodens beiträgt (Spiegel et al. 2014). Der Rotklee wächst bevorzugt auf mittelschweren und tiefgründigen Lehm- und Tonstandorten (Duke 1981; Freyer et al. 2005). Bei einem ausreichenden Wasserdargebot eignen sich auch leichtere Böden wie sandige Lehme. Austrocknungsgefährdete leichte Sandböden sind für die Art hingegen ungeeignet (Kolbe et al. 2006), da sie empfindlich auf restriktive Bodenfeuchtigkeitsbedingungen reagiert (Freyer et al. 2005). So zeigte Rotklee in einer Studie, die die Reaktionen verschiedener FLG auf Trockenstress untersuchte, mit einer Reduktion um 87 % den höchsten Ertragsrückgang unter Trockenheitsbedingungen, vor dem Gewöhnlichem Hornklee (79 %) und der Luzerne (67 %) (Peterson et al. 1992). Den Ergebnissen einer Untersuchung von Staniak (2019) ist zu entnehmen, dass der Anbau von Rotklee im Gemenge mit Gras den Ertragsrückgang unter Trockenstress abschwächt. Zudem gilt eine Infektion mit Arbuskulären Mykorrhizapilzen als trockentoleranzfördernd (Frame 2005), da diese das Wurzelsystem der FLG um Feinwurzeln erweitern und der Pflanze so ein größeres Bodenvolumen zur Wasseraufnahme zur Verfügung stellen. Eine ausreichende Wasserversorgung ist für die Art bei einer mittleren Jahresniederschlagsmenge von 600 bis 650 mm gegeben (Freyer et al. 2005). Der höchste Wasserbedarf besteht dabei während der Ausbildung der Haupt- und Nebentriebe des Rotkleees (Staniak 2019). Niederschlagsarme Phasen zu Beginn der Vegetationsperiode, wie sie auch in BRB üblich sind, bedingen eine Stagnation des Wachstums (Kolbe et al. 2006). López-Olivari und Ortega-Klose (2021) konnten zudem eine verminderte Überlebensrate sowie eine Beeinträchtigung der Persistenz von Rotkleebeständen unter Trockenstress feststellen. Die vom Rotklee tolerierten pH-Werte des Bodens reichen je nach Quelle von 5,5 (Sheaffer et al. 2018) bis 8 (Frame 2005), wobei die im Vergleich zur Luzerne bessere Verträglichkeit niedriger pH-Werte übereinstimmend beschrieben wird (Duke 1981; Freyer et al. 2005). Aufgrund seines hohen Nährstoff- und Proteingehaltes sowie seiner guten Verdaulichkeit findet Rotklee sowohl als Heu, Silage sowie

als Frischfutter in der Poly- und Monogastrierfütterung Verwendung (Kolbe et al. 2006; Sheaffer et al. 2018). Dabei besteht die höchste Futterqualität vor dem Knospenstadium (LFL 2020). Um einer blähenden Wirkung des Wiederkäuerfutters vorzubeugen, wird ein Anbau von Rotklee im Gemenge (Sheaffer et al. 2018) z.B. mit Weidelgräsern, Wiesenlieschgras oder Wiesenschwingel empfohlen (Freyer et al. 2005). Als Ertragsspanne für Rotkleeertrag im zweiten Hauptnutzungsjahr (HNJ) werden von Freyer et al. (2005) 90 bis 140 dt TM ha⁻¹ angegeben. Für einen reinen Rotkleebestand im zweiten HNJ eines vierschnittigen Nutzungsregimes wurde von Loges und Taube (1999) eine Ertragsleistung von 160,5 dt TM ha⁻¹ erfasst. Diese Angabe deckt sich auch mit den Ergebnissen einer aktuellen Studie aus Chile, in der die Ertragsleistung von Rotklee unter verschiedenen Bewässerungsregimen untersucht wurde (López-Olivari und Ortega-Klose 2021). Für einen vollständig bewässerten ungestressten Bestand konnte ein Ertrag von 159,7 dt TM ha⁻¹ gemessen werden, der sich unter den natürlichen Niederschlagsbedingungen der Region jedoch auf knapp die Hälfte, 81,1 dt TM ha⁻¹, reduzierte (López-Olivari und Ortega-Klose 2021). Die Variationsbreite der N₂-Fixierung der Art reicht von 80 bis 350 kg ha⁻¹ Jahr⁻¹ (Freyer et al. 2005).

2.3.2 Luzerne *Medicago sativa* L.

Die Blaue Luzerne oder Saatluzerne (hier kurz Luzerne) ist eine mehrjährige Art der Gattung *Medicago* L. (Oberdorfer 2001). Sie stammt aus dem Gebiet des heutigen Irans, Iraks und Afghanistans (Sheaffer et al. 2018), ist in der gemäßigten Klimazone weltweit verbreitet (Frame 2005) und gehört in Deutschland zu den bedeutendsten und leistungsstärksten Feldfutterbauarten (BSA 2020). Die Luzerne ist durch einen aufrechten Wuchs ihrer Stängel, die eine Wuchshöhe von bis zu 120 cm erreichen können, gekennzeichnet (Julier et al. 2017). Die Laubblätter der Art sind dreizählig, wobei der Blattrand der Fiederblättchen halb gezähnt (Sheaffer et al. 2018) und das Endblättchen extra gestielt ist. Die ovalen Blütenstände der Luzerne setzen sich aus bis zu 40 Blüten zusammen und zeigen zumeist eine blaue bis violette Färbung, die jedoch variieren kann (Duke 1981). Unter allen FLG bildet die Luzerne die tiefreichende Pfahlwurzel aus (Freyer et al. 2005), die den Boden bis in eine Tiefe von 9 m durchdringt (Sheaffer et al. 2018) und sich in zahlreiche Neben- und Seitenwurzeln verzweigt (Pietsch 2004). Bis zu 70 % der Gesamtwurzelmasse befinden sich dabei im Oberboden (Heichel 1982 zit. nach Frame 2005). Das tiefreichende Wurzelsystem der Art ermöglicht der Pflanze eine Wasseraufnahme aus den unteren Bodenschichten, wodurch Trockenperioden gut überstanden werden können (Kolbe et al. 2006). Zusätzlich zeigt das Wurzelsystem unter Trockenstress verschiedene morphologische Anpassungen, zu denen je nach Luzernesorte und Dauer der Stresseinwirkung u.a. die Erhöhung der Gesamtlänge des Wurzelsystems, die Steigerung der Anzahl der sekundären Xylemkanäle und

Wurzelspitzen sowie die Erhöhung des Wurzeldurchmessers zählen (Zhang et al. 2019). Die Luzerne kann folglich auch auf trockenen Standorten gut bestehen, wobei die untere Grenze des Toleranzbereiches für die jährliche Niederschlagsmenge bei 250 mm liegt (Araújo et al. 2015). Eine optimale Wasserversorgung wird bei 550 (Freyer et al. 2005) bis 600 mm (Duke 1981) Jahresniederschlag erreicht. Diese sollte insbesondere in der Phase der langsamen Jugendentwicklung der Luzerne gewährleistet sein, in der das Wurzelsystem zunächst entwickelt werden muss und die Keimlinge noch eine hohe Anfälligkeit gegenüber Trockenheit aufweisen (Freyer et al. 2005). Um die Trockentoleranz der Art nach einer erfolgreichen Etablierung voll auszuschöpfen, ist der Kulturzustand des (Unter-) Bodens des Ackerstandortes von zentraler Bedeutung. Dieser sollte tiefgründig und ohne Verdichtungshorizonte sein, die die Tiefenentwicklung der Wurzeln begrenzen könnten (Kolbe et al. 2006; LFL 2016). Als Bodenart bevorzugt die Luzerne hierbei Lehme und lehmige Sande (Duke 1981; Freyer et al. 2005). Empfindlich zeigt sich die Art gegenüber sauren Bodenreaktionen (Duke 1981), wobei die Angaben über den optimalen pH-Wert je nach Quelle von 6,0 bis 7,5 reichen (Frame 2005; Freyer et al. 2005; LFL 2016; Sheaffer et al. 2018). Trotz ihrer ausgeprägten Trockentoleranz ist der Wasserverbrauch der Luzerne mit einem Transpirationskoeffizienten von rund $840 \text{ l H}_2\text{O kg}^{-1} \text{ TM}$ (Ehlers 1997) wenig effizient. Auf Standorten mit einem geringen Wasserdargebot kann der Anbau, durch die starke Beanspruchung der Bodenwasservorräte, daher auch zu einem Wassermangel für die Folgekulturen führen (Kolbe et al. 2006). Dennoch wird die Art aufgrund ihrer hohen Ertragsleistungen und Rohproteingehalte, die bis zu 25 % ihrer TM ausmachen und im Knospenstadium am höchsten sind (LFL 2020), europaweit auf etwa 2,5 Mio. ha in Reinbeständen angebaut (Julier et al. 2017). Die Luzerne kann an Wiederkäuer sowohl als Heu als auch als Silage verfüttert werden (Sheaffer et al. 2018), wobei sich für die Silagebereitung Luzerne-Gras-Aufwüchse besser eignen als Reinbestände (siehe Kap. 2.2.1). Die kombinierte Verfütterung mit Gräsern verringert zudem das Blährisiko für die Wiederkäuer. Weiterhin sind auch weidetolerante Sorten wie die Luzelle verfügbar (Giebelhausen 2009), die in der Grünlandbewirtschaftung Verwendung finden können. Eine Frischfütternutzung sollte vor der Blüte stattfinden, da die Pflanze im Anschluss schnell verholzt (Kolbe et al. 2006). Daneben wird die Luzerne auch in der Fütterung von Monogastriern genutzt (siehe Kap. 2.2). Hinsichtlich ihrer kräftigen Pfahlwurzel, die mit dem Aufbrechen verdichteter Horizonte die Bodenstruktur verbessern kann, stellt die Luzerne zudem eine geeignete Gründüngungspflanze dar (Spiegel et al. 2014), die hohe Mengen an Ernte- und Wurzelrückstände zurücklässt. Diese können bis zu 70 dt TM ha^{-1} betragen (Kolbe et al. 2006). Das Ertragspotenzial der Art variiert mit der Nutzungsdauer, wobei Reinbestände im zweiten HNJ mit Erträgen von 90 bis $150 \text{ dt TM ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ihre maximale Ertragsleistung erreichen (Freyer et al. 2005). In den

Folgejahren ist mit einer Ausdünnung der Bestände und geringeren Erträgen zu rechnen. Luzerne(-gras)bestände fixieren je nach Biomassebildung jährlich bis zu 350 kg N₂ ha⁻¹ (ebd.).

2.3.3 Weißklee *Trifolium repens* L.

Der Weißklee ist eine europäische mehrjährige Art der Gattung *Trifolium* L. (Oberdorfer 2001; Freyer et al. 2005). Sie gehört ebenso wie die Luzerne und der Rotklee zu den bedeutendsten FLG-Arten der gemäßigten Klimazone, wobei sie aufgrund ihrer Ausdauer, ihres großen Nachwuchsvermögens sowie ihrer hohen Beweidungs- und Trittvträglichkeit insbesondere in der Bewirtschaftung von weidefähigen Grünlandstandorten von Relevanz ist (Spiegel et al. 2014; BSA 2020). Die Toleranz gegenüber einer intensiven Beweidung gründet sich dabei auf die Wuchsform der Art, welche durch die Ausbildung horizontal wachsender Stolonen charakterisiert ist. Diese bilden an zahlreichen Knoten neue Wurzeln und Wachstumszentren aus, was eine weiträumige vegetative Verbreitung der Pflanze ermöglicht (Duke 1981). Die Bestände sind niedrigwachsend mit Aufwuchshöhen von bis zu 30 cm. Die langgestielten runden Blütenköpfe bestehen aus bis zu 80 weißen Einzelblüten (Kolbe et al. 2006). Je nach Wuchstyp bilden die Pflanzen kleine (Morsö-Typ), mittelgroße (Hollandica-Typ) oder große (Ladino-Typ) Blätter (Freyer et al. 2005) mit einer schmalen weißlichen Zeichnung aus. Der zu den Flachwurzlern zählende Weißklee ist unterirdisch durch eine intensiv in Seitenwurzeln verzweigte Pfahlwurzel mit einer geringen Tiefenentwicklung von 60 bis 80 cm gekennzeichnet (ebd.). Die Art findet auf einer Vielzahl von Böden passende Bedingungen für eine erfolgreiche Etablierung und Bestandsentwicklung. Neben leichten bis mittelschweren Sand- und Lehmböden (Freyer et al. 2005) gelten auch feucht-schwere Tonböden als geeignet (Duke 1981; Spiegel et al. 2014). Bezüglich der Bodenreaktion liegt das Optimum der Art bei pH-Werten über 5,5 (Kolbe et al. 2006; Sheaffer et al. 2018). Lediglich trockene Standorte mit einem unzureichenden und wechselhaften Wasserdargebot bieten hinsichtlich der geringen Trockentoleranz der Art ungünstige Voraussetzungen für das Wachstum (Sheaffer et al. 2018; BSA 2020). Die Empfindlichkeit des Weißklee gegenüber einer sinkenden Bodenfeuchtigkeit ist u.a. auf ihr flach verlaufendes Wurzelsystem zurückzuführen (Hart 1987 zit. nach Inostroza und Acuña 2010), welches eine Wasseraufnahme aus tieferen und länger wasserführenden Bodenschichten verhindert. Zudem zeigt die Art eine schlechte Regulierung der stomatären Leitfähigkeit und des damit zusammenhängenden transpirationsbedingten Wasserverlustes bei Trockenstress, wodurch ein schnelles Welken der Blätter erklärt werden kann (Turner 1990b). Dennoch kann durch die Schließung der Stomata eine verbesserte Wassernutzungseffizienz unter Trockenbedingungen erreicht werden (Inostroza und Acuña 2010). In einem Containerversuch, in welchem die Biomasseänderung verschiedener FLG unter induzierten Trockenstressbedingungen getestet wurden, zeigte Weißklee einen bis zu

56-prozentigen Ertragsrückgang im Vergleich zur ungestressten Kontrollvariante und damit eine empfindlichere Reaktion als bspw. Horn- und Gelbklee (Komainda et al. 2019). Im Vergleich zur Luzerne zeigt Weißklee unter Trockenstress eine höhere tägliche Wassernutzungsrate, eine schneller voranschreitende Seneszenz der Blätter und ein stärkeres Absinken des relativen Wassergehalt im Gewebe, was in der Gesamtheit in einer kürzeren Überlebensdauer des Weißklees unter restriktiven Bodenfeuchtigkeitsbedingungen resultiert (Norton et al. 2021). Die Reaktion der Art auf Trockenstress besteht u. a. in Form einer Osmotischen Anpassung. So werden kompatible gelöste Stoffe, wie Prolin in den Stolonspitzen der Pflanze akkumuliert, die dort zur Aufrechterhaltung des Druckpotentials beitragen und so ein rasches Weiterwachsen bei Wiederbewässerung ermöglichen (Turner 1990a). Der jährliche Niederschlagsbedarf der Art liegt bei 550 mm und mehr (Kolbe et al. 2006). Nach Klapp et al. (1953) wird der Weißklee mit der höchsten Futterwertzahl 8 bewertet, wodurch seine Bedeutung für die Tierfütterung ersichtlich wird. Er zeichnet sich durch einen hohen Rohprotein- und Mineralstoffgehalt (Frame 2005), einen großen Blattanteil (Sheaffer et al. 2018) sowie eine konstant gute Verdaulichkeit aus, die auf seine langsame Verholzung (Kolbe et al. 2006) und die stetige Ausbildung junger Blätter an den Ausläufern zurückzuführen ist (Frame 2005). Er wird sowohl als Heu, Silage und als Frischfutter verfüttert und häufig auch im Gemenge angebaut (Duke 1981). Trotz seiner Beschattungsempfindlichkeit eignet er sich gut als Untersaat, da er durch seinen niedrigen Wuchs nicht die Ernte der Deckfrucht stört (BSA 2020). Hier bietet der Weißklee hinsichtlich seines Vermögens Bestandeslücken schnell zu schließen eine effektive Beikrautunterdrückung (Spiegel et al. 2014). Das Ertragsniveau der Art wird mit einer Spanne von 80 bis 100 dt TM ha⁻¹ Jahr⁻¹ angegeben, die N₂-Fixierung beläuft sich auf 50 bis 250 kg ha⁻¹ Jahr⁻¹ (Freyer et al. 2005).

2.3.4 Perserklee *Trifolium resupinatum* L.

Der Perserklee (auch Persischer Klee) ist eine einjährige aus dem Mittelmeerraum stammende Art der Gattung *Trifolium* L. (Oberdorfer 2001; Freyer et al. 2005). Sie zeichnet sich durch eine buschige, bis zu 80 cm hohe Wuchsform und eine mitteltief reichende Pfahlwurzel aus, die sich nur geringfügig in Seiten- und Feinwurzeln verzweigt (Frame 2005; Freyer et al. 2005; Kolbe et al. 2006). Die drei Fiederblättchen eines Laubblattes sind keil- bis eiförmig und gezähnt. Die Blütenstände der Art bestehen aus 20 – 30 rosafarbenen bis violetten, teils gedrehten (resupinierten) Blüten und bilden sich mit der Fruchtreife zu weißlich und grob strukturierten Kugeln um, welche die ein- bis zweisamigen Hülsen enthalten (Duke 1981; Frame 2005). In Bezug auf seine Umweltbedingungen gilt er als anpassungsfähig, bevorzugt jedoch schwerere Böden mit leicht sauren bis alkalischen pH-Werten und ein warmes Klima (LFL o. J.c; Duke 1981; Frame 2005). Sandige Substrate werden als ungeeignet beschrieben (Freyer et al. 2005). Zudem weist der

Perserklee hohe Ansprüche an eine adäquate Wasserversorgung auf, die die Grundlage für eine gute Ertragsleistung darstellt. So konnten Balazadeh et al. (2021) in einem dreischnittigen Nutzungsregime unter vollständiger Bewässerung einen TM-Ertrag von 125,2 dt ha⁻¹ für die Art feststellen, der sich im Zuge einer starken Begrenzung der Bewässerung um knapp 36 % auf 80 dt ha⁻¹ reduzierte. Martiniello (1999) erfasste für einen einschnittig genutzten Klee grasbestand aus Perserklee und Einjährigem Weidelgras eine Ertragsleistung von 64,7 dt ha⁻¹ unter bewässerten Bedingungen, während der nicht bewässerte Bestand im Durchschnitt vierer Erntejahre lediglich 54,6 dt ha⁻¹ erzielte. Frühblühende Sorten der Art zeigen eine verbesserte Anpassung an geringe Niederschlagsmengen (Frame 2005). Der Perserklee zeigt, anders als andere Kleearten, eine schnelle Jugendentwicklung und ist in der Fruchtfolge vor allem aufgrund seiner Gesundheitseigenschaften gegenüber Nematoden und dem pilzlichen Stängelbrenner von Bedeutung (Kolbe et al. 2006; BSA 2020). Verwendung findet er wegen seines Proteinreichtums, seines hohen Blattanteils und seiner guten Verdaulichkeit (geringe Verholzungseigung auch während der Blüte) insbesondere als Grünfütter für Rinder. Hinsichtlich seines guten Nachwuchsvermögens eignet sich der Perserklee auch als Weideleguminose. Häufig wird er in Mischungen mit Weidelgras und Alexandrinerklee angebaut (Freyer et al. 2005; Kolbe et al. 2006; Spiegel et al. 2014). Die Variationsbreite seiner N₂-Fixierleistung liegt bei 50 – 150 kg ha⁻¹ Jahr⁻¹ (Freyer et al. 2005).

2.3.5 Alexandrinerklee *Trifolium alexandrinum* L.

Der Alexandrinerklee (auch Ägyptischer Klee; AKL) stammt ebenso wie der Perserklee aus dem mediterranen Raum und ist eine einjährige, hierzulande nicht winterharte Art der Gattung *Trifolium* L. (Oberdorfer 2001). Pflanzen der Art können Wuchshöhen von bis zu 1,50 m erreichen und zeigen verschiedene Verzweigungstypen. So gibt es basale Verzweigungstypen, die sich für eine intensive mehrschnittige Nutzung eignen und Typen mit apikaler Verzweigung, die lediglich in einem einschnittigen Nutzungsregime Verwendung finden können, dabei jedoch eine bessere Anpassung an trockene Anbaugelände zeigen (Frame 2005). Die cremefarbenen Blüten bilden eiförmige Blütenstände und mit der Fruchtreife einsamige Hülsen aus. Der AKL entwickelt eine flach wurzelnde Pfahlwurzel (bis 30 cm), die eine nur mäßige Verzweigung in Seiten- und Feinwurzeln aufweist (Kolbe et al. 2006). Die Art wächst bevorzugt auf mittelschweren bis schweren Böden und mit neutralen pH-Werten zwischen 6 und 8 (Frame 2005) zeigt eine schlechte Anpassung an Sandböden (Freyer et al. 2005). Die für die Art typische Schnellwüchsigkeit ist dabei von einem ausreichenden Wärme- und Feuchtigkeitsangebot und hohen Niederschlägen abhängig (Freyer et al. 2005), wobei der AKL eine höhere Empfindlichkeit gegenüber suboptimalen Umweltbedingungen zeigt als der Perserklee (Kolbe et al. 2006). So konnte eine aktuelle Studie von Balazadeh et al. (2021) zeigen, dass der prozentuale Ertragsrückgang des AKL (41 %) unter

schwerem Trockenstress höher ausfällt als der des Perserklees (36 %). Unter optimalen Bewässerungsbedingungen erzielte der AKL einen TM-Ertrag von 147,2 dt ha⁻¹, während sich dieser unter Trockenstress auf rund 87,1 dt ha⁻¹ reduzierte. Giambalvo et al. (2011) stellten für AKL einen TM-Ertrag von 99,9 dt ha⁻¹ in Monokultur und 102,4 dt ha⁻¹ im Gemenge mit Einjährigem Weidelgras fest. Die N₂-Fixierleistung des Gemenges lag hier bei 167 kg N ha⁻¹ (Giambalvo et al. 2011) und übertrifft damit die von Freyer et al. (2005) angegebene artspezifische Variationsbreite der Fixierleistung von 50 - 150 kg N ha⁻¹. Genutzt wird AKL zumeist als Grünschnitt in der Rinderfütterung, wobei in Hinblick auf seine schnell verholzenden Stängel der richtige Schnitttermin zu Beginn der Blüte einzuhalten ist (Kolbe et al. 2006). Für eine Silierung ist die Art ungeeignet (Freyer et al. 2005), jedoch kann im Gemenge mit Weidelgräsern eine Heubereitung stattfinden (Kolbe et al. 2006). Da er eine geringe Weidetoleranz aufweist (ebd.), spielt er in der Grünlandbewirtschaftung keine Rolle (Spiegel et al. 2014).

2.3.6 Schwedenklee *Trifolium hybridum* L.

Eine weitere Art der Gattung *Trifolium* L. ist der in den gemäßigten Zonen Europas und Asiens beheimatete Schwedenklee (auch Bastardklee) (Oberdorfer 2001; Sheaffer et al. 2018). Dieser zeigt mit einer Vielzahl an schlanken und verzweigten Stängeln einen buschigen Wuchs mit Bestandeshöhen von bis zu 80 cm. Die drei eiförmigen Fiederblättchen eines Laubblattes zeigen eine ganzrandige feine Zähnung, sind unbehaart und gleichmäßig grün ohne weißliche Zeichnung. Die rundlichen Blütenstände bestehen aus bis zu 50 weißen bis rosafarbenen Einzelblüten und bilden mit der Fruchtreife mehrsamige Hülsen aus. Die Pfahlwurzel der Art reicht mitteltief in den Boden und zeigt eine intensive Verzweigung in Seitenwurzeln (Duke 1981; Frame 2005; Freyer et al. 2005; Kolbe et al. 2006). Beim Schwedenklee handelt es sich um eine mehrjährige winterfeste Art, die insbesondere in feucht-kühlen Klimaten, auf schweren tiefgründigen Lehm- und Tonböden gut gedeiht und zwei- bis dreijährig angebaut werden kann (Duke 1981; Freyer et al. 2005). Auf trockenen und sandigen Standorten zeigt sie eine schlechte Entwicklung (Duke 1981). Sie zeichnet sich durch eine hohe Toleranz gegenüber Staunässe aus, verträgt leicht saure pH-Werte bis 5,0 und zeigt sich gleichzeitig auch gegenüber alkalischen Bodenreaktionen unempfindlicher als andere Kleearten (Duke 1981; Sheaffer et al. 2018). Der Niederschlagsanspruch des Schwedenklees liegt bei über 650 mm mittlerem Jahresniederschlag (Simon 1956 zit. nach Kolbe et al. 2006). Seine Anbaubedeutung hierzulande ist gering (BSA 2020). Verwendung findet er als Grünfutter, Heu oder Silage hauptsächlich in der Rinderfütterung. Aufgrund seiner hohen Bitterstoff- und Fagopyringehalte, die bei den betreffenden Tieren zu Blähungen oder einer Lichtempfindlichkeit führen können, ist eine solche Nutzung jedoch lediglich im Gemenge mit weiteren legumen und nicht-legumen Arten zu empfehlen (Kolbe et al. 2006; Sheaffer et al.

2018). Eine weitere Einschränkung in der Nutzung ergibt sich aus der im Vergleich zu anderen FLG-Arten geringen Ausdauer und Ertragsleistung. Das Hauptwachstum findet im Frühsommer statt, sodass etwa 80 % des Gesamtertrages in einer Vegetationsperiode auf den ersten von zumeist nur zwei Schnitten entfallen (Sheaffer et al. 2018). Dieser liegt nach Freyer et al. (2005) bei jährlich 40 - 80 dt TM ha⁻¹. Das Nachwuchsvermögen des Schwedenklee ist gering (Frame 2005) und aufgrund seiner Trittempfindlichkeit zeigt er auch für eine Beweidung nur eine bedingte Eignung (Kolbe et al. 2006). Er kann jedoch in Untersaat und als Gründung genutzt werden (BSA 2020), ist häufig Bestandteil von Ansaatmischungen für Bienenweiden (Spiegel et al. 2014) und kann in klee Krebsgefährdeten Fruchtfolgen aufgrund seiner geringen Anfälligkeit gegenüber der Krankheit (Freyer et al. 2005) als Gesundheitspflanze dienen. Seine jährliche N₂-Fixierleistung liegt zwischen 30 und 150 kg ha⁻¹ Jahr⁻¹ (ebd.).

2.3.7 Inkarnatklee *Trifolium incarnatum* L.

Beim Inkarnatklee handelt es sich um eine aus dem Mittelmeerraum stammende einjährig-überwinternde Art der Gattung *Trifolium* L. (Oberdorfer 2001; Kolbe et al. 2006). Zu erkennen ist sie leicht an ihren kegelförmigen, etwa 5 cm langen, dunkelrot gefärbten Blütenständen, die sich aus bis zu 125 Einzelblüten zusammensetzen (Frame 2005). Zudem ist die Art durch eine dichte Behaarung der Blätter und der unverzweigten Stängel gekennzeichnet (Kolbe et al. 2006). Obwohl das Wurzelnetz des Inkarnatklees nur einen geringen Tiefgang aufweist (Freyer et al. 2005), ermöglicht die intensive Verzweigung der Pfahlwurzel in Seiten- und Feinwurzeln, eine mit dem Anbau einhergehende Strukturverbesserung des Bodens (Frame 2005; Spiegel et al. 2014). Die Art zeigt eine große ökologische Spannbreite hinsichtlich ihres Anbaustandortes, wobei sie jedoch kalkhaltige Böden mit pH-Werten zwischen 5,5 und 7 (LFL o. J.c) und mit leichten bis mittelschweren Texturen bevorzugt werden (Freyer et al. 2005). Aufgrund ihres hohen Wasserverbrauchs reagiert sie empfindlich auf Trockenheit (Frame 2005). Die optimale mittlere Jahresniederschlagsmenge liegt bei 600 mm (Simon 1956 zit. nach Kolbe et al. 2006). Der Inkarnatklee gilt als konkurrenzschwach (BSA 2020), dennoch wird ihm eine Beikraut unterdrückende Wirkung zugesprochen (Spiegel et al. 2014). Möglicherweise ist diese auf die artspezifische Kombination aus Schnellwüchsigkeit im Frühjahr und ausgeprägter Beblätterung zurückzuführen (Kolbe et al. 2006). Aufgrund ihres geringen Nachwuchsvermögens (Freyer et al. 2005) ist die Art nur einschnittig nutzbar (BSA 2020). Sie wird selten in Reinsaat angebaut und in erster Linie als eiweißreicher Gemengepartner für Zottelwicke und Welschem Weidelgras in der in Futter- und Winterzwischenfruchtmischung *Landsberger Gemenge* verwendet (ebd.). Im Mittel vierer Anbaujahre konnte von Martiniello (1999) ein Ertragsniveau von 29,6 dt TM ha⁻¹ für Inkarnatklee in Reinsaat mit vollständiger Bewässerung feststellen. Unter nicht bewässerten Bedingungen

reduzierte sich dieses auf 16,8 dt TM ha⁻¹ (Martiniello 1999), was einem Ertragsrückgang um 43 % entspricht. Im kombinierten Anbau mit Einjährigem Weidelgras konnte die jährliche Ertragsleistung sowohl unter bewässerten als auch unter nicht bewässerten Bedingungen auf 64,2 dt TM ha⁻¹ bzw. 53,0 dt TM ha⁻¹ wesentlich erhöht werden (ebd.). Die Variationsbreite der N₂-Fixierleistung der Art liegt nach Freyer et al. (2005) bei 50 – 150 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹. Da Inkarnat- klee eine geringe Widerstandskraft gegenüber Kleekrebs zeigt, sind Anbaupausen von sieben Jahren (auch für Rotklee) einzuhalten (ebd.).

2.4 Charakterisierung alternativer Futterleguminosen

Aus den Ausführungen des vorangegangenen Kapitels ist zu schlussfolgern, dass die in der gemäßigten Klimazone etablierten FLG-Arten, mit Ausnahme der Luzerne, nur eine geringfügige Anpassung an das Wachstum auf trockenen Standorten aufweisen. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden klimatischen Veränderungen in BRB (siehe Kap. 2.1.2), wird die dringende Notwendigkeit der Identifizierung und Erprobung bislang wenig genutzter, jedoch an diese Standortbedingungen adaptierter Arten und Sorten deutlich. Folgend werden daher alternative FLG mit einer ausgeprägten Trockentoleranz vorgestellt. Diese wird dabei, in Anlehnung an Farooq et al. (2009), als die Fähigkeit von Pflanzen definiert, auch bei einer defizitären Wasserversorgung wachsen, blühen sowie eine wirtschaftliche Ertragsbildung realisieren zu können. Eine ausführliche Übersicht, über die dabei wirkenden Toleranzmechanismen geben Nadeem et al. (2019) und Farooq et al. (2009). Im Folgenden soll lediglich auf eine Auswahl dieser eingegangen werden. Als ein primärer Toleranzmechanismus kann die *Dürreflucht* definiert werden, bei der die Pflanze durch eine zügige Entwicklung und Vollendung des Lebenszyklus vor dem Einsetzen der Trockenheit einer Stresseinwirkung entgeht (Nadeem et al. 2019). Daneben existieren Strategien der Dürrevermeidung, welche der Aufrechterhaltung des Pflanzenwasserhaushalts und der pflanzlichen Lebensprozesse bei verminderter Bodenwasserverfügbarkeit dienen (Inostroza et al. 2015). Hierzu zählen u.a. die Regulation der stomatären Leitfähigkeit zur Reduktion der transpirationsbedingten Wasserverluste und die Verstärkung des Wurzelwachstums für eine verbesserte Wasseraufnahme (Steffen und Bergknecht 2006). Einen wichtigen Toleranzmechanismus auf physiologischer Ebene stellt die osmotische Anpassung (genannt steigerungOA) dar (Farooq et al. 2009). Diese beschreibt die aktiv betriebene Akkumulation gelöster Stoffe in der Zelle infolge eines sinkenden Wasserpotenzials in der Pflanze. In der Konsequenz kommt es zu einem Absinken des osmotischen Potenzials, wodurch das Wasser entlang des Gradienten stärker in die Zelle gezogen und die Aufrechterhaltung des Turgors ermöglicht wird (Inostroza et al. 2015). Weiterhin ist das antioxidative Abwehrsystem ein essenzieller Bestandteil der pflanzlichen Trockentoleranz. Unter Trockenstress kommt es in Pflanzenzellen zu einer Akkumulation

sogenannter Reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) (Maleki et al. 2021). In zu hoher Konzentration lösen diese einen oxidativen Stress aus und schädigen die Zellstrukturen (ebd.), was in der Konsequenz zum Zelltod führen kann. Das antioxidative Abwehrsystem besteht aus enzymatischen und nicht-enzymatischen Molekülen (Farooq et al. 2009), welche die ROS abfangen, neutralisieren und so den oxidativen Stress vermindern (Maleki et al. 2021). Nadeem et al. (2019) fassen zusammen, dass eine erhöhte antioxidative Aktivität die Trockentoleranz von Leguminosen verbessern könnte.

2.4.1 Gewöhnlicher Hornklee *Lotus corniculatus* L.

Der Gewöhnliche Hornklee (GHK) (auch Hornschotenklee) ist eine weltweit verbreitete mehrjährige Art der Gattung *Lotus* L. (Kirkbride 1999), die aufgrund ihres hohen Maßes an natürlicher genotypischer Variabilität an eine Vielzahl von Umweltbedingungen angepasst ist (Steiner 1999; Escaray et al. 2012). Die krautige Pflanze zeigt ein niederliegendes bis aufrechtes Wachstum mit Aufwuchshöhen von bis zu 70 cm (Kirkbride 1999). Sie bildet vielzählige Stängel, die einer basalen Krone entspringen. Die Blätter bestehen aus drei umgekehrt eiförmigen Fiederblättern (Frame 2005). Der doldenartige Blütenstand besteht aus bis zu acht gelben bis orange-roten Blüten (Kirkbride 1999), aus welchen nachfolgend die Fruchtstände, 2 – 5 cm lange Hülsen, hervorgehen. Diese enthalten jeweils 15 – 20 Samen, die nach abgeschlossener Fruchtreife durch ein beidseitiges Aufreißen der Hülse freigesetzt werden (Frame 2005). Das Wurzelsystem der Art zeichnet sich durch eine tiefreichende, schnellwüchsige, luzerneähnliche Pfahlwurzel aus, die im Oberboden in mittelstarke Seitenwurzeln ausläuft (Blumenthal et al. 1999; Freyer et al. 2005). Das faserige Wurzelnetz zeigt eine geringere Tiefenentwicklung als das der Luzerne, zeigt in der Ackerkrume jedoch eine weitere horizontale Verbreitung (Seaney und Henson 1970). Aufgrund der hohen genetischen Vielfalt der Art können die Phänotypen des Hornkleees bspw. hinsichtlich der Wurzelmorphologie und der Wuchsform variieren (Steiner 1999). Das Ertragspotenzial des Hornkleees liegt nach Freyer et al. (2005) bei 50 – 90 dt TM ha⁻¹ Jahr⁻¹ und 15 – 30 dt TM ha⁻¹ Ernte- und Wurzelrückständen. Diese Angaben decken sich mit den Erträgen eines britischen Sortenversuchs von Marley et al. (2006), in dem sich die kanadische Hornklee-Sorte *Leo* im ersten Erntejahr als am ertragreichsten herausstellte. Die Gesamttrockenmasse betrug bei drei Ernteschnitten 79,5 dt ha⁻¹, wovon 6,8 dt auf Beikräuter und -gräser entfielen. Auffällig war bei allen Versuchssorten der starke Ertragseinbruch zum dritten Schnitt. Während die Erntemenge für die Sorte *Leo* zum ersten Schnitt bei 32,7 dt ha⁻¹ und zum zweiten bei 39,9 dt ha⁻¹ lag, betrug sie zum dritten Schnitt lediglich 0,3 dt ha⁻¹ (Marley et al. 2006). Zurückzuführen ist die immense Ertragsverringerung vermutlich auf die Art der Energiegewinnung zur Regeneration der Bestände des GHK (Blumenthal et al. 1999). Während Leguminosen, wie die Luzerne, nicht-

strukturelle Kohlenhydrate als Energiereserve in ihre Wurzeln einlagern und aus diesen ihr Nachwachsen nach einem Ernteschnitt oder einer Beweidung bestreiten können, findet eine solche Einlagerung beim GHK nur begrenzt statt, wodurch er nach der Entlaubung auf die verbliebene stark reduzierte Blattfläche und ihre fotosynthetischen Assimilate zur Energiegewinnung angewiesen ist (Smith 1962). Vance et al. (1982) konnten eine Seneszenz der Hornklee-Rhizobien als Reaktion auf eine Entfernung der Triebe feststellen. Die N₂-Fixierung ist folglich bis zur abgeschlossenen Entwicklung einer neuen Rhizobien-Population beschränkt, was die Regeneration des Bestandes zusätzlich verlangsamt. In Hinblick auf diese Faktoren lassen sich die im Vergleich zu Rotklee und Luzerne geringeren Erträge des Hornklees (Kolbe et al. 2006), die reduzierte Anzahl an möglichen Schnittnutzungen sowie die begrenzte Eignung für eine intensive Beweidung (Freyer et al. 2005) erklären. Die N₂-Fixierleistung der Art wird von Freyer et al. (2005) mit 30 – 100 kg ha⁻¹ Jahr⁻¹ beziffert. Trotz der geringen Erträge gilt der GHK aufgrund seiner relativen Anspruchslosigkeit in Bezug auf seine Umgebungsbedingungen (Freyer et al. 2005) auf unfruchtbaren Standorten als produktiver als andere FLG (Seaney und Henson 1970; Sheaffer et al. 2018). Er bevorzugt als Bodenarten lehmige Sande bis sandige Lehme (Simon 1960 zit. nach Freyer et al. 2005), wächst jedoch auch in flachgründigen Felsspalten, in sandigen Küstengebieten und bei ausreichendem Kalkgehalt auch auf Moorstandorten (LFL o. J.b; Steiner 1999). Er zeigt sich unempfindlich gegenüber Staunässe und weist eine mittlere Toleranz gegenüber salzigen Böden auf (Sheaffer et al. 2018). Für eine optimale Entwicklung des GHK ist nach Freyer et al. (2005) ein pH-Wert von 6,5 anzustreben. Die beste Nodulation der Wurzeln erfolgt nach Duke (1981) bei pH-Werten zwischen 6,0 und 6,5. In einem serbischen Feldversuch konnte der GHK auch bei einem pH-Wert von 4,8 (H₂O) noch gute Erträge erzielen (Tomić et al. 2017). Auf solchen sauren Standorten übertreffen die Erträge des GHK die der Luzerne und des Rotklees (Sheaffer et al. 2018). Der Niederschlagsbedarf der Art liegt bei 550 mm und weniger (Simon 1960 zit. nach Freyer et al. 2005), wobei eine mittlere Jahresniederschlagsmenge von 210 mm die untere Grenze des Toleranzbereiches darstellt (Duke 1981). Je nach Literaturquelle gilt der GHK als mäßig trockentolerant (Frame 2005; Sheaffer et al. 2018) bis dürreresistent (LFL o. J.b; Freyer et al. 2005). Zum Schutz vor Trockenheit nutzt die Art Strategien der Dürrevermeidung. Carter et al. (1997) untersuchten wie sich ein erhöhter CO₂-Gehalt in der Atmosphäre, ein Temperaturanstieg und Trockenheit auf das Wachstum und die Entwicklung des GHK auswirken und konnten eine deutliche Steigerung des Wurzelwachstums unter restriktiven Bodenfeuchtigkeitsbedingungen feststellen. Infolgedessen steht der Pflanze ein vergrößertes Bodenvolumen zur Verfügung, aus dem eine Wasseraufnahme möglich ist. Eine weitere Anpassungsstrategie des GHK besteht in der Ausbildung eines Phänotypen mit einer verringerten Gesamtblattfläche und verdickten Blättern (Carter et al. 1997; Inostroza et al. 2015). Zudem ist die Art durch ein hohes

Vermögen zur osmotischen Anpassung gekennzeichnet. So konnten Inostroza et al. (2015) in einem Gewächshausversuch, in dem sieben Sorten des GHK jeweils bei unbegrenzter und begrenzter Bodenwasserverfügbarkeit angebaut wurden, eine Verringerung des zellulären osmotischen Potenzials um 60 % und eine Steigerung des Turgors um 30 % in den unter Wasserstress stehenden Pflanzen im Vergleich zu den ungestressten Kontrollvarianten ermitteln (ebd.). Die Ergebnisse der Studie zeigten weiterhin, dass die Intensität der OA negativ mit der Biomasseproduktion korreliert, die Sorten mit der höchsten Akkumulation an gelösten Stoffen also die geringsten TM-Erträge erbrachten. Insofern kann die OA hier als ein Mechanismus zur Überlebenssicherung betrachtet werden, der jedoch nicht zur Stabilisierung der Erträge unter Trockenstress beiträgt (Inostroza et al. 2015). Die höchsten TM-Erträge wurden stattdessen von denjenigen Sorten erbracht, welche die höchste Wassernutzungseffizienz (WUE = water use efficiency) aufwiesen (ebd.). Grundsätzlich verringerte sich die WUE unter Trockenstressbedingungen, da der Ertrag prozentual stärker zurückging als die verbrauchte Wassermenge (ebd.). Carter et al. (1997) stellten in ihrem Versuch hingegen keine Verschlechterung der WUE des GHK unter Trockenstress fest. Die Ergebnisse der Studie zeigten neben der bereits genannten Steigerung der Wurzelentwicklung, einen Rückgang der Reproduktionskapazität, der Wachstumsrate und damit auch der oberirdischen Biomasse (ebd.). Dies bestätigte auch ein Gewächshausversuch von Komainda et al. (2019), in dem der GHK und Weißklee unter periodischem Trockenstress die gleiche Biomasseproduktion zeigten. Die relativen Biomasseverluste im Vergleich zur jeweiligen ungestressten Kontrollvariante fielen beim GHK (-26 %) jedoch deutlich geringer aus als beim Weißklee (- 43 %), was auf eine verbesserte Trockentoleranz des GHK im Vergleich zum Weißklee hindeutet (Komainda et al. 2019).

Hinsichtlich seiner Winterhärte ist eine Herbstsaat des GHK grundsätzlich möglich, dabei muss zeitlich jedoch eine ausreichende Entwicklung der Pflanzen vor dem Winter gewährleistet werden (Fairey und Smith 1999). Nach Frame (2005) ist eine Frühljahrsaart besser geeignet. In jedem Fall ist auf einen geringen Beikrautdruck der betreffenden Ackerfläche zu achten, da die Art in der Etablierungsphase ein langsames Wachstum und damit eine geringe Konkurrenzkraft gegenüber Beikräutern zeigt (Fairey und Smith 1999; Freyer et al. 2005; Chapman et al. 2008). Die Bedingungen für eine erfolgreiche Etablierung des GHK können bei der Aussaat zudem durch einen guten Bodenschluss des Saatguts und eine maximale Ablagetiefe von 6 mm optimiert werden. Eine tiefere Ablage kann den Feldaufgang stark beeinträchtigen (Seaney und Henson 1970). Bei einem Gemengeanbau ist zu beachten, dass der Hornklee aufgrund seiner Konkurrenzschwäche von massebildenden Partnern verdrängt wird. Als geeignete Mischungspartner gelten das Wiesenlieschgras, das Wiesenrispengras, der Rohrschwengel sowie Weißklee

und Schwedenklee (Frame 2005; Freyer et al. 2005). Die Nutzungsmöglichkeiten des GHK sind vielfältig. Er stellt als Frischfutter, Heu oder Silage ein sehr gutes Futtermittel dar (Frame 2005), dessen Futterwert mit dem des Rotklee und der Luzerne vergleichbar ist. Bei einem Wachstum unter Trockenheitsbedingungen hat Hornklee aufgrund eines besseren Blatt-Stängel-Gewichtsverhältnisses im Vergleich zur Luzerne sogar die günstigere Futterqualität (Peterson et al. 1992). Insbesondere die hohen Rohproteingehalte (Arrigo 2012; Grabber et al. 2014) machen die Art zu einer wertvollen Komponenten in der Wiederkäuerfütterung. Zudem weist der GHK hohe Gehalte an kondensierten Tanninen auf (Chapman et al. 2008), die den Proteinabbau im Pansen der Wiederkäuer reduzieren, so eine effizientere Eiweißnutzung ermöglichen (Frame 2005), Blähungen der Tiere verhindern (Sheaffer et al. 2018) und aufgrund anthelmintischer Eigenschaften zudem antiparasitär wirken (Mueller-Harvey et al. 2019). Bei einer Ansaat von Hornklee auf Weideflächen ist im Sinne einer verbesserten Persistenz die Verwendung niederliegender Wuchstypen zu empfehlen (Frame 2005). Neben der Futternutzung ist auch ein Anbau als Gründüngung möglich (Freyer et al. 2005). Der GHK gilt aufgrund seiner Wurzelmorphologie als Boden- und Strukturverbesserer (Spiegel et al. 2014) und stellt hinsichtlich seiner hohen Verträglichkeit gegenüber verschiedensten Umweltbedingungen eine wichtige Art zur Restauration degradierter Böden dar (Escaray et al. 2012).

2.4.2 Gelbklee *Medicago lupulina* L.

Der Gelbklee (auch Hopfenklee) ist eine mehrjährige jedoch kurzlebige Art der Gattung *Medicago* L. und gehört damit zu den Luzerne-Arten (Turkington und Cavers 1979; Freyer et al. 2005). Während sein ursprüngliches Verbreitungsgebiet Europa und Teile Asiens umfasste (LFL o. J.a), ist die Art heute in allen gemäßigten und subtropischen Regionen der Erde verbreitet (Turkington und Cavers 1979). Die phänotypischen Merkmale des Gelbklees differieren. So können die Bestände durch ein niederliegendes bis aufrechtes Wachstum, gering oder stark verzweigte Stängel und Wuchshöhen zwischen 15 und 60 cm charakterisiert sein (Turkington und Cavers 1979; Rojas-Sandoval 2017). Die Laubblätter sind dreizählig, wobei das Endblättchen, wie bei der Luzerne, gestielt ist. Die Stängel und Blätter der Pflanzen sind zumeist leicht bis dicht behaart. Der Blütenstand des Gelbklees setzt sich aus 20 bis 50 gelben Einzelblüten zu einer ovalen Traube zusammen (Turkington und Cavers 1979). Die Hülsen des Gelbklees sind rundlich und einsamig. Unterirdisch entwickelt die Art eine schlanke Pfahlwurzel mit zahlreichen Verzweigungen, die bis zu 60 cm tief in den Boden reicht (Turkington und Cavers 1979). Eine verstärkte Ausbildung von Faserwurzeln findet insbesondere auf armen Böden statt (LFL o. J.a).

Der Gelbklee stellt geringe Ansprüche an seinen Standort und wächst sowohl auf lehmigen Sanden als auch auf Ton, bevorzugt aber kalkreiche Lehme mit neutralem pH-Wert (LFL o. J.a; Simon, 1960 zit. nach Freyer et al. 2005; Rojas-Sandoval 2017) und reagiert empfindlich auf saure Bodenreaktionen (Kolbe et al. 2006). Lammerink (1968) konnte in Neuseeland jedoch auch auf Standorten mit einem pH-Wert von 4,8 noch Individuen des Gelbklees nachweisen. Diese zeigten im Vergleich zu Populationen auf Standorten mit weniger sauren Bodenreaktionen einen verzögerten Blühbeginn (Lammerink 1968). Nach Duke (1981) toleriert Gelbklee pH-Werte zwischen 4,5 und 8,2. Das Ertragspotenzial der Art wird von Freyer et al. (2005) mit 50 – 90 und von Heuzé et al. (2018) mit 25 – 37 dt TM ha⁻¹ Jahr⁻¹ angegeben. Die Menge der Ernte- und Wurzelrückstände beläuft sich auf 15 – 30 dt TM ha⁻¹ (Freyer et al. 2005). Aufgrund des geringen Nachwuchsvermögens der Art ist auch im HNJ lediglich ein Ernteschnitt möglich (LFL o. J.a). Die Art präferiert trocken-warme Klimabedingungen (Kolbe et al. 2006), gilt als trockenheitsverträglich (Freyer et al. 2005) und zeigt mit einer Feuchtezahl von 4 (Ellenberg und Leuschner 2010), die einen artspezifischer Indikatorwert für den Bodenfeuchtigkeitsbedarf darstellt, einen geringeren Anspruch an die Bodenfeuchtigkeit als Weiß- und Rotklee. Diesen ist jeweils die Feuchtezahl 5 zugeordnet (Ellenberg und Leuschner 2010). Auf Trockenstress reagiert der Gelbklee mit Ertragsverlusten. AbdElgawad et al. (2014) untersuchten in einem Klimakammerexperiment die Auswirkungen projizierter Klimaänderungen (SRES B2-Szenario nach IPCC) auf die Biomasseproduktion von Gelbklee. Dabei konnte unter Trockenstressbedingungen ein signifikanter Rückgang des Frisch- und Trockenmasseertrages der Art sowie eine Anpassung mittels Reduktion der stomatären Leitfähigkeit beobachtet werden (ebd.). Bei einer zusätzlichen Temperaturerhöhung um 3 K wurde dieser Effekt in Bezug auf die FM verstärkt, während der TM-Ertrag durch den Temperaturanstieg nicht weiter verringert wurde. Eine Steigerung des CO₂-Gehaltes in den Klimakammern um 225 ppm kehrte die Auswirkungen von Temperaturanstieg und Trockenheit um, sodass der Gelbklee unter den für die Zukunft projizierten Klimabedingungen die gleichen TM-Erträge erbringen konnte, wie unter den aktuellen klimatischen Gegebenheiten (AbdElgawad et al. 2014). Auch Komainda et al. (2019) stellten für die Art einen Ertragsrückgang unter restriktiven Bodenfeuchtigkeitsbedingungen fest. Dieser lag jedoch, wie auch beim GHK (siehe Kap. 2.4.1), auf einem signifikant geringeren Niveau als beim Weißklee. Alle drei Arten erzielten bei einem Wachstum unter periodischem Trockenstress eine vergleichbare absolute Biomasseproduktion (ebd.). Komainda et al. (2019) kommen daher zu dem Schluss, dass sowohl der GHK als auch der Gelbklee ein Potential für die Verwendung auf Dauergrünlandstandorten zeigen, auf denen infolge einer geringen Wasserverfügbarkeit die Produktivität von Weißklee begrenzt ist. Hinweise auf eine mögliche Anpassungsstrategie des Gelbklees an Trockenheit gibt die Studie von Tsutsupa und Stupacova (2013). Die Autorinnen untersuchten unter verschiedenen

Umweltbedingungen wachsende Gelbkleepflanzen sowie deren Blätter hinsichtlich ihrer Morphologie. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die Blätter der unter periodischem Trockenstress stehenden Pflanzen adaptive Charakteristika aufweisen und neben mesomorphen auch xeromorphe Merkmale ausbilden. So sind die betreffenden Blätter durch gradlinige Umrisse der Epidermiszellen und die Dominanz eines dichten Palisadengewebes anstelle eines lockeren Parenchyms gekennzeichnet (Tsutsupa und Stupacova 2013).

Die Anbaubedeutung des Gelbklees in Deutschland ist gering, weshalb eine züchterische Weiterentwicklung nur in geringem Umfang stattfindet (BSA 2020). Genutzt wird die Art hauptsächlich als Gründüngungspflanze, als Mischungspartner in Zwischenfruchtgemengen und als Untersaat in Mais- und Getreidebeständen (Freyer et al. 2005; Spiegel et al. 2014; Dierauer et al. 2017; BSA 2020). Die Aussaat kann bereits im Herbst oder im Frühjahr erfolgen (Kolbe et al. 2006), dann aufgrund der Spätfrostgefahr erst ab Ende März (LFL o. J.a). Zu Beginn der Vegetationsperiode zeigt Gelbklee eine rasche Jugendentwicklung (Elsalahy et al. 2019), bleibt dabei aber dennoch konkurrenzschwach. Als Mischungspartner ist er insbesondere auf für Rotklee ungeeigneten Flächen im Gemenge mit Weißklee, Serradella und Weidelgras bedeutend (LFL o. J.a; Freyer et al. 2005). Bezüglich des Futterwertes von Gelbklee finden sich in der einschlägigen Literatur uneinheitliche Angaben. So empfehlen Kolbe et al. (2006) aufgrund des bitteren Geschmacks lediglich eine Beimengung ins Futter in moderaten Anteilen, während die Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaus (AGFF) (o. J.) die Art als wertvolle Futterpflanze benennt. Die Futterwertzahl liegt nach Klapp et al. (1953) bei 7, was der zweitbesten Bewertung als Futterpflanze entspricht. Nach Freyer et al. (2005) ist die Nutzung von Reinbeständen als Weide dennoch höchstens für Schafe und Jungvieh geeignet. Aufgrund seines flächigen und zumeist niederliegenden Wachstums bietet die Art hier eine gute Biss- und Trittverträglichkeit (Spiegel et al. 2014). Die Stickstofffixierung des Gelbklees wird mit 30 – 100 kg ha⁻¹ Jahr⁻¹ angegeben (Freyer et al. 2005) und liegt damit deutlich unter der Fixierleistung des Weiß- und Rotkleees sowie der Luzerne.

2.4.3 Bockshornklee *Trigonella foenum-graecum* L.

Der Bockshornklee (BHK) ist eine einjährige Leguminose der Gattung *Trigonella* L. (Schuster et al. 1998; Oberdorfer 2001). Sie stammt aus dem westasiatischen Raum, ist heute weltweit verbreitet und wird vor allem in China, Indien, im Iran und im Mittelmeerraum angebaut (Schuster et al. 1998; Petropoulos 2002). Typisch ist der süßlich-würzige Geruch des Bockshornkleees, welcher auf das in der Pflanze enthaltene Kumarin zurückzuführen ist (Brendieck-Worm 2015). Die Stängel der Pflanze sind hohl, steif, meistens verzweigt und wachsen aufrecht, wodurch die

Bestände Wuchshöhen von bis zu 80 cm erreichen. Die drei Fiederblätter eines Laubblattes haben eine länglich-elliptische Form und sind am oberen Rand deutlich gezähnt; das mittlere Fiederblatt ist gestielt. Die kurz gestielten weißen Blüten des Bockshornklee sitzen einzeln oder paarig in den Blattachsen der Pflanze. Die Hülsen haben eine Länge von 3 – 12 cm, sind gerade bis leicht gebogen, spitzzulaufend und stehen aufrecht. Sie enthalten jeweils 10 – 20 rechteckige und farblich variierende Samen. Die Pfahlwurzel des Bockshornklee reicht bis zu 80 cm tief in der Boden und bildet seitlich Faserwurzeln aus (Schuster et al. 1998).

Der Bockshornklee wächst unter einer Vielzahl von Umweltbedingungen, wobei die Art u.a. für den Anbau in niederschlagsarmen und warmen Regionen geeignet ist (Duke 1981; Mehrafarin et al. 2011). Mehrafarin et al. (2011) beschreiben den Bockshornklee als eine Trockenlandpflanze mit geringem Wasserbedarf. Die untere Grenze ihres Toleranzbereiches für die jährliche Niederschlagsmenge liegt bei 380 mm (Duke 1981). Sie bevorzugt durchlässige und tiefgründige Lehmböden (ebd.), die eine leicht alkalische Bodenreaktion mit pH-Werten von 8,0 bis 8,5 aufweisen (Basu 2006). Böden, die zu nass und zu tonhaltig sind, beeinträchtigen die Entwicklung und das Wachstum des Bockshornklee (Petropoulos 1973 zit. nach Basu 2006), ebenso wie kühle und feuchte Witterungsbedingungen (Mehrafarin et al. 2011). Eine hohe Toleranz zeigt die Art gegenüber versalzten Böden, hier gilt sie als Kulturbringerin (Schuster et al. 1998). Die Aussaat von BHK ist sowohl im Herbst als auch im Frühjahr möglich. Frosttolerant ist die Art bis $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Duke 1981). Nach dem Auflaufen zeigt BHK zunächst eine geringe Wachstumsrate (Mehrafarin et al. 2011). Die Nutzungsmöglichkeiten von BHK sind zahlreich. So werden die Samen, Blätter und Stängel der Pflanze, insbesondere im asiatischen Raum bereits in langer Tradition als Gewürz, Gemüse und als volksmedizinisches Heilmittel mit antikarzinogener, antidiabetischer, entzündungshemmender sowie blutdruck- und cholesterinsenkender Wirkung verwendet (Mehrafarin et al. 2011; Brendieck-Worm 2015; Maleki et al. 2021). Bockshornklee dient zudem als Futtermittel für Rinder (Petropoulos 2002; Mehrafarin et al. 2011). Während der Anbau der Art für die Heuproduktion in mediterranen Regionen bereits üblich ist (Saia et al. 2016), kommen neuere Studien zur Fütterungseignung des Bockshornklee vor allem aus Kanada. So zeigte Montgomery (2009), dass Heulage aus BHK in der Milchviehfütterung eine geeignete und nichtblähende Alternative zur Luzerneheulage darstellen kann, wenn sie zum optimalen Zeitpunkt geerntet und korrekt gelagert wird. Die Ernte solle nach Petropoulos (2002) im BBCH-Stadium 75 – 80 stattfinden. Alemu und Doepel (2011) stellten bei der Fütterung mit BHK-Heulage im Vergleich zur Luzerne-Heulage hingegen eine geringere Milchleistung von Holstein-Kühen fest, was auf eine reduzierte TM-Aufnahme der Tiere zurückzuführen war. Naseri et al. (2013) weisen darauf hin, dass die Verwendung eines Futterzusatzstoffes aus BHK-Samen effizienzsteigernd auf

die Nährstoffverwertung von Wiederkäuerfuttermitteln wirken kann. Die Samen gelten weiterhin als ein wichtiges Galaktagogum und können durch die Stimulation des Milchdrüsenwachstums die Milchleistung von Kühen signifikant erhöhen. Wijekoon et al. (2021) betonen, in Bezug auf vielseitigen gesundheitsfördernden Eigenschaften der Leguminose, das mit der Fütterung von BHK verbundene Potential zur Einsparung synthetischer Medikamente. Die Angaben über die Ertragsleistung des Bockshornklees variieren. So konnten in Alberta, Kanada, in einem reengespaischten Anbausystem im Mittel über 15 Jahre TM-Erträge von 58 dt ha⁻¹ erbracht werden (Mir et al. 1997), während in einem sizilianischen Anbauversuch im zweijährigen Mittel 97 dt TM ha⁻¹ erzielt wurden (Saia et al. 2016). Dabei lag der N-Ertrag bei 194 kg ha⁻¹, wovon 77 % symbiotisch aus der Luft fixiert wurden (ebd.). Trotz seiner Eignung für den Anbau in trockenen Regionen zeigt BHK eine starke Reaktion auf periodischen Trockenstress. Bazzazi et al. (2013) beschreiben einen Rückgang des Biomasseertrages um 43 % bei gestressten Beständen im Vergleich zu den ungestressten Kontrollbeständen eines iranischen Streifenversuchs. Weiterhin reduzierten sich unter restriktiven Bodenfeuchtigkeitsbedingungen die Tage bis zur Blüte der Pflanzen, die Tage bis zur Reife der Früchte sowie die Aufwuchshöhe der Bestände (Bazzazi et al. 2013). Aktuelle Studien untersuchten die Trockentoleranzmechanismen der Art und stellten eine Variation der Stressbewältigungsstrategien bei verschiedenen Sorten des Bockshornklees fest (Maleki et al. 2021). Dabei zeigte sich, dass die trockenoleranten Sorten einen höheren Transpirationskoeffizienten sowie eine höhere stomatare Leitfähigkeit unter Trockenstress aufweisen als weniger trockenolerante Sorten (ebd.). Daneben spielen die Erhöhung der physiologischen Reaktionen (Zamani et al. 2020), bspw. in Form eines Anstiegs enzymatischer und nicht-enzymatischer Antioxidantien zur Pufferung ROS, eine zentrale Rolle bei der Bewältigung von Trockenstress.

2.4.4 Weißer Steinklee *Melilotus albus* Medik.

Der Weiße Steinklee (WSK; auch Bokharaklee) ist eine eng mit dem Gelben Steinklee verwandte Art der Gattung *Melilotus* Mill. (Oberdorfer 2001). Während sein ursprüngliches Verbreitungsgebiet Europa sowie die westlichen und zentralen Regionen Asiens umfasste, ist er heute weltweit und insbesondere in der gemäßigten Klimazone zu finden (Duke 1981). Je nach Sorte zeigt der Weiße Steinklee einen ein- oder zweijährigen Lebenszyklus (Bull 2014). Seine Wuchsform ähnelt der der Luzerne. Die meist aufrechten Stängel können Wuchshöhen von 2 m und mehr erreichen (Freyer et al. 2005; Bull 2014). Die Laubblätter setzen sich aus drei Fiederblättern zusammen, die eine länglich-schmale Form aufweisen und deren Rand gezähnt ist. Das Endblättchen ist gestielt. Die Blütenstände des Weißen Steinklees bestehen aus 40 – 100 einzelnen weißen Blüten und bilden 5 – 20 cm lange Trauben, die auf achselständigen Stielen sitzen. Die

Hülsen färben sich im Laufe der Fruchtreife schwarz und enthalten einen einzelnen nierenförmigen Samen (Flora of China o. J.; Duke 1981; Frame 2005). Das Wurzelsystem der Art zeichnet sich durch eine bis zu 3 m tief reichende Pfahlwurzel aus, die sich in kräftige Seitenwurzeln verzweigt. Die Ausprägung von Feinwurzeln ist von standörtlichen Bodenbedingungen abhängig und findet insbesondere in der oberen Bodenschicht statt (Freyer et al. 2005; Bull 2014).

Der Weiße Steinklee zeigt eine gute Anpassung an ein breites Spektrum von Umweltbedingungen und gilt daher als Pionierart für unterschiedliche Standorte. Als Bodenart bevorzugt er lehmige Sande (Simon, 1960 zit. nach Freyer et al. 2005), jedoch weist er auch auf Ton und leichten Böden eine zufriedenstellende Produktivität auf (Duke 1981). Gegenüber Sandböden zeigt er eine bessere Verträglichkeit als andere Futterleguminosen, einschließlich der Luzerne. Vergleichsweise hohe und stabile Erträge lassen ihn hier besonders anbauwürdig erscheinen (Bull 2014). Bezüglich des optimalen pH-Wertes für den WSK sind in der Literatur variierende Angaben zu finden. Nach Schneider (2019) liegt dieser bei 5,8, nach Sheaffer et al. (2018) bei über 6,5 und nach Freyer et al. (2005) bei 6,8 sowie im basischen Bereich. Duke (1981) und Frame (2005) beschreiben eine Empfindlichkeit des WSK gegenüber sauren Bodenreaktionen. Haller (1983) verweist zudem auf den Zusammenhang von Bodenreaktion und Entwicklungsstadium der Pflanze. So zeigen Versuchsergebnisse des Autors, dass ein erfolgreicher Anbau von Weißem Steinklee auch auf sauren Böden möglich ist, wenn mindestens zum Zeitpunkt der Keimung ein neutrales Bodenmilieu gewährleistet werden kann. Je länger sich die Entwicklung der Keimpflanzen unter günstigen Reaktionsbedingungen vollziehen kann, desto höhere Erträge können letztlich erzielt werden (Haller 1983). Je nach pH-Klasse des Bodens kann daher eine Kalkung zur Aussaat der Kultur sinnvoll sein (Schneider 2019). Diese erfolgt für gewöhnlich im zeitigen Frühjahr von Februar bis März, kann in Regionen mit regelmäßigen Frühjahrsniederschlägen und ausreichender Bodenfeuchte aber auch bis Mitte Mai erfolgen (ebd.). Grundsätzlich ist auch eine frühe Herbstaussaat bis Mitte August möglich (Frame 2005; Schneider 2019), hierbei besteht jedoch eine erhöhte Auswinterungsgefahr für den Bestand, wenn keine hinreichende Entwicklung der Überwinterungsorgane vor dem Kälteeinbruch mehr stattfindet (Brummund 1958 zit. nach Bull 2014). Eine Überwinterung bei bis zu -30 °C wird durch die Ausbildung von Erneuerungsknospen an der Wurzelkrone und die Einlagerung von Reservestoffen in die Wurzel ermöglicht (Bull 2014). Um diese Prozesse bei einem im Frühjahr gesäten Bestand hinreichend zu gewährleisten, werden spezifische Schnittregime empfohlen. So sollte der erste Schnitt im Ansaatjahr vor dem Übergang in das generative Stadium durchgeführt werden; der zweite Schnitt darf erst nach vollständiger Entwicklung der Überwinterungsorgane im Oktober erfolgen (ebd.). Bei einer Aussaat unter trockenen Bedingungen kann es zu einer Reduktion der Keimung kommen,

weshalb für einen verbesserten Bodenschluss ein Anwalzen des ausgebrachten Saatguts empfohlen wird (Schneider 2019). Nach einer erfolgreichen Etablierung gilt der Weiße Steinklee als sehr trockenresistent (Kolbe et al. 2006; Sheaffer et al. 2018; Schneider 2019) und ist nach Ellenberg und Leuschner (2010) der Feuchtezahl 3 zugeordnet. Optimal sind für das Wachstum mittlere Jahresniederschlagsmengen von 700 – 1100 mm, jedoch bildet die Art auch in Regionen mit 400 mm Jahresniederschlag noch gute Erträge und ein Überleben der Pflanze ist auch bei 90 mm mittlerem Jahresniederschlag noch möglich (untere Grenze des Toleranzbereiches) (Duke 1981). Die mitunter auf dem zweijährigen Lebenszyklus basierenden Trockentoleranzmechanismen der Art werden von Faensen-Thiebes (1992) beschrieben. So ist ein Überleben und die Etablierung des WSK unter Trockenbedingungen im Ansaatjahr, unter Hinnahme einer verminderten Biomasseproduktion und durch die intensive Regulierung der stomatären Leitfähigkeit möglich. Im zweiten Jahr, in dem es nach der Blüte sicher zu einem Absterben kommt, geht die Pflanze zur Strategie der Dürreflucht über und leitet die Biomasse- und Samenproduktion bereits vor der Trockenperiode ein (Faensen-Thiebes 1992). Verwendung findet der WSK vor allem als Gründüngungspflanze und Bienenweide. So bietet er eine Nahrungsgrundlage für etwa 30 verschiedene Wildbienenarten (Schneider 2018) und gehört mit seiner hohen Nektarproduktion zu den wertvollsten Pflanzen in der Honiggewinnung (Duke 1981; Sheaffer et al. 2018). Als Gründüngungspflanze zeichnet er sich insbesondere durch sein Pfahlwurzelsystem aus, welches den Boden intensiv durchdringt, verdichtete Schichten aufbrechen und das Bodengefüge für den Wasser- und Nährstoffhaushalt nachhaltig verbessern kann (Bull 2014; Baddeley et al. 2017). Nach Freyer et al. (2005) hinterlässt der Weiße Steinklee etwa 25 – 35 dt TM ha⁻¹ an Wurzel- und Ernterückständen, die Nahrung für das Edaphon bieten, ein heterogenes Porensystem bilden und nach dem mikrobiellen Abbau einen Teil der biologischen N-Düngung für die Nachfrucht realisieren. Der oberirdische Biomassertrag kann im Ansaatjahr 25 – 90 dt TM ha⁻¹ und im Hauptnutzungsjahr 50 – 150 dt TM ha⁻¹ betragen (Schneider 2019). Dabei wird die hohe jährliche N₂-Fixierleistung der Art mit 80 – 250 kg ha⁻¹ beziffert (Freyer et al. 2005). Ein weiterer Vorteil des Anbaus von WSK besteht in der Beikraut unterdrückenden Wirkung. Nachdem die Pflanzen die Phase der langsamen Jungendentwicklung (Frame 2005) überwunden haben, können das üppige Wachstum der Art und die dadurch veränderten Lichtverhältnisse im Bestand zu einem Rückgang des Beikrautbesatzes führen (Moyer et al. 2007). Als möglicher Grund für die Reduzierung der Beikrautpopulationen werden daneben auch allelopathische Effekte auf Basis des im WSK enthaltenen Kumarins genannt (ebd.). Ein Unterpflügen des Gründüngungsbestandes wird im Frühling des zweiten Vegetationsjahres empfohlen (Sheaffer et al. 2018). Eine Futternutzung von WSK ist grundsätzlich möglich, wird jedoch nicht uneingeschränkt empfohlen (Kolbe et al. 2006). Einerseits resultiert aus dem Kumaringehalt der Pflanzen eine geringe Schmackhaftigkeit.

Andererseits wird der sekundäre Pflanzeninhaltsstoff durch Schimmelpilze, die sich im Zuge der Silagebereitung im Substrat ansammeln können, zu Dicumarol umgebildet, was bei den Tieren eine Blutgerinnungsstörung auslösen kann (Frame 2005; Schneider 2019). Kumarinarme Sorten des WSK sind verfügbar (Freyer et al. 2005). Wird eine Futternutzung angestrebt, sollte die Beweidung bzw. die Ernte zur Heu- und Silagebereitung vor dem Knospenstadium erfolgen, da die Stängel danach rasch verholzen (Sheaffer et al. 2018). Des Weiteren kann WSK als Energiepflanze, bspw. als Substrat für Biogasanlagen, genutzt werden (Spiegel et al. 2014; Schneider 2019).

2.4.5 Erdklee *Trifolium subterraneum* L.

Der Erdklee ist eine einjährig-überwinternde Art der Gattung *Trifolium* L. (Duke 1981). Sie ist im Mittelmeerraum und Westasien heimisch (Kolbe et al. 2004; Frame 2005). Ihr heutiges Hauptanbaugebiet liegt in Australien, wo sie als Futterpflanze Verwendung findet (Baresel 2014). Der Erdklee unterscheidet sich insbesondere hinsichtlich seiner Wuchsform von anderen FLG. Die Pflanze bildet kreisförmige Horste aus niederliegenden Stängeln, die sich durch ihre horizontale Wachstumsrichtung miteinander verzweigen und eine Länge von bis zu 80 cm erreichen können (Duke 1981). Auf diese Weise bildet Erdklee dichte Bestände mit geringen Aufwuchshöhen (Baresel 2014). Die Laubblätter sind dreizählig, wobei die Fiederblätter eine dreieckige Form und eine beidseitige Behaarung aufweisen. Die Blütenstände der Art bestehen aus 3 – 6 weiß- bis rosafarbenen Blüten, die sich nach der Befruchtung dem Boden zuneigen und einen kugelförmigen Fruchtstand ausbilden, der 2 – 4 Samen enthält. Diese werden in die oberste Bodenschicht eingegraben, wo die Samen abreifen (Geokarpie) und in der nächsten Vegetationsperiode keimen (Duke 1981; Frame 2005). Aufgrund dieser Fähigkeit zur Selbstaussaat können Erdkleebestände, trotz ihrer strikten Einjährigkeit, ausdauernd erscheinen (Baresel 2014). Das Wurzelsystem des Erdkleees, das durch eine vielverzweigte Hauptwurzel gekennzeichnet ist, entwickelt nur einen geringen Tiefgang, wobei sich der Hauptanteil der Wurzelbiomasse im Oberboden bis in eine Tiefe von 25 cm befindet (Kolbe et al. 2004; Frame 2005). Die trockenresistente Art wächst bevorzugt auf leichten bis mittelschweren Böden, die gut entwässert sind und eine neutrale bis leicht saure Bodenreaktion aufweisen (Vasileva und Vasilev 2020). Während der Erdklee gegenüber alkalischen Böden empfindlich reagiert, zeichnet er sich durch eine hohe Toleranz gegenüber einem sauren Bodenmilieu aus und erbringt auch bei einem pH-Wert von 4,2 noch nahezu Maximalerträge (Evans et al. 1990; Guo et al. 2012). Die beste Entwicklung zeigt er in warmen Klimaten mit mild-feuchten Wintern (Duke 1981). Unter diesen Bedingungen ist eine Aussaat bzw. Keimung im Herbst und eine Hauptwachstumsphase bis ins Frühjahr üblich (Vasileva und Vasilev 2020). Dieser Lebenszyklus des Erdkleees, der mit der Samenreife und dem Absterben der

Pflanze vor dem Sommer endet, ist als Adaption der Art an die klimatischen Bedingungen ihrer mediterranen Herkunftsgebiete zu verstehen (Baresel et al. 2003; Frame 2005), welche insbesondere durch Trockenperioden im Sommer geprägt sind. Folglich ist der Trockentoleranzmechanismus des Erdklee als eine Strategie der Dürreflücht zu kategorisieren. Dieser ermöglicht es der Art auch in Regionen mit mittleren Jahresniederschlagsmengen von 350 mm zu bestehen (Frame 2005). Die Anpassung an ein mild-feuchtes Winterklima geht mit einer begrenzten Frosttoleranz der Art einher, weshalb in Deutschland grundsätzlich eine Frühjahrssaat ab Mai empfohlen wird (Kolbe et al. 2004). Baresel (2014) konnte in mehrjährigen Anbauversuchen jedoch Sorten identifizieren, die auch unter deutschen Bedingungen winterhart sind. Der optimale Zeitpunkt für eine Herbstansaat ist Mitte September, da die Pflanzen bis zum Kälteeinbruch bereits eine gute Bestandsetablierung und ein passendes Entwicklungsstadium zur Überwinterung erreicht haben (Finckh et al. 2016). In Deutschland wird die Art vorrangig als Gründüngungspflanze genutzt (Kolbe et al. 2004) und als Lebendmulch in verschiedenen Ackerkulturen erprobt (Baresel und Reents 2006; Stieber und Schmidtke 2011). In Lebendmulchsystemen, in denen Erdklee als Untersaat der Körnererbse etabliert wurde, konnte eine gute Beikrautunterdrückung erreicht werden (Stieber und Schmidtke 2011). Auch im Zwischenfruchtanbau wirkt Erdklee bei guter Etablierung Beikraut regulierend (Scavo et al. 2020). Als Lebendmulch für Wintergetreide verbesserte er die N-Dynamik des Anbausystems (Baresel und Reents 2006). Im Vergleich zu konkurrenzstärkeren und perennierenden Arten wie dem Weiß- und Rotklee erweist sich Erdklee hier als besonders geeignet, da der interspezifische Konkurrenzdruck aufgrund des verkürzten Lebenszyklus des Erdklee zur Kornfüllungsphase des Getreides abfällt (Baresel 2014). Weiterhin kann die Art als Futterpflanze Verwendung finden. So wird Erdklee in den niederschlagsarmen Regionen Australiens, mit jährlichen Niederschlagsmengen von weniger als 550 mm, für Rinder und Schafe angebaut (Smetham 2003). Sein Futterwert hängt dabei stark vom Entwicklungsstadium ab. Der Erdklee eignet sich sowohl für die Heu- und Silagebereitung, als auch zur Beweidung. Um Fruchtbarkeitsstörungen bei den (Weide-) Tieren zu vermeiden, sollte auf die Auswahl östrogenarmer Sorten geachtet werden (Reed 2016). Nach Frame (2005) korreliert die Biomasseproduktion einer Erdklee-Ansaat positiv mit der Dauer der Vegetationsperiode, ist also davon abhängig, ob es sich um eine früh-, mittelspät- oder spätblühende Sorte handelt. In einem neuseeländischen Anbauversuch erzielten 15 verschiedene Erdklee-Sorten in einem zweischnittigen Nutzungsregime einen mittleren TM-Ertrag von 42 dt ha⁻¹. Die höchsten TM-Erträge wurden dabei sowohl von einer mittelspät- als auch spätblühenden Sorte erzielt und lagen bei rund 80 dt ha⁻¹ (Teixeira et al. 2017). In Bulgarien wurden für Erdklee TM-Erträge zwischen 36 und 43 dt ha⁻¹ beschrieben (Vasileva und Vasilev 2020). Die jährliche N₂-Fixierleistung der Art wird mit

einer Spanne von 50 – 188 kg ha⁻¹ angegeben (Bolger et al., 1995 zit. nach Vasileva und Vasilev 2020).

2.4.6 *Serradella Ornithopus sativus* Brot.

Die Serradella ist eine einjährige Futterleguminose der Gattung *Ornithopus* L., die in den Küstenregionen Nordafrikas und Südeuropas heimisch ist (Duke 1981). Ihre stark verzweigten Stängel (Kolbe et al. 2006) zeigen Wuchshöhen von bis zu 70 cm (Frame 2005). Die Laubblätter der Art setzen sich aus zehn bis 15 paarigen und einem endständigen Fiederblättchen zusammen (Kolbe et al. 2006). Die doldenartigen Blütenstände der Serradella bestehen aus zwei bis fünf weißen bis rosafarbenen Einzelblüten, aus denen mit der Fruchtbildung etwa 3 cm lange, segmentierte und mehrsamige Hülsen hervorgehen (Frame 2005). Das von einer Pfahlwurzel ausgehende und sich intensiv in Nebenäste verzweigende Wurzelsystem (Kolbe et al. 2006) reicht tief in den Boden (Revell 2007) und trägt damit zur hohen Trockentoleranz der Art bei (Bolland 1983). Die Serradella zeigt die beste Entwicklung auf gut entwässerten, tiefgründigen Sandböden und sandigen Lehmen (Revell 2007), wobei sie ein feuchtes Küstenklima bevorzugt (Kolbe et al. 2006). So liegt der jährliche Niederschlagsbedarf der Art bei mindestens 500 (Frame 2005) bzw. bei über 550 mm (Freyer et al. 2005), wobei die untere Toleranzgrenze bei etwa 350 mm erreicht wird (Revell 2007). Hinsichtlich der Bodenreaktion zeichnet sich die Serradella durch eine hohe Toleranz gegenüber sauren pH-Werten aus. So zeigten Guo et al. (2012), dass die Art auch bei einem pH-Wert von 4,96 noch 90 % ihres in einer gekalkten Kontrollvariante erbrachten Maximalertrages erzielt und die Ertragsreduktion bei einer pH-Wertsenkung auf 4,2 knapp 44 % betrug. Die Nodulation der Wurzeln durch Rhizobien lag dabei mit und ohne Kalkbehandlung auf demselben Niveau (Guo et al. 2012). Ihre Hauptwachstumsphase hat die Serradella im Spätsommer bis Herbst, worin neben der tiefreichenden Pfahlwurzel ein weiteres Element ihrer Trockentoleranz liegt (Freyer et al. 2005), da sie in den trockenen Sommermonaten nur wenige Ressourcen beansprucht. Dennoch beeinträchtigen restriktive Bodenfeuchtigkeitsbedingungen, vor allem in der anfänglichen Entwicklung, die Produktivität der Art, da sie die Ausbildung von Seitentrieben reduzieren (Staniak et al. 2017). Nach ihrer Aussaat, die bis in den Mai erfolgt (ebd.), ist die Art wie viele andere FLG durch eine langsame Jungendentwicklung geprägt und anfällig für eine Verunkrautung der Bestände (Frame 2005). Hinsichtlich ihrer hohen Rohproteingehalte von bis zu 25 % während der Blüte (Revell 2007), ihrer guten Verdaulichkeit und geringen Verholzungsneigung (Kolbe et al. 2006) stellt die Serradella als Grünschnitt oder im Gemenge mit Gräsern auch als Silage oder Heu ein hochwertiges Futtermittel für Poly- und Monogastrier dar (Freyer et al. 2005). Sie wird zudem als Gründüngung verwendet (Duke 1981) und zeigte sich als Untersaat in Triticalebeständen wirksam in der Unterdrückung von Beikräutern (Staniak et al.

2017). Die jährliche Ertragsleistung der Art wird von Freyer et al. (2005) mit einer Spanne von 25 – 70 dt ha⁻¹ angegeben. In einem portugiesischen Versuch zur Leistungsfähigkeit verschiedener Futter- und Körnerleguminosen in der Stellung einer Winterzwischenfrucht konnte die Seradella im Durchschnitt zweier Erntejahre einen TM-Ertrag von 51,4 dt ha⁻¹ Jahr⁻¹, bei einer Vegetationsdauer von 6 bzw. 7 Monaten, erzielen (Perdigão et al. 2012). Der N_t-Gehalt des Aufwuchses betrug dabei, ebenfalls im Durchschnitt beider Versuchsjahre, 122 kg ha⁻¹ (ebd.).

2.5 Potenzielle Anbaueignung verschiedener Futterleguminosen

Die potenzielle Anbaueignung der zuvor vorgestellten FLG für den Standort Brandenburg ergibt sich aus dem Abgleich der Standortbedingungen des Landes mit den aus der einschlägigen Literatur exzerpierten Standortansprüchen der verschiedenen Arten. Als entscheidende Indikatoren werden dabei die Bodenart, der pH-Wert des Bodens sowie die Niederschlagsbedingungen herangezogen. Mit dem Ziel eine für die vorliegende Arbeit praktikable und schnell zu erfassende Übersicht über die potenziellen Anbaueignungen zu geben, werden hinsichtlich dieser drei Faktoren lediglich die (flächenmäßig) dominierenden Ausprägungen berücksichtigt und die standörtliche Heterogenität Brandenburgs vernachlässigt. Insofern werden als Bodenarten des Pflanzenstandortes BRB vereinfacht die nach (LBGR 2022) am weiträumigsten verbreiteten Bodenarten im Oberboden, *Sand* (BG 1) und *schwach lehmiger Sand* (BG 2), definiert (siehe Kap. 2.1.1). Als pH-Wert des Bodens werden, in Bezug auf die Veröffentlichung von Zimmer et al. (2012), die für diese Bodenartengruppen ermittelten durchschnittlichen pH-Werte (5,6 (BG 1); 5,9 (BG 2)) als *pH-Wert* ≤ 5,9 zusammengefasst. Der dritte Indikator der Niederschlagsbedingungen bezieht sich zum einen auf die unter dem Einfluss des Klimawandels zu erwartende mittlere Jahresniederschlagsmenge der Region und zum anderen auf die standortspezifischen Auffälligkeiten in der jährlichen Niederschlagsverteilung. So sind hier die für BRB typische *Frühjahrsstrockenheit* und die sich im Zusammenhang mit dem Klimawandel voraussichtlich intensivierende *Sommertrockenheit* sowie eine durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge von 587 mm angegeben. Letztere ergibt sich, hinsichtlich steigender globaler CO₂-Emissionen (International Energy Agency 2022) aus der Annahme der Autorin, dass die langfristige Entwicklung der regionalen Jahresniederschlagsmenge entsprechend des RCP 8.5 verlaufen (Schwalm et al. 2020) und bis zum Jahr 2100 einen Anstieg um 6 % im Vergleich zur Bezugsperiode (1971 – 2000, 554 mm) (DWD 2019) verzeichnen wird. Auch hier wird im Sinne der Übersichtlichkeit auf die Berücksichtigung der räumlichen Niederschlagsvariabilität in BRB verzichtet. Der Abgleich der Standortansprüche der verschiedenen FLG mit den standörtlichen Bedingungen Brandenburgs und die sich daraus ergebende potenzielle Anbaueignung jeder einzelnen Art sind in **Tabelle 2** dargestellt. Die für den Abgleich wesentlichen Standortansprüche der Arten wurden für die Erstellung der

Tabelle zuvor in die verwendeten Abstufungssymbole (++, +, 0, -, -) codiert. Diese Codierung ist für eine verbesserte Nachvollziehbarkeit den Rohdaten (2.5 Codierung) der Arbeit beigelegt.

Tabelle 2: Potenzielle Anbaueignung verschiedener Futterleguminosen für den Standort Brandenburg unter dem Einfluss des Klimawandels.

	Bodenart	pH-Wert Boden	Niederschlagsbedingungen	pot. Anbaueignung
	Sand, schwach lehmiger Sand	≤ 5,9	587 mm; Frühjahrs-, Sommertrockenheit	Brandenburg
Gewöhnlicher Hornklee	+	+	++	++++
Gelbklee	+	0	++	+++
Bockshornklee	0	0	++	++
Weißer Steinklee	++	0	+	+++
Erdklee	++	+	++	++++
Serradella	++	++	0	++++
Perserklee	-	0	0	-
Alexandrinerklee	-	0	-	--
Schwedenklee	--	+	-	--
Inkarnatklee	+	+	-	+
Weißklee	+	+	0	++
Rotklee	-	0	--	---
Luzerne	+	0	++	+++

- ++ Gegebenheit entspricht dem Optimum der Art
- + Gegebenheit entspricht nicht dem Optimum, aber Art zeigt gute Anpassung/ Verträglichkeit
- 0 weder gute Verträglichkeit noch Unverträglichkeit der Gegebenheiten; bzw. keine Angaben
- Art verträgt Gegebenheiten nicht/ schlecht
- Art verträgt Gegebenheiten sehr schlecht

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die in der einschlägigen Literatur als trockentolerant beschriebenen FLG (Gewöhnlicher Hornklee, Gelbklee, Bockshornklee, Weißer Steinklee, Erdklee, Serradella, Luzerne) eine bessere potenzielle Anbaueignung für den Standort BRB aufweisen als die restlichen Arten. Die potenzielle Anbaueignung lässt sich zwischen den trockentoleranten Arten wie folgt abstufen:

Erdklee > Gew. Hornklee, Serradella > Weißer Steinklee, Gelbklee, Luzerne > Bockshornklee.

Unter den nicht als trockentolerant geltenden Arten zeigt der Rotklee die geringste potenzielle Anbaueignung für den Standort Brandenburg, gefolgt vom Schweden- und Alexandrinerklee, dem Perserklee, dem Inkarnat- und dem Weißklee.

3 Material und Methoden

Hinsichtlich der Frage- und Zielstellung der vorliegenden Arbeit wurde im Jahr 2021 ein Feldversuch auf der Lehr- und Forschungsstation (LFS) Gut Wilmersdorf installiert, in dem ausgewählte FLG und FLG-Gras-Gemenge auf ihre standortspezifische Anbaueignung unter dem Einfluss des Klimawandels hin untersucht wurden. Der Versuch besteht bislang als Einzelversuch, soll jedoch den Beginn und die Grundlage für eine in den nächsten Jahren folgende Versuchsserie bilden.

3.1 Operationalisierung der Forschungsfrage

Um schließlich eine Auswertung des angelegten und in der vorliegenden Arbeit betrachteten Versuchs vor dem Hintergrund der Forschungsfrage zu ermöglichen, soll zunächst ein Ansatz zur Messbarmachung dieser gegeben werden. Die Forschungsfrage lautet:

Welche Futterleguminosenarten bzw. -sorten und Futterleguminosen-Gras-Artengemenge sind unter dem Einfluss des Klimawandels auch zukünftig für einen Anbau in Brandenburg geeignet?

Zentrales Element der Fragestellung ist der Begriff der *Anbaueignung*. Diese wird in der vorliegenden Arbeit in einen zeitlichen („zukünftig“) und räumlichen („in Brandenburg“) Bezugsrahmen gesetzt und von der Autorin in zwei Stufen definiert. Aus dem Abgleich der klimatischen und pedologischen Standortbedingungen Brandenburgs mit den Standortansprüchen der verschiedenen FLG-Arten ergibt sich zunächst eine literaturgestützte *potenzielle Anbaueignung* (siehe 2.5). Im empirischen Teil der Arbeit wird die *empirisch hergeleitete Anbaueignung* der Arten, Sorten und Artengemenge über die jeweilige *Etablierungs-* und die *Ertragsleistung* der Bestände definiert. Dabei wird die Etablierungsleistung in Anlehnung an das Vorgehen in anderen Studien (Teixeira et al. 2017; Hein und Waschl 2018) wiederum über den *Kulturdeckungsgrad [%]* und die *Verunkrautung [%]* der Bestände quantifiziert. Die Ertragsleistung ergibt sich aus dem *Trockenmasseertrag [dt ha⁻¹]*, dem *Ertragsanteil der Leguminosen [%]* an der Gesamttrockenmasse sowie der *N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹]* des jeweiligen Bestandes.

Bei der Bildung der Hypothesen für die vorliegende Arbeit wurden die potenzielle und empirische Anbaueignung unter der Annahme, dass eine höhere potenzielle Anbaueignung eine bessere empirische Anbaueignung der betreffenden Art bedingt, in Zusammenhang gesetzt.

3.2 Auswahl der Futterleguminosen

Im Rahmen des Feldversuchs wurden insgesamt elf verschiedene FLG bzw. FLG-Gras-Gemenge geprüft. Auf Grundlage der Literaturrecherche und der daraus hervorgegangenen Erkenntnisse

über die standörtlichen Gegebenheiten und zu erwarteten klimatischen Veränderungen in Brandenburg wurden **alternative Futterleguminosen** mit einer hohen Trockentoleranz für den Versuch ausgewählt, die hinsichtlich ihrer Standort- und Klimaansprüche verschieden hohe potenzielle Anbaueignungen für die Region aufweisen (siehe Kap. 2.5) und miteinander verglichen werden sollen. Es handelt sich dabei um den *Weißten Steinklee*, den *Bockshornklee*, den *Gelbklee*, den *Erdklee* und den *Gewöhnlichen Hornklee*. Diese fünf Arten wurden jeweils als Reinsaat in den Versuch integriert.

Als eine in BRB bereits weiträumig **etablierte Futterleguminose** wurde zudem die *Luzerne*, mit der Sorte *Luzelle* und einem Mix der Sorten *Planet*, *Fleetwood* und *Fraver (DSV 2060)*, sowohl als Reinsaat als auch im FLG-Gras-Gemenge (*Camena Luzerne-Gras 100*) in den Versuch aufgenommen.

Ferner wurden aufgrund der hohen Praxisrelevanz und zahlreicher Vorteile im Anbau (siehe Kap. 2.2.1) auch weitere **Futterleguminosen-Gras-Artengemenge** mit unterschiedlichen Standort- und Klimaansprüchen für den Versuch ausgewählt. So enthalten die Mischung *DSV 2256* aus Einjährigem Weidelgras, Perser- und Alexandrinerklee und das Gemenge *DSV M5* aus Deutschem Weidelgras, Rotklee, Inkarnatklee, Schweden- und Weißklee Arten mit einer vergleichsweise geringen Trockentoleranz (siehe Kap. 2.2.1; Kap. 2.5) und sind daher vornehmlich für frische bis feuchte Standorte geeignet. Die Mischungen *DSV M4* bestehend aus Luzerne, Deutschem Weidelgras, Weißklee, Hornklee, Gelbklee und Serradella und *DSV 2215* bestehend aus Gelbklee, Hornklee, Luzerne, Weißklee, Deutschem Weidelgras, Knaulgras, Rohrschwengel, Rot-schwengel und Wiesenschwengel sind hingegen für den Anbau auf trockenen Standorten ausgewiesen. Hinsichtlich der jeweils in den Gemengen enthaltenen Arten wird die potenzielle Anbaueignung der Mischungen *DSV 2256* und *DSV M5* für den Standort Brandenburg geringer eingestuft als die der Mischungen *DSV M4* und *DSV 2215*.

3.3 Versuchsaufbau

Bei dem betrachteten Versuch handelt es sich um einen einfaktoriellen Parzellenfeldversuch, in welchem die FLG-Art bzw. -Sorte bzw. das FLG-Gras-Gemenge den Prüffaktor darstellt und die oben genannten FLG und FLG-Gras-Gemenge als die elf Prüffaktorstufen fungieren. Diese wurden in zweifacher Wiederholung (Block 1 und 2) angesät, woraus sich eine Anzahl von 22 Parzellen ergibt. Im Falle des hier betrachteten Versuchs besteht eine Parzelle (Versuchseinheit) aus fünf Einzelparzellen, auf denen dieselbe Faktorstufe installiert wurde und die fortfolgend als Parzelleneinheit bezeichnet werden. Aufgrund von Säfehlern in der Versuchsdurchführung war eine Einzelparzellenanzahl von fünf nicht für jede Parzelleneinheit bzw. jedes Prüfglied

einzuhalten. Abweichungen hiervon sind in den Boniturbögen der Datenaufnahmen (Originaldaten) vermerkt. Die Verteilung der Prüfglieder (Varianten) innerhalb der beiden Wiederholungsblöcke folgte einer systematischen und sich wiederholenden Anordnung. Eine vollständige Randomisierung der Verteilung war folglich nicht gewährleistet. Die Prüffaktorstufen, die Prüfgliederanordnung innerhalb der Wiederholungsblöcke, eine Skizze des Versuchsfeldblocks sowie einer Parzelleneinheit sind in **Abbildung 2** dargestellt. Vertiefende Informationen den Eigenschaften und Herkünften des Saatguts sowie zur Aussaatstärke befinden sich im Anhang der Arbeit.

Zur Prüffaktorstufe 9 ist anzumerken, dass die Luzerne in Block 1 als Reinsaat in Form des Sorten-Mix DSV 2060 und in Block 2 als Gemenge in Form des Camena Luzerne-Gras 100 ausgesät wurde.

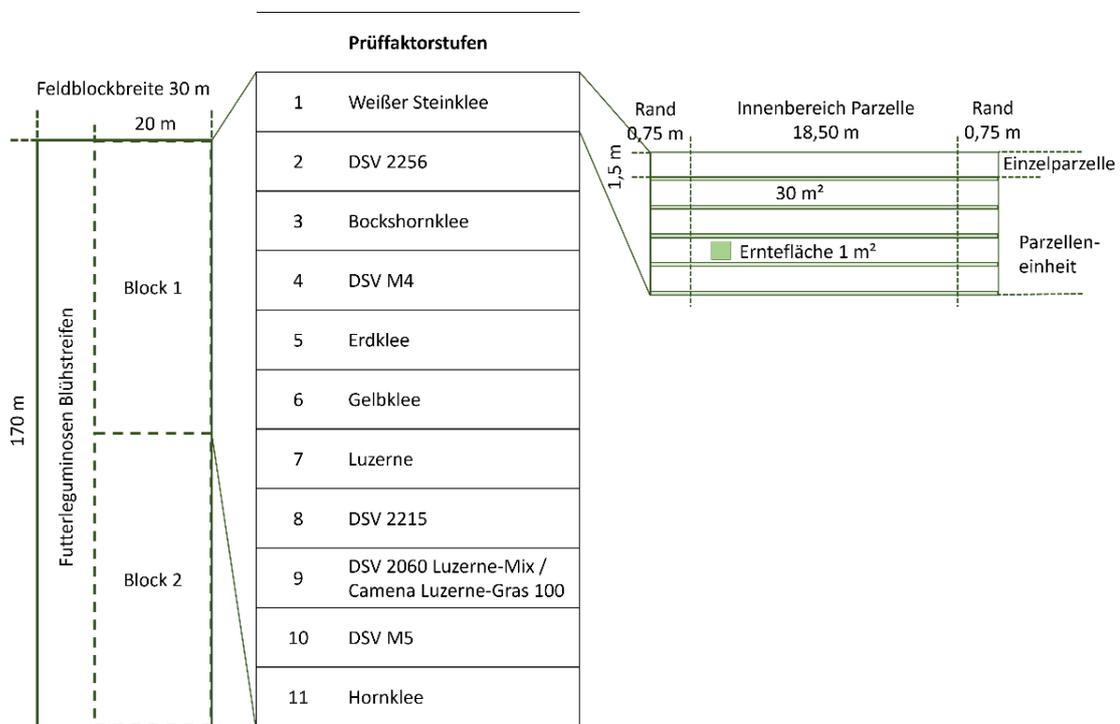


Abbildung 2: Skizze der Versuchsanlage und Anordnung der Prüffaktorstufen in den Blocks.

3.4 Versuchsstandort und Witterung

Der Parzellenfeldversuch wurde auf der LFS Wilmersdorf, 12 km nordwestlich der Stadt Angermünde im brandenburgischen Landkreis Uckermark, durchgeführt. Diese wird in Kooperation des Landwirtschaftsbetriebes *Gut Wilmersdorf GbR* mit der *Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde* betrieben und im Rahmen verschiedenster Anbauversuche nach betriebsüblichen Bioland-Richtlinien ökologisch bewirtschaftet. Die LFS umfasst eine Fläche von ca. 4 ha, auf welcher fünf etwa 0,47 ha große Feldblöcke eingerichtet sind. Einer dieser Feldblöcke (Feldblock

2) stellte im Jahr 2021 die Anbaufläche für den betrachteten Feldversuch dar. Der Landkreis Uckermark liegt zum größten Teil im jüngsten glazialen Gürtel Brandenburgs, dem jüngeren Jungmoränengebiet, welches durch ein welliges Landschaftsbild sowie glaziale Grundmoränenstandorte geprägt ist (MLUK 2020). Auch die LFS Gut Wilmersdorf zeigt das typische Relief einer kuppigen Grundmoränenlandschaft mit einem Hang in südöstliche Richtung, der auf einer Länge von 250 m um etwa 9,5 m abfällt (Steigung = 3,8 %) (Hauck et al. 2021). Die Bodenarten im Oberboden des Standortes sind mittel schluffige (Su3) und schwach (Sl2, Sl3) bis stark lehmige Sande (Sl4) der Bodenartengruppen 2 und 3, die innerhalb der Fläche eine ungleichmäßige Verteilung unter Herausbildung einer lehmigen Kuppe aufweisen. Die teilweise unter Erosionsvorgängen herausgebildeten charakteristischen Bodentypen der Versuchsfläche sind die Pararendzina auf der erosionsgefährdeten Kuppe und am Hang, die Parabraunerde und der Kolluvisol in den Senkenbereichen, stellenweise mit einer Pseudovergleyung (Hauck et al. 2021). Hinsichtlich der Nährstoffgehalte und pH-Werte des Bodens weist der Standort eine hohe Heterogenität auf, wobei durch den anstehenden Geschiebemergel im Allgemeinen ein höherer pH-Wert im erodierten Kuppenbereich zu erwarten ist. Auf dem für die vorliegende Arbeit relevanten Feldblock 2 wurden von Hauck et al. (2021) drei Monitoring-Punkte beprobt und an drei weiteren Positionen innerhalb bzw. in nächster Nähe des Feldblocks wurde zudem eine Bestimmung des Bodentyps vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Erhebungen sind in **Abbildung 3** und **Tabelle 3** separat dargestellt.



Abbildung 3: Standorte zur Bestimmung des Bodentyps und Monitoring-Punkte auf Feldblock 2 der LFS Gut Wilmersdorf (nach Hauck et al., 2021) (LGB, 2022).

Das landwirtschaftliche Ertragspotenzial des Standortes wird mit einer Ackerzahl zwischen 45 und 48 beziffert (LGB 2022). Der Humusgehalt des Oberbodens liegt bei 2 – 3 % (Hauck et al. 2021).

Tabelle 3: Einordnung der Monitoring-Punkte auf Feldblock 2 in Bodengruppen (nach LGB, 2022), ihre bodenchemischen Parameterwerten (nach Hauck et al., 2021) sowie Zuordnung der Gehaltsklassen (nach von Wulffen et al., 2008).

	BG	pH-Wert	P [mg/100 g]	K [mg/100 g]	Mg [mg/100 g]
MO 4	3	5,71	3,9	18,4	6,5
Gehaltsklasse		B	B	D	C
MO 5	2	7,12	5,2	18,8	4,8
Gehaltsklasse		E	C	D	C
MO 6	2	5,32	4,3	17,4	6,0
Gehaltsklasse		B	B	D	C

Die mittlere Jahrestemperatur der Region, in der sich die Versuchsfläche befindet, beträgt 8,9 °C bei einer Jahresniederschlagsmenge von 516 mm im langjährigen Mittel der Jahre 1981 – 2010 (Wetterstation Angermünde). Die Jahressumme der Sonnenscheindauer liegt für diesen Zeitraum bei durchschnittlich 1.719 Stunden (DWD o. J.c). Die für das Versuchsjahr 2021 erfassten Witterungsdaten sind in **Abbildung 4** dargestellt. Im Vergleich zu diesen langjährigen Mittelwerten war das Versuchsjahr 2021 mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 9,5 °C und einer Niederschlagssumme von 619 mm etwas wärmer und niederschlagsreicher. Mit 1.623 Stunden lag die Sonnenscheindauer bei knapp 95 % des vieljährigen Durchschnitts.

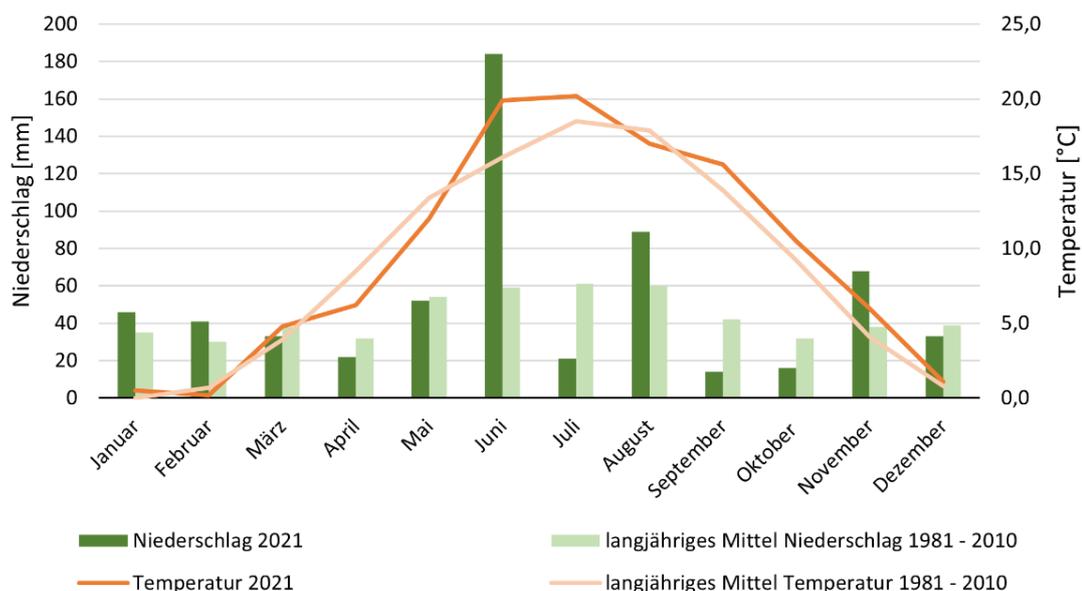


Abbildung 4: Niederschlags- und Temperaturwerte am Versuchsstandort (Wetterstation Angermünde) im Jahr 2021 sowie im langjährigen Mittel der Jahre 1981 – 2010 (DWD o. J.c, o. J.f).

Die Vegetationsperiode der FLG und FLG-Gras-Gemenge begann im April mit einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau, welches auch über den Mai hinweg bestehen blieb und eine Entwicklungsverzögerung der Pflanzen bedingt haben könnte. Die klimatische Wasserbilanz fiel in beiden Monaten negativ aus (DWD o. J.d). Die Bodenfeuchte lag bis in eine Bodentiefe von 50 cm jedoch immer mindestens im Bereich einer ausreichenden Wasserversorgung ($\geq 50\%$ nFK; unter Winterweizen) (DWD o. J.a). Der Juni stellte einen der wärmsten und vor allem den regenreichsten Monat im Verlauf der Vegetationsperiode dar. Bis zur Monatsmitte sank die Bodenfeuchte in einer Tiefe von 50 cm auf einen kritischen Wert von unter 50% nFK (unter Winterweizen). In der zweiten Monatshälfte wurden Werte von unter 30% bzw. unter 10% nFK erreicht (DWD o. J.a), womit vor allem flachwurzelnde Pflanzen über eine Dauer von etwa 4 Wochen unter einem zunächst leichten bis hin zu einem extremen Trockenstress standen. In einer Bodentiefe von 100 cm wurde das kritische Niveau von 50% nFK erst Ende des Monats unterschritten. Die Niederschlagsmenge im Juni betrug dennoch mehr als das Dreifache des langjährigen Mittels, was auf ein einzelnes Starkregenereignis am 30. Juni zurückzuführen ist, bei welchem knapp 168 mm Niederschlag fielen (DWD 2021). Dies könnte zu einer Erhöhung der Bodenwasservorräte geführt haben. Jedoch ist hinsichtlich der hohen Niederschlagsintensität und einer möglichen Hydrophobie des Bodens aufgrund vorhergehender Trockenphasen auch eine begrenzte Infiltration sowie ein verstärkter Oberflächenabfluss des Wassers mit Erosionswirkung als Konsequenz in Betracht zu ziehen. Der Juli war im Vergleich zum vieljährigen Mittel im Versuchsjahr wärmer und niederschlagsärmer. Eine ausreichende Wasserversorgung der Kulturen war bis in eine Bodentiefe von 50 cm dennoch jederzeit gegeben. In einer Tiefe von 100 cm blieb die Bodenfeuchte den gesamten Monat unterhalb eines Niveaus von 50% nFK (DWD o. J.a). Der August war wiederum durch niederschlagsreichere und kühlere Bedingungen geprägt, was in



Abbildung 5: Braune Knospen der Luzelle zum Erntetermin.

einigen Beständen die Entwicklung der Blüten durch ein unzureichendes Abtrocknen der Knospen, wie auf **Abbildung 5** an der Luzelle zu erkennen, beeinträchtigte.

3.5 Versuchsdurchführung

Im Vorversuchsjahr 2020 wurde der Feldblock 2 der LFS Wilmersdorf mit Sommergetreide und Rispenhirse bestellt. Nach der Ernte im Herbst wurde die Fläche wendend bearbeitet und lag den Winter über brach. Im Frühjahr des Versuchsjahres fand die Saatbettbereitung mittels Federzinkengrubber und Kreiselegge statt, bevor am 21. April 2021 die Aussaat der FLG-Reinsaaten und FLG-Gras-Gemenge mit einer Wintersteiger Parzellensämaschine (1,30 m Arbeitsbreite) erfolgte. Das Saatgut wurde dabei in einem Reihenabstand von 12,5 cm und möglichst flach in der Ackerkrume abgelegt. Aufgrund der Unebenheit der Fläche ist jedoch von einer Varianz in der Aussaattiefe auszugehen, was den Feldaufgang der Ansaaten beeinflussen kann. Eine Impfung des FLG-Saatguts durch die Versuchsansteller*innen wurde nicht vorgenommen, vereinzelte Arten bzw. Sorten werden jedoch obligatorisch vom jeweiligen Saatgutunternehmen geimpft. Eine Übersicht hierzu befindet sich im Anhang. Eine Düngung oder Kalkung der Versuchsfläche fand nicht statt. Nach 50 Wachstumstagen wurde die Versuchsfläche angesichts eines starken Beikrautbesatzes am 10. Juni 2021 erstmals gemulcht. Der Mulchschnitt wurde, um die Konkurrenzsituation für die Ansaaten zu verbessern, oberhalb der FLG- und Gemenge-Aufwüchse in einer Höhe von 10 cm angesetzt und mit einem Sichelmulcher (6 m Arbeitsbreite) durchgeführt. Am 29. Juni 2021 wurde nach 69 Wachstumstagen eine zweite intensivere Mulchung mit einem Schlegelmulcher (3 m Arbeitsbreite) vorgenommen, bei der auch die FLG- und FLG-Gras-Aufwüchse bis auf eine Höhe von 3 cm abgeschlegelt wurden. Dabei wurde der bereits in der Blüte stehende Bockshornklee (Prüffaktorstufe 3) unterhalb seines Wachstumsknotens beschädigt, was eine Regeneration und weitere Entwicklung beider Bestände (Block 1 und 2) verhinderte. Bei der Datenaufnahme konnte die Art daher nicht berücksichtigt werden. Die Datenerhebung im Versuch setzte sich aus regelmäßig durchgeführten Bonituren im Feld und der Erfassung verschiedener Prüfmerkmalswerte im Labor zusammen. Ab dem 6. Juli fanden in einem 14-tägigen Rhythmus insgesamt vier Bonituren auf der Versuchsfläche statt, bei der die fachgerechte Beurteilung der Versuchsobjekte vorgenommen wurde. Die Ertragsschnitte, die das Pflanzenmaterial für eine weiterführende Datenerhebung im Labor lieferten, wurden im Zuge der vierten und letzten Bonitur am 17. August, nach insgesamt 119 Wachstumstagen, durchgeführt.

3.6 Datenerhebung im Feld

Die im Feld durchgeführten Bonituren der FLG- und FLG-Gras-Bestände dienten der Beurteilung zuvor festgelegter Prüfmerkmale. Zu diesen zählten:

- Aufwuchshöhe der Bestände
- Gesamtdeckungsgrad der Aufwüchse
- FLG-, Gräser-, Kräuter-Anteil der Gesamtdeckung
- Entwicklungsstadien der Kulturarten
- Bestimmung der Beikraut- bzw. Beigräserarten
- Rhizobienbesatz der FLG-Wurzeln
- Aktivität der Knöllchenbakterien

Zu Beginn der ersten Bonitur am 06.07.2021 wurde durch die Autorin in jeder Parzelleneinheit ein Quadratmeter festgelegt, der den jeweiligen Bestand in Bezug auf die Aufwuchshöhe, deren Gleichmäßigkeit und den Beikraut- und Beigräserbesatz möglichst passgenau repräsentierte. Unter Aussparung der beiden Bockshornklee-Parzelleneinheiten sind insgesamt 20 Quadratmeter festgelegt und mittels farbiger Plastikstecken markiert worden. Diese stellten über die vier Bonituren hinweg den jeweils zu beurteilenden Ausschnitt eines Bestandes dar (Wilbois et al. 2004). Die einzelnen Prüfmerkmale wurden folglich am immer gleichen Ausschnitt des jeweiligen Aufwuchses erhoben (Wilbois et al. 2004), sodass die Entwicklung der Ansaaten über den Versuchszeitraum möglichst eindeutig und genau erfasst werden konnte.

Jede der vier Bonituren begann zunächst mit der Erfassung der groben Witterungsdaten (Wind, Sonnenschein, Bewölkung). Anschließend wurde der repräsentative Quadratmeter des jeweiligen Bestandes mit einem 1x1 m-Boniturrahmen umfasst, um die Schätzung des **Gesamtdeckungsgrades** [%] (DGD), also des Verhältnisses zwischen freiliegendem Boden und Vegetation, und der **Anteile der Futterleguminosen, Gräsern und Kräutern an der Gesamtdeckung** [%] des Aufwuchses zu erleichtern. Hierzu wurde der Rahmen gedanklich in vier Viertel geteilt, die von allen Pflanzen bzw. von den einzelnen Komponenten bedeckte Fläche den Teilstücken zugeordnet (Wilbois et al. 2004) und die entsprechenden Prozentsätze festgelegt. Im Nachgang wurde der Kulturdeckungsgrad (KDG) eines jeden Aufwuchses durch die Multiplikation des GDG mit dem jeweiligen prozentualen Kulturartenanteil errechnet, welcher in den Reinsaat-Beständen den FLG-Anteil und in den Gemenge-Bestände die Summe des FLG- und Gräseranteils an der Gesamtdeckung umfasst. Zeitgleich dazu wurden die verschiedenen Arten der Segetalflora bestimmt, um so etwaige **Hauptbeikräuter bzw. -gräser** in jedem Bestand und auf der Versuchsfläche auszumachen. Nachfolgend wurde das **Entwicklungsstadium** des jeweiligen Aufwuchses

nach den *Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen* des Bundessortenamtes (2000), im Speziellen nach den Vorgaben für *Gräser- und Kleearten einschließlich Luzerne, Eparsette* (Kap. 4.18), bestimmt. In den FLG-Gras-Gemengen wurde das Entwicklungsstadium differenziert für jede enthaltene Kulturart erfasst. Daran anschließend wurde die **Aufwuchshöhe** [cm] der Bestände gemessen. Die teilweise lückigen Aufwüchse erschwerten die korrekte Durchführung der Deckelmethode, weshalb die aufgrund der fehlenden Verdichtung des Aufwuchses zwar ungenauere, jedoch leichter umzusetzende Zollstockmethode angewandt wurde (Schleip et al. 2016). Dabei sind auf einer gedachten Zick-Zack-Linie fünf Messungen in jeder Einzelparzelle und damit, je nach Einzelparzellenanzahl, bis zu 25 Messungen je Bestand durchgeführt worden, deren Werte zu einer mittleren Aufwuchshöhe verrechnet wurden. Im letzten Schritt einer jeden Bonitur wurden der **Rhizobienbesatz** der FLG-Wurzeln und die **Aktivität der Knöllchenbakterien** untersucht. Dazu wurden mit Hilfe eines Spatens jedem Bestand mehrere Pflanzen jeder Futterleguminosenart bzw. -sorte entnommen und die Wurzelgeflechte von Erdresten befreit. Die vorhandenen Knöllchenbakterien wurden aufgeschnitten und auf eine Rotfärbung im Inneren überprüft, die die aktive Stickstofffixierung der Bacteriode markiert.

Nach Abschluss der vierten Bonitur am 17. August 2021 wurden nach 119 Wachstumstagen zudem die **Ertragschnitte** durchgeführt. Hierzu wurde der repräsentative Quadratmeter eines jeden Bestandes wiederum mit dem Boniturrahmen umfasst und die oberirdische Biomasse dieses Quadratmeters händisch mit einem Brotmesser auf einer Höhe von 6 cm geerntet. Das Pflanzenmaterial wurde in wasserdichte Blaue Säcke verpackt und anschließend in das Landschaftsökologische Labor der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde gebracht.

3.7 Datenerhebung im Labor

Die Datenerhebung im Labor umfasste Berechnungen und Messungen zu folgenden Prüfmerkmalen:

- Gesamt-Frischmasse der geernteten Biomasse
- Frischmasse (FM) der FLG-, Gräser-, Kräuter-Komponente
- FM-Ertragsanteil der FLG-, Gräser-, Kräuter-Komponente
- Gesamt-Trockenmasse der geernteten Biomasse
- Trockenmasse (TM) der FLG-, Gräser-, Kräuter-Komponente
- TM-Ertragsanteil der FLG-, Gräser-, Kräuter-Komponente
- Trockensubstanzgehalt (TS) der FLG-, Gräser-, Kräuter-Komponente
- Gesamt-Stickstoffgehalt des Pflanzenmaterials

Im Labor wurden die Proben (Probe = Pflanzenmaterial eines Ertragsschnittes) zunächst inklusive Blauem Sack gewogen, um so die Gesamtgewichte dieser zu erfassen. Innerhalb der drei auf die Ernte folgenden Tage, vom 18. – 20. August 2021, wurde nacheinander das Pflanzenmaterial aller Ertragsschnitte in die Komponenten FLG, Gräser und Kräuter sortiert. Diese Komponenten wurden zur Erfassung ihrer **Frischmasse** [g] jeweils gewogen und anschließend zur Vortrocknung in Papiertüten gefüllt oder auf saugfähigem Vliespapier in den Trockenwägen des Labors ausgebreitet. Um eine gleichmäßige Lufttrocknung ohne Schimmelbildung zu gewährleisten, wurde das Pflanzenmaterial täglich durchmischt und gewendet. Das Gewicht des ausgeleerten Blauen Sackes wurde ebenfalls für jede Probe erfasst, um eventuelle Wasser- und damit Gewichtsverluste des Pflanzenmaterials während des Sortierens genauer quantifizieren zu können. Diese Verluste sind an der Höhe der Differenz aus dem Gesamtgewicht der Probe, dem Gewicht des Blauen Sackes sowie der **Gesamt-Frischmasse der geernteten Biomasse** [g] abzulesen. Diese ergibt sich dabei rechnerisch aus der Summe der zuvor bestimmten FLG-, Gräser- und Kräuter-Frischmasse.

Nach mehrtägiger Vortrocknung wurde jegliches Pflanzenmaterial in Papiertüten umgefüllt und über 72 Stunden in einen Trockenschrank gegeben. Da die Proben zu einem späteren Zeitpunkt einer Analyse des Gesamt-Stickstoffgehalts unterzogen werden sollten, wurde für die Trocknung eine Temperatur von 60 °C, statt der zur TM-Bestimmung üblichen 105 °C, gewählt (BSA 2000), um eine Verflüchtigung der Stickstoffverbindungen zu vermeiden. Nach Ablauf der 72 Stunden kühlte das Pflanzenmaterial einen weiteren Tag im geschlossenen Trockenschrank aus, bevor die **Trockenmasse** [g] der einzelnen Komponenten einer jeden Probe durch ein zweites Wiegen erhoben wurde. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da ein Exsikkator in entsprechender Größe nicht zur Verfügung stand. Die **Gesamt-Trockenmasse der geernteten Biomasse** [g] wurde wiederum additiv bestimmt. Aus den für jede Probe erfassten Werten zur Frisch- und Trockenmasse wurden von der Autorin rechnerisch weiterhin die **prozentualen Ertragsanteile** [%] der einzelnen Komponenten an der Gesamt-FM und der Gesamt-TM sowie deren **prozentualer Trockenstoffgehalt** [%] bestimmt. Die Berechnungen erfolgten mittels der nach der Prozentzahl umgestellten Formel der Prozentrechnung. Im Anschluss an dieses Procedere wurden dem getrockneten Pflanzenmaterial eines jeden Ertragsschnittes 10 g für eine Analyse des **Gesamt-Stickstoffgehalts** [%] entnommen. Die prozentuale Zusammensetzung dieser 10 g aus Leguminosen, Gräsern und Kräutern entsprach dabei den TM-Ertragsanteilen der einzelnen Komponenten an der jeweiligen Probe. Das Pflanzenmaterial dieser 10 g-Proben wurde mittels einer Ultrazentrifugalmühle für die Elementaranalyse aufbereitet, in mehreren Durchgängen gemahlen und nachfolgend zur Analyse an das Laborpersonal weitergegeben.

3.8 Berechnung der N₂-Fixierleistung

Aus diesen, während der Bonituren im Feld sowie im Labor, erfassten Prüfmerkmalswerten wurden nachträglich weitere Daten generiert. So stellt die legume N₂-Fixierleistung der Prüfglieder ein weiteres Prüfmerkmal im betrachteten Versuch dar. Diese wurde unter Anwendung der von Kolbe und Köhler 2008 veröffentlichten Langfassungen der Gleichungen zur Berechnung der N₂-Bindung von FLG-Reinsaatbeständen und FLG-Gemenge-Beständen mit Nichtleguminosen berechnet. In diesen finden über lineare und quadratische Wechselwirkungsglieder die Größen *Frischmasse-Ertrag des Aufwuchses [dt ha⁻¹]*, *N_t-Gehalt des Aufwuchses [kg dt⁻¹]* sowie der *Ertragsanteil der FLG im Aufwuchs [%]* Eingang in die Berechnung (Kolbe 2009), wobei die beiden ersteren zunächst zum N-Entzug [kg ha⁻¹] verrechnet werden. Zudem können unterschiedliche Gleichungen in Abhängigkeit von der angebauten FLG-Art und der Nutzungsform des Bestandes ausgewählt werden. Zur Berechnung der N₂-Bindung der Aufwüchse im betrachteten Versuch wurde für die Prüfglieder der Prüffaktorstufen 7 (Luzerne *Luzelle*) und 9 (DSV 2060 Luzerne-Mix/Camena Luzerne-Gras 100) die Langfassung der Gleichung zur Berechnung der N₂-Bindung durch Luzerne, Serradella und Esparsette in Reinsaat oder im Gemenge sowie für die Nutzungsvariante Schnittnutzung nach (Kolbe und Köhler 2008) verwendet, dargestellt in **Formel 1**.

Formel 2: Langfassung der Formel zur Berechnung der N₂-Bindung durch Luzerne, Serradella und Esparsette in Reinsaat oder im Gemenge bei Schnittnutzung (nach Kolbe & Köhler, 2008).

$$\text{N}_2\text{-Bindung} = (-105 + 1,269 * \text{N-Entzug}) + (0,003 * \text{EA FLG}^2)$$

N-Entzug [kg ha⁻¹] = FM-Ertrag [dt ha⁻¹] * N_t-Gehalt FM [kg dt⁻¹]
EA FLG = Ertragsanteil der Futterleguminosen [%]

Die Fixierleistung der Prüfglieder der restlichen Prüffaktorstufen wurde über die in **Formel 2** dargestellte Langfassung der Gleichung zur Berechnung der N-Bindung durch alle Kleearten (außer Weißklee) in Reinsaat oder im Gemenge sowie für die Nutzungsvariante Schnittnutzung nach (Kolbe und Köhler 2008) ermittelt.

Formel 1: Langfassung der Formel zur Berechnung der N₂-Bindung durch alle Kleearten außer Weißklee in Reinsaat oder im Gemenge bei Schnittnutzung (nach Kolbe & Köhler, 2008).

$$\text{N}_2\text{-Bindung} = (-160 + 0,0015 * \text{N-Entzug}^2) + (0,005 * \text{N-Entzug} * \text{EA FLG}) + (6,699 * \text{EA FLG}) - (0,0505 * \text{EA FLG}^2)$$

N-Entzug [kg ha⁻¹] = FM-Ertrag [dt ha⁻¹] * N_t-Gehalt FM [kg dt⁻¹]
EA FLG = Ertragsanteil der Futterleguminosen [%]

3.9 Auswertung und Darstellung der Daten

Für die Auswertung der Daten wurde eine Gruppierung der Prüffaktorstufen bzw. der einzelnen Prüfglieder (Bestände, n = 20) vorgenommen. So wurden die Prüffaktorstufen 1, 5, 6, 7 und 11

der Gruppe der *FLG-Reinsaaten* und die Prüffaktorstufen 2, 4, 8 und 10 der Gruppe der *FLG-Gras-Gemenge* zugeordnet. Im Falle der Prüffaktorstufe 9 wurde ein Prüfglied ersterer (DSV 2060 Luzerne-Mix) und ein Prüfglied zweiterer Gruppe (Camena LuzernemGras 100) zugeteilt. Innerhalb der Gruppe der FLG-Gras-Gemenge wurde weiterhin eine Einteilung in *Gemenge mit hoher potenzieller Anbaueignung* (DSV M4, DSV 2215, Camena Luzerne Gras 100) und *Gemenge mit geringer potenzieller Anbaueignung* (DSV 2256, DSV M5) vorgenommen. Die Datenanalyse erfolgte für die FLG-Reinsaaten und die FLG-Gras-Gemenge sowie für jedes Prüfmerkmal separat. Innerhalb der beiden Gruppen wurden sowohl die mittleren Merkmalsausprägungen der Prüffaktorstufen als auch die Merkmalswerte der einzelnen Prüfglieder mittels deskriptiver Statistik dargestellt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Herausstellung besonderer Merkmalsausprägungen einzelner Prüfglieder zu ermöglichen, die zur Einschätzung der Anbaueignung der Arten bzw. Sorten und Gemenge von Bedeutung sein könnten und bei ausschließlicher Angabe der mittleren Prüfmerkmalswerte einer Prüffaktorstufe möglicherweise eingeebnet würden. Die deskriptiv-statistische Auswertung der Daten wurde in Form der Erstellung von Tabellen und Diagrammen sowie der Berechnung verschiedener Lage- und Streuungsmaße (arithmetisches Mittel, Standardabweichung, Variationskoeffizient (VK)) in Microsoft Office Excel 2016 vorgenommen. Auf die Durchführung einfaktorieller Varianzanalysen (ANOVA) mit anschließenden multiplen Mittelwertvergleichen (Post-Hoc-Tests), die die mittleren Merkmalsausprägungen der Prüffaktorstufen innerhalb einer Gruppe untereinander auf signifikante Unterschiede hin testen, wurde hinsichtlich des geringen Stichprobenumfangs je Prüffaktorstufe ($n = 2$) und der daraus resultierenden hohen Grenzdifferenzen und Risiken 2. Art (Thomas 2006) verzichtet. Zudem kann bei einer Stichprobengröße von zwei der auf die Merkmalsausprägung wirkende Versuchsfehler (Einfluss des Zufalls) nur unzureichend abgeschätzt werden, weshalb nach Ansicht der Autorin statistische Schlüsse auf Unterschiede zwischen den Grundgesamtheiten auf dieser Basis unzulässig erscheinen. Eine Ausnahme bildet hierbei das Prüfmerkmal der Aufwuchshöhe, für welches je Prüfglied zwischen 15 und 25 Einzelwerte erfasst wurden und welches sich folglich auch für eine Auswertung mittels schließender Statistik eignet. So wurden die zum vierten Boniturtermin erfassten mittleren Aufwuchshöhen der einzelnen Prüfglieder mittels Kruskal-Wallis-Test auf signifikante Unterschiede hin getestet. Zur Lokalisierung dieser wurden Paarweise Vergleiche für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ angeschlossen und die Signifikanzwerte mittels Bonferroni-Korrektur angepasst. Der nicht-parametrische Test wurde an dieser Stelle gewählt, weil nicht alle Stichproben eine Normalverteilung aufwiesen (Shapiro-Wilk-Test, $p < 0,1$). Die Überprüfung der Normalverteilung wurde in SsS 7.1, die restlichen Berechnungen im Programm IBM SPSS Statistics 28.0 durchgeführt. Verfahren der Schließenden Statistik wurden hinsichtlich

3 Material und Methoden

des größeren Stichprobenumfangs zudem für die prüfmerkmalsbezogenen Gruppenvergleiche herangezogen. Eine Übersicht über die angewendeten Tests bietet **Tabelle 4**.

Tabelle 4: Zusammenfassung des statistischen Vorgehens in den Gruppenvergleichen.

verglichene Gruppen	Prüfmerkmal	verwendeter Test	überprüfte Voraussetzungen	verwendetes Programm
FLG-Reinsaaten / FLG-Gras-Gemenge	TM-Ertrag [dt ha ⁻¹]	t-Test (Mittelwertvergleich)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) Varianzgleichheit (Brown-Forsythe-Test)	SsS 7.1
	Verunkrautung [%]	t-Test (Mittelwertvergleich)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) Varianzgleichheit (Brown-Forsythe-Test)	SsS 7.1
	Kulturdeckungsgrad [%] 17.08.2021	U-Test (Medianvergleich)	Gleiche Streuungen (Brown-Forsythe-Test)	SsS 7.1
Gemenge mit hoher potenzieller Anbaueignung / Gemenge mit geringer potenzieller Anbaueignung	TM-Ertrag [dt ha ⁻¹]	t-Test (Mittelwertvergleich)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) Varianzgleichheit (Brown-Forsythe-Test)	SsS 7.1
	Verunkrautung [%]	t-Test (Mittelwertvergleich)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) Varianzgleichheit (Brown-Forsythe-Test)	SsS 7.1
	Kulturdeckungsgrad [%] 17.08.2021	t-Test (Mittelwertvergleich)	Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) Varianzgleichheit (Brown-Forsythe-Test)	SsS 7.1
	N ₂ -Fixierung [kg ha ⁻¹]	Robuster Rangtest (Medianvergleich)		SsS 7.1
	Ertragsanteil Futterleguminosen [%]	Robuster Rangtest (Medianvergleich)		SsS 7.1
alle Prüfglieder	Aufwuchshöhe [cm] 17.08.2021	Kuskal-Wallis-Test + Paarweise Vergleiche		IBM SPSS Statistics 28.0

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Erhebungen im Feld und im vorgestellt. Die Darstellung erfolgt entlang der verschiedenen Prüfmerkmale zumeist separat für die FLG-Reinsaaten, die FLG-Gras-Gemenge und die Vergleiche zwischen beiden Gruppen. Dabei werden jeweils beide Bestände einer Art bzw. Sorte oder eines Gemenges gezeigt. Hierbei wird der Aufwuchs des ersten Wiederholungsblocks (siehe Kap. 3.3) durch die Anfügung eines `_1` und der Bestand des zweiten Blocks durch ein `_2` gekennzeichnet.

4.1 Aufwuchshöhe

Die durchschnittlichen Aufwuchshöhen der Bestände zu allen vier Boniturterminen sind in **Abbildung 6** dargestellt.

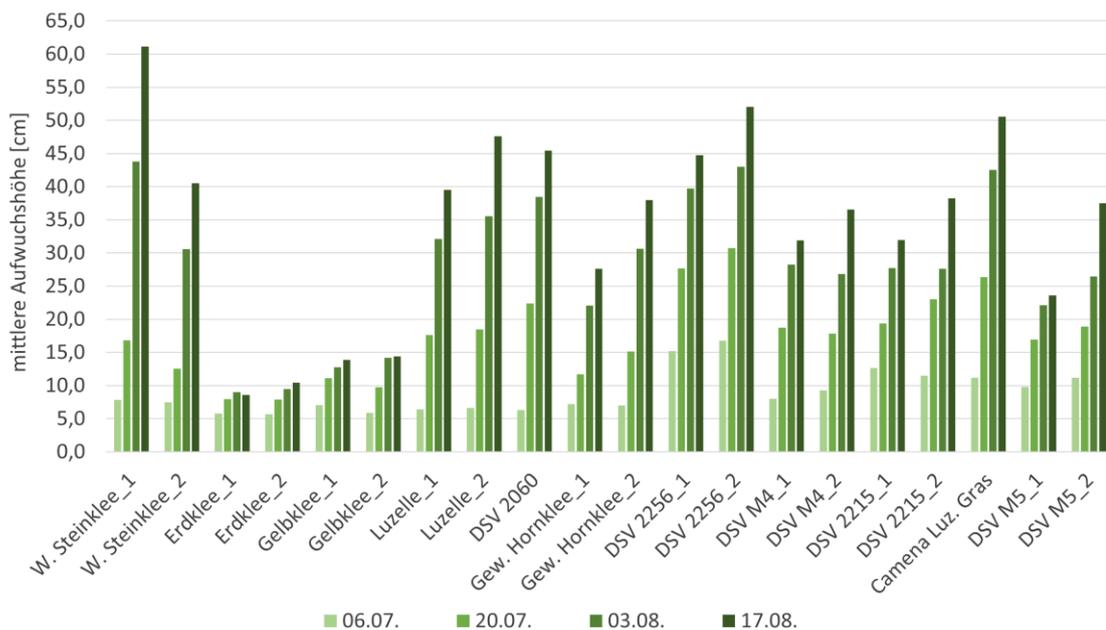


Abbildung 6: Mittlere Aufwuchshöhen [cm] der Bestände zu den vier Boniturterminen.

Aus dieser geht hervor, dass die Bestände des Gemenges DSV 2256 zur ersten und zweiten Bonitur die höchsten Aufwuchshöhen zeigten. Zur dritten Bonitur erreichte der WSK_1 mit 43,8 cm die höchste Aufwuchshöhe, gefolgt vom Bestand DSV 2256_2 mit 43,0 cm und dem Camena Luzerne Gras 100 mit 42,5 cm. Diese drei Bestände zeigten auch zum Erntetermin die höchsten Aufwüchse. Die geringsten Aufwuchshöhen wiesen zu jedem Zeitpunkt der Datenaufnahme die Bestände des Erdklee auf, gefolgt von den Aufwüchsen des Gelbklee. Die Aufwuchshöhen der Bestände zum Zeitpunkt der Ertragschnitte sind auf signifikante Unterschiede hin getestet worden. Eine Übersicht über die signifikanten Unterschiede zwischen den Prüfgliedern ist dem Anhang der Arbeit zu entnehmen.

4.2 Bodendeckung

Die Bodendeckung der einzelnen Prüfglieder wird anhand dreier Größen, dem Gesamtdeckungsgrad [%] (GDG), dem Anteil der FLG bzw. der Kulturarten an der Gesamtdeckung [%] und dem sich aus der Multiplikation dieser beiden Größen ergebenden Kulturdeckungsgrad [%] (KDG), dargestellt.

Futterleguminosen-Reinsaaten

In **Abbildung 7** sind die Komponenten der Bodendeckung für die FLG-Reinsaatbestände während der ersten Bonitur am 06.07.2021 ersichtlich.

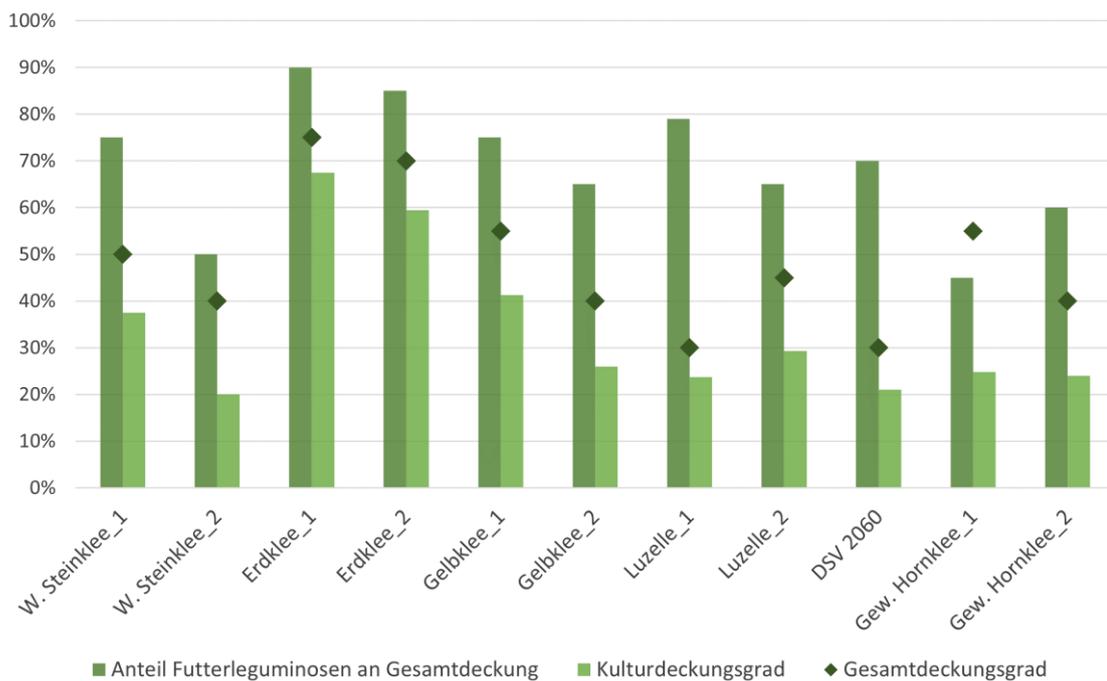


Abbildung 7: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Futterleguminosen an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände zum ersten Boniturtermin am 06.07.2021.

Aus der Darstellung geht hervor, dass die beiden Erdkleebestände in der ersten Bonitur die höchsten GDG, die höchsten FLG-Anteile an der Gesamtdeckung und damit auch die höchsten KDG aufwiesen. Die geringsten GDG von 30 % wurden von den Aufwüchsen der Luzernesorten Luzelle_1 und Planet, Fleetwood und Fraver (DSV 2060) erbracht. Beide Bestände wiesen mit über 70 % jedoch hohe FLG-Anteile an der Gesamtdeckung auf. Aus der Kombination eines geringen GDG mit einem niedrigen FLG-Anteil ergab sich für den WSK_2 mit 20 % der geringste KDG unter allen Aufwüchsen. Im Mittel beider Aufwüchse einer Art bzw. Sorte zeigte der Erdklee mit 64 % den höchsten KDG zum ersten Boniturtermin, gefolgt vom Gelbklee (34 %), dem Weißen Steinklee (29 %), von der Luzelle (27 %), dem Gewöhnlichen Hornklee (24 %) und dem

Einzelbestand des Luzernesorten-Mix DSV 2060 (21 %). Mit einem VK von 43 % wiesen die KDG des Weißen Steinklees die größte Streuung um den Mittelwert auf. Die geringste Streuung der Merkmalswerte war mit einem VK von 2 % für den GHK zu verzeichnen.

Der GDG nahm im Verlauf der Vegetationsperiode bis zur Durchführung der Ertragsschnitte, mit Ausnahme des Bestandes Erdklee_1, in allen Beständen zu. Die Entwicklung der FLG-Anteile an der Gesamtdeckung hingegen verlief in den Beständen sehr unterschiedlich. Eine Steigerung des Anteils bis zum vierten Boniturtermin konnte lediglich für den WSK_1 und den GHK_1 festgestellt werden. Die Anteile erhöhten sich hier um 24 bzw. 40 % auf 99 bzw. 85 %. In der Mehrzahl der Aufwüchse steigerte sich der Anteil der FLG an der Gesamtdeckung nur bis zur dritten Bonitur und verzeichnete folgend eine Stagnation (Steinklee_2, Erdklee_1, Gelbklee_2) bzw. eine leichte Reduktion (Luzelle_1, Luzelle_2, DSV 2060, GHK_2). Ein über alle vier Datenerhebungen kontinuierlicher Rückgang des FLG-Anteils wurde für den Erdklee_2 und den Gelbklee_1 erfasst. Die Anteile reduzierten sich hier von anfänglich 85 bzw. 75 % auf 60 bzw. 48 %.

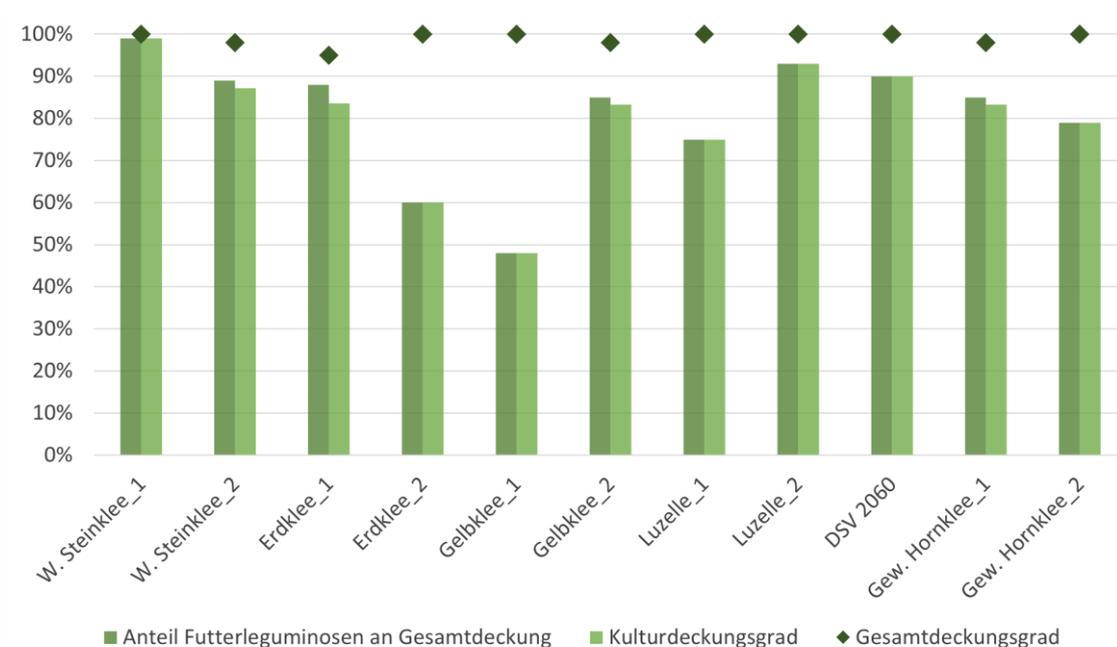


Abbildung 8: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Futterleguminosen an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände zum vierten Boniturtermin am 17.08.2021.

Die Komponenten der Bodendeckung zum Zeitpunkt der Ertragsschnitte am 17.08.2021 sind für alle Bestände in **Abbildung 8** dargestellt. Nach insgesamt 119 Wachstumstagen wiesen alle Aufwüchse einen GDG von über 90 % auf. Der Anteil der FLG an der Gesamtdeckung sowie der KDG variierten zu diesem Zeitpunkt stark, wobei die Mittelwerte der Größen bei 81 bzw. 80 % lagen. Mit einem FLG-Anteil und einem KDG von 48 % zeigte der Gelbklee_1 diesbezüglich die geringsten Werte. Auch der Erdklee_2 blieb mit einem FLG-Anteil und einem KDG von 60 % unter den

Durchschnittswerten. Im Mittel beider Bestände erzielte der WSK mit 93 % den höchsten KDG zum vierten Boniturtermin, gefolgt vom DSV 2060-Einzelbestand (90 %), der Luzelle (84 %), dem Gewöhnlichen Hornklee (81 %), dem Erdklee (72 %) und dem Gelbklee (66 %). Die Arten Gelbklee und Erdklee wiesen mit VK von 38 bzw. 23 % die größte Streuung der erfassten KDG um den Mittelwert auf. Die geringste Streuung zeigte mit einem VK von 4 % die Art GHK.

Futterleguminosen-Gras-Gemenge

Die GDG, die Kulturartenanteile an der Gesamtdeckung sowie die KDG der FLG-Gras-Bestände zur ersten Bonitur am 06.07.2021 sind in **Abbildung 9** dargestellt.

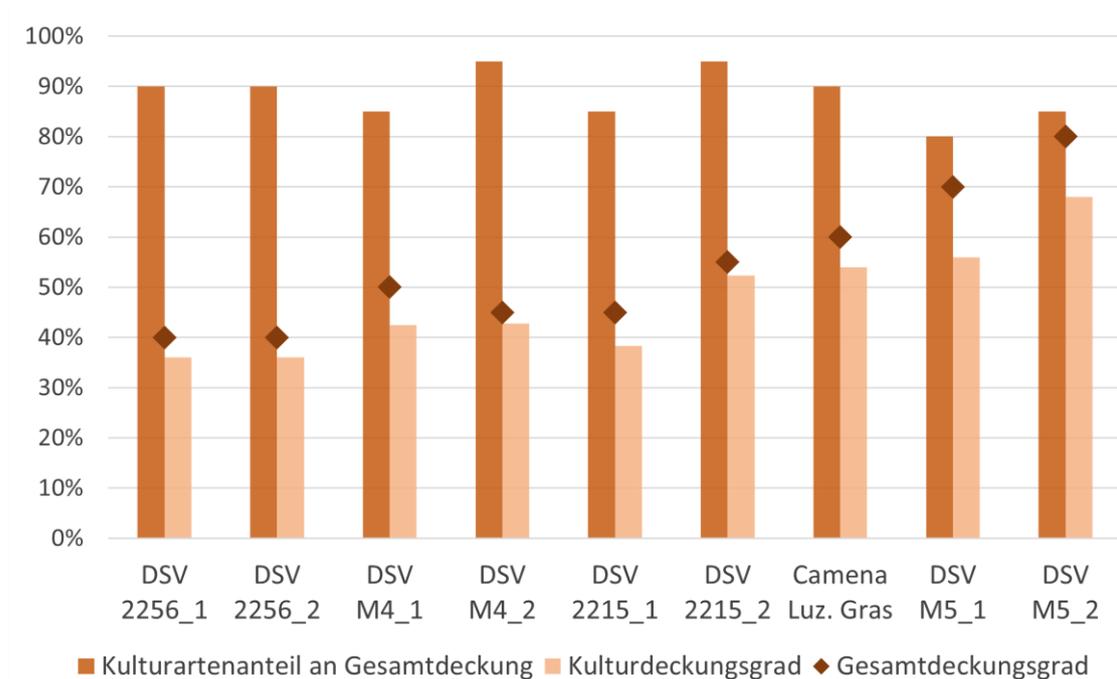


Abbildung 9: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Kulturarten an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Gras-Gemengebestände zum ersten Boniturtermin am 06.07.2021.

Dabei entsprechen die Kulturartenanteile der Summe der FLG- und Gräser-Anteile an der Gesamtdeckung. Aus der Abbildung geht hervor, dass die höchsten GDG zu Beginn der Datenaufnahme von den Beständen DSV M5_1, DSV M5_2 und Camena Luzerne Gras 100 erreicht wurden. Mit Werten von 68, 56 und 54 % zeigten diese drei Aufwüchse zudem die höchsten KDG. Die höchsten Kulturartenanteile an der Gesamtdeckung wiesen mit je 95 % hingegen die Bestände DSV M4_2 und DSV 2215_2 auf. Die Bestände des Gemenges DSV 2256 zeigten mit je 90 % ebenfalls hohe Kulturartenanteile an der Gesamtdeckung, erreichten durch eine starke Lückigkeit der Aufwüchse und GDG von lediglich 40 % dennoch jeweils nur einen geringen KDG von 36 %.

Der GDG nahm im Verlauf der Vegetationsperiode in allen Beständen zu und erreichte mit Ausnahme der beiden Aufwüchse des Gemenges DSV 2256 in allen Prüfgliedern nahezu 100 %. In den Beständen DSV 2256_1 und DSV 2256_2 betrugen die GDG zum Erntetermin lediglich 75 bzw. 60 %. Der Kulturartenanteil an der Gesamtdeckung verzeichnete bis zur vierten Bonitur in der Mehrzahl der Aufwüchse einen leichten Anstieg und lag zum Erntetermin im Bestand DSV M4_1 mit 80 % auf seinem niedrigsten Niveau. Als Auffälligkeit in der Entwicklung der Kulturartenanteile ist herauszustellen, dass sich der Anteil der FLG an der Gesamtdeckung im Verlauf der vier Bonituren in jedem der neun untersuchten Aufwüchse steigerte, während sich der Gräser-Anteil an der Gesamtdeckung reduzierte. Die KDG erreichten zur vierten Bonitur im Durchschnitt aller Aufwüchse ein Niveau von 86 %. Von diesem Wert ausgehend zeigten die Bestände DSV 2256_2, DSV 2256_1 und DSV M4_1 unterdurchschnittliche KDG, während der Aufwuchs des Camena Luzerne Gras 100 mit 99 % den höchsten KDG erreichte. Im Mittel beider Bestände eines FLG-Gras-Gemenges wies die Mischung DSV M5 mit 97 % die zweithöchsten und mit einem VK von 2 % zudem die einheitlichsten KDG auf. Die Gemenge DSV 2215, DSV M4 und DSV 2256 zeigten KDG von 93, 88 und 62 %, wobei Mischung DSV M4 mit einem VK von 13 % die größte Streuung der erfassten Werte um das Mittel aufwies. Die Gemenge mit einer hohen potenziellen Anbaueignung (DSV M4, DSV 2215, Camena Luzerne Gras 100) erreichten zum vierten Boniturtermin keinen signifikant höheren KDG als die Gemenge mit einer geringen potenziellen Anbaueignung (DSV 2256, DSV M5) (t-Test, $p = 0,147$). Die Komponenten der Bodendeckung zur vierten Bonitur sind für alle FLG-Gras-Bestände in **Abbildung 10** dargestellt.

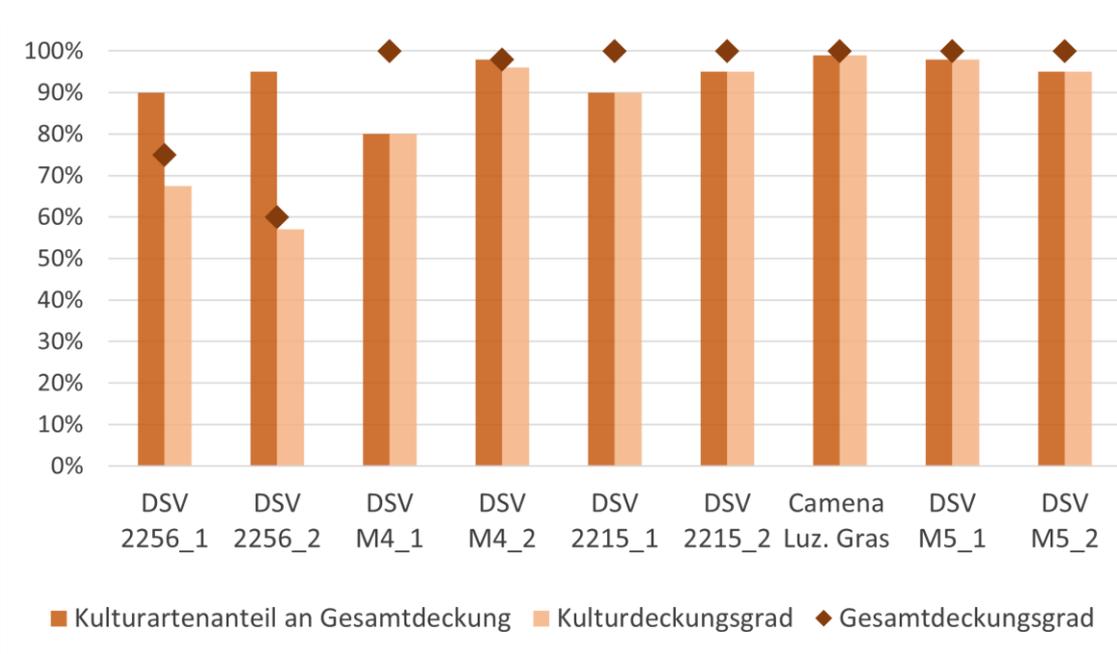


Abbildung 10: Gesamtdeckungsgrad [%], Kulturdeckungsgrad [%] sowie Anteil der Kulturarten an der Gesamtdeckung [%] der Futterleguminosen-Gras-Gemengebestände zum vierten Boniturtermin am 17.08.2021.

Vergleich der Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge

Die beiden Gruppen, FLG-Reinsaaten und FLG-Gras-Gemenge, wurden hinsichtlich ihres KDG zur vierten Bonitur am 17.08.2021 miteinander verglichen und unter Formulierung einer einseitigen Fragestellung auf einen signifikant höheren KDG der FLG-Gras-Bestände hin getestet. Die statistischen Kenngrößen der Stichproben sind der **Tabelle 5** zu entnehmen.

Tabelle 5: Stichprobenumfang der Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge sowie Median, arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Variationskoeffizient für das Prüfmerkmal des Kulturdeckungsgrades [%] am 17.08.2021.

	Stichproben- umfang n	Median [%]	arithmetisches Mittel [%]	Standard- abweichung [%]	Variations- koeffizient [%]
FLG-Reinsaaten (1)	11	83,3	80,1	14,7	18
FLG-Gras-Gemenge (2)	9	95,0	86,4	15,0	17

Das Ergebnis des durchgeführten Mann-Whitney-U-Tests für ungepaarte Stichproben, in welchem die Mediane der Stichproben miteinander verglichen wurden, ist in **Tabelle 6** dargestellt. Die Test-Voraussetzung der gleichen Streuung in beiden Stichproben wurde zuvor mittels Brown-Forsythe-Test bestätigt ($p = 0,913$, $\alpha = 0,1$).

Für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ weist die Gruppe der FLG-Gras-Gemenge, mit einer einseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,115, keinen signifikant höheren KDG zur vierten Bonitur auf als die Gruppe der FLG-Reinsaaten. Folglich wird die Nullhypothese beibehalten.

Tabelle 6: Testergebnis des Medianvergleiches für das Prüfmerkmal des Kulturdeckungsgrades [%] am 17.08.2021 zwischen den Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge.

Mann-Whitney-U-Test für ungepaarte Stichproben			
Prüfgröße U	einseitige Irrtums- wahrscheinlichkeit p	Signifikanzniveau α	Testentscheid
33,000	0,115	0,05	$p > \alpha$ → H_0 beibehalten

4.3 Bestandsentwicklung

Die im Verlauf der vier Bonituren bestimmten Entwicklungsstadien der FLG variierten zwischen den Arten bzw. Sorten stark. Zwischen beiden Beständen einer Art bzw. Sorte oder eines Gemenges zeigten sich jedoch keine oder nur geringfügige Unterschiede, weshalb die Ergebnisse folgend für jede Art bzw. Sorte und jedes Gemenge zusammengefasst dargestellt werden.

Futterleguminosen-Reinsaaten

Tabelle 7 zeigt die erfassten und nach den Richtlinien des Bundessortenamtes (2000) in Boniturnoten wiedergegebenen Entwicklungsstadien der FLG in Reinsaat.

Tabelle 7: Entwicklungsstadien der Futterleguminosen-Reinsaatbestände zu den vier Boniturterminen.

Boniturdatum	06.07.21	20.07.21	03.08.21	17.08.21
Weißer Steinklee	2	2	2	5
Erdklee	4-5	6-7	7-8	9
Gelbklee	1	1-2	2-4	5
Luzelle	1-2	2-3	2-4	5
DSV 2060	1	2	4	5
Gew. Hornklee	2	5	6	7-9

1 = Rosettenstadium (BBCH 39); 2 = verlängerte Triebe ohne Knospen (BBCH 51);
 3 = verlängerte Triebe mit Knospen (BBCH 55); 4 = Knospen vor dem Blühbeginn (BBCH 59);
 5 = Blühbeginn (BBCH 61); 6 = Vollblüte (BBCH 65); 7 = Ende der Blüte (BBCH 69);
 8 = Fruchtausatz (BBCH 75); 9 = beginnende Reife (BBCH 81) (BSA 2000)

Hervorzuheben ist hieraus die unter allen Arten am weitesten fortgeschrittene Entwicklung des Erdkleees zu den vier Boniturterminen. Die Art befand sich bereits nach 77 Wachstumstagen, zur ersten Bonitur, kurz vor dem bzw. im Blühbeginn. Die Aufwüchse des Weißen Steinklees, des Gelbklees, der Luzernesorte Luzelle und der Einzelbestand des Luzernesorten-Mix DSV 2060 erreichten dieses Entwicklungsstadium nach erst 119 Wachstumstagen, zum vierten Bonitur- und gleichzeitigen Erntetermin. Zur zweiten Bonitur nach 91 Wachstumstagen, näherten sich die Erdkleeaufwüchse bereits dem Ende der Blüte. Nach 14 weiteren Wachstumstagen, zur dritten Bonitur, konnte die Ausbildung erster Fruchtausätze festgestellt werden. Zum Erntetermin am 17.08.2021 befanden sich die Samen des Erdkleees bereits in der fortgeschrittenen Reife und es war ein Absterben der ersten Triebe anhand trockener und brauner Blätter festzustellen. Eine ähnlich weit fortgeschrittene Entwicklung im Boniturzeitraum zeigte der GHK, welcher nach 105 Wachstumstagen in der Vollblüte stand und zum Erntetermin reife Samen ausgebildet hatte.

Futterleguminosen-Gras-Gemenge

Die Entwicklungsstadien der in den FLG-Gras-Gemengen enthaltenen Gemengepartner zu den vier Boniturterminen sind in **Tabelle 8** dargestellt. Als Auffälligkeit hieraus ist zu erwähnen, dass das Einjährige Weidelgras der Mischung DSV 2256 als einzige Gräserart im Versuch in das generatives Entwicklungsstadium übergang und bereits zur dritten Bonitur das BBCH-

4 Ergebnisse

Makrostadium der Fruchtreife erreichte. Des Weiteren wird ersichtlich, dass das Gemenge DSV M5 im Verlauf der Datenaufnahme durch verschiedene Blühaspekte geprägt war. So stand zunächst der Inkarnatklee zur zweiten Bonitur in der Vollblüte, gefolgt vom Schwedenklee zur dritten und vom Rotklee zur vierten Bonitur.

Tabelle 8: Entwicklungsstadien der Gemengepartner der Futterleguminosen-Gras-Gemenge zu den vier Boniturterminen.

	Boniturdatum	06.07.21	20.07.21	03.08.21	17.08.21
DSV 2256	Gräser	3-4	6	9	9
	Alexandrinerklee	2-3	2-3	5-6	7-9
	Perserklee	5	5-6	6-7	7-9
DSV M4	Gew. Hornklee	2	2	4-5	7-9
	Gelbklee	2	2	2	2
	Serradella	5	5-6	7-9	9
	Luzerne	1	2-3	2-5	4-5
	Gräser	< 1	< 1	< 1	< 1
DSV 2215	Gew. Hornklee	2	3-5	5-6	7-9
	Gelbklee	1-2	1-2	2	3-5
	Weißklee	1-2	3-5	6-7	6-7
	Luzerne	1	2	2-5	3-5
	Gräser	< 1	< 1	< 1	< 1
Camena Luzerne	Luzerne	2	2	3	3-5
Gras 100	Gräser	< 1	< 1	< 1	< 1
DSV M5	Rotklee	1-2	1-2	2	5-6
	Schwedenklee	1-2	3	5-6	6-9
	Inkarnatklee	3-5	5-6	6-9	7-9
	Weißklee	1-2	2	2	3-5
	Gräser	< 1	< 1	< 1	< 1

1 = Rosettenstadium (BBCH 39/45); 2 = verlängerte Triebe ohne Knospen (BBCH 51);
 3 = verlängerte Triebe mit Knospen (BBCH 55); 4 = Knospen vor dem Blühbeginn (BBCH 59);
 5 = Blühbeginn (BBCH 61); 6 = Vollblüte (BBCH 65); 7 = Ende der Blüte (BBCH 69);
 8 = Fruchtausatz (BBCH 75); 9 = beginnende Reife (BBCH 81) (BSA 2000; Demonet KleeLuzPlus o.J.)

4.4 Rhizobienbesatz und -aktivität

Alle als Reinsaat oder in einem Gemenge im Versuch integrierten Futterleguminosenarten wurden auf den Besatz mit Rhizobien und deren aktive N₂-Fixierung hin untersucht. Durch die Freilegung der Wurzeln einzelner Pflanzen konnte das Vorhandensein von Knöllchenbakterien für jede FLG-Art festgestellt werden. Das Aufschneiden dieser, zeigte die durch die Anwesenheit von Leghämoglobin bedingte Rosa- bzw. Rotfärbung des Inneren der Knöllchen. Folglich kann eine aktive N₂-Fixierung für alle Futterleguminosen des Versuches zu allen vier Boniturterminen bestätigt werden.

4.5 Arten der Segetalflora

Neben der Bestimmung der Deckungsgraden und der Entwicklungsstadien der Kulturpflanzen fand in jedem Bestand auch die Erfassung der Beikräuter statt. **Abbildung 11** zeigt alle in den FLG- und FLG-Gras-Beständen erfassten Beikrautarten und die Anzahl ihrer Nennungen im Verlauf der vier Bonituren. Die maximale zu erreichende Anzahl an Nennungen liegt mit insgesamt 20 bonitierten Beständen und vier Boniturdurchläufen bei 80.

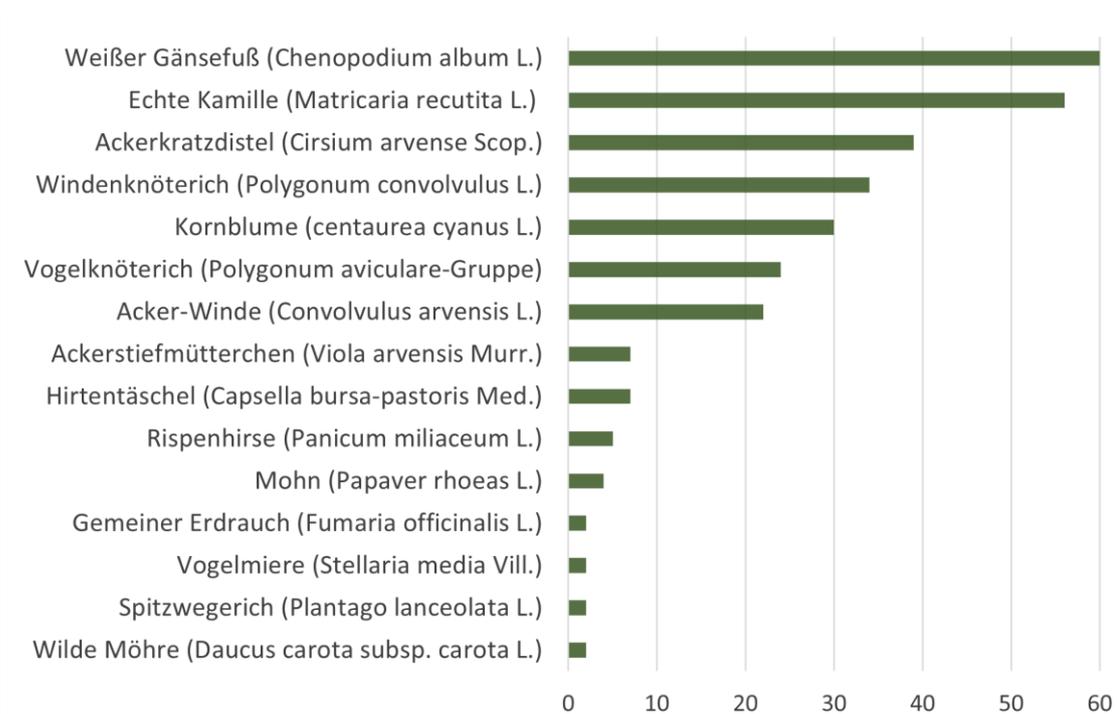


Abbildung 11: Erfasste Beikräuter und -gräser in den Aufwüchsen der Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge sowie die Anzahl ihrer Nennungen im Verlauf des Boniturzeitraumes.

Als Leitunkräuter auf der Versuchsfläche können mit einer Anzahl von 60, 56 und 39 Nennungen der Weiße Gänsefuß (*Chenopodium album* L.), die echte Kamille (*Matricaria recutita* L.) sowie die Ackerkratzdistel (*Cirsium arvense* Scop.) identifiziert werden. Während der Weiße Gänsefuß mit der höchsten Anzahl an Nennungen die weiteste und andauerndste Verbreitung auf der Versuchsfläche aufwies, fiel die Ackerkratzdistel insbesondere durch ihre ausgeprägte Dominanz in betroffenen Beständen auf. So waren insbesondere der GHK_2, der Gelbkle_1, der Erdkle_2 sowie der Aufwuchs des Luzernesorten-Mix DSV 2060 durch eine intensive Distelverunkrautung gekennzeichnet. Auffällig war zudem der starke Durchwuchs der Rispenhirse (*Panicum miliaceum* L.) im Erdkle_2- und Gelbkle_1-Bestand, mit welcher die Fläche im Jahr zuvor bestellt worden war.

4.6 Frisch- und Trockenmasseertrag

Futterleguminosen-Reinsaaten

Verschiedene Ertragsdaten der FLG-Reinsaatbestände sind in **Tabelle 9** zusammengefasst. Dabei beziehen sich die Frisch- und Trockenmasseerträge jeweils auf die Futterleguminosenkomponente des Schnittguts vom 17.08.2021.

Tabelle 9: Gesamtfrischmasse [dt ha⁻¹], Frisch- und Trockenmasseertrag [dt ha⁻¹] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände und deren Mittelwerte, Trockensubstanz [%] der Futterleguminosenkomponente des Schnittguts sowie Mittelwert [dt ha⁻¹], Standardabweichung [dt ha⁻¹] und Variationskoeffizient [%] der Trockenmasseerträge einer Art bzw. Sorte.

	Frischmasse gesamt [dt ha ⁻¹]	Frischmasse- Ertrag [dt ha ⁻¹]	Trocken- substanz [%]	Trockenmasse- Ertrag [dt ha ⁻¹]	arithm. Mittel [dt ha ⁻¹]	Standard- abweichung [dt ha ⁻¹]	Variations- koeffizient [%]
Weißer Steinklee_1	219,4	206,7	20,0	41,4	30,4	15,6	51
Weißer Steinklee_2	102,2	74,5	25,9	19,3			
Erdklee_1	140,4	117,8	28,0	33,0	25,4	10,8	43
Erdklee_2	150,4	71,3	24,9	17,7			
Gelbklee_1	136,8	68,3	23,4	16,0	19,5	4,9	25
Gelbklee_2	135,2	100,9	22,8	23,0			
Luzelle_1	162,3	96,6	26,5	25,6	27,8	3,0	11
Luzelle_2	132,6	110,8	26,9	29,9			
DSV 2060	121,9	96,2	25,6	24,6			
Gew. Hornklee_1	122,8	98,3	23,8	23,4	32,8	13,3	41
Gew. Hornklee_2	294,5	239,8	17,6	42,2			
Mittelwert	156,2	116,5		26,9			34

Mit Gesamtfrischmassen von 295, 219 und 162 dt ha⁻¹ zeigten der GHK_2, der WSK_1 und die Luzelle_1 die höchste Biomassebildung unter den FLG-Reinsaatbeständen. Unter Ausschluss der Gräser und Kräuter aus der Biomasse erzielte mit 118 dt ha⁻¹ der Erdklee_1, nach dem GHK_2 und WSK_1, den dritthöchsten FM-Ertrag. Die FLG-Komponente dieses Aufwuchses fiel zudem durch ihren hohen TS-Gehalt von 28 % auf und konnte so mit 33 dt ha⁻¹ auch den dritthöchsten TM-Ertrag unter allen Reinsaatbeständen erzielen. Den geringsten TS-Gehalt wies mit 17,6 % die Biomasse des GHK_2 auf, welcher mit 42,2 dt ha⁻¹ dennoch den höchsten TM-Ertrag erbrachte. Im Mittel beider Bestände einer Art bzw. Sorten erzielte wiederum der GHK mit 32,8 dt ha⁻¹ den höchsten TM-Ertrag, vor dem Weißen Steinklee (30,4 dt ha⁻¹), der Luzelle (27,8 dt ha⁻¹), dem Erdklee (25,4 dt ha⁻¹) und dem Gelbklee, der mit mittleren 19,5 dt ha⁻¹ den geringsten TM-Ertrag erzielte. Dabei zeigten mit einem VK von 51 bzw. 43 % der WSK und der Erdklee die größte Streuung der erfassten TM-Erträge, während die Luzernesorte Luzelle mit einem VK von 11 % die stabilste Ertragsleistung erbrachte. Der mittlere VK der FLG-Reinsaaten liegt bei 34 %.

Futterleguminosen-Gras-Gemenge

Unter den FLG-Gras-Gemengen erzielten die Bestände DSV M5_2, Camena Luzerne-Gras und DSV 2215_2 sowohl die höchsten Gesamtfrischmassen als auch die höchsten FM- sowie TM-Erträge. Diese ergeben sich für die FLG-Gras-Gemenge aus den summierten Frisch- bzw. Trockenmassen der FLG- und Gräser-Komponenten des jeweiligen Aufwuchses. Die verschiedenen Ertragsdaten sind der **Tabelle 10** zu entnehmen.

Tabelle 10: Gesamtfrischmasse [dt ha⁻¹], Frisch- und Trockenmasseertrag [dt ha⁻¹] der Futterleguminosen-Gras-Bestände und deren Mittelwerte, Trockensubstanz [%] der Futterleguminosen-Gras-Komponente des Schnittguts sowie Mittelwert [dt ha⁻¹], Standardabweichung [dt ha⁻¹] und Variationskoeffizient [%] der Trockenmasseerträge eines Gemenges.

	Frischmasse gesamt [dt ha ⁻¹]	Frischmasse- Ertrag [dt ha ⁻¹]	Trocken- substanz [%]	Trockenmasse- Ertrag [dt ha ⁻¹]	arithm. Mittel [dt ha ⁻¹]	Standard- abweichung [dt ha ⁻¹]	Variations- koeffizient [%]
DSV 2256_1	88,1	65,0	39,2	25,5	23,3	3,2	14
DSV 2256_2	57,5	55,6	37,8	21,0			
DSV M4_1	126,4	101,4	24,8	25,2	23,8	2,0	8
DSV M4_2	93,6	85,2	26,2	22,4			
DSV 2215_1	146,6	119,3	23,6	28,1	34,0	8,3	24
DSV 2215_2	195,2	182,3	21,8	39,8			
Camena Luz. Gras	211,3	184,8	20,9	38,6	39,1	8,6	22
DSV M5_1	154,0	144,3	19,9	33,0			
DSV M5_2	254,3	226,2	22,9	45,1			
Mittelwert	147,4	129,4		31,0			17

Besonders hervorzuheben sind hieraus weit unterdurchschnittlichen FM-Erträge der Aufwüchse DSV 2256_1 und DSV 2256_2. Aufgrund der in beiden Beständen hohen prozentualen Trockensubstanz der Kulturarten näherte sich die mittlere TM-Ertragsleistung des Gemenges mit 23,3 dt ha⁻¹ jedoch denen der anderen Mischungen an. So lag der durchschnittliche TM-Ertrag der Mischung DSV M4 mit 23,8 dt ha⁻¹ nur knapp darüber. Den höchsten mittleren TM-Ertrag erzielte die Mischung DSV M5 mit 39,1 dt ha⁻¹, gefolgt vom Einzelbestand Camena Luzerne-Gras (38,6 dt ha⁻¹) und dem Gemenge DSV 2215 (34,0 dt ha⁻¹). Letzteres zeigte mit einem VK von 24 % die größte Streuung der TM-Erträge. Ein VK von 8 % zeigte die geringste Streuung der TM-Erträge für das Gemenge DSV M4 an. Der mittlere VK der Gemenge liegt bei 17 %. Ein signifikanter TM-Ertragsunterschied zwischen den Gemengen mit einer hohen und einer niedrigen potenziellen Anbaueignung konnte nicht nachgewiesen werden (t-Test, p = 0,521).

Vergleich der Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge

Die FLG-Reinsaatbestände des Versuches erzielten im Mittel einen TM-Ertrag von 26,9 dt ha⁻¹, während die FLG-Gras-Bestände einen durchschnittlichen TM-Ertrag von 31,0 dt ha⁻¹ erbrachten. Unter Formulierung einer einseitigen Fragestellung wurde getestet, ob dieser TM-Ertrag der FLG-Gras-Gemenge statistisch signifikant ist. Das Ergebnis des durchgeführten t-Tests für ungepaarte Stichproben ist der **Tabelle 11** zu entnehmen. Die Normalverteilung der Stichproben ($p(1) = 0,253$; $p(2) = 0,401$; $\alpha = 0,1$; Shapiro-Wilk-Test) sowie deren Varianzgleichheit ($p = 0,901$; $\alpha = 0,1$; Brown-Forsythe-Test) wurden bestätigt.

Tabelle 11: Testergebnis des Mittelwertvergleiches für das Prüfmerkmal des Trockenmasseertrages [dt ha⁻¹] zwischen den Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge.

t-Test für ungepaarte Stichproben				
Prüfgröße t	Freiheitsgrade	einseitige Irrtumswahrscheinlichkeit p	Signifikanzniveau α	Testentscheid
- 1,032	18	0,158	0,05	$p > \alpha$ → H_0 beibehalten

Für ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ zeigt die Gruppe der FLG-Gras-Gemenge, mit einer einseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,158, keinen signifikant höheren TM-Ertrag als die Gruppe der FLG-Reinsaaten. Die Nullhypothese wird beibehalten.

4.7 Ertragsanteile im Schnittgut

Futterleguminosen-Reinsaaten

Abbildung 12 zeigt die aus dem getrockneten Pflanzenmaterial der Ertragschnitte bestimmten Ertragsanteile der Futterleguminosen, Gräser und Kräuter in den FLG-Reinsaatbeständen.

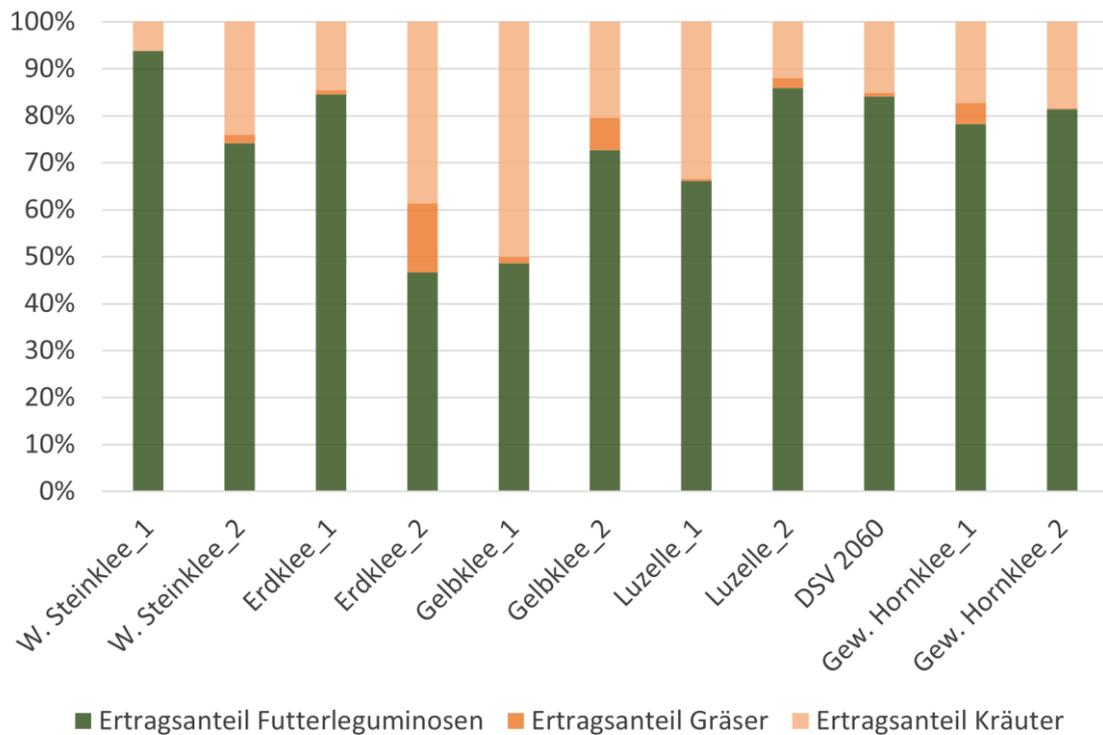


Abbildung 12: Trockenmasseertragsanteile [%] der Futterleguminosen, Gräser und Kräuter an der Gesamt-Trockenmasse [dt ha⁻¹] der Futterleguminosen-Reinsaatbestände.

Dabei sind die EA der nicht zu den Kulturpflanzen zählenden Gräser und Kräuter farblich vom EA der Futterleguminosen abgesetzt. Aus der Summe der EA der Gräser und Kräuter ergibt sich die prozentuale Verunkrautung der Bestände der FLG-Reinsaaten. Mit FLG-EA von 94, 86 und 85 % zeigten der WSK_1, die Luzelle_2 und der Erdklee_1 die geringste Verunkrautung durch Beigräser und -kräuter. Die stärkste Verunkrautung wurde für den Erdklee_2, den Gelbklee_1 sowie die Luzelle_1 erfasst. Diese Bestände wiesen EA von 47, 49 und 66 % für die legume Komponente auf. Betrachtet man das Mittel beider Bestände einer Art bzw. Sorte, ist der Weiße Steinklee, mit einem durchschnittlichen FLG-EA von 84 %, als die Art mit der geringsten Verunkrautung herauszustellen. Der Einzelbestand des Luzernesorten-Mix DSV 2060 erreichte ebenfalls einen TM-EA von 84 % für die legume Komponente. Es folgen der Gewöhnliche Hornklee (80 %), die Luzelle (76 %), der Erdklee (66 %) und der Gelbklee (61 %). Dabei weisen VK von 41 bzw. 3 % auf die stärkste Streuung der FLG-EA beim Erdklee und die geringste Streuung beim Gewöhnlichen Hornklee hin. Die EA der einzelnen Komponenten machen zudem deutlich, dass die

Verunkrautung der Bestände im Wesentlichen auf das Wachstum von Kräutern zurückzuführen ist, während die Konkurrenz durch Gräser nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die im Vergleich zu den restlichen Beständen hohen EA der Gräser im Erdklee_2 und Gelbklee_2 sind mit dem Durchwuchs der Vorfrucht Rispenhirse zu begründen.

Futterleguminosen-Gras-Gemenge

In den Beständen der FLG-Gras-Gemenge zählen neben den FLG auch die Gräser zu den Kulturpflanzen. Die Verunkrautung ergibt sich daher jeweils aus dem EA der Kräuter. Die Verteilung der einzelnen EA in den FLG-Gras-Beständen des Versuches ist in **Abbildung 13** dargestellt.

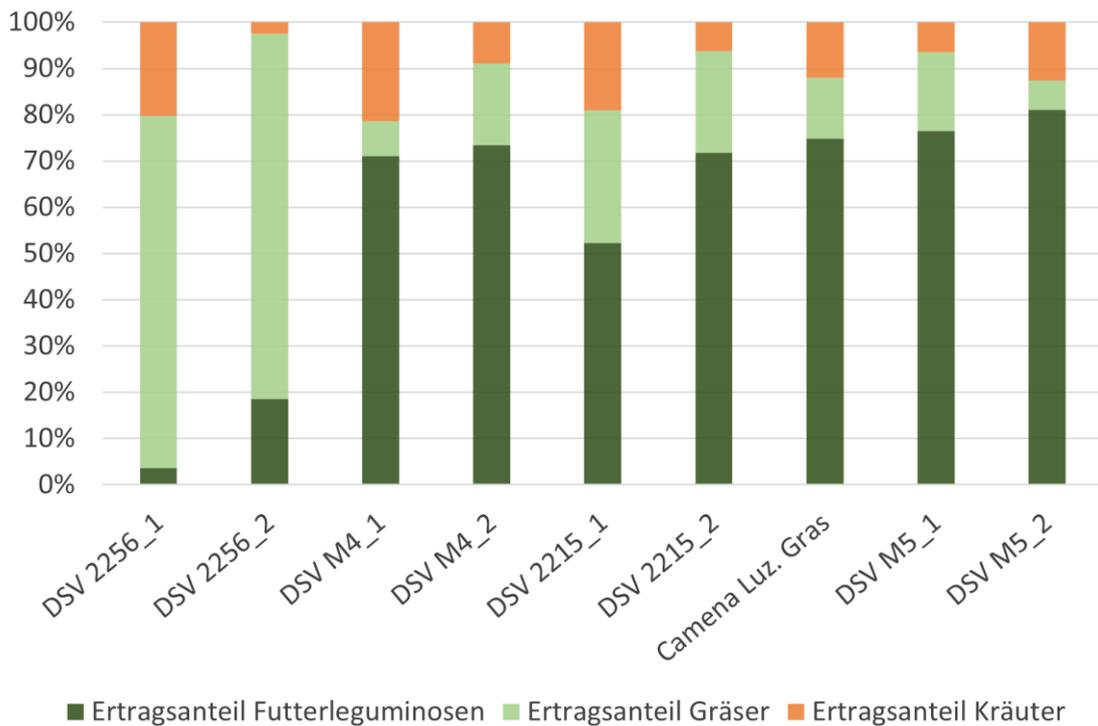


Abbildung 13: Trockenmasseertragsanteile [%] der Futterleguminosen, Gräser und Kräuter an der Gesamt-Trockenmasse [dt ha⁻¹] der Futterleguminosen-Gras-Gemengebestände.

Mit einem Kräuter-EA von 21, 20 und 19 % zeigen die Bestände DSV M4_1, DSV 2256_1 und DSV 2215_1 die stärkste Verunkrautung. Die höchsten Kulturpflanzen-Ertragsanteile, welche sich aus der jeweiligen Summe des EA der Gräser und FLG ergeben, weisen mit 98, 94 und 94 % die Bestände DSV 2256_2, DSV 2215_2 und DSV M5_1 auf. Im Mittel beider Bestände eines Gemenges zeigt die Mischung DSV M5 mit 90 % den höchsten und die Mischung DSV M4 mit 85 % den geringsten EA für die Kulturarten. Hervorzuheben ist weiterhin der auffällig geringe EA der FLG im Gemenge DSV 2256. Dieser liegt bei lediglich 4 (DSV 2256_1) bzw. 19 % (DSV 2256_2) und im Mittel bei 11 %, während die restlichen Bestände einen durchschnittlichen FLG-EA von 72 % aufweisen. Die geringste Streuung der erfassten Kulturpflanzen-Ertragsanteile zeigt mit einem

Variationskoeffizienten von 5 % das Gemenge DSV M5. Im Vergleich der Gemenge mit einer hohen und einer geringen potenziellen Anbaueignung wurde kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der FLG-EA festgestellt (Robuster Rangtest, $p = 0,548$). Ebenso konnte keine signifikant geringere Verunkrautung der Gemenge mit einer höheren potenziellen Anbaueignung nachgewiesen werden (t-Test, $p = 0,277$).

Vergleich der Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge

Beiden Gruppen, FLG-Reinsaaten und FLG-Gras-Gemenge, wurden hinsichtlich ihrer mittleren prozentualen Verunkrautung miteinander verglichen und unter Formulierung einer einseitigen Fragestellung auf eine signifikant geringere Verunkrautung der FLG-Gras-Bestände hin getestet.

Tabelle 12: Stichprobenumfang der Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge sowie arithmetisches Mittel, Standardabweichung und Variationskoeffizient für das Prüfmerkmal der Verunkrautung [%].

	Stichproben- umfang n	arithmetisches Mittel [%]	Standard- abweichung [%]	Variations- koeffizient [%]
FLG-Reinsaaten (1)	11	25,79	15,06	58
FLG-Gras-Gemenge (2)	9	12,15	6,80	56

Tabelle 12 ist zu entnehmen, dass die mittlere Verunkrautung der FLG-Reinsaaten bei 25,79 % und die der FLG-Gras-Gemenge bei 12,15 % liegt, wobei die Streuung der Merkmalswerte um den Mittelwert mit 58 bzw. 56 % in beiden Gruppen etwa gleich groß ist. **Tabelle 13** zeigt das Ergebnis des durchgeführten t-Tests für ungepaarte Stichproben unter vorheriger Überprüfung einer Normalverteilung beider Stichproben ($p(1) = 0,150$; $p(2) = 0,458$; $\alpha = 0,1$; Shapiro-Wilk-Test) sowie der Varianzgleichheit ($p = 0,157$; $\alpha = 0,1$; Brown-Forsythe-Test).

Tabelle 13: Testergebnis des Mittelwertvergleiches für das Prüfmerkmal der Verunkrautung [%] zwischen den Gruppen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge.

t-Test für ungepaarte Stichproben				
Prüfgröße t	Freiheitsgrade	einseitige Irrtumswahrscheinlichkeit p	Signifikanzniveau α	Testentscheid
2,509	18	0,011	0,05	$p < \alpha$ → H_A angenommen

Mit einer einseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,011$ kann bei einem festgelegten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ die Nullhypothese verworfen werden. Die Aufwüchse der Gruppe der FLG-Gras-Gemenge zeigen im Mittel folglich eine signifikant geringere prozentuale Verunkrautung als die Bestände der FLG-Reinsaaten.

Für beide Gruppen gemeinsam wurde zudem der Zusammenhang zwischen dem gebildeten TM-Ertrag der Aufwüchse und dem prozentualen FLG-EA in der Trockenmasse betrachtet. Dieser ist in **Abbildung 14** dargestellt. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,2247$ ergibt sich ein positiver linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen.

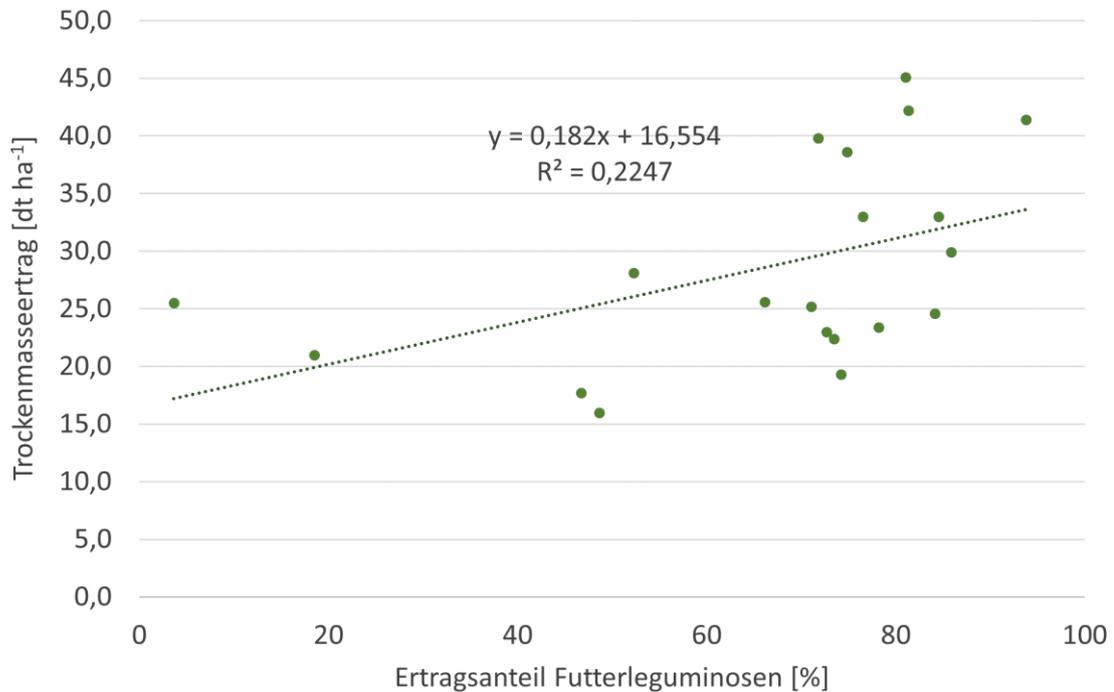


Abbildung 14: Trockenmasseertrag [dt ha⁻¹] der Bestände in Abhängigkeit vom Futterleguminosen-Ertragsanteil [%].

4.8 N_t-Gehalt und N₂-Fixierleistung

Futterleguminosen-Reinsaat

Den höchsten N_t-Gehalt unter den FLG-Reinsaat wies mit 4,3 % die getrocknete Biomasse des Bestandes WSK_1 auf, den geringsten Gehalt zeigte mit 2,0 % das Schnittgut des Erdklee_2-Aufwuchses. Im Mittel aller Reinsaatbestände lag der N_t-Gehalt bei 3,0 %. Die für die einzelnen FLG-Bestände berechnete N₂-Bindung, die dafür relevanten Größen (Frischmasse des Bestandes, N_t-Gehalt der Frischmasse, N-Entzug durch die Biomasse, FM-Ertragsanteil der FLG im Bestand) sowie die jeweils verwendeten Gleichungen sind in **Tabelle 14** zusammengefasst.

4 Ergebnisse

Tabelle 14: Berechnete N₂-Bindung der Futterleguminosen-Reinsaatbestände, relevante Größen zur Berechnung sowie die zur Berechnung verwendeten Formeln.

	Frischmasse gesamt [dt ha ⁻¹]	N _t -Gehalt Frischmasse [kg dt ⁻¹]	N-Ertrag Schnittgut [kg ha ⁻¹]	EA FLG [%]	N ₂ -Bindung [kg ha ⁻¹]
$N_2\text{-Bindung} = (-160 + 0,0015 * N\text{-Entzug}^2) + (0,005 * N\text{-Entzug} * EA\text{ FLG}) + (6,699 * EA\text{ FLG}) - (0,0505 * EA\text{ FLG}^2)^*$					
Weißer Steinklee_1	219,4	0,87	191	94	168
Weißer Steinklee_2	102,2	0,71	73	73	94

Erdklee_1	140,4	0,65	92	84	98
Erdklee_2	150,4	0,51	77	47	71

Gelbklee_1	136,8	0,66	90	50	83
Gelbklee_2	135,2	0,69	93	75	106

Gew. Hornklee_1	122,8	0,59	73	80	90
Gew. Hornklee_2	294,5	0,58	170	81	163

$N_2\text{-Bindung} = (-105 + 1,269 * N\text{-Entzug}) + (0,003 * EA\text{ FLG}^2)^{**}$					
Luzelle_1	162,3	0,70	114	60	50
Luzelle_2	132,6	0,88	117	84	64

DSV 2060	121,9	0,79	96	79	35

* Langfassung der Gleichung zur Berechnung der N-Bindung durch alle Kleearten (außer Weißklee) in Reinsaat oder Gemenge sowie für die Nutzungsvariante Schnittnutzung (nach Kolbe & Köhler, 2008)

** Langfassung der Gleichung zur Berechnung der N-Bindung durch Luzerne, Serradella und Esparsette in Reinsaat oder Gemenge sowie für die Nutzungsvariante Schnittnutzung (nach Kolbe & Köhler, 2008)

Es ist ersichtlich, dass die N-Erträge des Schnittguts beim WSK_1 mit 191 kg ha⁻¹ und beim GHK_2 mit 170 kg ha⁻¹ am höchsten waren, was insbesondere auf die hohen Gesamt-FM-Erträge zurückzuführen ist. Die niedrigsten N-Erträge wurden vom jeweils anderen Bestand des Weißen Steinklees und des Gewöhnlichen Hornklees erzielt, da diese die geringsten Gesamt-FM-Erträge unter den FLG-Reinsaatbeständen erbrachten. Übereinstimmend mit den N-Erträgen wurden für den WSK_1 und den GHK_2 auch die höchsten N₂-Fixierungsleistungen errechnet. Diese lagen bei 168 bzw. 163 kg ha⁻¹. Die geringsten N₂-Bindungen zeigten mit 35 (DSV 2060), 50 (Luzelle_1) und 64 kg ha⁻¹ (Luzelle_2) die Bestände der verschiedenen Luzernesorten. Folglich erzielte die Luzelle mit 57 kg ha⁻¹ auch im Mittel beider Aufwüchse die niedrigste N₂-Fixierungsleistung, gefolgt vom Erdklee (85 kg ha⁻¹), Gelbklee (95 kg ha⁻¹), Gewöhnlichen Hornklee (126 kg ha⁻¹) und Weißen Steinklee (131 kg ha⁻¹).

Futterleguminosen-Gras-Gemenge

Unter den FLG-Gras-Gemengen zeigte das Schnittgut des Camena Luzerne-Gras-Bestandes mit 3,5 % den höchsten N_t-Gehalt in der Trockenmasse. Im Durchschnitt aller analysierten Pflanzenproben lag der N_t-Gehalt bei 2,8 %, wobei lediglich das Schnittgut der DSV 2256-Bestände mit 1,9 (DSV 2256_1) bzw. 1,3 % (DSV 2256_2) unterdurchschnittliche N_t-Gehalte aufwies.

4 Ergebnisse

In **Tabelle 15** sind die berechneten N₂-Fixierungsleistungen der FLG-Gras-Bestände, die zur Berechnung benötigten Größen sowie die verwendeten Gleichungen angegeben. Aus der Tabelle geht hervor, dass wie auch bei den FLG-Reinsaatbeständen, die höchsten N-Erträge im Schnittgut auf diejenigen Aufwüchse mit den höchsten Gesamt-FM-Erträgen entfallen. So zeigte mit 165 kg ha⁻¹ der Bestand DSV M5_2 den höchsten N-Ertrag, gefolgt vom Aufwuchs des Camena Luzerne Gras 100 mit 153 kg ha⁻¹ und dem Bestand DSV 2215_2 mit 137 kg ha⁻¹ N-Ertrag. Die höchste N₂-Fixierung erzielte wiederum der Bestand DSV M5_2 mit 158 kg ha⁻¹, während die N₂-Bindung des Camena Luzerne-Gras-Aufwuchses nur noch im Mittelfeld aller Ergebnisse lag. Bei Betrachtung der mittleren N₂-Bindung der verschiedenen FLG-Gras-Gemenge stellte sich die Mischung DSV M5 mit 138 kg ha⁻¹ als am leistungsfähigsten heraus, gefolgt von den Gemengen DSV 2215 (116 kg ha⁻¹) und DSV M4 (104 kg ha⁻¹).

Tabelle 15: Berechnete N₂-Bindung der Futterleguminosen-Gras-Bestände, relevante Größen zur Berechnung sowie die zur Berechnung verwendeten Formeln.

	Frischmasse gesamt [dt ha ⁻¹]	N _c -Gehalt Frischmasse [kg dt ⁻¹]	N-Ertrag Schnittgut [kg ha ⁻¹]	EA FLG [%]	N ₂ -Bindung [kg ha ⁻¹]
$N_2\text{-Bindung} = (-160 + 0,0015 * N\text{-Entzug}^2) + (0,005 * N\text{-Entzug} * EA\text{ FLG}) + (6,699 * EA\text{ FLG}) - (0,0505 * EA\text{ FLG}^2)^*$					
DSV 2256_1	88,1	0,69	61	5	-120
DSV 2256_2	57,5	0,49	28	27	-12

DSV M4_1	126,4	0,81	103	71	113
DSV M4_2	93,6	0,77	72	70	94

DSV 2215_1	146,6	0,68	100	52	93
DSV 2215_2	195,2	0,70	137	70	138

DSV M5_1	154	0,72	112	77	118
DSV M5_2	254,3	0,65	165	83	158

$N_2\text{-Bindung} = (-105 + 1,269 * N\text{-Entzug}) + (0,003 * EA\text{ FLG}^2)^{**}$					
Camena Luz. Gras	211,3	0,72	153	69	103

* Langfassung der Gleichung zur Berechnung der N-Bindung durch alle Kleearten (außer Weißklee) in Reinsaat oder Gemenge sowie für die Nutzungsvariante Schnittnutzung (nach Kolbe & Köhler, 2008)

** Langfassung der Gleichung zur Berechnung der N-Bindung durch Luzerne, Serradella und Esparssette in Reinsaat oder Gemenge sowie für die Nutzungsvariante Schnittnutzung (nach Kolbe & Köhler, 2008)

Besonders hervorzuheben ist die N₂-Bindung der Mischung DSV 2256, die mit mittleren - 66 bzw. - 120 (DSV 2256_1) und - 12 kg ha⁻¹ (DSV 2256_2) als einzige Prüffaktorstufe N₂-Fixierleistungen im negativen Bereich zeigte. Da eine negative N₂-Fixierung aus biologischer Perspektive nicht gültig ist, wurden diese Werte für den statistischen Medianvergleich zwischen den Gemengen mit hoher und geringer potenzieller Anbaueignung auf ein Nullniveau angehoben. Es konnte keine signifikant höhere N₂-Fixierung durch die FLG-Gras-Gemenge mit einer höheren potenziellen Anbaueignung nachgewiesen werden (Robuster Rangtest, p = 0,413).

5 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse in Bezug auf die formulierten Forschungshypothesen (siehe Kap. 1.2) diskutiert. Entsprechend der Gruppierung der Hypothesen und der Struktur der Ergebnisdarstellung werden die in Reinsaat etablierten FLG-Arten bzw. -Sorten und die Futterleguminosen-Gras-Gemenge auch in der Diskussion getrennt voneinander betrachtet. Innerhalb der beiden Gruppen werden die Arten bzw. Sorten und Gemenge anhand erhobener Prüfmerkmale hinsichtlich ihrer Etablierungs- und Ertragsleistung verglichen und beurteilt. Auf dieser Grundlage wird anschließend eine Einschätzung der Anbaueignung der Arten bzw. Sorten und Gemenge für den Standort Brandenburg unter dem Einfluss des Klimawandels vorgenommen. Daran anschließend findet ein Vergleich zwischen den Gruppen statt, in dem die Etablierungs- und TM-Ertragsleistung betrachtet wird, um so eine möglicherweise höhere Anbaueignung einer der Gruppen herauszustellen.

5.1 Futterleguminosen-Reinsaaten

A *Die Art mit der höchsten potenziellen Anbaueignung, der Erdklee, lässt sich am besten etablieren und weist daher einen höheren Kulturdeckungsgrad [%] sowie eine geringere Verunkrautung [%] auf als der Gewöhnliche Hornklee, der Gelbklee, der Weiße Steinklee, die Luzernesorten und der Bockshornklee.*

Zunächst wird die Komponente der Etablierungsleistung der jeweiligen Bestände anhand der Prüfmerkmale Kulturdeckungsgrad [%] und Verunkrautung [%] betrachtet.

Zu Beginn wird der prozentuale Kulturdeckungsgrad (KDG) untersucht, welcher sich aus der Multiplikation des Gesamtdeckungsgrades [%] (GDG) mit dem FLG-Anteil an der Gesamtdeckung [%] eines Bestandes ergibt. Zur ersten Bonitur am 06.07.2021 zeigte im Mittel beider Bestände der Erdklee den höchsten KDG, gefolgt vom Gelbklee, dem Weißen Steinklee, der Luzelle, dem Gewöhnlichen Hornklee und der Luzernesorten-Mischung DSV 2060. Die hohen KDG des Erdklees zum frühesten Zeitpunkt der Datenaufnahme könnten auf eine im Vergleich zu den restlichen Arten und Sorten bessere Etablierungsfähigkeit der Art unter den Standortbedingungen Brandenburgs, auf Grundlage ihrer hohen potenziellen Anbaueignung, hinweisen. Für eine differenzierte Bewertung der zügigen Bodendeckung durch den Erdklee muss hier jedoch der horizontale und bodennahe Wuchs seiner Stängel berücksichtigt werden. Die aus der Wuchsform resultierende flächigere Ausdehnung der zuwachsenden Biomasse kann die Art in einem interspezifischen Vergleich mit aufrecht wachsenden Arten und Sorten, wie der Luzelle oder dem Weißen Steinklee, hinsichtlich des Etablierungsfortschrittes überlegen wirken lassen. Die Aussagekraft

des KDG als Indikator für die Etablierung muss an dieser Stelle folglich relativiert werden. Der mittlere KDG des Gelbklees übertraf zum ersten Boniturtermin den der restlichen FLG (mit Ausnahme des Erdklees), was die rasche Jungendentwicklung der Art widerspiegelt, die auch in anderen Untersuchungen beobachtet wurde (Elsalhy et al. 2019). Die Arten Weißer Steinklee, Luzerne und Gewöhnlicher Hornklee zeichnen sich durch ein langsames Wachstum in der Jugendphase aus, was die geringeren KDG der jeweiligen Bestände zur ersten Bonitur erklärt. Mit dem Verlauf der Vegetationsperiode veränderten sich die GDG der Aufwüchse und die FLG-Anteile an der Gesamtdeckung, sodass zum vierten Boniturtermin, nach 119 Wachstumstagen, der Weiße Steinklee den höchsten durchschnittlichen KDG aufwies. Dieser nahm im Vergleich der Arten und Sorten weiterhin in der Reihenfolge DSV 2060 > Luzelle > Gewöhnlicher Hornklee > Erdklee > Gelbklee ab. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der ersten Bonitur zeigte der Erdklee zu diesem Zeitpunkt, mit mittleren 72 % und entgegen der Forschungshypothese, einen der geringsten KDG. Dieser übertrifft dennoch die Bodendeckung, die in einer anderen Studie nach einer vergleichbaren Vegetationszeit für die Art erfasst wurde. So bestimmten Teixeira et al. (2017) für die Sorte *Seaton Park* nach 110 Wachstumstagen einen KDG von nur etwa 50 %, was darauf hindeutet, dass der Erdklee am Versuchsstandort eine für die Sorte gute Etablierung erreicht hat. Im Vergleich zu den anderen Versuchsarten und -sorten fällt der KDG des Erdklees hingegen gering aus, was auf eine schlechtere Etablierungsfähigkeit der Art am Standort hinweisen könnte. Dabei ist jedoch der auf eine Dürreflucht ausgelegte Lebenszyklus der Art zu berücksichtigen und, dass es sich bei den im Versuch verwendeten Sorten, *Dalkeith* und *Seaton Park*, um mittelfrühblühende Sorten (Camena Samen 2021) handelt. So befanden sich beide Aufwüchse des Erdklees zur vierten Datenaufnahme bereits im Entwicklungsstadium der Frucht- reife und es war ein erstes Absterben einzelner Triebe zu beobachten (siehe Kap. 4.3), während der Weiße Steinklee, der Gelbklee und die Luzernesorten die Vollblüte noch nicht erreicht hatten und einen fortlaufenden Biomassezuwachs verzeichneten. Neben einer schlechteren Etablierungsfähigkeit des Erdklees am Versuchsstandort, kann folglich auch die unterschiedlich weit fortgeschrittene Entwicklung der Arten und Sorten die geringeren KDG der Art bedingt haben, da diese zu einer gegenläufigen Dynamik im Biomassezuwachs führen.

Die prozentuale Verunkrautung der FLG-Reinsaatbestände ergibt sich aus der Summe der TM-Ertragsanteile (EA) der Gräser und Kräuter im Pflanzenmaterial der Ertragsschnitte vom 17.08.2021. Die geringste durchschnittliche Verunkrautung wies die Art Weißer Steinklee auf, gefolgt vom Luzernesorten-Mix DSV 2060, dem Gewöhnlichen Hornklee, der Luzelle und dem Erdklee. Die stärkste mittlere Verunkrautung zeigte der Gelbklee. Im Widerspruch zur formulierten Forschungshypothese konnte für den Erdklee somit keine geringere Verunkrautung im

Vergleich zu den restlichen Arten und Sorten festgestellt werden. Die erfassten Verunkrautungs-niveaus könnten auf eine schlechte Etablierungsfähigkeit des Erdkleees und des Gelbkleees aufgrund ungeeigneter standörtlicher Entwicklungs- und Wachstumsbedingungen hinweisen, welche die Konkurrenzkraft der Arten verringert und damit die hohe Verunkrautung der Bestände bedingt haben. Jedoch würden beide Arten, aufgrund ihrer niedrigen Wuchsformen, auch auf Standorten mit günstigen Bedingungen in ihrer Konkurrenzwirkung um den Faktor Licht begrenzt bleiben. Dadurch würde eine Verunkrautung der Bestände auch unabhängig von der gegebenen Etablierungsfähigkeit gefördert werden. Unterstützt wird diese Annahme durch Ergebnisse einer Studie von den Hollander et al. (2006), die eine signifikante Korrelation zwischen der maximalen Aufwuchshöhe und der Konkurrenzwirkung verschiedener Kleearten bestätigten und für den Erdklee ebenfalls nur eine unzureichende Beikrautunterdrückung aufzeigten. Die Annahme deckt sich auch mit den Ergebnissen der geringeren Verunkrautung der Bestände des Weißen Steinkleees, des Luzernesorten-Mix DSV 2060 und der Luzelle, die zum Erntetermin jeweils eine signifikant höhere Aufwuchshöhe aufwiesen als die Bestände des Erdkleees und des Gelbkleees (siehe Anhang 2).

Insgesamt fiel unter den sechs betrachteten FLG-Arten bzw. -Sorten der Weiße Steinklee, hinsichtlich des höchsten KDG und der geringsten Verunkrautung zum Zeitpunkt der Ernte, mit der besten Etablierung unter den brandenburgischen Standortbedingungen auf. Weiterhin zeigten der Luzernesorten-Mix DSV 2060 und die Luzernesorte Luzelle, gefolgt vom Gewöhnlichen Hornklee eine gute und im Vergleich der Arten und Sorten mittlere Etablierungsleistung. Der Erdklee wies bezüglich der herangezogenen Prüfmerkmale eine weniger erfolgreiche Etablierung auf als aufgrund seiner hohen potenziellen Anbaueignung im Vorhinein angenommen wurde. Dabei bleibt jedoch unklar, ob diese Etablierungsleistung tatsächlich auf ungünstige Standortbedingungen zurückzuführen ist, oder ob diese unabhängig von der Etablierungsfähigkeit durch die oben diskutierten artspezifischen Entwicklungs- und Wuchseigenschaften bedingt wurde. Der Gelbklee zeigte bezüglich beider Prüfmerkmale die schlechteste Etablierung unter den untersuchten Arten und Sorten. Aus den besprochenen Ergebnissen ergibt sich für die Etablierungsleistung der Arten bzw. Sorten folgende Abstufung:

Weißer Steinklee > DSV 2060 > Gewöhnlicher Hornklee, Luzelle > Erdklee > Gelbklee.

B *Die Art mit der höchsten potenziellen Anbaueignung, der Erdklee, zeigt hinsichtlich des Trockenmasseertrages [dt ha⁻¹] und der N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹] eine höhere Ausschöpfung des artspezifischen Ertragspotenzials als der Gewöhnliche Hornklee, der Gelbklee, der Weiße Steinklee, die Luzernesorten und der Bockshornklee.*

Um eine Einschätzung der Anbaueignung der Arten und Sorten vornehmen zu können, wird in einem zweiten Schritt die jeweilige Ertragsleistung anhand der Prüfmerkmale Trockenmasseertrag und N₂-Fixierleistung untersucht. Eine Betrachtung des prozentualen FLG-Ertragsanteils wird dabei unberücksichtigt gelassen, da dieser im Falle der FLG-Reinsaaten das Gegenstück zur prozentualen Verunkrautung darstellt, die bereits diskutiert wurde. Die im Versuch erzielten TM-Erträge und N₂-Fixierleistungen der Arten und Sorten werden mit entsprechenden Literaturangaben verglichen und die Prüffaktorstufen so auf die prozentuale Ausschöpfung ihres art- bzw. sortenspezifischen Ertragspotenzials am Versuchsstandort hin überprüft. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da ein interspezifischer Vergleich der Prüfmerkmale aufgrund unterschiedlicher Potenziale nicht die erwünschte Aussagekraft bezüglich einer etwaigen Anbaueignung erreichen würde. Um die Ausschöpfung der Ertragsleistung zwischen den Arten bzw. Sorten vergleichbar zu machen, wurden von der Autorin als Potenzialgrenzen fungierende Vergleichswerte herangezogen, die sich in ihren Eigenschaften möglichst ähneln. So basieren die Vergleichswerte für die TM-Erträge, wenn nicht anders dargelegt, auf einem einzelnen Ertragsschnitt im ersten HNJ. Zur Einordnung der berechneten N₂-Fixierleistungen wurden aus der Literatur hingegen jeweils Angaben zur jährlichen N₂-Fixierleistung der Arten und Sorten herangezogen. Eine tabellarische Zusammenfassung der verwendeten Quellen ist dem Anhang der Arbeit zu entnehmen.

Entsprechend der potenziellen Anbaueignungen der Arten für den Standort Brandenburg (siehe Kap. 2.5) wird die höchste Ausschöpfung des Ertragspotenzials vom **Erdklee** erwartet. In einem neuseeländischen Sortenversuch wurde für die Sorte *Seaton Park* ein Ertragsniveau von rund 14,5 dt TM ha⁻¹ bei einem Ernteschnitt nach 165 Wachstumstagen erfasst (Teixeira et al. 2017). Im vorliegenden Versuch erzielte der Erdklee nach 119 Wachstumstagen einen mittleren TM-Ertrag von 25,4 dt ha⁻¹, was 175 % des Literaturwertes darstellt. Bei Betrachtung der Einzelertragswerte wird deutlich, dass der Bestand Erdklee_1 den Vergleichswert sogar um 128 % (33 dt TM ha⁻¹) übertrifft, was zeigt, dass die Aufwüchse das TM-Ertragspotenzial der Sorte *Seaton Park* am Versuchsstandort sehr gut ausschöpfen und übererfüllen konnten. Jedoch bleiben die TM-Ertragswerte hinter denen anderer Sorten (Woogenellup, 42 dt ha⁻¹) (Teixeira et al. 2017) oder Subspezies (*Trifilium subterraneum* ssp. *yaninicum*, 40 dt ha⁻¹) (Vasileva und Vasilev 2020) zurück, die aus der Literatur bekannt sind. Mit einem VK von 41 % zeigte der Erdklee unter den untersuchten Arten und Sorten die zweitgrößte Streuung der TM-Ertragswerte. Möglicherweise

könnten die Ertragsunterschiede mit dem verstärkten Durchwuchs der Vorfrucht Rispenhirse (*Panicum miliaceum* L.) im Bestand Erdklee_2 erklärt werden. So konnten Ahmed und Hou (2021) erst kürzlich die allelopathische Wirkung von Biomasseextrakten der Rispenhirse auf die Entwicklung von Luzerne und Wicke feststellen, welche die Keimung der Samen sowie das Wachstum der Keimlinge reduzierte. Diese Effekte könnten auch bei der Ertragsbildung des Erdklee_2 zum Tragen gekommen sein und die geringeren TM-Erträge im Vergleich zum Erdklee_1 bedingt haben. Bezüglich seines jährlichen N₂-Fixierungspotenzials wird in der Literatur eine Variationsbreite von 50 – 188 kg ha⁻¹ (Bolger et al., 1995 zit. nach Vasileva und Vasilev 2020) für den Erdklee angegeben. Im betrachteten Versuch wurde eine mittlere N₂-Fixierung von 85 kg ha⁻¹ für die Art errechnet, was knapp 45 % des oberen Grenzwertes des Fixierungspotenzials entspricht.

Die Art mit der nächsthöheren potenziellen Anbaueignung nach dem Erdklee ist der **Gewöhnliche Hornklee**. Für die Sorte *Leo*, die auch im betrachteten Versuch Verwendung fand, wurde von Marley et al. (2006) ein TM-Ertrag von 32,7 dt ha⁻¹ für den ersten Schnitt nach der Ansaat erfasst. Dieser Wert wird als Ertragspotenzial für die Art herangezogen. Mit dem erzielten mittleren TM-Ertrag von 32,8 dt ha⁻¹ für den GHK konnte dieses im vorliegenden Versuch zu 100 % und vom ertragsstärkeren Bestand GHK_2 (42,2 dt ha⁻¹) zu 129 % ausgeschöpft werden. In der Untersuchung von Marley et al. (2006) wurde der Ernteschnitt nach 363 Wachstumstagen durchgeführt, während dieser auf der LFS Gut Wilmersdorf bereits nach 119 Wachstumstagen erfolgte. Hinsichtlich dieser deutlich kürzeren Etablierungs- und Vegetationszeit im betrachteten Versuch ist der Vergleich zwischen beiden Werten kritisch einzuordnen, wobei vermutet werden kann, dass unter gleichen Versuchsbedingungen eine höhere prozentuale Ausschöpfung hätte erreicht werden können. Mit einem VK von 41 % zeigt auch der GHK eine große Streuung der TM-Ertragswerte um den Mittelwert. Der höhere TM-Ertrag des Bestandes GHK_2 könnte möglicherweise auf dessen Lage im Senkenbereich der Versuchsfläche zurückzuführen sein. Aufgrund von Erosionsvorgängen entlang der Hangneigung der Versuchsfläche bilden sich hier vermehrt humusreiche Kolluvisole aus, die im Vergleich zu den humusärmeren Böden in Hanglage, auf welchen sich der Bestand GHK_1 befand, eine fruchtbarere Wachstumsgrundlage darstellen und die höhere Ertragsleistung bedingt haben könnten. Die jährliche N₂-Fixierleistung der Art liegt nach Freyer et al. (2005) zwischen 30 und 100 kg ha⁻¹. Der GHK fixierte im Mittel beider Bestände 126 kg N₂ ha⁻¹, wobei die Fixierleistung des Bestandes GHK_2, aufgrund der gesteigerten Biomasseakkumulation, mit 163 kg ha⁻¹ deutlich über der des Bestandes GHK_1 (90 kg ha⁻¹) lag. Die durchschnittliche N₂-Fixierleistung des Gewöhnlichen Hornklees übertrifft den oberen Grenzwert des artspezifischen Fixierpotenzial um 26 %.

Der **Weißer Steinklee** (WSK) erzielte im betrachteten Versuch einen mittleren TM-Ertrag von 30,4 dt ha⁻¹ mit Einzelertragswerten von 41,4 (WSK_1) bzw. 19,3 dt ha⁻¹ (WSK_2). Pietsch (2004) erfasste für den WSK TM-Erträge von 8,6 – 28,4 dt ha⁻¹ für den ersten Ertragsschnitt nach der Aussaat. Wird der höhere der beiden Werte als artspezifisches Ertragspotenzial herangezogen, konnte dieses im Versuch um durchschnittlich 7 % und vom ertragsstärkeren Bestand, WSK_1, um 46 % übertroffen werden. Auffällig ist auch beim WSK die hohe Differenz zwischen den TM-Erträgen beider Aufwüchse, die mit einem VK von 51 % quantifiziert werden kann. Grund hierfür könnte die unterschiedliche Anordnung der Prüfglieder auf der Versuchsfläche gewesen sein. Während der Bestand WSK_1 auf der lehmigen Kuppe des Versuchsstandortes positioniert war, befand sich der Bestand WSK_2 in Hanglage. Die kuppigen Bereiche des Geländes sind potenziell von einem Bodenabtrag durch Wind- und Wassererosion betroffen, wodurch das kalkhaltige Ausgangsgestein Geschiebemergel ansteht und in diesen Bereichen tendenziell höhere pH-Werte als am Hang und in der Senke bedingt (Hauck et al. 2021). Hinsichtlich der Präferenz des WSK für basische bis neutrale pH-Werte könnte dies zu den großen TM-Ertragsunterschieden zwischen beiden Aufwüchsen geführt haben. Im Widerspruch zu dieser Annahme stehen die von Hauck et al. (2021) bestimmte ausreichend hohe pH-Wert (7,1) am Hang (siehe Kap. 3.4) sowie das Versuchsergebnis von Bull (2014), nach welchem eine Abhängigkeit des Steinkleewachstums in einem pH-Wert-Bereich von 4,9 – 7,7 nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Das jährliche N₂-Fixierungspotenzial der Art wird mit 80 – 250 kg ha⁻¹ angegeben (Freyer et al. 2005). Die im Versuch erzielte durchschnittliche N₂-Fixierleistung des WSK lag bei 131 kg ha⁻¹ und konnte das Fixierungspotenzial (oberer Grenzwert) damit zu 53 % ausschöpfen.

Der **Gelbklee**, für welchen die gleiche potenzielle Anbaueignung bestimmt wurde wie für den Weißen Steinklee und die Luzerne, erreichte im betrachteten Versuch einen mittleren TM-Ertrag von 19,5 dt ha⁻¹. In verschiedenen Anbauversuchen im Norden der USA wurde für die Art, mit Durchführung eines einzelnen Ernteschnittes sechs bis zehn Wochen nach der Aussaat, ein durchschnittlicher TM-Ertrag von 22,0 dt ha⁻¹ erfasst (Zhu et al. 1996). Dieser fungiert hier als Vergleichswert, womit der Gelbklee im betrachteten Versuch sein artspezifisches TM-Ertragspotenzial zu 89 % ausschöpfen konnte. Dabei ist anzumerken, dass der Vergleichswert aus der Literatur unter Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel erreicht wurde, während die konkurrenzschwache Art auf der LFS Gut Wilmersdorf nach den Richtlinien der ökologischen Landwirtschaft angebaut wurde. Die damit einhergehende starke Verunkrautung der Gelbklee-Bestände, die bereits diskutiert wurde, könnte die TM-Ertragsleistung der Art reduziert haben. Der angestellte Vergleich zwischen beiden TM-Ertragswerten ist diesbezüglich in seiner Aussagekraft begrenzt, da die unterschiedlichen Versuchsbedingungen die erreichte prozentuale

Ausschöpfung des Ertragspotenzials verringert haben könnten. Das artspezifische N₂-Fixierungspotenzial des Gelbklees liegt bei jährlich 30 – 100 dt ha⁻¹ (Freyer et al. 2005). Im betrachteten Versuch wurde für die Art eine mittlere Fixierleistung von 95 kg N₂ ha⁻¹ berechnet, womit das Potenzial der Art, in Bezug auf den oberen Grenzwert, zu 95 % ausgeschöpft werden konnte.

Die weidetolerante Luzernesorte **Luzelle** erbrachte im vorliegenden Versuch eine mittlere Ertragsleistung von 27,8 dt TM ha⁻¹, die mit einem VK von 11 % zudem die stabilste unter allen Arten und Sorten darstellte. Giebelhausen (2009) erfasste für die Sorte im ersten HNJ bei einem drei- bis vierschnittigen Nutzungsregime einen durchschnittlichen TM-Ertrag von 144,2 dt ha⁻¹. Um einen groben Vergleich zur prozentualen Ausschöpfung des Ertragspotenzials durch die anderen Arten und Sorten zu ermöglichen, wird dieser Vergleichswert durch drei bzw. vier geteilt, um so vereinfacht ein einschnittiges Nutzungsregime zu simulieren. Nach diesem Vorgehen ergibt sich für die Luzelle ein TM-Ertragspotenzial von 36,1 – 48,1 dt ha⁻¹ für einen Ertragschnitt im ersten HNJ, womit im betrachteten Versuch eine 58 – 77-prozentige Ausschöpfung erreicht werden konnte. Für die Luzernesorte Planet erfasste Giebelhausen (2009) einen TM-Ertrag von 157,5 dt ha⁻¹, ebenfalls im ersten HNJ sowie für ein drei- bis vierschnittiges Nutzungsregime. Dieser wird als Vergleichswert für den **Luzernesorten-Mix DSV 2060** herangezogen, in dem u.a. die Sorte Planet enthalten war. Nach demselben Procedere wie für die Sorte Luzelle vorgehend, ergibt sich für den Sorten-Mix ein TM-Ertragspotenzial von 39,4 – 52,5 dt ha⁻¹. Der Einzelbestand DSV 2060 erzielte im betrachteten Versuch einen TM-Ertrag von 24,6 dt ha⁻¹ und konnte sein Ertragspotenzial damit zu 47 – 62 % ausschöpfen. Pietsch (2004) stellte im Mittel zweier Versuchsjahre für Luzerne in Schnittnutzung und im ersten HNJ eine N₂-Fixierung 137 kg ha⁻¹ fest. Dieser Wert wird sowohl für die Luzernesorte Luzelle als auch für den Luzernesorten-Mix DSV 2060 als N₂-Fixierungspotenzial definiert. Mit einer berechneten mittleren N₂-Bindung von 57 kg ha⁻¹ konnte die Luzelle dieses zu 42 % ausschöpfen, während der Luzernesorten-Mix sein Potenzial mit einer N₂-Fixierung von 35 kg ha⁻¹ lediglich zu 26 % ausreizte.

Bezüglich der prozentualen Ausschöpfung des art- bzw. sortenspezifischen TM-Ertragspotenzials am Versuchsstandort ergibt sich zwischen den Arten bzw. Sorten folgende Abstufung:

Erdklee > Weißer Steinklee > Gewöhnlicher Hornklee > Gelbklee > Luzelle > DSV 2060.

In Übereinstimmung mit der formulierten Forschungshypothese konnte der Erdklee somit die höchste prozentuale Ausschöpfung erreichen. Sowohl der Erdklee als auch der WSK und der GHK konnten ihr artspezifisches TM-Ertragspotenzial im Mittel übertreffen, was darauf hindeutet, dass am Versuchsstandort sehr gute Entwicklungs- und Wachstumsbedingungen für die Arten bestehen. Dies ist auch für den Gelbklee anzunehmen, der trotz einer starken Verunkrautung

eine hohe Ausschöpfung seines Potenzials erreichen konnte. Die geringste Ausschöpfung des TM-Ertragspotenzials zeigten die Luzernesorte Luzelle sowie der Luzernesorten-Mix DSV 2060. Dies könnte auf ungeeignete Wachstumsbedingungen für die Sorten am Versuchsstandort hinweisen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die herangezogenen Vergleichswerte aus der Literatur die TM-Erträge einer Sommerblanksaat mit einer Nutzung in den Folgejahren darstellen (Giebelhausen 2009), während es sich im betrachteten Versuch um TM-Erträge einer Frühjahrsblanksaat mit einer Nutzung im Ansaatjahr handelt. Vor dem Hintergrund der langsamen Jugendentwicklung der Luzerne kann angenommen werden, dass diese Differenz in der vorausgegangenen Vegetationszeit die geringe Ausschöpfung des Ertragspotenzials bedingt hat.

Hinsichtlich der N₂-Fixierungsleistung nimmt die prozentuale Ausschöpfung des art- bzw. sortenspezifischen Potenzials zwischen den Prüffaktorstufen in folgender Reihenfolge ab:

Gewöhnlicher Hornklee > Gelbklee > Weißer Steinklee > Erdklee > Luzelle > DSV 2060.

Entgegen der Forschungshypothese zeigte anstelle des Erdkleees der GHK die höchste prozentuale Ausschöpfung des artspezifischen N₂-Fixierungspotenzials und konnte dieses zudem als einzige Art im Versuch übertreffen. Obwohl der WSK in absoluten Zahlen die höchste durchschnittliche N₂-Fixierung erzielte, bleibt er aufgrund des höchsten Fixierungspotenzials unter allen Arten und Sorten bezüglich der prozentualen Ausschöpfung hinter dem GHK und dem Gelbklee zurück. Die geringste Ausschöpfung des Fixierungspotenzials zeigten wiederum die Luzernesorte Luzelle und der Luzernesorten-Mix DSV 2060.

Zusammenfassung vor dem Hintergrund der Forschungsfrage

Die beste Etablierungsleistung und eine Übererfüllung des TM-Ertragspotenzials deuten darauf hin, dass der **Weißer Steinklee** unter den betrachteten Arten und Sorten zukünftig die **beste Anbaueignung** für den Standort Brandenburg aufweisen könnte. Aus den diskutierten Ergebnissen lässt sich weiterhin ableiten, dass vor allem kalkhaltige Standorte für den Anbau prädestiniert sind. Hinsichtlich seines für die Tierfütterung ungünstigen Kumaringehaltes ist eine hohe Anbaueignung des WSK insbesondere in viehlosen Betrieben gegeben, in denen er als Bienenweide und Gründüngung Verwendung finden kann. Dabei wirken sich seine hohe Biomassebildung und das kräftige und tiefreichende Wurzelsystem vorteilhaft aus (siehe Kap. 2.4.4). Weiterhin kann, für den **Gewöhnlichen Hornklee** eine **gute Anbaueignung** am Versuchsstandort angenommen werden, die sich auf die höchste Ausschöpfung des N₂-Fixierungspotenzials, eine Übererfüllung des TM-Ertragspotenzials und eine gute Etablierungsleistung gründet. Diese Eignung kann sowohl auf viehhaltenden als auch auf viehlosen Betrieben zum Tragen kommen, da sich die Art durch bodenstrukturverbessernden Wurzeleigenschaften, aber auch durch einen hohen Futterwert

auszeichnet. Zudem birgt die antiparasitäre Wirkung des Hornklees Vorteile für die Wiederkäuerfütterung (siehe Kap. 2.4.1). Die im Vergleich der Arten und Sorten höchste Ausschöpfung des TM-Ertragspotenzials deutet auf eine **gute Anbaueignung** des **Erdklees** für den Standort Brandenburg hin. Diese wird durch die gute sortenspezifische Etablierungsleistung untermauert. Einschränkungen könnten diesbezüglich, aufgrund der geringen Aufwuchshöhe, auf Ackerflächen mit einem hohen Beikrautdruck bestehen. Diese Wuchsform und seine Eignung als Futtermittel, lassen einen Anbau des Erdklees jedoch vor allem für Betriebe mit Weideflächen sinnvoll erscheinen, auf denen er eine trockentolerante Ergänzung zum Weißklee darstellen kann. Auf Ackerbaubetrieben kann die Art zudem eine konkurrenzschwächere Alternative zum Rotklee als Untersaat in Getreidebeständen darstellen (Baresel 2014). Die Luzernesorte **Luzelle** und der **Luzernesorten-Mix DSV 2060** zeigten unter den betrachteten Arten und Sorten die geringste Ausschöpfung des TM-Ertrags- und N₂-Fixierungspotenzials. Jedoch erzielten beide Prüffaktorstufen eine gute Etablierungsleistung. Vor dem Hintergrund der langsamen Jugendentwicklung der Luzerne können diese erfolgreichen Bestandesetablierungen im Ansaatjahr bereits als Indiz für eine gute Anbaueignung der Sorten am Versuchsstandort betrachtet werden. Die geringe Ertragsleistung deutet hingegen auf eine eingeschränkte Anbaueignung hin, wobei jedoch berücksichtigt werden muss, dass bei der Mehrjährigkeit der Art eine volle Ertragsleistung grundsätzlich erst in den Jahren nach der Ansaat erreicht wird. Auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse kann eine **gute Anbaueignung** der beiden Prüffaktorstufen vermutet werden, die durch die Entwicklung und die Ertragsleistung der Bestände in den Folgejahren jedoch zunächst bestätigt werden muss. Ein Anbau der Luzelle könnte dann aufgrund ihrer verbesserten Beweidungstoleranz (Giebelhausen 2009) insbesondere für viehhaltende Betrieb mit Weidehaltung von Interesse sein. Die Sorten der DSV Mischung zeichnen sich durch hohe Rohprotein- und mittlere TM-Erträge aus (BSA 2020), was ebenfalls für eine Anbaueignung auf viehhaltenden Betrieben sprechen würde. Für den **Gelbklee** kann in Bezug auf die Untersuchungsergebnisse eine **gute bis eingeschränkte Anbaueignung** für den Standort BRB vermutet werden. Dieser erbrachte unter allen Arten und Sorten zwar die geringste Etablierungsleistung, was insbesondere auf die vergleichsweise starke Verunkrautung der Aufwüchse zurückzuführen ist, zeigte aber dennoch eine hohe Ausschöpfung des artspezifischen TM-Ertrags- und N₂-Fixierungspotenzials. Da das TM-Ertragspotenzial der Art grundsätzlich gering ausfällt, ist die Eignung für einen Anbau in Reinsaat und in Hauptfruchtstellung begrenzt (LFL o. J.a). In Artengemengen könnte der Gelbklee hinsichtlich seiner zügigen Jugendentwicklung jedoch eine gute Ergänzung zu FLG-Arten mit einer langsamen Etablierung bieten. So berichten Elsalahy et al. (2019) von einer verbesserten Beikrautunterdrückung durch die Kombination komplementärer Wachstumsmerkmale in FLG-Gemengen. Effekte wie dieser könnten dazu beitragen, dass die verschiedenen Funktionen, die

mit dem FLG-Anbau verbunden sind, in BRB auch unter dem Einfluss des Klimawandels erfüllt werden können.

5.2 Futterleguminosen-Gras-Gemenge

C Die Gemenge mit einer besseren potenziellen Anbaueignung, DSV M4, DSV 2215 und Camena Luzerne Gras 100, lassen sich besser etablieren und weisen daher einen höheren Kulturdeckungsgrad [%] und eine geringere Verunkrautung [%] auf als die Gemenge DSV M5 und DSV 2256.

Die Etablierungsleistung der Gemenge wird anhand der Kulturdeckungsgrade [%] zu den verschiedenen Boniturterminen und anhand der Verunkrautung [%] untersucht und verglichen.

Zunächst wird der KDG der Aufwüchse betrachtet, welcher sich aus der Multiplikation der GDG [%] mit dem Kulturartenanteil an der Gesamtdeckung [%] ergibt. Zum Zeitpunkt der ersten Datenaufnahme am 06.07.2021 erzielte das Gemenge DSV M5, trotz seiner vergleichsweise geringen potenziellen Anbaueignung für den Versuchsstandort, im Mittel den höchsten KDG. Gefolgt vom Einzelbestand Camena Luzerne Gras 100. Die Gemenge DSV M4 und DSV 2215 zeigten trotz ihrer hohen potenziellen Anbaueignung einen unterdurchschnittlichen KDG zum ersten Boniturtermin. Den geringsten KDG wies zu diesem Zeitpunkt sowie zum vierten Boniturtermin das Gemenge DSV 2256, bestehend aus Einjährigem Weidelgras, Alexandriner- und Perserklee, auf. Beide Aufwüchse der Mischung waren bis zum Ernteschnitt durch eine hohe Lückigkeit und einen ausbleibenden Bestandesschluss gekennzeichnet, was auf eine schlechte Etablierungsfähigkeit des Gemenges am Versuchsstandort hindeuten könnte. Im Gegensatz dazu zeigten die Bestände der Mischungen Camena Luzerne Gras 100 und DSV M5 zum vierten Boniturtermin einen KDG von nahezu 100 %. Die für einen Anbau auf trockenen Standorten geeigneten Gemenge DSV 2215 und DSV M4 erreichten bezüglich des KDG im Vergleich zu den restlichen Mischungen ein mittleres Niveau, wobei letztere leicht unterlegen war. Im Widerspruch zur formulierten Forschungshypothese erzielten die FLG-Gras-Gemenge mit einer besseren potenziellen Anbaueignung keinen generell höheren KDG als die Mischungen mit einer schlechteren potenziellen Anbaueignung. Insbesondere das Gemenge DSV M5 fiel hier durch seine starke Wüchsigkeit trotz geringer potenzieller Anbaueignung auf.

Die prozentuale Verunkrautung der FLG-Gras-Gemengebestände ergibt sich aus dem TM-Ertragsanteil der Kräuter im Schnittgut vom 17.08.2021. Diese war im Gemenge DSV M5 am geringsten, gefolgt von der Mischung DSV 2256, dem Aufwuchs des Camena Luzerne Gras 100, der Mischung DSV 2215 und DSV M4. Entgegen der aufgestellten Forschungshypothese zeigten die

FLG-Gras-Gemenge mit einer geringeren potenziellen Anbaueignung die geringere Verunkrautung, die sich jedoch nicht als statistisch signifikant herausstellte. Das prozentuale Verunkrautungs-niveau des konkurrenzstärksten Gemenges DSV M5 lag bei 10 %, während das des konkurrenzschwächsten Gemenges DSV M4 15 % betrug. Folglich bestanden hinsichtlich der Effektivität in der Beikrautunterdrückung nur geringfügige Unterschiede zwischen den Gemengen, was darauf hindeutet, dass neben der potenziellen Anbaueignung auch andere Faktoren die Konkurrenz-kraft der Gemenge beeinflussen. So weisen verschiedene Studien darauf hin, dass der kombinierte Anbau mehrerer Arten grundsätzlich in einer Verbesserung der Beikrautunterdrückung resultiert, was auf die effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen (Sturludóttir et al. 2013) sowie die Komplementarität funktionaler Eigenschaften im Artengemenge zurückzuführen sein könnte (Ranaldo et al. 2020).

Hinsichtlich der geringfügigen Unterschiede in der Verunkrautung der Gemenge, werden zur Bewertung der Etablierungsleistung vor allem die KDG zum Erntetermin herangezogen. Damit zeigt das Gemenge Camena Luzerne Gras 100 die beste Etablierung am Versuchsstandort, gefolgt von den Gemengen DSV M5, DSV 2215 und DSV M4. Für diese vier Gemenge lässt sich insgesamt eine zufriedenstellende Etablierungsleistung auf ähnlichem Niveau feststellen, während die Mischung DSV 2256 hinsichtlich der geringen KDG hinter diesen zurückbleibt. Eine grundsätzliche Überlegenheit bezüglich der Etablierungsleistung lässt sich für die FLG-Gras-Gemenge mit einer höheren potenziellen Anbaueignung, entgegen der Forschungshypothese, nicht feststellen. Die Etablierungsleistung der Gemenge nimmt in nachstehender Reihenfolge ab:

Camena Luzerne Gras 100 > DSV M5 > DSV 2215 > DSV M4 > DSV 2256.

D *Die Gemenge mit einer besseren potenziellen Anbaueignung, DSV M4, DSV 2215 und Camena Luzerne Gras 100, erbringen höhere Trockenmasseerträge [dt ha⁻¹], weisen einen höheren Leguminosen-Ertragsanteil [%] sowie eine höhere N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹] auf als die Gemenge DSV M5 und DSV 2256.*

Als zweite Komponente einer empirisch hergeleiteten Anbaueignung wird die Ertragsstruktur der verschiedenen FLG-Gras-Gemenge anhand der Trockenmasseerträge [dt ha⁻¹], des Futterleguminosen-Ertragsanteils [%] und der N₂-Fixierleistung [kg ha⁻¹] untersucht.

Zunächst werden die prozentualen TM-Ertragsanteile der FLG im Schnittgut der Gemenge vom 17.08.2021 verglichen. Den höchsten FLG-EA erreichte das Gemenge DSV M5 mit 79 %, bei einem FLG-Anteil von 70 % im Saatgut. Das Gemenge Camena Luzerne Gras 100 zeigte mit 75 % denselben FLG-Anteil im Aufwuchs wie im Saatgut. Den nächsthöheren FLG-EA erzielte die Mischung DSV M4, die mit 72 % FLG im Aufwuchs einen leichten Rückgang im Vergleich zum Anteil

im Saatgut (80 %) verzeichnete. Dieser könnte auf die Kombination aus (anfänglich) konkurrenzschwachen FLG (Weißklee, GHK, Gelbklee, Luzerne, Serradella) und dem konkurrenzstarken Deutschen Weidelgras zurückzuführen sein. Besonders auffällig war der geringe FLG-EA in den Aufwüchsen des Gemenges DSV 2256, der bei lediglich 4 (DSV 2256_1) bzw. 19 % (DSV 2256_2) lag und damit weit hinter dem 30-prozentigen Leguminosenanteil im Saatgut zurückblieb. Dies deutet auf ungünstige Entwicklungs- und Wachstumsbedingungen für die enthaltenen FLG-Arten Perser- und Alexandrinerklee am Versuchsstandort hin, die eine erfolgreiche Etablierung verhindert haben könnten. Gleichzeitig ist zu beachten, dass sich das Einjährige Weidelgras der Mischung zum Zeitpunkt der Ernte bereits im BBCH-Stadium 85 – 89 (Teigreife bis Vollreife) befand und daher deutlich höhere Trockensubstanzgehalte (41 %) aufwies als die FLG-Komponente (26 %). Das Verhältnis der TM-EA beider Komponenten in der Gesamt-TM wurde dadurch zugunsten des Gräser-EA beeinflusst. Für eine optimale N₂-Fixierleistung wird in der Literatur ein Verhältnis von 80 % Leguminosen zu 20 % Nicht-Leguminosen im Bestand empfohlen (Friedel et al. 2003). Hinsichtlich dieses Richtwertes ist der erzielte mittlere FLG-EA von 11 % im Gemenge DSV 2256 jedoch in jedem Fall als deutlich zu niedrig einzuschätzen. Das Gemenge DSV 2215 erreichte mit einem FLG-Anteil von 35 % im Saatgut einen FLG-EA von 52 (DSV 2215_1) bzw. 72 % (DSV 2215_2) im Aufwuchs. Diese Differenz schlug sich auch in den TM-Erträgen der beiden Aufwüchse nieder, die bei 28,1 (DSV 2215_1) bzw. 38,9 dt ha⁻¹ (DSV 2215_2) lagen und den positiven linearen Zusammenhang zwischen dem FLG-EA und der Ertragsbildung eines FLG-Gras-Bestandes verdeutlichten. Dieser wird auch von anderen Autoren bestätigt (Titze 2015). Entgegen der vorherigen Annahme wiesen die FLG-Gras-Gemenge mit einer höheren potenziellen Anbaueignung im Mittel keinen höheren FLG-Ertragsanteil auf als die Gemenge mit einer geringeren potenziellen Anbaueignung.

Auch hinsichtlich des TM-Ertrages konnte keine generelle Überlegenheit der Gemenge mit einer höheren potenziellen Anbaueignung festgestellt werden. Den höchsten TM-Ertrag erbrachte unter allen Mischungen das Gemenge DSV M5, gefolgt vom Camena Luzerne Gras 100, der Mischung DSV 2215, DSV M4 und dem Gemenge DSV 2256. Dass das Gemenge DSV M5 trotz seiner geringeren potenziellen Anbaueignung einen höheren TM-Ertrag erzielen konnte als die trocken-toleranten Gemenge DSV M4 und DSV 2215, könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich die Mischung aus wüchsigeren Arten (Rotklee, Schwedenklee, Inkarnatklee) zusammensetzt und damit ein grundsätzlich höheres TM-Ertragspotenzial aufweist. Zudem wies das Gemenge den höchsten FLG-Ertragsanteil auf, der, wie bereits besprochen, positiv mit der Ertragsbildung korreliert. Des Weiteren zeigt die aus fünf Arten bestehende Mischung eine Kombination aus flach- und mitteltiefwurzelnden Pflanzen und enthält Arten mit positiver und negativer potenzieller

Anbaueignung (siehe Kap. 2.5). Diese Zusammensetzung könnte dazu geführt haben, dass die zeitweise restriktiven Bodenfeuchtigkeitsbedingungen in der Vegetationsperiode (siehe Kap. 3.4) nicht mit einer starken Beeinträchtigung der Ertragsbildung einher gingen, sondern durch eine komplementäre Ressourcennutzung und ein kompensatorisches Wachstum abgemildert wurden. Das zweite Gemenge mit einer geringen potenziellen Anbaueignung, die Mischung DSV 2256, erbrachte hingegen die geringste Biomassebildung. Dies zeigten vor allem die FM-Erträge. In der TM führte der hohe TS-Gehalt der Gräser zu einer Angleichung an das Ertragsniveau des Gemenges DSV M4. Das Gemenge DSV 2256 setzte sich aus nur drei Arten zusammen, die zudem alle eine negative potenzielle Anbaueignung und eine vergleichbare Durchwurzelungstiefe (in Bezug auf die FLG-Arten) aufwiesen. Die im Vergleich zum Gemenge DSV M5 geringere Artenanzahl und Vielfalt an funktionalen Eigenschaften könnte dazu geführt haben, dass die ungünstigen Wachstums- und Witterungsbedingungen weniger gut abgefangen werden konnten, wodurch die geringere Ertragsbildung erklärt werden könnte. Diese Annahme stützt sich auf Erkenntnisse von Ranaldo et al. (2020), die feststellten, dass insbesondere die Vielfalt der funktionalen Merkmale (z.B. die Durchwurzelungstiefe) in einem Artengemenge die hinreichende Biomasseproduktion unter schwierigen Umweltbedingungen gewährleistet.

Hinsichtlich der N_2 -Fixierleistung stellte sich wiederum das Gemenge DSV M5 als am ertragreichsten heraus. Dies ist auf die Kombination von hohen FM-Erträgen, FLG-EA und N_t -Gehalten zurückzuführen. Es folgten die Gemenge DSV 2215, DSV M4, und das Camena Luzerne Gras 100. Die Mischung DSV 2256 erzielte hinsichtlich der geringsten FLG-EA, FM-Erträge und N_t -Gehalte unter allen Gemengen im Versuch auch die geringste N_2 -Fixierung. Mit der von Kolbe und Köhler (2008) kalibrierten und veröffentlichten Formel zur Berechnung der N_2 -Bindung ergaben sich für die Gemenge-Aufwüchse negative N_2 -Fixierleistungen von - 120 (DSV 2256_1) bzw. - 12 $kg\ ha^{-1}$ (DSV 2256_2). Eine Fixierleistung im Negativbereich kann mathematisch zwar erreicht werden, ist aus einer biologischen Perspektive jedoch nicht haltbar. Aus diesem Grund wurden für die Bestände des Gemenges DSV 2256 weitere Berechnungen mit dem N-Saldo Rechner des Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (Bachinger et al. 2013) angestellt und für einen Vergleich herangezogen. Diese ergaben für die Bestände positive N_2 -Fixierleistungen von 4 (DSV 2256_1) bzw. 9 $kg\ ha^{-1}$ (DSV 2256_2), die dennoch weit hinter den Leistungen der restlichen Gemengebestände zurückblieben. Im Widerspruch zur formulierten Annahme konnte keine höhere N_2 -Fixierleistung der Gemenge mit einer höheren potenziellen Anbaueignung dokumentiert werden.

Insgesamt zeigte das Gemenge DSV M5 mit dem höchsten FLG-EA, dem höchsten TM-Ertrag und der höchsten N_2 -Fixierung die beste Ertragsleistung am Versuchsstandort. Eine vergleichbare

Ertragsleistung erzielte das Camena Luzerne Gras 100. Unter den trockenoleranten Gemengen DSV 2215 und DSV M4 stellte sich ersteres trotz geringerer FLG-EA bezüglich des TM-Ertrages und der N₂-Fixierleistung als ertragreicher heraus. Die Mischung DSV 2256 erzielte im Vergleich zu den restlichen Gemengen eine nur geringe Ertragsleistung, die insbesondere auf die niedrigen FLG-EA im Aufwuchs zurückzuführen sind. Die Ertragsleistung der Gemenge nimmt in nachstehender Reihenfolge ab:

DSV M5 > Camena Luzerne Gras 100 > DSV 2215 > DSV M4 > DSV 2256.

Zusammenfassung vor dem Hintergrund der Forschungsfrage

Aus der Zusammenführung der Etablierungs- und Ertragsleistung der fünf untersuchten FLG-Gras-Gemenge ergibt sich, dass die Mischungen **DSV M5**, bestehend aus Deutschem Weidelgras, Rotklee, Inkarnatklee, Weiß- und Schwedenklee und das **Camena Luzerne Gras 100** bestehend aus Luzerne, Lieschgras und Deutschem Weidelgras für den Standort Brandenburg zukünftig die **besten Anbaueignungen** aufweisen könnten. Hinsichtlich der vorteilhaften Futterwerte der einzelnen Gemengepartner weist die Luzerne-Gras-Mischung dabei insbesondere für viehhaltende Betriebe eine hohe Bedeutung auf, für welche sie im überjährigen Feldfutterbau eine trockenheitsverträgliche Alternative zum Rotklee(-gras) darstellen kann. Je nach standortspezifischem Wasserdargebot muss dabei jedoch der hohe Wasserverbrauch und die ungünstige WUE der Luzerne berücksichtigt werden (siehe Kap. 2.2.2). Im Gegensatz dazu erzielt das Gemenge DSV M5 eine hohe Anbaueignung vor allem in der Verwendung als Untersaat oder als Gründüngung (DSV Saaten 2021). In Hinblick auf die Vielfalt der FLG-Blüten und die aufeinander folgenden Blühaspekte (siehe Kap. 4.3) kann der Mischung zudem ein biodiversitätsfördernder Mehrwert zugesprochen werden, da über einen möglichst langen Zeitraum eine vielfältige Nahrungsgrundlage für Insekten dargeboten wird. Die Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass im FLG-Gras-Gemengeanbau auch die bislang vermehrt genutzten FLG-Arten, Rotklee und Weißklee, von Relevanz und guter Anbaueignung bleiben könnten. Die Mischungen DSV 2215 und DSV M4 zeigten im Vergleich aller Gemenge jeweils eine mittlere Etablierungs- sowie Ertragsleistung, wobei die absoluten TM-Erträge zweiterer Mischung jedoch deutlich geringer ausfielen. Dem Gemenge **DSV 2215** kann demnach eine **gute Anbaueignung** für den Standort BRB unter dem Einfluss des Klimawandels zugesprochen werden. Hinsichtlich der guten TM-Erträge und des relativ ausgeglichenen Verhältnisses zwischen FLG- und Gras-Komponente (günstigeres Energie-Protein-Verhältnis) eignet es sich dabei vor allem für die Futternutzung auf viehhaltenden Betrieben. Für das Gemenge **DSV M4** für kann eine **gute bis eingeschränkte Anbaueignung** vermutet werden, die insbesondere bei einer Nutzung als insektenfördernde Gründüngung zum Tragen kommt (DSV

Saaten 2021). Der Mischung **DSV 2256** kann in Bezug auf die erbrachte Etablierungs- und Ertragsleistung lediglich eine **eingeschränkte Anbaueignung** für den Standort BRB unter den zukünftigen klimatischen Bedingungen zugeschrieben werden. Die Erfüllung der mit dem FLG-Anbau verbundenen Funktionen kann durch die hohe Lückigkeit der Bestände, die unzureichende N₂-Fixierung und die geringen TM-Erträge nicht gewährleistet werden. Das in der Literatur beschriebene Versagen der enthaltenen Arten auf trockenen Standorten (Freyer et al. 2005; Kolbe et al. 2006) wird durch die Versuchsergebnisse bestätigt.

Eine generelle Überlegenheit der FLG-Gras-Gemenge mit einer höheren potenziellen Anbaueignung konnte für keines der fünf betrachteten Prüfmerkmale festgestellt werden. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Effekte einer hohen Anbaueignung (günstige Wachstums- und Entwicklungsbedingungen in Bezug auf Bodenart, pH-Wert und klimatische Gegebenheiten) durch etwaige Gemeengeeffekte (funktionale Komplementarität, effizientere Ressourcennutzung, kompensatorisches Wachstum) überlagert werden. Hierdurch würde die Anbaueignung von FLG-Gras-Gemengen unter ungünstigen Bedingungen und damit auch in Brandenburg unter dem Einfluss des Klimawandels grundsätzlich erhöht werden.

5.3 Vergleich zwischen Futterleguminosen-Reinsaaten und Futterleguminosen-Gras-Gemenge

E Die Futterleguminosen-Gras-Gemenge lassen sich besser etablieren und weisen daher einen höheren Kulturdeckungsgrad [%] und eine geringere Verunkrautung [%] auf als die Futterleguminosen-Reinsaaten.

Die Etablierung der beiden Gruppen wird anhand der prozentualen Kulturdeckungsgrade zur vierten Bonitur und anhand der prozentualen Verunkrautung untersucht. Die durchschnittlichen Kulturdeckungsgrade der FLG-Reinsaaten und der FLG-Gras-Gemenge unterschieden sich nach 119 Wachstumstagen, zum Termin der vierten Datenerhebung und der Ertragsschnitte, mit einem Median von 83 bzw. 95 % nicht voneinander. Jedoch wiesen die FLG-Gras-Gemenge mit knapp 12 % eine signifikant geringe Verunkrautung auf als die FLG-Reinsaaten, bei denen diese im Durchschnitt 26 % betrug. Dieses Ergebnis entspricht der Literatur, in welcher die verbesserte Beikrautunterdrückung durch Gemeengebestände im Vergleich zu Reinbeständen einer Art vielfach beschrieben wird (Finn et al. 2013; Sturludóttir et al. 2013; Connolly et al. 2017). Die Gemeengebestände DSV 2256_2 und DSV 2215_2 zeigten zudem ein Verunkrautungs-niveau, welches geringer war als das der konkurrenzstärksten FLG-Reinsaat (Weißer Steinklee_1). Im Mittel beider Aufwüchse eines Gemenges bzw. einer Art oder Sorte konnte eine solche transgressive Beikrautunterdrückung sogar für alle Gemenge dokumentiert werden. Dabei stellten der Weiße

Steinklee und der Luzernesorten-Mix DSV 2060 die konkurrenzstärksten FLG-Reinsaaten dar. Als mögliche Ursache der verbesserten Beikrautunterdrückung von Artengemengen im Vergleich zu Reinsaaten wird die Kombination verschiedener funktionaler Eigenschaften innerhalb der Gemenge angeführt (Ranaldo et al. 2020). So zeigten die im betrachteten Versuch verwendeten Mischungen u.a. Kombinationen aus Flachwurzlern (Weißklee) und Tiefwurzlern (Luzerne), Arten mit niedriger (Gelbklee) und aufrechter Wuchsform (Luzerne) (DSV M4, DSV 2215) sowie Kombinationen aus N₂-bindenden und nicht N₂-bindenden Arten. Für die Aufwüchse des Gemenges DSV M5 konnten zudem verschiedene Blühaspekte beobachtet werden, die auf unterschiedliche Hauptwachstumsphasen und Entwicklungsmuster der Arten hindeuten. Diese Zusammenführung sich ergänzender Eigenschaften könnte zu einer komplementären und effizienteren Nutzung der vorhandenen Ressourcen geführt haben (Sturludóttir et al. 2013), welche das Aufkommen von Beikräutern in den Gemengebeständen im Vergleich zu den Reinsaatbeständen reduziert hat. Die Erkenntnisse einer Untersuchung von Elsalahy et al. (2019) relativieren das vorliegende Ergebnis, indem diese darauf hindeuten, dass die erhöhte Konkurrenzwirkung von Artengemengen im Vergleich zu Reinbeständen einer Art von den jährlichen Schwankungen der standörtlichen Wachstumsbedingungen abhängt. Hinsichtlich der bislang lediglich einjährigen Versuchsdauer bleibt die Aussagekraft des betrachteten Ergebnisses damit begrenzt. Dennoch weist die signifikant geringere Verunkrautung der Gemengebestände, in Übereinstimmung mit der Forschungshypothese, auf eine bessere Etablierungsfähigkeit dieser im Vergleich zu den FLG-Reinsaaten hin.

F *Die Futterleguminosen-Gras-Gemenge erbringen unter den brandenburgischen Standortbedingungen einen höheren Trockenmasseertrag [dt ha⁻¹] als die Futterleguminosen-Reinsaaten.*

Folgend werden beide Gruppen anhand des Prüfmerkmals des Trockenmasseertrages [dt ha⁻¹] miteinander verglichen. Der im Versuch ermittelte durchschnittliche TM-Ertrag der Gruppe der FLG-Gras-Gemenge lag mit 31,0 dt ha⁻¹ leicht über dem mittleren TM-Ertrag der Gruppe der FLG-Reinsaaten, welcher 26,9 dt ha⁻¹ betrug. Entgegen der formulierten Forschungshypothese stellte sich dieser Unterschied jedoch nicht als statistisch signifikant heraus. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zur Literatur, in der eine Ertragssteigerung durch den kombinierten Anbau von Futterleguminosen und Gräsern im Vergleich zum Anbau von FLG-Monokulturen häufig dokumentiert wurde (Vasileva und Vasilev 2012; Sturludóttir et al. 2013; Hofer et al. 2016). Ferner werden auch transgressive Mehrerträge der Gemenge festgestellt (Finn et al. 2013), welche sich auf den in Artengemengen wirkenden Effekt der Nischenkomplementarität zurückführen lassen (Phelan et al. 2015). Eine Ursache für das abweichende Ergebnis im betrachteten Versuch könnte dabei

die unterschiedliche Arten- bzw. Sortenzusammensetzung der beiden Gruppen sein. Während in anderen Studien zumeist dieselben FLG-Arten in Monokultur und im Gemenge auf ihre TM-Ertragsleistung hin untersucht wurden, setzten sich die Vergleichsgruppen im vorliegenden Versuch aus unterschiedlichen FLG-Arten zusammen. So waren in der Gruppe der FLG-Reinsaaten lediglich Arten bzw. Sorten mit einer ausgeprägten Trockentoleranz und positiven potenziellen Anbaueignung für den Versuchsstandort (siehe Kap. 2.5) vertreten. In der Gruppe der FLG-Gras-Gemenge waren hingegen auch Arten mit einer negativen potenziellen Anbaueignung sowie einer eingeschränkten Trockentoleranz enthalten. Dazu zählen neben dem Schweden- und Rotklee aus der Mischung DSV M5 auch der Perser- und Alexandrinerklee sowie das Einjährige Weidelgras aus dem Gemenge DSV 2256. Es wurden folglich trockenolerante Reinsaaten mit trockenoleranten *und* nicht trockenoleranten Gemengen mit einer potenziell eingeschränkten Ertragsbildung verglichen. Dies könnte die durchschnittliche TM-Ertragsleistung der FLG-Gras-Gemenge im Versuch so beeinflusst haben, dass ein signifikanter Mehrertrag gegenüber den FLG-Reinsaaten nicht zustande gekommen ist und begrenzt damit die Aussagekraft des vorgenommenen Vergleichs. Ein deutlicher Unterschied zeigte sich zwischen den FLG-Reinsaaten und den FLG-Gras-Gemengen stattdessen bezüglich der Ertragsstabilität. So war die mittlere Streuung der TM-Erträge der einzelnen Gemenge mit einem VK von 17 % deutlich geringer als die durchschnittliche Streuung der TM-Erträge der einzelnen Arten bzw. Sorten mit einem VK von 34 %. Das könnte darauf hindeuten, dass die Gemenge unter ungünstigen Standortbedingungen aufgrund ihrer Artenvielfalt dazu in der Lage sind, eine reduzierte Biomassebildung einzelner Arten durch ein kompensatorisches Wachstum anderer Arten im Gemenge auszugleichen. Die durchschnittlichen TM-Erträge für Leguminosen zur Ganzpflanzenernte lagen in Brandenburg im Versuchsjahr 2021 bei 56,6 dt ha⁻¹ (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg 2022). Dieser Ertragswert konnte im Versuch weder von einem Reinsaat- noch von einem Gemengebestand erzielt werden.

Zusammenfassung vor dem Hintergrund der Forschungsfrage

Aus dem Vergleich der durchschnittlichen TM-Ertragsleistungen und mittleren KDG der beiden Gruppen zum Erntetermin lässt sich in Bezug auf die Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit keine eindeutige Empfehlung für den Anbau von FLG-Reinsaaten oder FLG-Gras-Gemenge ableiten. Die signifikant geringere Verunkrautung der Gemengebestände deutet jedoch auf eine bessere Etablierungsfähigkeit dieser hin. Diese könnte wiederum eine höhere Anbaueignung von FLG-Gras-Gemenge im Vergleich zu FLG-Reinsaaten für den Standort Brandenburg unter den Bedingungen des Klimawandels nach sich ziehen. Ein höherer TM-Ertrag der FLG-Gras-Gemenge im Vergleich zu den FLG-Reinsaaten konnte im betrachteten Versuch nicht festgestellt werden.

Eine Vielzahl an Studien belegt jedoch einen solchen Mehrertrag durch einen Gemengeanbau. Diese Forschungserkenntnisse sollten bei der Planung zukünftiger Anbausysteme für FLG in Brandenburg maßgeblich sein, nicht zuletzt aufgrund der diskutierten Einschränkungen des in der vorliegenden Arbeit angestellten Vergleichs. So kann die Erhöhung der Artenzahl mit verschiedenen funktionalen Eigenschaften gerade bei einem Anbau unter ungünstigen klimatischen Bedingungen ein Kernelement zur Sicherung einer ausreichenden Biomasseproduktion darstellen (Ranaldo et al. 2020) und die Kombination legumer und nicht-legumer Gemengepartner trockenstressbedingte Ertragsverluste mitigieren (Hofer et al. 2016; Grange et al. 2021). Eine erhöhte Anbaueignung von FLG-Gras-Gemengen im Vergleich zu FLG-Reinsaaten ergibt sich zudem aus verschiedenen nutzungsbezogenen Aspekten. So wirkt sich die verbesserte Beikrautunterdrückung nicht nur positiv auf den Gemengebestand selbst und dessen Qualität aus, sondern verringert weiterhin den Beikrautdruck in der gesamten Fruchtfolge. Insbesondere die Wachstums- und Entwicklungsbedingungen für die direkte Folgekultur werden dadurch verbessert. Hinsichtlich der regelmäßig auftretenden Frühjahrstrockenheit und geringen mittleren Jahresniederschlagsmenge in Brandenburg, kann ein geringerer Beikrautdruck wiederum zur Reduzierung unproduktiver Wasserverluste, durch die Wasseraufnahme von Nichtkulturarten, beitragen. Ein kombinierter Anbau von Gräsern und FLG wirkt sich weiterhin vorteilig aus, wenn die Aufwüchse für die Tierfütterung verwendet werden sollen. So wird ein Ausgleich zwischen Protein- und Energiegehalt der Ration erreicht (Freyer et al. 2005) sowie die für die Silagebereitung wichtige Kohlenhydratkomponente in der Biomasse erhöht (Loges et al. 2002b). Es lässt sich zusammenfassen, dass der Anbau von FLG-Gras-Gemengen gegenüber dem Anbau von FLG-Reinsaaten verschiedene Vorteile aufweist, die eine Nutzung von Artengemengen bereits heute sinnvoll erscheinen lassen. In Bezug auf die zu erwartenden klimatischen Veränderungen in BRB ist ein vermehrter Anbau von FLG-Gras-Gemengen insbesondere aufgrund der effizienteren Ressourcennutzung und der daraus möglicherweise resultierenden Ertragssteigerungen bzw. -stabilisierungen unter schwierigen klimatischen Bedingungen zu empfehlen.

5.4 Methodendiskussion

Um die Aussagekraft der zuvor diskutierten Ergebnisse richtig einzuordnen, werden im Folgenden die Rahmenbedingungen des Versuchs sowie das methodische Vorgehen anhand der wichtigsten Aspekte kritisch betrachtet. Der Versuchsaufbau unterlag, aufgrund einer notwendigen Abwägung zwischen der Praktikabilität bei der Umsetzung und den wissenschaftlichen Maßstäben, einigen Einschränkungen. So folgte die Prüfgliedverteilung innerhalb der Blocks einer systematischen Anordnung. Dies führte zum einen dazu, dass die einzelnen Prüffaktorstufen den immer gleichen spezifischen Konkurrenzbedingungen ausgesetzt waren, was die

Vergleichbarkeit zwischen den Prüffaktorstufen begrenzt. Zum anderen war damit keine vollständige Randomisierung der Versuchsanlage gegeben, womit die Bedingungen für eine statistische Auswertung nicht uneingeschränkt erfüllt waren (Thomas 2006). Des Weiteren war die Anzahl der Wiederholungen auf zwei begrenzt, weshalb die Versuchsgenauigkeit als sehr gering einzuschätzen ist. Die teilweise hohen Differenzen zwischen den Merkmalswerten einer Prüffaktorstufe können aufgrund der geringen Wiederholungsanzahl nicht valide eingeordnet und bewertet werden und etwaige Positioneffekte, die aufgrund der hohen Heterogenität der Versuchsfläche anzunehmen sind, kommen stärker zum Tragen. Zudem bleibt mit einer Stichprobengröße von $n = 2$ je Prüffaktorstufe die Anwendung schließender Statistikverfahren in der Datenauswertung auf Vergleiche zwischen gebildeten Gruppen beschränkt. Im Vergleich zwischen den Arten bzw. Sorten können in Bezug auf die Prüfmerkmale lediglich Tendenzen ohne eine statistische Aussagekraft beschrieben werden. Im Falle des betrachteten Versuchs ist die geringe Wiederholungsanzahl dennoch damit zu rechtfertigen, dass es sich um einen Tastversuch handelt, der zunächst der groben Einschätzung der Anbaueignung verschiedener FLG-Arten bzw. -Sorten und FLG-Gras-Gemenge am Versuchsstandort dient. Dieser soll den Beginn einer Versuchsserie darstellen, in welcher folgend die Fragestellungen konkretisiert und die Daten über mehrere Jahre erweitert werden können. Bislang besteht der Versuch jedoch lediglich als einjähriger Einzelversuch, wodurch auf die Merkmalsausprägung wirkende Jahreseffekte einkalkuliert werden müssen. Die erfassten Merkmalswerte wurden zudem durch die Festlegung der repräsentativen Quadratmeter beeinflusst, an denen die Bonituren und Ertragsschnitte durchgeführt wurden. Diese Festlegung wurde zwar nach möglichst objektiven Kriterien vorgenommen, blieb aber letztlich dennoch eine subjektive Entscheidung, bei der eine exakte Repräsentation des Bestandes durch die ausgewählte Teilfläche nicht gewährleistet werden kann. Zudem wurde die Auswahl der Quadratmeter zu einem Zeitpunkt vorgenommen, an dem die Gleichmäßigkeit der Aufwüchse und der Verunkrautung noch nicht vollends abzuschätzen waren, sodass unter Umständen auch Teilflächen mit zu hohen bzw. zu niedrigen Aufwüchsen oder zu starker bzw. zu geringer Verunkrautung für die Datenerhebung ausgewählt wurden. In Bezug auf die Forschungsfrage bleibt die Aussagekraft der Ergebnisse weiterhin dadurch begrenzt, dass die Versuchsfläche die Vielfalt der brandenburgischen Standortbedingungen nicht hinreichend abbilden kann. Aussagen über die Anbaueignung der Arten bzw. Sorten und Gemenge für den Standort Brandenburg weisen diesbezüglich keine Allgemeingültigkeit auf. Zudem war die Witterung im Versuchsjahr durch keine langanhaltenden Trockenperioden und Dürreereignisse gekennzeichnet, sodass die Anbaueignung der Arten bzw. Sorten und Gemenge unter Trockenheitsbedingungen, die zentrales Element des Erkenntnisinteresses war, nicht abschließend überprüft werden konnte.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Frage, welche FLG-Arten bzw. -Sorten und FLG-Gras-Artengemenge sich auch zukünftig unter dem Einfluss des Klimawandels für einen Anbau im Land Brandenburg eignen. Für die einzelnen Prüffaktorstufen konnten auf Grundlage der Etablierungs- und Ertragsleistungen *beste*, *gute* oder *eingeschränkte Anbaueignungen* abgeleitet werden, die dabei immer auch in Abhängigkeit zur angestrebten Nutzungsform stehen.

Unter den betrachteten Arten, Sorten und Gemengen stellten sich für viehhaltende Betriebe insbesondere der Gewöhnliche Hornklee, das Camena Luzerne Gras 100 und das Gemenge DSV 2215 als vielversprechende Optionen für einen zukünftigen Anbau heraus, da diese am Versuchsstandort sowohl eine gute Etablierungs- als auch Ertragsleistung erzielten und sich durch gute Fütterungseigenschaften auszeichnen. Daneben erwies sich der Erdklee, welcher die höchste prozentuale Ausschöpfung des artspezifischen TM-Ertragspotenzials erzielte, als eine Art mit guter Anbaueignung für den Versuchsstandort. Dieser kann hinsichtlich seiner Wuchsform im Speziellen als trockentolerante Grünlandart Verwendung finden. Angesichts der vergleichsweise geringen absoluten TM-Erträge könnte eine Zielstellung für folgende Versuche die Überprüfung der Potenzialausschöpfung bei ertragsstärkeren Sorten und Subspezies des Erdklee am Versuchsstandort sein.

In den viehlosen Betrieben Brandenburgs könnten unter dem Einfluss des Klimawandels zukünftig vor allem der Weiße Steinklee und das Gemenge DSV M5 eine hohe Anbaueignung erlangen, da sie die Vorteile einer geringen Verunkrautung der Bestände, einer vergleichsweise hohen TM-Ertrags- und N₂-Fixierungsleistung verbinden. Beiden Ansaaten kann zudem ein biodiversitätsfördernder Mehrwert zugesprochen werden. Um einen erfolgreichen Anbau des Weißen Steinklee zu gewährleisten, sollte, wie es auch im Luzerneanbau üblich ist, eine Kalkung zur Aussaat vorgenommen werden.

Eine deutlich eingeschränkte Anbaueignung konnte hinsichtlich geringer TM-Erträge und N₂-Fixierleistungen sowie einer hohen Lückigkeit der Bestände lediglich für das Gemenge DSV 2256, bestehend aus Perserklee, Alexandrinerklee und Einjährigem Weidelgras, festgestellt werden.

Aus den Ergebnissen des Vergleichs zwischen den Reinsaaten und Gemengen lässt sich zudem schlussfolgern, dass der Anbau von FLG-Gras-Gemengen hinsichtlich der geringeren Verunkrautung der Bestände dem Anbau von FLG-Reinsaaten vorzuziehen ist.

Wie in der Diskussion herausgestellt wurde, kann als Grund für die geringere Verunkrautung die Komplementarität funktionaler Arteigenschaften innerhalb von Gemengen vermutet werden,

die im Zuge des Klimawandels auch Vorteile hinsichtlich anderer Leistungsmerkmale, wie dem TM-Ertrag und der Ertragsstabilität, bieten könnte. Eine Zielstellung weiterführender Versuche könnte die Prüfung dieses möglichen Zusammenhangs zwischen der Vielfalt der Arteigenschaften und einer verbesserten Etablierungs- und Ertragsleistung für FLG-Gras-Gemenge am Versuchsstandort sein. Diesbezüglich könnten die Gemenge speziell hinsichtlich ihrer Vielfalt an komplementären Arteigenschaften ausgewählt und untereinander sowie mit den Reinsaaten der zuvor herausgestellten trockentoleranten FLG-Arten verglichen werden.

Zudem sollte die Prüfung der Anbaueignung aller im vorliegenden Versuch betrachteten FLG-Reinsaaten und FLG-Gras-Gemenge fortgesetzt werden, um die einjährigen Ergebnisse und daraus gezogenen Schlussfolgerungen zu validieren. Dabei sollte der Versuchsaufbau nach Möglichkeit durch eine Erhöhung der Anzahl an Wiederholungen angepasst werden. Weiterhin erscheint die Einbindung der Arten Rot- und Weißklee in Reinsaaten als Prüffaktorstufen sinnvoll, um eine etwaige Überlegenheit der trockentoleranten Arten und Sorten hinsichtlich der Etablierungs- und Ertragsleistung im direkten Vergleich dokumentieren oder ablehnen zu können. Um die Trockentoleranz der einzelnen Arten, Sorten und Gemenge gegeneinander abzustufen zu können, ist zudem die Installation eines Rainout Shelters denkbar. Auf diese Weise können die Pflanzen einem induzierten Wasserstress ausgesetzt werden, was u.a. die Bonitur erster Welk- und Trockenstressanzeichen ermöglichen würde. Die Aussagekraft zukünftiger Versuchsergebnisse in Bezug auf die Forschungsfrage könnte so gesteigert werden.

7 Literaturverzeichnis

- Abdelgawad, H; Farfan-Vignolo, ER; Vos, D de; Asard, H (2014): Elevated CO₂ mitigates drought and temperature-induced oxidative stress differently in grasses and legumes. In: *Plant science: an international journal of experimental plant biology* 231, S. 1–10. DOI: 10.1016/j.plantsci.2014.11.001.
- Achilles, W; Klöble, U; Kemkens, K; Christinck, A (2009): Forschungsbedarf zum Themenkomplex Klimawandel und Ökolandbau – Situation, Anpassungsstrategien. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). Online verfügbar unter https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Oekolandbau/Klimawandel/Klimawandel.pdf, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Ahmed, AIA; Hou, FJ (2021): Allelopathic effects of proso millet (*Panicum miliaceum* L) extracts on seed germination and seedling growth of alfalfa and vetch. In: *Allelopathy Journal* 53 (1), S. 219–229. DOI: 10.26651/allelo.j/2021-53-2-1339.
- Alemu, AW; Doepel, L (2011): Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as an alternative forage for dairy cows. In: *Animal: an international journal of animal bioscience* 5 (9), S. 1370–1381. DOI: 10.1017/S1751731111000322.
- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2021): Statistischer Bericht C II 2 – j / 20. Ernteberichterstattung über Feldfrüchte und Grünland im Land Brandenburg 2020. Potsdam.
- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2022): Statistischer Bericht C II 2 – j / 21. Ernteberichterstattung über Feldfrüchte und Grünland im Land Brandenburg 2021. Potsdam.
- Annicchiarico, P; Barrett, B; Brummer, EC; Julier, B; Marshall, AH (2015): Achievements and Challenges in Improving Temperate Perennial Forage Legumes. In: *Critical Reviews in Plant Sciences* 34 (1-3), S. 327–380. DOI: 10.1080/07352689.2014.898462.
- Araújo, SS; Beebe, S; Crespi, M; Delbreil, B; González, EM; Gruber, V et al. (2015): Abiotic Stress Responses in Legumes: Strategies Used to Cope with Environmental Challenges. In: *Critical Reviews in Plant Sciences* 34 (1-3), S. 237–280. DOI: 10.1080/07352689.2014.898450.
- Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Futterbaus (AGFF) (o. J.): Gelbklee / Hopfenklee. Online verfügbar unter <https://www.eagff.ch/wiesenpflanzen-kennen/kleearten/merkmale-pro-art/gelbklee/-hopfenklee>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Arrigo, Y (2012): Bestimmter und geschätzter Futterwert von Zichorie, Hornklee und Esparsette. In: *Agrarforschung Schweiz* 3 (10), S. 492–499.
- Bachinger, J (2002): Ökolandbau in Nordostdeutschland. In: *Forschungsreport Verbraucherschutz - Ernährung - Landwirtschaft* (1), S. 30–34.
- Bachinger, J; Reckling, M; Stein-Bachinger, K (2013): Stickstoff-Saldo-Rechner für Leguminosen-Gras-Gemenge. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., zuletzt geprüft am 15.04.2022.
- Baddeley, JA; Pappa, VA; Pristeri, A; Bergkvist, G; Monti, M; Reckling, Moritz, Schläfke, Nicole; Watson, CA (2017): Legume-based Green Manure Crops. In: D. Murphy-Bokern, Fred Stoddard und Christine Watson (Hg.): *Legumes in cropping systems*. Boston, Oxfordshire: CAB International, S. 125–136.
- Balazadeh, M; Zamanian, M; Golzardi, F; Torkashvand, AM (2021): Effects of Limited Irrigation on Forage Yield, Nutritive Value and Water Use Efficiency of Persian Clover (*Trifolium Resupinatum*) Compared to Berseem Clover (*Trifolium Alexandrinum*). In: *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 52 (16), S. 1927–1942. DOI: 10.1080/00103624.2021.1900228.

- Baresel, JP (2014): Selektion von Erdklee (*Trifolium subterraneum*) auf Winterfestigkeit, Biomassebildung und Reifezeitpunkt unter deutschen Bedingungen. Technische Universität München - Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. Freising.
- Baresel, JP; Reents, HJ (2006): Lebendmulchsysteme mit einjährigen Leguminosen - Schlussbericht. Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau. Bonn.
- Baresel, JP; Reents, HJ; Schenkel, W (2003): Screening alternativer Leguminosenarten auf ihre Eignung zur Gründüngung und zum Mischanbau im ökologischen Landbau. Hg. v. Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/8353/>, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- Bargaz, A; Zaman-Allah, M; Farissi, M; Lazali, M; Drevon, J-J; Maougal, RT; Carlsson, G (2015): Physiological and Molecular Aspects of Tolerance to Environmental Constraints in Grain and Forage Legumes. In: *International journal of molecular sciences* 16 (8), S. 18976–19008. DOI: 10.3390/ijms160818976.
- Basu, KS (2006): Seed Production Technology for Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) in the Canadian Prairies. Master Thesis. University of Lethbridge, Alberta, Canada. Online verfügbar unter <https://opus.uleth.ca/bitstream/handle/10133/242/MR17383.pdf?sequence=3&isAllowed=y>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Bazzazi, N; Khodambashi, M; Mohammadi, S (2013): The Effect of Drought Stress on Morphological Characteristics and Yield Components of Medicinal Plant Fenugreek. In: *Journal of Crop Production and Processing* 3 (8), S. 11–23.
- Bell, LW; Williams, AH; Ryan, MH; Ewing, MA (2007): Water relations and adaptations to increasing water deficit in three perennial legumes, *Medicago sativa*, *Dorycnium hirsutum* and *Dorycnium rectum*. In: *Plant and Soil* 290 (1-2), S. 231–243. DOI: 10.1007/s11104-006-9155-7.
- BLE (2022): Landwirtschaft. Visualisierung der Strukturdaten zum ökologischen Landbau in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/oekologischer-landbau>, zuletzt geprüft am 17.04.2022.
- Blumenthal; M. J.; McGraw, RL (1999): Lotus adaptation, use and management. In: P. R. Beuselinck (Hg.): *Trefoil: The Science and Technology of Lotus*. Madison, Wisconsin: Crop Science Society of America and American Society of Agronomy (CSSA Special Publications, 28), S. 97–119.
- BMEL (2015): Umsetzung der EU-Agrarreform in Deutschland. Bonn.
- Böhm, H; Dauber, J; Dehler, M; Amthauer Gallardo, DA; Witte, T de; Fuß, R et al. (2020): Fruchtfolgen mit und ohne Leguminosen: ein Review. In: *Journal für Kulturpflanzen* 72 (10-11), S. 489–509. DOI: 10.5073/JfK.2020.10-11.01.
- Bolland, MDA (1983): Serradella: pasture prospect. In: *Journal of the Department of Agriculture* 24 (1). Online verfügbar unter https://researchlibrary.agric.wa.gov.au/journal_agriculture4/vol24/iss1/11, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- BÖLW (Hg.) (2021): Branchenreport 2021. Ökologische Lebensmittelwirtschaft.
- Bradford, KJ; Hsiao, TC (1982): Physiological Responses to Moderate Water Stress. In: O. L. Lange, P. S. Nobel, C. B. Osmond und H. Ziegler (Hg.): *Physiological Plant Ecology II*. Heidelberg: Springer.
- Brendieck-Worm, C (2015): Bockshornklee, *Trigonella foenum-graecum*. In: *Zeitschrift für Ganzheitliche Tiermedizin* 29 (04), S. 111–117. DOI: 10.1055/s-0035-1558147.
- BSA (2000): Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen.

- BSA (2020): Beschreibende Sortenliste. Futtergräser Esparsette, Klee, Luzerne. Online verfügbar unter https://www.bundessortenamt.de/bsa/media/Files/BSL/bsl_futtergrae-ser_2020.pdf, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Bull, I (2014): Untersuchungen zum Anbau und zur Verwertung von Steinklee. Dissertation. Universität Rostock. Online verfügbar unter https://rosdok.uni-rostock.de/file/rosdok_disshab_0000001266/rosdok_derivate_0000021915/Dissertation_Bull_2014.pdf, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Camena Samen (2021): Saaten für den biologischen Landbau Frühjahr 2021. Lauenau.
- Carlsson, G; Huss-Danell, K (2003): Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. In: *Plant and Soil* 253 (2), S. 353–372. DOI: 10.1023/A:1024847017371.
- Carter, EB; Theodorou, MK; Morris, P (1997): Responses of Lotus corniculatus to environmental change. In: *New Phytologist* 136 (2), S. 245–253. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1997.00733.x.
- Castell, A; Eckl, T; Schmidt, M; Beck, R; Heiles, E; Salzedo, G; Urbatzka, P (2018): Fruchtfolgen im ökologischen Lanbau - Pflanzenbaulicher Systemvergleich in Viehhausen und Puch. 3. Aufl. Hg. v. LFL.
- Chapman, G; Bork, E; Donkor, N; Hudson, R (2008): Forage Yield and Quality of Chicory, Birdsfoot Trefoil, and Alfalfa During the Establishment Year. In: *The Open Agriculture Journal* 2 (1), S. 68–74. DOI: 10.2174/1874331500802010068.
- Connolly, J; Sebastià, M-T; Kirwan, L; Finn, JA; Llurba, R; Suter, M et al. (2017): Weed suppression greatly increased by plant diversity in intensively managed grasslands: A continental-scale experiment. In: *Journal of Applied Ecology* 55 (2), S. 852–862. DOI: 10.1111/1365-2664.12991.
- Dalchow, K (2005): Kleinräumige Bodenheterogenität im Jungmoränengebiet Brandenburgs – eine Herausforderung durch die Jahrhunderte. In: *Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge* 12, S. 137–142.
- den Hollander, NG; Bastiaans, L; Kropff, MJ (2006): Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design. In: *European Journal of Agronomy* 26 (2), S. 104–112. DOI: 10.1016/j.eja.2006.08.005.
- DESTATIS (o. J.): Statistische Bibliothek. Fachserie / 3 / 3 / 2 / 1. verschiedene Ausgaben. Online verfügbar unter https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESe-rie_mods_00000335, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- DESTATIS (2021a): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Betriebe mit ökologischem Landbau Landwirtschaftszählung 2020. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/oekologischer-landbau-2030221209004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- DESTATIS (2021b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Flächen) 2020. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Publikationen/Bodennutzung/landwirtschaftliche-nutzflaeche-2030312207004.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- DESTATIS (2021c): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wachstum und Ernte - Feldfrüchte -. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Publikationen/Downloads-Feldfruechte/feldfruechte-jahr->

- 2030321207164.pdf;jsessionid=24ED9AEE5F3D543B2FDCC7B75E3CD9D3.live732?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- DESTATIS (2022): Genesis-Online. 41241-0001: Anbaufläche (Feldfrüchte und Grünland): Deutschland, Jahre, Fruchtarten. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=2&step=2&titel=Tabellenaufbau&levelid=1648408743102&acceptscookies=false#abreadcrumb>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Diepenbrock, W; Ellmer, F; Léon, J (2016): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. 4., überarbeitete Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Dierauer, H; Siegrist, F; Weidmann, G (2017): Praxistipp Nr. 06. Untersaat in Mais. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL).
- Drastig, K; Prochnow, A; Brunsch, R (2010): Wassermanagement in der Landwirtschaft. Diskussionspapier 3. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Berlin.
- DSV Saaten (2021): DSV Ökosaatgut 2021. Für die besonderen Ansprüche des ökologischen Anbaus.
- Duke, JA (1981): Handbook of LEGUMES of World Economic Importance. Boston, MA: Springer US.
- DWD (o. J.a): Bodenfeuchteviewer. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/appl/bf_view/_node.html, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- DWD (o. J.b): Farbskala der Bodenfeuchte. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/bodenfeuchte_farbskala_doku.html?nn=732680, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- DWD (o. J.c): Klima an ausgewählten Wetterstationen in Berlin und Brandenburg. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/kvo/berlin_brandenburg.html?nn=480164#buehneTop, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- DWD (o. J.d): Klimakarten Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimakartendeutschland/klimakartendeutschland.html?nn=480164>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- DWD (o. J.e): Zeitreihen und Trends. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=480164>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- DWD (2019): Klimareport Brandenburg. 1. Auflage. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main.
- DWD (2021): Monatlicher Klimastatus Deutschland Juni 2021. Offenbach am Main.
- Ehlers, W (1997): Zum Transpirationskoeffizienten von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen. In: *Pflanzenbauwissenschaften* 1 (3), S. 97–108.
- Ellenberg, H; Leuschner, C (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht; 203 Tabellen. 6., vollst. neu bearb. und stark erw. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB Botanik, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Geographie, 8104).
- Elsalahy, H; Döring, T; Bellingrath-Kimura, S; Arends, D (2019): Weed Suppression in Only-Legume Cover Crop Mixtures. In: *Agronomy* 9 (10), S. 648. DOI: 10.3390/agronomy9100648.
- Escaray, FJ; Menendez, AB; Gárriz, A; Pieckenstain, FL; Estrella, MJ; Castagno, LN et al. (2012): Ecological and agronomic importance of the plant genus Lotus. Its application in grassland sustainability and the amelioration of constrained and contaminated soils. In: *Plant science: an international journal of experimental plant biology* 182, S. 121–133. DOI: 10.1016/j.plantsci.2011.03.016.

- Europäisches Parlament (2018): Verordnung über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 834/2007. Verordnung (EU) 2018/848.
- Evans, J; Dear, B; O'Connor, GE (1990): Influence of an acid soil on the herbage yield and nodulation of five annual pasture legumes. In: *Australian Journal of Experimental Agriculture* 30 (1), S. 55. DOI: 10.1071/EA9900055.
- Faensen-Thiebes, A (1992): Zur Ökologie von *Melilotus alba* L. In: *Flora* 186 (5-6), S. 377–391. DOI: 10.1016/S0367-2530(17)30553-4.
- Fairey, DT; Smith, RR (1999): Seed production in birdsfoot trefoil, *Lotus* species. In: P. R. Beuselinck (Hg.): *Trefoil: The Science and Technology of Lotus*. Madison, Wisconsin: Crop Science Society of America and American Society of Agronomy (CSSA Special Publications, 28), S. 145–166.
- Farooq, M; Wahid, A; Kobayashi, N; Fujita, D; Basra, SMA (2009): Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. In: *Sustainable Agriculture*: Springer, Dordrecht, S. 153–188. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-2666-8_12.
- Ferguson, BJ; Lin, M-H; Gresshoff, PM (2013): Regulation of legume nodulation by acidic growth conditions. In: *Plant Signaling & Behavior* 8 (3). DOI: 10.4161/psb.23426.
- Fiedler, HJ (2001): Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten. Renningen-Malmsheim: expertverlag.
- Finckh, M; Bacanovic, J; Junge, S; Wedemeyer, R; Schmidt, J; Hallmann, J; Baresel, J (2016): Das EU-Projekt OSCAR (Optimising Subsidiary Crop Applications in Rotations): Ergänzende Pflanzen zur Systemoptimierung in der pfluglosen Landwirtschaft: Neue Genotypen gesucht. In: *Landwirtschaft ohne Pflug* (1/2), S. 32–39.
- Finn, JA; Kirwan, L; Connolly, J; Sebastià, MT; Helgadottir, A; Baadshaug, OH et al. (2013): Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: a 3-year continental-scale field experiment. In: *Journal of Applied Ecology* 50 (2), S. 365–375. DOI: 10.1111/1365-2664.12041.
- Flora of China (o. J.): *Melilotus albus*. Online verfügbar unter http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200012216, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Frame, J (2005): *Forage Legumes For Temperate Grasslands*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Freyer, B; Pietsch, G; Hrbek, R; Winter, S (2005): *Futter- und Körnerleguminosen im biologischen Landbau*. Leopoldsdorf: avBuch.
- Friedel, JK; Pietsch, G; Freyer, B (2003): Stickstoffversorgung optimieren! In: *ERNTE - Zeitschrift für Landwirtschaft und Ökologie* (5).
- Gebbers, R; Kramer, E (2017): *Potenziale der teilflächenspezifischen Kalkversorgung von Grünland*. Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde und Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB) Potsdam.
- Gerstengarbe, FW; Badeck, F; Hattermann, F; Krysanova, V; Lahmer, W; Lasch, P et al. (2003): PIK Report No. 83. Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Potsdam.
- Giambalvo, D; Ruisi, P; Di Miceli, G; Frenda, AS; Amato, G (2011): Forage production, N uptake, N₂ fixation, and N recovery of berseem clover grown in pure stand and in mixture with annual ryegrass under different managements. In: *Plant and Soil* 342 (1-2), S. 379–391. DOI: 10.1007/s11104-010-0703-9.

- Giebelhausen, H (2009): Einfluss von Sorte und Nutzung auf Bestandesdichte und Ertrag von Luzerne. In: C. Berendonk und G. Riehl (Hg.): Futterbau und Klimawandel: Grünlandbewirtschaftung als Senke und Quelle für Treibhausgase. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau Band 10. 53. Jahrestagung der AGGF. Kleve, 27.-29. August, S. 129–134.
- Gömann, H; Bender, A; Bolte, A; Dirksmeyer, W; Englert, H; Feil, J-H et al. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Abschlussbericht. In: *Thünen Report* Bd. 30. DOI: 10.3220/REP1434012425000.
- Grabber, JH; Riday, H; Cassida, KA; Griggs, TC; Min, DH; MacAdam, JW (2014): Yield, Morphological Characteristics, and Chemical Composition of European- and Mediterranean-Derived Birdsfoot Trefoil Cultivars Grown in the Colder Continental United States. In: *Crop Science* 54 (4), S. 1893–1901. DOI: 10.2135/cropsci2013.09.0644.
- Grange, G; Finn, JA; Brophy, C (2021): Plant diversity enhanced yield and mitigated drought impacts in intensively managed grassland communities. In: *Journal of Applied Ecology* 58 (9), S. 1864–1875. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/guylain-grange/publication/351174756_plant_diversity_enhanced_yield_and_mitigated_drought_impacts_in_intensively_managed_grassland_communities/links/60f1880e0859317dbde6b0f7/plant-diversity-enhanced-yield-and-mitigated-drought-impacts-in-intensively-managed-grassland-communities.pdf.
- Grünewald, U (2010): Wasserbilanzen in der Region Brandenburg-Berlin. Diskussionspapier 7. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Berlin.
- Guo, YJ; Li, GD; Hayes, RC; Dear, BS; Price, A (2012): Tolerance of the annual legumes *Biserrula pelecinus*, *Ornithopus sativa*, *Trifolium spumosum*, *T. vesiculosum* and *T. subterraneum* to soil acidity. In: *New Zealand Journal of Agricultural Research* 55 (1), S. 1–14. DOI: 10.1080/00288233.2011.626785.
- Haller, E (1983): Effect of the Germinating Seed Environment on Crop Yields. I. Effect of Soil Acidity at Germination on Yields of Sweet Clover and Alfalfa. In: *Experimental Agriculture* 19 (1), S. 55–66. DOI: 10.1017/S0014479700010516.
- Hauck, L; Herpel, R; Kock, S; Marx, N; Metzger, L; Muhl, F et al. (2021): Kennzeichnung der Böden der HNEE Lehr- und Forschungsstation in Wilmersdorf. Modulbericht. Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde.
- Hein, W; Waschl, H (2018): Unbekannte Leguminosen: Esparsette, *Galega orientalis* und Andenlupinen - Erste Erfahrungen. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter https://raumberg-gumpenstein.at/jdownloads/Tagungen/Biotagung/Biotagung_2018/4b_2018_hein.pdf, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Helal, HM (1991): Bodengefüge, Wurzelentwicklung und Wurzelfunktionen. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 154 (6), S. 403–407. DOI: 10.1002/jpln.19911540603.
- Heuzé, V; Thiollet, H; Tran, G; Hassoun, P; Lebas, F (2018): Black medic (*Medicago lupulina*). Feedipedia. Online verfügbar unter <https://www.feedipedia.org/node/277>, zuletzt geprüft am 04.04.2022.
- Hofer, D; Suter, M; Haughey, E; Finn, JA; Hoekstra, NJ; Buchmann, N; Lüscher, A (2016): Yield of temperate forage grassland species is either largely resistant or resilient to experimental summer drought. In: *Journal of Applied Ecology* 53 (4), S. 1023–1034. DOI: 10.1111/1365-2664.12694.

- Inostroza, L; Acuña, H (2010): Water use efficiency and associated physiological traits of nine naturalized white clover populations in Chile. In: *Plant Breeding* 129 (6), S. 700–706. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2009.01742.x.
- Inostroza, L; Acuña, H; Tapia, G (2015): Relationships between phenotypic variation in osmotic adjustment, water-use efficiency, and drought tolerance of seven cultivars of *Lotus corniculatus* L. In: *Chilean journal of agricultural research* 75 (1), S. 3–12. DOI: 10.4067/S0718-58392015000100001.
- International Energy Agency (2022): Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021. Global emissions rebound sharply to highest ever level.
- Julier, B; Gastal, F; Lourarn, G; Badenhauser, I; Annicchiarico, P; Crocq, G et al. (2017): Lucerne (Alfalfa) in European Cropping Systems. In: D. Murphy-Bokern, Fred Stoddard und Christine Watson (Hg.): *Legumes in cropping systems*. Boston, Oxfordshire: CAB International, S. 168–192.
- Kirkbride, JH (1999): *Lotus Systematics and Distribution*. In: P. R. Beuselinck (Hg.): *Trefoil: The Science and Technology of Lotus*. Madison, Wisconsin: Crop Science Society of America and American Society of Agronomy (CSSA Special Publications, 28), S. 1–20.
- Klapp, E; Boeker, P; König, F; Stählin, A (1953): Wertzahlen der Grünlandpflanzen. In: *Das Grünland* 5. Der Tierzüchter. Hannover: Schaper.
- Kling, C; Meyer, S; Schröter, I; Vogel, S; Gerlach, F; Lück, K et al. (2019): Berücksichtigung von Bodenvariabilität bei der Kalk-Ausbringung. In: Daniel Mühlrath, Joana Albrecht, Maria R. Finckh, Ulrich Hamm, Jürgen Heß und Knierim, Ute und Möller, Detlev (Hg.): 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Innovatives Denken für eine nachhaltige Land- und Ernährungswirtschaft. Beiträge zur 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Kassel, 5. bis 8. März 2019. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Kocira, A; Staniak, M; Tomaszewska, M; Kornas, R; Cymerman, J; Panasiewicz, K; Lipińska, H (2020): Legume Cover Crops as One of the Elements of Strategic Weed Management and Soil Quality Improvement. A Review. In: *Agriculture* 10 (9), S. 394. DOI: 10.3390/agriculture10090394.
- Kolbe, H (2008): *Fruchtfolgegrundsätze im Ökologischen Landbau*. Hg. v. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Kolbe, H (2009): Vergleich von Methoden zur Berechnung der biologischen N₂-Fixierung von Leguminosen zum Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis. In: *Pflanzenbauwissenschaften* 13 (1), S. 23–36.
- Kolbe, H; Köhler, B (2008): Erstellung und Beschreibung des PC-Programms BEFU, Teil Ökologischer Landbau Verfahren der Grunddüngung, legumen N-Bindung, Nährstoff- und Humusbilanzierung. In: *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*, Bd. 36.
- Kolbe, H; Schuster, M; Hänsel, M; Schließer, I; Pöhlitz, B; Steffen, E; Pommer, R (2006): *Feldfutterbau und Gründüngung im Ökologischen Landbau*. Informationen für Praxis und Beratung. Hg. v. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Dresden.
- Kolbe, H; Shuster, M; Hänsel, M; Grünbeck, A; Schließer, I; Köhler, A et al. (2004): *Zwischenfrüchte im Ökologischen Landbau*. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/15102/2/Zwischenfruechte.pdf>, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- Komainda, M; Küchenmeister, K; Küchenmeister, F; Breitsameter, L; Wrage-Mönnig, N; Kayser, M; Isselstein, J (2019): Forage legumes for future dry climates: Lower relative biomass losses of minor forage legumes compared to *Trifolium repens* under conditions of

- periodic drought stress. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 205 (5), S. 460–469. DOI: 10.1111/jac.12337.
- Lammerink, J (1968): Genetic variability in commencement of flowering in *Medicago lupulina* L. in the South Island of New Zealand. In: *New Zealand Journal of Botany* 6 (1), S. 33–42. DOI: 10.1080/0028825X.1968.10428788.
- Latif, S; Gurusinghe, S; Weston, PA; Quinn, JC; Piltz, JW; Weston, LA (2019): Metabolomic approaches for the identification of flavonoids associated with weed suppression in selected Hardseeded annual pasture legumes. In: *Plant and Soil* 447 (1-2), S. 199–218. DOI: 10.1007/s11104-019-04225-4.
- LBGR (2022): Bodengeologie Brandenburg - Ableitungen zur Physik. Online verfügbar unter http://www.geo.brandenburg.de/therm_php_6.0/maps/index.html?karte=boden_ph&embedded=false#basemap=0&scale=2311162&layerids=1360.1072.1076.1102.1103.1079¢erX=1615737.313552717¢erY=6874767.450941654&bmFader=0, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Leithold, G; Becker, K; Riffel, A; Schulz, F; Schmid-Eisert; Andreas; Brock, C (2017): Stickstoff und Schwefel im ökologischen Landbau. Ratgeber für eine bessere Nährstoffversorgung von Ackerkulturen. 2. Aufl. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- LFL (o. J.a): Gelbklee – *Medicago lupulina* L. Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/027775/index.php>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- LFL (o. J.b): Hornklee – *Lotus corniculatus* L. Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/022542/>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- LFL (o. J.c): Perserklee – *Trifolium resupinatum* L. Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/022560/>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- LFL (2016): Luzerne. Anbau - Konservierung - Verfütterung. 2. Aufl.
- LFL (2020): Gruber Tabelle zur Fütterung in der Rindermast. Fresser Mastfärsen Bullen Mastkühe Ochsen. 24. Aufl.
- LGB (2022): Brandenburgviewer. Online verfügbar unter <https://bb-viewer.geobasis-bb.de/?projection=EPSG:25833¢er=427370.5399326991,5885222.84651262&zoom=11&bglayer=4&layers=71,25>, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- Lipiec, J; Doussan, C; Nosalewicz, A; Kondracka, K (2013): Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. In: *International Agrophysics* 27 (4), S. 463–477. DOI: 10.2478/intag-2013-0017.
- Loges, R; Dreyman, S; Wichmann, S (2002a): Leguminosenanbau richtig machen. In: *bioland - Fachzeitschrift für den ökologischen Landbau* (1), S. 14–15.
- Loges, R; Taube, F (1999): Ertrag und Futterqualität von Rotklee und Luzerne als Reinsaat sowie im Gemenge mit Gräsern. In: Heide Hoffmann und S. Müller (Hg.): Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau. Berlin, 23.-25.02., S. 501–504.
- Loges, R; Thaysen, J; Taube, F (2002b): Untersuchungen zur Silagequalität und Siliereignung von Rotklee und Luzerne sowie deren Gemenge mit Dt. Weidelgras. In: Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau in der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften (Hg.): 46. Jahrestagung, Referate und Poster. Rostock (46. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau in der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften).
- López-Olivari, R; Ortega-Klose, F (2021): Response of red clover to deficit irrigation: dry matter yield, populations, and irrigation water use efficiency in southern Chile. In: *Irrigation Science* 39 (2), S. 173–189. DOI: 10.1007/s00271-020-00693-0.

- Lutze, GW (2014): Naturräume und Landschaften in Brandenburg und Berlin. Gliederung, Genese und Nutzung. Berlin: be.bra-wiss.-Verl.
- Maaß, H; Blumenstein, B; Bruns, C; Möller, D (2017): Ökologischen Landbau weiterdenken. Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken: Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Freising-Weihenstephan, 7. bis 10 März 2017. 1. Auflage. Hg. v. Sebastian Wolfrum, Hauke Heuwinkel, Hans Jürgen Reents, Klaus Wiesinger, Kurt-Jürgen Hülsbergen und Hans-Jürgen Reents. Berlin: Verlag Dr. Köster. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/31859/>.
- Maleki, M; Shojaeiyan, A; Mokhtassi-Bidgoli, A (2021): Genotypic variation in biochemical and physiological responses of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) landraces to prolonged drought stress and subsequent rewatering. In: *Scientia Horticulturae* 287, S. 110–224. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110224.
- Marley, CL; Fychan, R; Jones, R (2006): Yield, persistency and chemical composition of Lotus species and varieties (birdsfoot trefoil and greater birdsfoot trefoil) when harvested for silage in the UK. In: *Grass and Forage Science* 61 (2), S. 134–145. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2006.00516.x.
- Martiniello (1999): Effects of irrigation and harvest management on dry-matter yield and seed yield of annual clovers grown in pure stand and in mixtures with graminaceous species in a Mediterranean environment. In: *Grass and Forage Science* 54 (1), S. 52–61. DOI: 10.1046/j.1365-2494.1999.00153.x.
- McWilliam, JR; Clements, RJ; Dowling, PM (1970): Some factors influencing the germination and early seedling development of pasture plants. In: *Australian Journal of Agricultural Research* 21 (1), S. 19. DOI: 10.1071/AR9700019.
- Mehrafarin, A; Rezazadeh, S; Naghdi Badi, H; Noormohammadi, G; Zand, E; Qaderi, A (2011): A Review on Biology, Cultivation and Biotechnology of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) as a Valuable Medicinal Plant and Multipurpose. In: *Journal of Medicinal Plants* 10 (37), S. 6–24.
- Mir, Z; Acharya, SN; Mir, PS; Taylor, WG; Zaman, MS; Mears, GJ; Goonewardene, LA (1997): Nutrient composition, in vitro gas production and digestibility of fenugreek (*Trigonella foenum - graecum*) and alfalfa forages. In: *Canadian Journal of Animal Science* 77 (1), S. 119–124. DOI: 10.4141/A96-061.
- MLUK (2020): Steckbriefe Brandenburger Böden. Sammelmappe. 3. Aufl. Online verfügbar unter <https://mluk.brandenburg.de/>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Montgomery, J (2009): The potential of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) as a forage for dairy herds in central Alberta. Master Thesis. University of Alberta, Alberta, Canada. Online verfügbar unter <https://era.library.ualberta.ca/items/837a46a3-7131-4729-b3aa-7d7f0fc70487>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Moyer, JR; Blackshaw, RE; Huang, HC (2007): Effect of sweetclover cultivars and management practices on following weed infestations and wheat yield. In: *Canadian Journal of Plant Science* 87 (4), S. 973–983. DOI: 10.4141/CJPS06054.
- Mueller-Harvey, I; Bee, G; Dohme-Meier, F; Hoste, H; Karonen, M; Kölliker, R et al. (2019): Benefits of Condensed Tannins in Forage Legumes Fed to Ruminants: Importance of Structure, Concentration, and Diet Composition. In: *Crop Science* 59 (3), S. 861–885. DOI: 10.2135/cropsci2017.06.0369.
- Nadeem, M; Li, J; Yahya, M; Sher, A; Ma, C; Wang, X; Qiu, L (2019): Research Progress and Perspective on Drought Stress in Legumes: A Review. In: *International journal of molecular sciences* 20 (10). DOI: 10.3390/ijms20102541.

- Naseri, V; Hozhabri, F; Kafilzadeh, F (2013): Assessment of in vitro digestibility and fermentation parameters of alfalfa hay-based diet following direct incorporation of fenugreek seed (*Trigonella foenum*) and asparagus root (*Asparagus officinalis*). In: *Journal of animal physiology and animal nutrition* 97 (4), S. 773–784. DOI: 10.1111/j.1439-0396.2012.01318.x.
- Nitsch, H; Röder, N; Oppermann, R; Milz, E; Baum, S; Lepp, T et al. (2017): Naturschutzfachliche Ausgestaltung von Ökologischen Vorrangflächen. Endbericht zum gleichnamigen F+E-Vorhaben. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz. Bonn.
- Norton, MR; Li, GD; Xu, B; Price, A; Tyndall, P; Hayes, RC (2021): Differences in dehydration tolerance affect survival of white clover (*Trifolium repens*) and lucerne (*Medicago sativa*) during a drying cycle. In: *Crop and Pasture Science* 72 (9), S. 723. DOI: 10.1071/CP20300.
- Nußbaum, H (2007): Klee und Klee gras erfolgreich silieren. Landwirtschaftliches Zentrum für Rinderhaltung, Grünlandwirtschaft, Milchwirtschaft, Wild und Fischerei Baden-Württemberg.
- Oberdorfer, E (2001): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. für Deutschland und angrenzende Gebiete. 8. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH & Co.
- Perdigão, A; Coutinho, J; Moreira, N (2012): Cover Crops as Nitrogen Source for Organic Farming in Southwest Europe. In: *Acta Horticulturae* (933), S. 355–361. DOI: 10.17660/ActaHortic.2012.933.46.
- Peterson, PR; Sheaffer, CC; Hall, MH (1992): Drought Effects on Perennial Forage Legume Yield and Quality. In: *Agronomy Journal* 84 (5), S. 774–779. DOI: 10.2134/agronj1992.00021962008400050003x.
- Petropoulos, GA (2002): Fenugreek. London: CRC Press.
- Phelan, P; Moloney, AP; McGeough, EJ; Humphreys, J; Bertilsson, J; O’Riordan, EG; O’Kiely, P (2015): Forage Legumes for Grazing and Conserving in Ruminant Production Systems. In: *Critical Reviews in Plant Sciences* 34 (1-3), S. 281–326. DOI: 10.1080/07352689.2014.898455.
- Pietsch, G (2004): N₂-Fixierungsleistung und Wasserverbrauch von Futterleguminosen im Ökologischen Landbau unter den klimatischen Bedingungen der pannonischen Region Österreichs. Dissertation. Universität für Bodenkultur, Wien.
- Ranaldo, M; Carlesi, S; Costanzo, A; Bàrberi, P (2020): Functional diversity of cover crop mixtures enhances biomass yield and weed suppression in a Mediterranean agroecosystem. In: *Weed Research* 60 (1), S. 96–108. DOI: 10.1111/wre.12388.
- Reed, K (2016): Fertility of Herbivores Consuming Phytoestrogen-containing *Medicago* and *Trifolium* Species. In: *Agriculture* 6 (3), S. 35. DOI: 10.3390/agriculture6030035.
- Revell, C (2007): French serradella - soft seeded. Pastures Australia. Online verfügbar unter https://keys.lucidcentral.org/keys/v3/pastures/Html/French_serradella_-_soft_seeded.htm, zuletzt geprüft am 28.03.2022.
- Ridolfi, L; D’Odorico, P; Porporato, A; Rodriguez-Iturbe, I (2000a): Duration and frequency of water stress in vegetation: An analytical model. In: *Water Resources Research* 36 (8), S. 2297–2307. DOI: 10.1029/2000WR900104.
- Ridolfi, L; D’Odorico, P; Porporato, A; Rodriguez-Iturbe, I (2000b): Impact of climate variability on the vegetation water stress. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105 (D14), S. 18013–18025. DOI: 10.1029/2000JD900206.
- Rognli, OA; Pecetti, L; Kovi, MR; Annicchiarico, P (2021): Grass and legume breeding matching the future needs of European grassland farming. In: *Grass and Forage Science* 76 (2), S. 175–185. DOI: 10.1111/gfs.12535.

- Rojas-Sandoval, J (2017): *Medicago lupulina*. Wallingford.
- Saia, S; Urso, V; Amato, G; Frenda, AS; Giambalvo, D; Ruisi, P; Di Miceli, G (2016): Mediterranean forage legumes grown alone or in mixture with annual ryegrass: biomass production, N₂ fixation, and indices of intercrop efficiency. In: *Plant and Soil* 402 (1-2), S. 395–407. DOI: 10.1007/s11104-016-2837-x.
- Scavo, A; Restuccia, A; Lombardo, S; Fontanazza, S; Abbate, C; Pandino, G et al. (2020): Improving soil health, weed management and nitrogen dynamics by *Trifolium subterraneum* cover cropping. In: *Agronomy for Sustainable Development* 40 (3), S. 18. DOI: 10.1007/s13593-020-00621-8.
- Schättler, J (2020): Kleinkörnige Leguminosen in der Wiederkäuerfütterung. Online verfügbar unter <https://www.demonet-kleeluzplus.de/240404/index.php>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Schimmelpfennig, S; Heidecke, C; Beer, H; Bittner, F; Klages, S; Kregel, S; Lange, S (2018): Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft. Ergebnisse eines Workshops der Ressortforschungsinstitute FLI, JKI und Thünen-Institut. Johann Heinrich von Thünen Institut (Thünen Working Paper, 86).
- Schindler, U; Steidl, J; Müller, L; Eulenstein, F; Thiere, J (2007): Drought risk to agricultural land in Northeast and Central Germany. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 170 (3), S. 357–362. DOI: 10.1002/jpln.200622045.
- Schleip, I; Huguenin, O; Hermle, M; Heckendorn, F; Sixt, D; Volling, O; Schindele, M (2016): Erfolgreiche Weidehaltung. Der Schlüssel zu niedrigen Kosten in der Milchproduktion. Online verfügbar unter <https://www.oeko-komp.de/wp-content/uploads/2017/03/Milchvieh-weidehaltung.pdf>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Schneider, J (2018): Wildbienen und Steinklee. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft-mv.de/Fachinformationen/Nawaro/?id=832&processor=processor.sa.lfaforenbeitrag>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Schneider, J (2019): Handout Steinklee. Hg. v. Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei. Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaft-mv.de/Fachinformationen/Nawaro/?id=932&processor=processor.sa.lfaforenbeitrag>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Schultz-Sternberg, R; Bartsch, R; Schleier, C (2012): Brandenburg spezifische Boden-Indikatoren für ein Klimamonitoring im Rahmen der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) sowie Zusammenstellung von aussagefähigen Wirkungs- und Alarmschwellen. Hg. v. LUGV Brandenburg.
- Schuster, WH; Alkämper, J; Marquard, R; Stählin, A; Stählin, L (1998): Leguminosen zur Kornnutzung. Gießen. Online verfügbar unter <https://d-nb.info/106808703x/34>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Schwalm, CR; Glendon, S; Duffy, PB (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (33), S. 19656–19657. DOI: 10.1073/pnas.2007117117.
- Seaney, RR; Henson, PR (1970): Birdsfoot trefoil. In: Academic Press (Hg.): *Advances in agronomy*. 22. Aufl., S. 119–157.
- Seneviratne, SI; Corti, T; Davin, EL; Hirschi, M; Jaeger, EB; Lehner, I et al. (2010): Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. In: *Earth-Science Reviews* 99 (3-4), S. 125–161. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.

- Sheaffer, CC; Ehlke, NJ; Albrecht, KA; Jungers, Jacob M., Goplen, Jared J. (2018): Forage legumes: clovers, birdsfoot trefoil, cicer milkvetch, crownvetch and alfalfa. University of Minnesota (Station Bulletin, 608).
- Sheaffer, CC; Seguin, P (2003): Forage Legumes for Sustainable Cropping Systems. In: *Journal of Crop Production* 8 (1-2), S. 187–216. DOI: 10.1300/J144v08n01_08.
- Smetham, ML (2003): A review of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.), its ecology and use as a pasture legume in Australasia. In: *Advances in Agronomy* 79, S. 303–350. DOI: 10.1016/S0065-2113(02)79006-8.
- Smith, D (1962): Carbohydrate Root Reserves in Alfalfa, Red Clover, and Birdsfoot Trefoil under Several Management Schedules. In: *Crop Science* 2 (1), S. 75–78. DOI: 10.2135/cropsci1962.0011183X000200010024x.
- Sommer, H; Sundrum, A (2015): Ganzpflanze und Blattmasse verschiedener Grünleguminosen als Eiweißquelle in der Schweinefütterung. In: Anna Maria Häring, B. Hörning, R. Hoffmann-Bahnsen, H. Luley, V. Luthardt, J. Pepe und G. Trei (Hg.): Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Berlin: Köster. Online verfügbar unter https://orgprints.org/id/eprint/27148/1/27148_sommer.pdf, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Spiegel, A-K; Gronle, A; Arncken, C; Bernhardt, T; Heß, J; Schmack, J et al. (2014): Leguminosen nutzen. Naturverträgliche Anbaumethoden aus der Praxis. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz. Bonn.
- Stahr, A (2018): Bodengeologie des Landes Brandenburg. Online verfügbar unter <http://www.ahabc.de/bodengeologie-des-bundeslandes-brandenburg/#>, zuletzt geprüft am 18.01.2022.
- Staniak, M (2019): Changes in yield and nutritive value of red clover (*Trifolium pratense* L.) and Festulolium (*Festulolium braunii*) under drought stress. In: *Agricultural and Food Science* 28 (1), 27–34. DOI: 10.23986/afsci.73282.
- Staniak, M; Bojarszczuk, J; Książak, J (2017): Undersown serradella (*Ornithopus sativus* L.) as an element of weed control in triticale crops. In: *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 62 (4), S. 144–148.
- Steffen, E; Bergknecht, S (2006): Futterpflanzen und Klimawandel. Bewertung von Arten und Sorten landwirtschaftlicher Futterpflanzen in ihrer Reaktion auf veränderte klimatische Bedingungen. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Dresden.
- Steiner, JJ (1999): Birdsfoot Trefoil Origins and Germplasm Diversity. In: P. R. Beuselinck (Hg.): Trefoil: The Science and Technology of Lotus. Madison, Wisconsin: Crop Science Society of America and American Society of Agronomy (CSSA Special Publications, 28), S. 81–96.
- Steinshamn, H (2010): Effect of forage legumes on feed intake, milk production and milk quality – a review. In: *Animal Science Papers and Reports* 28 (3), S. 195–206.
- Stieber, J; Schmidtke, K (2011): Leistung legumer Untersaaten in Körnererbse: Unkrautunterdrückung, symbiotische N₂-Fixierung und N Vorfruchtwirkung in Systemen differenzierter Grundbodenbearbeitung. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden.
- Sturludóttir, E; Brophy, C; Bélanger, G; Gustavsson, A-M; Jørgensen, M; Lunnan, T; Helgadóttir, Á (2013): Benefits of mixing grasses and legumes for herbage yield and nutritive value in Northern Europe and Canada. In: *Grass and Forage Science* 69 (2), S. 229–240. DOI: 10.1111/gfs.12037.

- Teixeira, C; Lucas, RJ; Lewis, T; Moot, DJ (2017): From establishment to re-establishment: a field evaluation of sub clover cultivars. Lincoln University, Field Research Centre, Faculty of Agriculture and Life Sciences.
- Thomas, E (2006): Feldversuchswesen. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- Titze, A (2015): Ertrags- und Futterwerteigenschaften trockenheitsverträglicher Leguminosen-Gras-Gemenge unter ökologischer Bewirtschaftung. In: *Beiträge zum ökologischen Landbau* 56, S. 71–78.
- Tomić, D; Stevović, V; Lazarević, Đ; Đurović, D; Mašković, P (2017): Productivity of birdsfoot trefoil on acid soils. International Scientific Agriculture Symposium 2017. Jahorina, Bosnia and Herzegovina, 2017.
- Tsutsupa, T; Stupacova, N (2013): Comparative anatomical analysis of leaf structure of *Medicago lupulina* L. (Leguminosae). In: *Modern Phytomorphology* (4), S. 229–232.
- Turkington, R; Cavers, PB (1979): The Biology of Canadian Weeds. In: *Canadian Journal of Plant Science* 59 (1), S. 99–110. DOI: 10.4141/cjps79-015.
- Turner, LB (1990a): The Extent and Pattern of Osmotic Adjustment in White Clover (*Trifolium repens* L.) During the Development of Water Stress. In: *Annals of Botany* 66 (6), S. 721–727. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a088088.
- Turner, LB (1990b): Water Relations of White Clover (*Trifolium repens*): Water Potential Gradients and Plant Morphology. In: *Annals of Botany* 65 (3), S. 285–290. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a087936.
- Umwelt Bundesamt (o. J.): Was ist das Haber-Bosch Verfahren? Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/verursacher/energiewirtschaft-industrie/was-ist-das-haber-bosch-verfahren>, zuletzt geprüft am 27.03.2022.
- Urbatzka, P; Beck, R (2015): Entwicklung der Humusgehalte und der Humusqualität in verschiedenen Fruchtfolgen des ökologischen Landbaus. In: Anna Maria Häring, B. Hörning, R. Hoffmann-Bahnsen, H. Luley, V. Luthardt, J. Pepe und G. Trei (Hg.): Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Berlin: Köster.
- Vance, CP; Johnson, LEB; Stade, S; Groat, RG (1982): Birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*) root nodules: morphogenesis and the effect of forage harvest on structure and function. In: *Canadian Journal of Botany* 60 (4), S. 505–518. DOI: 10.1139/b82-068.
- Vasileva, V; Vasilev, E (2012): Study on Productivity of some Legume Crops in Pure Cultivation and Mixtures. In: *Agriculturae Conspectus Scientificus* 77 (2), S. 91–94.
- Vasileva, V; Vasilev, E (2020): Agronomic characterization and the possibility for potential use of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) in the forage production in Bulgaria. In: *Pakistan Journal of Botany* 52 (2). DOI: 10.30848/pjb2020-2(26).
- von Wulffen, U; Roschke, M; Kape, H-E (2008): Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV). Gemeinsame Hinweise der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt. LVL Brandenburg, LLFG Sachsen-Anhalt, LFBMV Mecklenburg-Vorpommern.
- Vrignon-Brenas, S; Celette, F; Piquet-Pissaloux, A; David, C (2016): Biotic and abiotic factors impacting establishment and growth of relay intercropped forage legumes. In: *European Journal of Agronomy* 81, S. 169–177. DOI: 10.1016/j.eja.2016.09.018.
- Walter, R; Burmeister, J; Brandhuber, R (2015): Regenwürmer - aktuelle Gefahren und positive Entwicklungen in landwirtschaftlich genutzten Böden. In: BMEL und LFL (Hg.): Jahr des

- Boden. Schwere Maschinen, enge Fruchtfolgen, Gärreste - eine Gefahr für die Bodenfruchtbarkeit? 13. Kulturlandschaftstagung. Würzburg, 18. und 19. Juni.
- Weltin, J; Carrasco Alarcon, LS; Berger, U; Bellof, G (2014): Luzernesilage aus spezieller Nutzung und technologischer Aufbereitung in der ökologischen Geflügel- und Schweinefütterung. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.
- Wiggering, H; Finckh, M; Heß, J; Wehling, P; Michaelis, T (2012): Fachforum Leguminosen: Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft - Ökosystemleistungen von Leguminosen wettbewerbsfähig machen; Forschungsstrategie der Deutschen Agrarforschungsallianz. Braunschweig.
- Wijekoon, C; Acharya, SN; Siow, YL; Sura, S; Thandapilly, S; Sabra, A (2021): Canadian sainfoin and fenugreek as forage and functional foods. In: *Crop Science* 61 (1), S. 1–20. DOI: 10.1002/csc2.20280.
- Wilbois, K-P; Schwab, A; Fischer, H; Bachinger, J; Palme, S; Peters, H; Dongus, S (2004): Leitfaden für Praxisversuche. Eine Anleitung zur Planung, Durchführung und Auswertung von Praxisversuchen. Hg. v. Forschungsinstitut für biologischen Landbau. Bundesprogramm Ökologischer Landbau.
- Wippel, K; Schulze-Lefert, P; Garrido-Oter, R (2019): Rhizobien in der Pflanzenmikrobiota. In: *Biologie in unserer Zeit* 49 (6), S. 426–434. DOI: 10.1002/biuz.201910692.
- Zamani, Z; Amiri, H; Ismaili, A (2020): Improving drought stress tolerance in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) by exogenous melatonin. In: *Plant Biosystems* 154 (5), S. 643–655. DOI: 10.1080/11263504.2019.1674398.
- Zebisch, M; Grothmann, T; Schröter, D; Hasse, C; Fritsch, U; Cramer, W (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. PIK Potsdam.
- Zehner, S; Göttfert, M (2015): Knöllchenbakterien: Helfer der Landwirtschaft. In: *Biologie in unserer Zeit* 45 (5), S. 296–302. DOI: 10.1002/biuz.201510573.
- Zhang, C; Shi, S; Liu, Z; Yang, F; Zhang, Z (2019): Effects of drought stress on the root morphology and anatomical structure of alfalfa (*Medicago sativa*) varieties with differing drought-tolerance. In: *Acta Prataculturae Sinica* 28 (5), S. 79–89. DOI: 10.11686/cyxb2018314.
- Zhu, Y; Sheaffer, CC; Barnes, DK (1996): Forage Yield and Quality of Six Annual Medicago Species in the North-Central USA. In: *Agronomy Journal* 88 (6), S. 955–960. DOI: 10.2134/agronj1996.00021962003600060019x.
- Zimmer, J; Ellmer, F (2012): Nährstoffversorgung ackerbaulich genutzter Böden im Land Brandenburg. In: *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* (24), S. 92–93.

8 Anhang

	Prüffaktorstufe <i>Enthaltene Arten bzw. Sorten</i>	Aussaatstärke	Eigenschaften / Herkunft des Saatgut	Hersteller*innenangaben zum Saatgut
1	Weißer Steinklee ¹	27 kg ha ⁻¹	konventionell ungeimpft (Camena)	zweijährig; kumarinhaltig
2	DSV 2256 ² <i>Einjähriges Weidelgras (70 %), Perserklee (15 %), Alexandrinerklee (15 %)</i>	41 kg ha ⁻¹	biologisch geimpft (Mantelsaat) (DSV)	schnellwüchsig, hoch im Ertrag, schmackhaft; normale-feuchte Standorte
3	Bockshornklee ¹	30 kg ha ⁻¹	biologisch ungeimpft (Camena)	anfänglich konkurrenzschwach; bevorzugt lehmige Böden; trockentolerant
4	DSV M4 ² <i>Luzerne (45 %), Dt. Weidelgras (20 %), Weißklee (10 %), Hornklee (10 %), Gelbklee (10 %), Serradella (5 %)</i>	35 kg ha ⁻¹	biologisch ungeimpft (DSV)	für trockene Lagen, kalkhaltige Böden; Förderung von Insekten und Nützlingen
5	Erdklee ¹ <i>Dalkeith / Seaton Park</i>	30 kg ha ⁻¹	konventionell ungeimpft (Camena)	mittelfrüh; niedrigwachsend; östrogenhaltig
6	Gelbklee ¹ <i>Virgo</i>	24 kg ha ⁻¹	biologisch ungeimpft (Camena)	trockene, kalkhaltige Standorte; ein-bis zweijährig
7	Luzerne ¹ <i>Luzelle</i>	21 kg ha ⁻¹	konventionell ungeimpft (Camena)	trittverträglicher Weidetyp; niedriger Wuchs
8	DSV 2215 ³ <i>Gelbklee (5 %), Hornklee (5 %), Luzerne (20 %), Weißklee (5 %), versch. Gräser (65 %)</i>	35 kg ha ⁻¹	biologisch geimpft (Mantelsaat) (DSV)	für trockene und leichte Standorte; Schnitt- und Weidenutzung
9	DSV 2060 Luzerne-Mix ³ <i>Planet, Fleetwood, Fraver</i> / Camena Luzerne-Gras 100 ¹ <i>Luzerne (75 %) Lieschgras (10 %), Dt. Weidelgras (15 %)</i>	20 kg ha ⁻¹ / 30 kg ha ⁻¹	konventionell geimpft (DSV) / teilw. biologisch geimpft (Camena)	hohe Erträge und Eiweißgehalte auf trockenen Standorten / Mischung mit spätreifenden Gräsern
10	DSV M5 ² <i>Dt. Weidelgras (30 %), Rotklee (20 %), Inkarnatklee (20 %), Schwedenklee (20 %), Weißklee (10 %)</i>	35 kg ha ⁻¹	biologisch ungeimpft (DSV)	wüchsige Untersaat zur Gründung
11	Gewöhnlicher Hornklee ¹ <i>Leo</i>	16 kg ha ⁻¹	konventionell ungeimpft (Camena)	für trockene Lagen und kalkhaltige Böden; Sorte mit hohem TM-Ertrag (1. Schnitt)

¹ Camena Samen (2021): Saaten für den biologischen Landbau Frühjahr 2021. Lauenau.

² DSV Saaten (2021): DSV Ökosaatgut 2021 – Für die besonderen Ansprüche des ökologischen Lanbaus.

³ DSV (2022): COUNTRY FELDGRAS 2060. [online] <https://www.dsv-saaten.de/sorte/3603> [22.03.2022]

Anhang 1: Arten- bzw. Sortenzusammensetzung der Prüffaktorstufen, Aussaatstärke sowie Eigenschaften des Saatguts nach Hersteller*innenangaben.

8 Anhang

	W. Steinklee_1	W. Steinklee_2	Erdklee_1	Erdklee_2	Gelbklee_1	Gelbklee_2	Luzelle_1	Luzelle_2	DSV 2060	Gew. Hornklee_1	Gew. Hornklee_2	DSV 2256_1	DSV 2256_2	DSV M4_1	DSV M4_2	DSV 2215_1	DSV 2215_2	Camena Luz. Gras 100	DSV M5_1	DSV M5_2
W. Steinklee_1																				
W. Steinklee_2	sig.																			
Erdklee_1	sig.	sig.																		
Erdklee_2	sig.	sig.	n.s.																	
Gelbklee_1	sig.	sig.	n.s.	n.s.																
Gelbklee_2	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.															
Luzelle_1	sig.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.														
Luzelle_2	n.s.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.													
DSV 2060	n.s.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.												
Gew. Hornklee_1	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	sig.											
Gew. Hornklee_2	sig.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.										
DSV 2256_1	n.s.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	n.s.									
DSV 2256_2	n.s.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	n.s.	n.s.								
DSV M4_1	sig.	n.s.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.							
DSV M4_2	sig.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.						
DSV 2215_1	sig.	n.s.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	n.s.	n.s.					
DSV 2215_2	sig.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.				
Camena Luz. Gras 100	n.s.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	n.s.	sig.	n.s.			
DSV M5_1	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	sig.		
DSV M5_2	sig.	n.s.	sig.	sig.	sig.	sig.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

Anhang 2: Signifikante Unterschiede zwischen den Aufwuchshöhen der Prüfglieder zum vierten Boniturtermin (Paarweise Vergleiche, $\alpha = 0,05$).

	N ₂ -Fixierung [kg ha ⁻¹]	Mittlere N ₂ -Fixierung [kg ha ⁻¹]	Literatur- angaben [kg ha ⁻¹ Jahr ⁻¹]	Quelle	Ertragspotenzial [kg ha ⁻¹] (ausgew. Vergleichswert)	Ausschöpfung Ertragspotenzial [%]
Weißer Steinklee_1	168	131	80 - 250	Freyer et al. 2005	250	Mittel: 52
Weißer Steinklee_2	94					WSK_1: 67 WSK_2: 38
Erdklee_1	98	85	50 – 188	Bolger et al., 1995 zit. nach Vasileva & Vasilev, 2020	188	Mittel: 45
Erdklee_2	71					Erdklee_1: 52 Erdklee_2: 38
Gelbklee_1	83	95	30 - 100	Freyer et al. 2005	100	Mittel: 95
Gelbklee_2	106					Gelbklee_1: 83 Gelbklee_2: 106
Luzelle_1	50	57	137	Pietsch, 2004	137	Mittel: 42
Luzelle_2	64					Luzelle_1: 37 Luzelle_2: 47
DSV 2060	35	35	137	Pietsch, 2004	137	DSV 2060_1: 26
Gew. Hornklee_1	90	126	30 - 100	Freyer et al. 2005	100	Mittel: 126
Gew. Hornklee_2	163					Gew. Hornklee_1: 90 Gew. Hornklee_2: 163

Anhang 3: Daten zur N₂-Fixierleistung der Futterleguminosen-Reinsaatbestände und Abgleich dieser mit ausgewählten Literaturwerten.

	TM-Ertrag [dt ha ⁻¹]	Mittlerer TM-Ertrag [dt ha ⁻¹]	Literatur- angaben [dt ha ⁻¹]	Rahmenbedingungen	Quelle	Ertragspotenzial [dt ha ⁻¹] (ausgew. Vergleichswert)	Ausschöpfung Ertragspotenzial [%]
Weißer Steinklee_1	41,4		25 – 80	– im Ansaatjahr	Bull, 2014		Mittel: 107 WSK_1: 146 WSK_2: 68
Weißer Steinklee_2	19,3	30,4	28,4	– erster Schnitt (im Mai, bei Aussaat im September) – schluffiger Lehm; 4-5% Humusgehalt; pH-Wert (CaCl ₂) 7,6; 500 mm jährl. Nds-Menge	Pietsch, 2004	28,4	
Erdklee_1	33,0		14,5	– ein Ernteschnitt (nach 165 Wachstumstagen) – Sorte Seaton Park	Teixeira et al., 2017		Mittel: 175 Erdklee_1: 228 Erdklee_2: 122
Erdklee_2	17,7	25,4	36,0	– Schlufflehm; pH-Wert 5,4; jährl. Nds-Menge 630 mm – <i>Trifolium subterraneum</i> ssp. <i>subterraneum</i> – Herbstaussaat in Bulgarien	Vasileva & Vasilev, 2020	14,5	
Gelbklee_1	16,0		25 – 37	– unbekannt	Heuzé et al., 2018		Mittel: 89 Gelbklee_1: 73 Gelbklee_2: 105
Gelbklee_2	23,0	19,5	22,0	– Mittel dreier Versuchsstandorte – Frühjahrsaussaat; pH-Wert: 6,5 – ein Ernteschnitt 6 – 10 Wochen nach Aussaat	Zhu et al., 1996	22,0	
Luzelle_1	25,6		144,2	– Sommerblanksaat mit Nutzung in Folgejahren – Lehmiger Sand bis sandiger Lehm (BRB); 36 BP			Mittel: 58 - 77 Luzelle_1: 53 - 71 Luzelle_2: 62 - 83
Luzelle_2	29,9	27,8		– Ertrag aus drei bis vier Ernteschnitten → TM-Ertrag geteilt durch 3 bzw. 4 = Ertragspotenzial	Giebelhausen, 2009	36,1 – 48,1	
DSV 2060	24,6	24,6	157,5	– Sommerblanksaat mit Nutzung in Folgejahren – Sorte Planet – Lehmiger Sand bis sandiger Lehm (BRB); 36 BP – Ertrag aus drei bis vier Ernteschnitten → TM-Ertrag geteilt durch 3 bzw. 4 = Ertragspotenzial	Giebelhausen, 2009	39,4 – 52,5	DSV 2060_1: 47 - 62
Gew. Hornklee_1	23,4		50 - 90	– unbekannt	Freyer et al., 2005		Mittel: 100 Gew. Hornklee_1: 72 Gew. Hornklee_2: 129
Gew. Hornklee_2	42,2	32,8	32,7	– erster Ernteschnitt im Juni nach Herbstaussaat – Region Westwales; 1351 mm jährl. Nds.-Menge; Lehm – Sorte Leo	Marley et al., 2006	32,7	

Anhang 4: Trockenmasseertragsdaten der Futterleguminosen-ReinSaatbestände und Abgleich dieser mit ausgewählten Literaturwerten.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Amanda Birkmann, geboren am 23.06.1997, an Eides statt, dass ich die vorstehende Abschlussarbeit selbständig angefertigt und mich fremder Hilfe nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß veröffentlichtem oder nicht veröffentlichtem Schrifttum entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Ich erkläre weiterhin, dass die Arbeit im Rahmen keines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht worden ist.

Ort, Datum

Unterschrift