Hochschule für Wirtschaft und Gesellschaft Ludwigshafen

Dualer Studiengang B. Sc. Weinbau und Oenologie Rheinland-Pfalz

Bachelorarbeit

Wachstumseigenschaften, Wasser- und Nährstoffhaushalt verschiedener Begrünungspflanzen für die Unterstockbegrünung im Weinbau bei unterschiedlicher Wasserversorgung

Neustadt an der Weinstraße, 12.08.2024

Verfasserin	Julia Standke
Matrikelnummer	635244
Erstgutachter	Prof. Dr. Jochen Bogs
	Technische Hochschule Bingen
Zweitgutachterin	Katharina Weihbrecht
	Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Student/-in: Julia Standke Matrikel-Nummer: 635244

Modul: Bachelorarbeit – Thesis Abgabetag: 12.08.2024

Thema: Wachstumseigenschaften, Wasser- und Nährstoffhaushalt verschiedener Begrünungspflanzen für die Unterstockbegrünung im Weinbau bei unterschiedlicher Wasserversorgung

Hiermit versichere ich, Julia Standke, die vorliegende Bachelorarbeit selbständig angefertigt zu haben. Ich habe keine unzulässige Hilfe in Anspruch genommen, insbesondere keine Unterstützung auf Basis Künstlicher Intelligenz (KI). Eine hiervon abweichende Zulässigkeit von Unterstützung auf Basis von KI habe ich mit der/dem Erstgutachtenden abgestimmt. Ich habe ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt.

Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken oder Quellen entnommen wurden, habe ich unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Dies gilt auch für bildliche Darstellungen oder Erzeugnisse auf Basis von Künstlicher Intelligenz.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen. Darüber hinaus versichere ich, dass die von mir eingereichte Fassung in Papierform mit der elektronischen Version übereinstimmt.

Mir ist bewusst, dass jeder Verstoß gegen die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis geahndet wird. Ich nehme zur Kenntnis, dass diese Arbeit mit Hilfe einer Software auf Plagiate oder nicht angegebene Hilfsmittel überprüft und für Prüfungszwecke gespeichert werden kann.

Neustadt an der Weinstraße, den 12.08.2024 Julia Standke

ABSTRACT

Die Unterstockbegrünung stellt eine nachhaltige Alternative zu chemischer und mechanischer Unterstockbearbeitung dar, allerdings konkurriert sie mit der Rebe um Wasser und Nährstoffe, was besonders im Rahmen des rezenten Klimawandels berücksichtigt werden muss.

2023 wurden acht Versuchsvarianten, welche sich in Pflanzenart und Wasserversorgung unterscheiden, in einem Topfversuch auf ihre Wachstumseigenschaften sowie ihren Wasser- und Nährstoffhaushalt untersucht. Gelbklee, Rot-Schwingel, Sand-Thymian und eine Kontroll-Variante ohne Einsaat wurden jeweils mit zwei verschiedenen Wassermengen versorgt. Während der Versuchsdurchführung wurden Deckungsgrad, maximale Wuchshöhe, Bodenfeuchtigkeit und Sickerwassermengen regelmäßig bonitiert. Anschließend erfolgten Nährstoffanalysen in Spross, Wurzel und Boden.

Hinsichtlich der Wachstumseigenschaften ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der hoch versorgten und der niedrig versorgten Variante innerhalb der gleichen Pflanzenart. Die Bodenfeuchtigkeit nahm mit Einsaat von Begrünungspflanzen ab. Vor allem Gelbklee und Rotschwingel zeigten einen hohen Wasserbedarf. Darüber hinaus erwies sich Gelbklee als besonders nährstoffzehrend. Dennoch wurden in allen eingesäten Varianten Verbesserungen der Bodenzusammensetzung festgestellt. Diese zeigten gegenüber der Kontrolle höhere C/N-Verhältnisse, organisches Kohlenstoff- und Humusgehalte sowie niedrigere pH-Werte.

Under-vine cover crops are a sustainable alternative to chemical or mechanical under-vine cultivation and can positively affect soil, biological activity, and vines. However, it competes with the vine for water and nutrients, which must be considered in times of recent climate change.

In 2023, eight trial variants with different plant species and water supplies were tested in a pot experiment for growth characteristics as well as water and nutrition balance. Yellow clover, red fescue, sand thyme and a control variant without seeding were supplied with two different amounts of water each. During the trial, cover ratio, maximum growth height, soil moisture and amount of infiltrated water were measured regularly followed by nutrient analyses in shoot, root and soil.

With regard to growth characteristics, there were no significant differences between the high water supply and the low water supply variant within the same plant species. Soil moisture decreases with the sowing of cover crops. Yellow clover and red fescue in particular showed high water-requirement. In addition, yellow clover proved to be particularly nutrient-demanding.

Nevertheless, improvements in soil composition were observed in all sown variants. Compared to the control variant, they showed higher C/N ratios, organic carbon contents and humus contents as well as lower pH values.

Overall, this study was able to demonstrate the positive effects of under-vine cover crops on soil quality. Concerning the water balance of the different plants, further research is required in which the evaporation effects are taken into account.

INHALTSVERZEICHNIS

Eigenständigkeitserklärung I

Abstract II

Abkürzungsverzeichnis III

Abbildungsverzeichnis IV

Tabellenverzeichnis VII

1 Einleitung 1

2 Literaturübersicht 2

2.1 Bodenpflege in der Stockreihe (Unterstockbodenpflege) 2

2.1.1 Notwendigkeit der Unterstockbodenpflege 2

2.1.2 Herkömmliche Möglichkeiten der Unterstockbodenpflege 3

2.1.3 Problematik der aktuellen Bewirtschaftungssysteme 4

2.2 Potential einer Unterstockbegrünung im Weinbau 5

2.2.1 Einfluss auf den Boden 5

2.2.2 Einfluss auf die biologische Aktivität 6

2.2.3 Einfluss auf die Rebe 7

2.3 Geeignete Pflanzen für die Unterstockbegrünung 7

2.4 Pflanzenwachstum 7

2.5. Nährstoffversorgung der Rebe bei Unterstockbegrünung 9

2.6 Wasserversorgung der Rebe bei Unterstockbegrünung 10

3 Material und Methoden 13

3.1 Versuchsvarianten 13

3.2 Versuchsdurchführung 14

3.3 Einsaat 15

3.4 Verwendetes Substrat 16

3.5 Klimabedingungen 17

3.6 Analysen 18

3.6.1 Deckungsgrad ... 18
3.6.2 Maximale Wuchshöhe ... 19
3.6.3 Biomasse ... 20
3.6.4 Wassergehalt im Spross ... 20
3.6.5 Bodenfeuchtigkeit ... 20
3.6.6 Sickerwasser ... 22
3.6.7 Nährstoffe in Spross und Wurzel ... 22
3.6.8 Bodenanalysen ... 23
3.7 Statistische Auswertung ... 24
4 Ergebnisse ... 25
4.1 Deckungsgrad ... 25
4.2 Maximale Wuchshöhe ... 26
4.3 Biomasse ... 27
4.4 Wassergehalt im Spross ... 30
4.5 Bodenfeuchtigkeit ... 30
4.6 Sickerwasser ... 33
4.7 Nährstoffe in Spross und Wurzel ... 34
4.8 Bodenanalysen ... 36
5 Diskussion ... 43
5.1 Wachstumseigenschaften ... 43
5.2 Wasserhaushalt ... 45
5.3 Nährstoffhaushalt ... 46
5.4 Limitation und Forschungsausblick ... 50
6 Zusammenfassung ... 51
Anhang ... 52
Literaturverzeichnis ... 57

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

DLR	Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum
FS	Frisch-Substanz
Nmin	mineralischer Stickstoff
TDT	Time-Domain-Transmission
TS	Trocken-Substanz
(VD)LUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Darstellung der Wasserversorgung in Milliliter der hoch und niedrig versorgten Versuchsvarianten (n = 16) und der Tagesmitteltemperatur in °C (n = 30) im Zeitraum von Tag 0 bis Tag 147; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 18

Abbildung 2: Referenzbilder verschiedener Varianten zu unterschiedlichen Zeitpunkten für die einheitliche Bestimmung des Deckungsgrads: (A) Deckungsgrad 1 – 5 % an Tag 7 in der $G_{niedrig}$-Varainte (B) Deckungsgrad 51 – 75 % an Tag 22 in der S_{hoch}-Variante (C) Deckungsgrad 76 – 100 % an Tag 37 in der S_{hoch}-Variante 19

Abbildung 3: Die von TOMST zur Verfügung gestellte Kalibrationsfunktion für die Bestimmung der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit bei lehmigem Sand (Quelle: Wild, 2019) 21

Abbildung 4: Bestimmung des Deckungsgrades in % der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, $R_{hoch,}$ $R_{niedrig}$, S_{hoch} und $S_{niedrig}$ im Zeitraum von Einsaat an Tag 0 bis zum Abernten der Pflanzen an Tag 148; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 25

Abbildung 5: Bestimmung der maximale Wuchshöhe in Zentimeter der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig}$ im Zeitraum von Einsaat an Tag 0 bis zum Abernten der Pflanzen an Tag 148; n = 4 ; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung..... 26

Abbildung 6: Bestimmung der Spross-Frisch- und Spross-Trockenmasse in Gramm der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig;}$ Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörgkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 28

Abbildung 7: Bestimmung der Wurzel-Frischmasse in Gramm der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig}$; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 29

Abbildung 8: Bestimmung des Wassergehalts im Spross in % der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig}$; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 30

Abbildung 9: Verlauf der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit in % in 6 cm Bodentiefe der Varianten K_{hoch} (n =4), $K_{niedrig}$ (n = 4), G_{hoch} (n = 3), $G_{niedrig}$ (n = 4), R_{hoch} (n = 4), $R_{niedrig}$ (n = 4), S_{hoch} (n = 3) und $S_{niedrig}$ (n = 4), für den Zeitraum von Tag 0 bis Tag 146 31

Abbildung 10: Boxplots der volumetrische Bodenfeuchtigkeit in % der Varianten K_{hoch} (n = 4), $K_{niedrig}$ (n = 4), G_{hoch} (n = 3), $G_{niedrig}$ (n = 4), R_{hoch} (n = 4), $R_{niedrig}$ (n = 4), S_{hoch} (n = 3) und $S_{niedrig}$ (n = 4) für Zeitraum von Tag 59 bis Tag 89 (Monat Juli) 32

Abbildung 11: Bestimmung des Sickerwassers in Gramm der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch} und $S_{niedrig}$ an Tag 34, Tag 57, Tag 72, Tag 82, Tag 124 und Tag 148; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung..... 33

Abbildung 12: Bestimmung der Makronährstoffe Gesamt-Stickstoff, Calcium, Kalium, Phosphor, Magnesium und Schwefel in % TS in Wurzel und Spross der Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer mittels folgender Methoden VDLUFA MB Bd.III,4.1.2:2004 und DIN EN ISO 11885:2009-09; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 34

Abbildung 13: Bestimmung der Mikronährstoffe Kupfer, Mangan, Zink, Bor und Eisen in mg/kg TS in Wurzel und Spross der Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer mittels folgender Methoden VDLUFA MB Bd.VII,2.2.2.6:2011 und DIN EN ISO 11885:2009-09; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 35

Abbildung 14: Bestimmung der Makronährstoffe Gesamt-Stickstoff, Phosphat und Kalium in mg/100 g TS in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer mittels folgender Methoden VDLUFA I, A2.2.5:2012* und CAL-Methode (VDLUFA I,A6.2.1.1:2012); Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 37

Abbildung 15: Bestimmung der Nitratgehalte in mg/100 g feldfrischer Boden in den Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch} und $S_{niedrig}$ durch die LUFA Speyer nach VDLUFA Bd. I A6.1.4.1:2002; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 38

Abbildung 16: Bestimmung der Mikronährstoffe Kupfer, Mangan, Zink und Bor in mg / kg TS in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer nach CAT-Methode (VDLUFA I,A6.4.1:2002*); Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 39

Abbildung 17: Bestimmung der Boden-pH-Werte in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer nach VDLUFA I, A5.1.1:2016; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 40

Abbildung 18: Bestimmung der C/N-Verhältnis in den Böden der Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 41

Abbildung 19: Bestimmung des organischen Kohlenstoffanteils und des Humusanteils in % TS in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer nach DIN ISO 10694:1996-08* und Formel (Corg*1,72); Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung 42

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht der Varianten und Wiederholungen 14
Tabelle 2: Zeitlicher Ablauf des Versuchs..... 15
Tabelle 3: Saatstärke nach Herstellerangaben in g/m² und tatsächlich gewählte Saatstärke in g/Topf bei einer Oberfläche von 0,0346 m² für die Pflanzenvarianten Gelbklee, Rot-Schwingel und Sand-Thymian..... 16
Tabelle 4: Boniturstufen des Deckungsgrads in Anlehnung an die Vegetationsaufnahme nach Braun-Blanquet (1964) mit entsprechendem Klassenmittel..... 19
Tabelle 5: Von der LUFA Speyer verwendete Methoden für die Analyse der Nährstoffe Gesamt-Stickstoff, Bor, Calcium, Kalium, Magnesium, Phosphor, Schwefel, Eisen, Kupfer, Mangan und Zink in Spross und Wurzel der hoch versorgten Varianten . 23
Tabelle 6: Von der LUFA Speyer verwendete Methoden für die Analyse von pH-Wert, C/N-Verhältnis, organischen Kohlenstoff- und Humusgehalt sowie den Nährstoffen Kali, Phosphat, Gesamt-Stickstoff, Bor, Kupfer, Mangan, Zink, Nitrat und Ammonium in den Bodenproben der hoch versorgten Varianten..... 24

1 EINLEITUNG

Die Landwirtschaft ist nicht nur direkt vom Klimawandel betroffen, sondern trägt auch maßgeblich dazu bei. So verursachte die EU-Landwirtschaft 2021 10,7 % aller Treibhausgasemissionen in der EU und trug mit dem Einsatz von rund 355.000 Tonnen Pestiziden zum Artensterben bei (Statistisches Bundesamt 2023). In der Dauerkultur Weinbau gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die Umweltbelastung zu reduzieren und die Artenvielfalt zu fördern. Ein Ansatzpunkt, welcher im Rahmen dieser Arbeit vertieft werden soll, ist die angepasste Unterstockbodenpflege.

Die Unterstockbodenpflege dient der Regulierung von unerwünschten Beikräutern. Hierfür stehen grundsätzlich mehrere Bewirtschaftungssysteme zur Verfügung: durchgesetzt haben sich hier vor allem die chemische und die mechanische Unterstockbearbeitung. Herbizide werden jedoch aufgrund ihrer potenziellen Umweltauswirkung stark kritisiert (Wang et al. 2022). Die mechanische Bearbeitung hingegen verlangt eine häufigere Anwendung und verursacht neben höheren Kosten und CO_2-Emissionen auch stärkere Bodenverdichtungen (Bauer et al. 2017).

An dieser Stelle zeigt die gezielte Einsaat mit niedrig wachsenden Pflanzen, die sogenannte Unterstockbegrünung, ein hohes Potential. Neben zahlreichen positiven Effekten, wie zum Beispiel der Unterdrückung von unerwünschten Beikräutern, der Erhöhung der biologischen Aktivität oder der verminderten Nährstoffauswaschung, gilt es jedoch, die Wasser- und Nährstoffkonkurrenz mit der Rebe nicht zu vernachlässigen.

Ziel der vorliegenden Ausarbeitung ist es, die Eignung verschiedener Pflanzenarten für die Unterstockbegrünung im Weinbau bei unterschiedlicher Wasserversorgung zu testen. Hierfür wurden Topfversuche mit Gelbklee, Rot-Schwingel und Sand-Thymian unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus durchgeführt und auf Wachstumseigenschaften sowie Wasser- und Nährstoffhaushalt untersucht.

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1 Bodenpflege in der Stockreihe (Unterstockbodenpflege)

Die Bodenpflege gilt als einer der wichtigsten Faktoren im Weinbau und hat zum Ziel, die Bodenfruchtbarkeit zu schützen und zu fördern. Für die Pflanze bedeutet dies eine gute Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit sowie eine gute Durchwurzelbarkeit des Bodens, sodass hierdurch das Pflanzenwachstum gefördert wird (Hoffmann 2014). Die Bodenpflege ist abhängig von Standortbedingungen, Produktionsziel sowie von spezifischen Sortenansprüchen (Bauer et al. 2017). In der Praxis unterscheidet man zwischen der Bodenpflege in der Fahrgasse und derjenigen im Unterstockbereich. Im Folgenden wird die Unterstockbodenpflege näher betrachtet.

2.1.1 Notwendigkeit der Unterstockbodenpflege

Der Boden in der Stockreihe ist in der Regel ausreichend mit Nährstoffen, Wasser und Licht versorgt, sodass gute Bedingungen für die Ausbildung einer Spontanflora herrschen. Auch eine breitwürfige Stickstoffdüngung, wie sie im Weinbau üblich ist, fördert das Wachstum – vor allem das von stickstoffliebenden, eher hochwüchsigen Arten (Fox und Steinbrenner 2023).

Jedoch steht die Spontanflora oft im Unterstockbereich in Wasser- und Nährstoffkonkurrenz mit der Rebe (Hanni 2013). Darüber hinaus mindert eine hochwachsende Spontanflora den Luftfluss. Dies kann sowohl zum Anstauen von Kaltluft und somit zu erhöhtem Risiko von Frostschäden führen (Cooper und Saudners 2022), als auch das Abtrocknen der Beeren erschweren und somit die Entwicklung von feuchteliebenden Pilzerregern begünstigen (Herzog 2020). Ferner kann sie auch als „Sprungbrett“ für Pilzkrankheiten dienen, so dass bspw. die Zoosporen des falschen Mehltaus (*Plasmopara viticola)* durch Spritzwasser auf die Beikräuter und anschließend auf die Laubwand und Traubenzone übertragen werden (Mohr 2012).

Eine Spontanflora im Unterstockbereich birgt somit erhebliche Risiken für Rebvitalität und Traubenqualität, sodass eine Unterstockbodenpflege zwingend notwendig ist.

2.1.2 Herkömmliche Möglichkeiten der Unterstockbodenpflege

Abhängig von verschiedenen Faktoren wie Alter und Wuchskraft der Rebanlage, Ertragsziel oder Hangneigung muss ein geeignetes System für die Unterstockpflege ausgewählt werden. Grundsätzlich stehen hierfür bislang verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, welche nachfolgend beschrieben werden.

Herbizideinsatz

Herbizide sind Mittel, die Beikräuter unspezifisch oder selektiv abtöten können. Von einer ganzflächigen Behandlung ist abzusehen. Stattdessen werden sie in Band- und Punktapplikation ausgebracht. Sie sind so einzusetzen, dass keine grünen Rebteile getroffen werden, die Abdrift minimiert wird und die Behandlungsstreifen möglichst schmal ausfallen (Bauer et al. 2017).

Mechanische Bearbeitung

Mit Geräten wie Rollhacke, Fingerhacke, Scheibenpflug, Flachschar, Krümler Bürstengerät oder Mulcher ist es möglich, den Boden oberflächlich zu lockern oder die Entwicklung eines Bewuchses zu stören (Weinbauberater des Beratungsrings 2024). Bestimmt durch die Weinbergsgegebenheiten ist die Wahl eines geeigneten Geräts zu treffen. Trotz technischer Fortschritte bleibt die mechanische Bodenbearbeitung sehr anspruchsvoll (Morisod 2018). Breiten- und Höheneinstellung sowie die Fahrgeschwindigkeit beeinflussen das Ergebnis maßgeblich. Zudem ist die Gerätekombination begrenzt. Verglichen mit dem Herbizideinsatz ist für die Unterstockbodenpflege mittels mechanischer Geräte im Allgemeinen von mehr Überfahrten auszugehen (Bauer et al. 2017).

Unterstockabdeckung

Gerade in Steillagen, in denen die Unterstockbodenpflege erschwert ist, ist die Abdeckung mit geeigneten Materialien eine gängige Lösung. Hierfür werden unter Anderem Stroh, Rinde, Rinden- und Grünschnittkompost verwendet. Dies verursacht einen Lichtmangel und die Keimung von Pflanzen wird unterdrückt (Hoffmann 2014). Bei der Abdeckung mit Mulch sind jedoch große Mengen notwendig und die Wirkung ist zeitlich begrenzt (Morisod 2018).

Thermische Verfahren

Bei thermischen Verfahren werden oberirdische Pflanzenteile erhitzt und erleiden einen Hitzeschock. Diese Verfahren gelten als technisch nicht voll ausgereift. Sie erfordern einen hohen Energie- und Arbeitszeitaufwand. Des Weiteren werden bei dieser Bearbeitungsmethode nicht nur die Pflanzen, sondern auch die in Pflanzen- und Bodenzone ansässigen Lebewesen abgetötet oder beschädigt (Hoffmann 2014).

2.1.3 Problematik der aktuellen Bewirtschaftungssysteme

Von den beschriebenen Bewirtschaftungssystemen haben sich vor allem die chemische und die mechanische Unterstockpflege durchgesetzt. Neben ihrer Effektivität und Wirtschaftlichkeit müssen jedoch ihre Nachteile beachtet werden.

So sorgt der Herbizideinsatz für das totale oder selektive Abtöten von Pflanzen, die einer Vielzahl von Insekten eine Nahrungsgrundlage bieten. Diese wiederum dienen Vögeln als Nahrung. Die chemische Bodenbearbeitung stört somit die Nahrungskette nachhaltig und trägt damit zum Artensterben bei (Bauer et al. 2017). Darüber hinaus können sich Herbizide negativ auf Bodenbakterien und Mikorrhizen auswirken und hierdurch die Rebernährung Gärung behindern (Morozova et al. 2017; Zaller et al. 2018; Donnini et al. 2016; Chou und Heuvel 2018).

Doch auch die mechanische Bodenbearbeitung birgt Nachteile. Neben den bereits erwähnten technischen Schwierigkeiten, ermöglicht sie im Vergleich zur chemischen Behandlung nur eine geringe Flächenleistung. Ihr Erfolg ist abhängig von Witterung und Bodenfeuchtigkeit (Bauer et al. 2017). Der schwerwiegendste Nachteil ist allerdings die Notwendigkeit mehrerer Arbeitsgänge. Hierdurch werden sowohl höhere Kosten und CO_2-Emissionen als auch stärkere Bodenverdichtung verursacht. Der Boden unter den Reben wird hingegen öfter belüftet, was den Humusabbau fördert und die Erosionsanfälligkeit erhöht (Ben-Salem et al. 2018).

Bei gängigen Zeilenbreiten von 1,80 m bis 2,50 m macht der Unterstockbereich rund ein Drittel der gesamten Weinbergsfläche aus (Hoffmann 2014). Es reicht daher nicht einfach aus, die technisch und wirtschaftlich günstigste Bearbeitungsweise zu finden. Stattdessen gilt es auch hier, wie im Rahmen des Green Deals beschlossen, den Einsatz von Pflanzenschutzmittel zu reduzieren, die Treibhausgasemission zu senken sowie die Biodiversität zu fördern (Europäische Kommission 2019).

2.2 Potential einer Unterstockbegrünung im Weinbau

Angesichts der Nachteile von Herbizideinsatz und mechanischen Bodenbearbeitung im Unterstockbereich erscheint die Einsaat von niedrig wachsenden Pflanzen mit geringem Konkurrenzpotential als eine attraktive Alternative (Jordan et al. 2016; Karl et al. 2016). Die wichtigste Eigenschaft der Unterstockbegrünung ist die Beikrautunterdrückung durch antagonistische Verdrängung. So wird das Wachstum unerwünschter, stark wasser- und nährstoffzehrender Pflanzen reduziert oder ganz unterdrückt (Centinari et al. 2016). Weitere positive Auswirkungen werden im Folgenden genauer betrachtet.

2.2.1 Einfluss auf den Boden

Durch die Einsaat von Begrünungspflanzen in der Stockreihe wird eine Bodenbedeckung gebildet. Hierdurch entstehen Schattengare (Bavougian und

Read 2018), sodass Evaporationsverluste gemindert werden und kühlere Bodentemperaturen im Sommer herrschen (Huth 2022).

Zudem kann eine Unterstockbegrünung den Humusgehalt stabil halten oder sogar steigern (Marks et al. 2022). Der Humus wiederum kann die für die Rebernährung wichtigen Kationen und Anionen austauschbar binden und so die Nährstoffauswaschung reduzieren (Vanden Heuvel und Centinari 2021). Durch verklebte Mineralteilchen wirkt Humus Gefüge schaffend und stabilisiert somit die Bodenstruktur (Abad et al. 2023). Es entstehen holraumreiche Bodenverbände.

Dieser Effekt wird durch die Wurzelbildung der Begrünungspflanzen unterstützt und fördert die Infiltration und Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, sodass der Boden bei Niederschlägen aufgrund von Bodenstruktur und Bodenabdeckung schlussendlich weniger erosionsanfällig ist (Vanden Heuvel und Centinari 2021).

2.2.2 Einfluss auf die biologische Aktivität

Die biologische Aktivität des Bodens bezeichnet die Stoffumsetzung der Bodenorganismen und wird als exhalierte CO_2-Produktion einer Bodenprobe gemessen. Sie wird als Kennzahl für den Organismenbesatz eines Bodens herangezogen. Die biologische Aktivität wird durch die zuvor beschriebene stabile Bodenstruktur und die Nachlieferung organischer Substanz gefördert (Hoffmann 2014). Durch den Verzicht auf Herbizide und mechanische Bodenbearbeitung werden ungestörte Lebensbedingungen geschaffen. Folglich belebt die Einsaat von Begrünungspflanzen in der Stockreihe die biologische Aktivität des Bodens (Abad et al. 2023) und fördert somit die Bodenfruchtbarkeit.

Darüber hinaus dient die Unterstockbegrünung nicht nur den Bodenlebewesen als Nahrung und Lebensraum. Auch für Insekten, Vögel und Feldhasen stellt sie Nahrung und Lebensraum dar.

2.2.3 Einfluss auf die Rebe

Einflüsse auf die Rebe durch eine Unterstockbegrünung konnten bereits in früheren Forschungen nachgewiesen werden. Und obwohl die Konkurrenz zwischen Begrünung und Rebe die Wüchsigkeit der Rebe reduzieren kann (Coniberti et al. 2018), so ist sie nicht durchweg als negativ zu bewerten. Die Konkurrenz kann auch für eine lockere Traubenstruktur und somit weniger Fäulnis sorgen (Coniberti et al. 2018). Darüber hinaus kann sie ein tieferes Wurzelwachstum der Rebe fördern (Fleishman et al. 2023).

2.3 Geeignete Pflanzen für die Unterstockbegrünung

Für die Unterstockbegrünung eignen sich vor allem schnell und breit wachsende Arten, die konkurrenzstark gegenüber der Spontanflora auftreten. Gleichzeitig sollten Wurzel- und Höhenwachstum beschränkt sein, um eine zu starke Konkurrenz mit der Rebe und das Einwachsen der Begrünung in die Traubenzone zu verhindern. In starkwüchsigen Anlagen oder in Anlagen, die eine hohe Traubenqualität erzeugen sollen, kann jedoch auch eine konkurrierende Begrünungseinsaat zielführend sein (Coniberti et al. 2018).

Hinsichtlich Pflege, Wasser- und Lichtbedarf sollten ausgesäte Begrünungspflanzen nicht zu anspruchsvoll sein. Frostharte und mehrjährige Pflanzen können die Kosteneffizienz steigern (Dreisiebner-Lanz 2019; Scheidweiler 2017; Abad et al. 2023). Des Weiteren besteht durch die Einsaat von aromatischen Kräutern, wie zum Beispiel Thymian, die Möglichkeit, durch die Ernte einen Zusatznutzen zu schaffen (Dittrich et al. 2021).

2.4 Pflanzenwachstum

Das Pflanzenwachstum ist bestimmt von abiotischen Faktoren wie Licht, Wärme, essenziellen Gasen, Wasser und Nährstoffen. Je nach Pflanze unterscheiden sich hierbei die optimalen Umweltbedingungen.

Licht ist eine wichtige Energiequelle für Pflanzen und wird hauptsächlich aus der Sonne bezogen. Es stellt eine notwendige Voraussetzung für die Photosynthese einer Pflanze dar. So wird die Lichtenergie in der Lichtreaktion zum sogenannte Adenosintriphosphat umgewandelt, welches in der Dunkelreaktion für die Reduktion von Kohlenstoffdioxid zu Glucose benötigt wird. Die Glucose wiederum dient der Pflanze als Energielieferant und ermöglicht das Pflanzenwachstum (Currle et al. 1983).

Ebenso wie Licht, dient auch die Wärme als Energiequelle. Die Stoffwechselprozesse in der Pflanze sind temperaturabhängig. So können niedrige Temperaturen den Wachstumsprozess abbremsen oder gar stoppen. Zu hohe Temperaturen hingegen können lebenswichtiger Proteine zerstören (Keller 2015).

Außerdem benötigt die Pflanze Kohlenstoffdioxid für die Photosynthese und Sauerstoff für die Zellatmung und somit zur Energiegewinnung. Diese Gase sind essenziell für das Überleben und das Wachstum der Pflanze. Ein Mangel dieser Gase kann zu Wurzelfäulnis, Pilzbefall oder Ausfall von Blättern führen (Currle et al. 1983).

Auch Wasser ist für die Pflanze von höchster Bedeutung und macht rund 70 – 90 % der Pflanzenmasse aus. Neben Licht und Kohlenstoffdioxid stellt es einen weiteren Ausgangsstoff für die Photosynthese dar. Zudem ist es eine wichtige Voraussetzung für die Aufrechterhaltung des Zelldrucks, den sogenannten Tugordruck. Wasser dient als Lösungs- und Transportmittel für Nährstoffe und pflanzeneigene Syntheseprodukte und kann Pflanzengewebe durch Transpiration kühlen. Sowohl Wassermangel als auch -überschuss können Schäden an der Pflanze verursachen. So kann ein Mangel zu Trockenstress führen, wodurch Photosyntheseleistung und Nährstoffaufnahme gehemmt werden oder gar eine unumkehrbare Welke verursacht wird. Eine zu hohe Wasserversorgung, durch zum Beispiel Staunässe, kann ebenfalls zu Welkeerscheinungen führen. Darüber hinaus können Wurzelschäden oder Pilzkrankheiten ausgelöst werden (Currle et al. 1983).

Nährstoffe sind chemische Elemente oder Verbindungen und sind von zentraler Bedeutung als Bestandteil biologischer Moleküle und Molekülkomplexe. Sie werden von der Pflanze aus der Umwelt aufgenommen und haben verschiedene Aufgaben. Unter anderem werden sie für die Photosynthese und das Pflanzenwachstum benötigt. Sie können in Massennährstoffe, Hauptnährstoffe (Makronährstoffe) und Spurenelemente (Mikronährstoffe) unterteilt werden. Hierbei machen die Massennährstoffe den Hauptteil der pflanzlichen Biomasse aus. Makronährstoffe werden in großen, Mikronährstoffe in geringen Mengen, benötigt (Bauer et al. 2017).

Die Nährstoffaufnahme erfolgt sowohl über das Blatt als auch über die Wurzel. Die im Boden vorliegenden Nährstoffe werden im Bodenwasser gelöst und meist im Bereich der Wurzelspitze aufgenommen. Hierfür müssen Nährstoffe nicht nur in ausreichenden Mengen, sondern auch in aufnehmbarer Form und in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander vorliegen. Auch hier sind Über- und Unterversorgung zu vermeiden. Eine Überversorgung bestimmter Nährstoffe kann zu ungünstigen Verhältnissen führen und hierdurch die Aufnahme anderer wichtiger Nährstoffe hemmen. Sie kann Qualitäts- und Ertragseinbußen verursachen. Ebenso kann eine Nährstoffunterversorgung verschiedene Chlorosen verursachen und somit zu Qualitäts- und Ertragseinbußen führen (Keller 2015).

2.5. Nährstoffversorgung der Rebe bei Unterstockbegrünung

Wie oben erläutert ist eine ausgewogene Nährstoffversorgung maßgeblich für die Biologie der Pflanze. In Bezug auf die Weinrebe können Nährstoffe zudem die Erträge und Qualitätskriterien wie Mostgewicht (Sautter 1971; Garoglio 1971), Säuregehalt (Mehofer et al. 2014), Traubengesundheit (Gärtel 1959) und weitere Parameter beeinflussen.

Die Einsaat von Begrünungspflanzen im Unterstockbereich der Rebe kann die Nährstoffverfügbarkeit jedoch maßgeblich beeinflussen. So stellen

Begrünungspflanzen einerseits eine Konkurrenz zur Rebe dar, können andererseits aber auch zu einer verbesserten Bodenzusammensetzung führen.

Dass sich Begrünungspflanzen in ihrer Nährstoffkonkurrenz zur Rebe unterscheiden, stellte Vanden Heuvel in einer Forschungsarbeit von 2019 fest. Hierbei verursachten Begrünungen mit hohem Konkurrenzpotential zur Rebe, wie zum Beispiel Chicorée, verringerte Nährstoffkonzentrationen im Blattstiel der Rebe zur Reifezeit. Andere Begrünungspflanzen hingegen führten zu keinen signifikanten Unterschieden (Vanden Heuvel 2017).

Darüber hinaus wurden in einer Forschungsarbeit von Karl et al. (2016) chemische und mechanische Unterstockbearbeitung sowie eine Variante mit standorteigener Spontanflora und eine Variante mit Kleeeinsaat auf ihren Einfluss hinsichtlich Nährstoffkonzentration und organischer Substanz im Boden untersucht. Hierbei konnten signifikante Unterschiede in Phosphor-, Kalium- und Zink-Konzentration zwischen den Varianten werden. Alle Nährstoffe lagen jedoch innerhalb angemessener Bereiche, mit Ausnahme von Phosphor in der Weißklee-Variante, welcher gemäß den Bodennährstoffempfehlungen für Weinberge (Wolf 2008) als mangelhaft eingestuft wurde. Allerdings wies die Klee-Variante von allen Versuchsvarianten die höchste organische Substanz auf. Darüber hinaus wurde herausgefunden, dass die Böden der begrünten Varianten über einen Zeitraum von fünf Jahren in der Lage waren, bis zu 23 % mehr organischen Kohlenstoff zu binden als die Herbizid-Variante.

Ferner konnten reduzierte Ammonium-, Kalium- und Phosphorgehalte in Böden mit Unterstockbegrünung festgestellt werden. Die Nitratgehalte blieben hingegen nahezu unbeeinflusst, was sich durch eine Regulierung der Nitrat-Verfügbarkeit durch die Bodenfeuchtigkeit erklären lässt (Dittrich et al. 2021).

2.6 Wasserversorgung der Rebe bei Unterstockbegrünung

Im Vergleich zu anderen Pflanzen benötigt die Rebe nur wenig Wasser. Außerdem richtet sich ihr Wasserverbrauch nach dem Angebot, sodass sie bei Trockenheit in der Lage ist, Wasser besser zu nutzen (Geisler 1961).

Je nach Rebsorte ist die Rebe bei einem Bodenwasserpotential von ≤ - 0,25 Mpa in ihrer Wüchsigkeit beeinträchtigt, verfügt jedoch noch über eine gute Photosyntheseleistung. Diesen Zustand bezeichnet man als moderaten Wasserstress. Bei einer Saugspannung ≤ - 1,6 Mpa ist die Rebe jedoch nicht mehr in der Lage, Wasser und die darin gelösten Nährstoffe aus dem Boden zu adsorbieren und sie welkt unumkehrbar, sodass dies als permanenter Welkepunkt bezeichnet wird (Petgen 2015). Ein zu starker bzw. langanhaltender Wassermangel sollte daher unbedingt vermieden werden.

Begrünungspflanzen in der Stockreihe bilden Wurzeln und fördern die Bildung stabiler Aggregate, was wiederum die Infiltrationsrate sowie die Wasserspeicherkapazität des Bodens erhöht (Parker und Jenny 1945). Die Wasserverfügbarkeit für die Rebe kann also durch eine Unterstockbegrünung zunehmen.

In einigen Studien konnten aufgrund der ausreichenden Bodenfeuchtigkeit keine signifikanten Unterschiede im Wasserpotential der Blattstängel zwischen Varianten mit Einsaat oder Kontrollvariante festgestellt werden (Coniberti et al. 2018; Karl et al. 2016). Bei anderen Versuchen mit verschiedene Einsaaten, trafen signifikante Unterschiede nicht für alle Begrünungsvarianten ein (Chou und Heuvel 2018).

Jedoch gibt es in den meisten Regionen der gemäßigten Klimazone Perioden, in denen die Verdunstungsrate das Wasserangebot übersteigt. In solchen Fällen kann eine starke Transpiration durch die Unterstockbegrünung den Wasserstress der Rebe beschleunigen (Blasse 1961), so dass in anderen Studien ein niedrigeres Wasserpotential in Anlagen mit Unterstockbegrünung nachgewiesen werden konnte (Abad et al. 2020; Vukicevich et al. 2019).

Abgesehen von gegebenen Standortbedingungen wie Niederschlagsmengen sollte bei der Einsaat einer Unterstockbegrünung also auch unbedingt auf den Wasserbedarf der Begrünungspflanze geachtet werden. In früheren Untersuchungen wurde bereits die Transpirationsrate verschiedener Pflanzen der Gassenbegrünung untersucht. Hierbei wies der Rotschwingel die niedrigste

Transpirationsrate auf (Lopes et al. 2015). Auch in Forschungsarbeiten von Cussans et al. (1995) wies er den geringsten Wasserbedarf auf, was ihn zu einer guten Wahl für trockene Standorte macht. Dennoch bedarf es weitere Forschung, um den Wasserbedarf von verschiedenen Begrünungspflanzen für die Unterstockbegrünung auch bei unterschiedlicher Wasserversorgung zu quantifizieren.

Die Unterstockbegrünung stellt also eine umweltfreundliche Alternative zur chemischen und mechanischen Unterstockbegrünung dar. Sie bietet mögliche Vorteile für Rebe, Boden und biologische Aktivität.

Für die Qualitätssicherung der Trauben ist es jedoch von hoher Bedeutung, mögliche Begrünungspflanzen vorab auf ihre Eignung zu untersuchen. So sollten Begrünungspflanzen eine schnelle Bodendeckung schaffen und in ihrer Wuchshöhe begrenzt sein. Hinsichtlich des Nährstoffhaushaltes sollten sie keine zu starke Konkurrenz zur Rebe darstellen. Darüber hinaus sollten die Begrünungspflanzen nicht zu stark mit der Rebe um Wasser konkurrieren stattdessen in Anbetracht des Klimawandels und der zunehmenden Trockenheit sogar bei niedriger Wasserversorgung überlebensfähig sein, sodass im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung folgende Forschungsfrage untersucht wird:

„Welche Begrünungspflanzen eignen sich hinsichtlich Wachstumseigenschaften, Wasser- und Nährstoffhaushalt bei verschiedener Wasserversorgung für die Unterstockbegrünung im Weinbau?“

3 MATERIAL UND METHODEN

Um die Wachstumseigenschaften, den Wasser- und den Nährstoffhaushalt verschiedener Begrünungspflanzen für die Unterstockbegrünung im Weinbau bei unterschiedlicher Wasserversorgung zu untersuchen, wurden in der Versuchsdurchführung acht Varianten, die sich in Pflanzenart und Wasserversorgung unterscheiden, miteinander verglichen:

3.1 Versuchsvarianten

Für die Versuchsreihe wurden Rot-Schwingel, Gelbklee und Sand-Thymian ausgewählt, die bereits in früheren Untersuchungen genutzt wurden und die gleichzeitig drei unterschiedlichen Pflanzenfamilien *(Poaceae/Fabaceae/Lamiaceae)* zugehören. Zudem gab es eine Kontrollvariante ohne Einsaat.

Die Wasserversorgung erfolgte ein- bis dreimal pro Woche durch händisches Gießen mit demineralisiertem Wasser. Die Wassermengen in mL wurden jeweils mittels Becherglas und Feinwaage gemessen und anschließend auf den zugehörigen Varianten verteilt.

Von Einsaat bis zum Zeitpunkt, an dem 80 % Bodendeckung erreicht wurde, wurden alle Varianten gleich gegossen (Messung: siehe Kapitel 3.6.1 Deckungsgrad). Während dieser Zeit wurde an der Bodenoberfläche der Kontrollvariante eine Bodenfeuchtigkeit zwischen 40 % und 45 % angestrebt (Messung: siehe Kapitel 3.6.5 Bodenfeuchtigkeit).

Die Variation in der Wasserversorgung erfolgte ab 80 % Bodendeckung an Tag 34. Während pro Pflanzenvariante jeweils die Hälfte der Töpfe weiterhin mit ausreichend Wasser versorgt wurde, wurde die andere Hälfte so gegossen, dass ein moderater Trockenstress provoziert wurde, ohne dass die Pflanzen absterben sollten. Hierbei erhielten alle hoch versorgten Varianten die gleiche Wassermenge. Ebenso erhielten alle niedrig versorgten Varianten die gleiche Wassermenge. Die verwendeten Wassermengen orientierten sich hierbei weiterhin an der Bodenfeuchtigkeit an der Bodenoberfläche der

Kontrollvarianten. Für die hoch versorgten Varianten wurde nach wie vor eine Bodenfeuchtigkeit zwischen 40 % und 45 % an der Oberfläche angestrebt, für die niedrig versorgten Varianten eine Bodenfeuchtigkeit zwischen 30 % und 35 %. Jede Variante erfolgte in vierfacher Wiederholung, sodass sich hieraus eine Gesamtzahl von 32 Untersuchungseinheiten ergab (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht der Varianten und Wiederholungen

Pflanze	**Wasserversorgung**	**Bezeichnung**	**Wiederholungen**
Kontrolle (K)	Hoch	K_{hoch}	n = 4
	Niedrig	$K_{niedrig}$	n = 4
Gelbklee (G)	Hoch	G_{hoch}	n = 4
	Niedrig	$G_{niedrig}$	n = 4
Rot-Schwingel (R)	Hoch	R_{hoch}	n = 4
	Niedrig	$R_{niedrig}$	n = 4
Sand-Thymian (S)	Hoch	S_{hoch}	n = 4
	Niedrig	$S_{niedrig}$	n = 4

3.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde zwischen Mai 2023 und September 2023 im Gewächshaus des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz in Neustadt an der Weinstraße durchgeführt. Von Einsaat bis zum Abernten der Pflanzen vergingen 148 Tage. Tabelle 2 zeigt den zeitlichen Ablauf des Versuchs.

Tabelle 2: Zeitlicher Ablauf des Versuchs

Datum	**Beschreibung der Versuchsdurchführung**
Vor dem 03.05.2023	• Boden sieben
03.05.2023 (Tag 0)	• Befüllen der Töpfe mit Substrat • Einsaat und angießen
04.05.2023 – 27.09.2023 (Tag 1) (Tag 147)	• Gießen der Varianten → unterschiedliche Wasserversorgung ab Tag 34 • Bestimmung des Deckungsgrades • Bestimmung der maximalen Wuchshöhe • Bestimmung der Bodenfeuchte und Lufttemperatur • Wiegen des Sickerwassers
28.09.2023 (Tag 148)	• Abernten der Pflanzen
Nach dem 28.09.2023	• Bestimmung von Spross-Frischmasse, Spross-Trockenmasse sowie Wurzel-Frischmasse • Pflanzen- und Wurzelanalysen • Bodenanalysen

3.3 Einsaat

Mit der Einsaat wurde das Ziel verfolgt, einen möglichst dichten Bewuchs zu generieren. Die tatsächliche Saatstärke war daher um ein Vierfaches höher als die Saatstärke nach Herstellerempfehlung. Bei einem Innendurchmesser der Pflanztöpfe von 21 cm und somit einer Oberfläche von 0,0346 m² ergaben sich hierdurch die in Tabelle 3 aufgeführten Saatstärken.

Tabelle 3: Saatstärke nach Herstellerangaben in g/m² und tatsächlich gewählte Saatstärke in g/Topf bei einer Oberfläche von 0,0346 m² für die Pflanzenvarianten Gelbklee, Rot-Schwingel und Sand-Thymian

Saatgut	**Saatstärke nach Herstellerempfehlung (g/m²)**	**Tatsächlich Saatstärke (g/Topf)**
Gelbklee (Sativa Biosaatgut GmbH, Jestetten, Deutschland)	2,0	0,28 (entspricht: 8,0 g/m²)
Rot-Schwingel (Appels Wilde Samen GmbH, Darmstadt, Deutschland)	4,0	0,56 (entspricht 16,0 g/m²)
Sand-Thymian (Saatgut-Vielfalt, Walter Wolf in St. Blasien, Deutschland)	0,5	0,07 (entspricht 2,0 g/m²)

3.4 Verwendetes Substrat

Das für die Versuchsdurchführung verwendete Substrat stammt aus der Lage Maulberg in Neustadt-Mußbach und ist laut Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) nach Methode I, D2.1:1996 ein lehmiger Sandboden.

Vor Verwendung des Substrats wurde dieses getrocknet und mittels Bodensieb mit einer Maschenweite von 3 mm (Sterico GmbH, Düsseldorf, Deutschland) gesiebt, sodass Steine und Fremdmaterial entfernt wurden und ein möglichst gleichmäßiges Gefüge entstand (siehe Anhang I).

Anschließend wurden die Kick-Brauckmann Pflanztöpfe (STOMA GmbH, Siegburg, Deutschland) mit je 6,3 kg Substrat befüllt. Diese Töpfe zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus Einsatztopf und Übertopf bestehen. Der Übertopf ist mit einem Auslaufstutzen versehen, was es ermöglicht, Sickerwasser über einen Schlauch in eine Auffangflasche zu leiten.

3.5 Klimabedingungen

Um möglichst einheitliche klimatische Bedingungen für alle Varianten zu schaffen, wurden die Versuche im Gewächshaus des DLR durchgeführt. Hierbei wurde ein Tag-Nacht-Zyklus von jeweils 12 Stunden simuliert. Die verwendete Lichtstärke betrug 480 µmol/(s·m²). Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit lag bei 54 %. Gleichzeitig wurde eine Temperaturschwankung von 15 °C in der Nacht und 26 °C am Tag angestrebt. Die 32 Pflanztöpfe wurden randomisiert auf Tischen verteilt und mit TMS Bodenloggern (TOMST® s.r.o, Prag, Tschechische Republik) versehen (siehe Anhang II).

Diese dokumentierten alle 15 Minuten die Lufttemperatur auf 12 cm über dem Boden. Hierbei ist zu beachten, dass einer der Bodenlogger nicht eingeschaltet war und ein weiterer nur bis zur Hälfte eingesteckt war, sodass lediglich 30 Bodenlogger Daten erfasst haben. Mittels „Lolly Software“ des gleichen Herstellers wurden diese Daten ausgelesen. Die Auswertung der Bodenlogger ergab eine durchschnittliche Lufttemperatur von 21,70 °C auf 12 cm über der Bodenoberfläche.

Niederschlag wurde durch die händische Wasserversorgung simuliert. Ziel war es, eine Bodenfeuchtigkeit von 40 % bis 45 % bzw. 30 % bis 35 % zu erreichen. Die hierfür tatsächlich verwendeten Gießmengen wurden dokumentiert. Abbildung 1 zeigt die Tagesmitteltemperatur sowie die Wasserversorgung im Durchführungszeitraum.

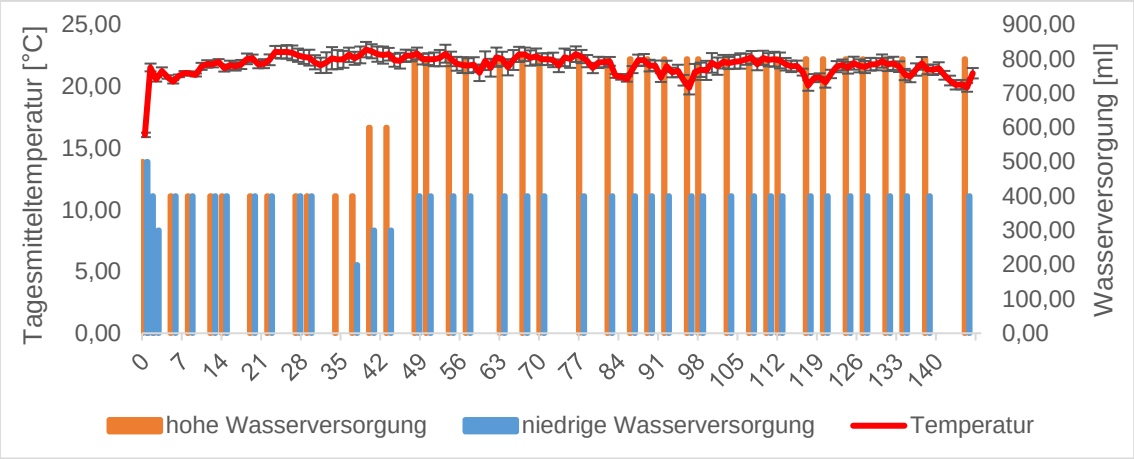


Abbildung 1: Darstellung der Wasserversorgung in Milliliter der hoch und niedrig versorgten Versuchsvarianten (n = 16) und der Tagesmitteltemperatur in °C (n = 30) im Zeitraum von Tag 0 bis Tag 147; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

3.6 Analysen

Um Unterschiede hinsichtlich Wachstumseigenschaften sowie Wasser- und Nährstoffhaushalt der verschiedenen Begrünungspflanzen zu dokumentieren, wurden die folgenden Analysemethoden verwendet. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Beikräuter wurden hierbei ausgeschlossen, indem diese regelmäßig entfernt wurden.

3.6.1 Deckungsgrad

Die Bestimmung des Deckungsgrades erfolgte von Einsaat an Tag 0 bis Abernten an Tag 148 in Anlehnung an die Vegetationsaufnahme nach Braun-Blanquet (1964). Hierfür wurden Fotos von jeder Wiederholung aufgenommen (siehe Anhang III). Anschließend wurde der Deckungsgrad der grünen Teile, also der intakten Pflanzen, je Pflanztopf nach den in der folgenden Tabelle 4 aufgeführten Stufen abgeschätzt. Eine Beurteilung von Boden- und Streuanteil erfolgte hierbei nicht.

Tabelle 4: Boniturstufen des Deckungsgrads in Anlehnung an die Vegetationsaufnahme nach Braun-Blanquet (1964) mit entsprechendem Klassenmittel

Schätzung nach Braun-Blanquet	Ein Individuum 0,5 %	1 – 5 %	6 – 25 %	26 - 50 %	51 – 75 %	76 – 100 %
Klassenmittel	0,5 %	3 %	15 %	37,5 %	62,5 %	87,5 %

Für die Aufwuchs-Bonitur wurden die Klassenmittel eines jeden Pflanztopfes erfasst. Mit Erreichen der Deckungsgrad-Stufe 76 – 100 % ergab sich ein Klassenmittel von 87,5 %. Ein eventueller Rückgang des Klassenmittels ist damit begründet, dass sich grüne Pflanzenteile gelb verfärbt haben.

Um eine einheitliche Schätzung des Deckungsgrades zu erzielen wurden Referenzbilder für alle Boniturstufen gewählt. Abbildung 2 zeigt diese am Beispiel der Deckungsgrade 1 – 5 %, 51 - 75 % und 76 – 100 %.

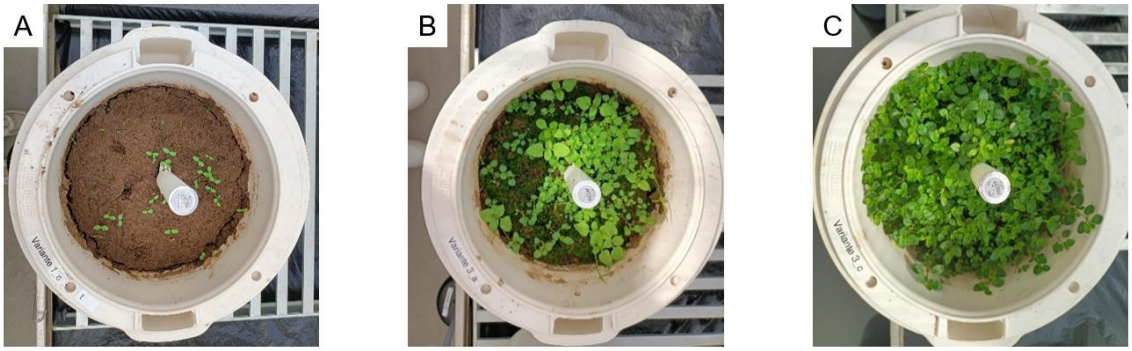


Abbildung 2: Referenzbilder verschiedener Varianten zu unterschiedlichen Zeitpunkten für die einheitliche Bestimmung des Deckungsgrads: (A) Deckungsgrad 1 – 5 % an Tag 7 in der $G_{niedrig}$-Variante (B) Deckungsgrad 51 – 75 % an Tag 22 in der S_{hoch}-Variante (C) Deckungsgrad 76 – 100 % an Tag 37 in der S_{hoch}-Variante

3.6.2 Maximale Wuchshöhe

Die maximale Wuchshöhe wurde von Austrieb der ersten Variante bis zum Abernten der Pflanzen mit Hilfe eines Zollstocks bestimmt (siehe Anhang IV). Hierbei wurde stets der höchste Punkt der am höchsten gewachsenen Pflanze einer jeden Wiederholung gemessen.

3.6.3 Biomasse

Am 28. September erfolgte das Abernten der Versuchsvarianten mit einer Grasschere (siehe Anhang V). Mit Hilfe einer Feinwaage wurde die Frischmasse von oberirdischer Pflanzenmasse, kurz Spross, und Wurzel ermittelt. Die Spross-Frischmasse wurde anschließend für 24 Stunden bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet und erneut mittels Feinwaage gewogen. Hierdurch wurde die Spross-Trockenmasse bestimmt.

3.6.4 Wassergehalt im Spross

Aus der Differenz von Spross-Frisch- und Spross-Trockenmasse ließ sich der Wassergehalt im Spross bestimmen. Die Formel hierfür lautet:

$$Wassergehalt = \frac{(Frischmasse - Trockenmasse)}{Frischmasse * 100}$$

3.6.5 Bodenfeuchtigkeit

Die Bestimmung der volumetrischen Bodenfeuchte (m^3 Wasser/m^3 Boden = Vol. %) erfolgte auf zwei verschiedene Weisen und diente unterschiedlichen Zwecken.

Zum einen wurde die volumetrische Bodenfeuchte an der Oberfläche der Kontrollvariante vor und nach dem Gießen mittels SM 150 Soil Moisture Sensor (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Vereinigtes Königreich) bestimmt. Die Messung beruht auf dem Frequency-Domain-Reflector-Prinzip, wobei ein elektromagnetisches Feld (100 MHz) im Senderstab der Sonde erzeugt und die Durchlässigkeit des Feldes im Boden über den Empfängerstab gemessen wird. Die Durchlässigkeit ist dabei abhängig vom Wassergehalt des Bodens, der Bodenart und der eingeschlossenen Luft (Delta-T Devices Ltd 2016). Diese Messung diente als Indikator für Zeitpunkt und Menge der Wasserversorgung.

Zum anderen wurde alle 15 Minuten der volumetrische Wassergehalt des Bodens in 6 cm Tiefe mit Hilfe der TMS Bodenlogger bestimmt. Hierbei wurde die Time-Domain-Transmission(TDT)-Methode (Robinson et al. 2008)

verwendet, bei der elektromagnetische Impulse von ca. 2,5 GHz durch eine 30 cm lange Leitung gesendet werden und eine Zählvorrichtung erreichen, wodurch ein weiterer Impuls gesendet wird. Die Impulse werden als Rohwert des Feuchtigkeitssignals (50 – 200 MHz) gezählt und stehen im direkten Zusammenhang mit der Bodenfeuchtigkeit. Eine höhere Bodenfeuchtigkeit senkt die Anzahl der gesendeten Impulse. Anschließend werden die Messungen auf den numerischen Bereich von 1 – 4095 TDT-Rohwerte umgewandelt. Hierbei entspricht ein Wert von 100 der Messung von Umgebungsluft und ein Wert von 3500 der Messung von destilliertem Wasser. Mit Hilfe einer bodenspezifischen Kalibrationskurve können diese Werte in volumetrische Bodenfeuchtigkeit umgewandelt werden (Wild et al. 2019). Abbildung 3 zeigt die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Kalibrationskurve für lehmigen Sand. Die Funktion der Kalibrationskurve lautet wie folgt:

$$y = ax^2 + bx + c$$

Hierbei gilt:

x = TDT-Rohwerte
y = vol. Bodenfeuchtigkeit
a = -0,000000038
b = 0,000292933
c = -0,06208

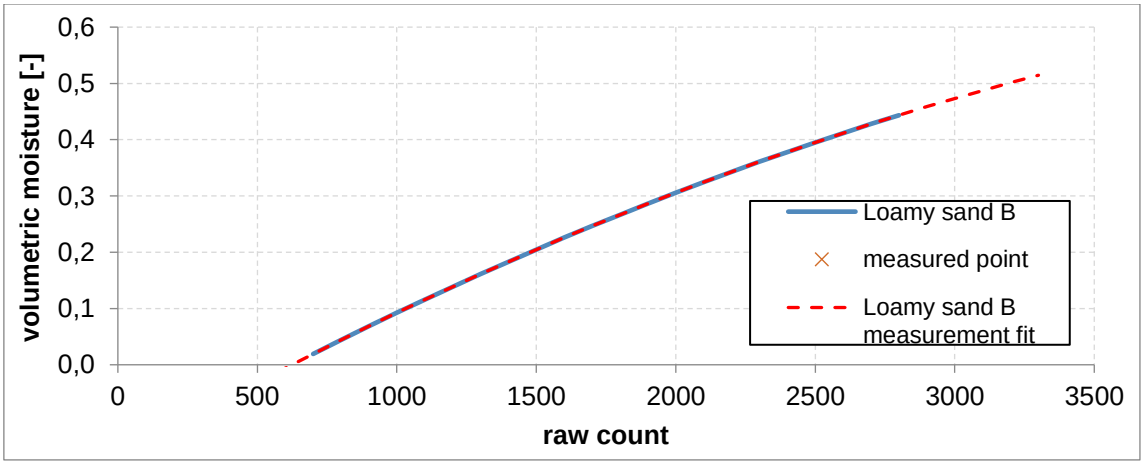


Abbildung 3: Die von TOMST® zur Verfügung gestellte Kalibrationsfunktion für die Bestimmung der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit bei lehmigem Sand (Quelle: Wild, 2019)

3.6.6 Sickerwasser

Für die Ermittlung des Sickerwassers wurden die Auffangflaschen der 32 Untersuchungseinheiten geleert und der Inhalt gewogen. Dies geschah an den folgenden sechs Terminen:

- Tag 34 (06.06.2023)
- Tag 57 (29.06.2023)
- Tag 72 (14.07.2023)
- Tag 82 (24.07.2023)
- Tag 124 (04.09.2023)
- Tag 148 (28.09.2023)

3.6.7 Nährstoffe in Spross und Wurzel

Die Ermittlung der Nährstoffe in Spross und Wurzel erfolgte lediglich in den hoch versorgten Varianten. Hierfür wurden die Spross- und Wurzelmasse der LUFA Speyer zugesendet und auf die Nährstoffgehalte von Stickstoff, Phosphor, Calcium, Kalium, Magnesium, Schwefel, Kupfer, Mangan, Zink, Bor und Eisen untersucht. Die Einheiten beziehen sich hierbei auf Frisch-Substanz (FS) oder Trocken-Substanz (TS). Die verwendeten Methoden variierten je nach Nährstoff und sind Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Von der LUFA Speyer verwendete Methoden für die Analyse der Nährstoffe Gesamt-Stickstoff, Bor, Calcium, Kalium, Magnesium, Phosphor, Schwefel, Eisen, Kupfer, Mangan und Zink in Spross und Wurzel der hoch versorgten Varianten

Methode	**Nährstoff**
VDLUFA MB III, 4.1.2:2004	Gesamt-Stickstoff [% FS]
DIN EN ISO 11885:2009-09	Bor [mg/kg TS]
	Calcium [% TS]
	Kalium [% TS]
	Magnesium [% TS]
	Phosphor [% TS]
	Schwefel [% TS]
VDLUFA MB VII, 2.2.2.6:2011	Eisen [mg/kg TS]
	Kupfer [mg/kg TS]
	Mangan [mg/kg TS]
	Zink [mg/kg TS]

3.6.8 Bodenanalysen

Darüber hinaus wurden der LUFA Speyer Proben für Bodenanalysen zugesendet. Eine Analyse der Nitrat- und Ammoniumgehalte sowohl für die hoch als auch für die niedrig versorgten Varianten. Zudem wurden die hoch versorgten Varianten auf pH-Wert, C/N-Verhältnis, organischer Kohlenstoff, Humusgehalt sowie die Bodennährstoffe Phosphat, Kalium, gesamt Stickstoff, Bor, Mangan, Kupfer und Zink, Nitrat und Ammonium untersucht. Die hierfür verwendeten Methoden sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Von der LUFA Speyer verwendete Methoden für die Analyse von pH-Wert, C/N-Verhältnis, organischen Kohlenstoff- und Humusgehalt sowie den Nährstoffen Kali, Phosphat, Gesamt-Stickstoff, Bor, Kupfer, Mangan, Zink, Nitrat und Ammonium in den Bodenproben der hoch versorgten Varianten

Methode	**Parameter**
VDLUFA MB I, A5.1.1:2016	pH-Wert
Formel (C/N)	C/N-Verhältnis
DIN ISO 10694:1996-08*	Organischer Kohlenstoff [% TS]
Formel (Corg*1,72)	Humusgehalt [% TS]
VDLUFA MB I, A6.2.1.1:2012	Kali [mg/100 g TS]
	Phosphat [mg/100 g TS]
VDLUFA MB I, A2.2.5:2012*	Gesamt-Stickstoff [mg/100 g TS]
VDLUFA MB I, A6.4.1:2002*	Bor [mg/kg TS]
	Kupfer [mg/kg TS]
	Mangan [mg/kg TS]
	Zink [mg/kg TS]
VDLUFA MB I, A6.1.4.1:2002	Nitrat [mg/100 g FS]
VDLUFA MB I, A2.1.1:1991	Ammonium [mg/ 100 g FS]

3.7 Statistische Auswertung

Die Versuchsvarianten lagen in jeweils vierfacher Wiederholung vor und wurden in den meisten Fällen einzeln beprobt. Die Daten wurden anschließend via Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, USA) und dessen Add-on XLStat (Lumivero, Denver, USA) statistisch ausgewertet. Hierfür wurden das arithmetische Mittel und die einfache Standardabweichung einer jeden Variante bestimmt. Um die Normalverteilung der Messwerte für die weitere Auswertung zu gewährleisten, wurden die Daten bei Bedarf entweder logarithmisch transformiert oder mittels Johnson-Prozedur behandelt. Die Normalverteilung wurde per Jarque-Bera-Test festgestellt. Zur Prüfung auf signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) sowie eine *Post-hoc*-Analyse durchgeführt. Nicht signifikante Ergebnisse sind jeweils mit dem gleichen Buchstaben gekennzeichnet, signifikante Unterschiede sind mit jeweils unterschiedlichen Buchstaben versehen.

4 ERGEBNISSE

4.1 Deckungsgrad

Der Deckungsgrad der grünen Pflanzenteile wurde von Einsaat bis Abernten in allen Varianten dokumentiert und ist in Abbildung 4 dargestellt.

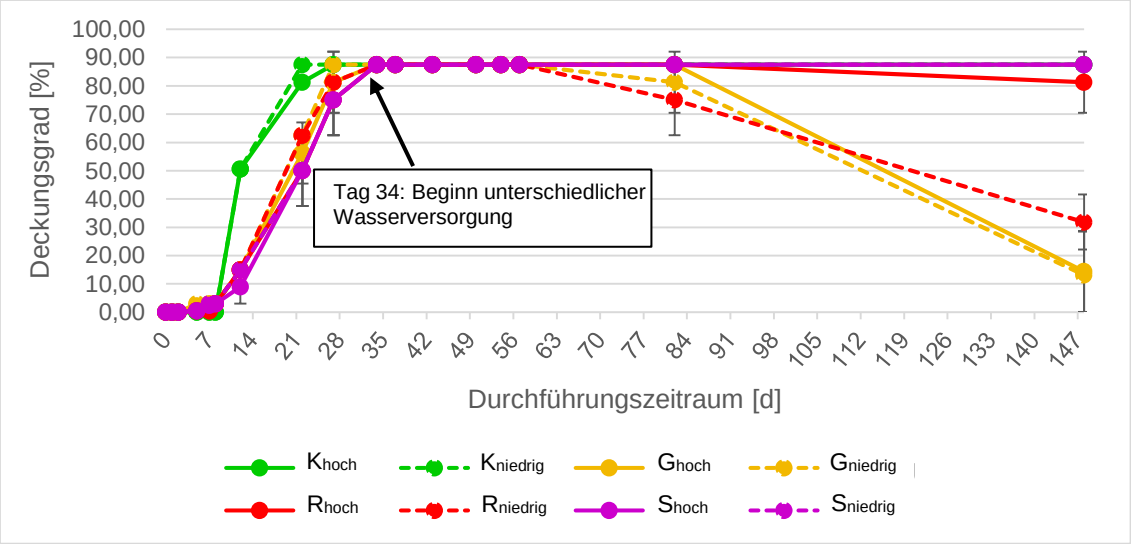


Abbildung 4: Bestimmung des Deckungsgrades in % der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch} und $S_{niedrig}$ im Zeitraum von Einsaat an Tag 0 bis zum Abernten der Pflanzen an Tag 148; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Die Entwicklung des Deckungsgrads erfolgte in den verschiedenen Varianten sehr ähnlich. Zwischen der Einsaat an Tag 0 und dem Aufwuchs der ersten Sprösslinge vergingen fünf Tage. Anschließend, zwischen Tag 7 und Tag 27, nahm der Deckungsgrad in allen Versuchsvarianten konstant zu – auch in den K-Varianten ohne Einsaat. Hier kam es nämlich zu verstärktem Moos-Wachstum, sodass dieses als grüne Pflanzenteile gezählt wurde und in die Bonitur einging.

Der Deckungsgrade der K- und der G-Varianten entwickelte sich etwas schneller als der von R- und S-Varianten. Die G-Varianten erreichten bereits an Tag 27 einen Deckungsgrad über 80 %. An Tag 34 haben alle Varianten das Klassenmittel 87,5 % erreicht, sodass anschließend die Unterscheidung in der Wasserversorgung erfolgte.

Ab Tag 57 sind Rückgänge im Deckungsgrad der grünen Pflanzenteile in G- und R-Varianten zu verzeichnen, sodass der Deckungsgrad der G-Varianten an Tag 148 bei lediglich 13 % lag.

4.2 Maximale Wuchshöhe

Die maximale Wuchshöhe der verschiedenen Varianten wurde von Einsaat bis Abernten erfasst. Zwischen Tag 57 und Tag 86 erfolgte keine Messung. Nach Tag 34 kam es aufgrund der reduzierten Wasserversorgung erstmals zu Trockenstress. Die verursachte Welke war vor allem in der $G_{niedrig}$- und $R_{niedrig}$-Variante sehr stark (siehe Anhang VI), sodass die Wasserversorgung der niedrig versorgten Varianten für den späteren Zeitraum angepasst wurde. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse.

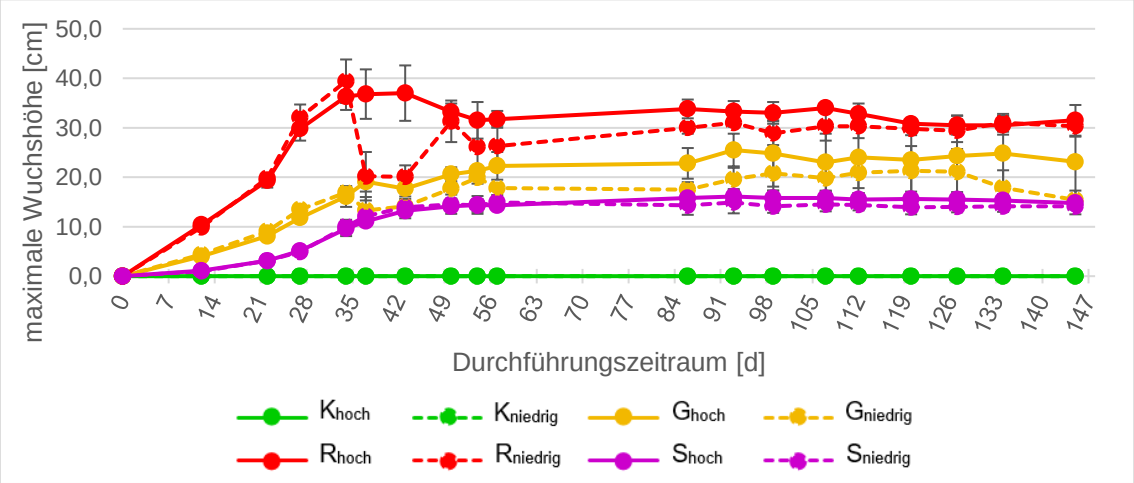


Abbildung 5: Bestimmung der maximale Wuchshöhe in Zentimeter der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig}$ im Zeitraum von Einsaat an Tag 0 bis zum Abernten der Pflanzen an Tag 148; n = 4 ; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Im Zeitraum der gleichen Wasserversorgung, von Einsaat bis zum Erreichen von 80 % Bodendeckung an Tag 34, wiesen die Varianten der gleichen Pflanzenart nur geringe Unterschiede in ihrer maximalen Wuchshöhe auf.

Anschließend, mit herabsetzen der Wasserversorgung, zeigt sich, dass die maximalen Wuchshören der niedrig versorgten Varianten jeweils etwas geringer ausfielen als die der hoch versorgten Varianten.

Von den verschiedenen Pflanzenarten hatte der Rot-Schwingel das schnellste Wachstum. Bereits früh, zwischen Tag 34 und Tag 43, erreichten die R-Varianten ihre maximale Wuchshöhe. Mit fortschreitendem Wachstum verlor der Rot-Schwingel an Aufrichtung. Die Halme hingen herab, sodass die maximale Wuchshöhe leicht zurückging. Im Allgemeinen lässt sich jedoch sagen, dass er von allen Varianten, die größte Wuchshöhe erreichte. Die $R_{niedrig}$-Variante erreichte ein Maximum von 39,4 cm bereits vor dem Herabsetzen der Wasserversorgung.

Die G-Varianten zeigten ein langsameres Wachstum. Erst zwischen Tag 90 und Tag 120 erreichten diese ihre höchste vertikale Ausdehnung. Die Höhe der G_{hoch}-Variante stagnierte ab Tag 93 zwischen 23,0 cm und 25,5 cm. Die maximale Wuchshöhe der $G_{niedrig}$-Variante hingegen variierte ab Tag 93 zwischen 14,1 cm und 21,1 cm.

Die S-Varianten wuchsen am langsamsten. Hierbei erreichte die $S_{niedrig}$-Variante ihre höchste maximale Wuchshöhe von 14,9 cm an Tag 57, die S_{hoch}-Variante mit 16,1 cm an Tag 93. Hiernach stagnierte das Wachstum.

4.3 Biomasse

Mit Abernten der Pflanzen an Tag 148 erfolgte die Bestimmung der Spross- und der Wurzel-Frischmasse. Ferner wurde für den Spross auch die Trockenmasse bestimmt. Die verschiedenen Biomassen werden im Folgenden genauer beschrieben.

Spross-Frischmasse und Spross-Trockenmasse

Mit dem Abernten wurde die Spross-Frischmasse ermittelt, nach dem Trocknen für 24 Stunden im Trockenschrank bei 105 °C erfolgte die Bestimmung der Trockenmasse. Für die Bonitur der Spross-Frisch- und Spross-Trockenmasse in den K-Varianten wurde der Moosbewuchs gewogen.

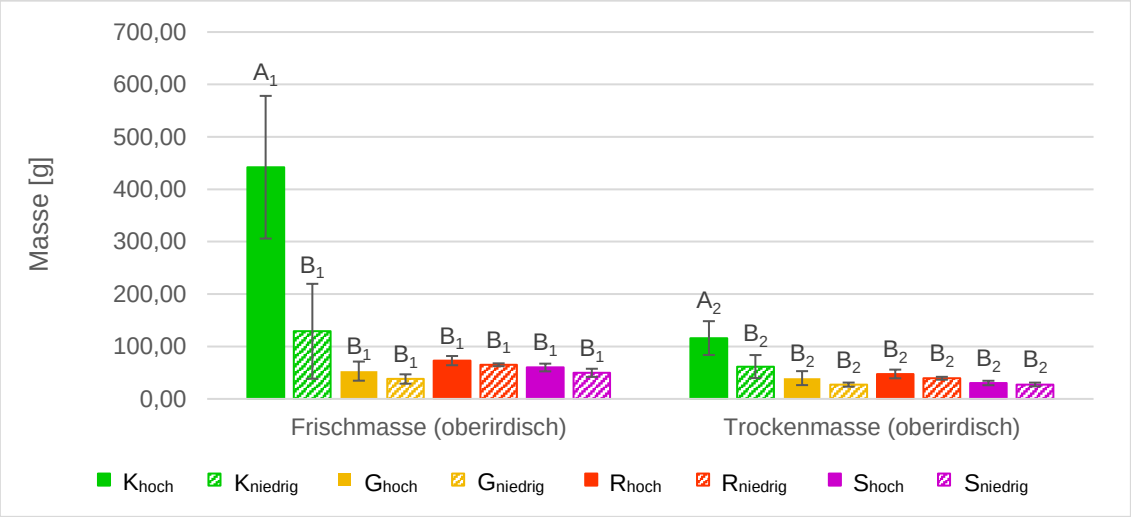


Abbildung 6: Bestimmung der Spross-Frisch- und Spross-Trockenmasse in Gramm der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig;}$ Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit $\alpha = 0,05$; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörgkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, ergaben die K-Varianten sowohl frisch als auch getrocknet die höchsten Massen.

In der Spross-Frischmasse unterscheidet sich die K_{hoch}-Variante mit 442,08 g signifikant von den restlichen sieben Versuchsvarianten. Die eingesäten Varianten erzielten Massen zwischen 73,05 g (R_{hoch}-Variante) und 38,00 g ($G_{niedrig}$-Variante). Hierbei ist der Trend zu erkennen, dass die Massen der niedrig versorgten Varianten stets etwas geringer ausfielen als die der hoch versorgten Varianten der gleichen Pflanzenart. Signifikante Unterschiede sind jedoch nicht festzustellen.

In der Spross-Trockenmasse waren die Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten geringer. Dennoch unterschied sich auch hier die K_{hoch}-Variante mit 116,07 g signifikant von allen anderen.

Wurzel-Frischmasse

In der folgenden Abbildung 7 ist die Wurzel-Frischmasse der acht Versuchsvarianten dargestellt.

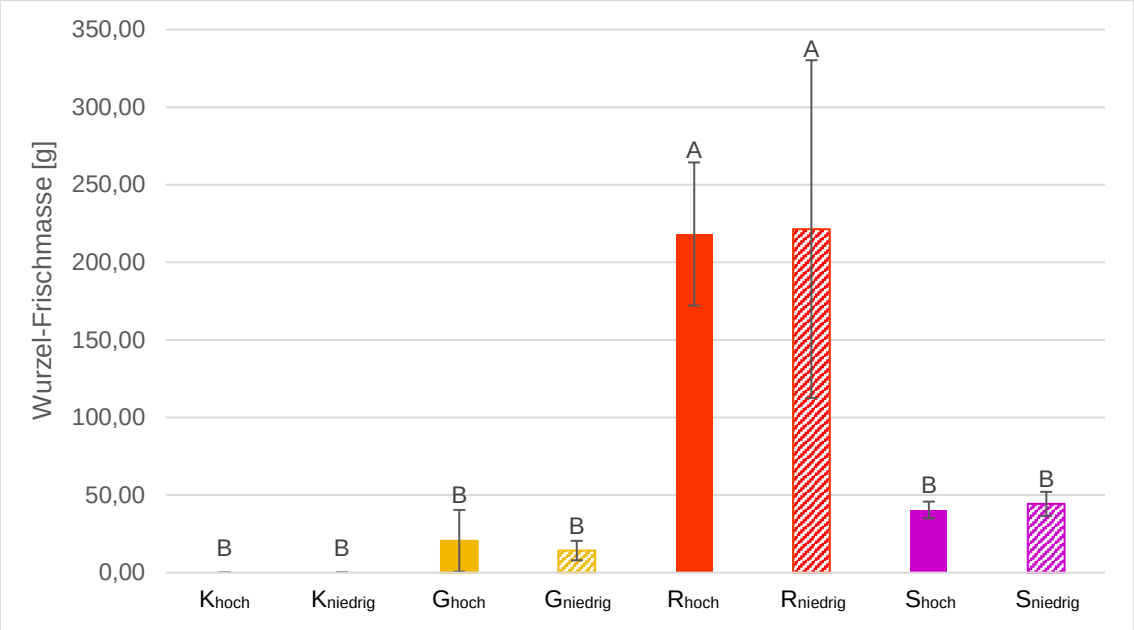


Abbildung 7: Bestimmung der Wurzel-Frischmasse in Gramm der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig}$; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Die Wurzel-Frischmassen der verschiedenen Varianten wiesen starke Unterschiede auf und lagen zwischen 0 g in den beiden K-Varianten und 221,35 g in der $R_{niedrig}$-Variante. Zu erkennen ist, dass Rot-Schwingel deutlich mehr Wurzelmasse ausgebildet hat und sich damit signifikant von den anderen Varianten unterscheidet. Zwischen den restlichen Pflanzenarten, geschweige denn zwischen den hoch und den niedrig versorgten Varianten der gleichen Pflanzenart, konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

4.4 Wassergehalt im Spross

In Abbildung 8 wird der Wassergehalt im Spross der acht Versuchsvarianten dargestellt.

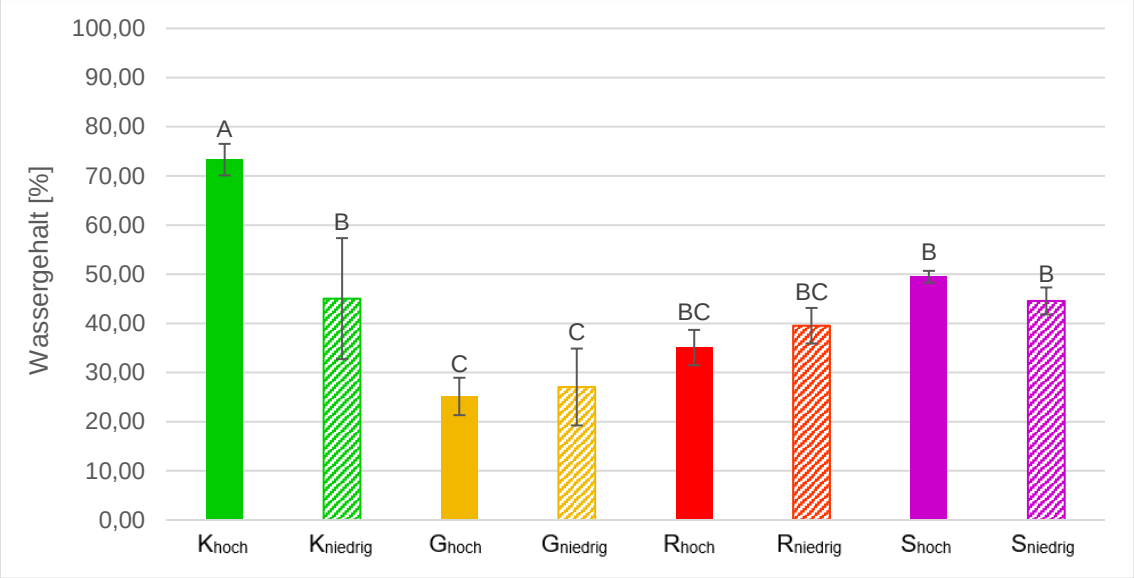


Abbildung 8: Bestimmung des Wassergehalts im Spross in % der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch}, $S_{niedrig}$; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Der Wassergehalt im Spross in den acht Versuchsvarianten lag zwischen 25,13 % in der G_{hoch}-Variante und 73,30 % in der K_{hoch}-Variante. Hierbei unterscheidet sich die K_{hoch}-Variante signifikant von allen anderen. Darüber hinaus unterschieden sich auch $K_{niedrig}$- und die beiden S-Varianten signifikant von den G-Varianten. Innerhalb der gleichen Pflanzenart konnten, abgesehen von der K-Variante, keine signifikanten Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Wasserversorgung nachgewiesen werden.

4.5 Bodenfeuchtigkeit

Die Messung der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit in 6 cm Bodentiefe erfolgte alle 15 Minuten mittels TMS Bodenlogger. In Abbildung 9 wird diese für die acht Versuchsvarianten über den gesamten Versuchszeitraum dargestellt.

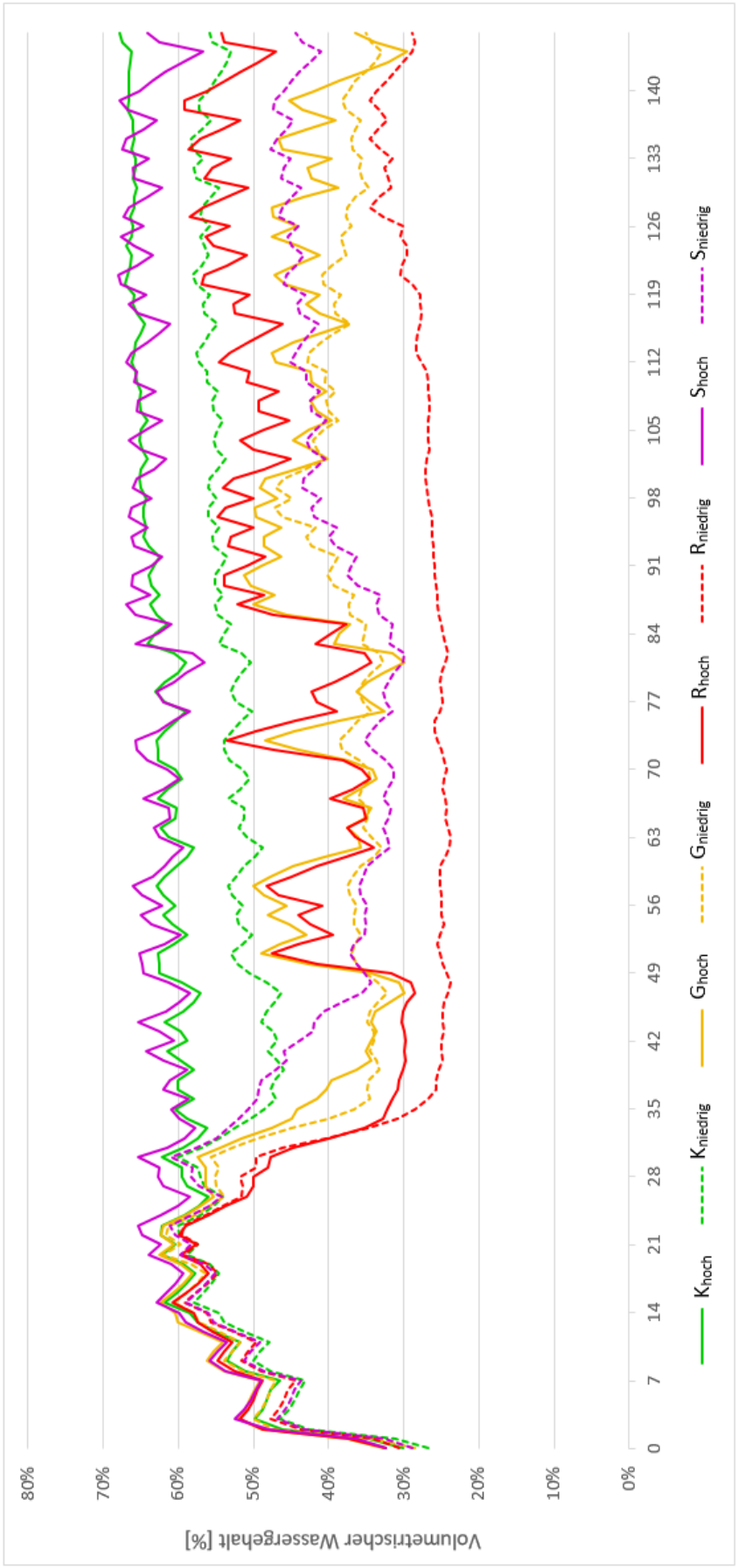


Abbildung 9: Verlauf der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit in % in 6 cm Bodentiefe der Varianten K_{hoch} (n =4), $K_{niedrig}$ (n = 4), G_{hoch} (n = 3), $G_{niedrig}$ (n = 4), R_{hoch} (n = 4), $R_{niedrig}$ (n = 4), S_{hoch} (n = 3) und $S_{niedrig}$ (n = 4), für den Zeitraum von Tag 0 bis Tag 146

Im Zeitraum von Tag 59 bis Tag 89 (Monat Juli) waren die Versuchsvarianten ausgewachsen und in einem gesunden Zustand, sodass sich dieser Zeitraum für eine genauere Betrachtung eignet und hierfür ein zusätzliches Boxplot-Diagramm erstellt wurde (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Boxplots der volumetrische Bodenfeuchtigkeit in % der Varianten K_{hoch} (n = 4), $K_{niedrig}$ (n = 4), G_{hoch} (n = 3), $G_{niedrig}$ (n = 4), R_{hoch} (n = 4), $R_{niedrig}$ (n = 4), S_{hoch} (n = 3) und $S_{niedrig}$ (n = 4) für Zeitraum von Tag 59 bis Tag 89 (Monat Juli)

Abbildung 10 zeigt, dass die S_{hoch}-Variante mit einem Median von 61,98 % und die K_{hoch}-Variante mit einem Median von 61,75 % die höchsten volumetrischen Bodenfeuchtigkeiten im Juli aufwiesen. Dahingegen hatten die $R_{niedrig}$-Variante mit einem Median von 24,74 % und die $S_{niedrig}$-Variante mit einem Median von 32,40 % die geringsten volumetrischen Bodenfeuchtigkeiten.

Wie zu erwarten, ist die volumetrische Bodenfeuchtigkeit in den hoch versorgten Varianten höher ist als in den niedrig versorgten Varianten der gleichen Pflanzenart. Dieser Unterschied fällt bei den G-Varianten geringer aus als bei den R- und S-Varianten. Vor allem der Sand-Thymian reagierte stark auf die unterschiedliche Wasserversorgung. So hat die $S_{niedrig}$-Variante (Median = 32,40 %) nur knapp die Hälfte der Bodenfeuchtigkeit wie die S_{hoch}-Variante (Median = 61,98 %).

4.6 Sickerwasser

Die Bestimmung der Sickerwassermenge erfolgte an sechs Terminen. Diese wurden aufaddiert und sind in Abbildung 11 dargestellt.

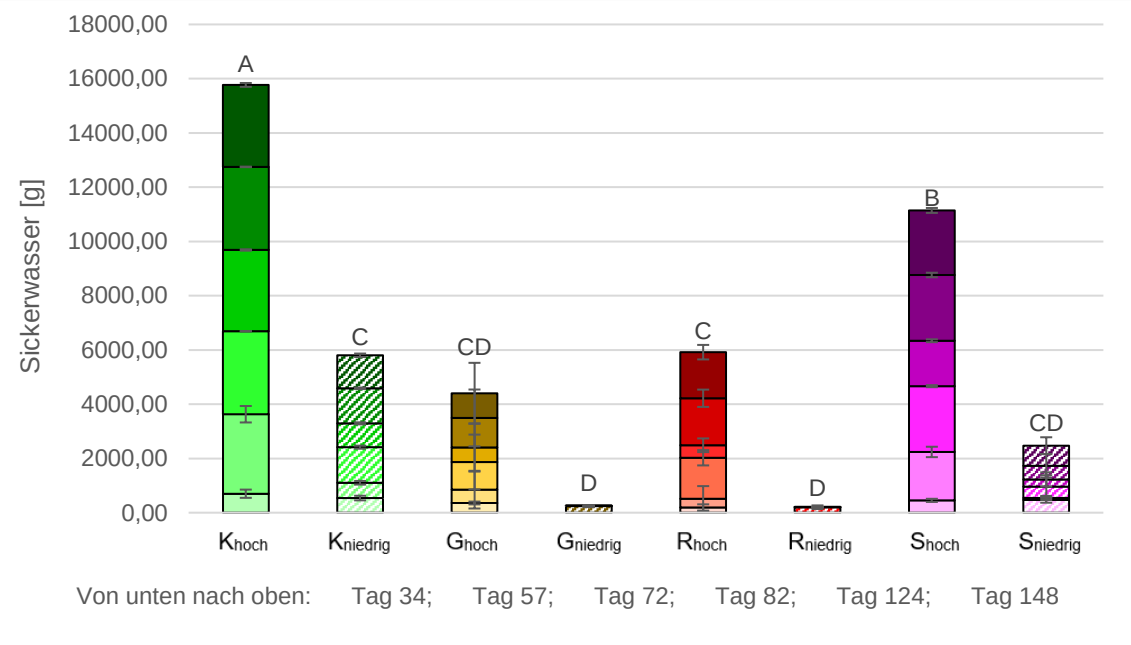


Abbildung 11: Bestimmung des Sickerwassers in Gramm der Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch} und $S_{niedrig}$ an Tag 34, Tag 57, Tag 72, Tag 82, Tag 124 und Tag 148; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Der Abbildung 11 ist zu entnehmen, dass die K_{hoch}-Variante mit 15.770,87 g in der Summe die größten Mengen Wasser versickern ließ. Sie unterscheidet sich signifikant von allen anderen Varianten. Ebenso hat die S_{hoch}-Variante große Mengen Sickerwasser, 11.143,07 g in der Summe, gebildet und unterscheidet sich ebenfalls signifikant von den restlichen Varianten. Die niedrig versorgten Varianten mit Einsaat wiesen hingegen nur kleine Mengen Sickerwasser auf. Während bei der $S_{niedrig}$-Variante noch 2.470,10 g Sickerwasser aufgefangen wurden, wurden bei der $G_{niedrig}$-Variante lediglich 249,75 g und bei der $R_{niedrig}$-Variante lediglich 203,80 g aufgefangen.

4.7 Nährstoffe in Spross und Wurzel

Die Nährstoffgehalte in Spross und Wurzel wurden durch die LUFA Speyer analysiert. Hierbei wurden lediglich die hoch versorgten Varianten untersucht. Aufgrund geringer Wurzelbildung beim Moos in der K-Variante, beschränkt sich die Analyse hierbei auf den Nährstoffgehalt im Spross. Die Analysen lassen sich in Makro- und Mikronährstoffe unterteilen und sind den folgenden Abbildungen 12 und 13 zu entnehmen.

Makronährstoffe

Die Gehalte der Makronährstoffe aus Wurzel und Spross sind in Abbildung 12 gestapelt dargestellt.

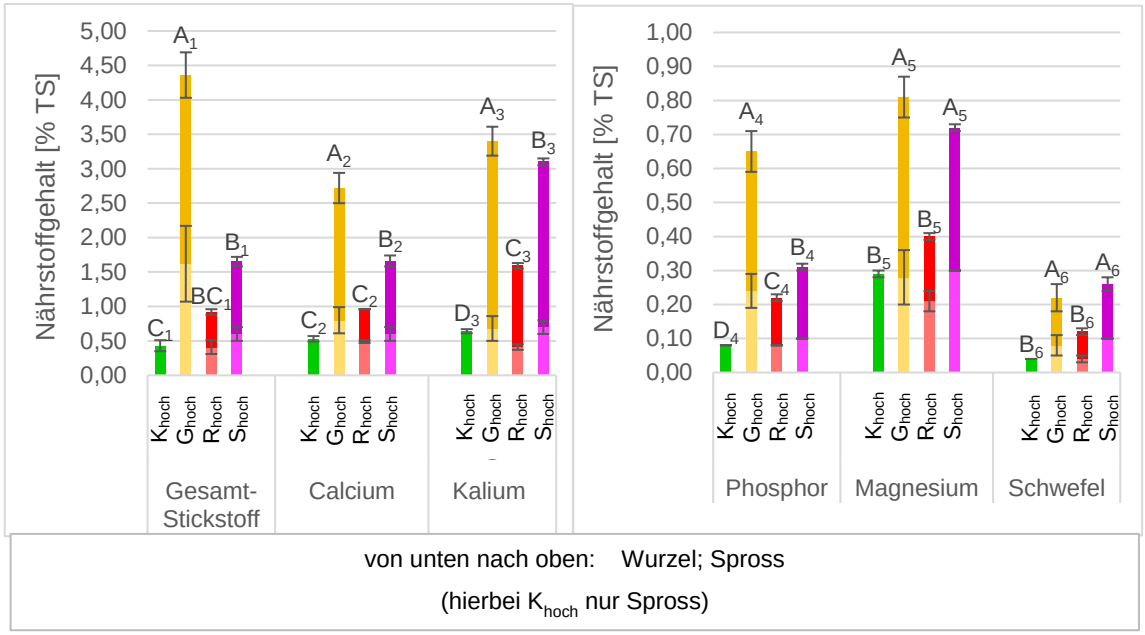


Abbildung 12: Bestimmung der Makronährstoffe Gesamt-Stickstoff, Calcium, Kalium, Phosphor, Magnesium und Schwefel in % TS in Wurzel und Spross der Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer mittels folgender Methoden VDLUFA MB Bd.III,4.1.2:2004 und DIN EN ISO 11885:2009-09; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Abbildung 12 zeigt, dass die G_{hoch}-Variante in allen untersuchten Nährstoffen, abgesehen von Schwefel, stets den höchsten Nährstoffgehalt in Bezug auf die TS aufwies und sich in allen Nährstoffen außer Magnesium und Schwefel signifikant von den drei anderen Varianten unterscheidet.

Hierbei ist vor allem der Gesamt-Stickstoffgehalt auffällig, welcher mit 4,36 % in der G_{hoch}-Variante deutlich höher ist als in den restlichen Varianten mit Gehalten zwischen 0,43 % (K_{hoch}-Variante) und 1,65 % (S_{hoch}-Variante).

Auch die Phosphorgehalte liegen mit 0,65 % in der G_{hoch}-Variante und 0,08 % in der K_{hoch}-Variante weit auseinander.

Neben dem Gelbklee konnten auch im Sand-Thymian hohe Kalium-, Magnesium- und Schwefelgehalte festgestellt werden. Die K_{hoch}- und R_{hoch}-Variante hingegen wiesen stets niedrigere Werte auf und unterscheiden sich damit in allen Nährstoffen signifikant von der G_{hoch}- und der S_{hoch}-Variante.

Mikronährstoffe

Abbildung 13 zeigt die Gehalte der Mikronährstoffe Kupfer, Mangan, Zink, Bor und Eisen in den hoch versorgten Varianten. Ebenso wie die Makronährstoffe sind die Gehalte der Mikronährstoffe in Spross und Wurzel gestapelt dargestellt.

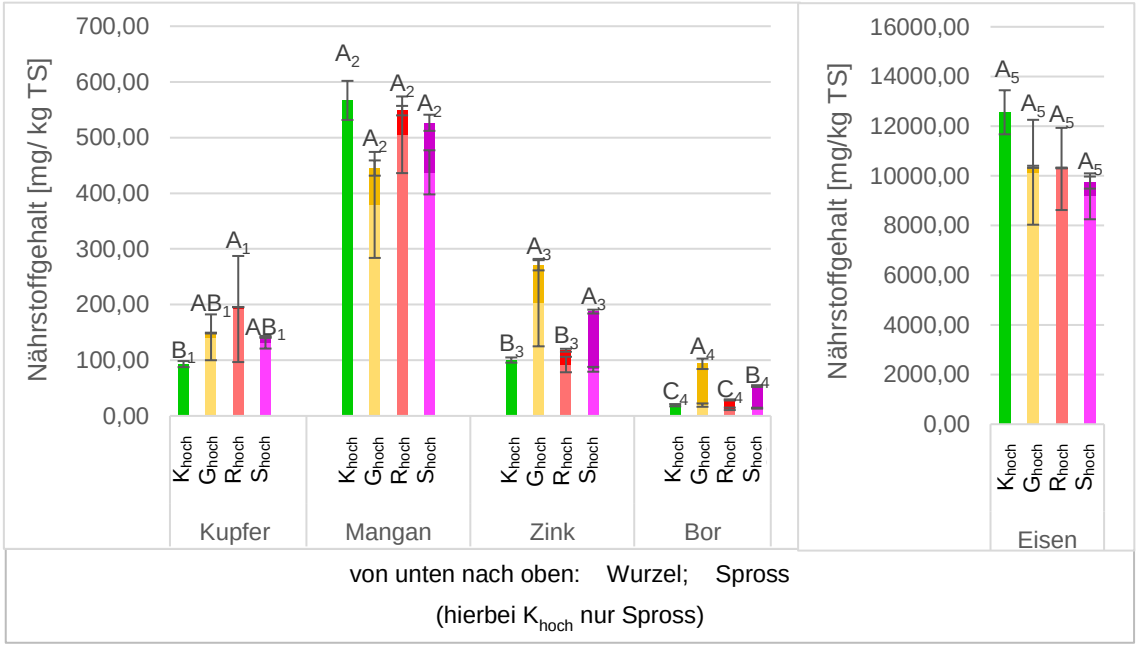


Abbildung 13: Bestimmung der Mikronährstoffe Kupfer, Mangan, Zink, Bor und Eisen in mg/kg TS in Wurzel und Spross der Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer mittels folgender Methoden VDLUFA MB Bd.VII,2.2.2.6:2011 und DIN EN ISO 11885:2009-09; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Im Vergleich zu den Makronährstoffen fallen die Unterschiede in den Mikronährstoffen geringer aus.

Die Auswertung der Analyse ergibt keine signifikanten Unterschiede im Mangan- und Eisengehalt. Im Kupfergehalt konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der K_{hoch}-Variante (93,08 mg/kg TS) und der R_{hoch}-Variante (195,41 mg/kg TS) festgestellt werden. Auch Zink und Bor ergaben signifikante Unterschiede. Die Zinkgehalte in der G_{hoch}- und S_{hoch}-Variante waren signifikant höher als in der K_{hoch}- und R_{hoch}-Variante. Und auch im Borgehalt wiesen diese signifikant höhere Werte auf. Die G_{hoch}-Variante wies mit 93,57 mg/kg TS den höchsten Borgehalt auf und unterschied sich damit nicht nur von der K_{hoch}- und R_{hoch}-Variante, sondern auch von der S_{hoch}-Variante.

Je nach Nährstoff wiesen unterschiedliche Pflanzenarten die höchsten Nährstoffgehalte auf, sodass sich aus der Auswertung der Mikronährstoffe kein Trend erkennen lässt.

4.8 Bodenanalysen

Bodenproben der Versuchsvarianten wurden der LUFA Speyer zugeschickt und analysiert. Hierbei wurden Ammonium- und Nitratgehalte in allen Versuchsvarianten untersucht. Alle weiteren Parameter wurden hingegen nur in den hoch versorgten Varianten analysiert.

Makronährstoffe

In den Böden der hoch versorgten Varianten wurden die Makronährstoffe Gesamt-Stickstoff, Phosphat und Kalium untersucht (siehe Abbildung 14).

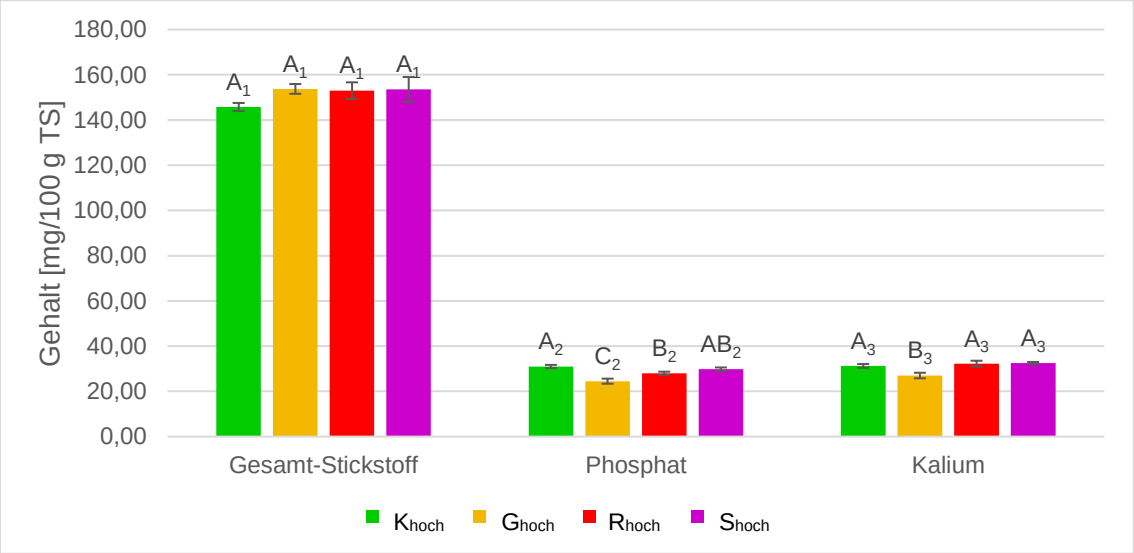


Abbildung 14: Bestimmung der Makronährstoffe Gesamt-Stickstoff, Phosphat und Kalium in mg/100 g TS in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer mittels folgender Methoden VDLUFA I, A2.2.5:2012 und CAL-Methode (VDLUFA I,A6.2.1.1:2012); Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung*

Mit einem Gehalt von 145,75 mg/100 g TS wies der Boden der K_{hoch}-Variante den geringsten Gesamt-Stickstoffgehalt auf. Dieser unterscheidet sich jedoch nicht signifikant von den Gesamt-Stickstoffgehalten der G_{hoch}-, R_{hoch}- und S_{hoch}-Variante, welche alle bei ca. 153,00 g liegen.

Hinsichtlich des Phosphatgehalts konnten in den Böden der verschiedenen Versuchsvarianten signifikante Unterschiede festgestellt werden. So unterscheidet sich die G_{hoch}-Variante (24,50 mg/100 g TS) signifikant von den drei anderen Varianten mit 31,33 mg/100 g TS (K_{hoch}-Variante), 28,00 mg/100 g TS (R_{hoch}-Variante) und 29,75 mg/100 g TS (S_{hoch}-Variante). Der Unterschied zwischen der K_{hoch}- und R_{hoch}-Variante ist ebenfalls als signifikant einzustufen.

Ebenso wie beim Phosphatgehalt weist der Boden der G_{hoch}-Variante hinsichtlich seines Kaliumgehaltes mit 27,00 mg/100 g TS einen signifikanten Unterschied zu den anderen drei Varianten auf.

Ammonium- und Nitratgehalt

Im Rahmen der Bodenanalyse durch die LUFA Speyer erfolgte auch die Untersuchung des mineralischen Stickstoffs (Nmin). Der Nmin-Wert setzt sich zusammen aus Ammonium und Nitrat. Da der Großteil der Ammoniumgehalte in den untersuchten Wiederholungen jedoch unterhalb der Nachweisgrenze lag, wurde hierfür keine statistische Auswertung durchgeführt. Bei der Analyse der Nitratgehalte lagen in beiden K-Varianten drei der vier Wiederholungen unterhalb der Nachweisgrenze. Diese Werte wurden für die statistische Auswertung durch 0 ersetzt. Abbildung 15 stellt die Nitratgehalte im Boden der acht Versuchsvarianten dar.

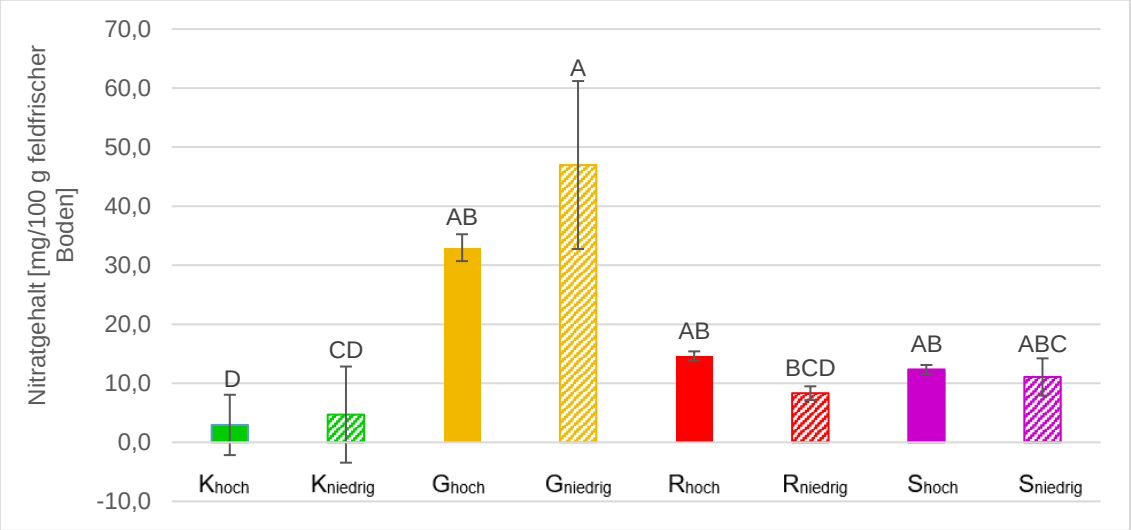


Abbildung 15: Bestimmung der Nitratgehalte in mg/100 g feldfrischer Boden in den Varianten K_{hoch}, $K_{niedrig}$, G_{hoch}, $G_{niedrig}$, R_{hoch}, $R_{niedrig}$, S_{hoch} und $S_{niedrig}$ durch die LUFA Speyer nach VDLUFA Bd. I A6.1.4.1:2002; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Die Analyse der Nitratgehalte ergibt deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Pflanzenvarianten. Hierbei zeigt Gelbklee mit Gehalten zwischen 33,0 mg/100 g TS (G_{hoch}-Variante) und 47,0 mg/100 g TS ($G_{niedrig}$-Variante) deutlich höhere Werte auf als die restlichen Versuchsvarianten mit Gehalten zwischen 3,0 mg/100 g TS (K_{hoch}-Variante) und 14,7 mg/100 g TS (R_{hoch}-Variante).

Die statistische Auswertung ergab, dass sich die $G_{niedrig}$-Variante signifikant von der $R_{niedrig}$- sowie den beiden K-Varianten unterscheidet. Auch G_{hoch}-, R_{hoch}- und

S_{hoch}-Variante unterscheiden sich signifikant von den beiden K-Varianten. Die $S_{niedrig}$-Variante unterscheidet sich lediglich von der K_{hoch}-Variante.

Innerhalb der gleichen Pflanzenart bei unterschiedlicher Wasserversorgung sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

Mikronährstoffe

Der Gehalt der Mikronährstoffe Bor, Kupfer, Mangan und Zink im Boden der hoch versorgten Varianten ist in Abbildung 16 dargestellt.

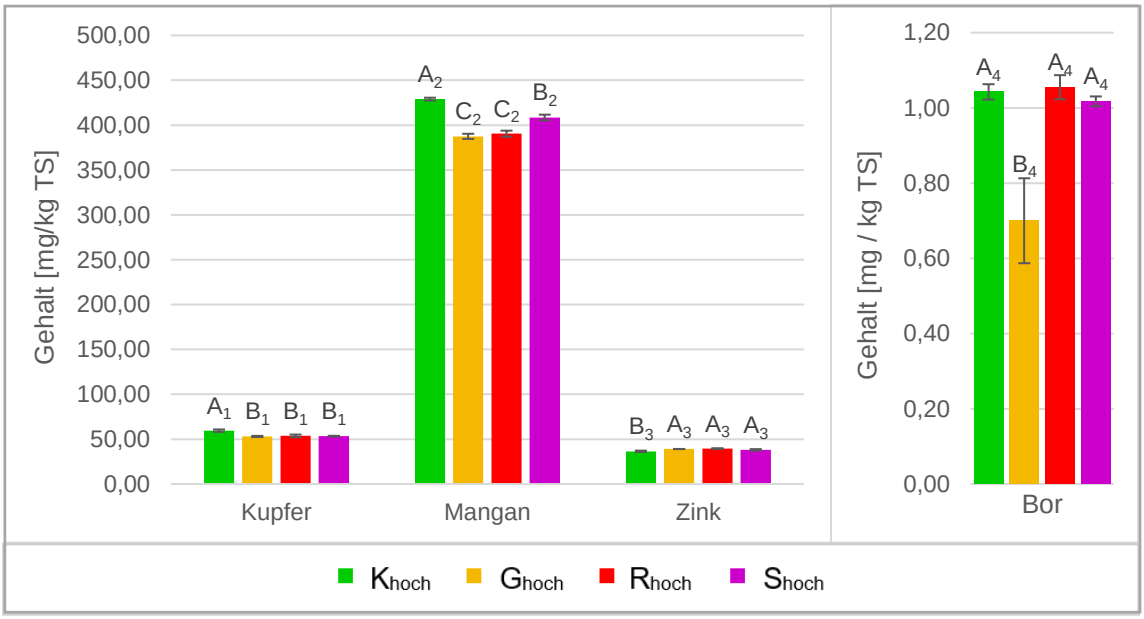


Abbildung 16: Bestimmung der Mikronährstoffe Kupfer, Mangan, Zink und Bor in mg / kg TS in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer nach CAT-Methode (VDLUFA I,A6.4.1:2002); Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung*

Der Boden der G_{hoch}-Variante weist einen Borgehalt von 0,70 mg/kg TS auf und ist somit der niedrigste Wert. Er unterscheidet sich damit signifikant von den Böden der anderen hoch versorgten Varianten.

Hinsichtlich des Kupfers weist der Boden der K_{hoch}-Variante mit 59,53 mg/kg TS einen signifikant höheren Gehalt auf als die Varianten G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch}, welche bei knapp 53,00 mg/kg TS liegen.

Im Vergleich zu den anderen Mikronährstoffen fallen die Mangangehalte mit Werten zwischen 387,50 mg/kg TS (G_{hoch}-Variante) und 428,67 (K_{hoch}-Variante) verhältnismäßig hoch aus. Hierbei unterscheidet sich der Boden der K_{hoch}-Variante signifikant von den drei anderen Varianten. Ebenso unterscheidet sich die S_{hoch}-Variante mit 408,50 mg/kg TS signifikant von allen anderen Varianten. Zwischen G_{hoch}- und R_{hoch}-Variante konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Die Böden der hoch versorgten Versuchsvarianten weisen Zinkgehalte zwischen 36,45 mg/kg TS (K_{hoch}-Variante) und 39,48 mg/kg TS (R_{hoch}-Variante) auf. Nach Varianzanalyse unterscheidet sich die K_{hoch}-Variante hierbei signifikant von den drei restlichen Varianten.

pH-Wert

Abbildung 17 zeigt die pH-Werte des Bodens in den verschiedenen hoch versorgten Versuchsvarianten.

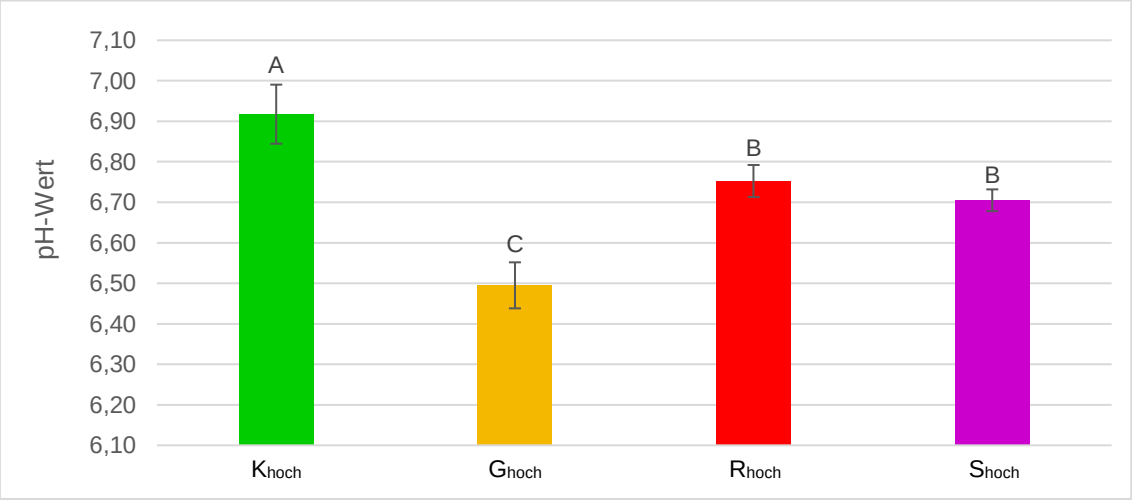


Abbildung 17: Bestimmung der Boden-pH-Werte in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer nach VDLUFA I, A5.1.1:2016; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Die pH-Werte liegen zwischen 6,5 in der G_{hoch}-Variante und 6,92 in der K_{hoch}-Variante. Abgesehen von der R_{hoch}- und S_{hoch}-Variante, unterscheiden sich alle Varianten signifikant voneinander.

C/N-Verhältnis

Durch Bestimmung der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte in den Böden der vier hoch versorgten Varianten, konnten die zugehörigen C/N-Verhältnisse berechnet werden. Diese Kennzahl ist in Abbildung 18 dargestellt.

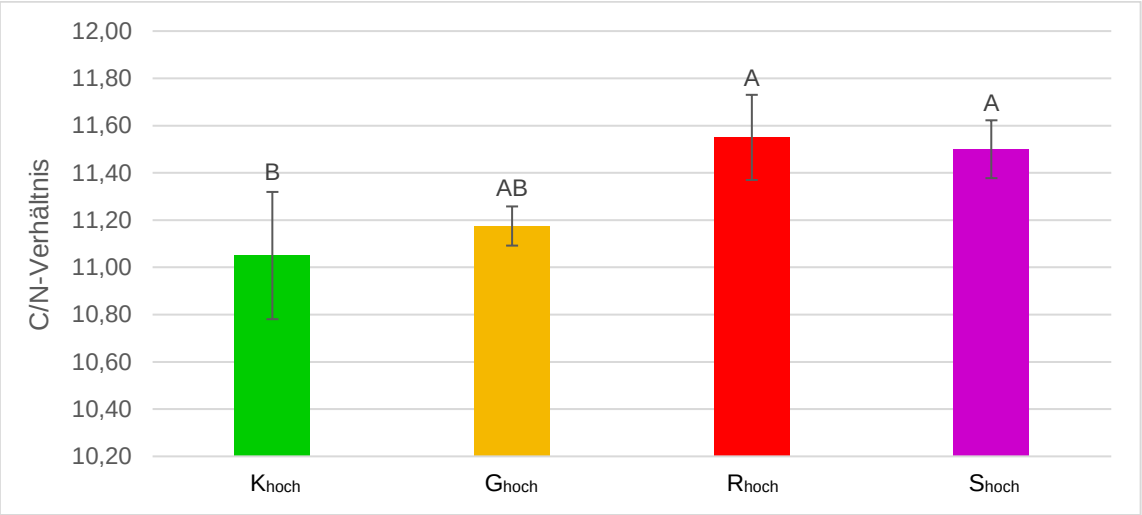


Abbildung 18: Bestimmung der C/N-Verhältnis in den Böden der Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer; Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung

Die Bodenanalyse der K_{hoch}-Variante wies mit 10,97 das niedrigste C/N-Verhältnis auf, die R_{hoch}-Variante mit 11,55 hingegen das höchste. Nach statistischer Auswertung unterscheidet sich die K_{hoch}-Variante hierbei signifikant von der R_{hoch}- und der S_{hoch}-Variante.

Organischer Kohlenstoff- und Humusgehalt

Abbildung 19 zeigt den Anteil des organischen Kohlenstoffs und des Humus an der TS.

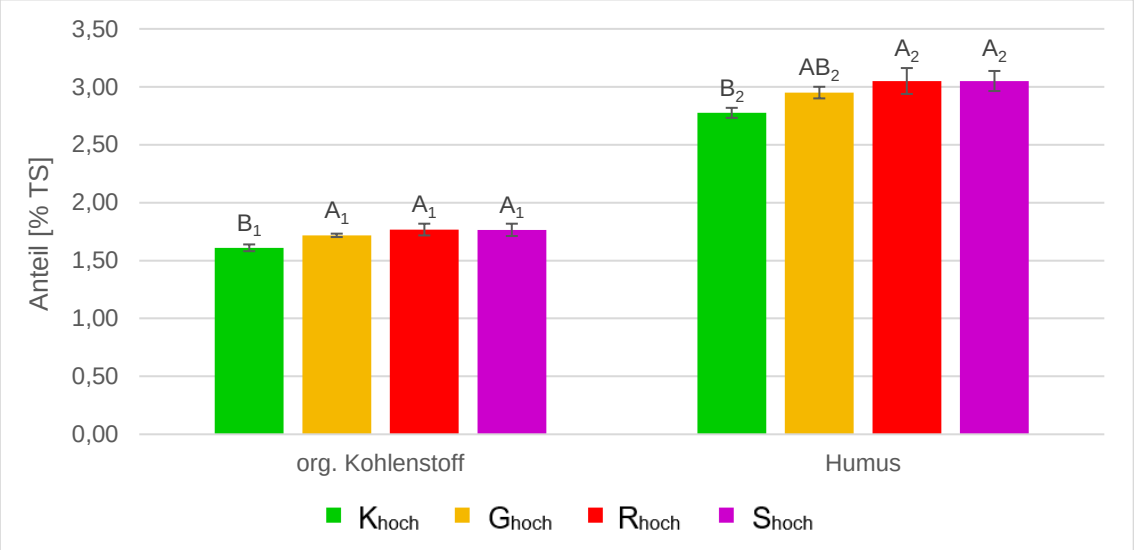


Abbildung 19: Bestimmung des organischen Kohlenstoffanteils und des Humusanteils in % TS in den Varianten K_{hoch}, G_{hoch}, R_{hoch} und S_{hoch} durch die LUFA Speyer nach DIN ISO 10694:1996-08 und Formel (Corg*1,72); Post-hoc-Test nach Tukey (HSD) mit α = 0,05; Signifikanzen sind mit Großbuchstaben indiziert, Zahlen neben dem Index kennzeichnen die Zugehörigkeit zum jeweiligen Parameter; n = 4; Fehlerindikatoren = ± Standardabweichung*

Mit einem organischen Kohlenstoff-Anteil von 1,60 % an der TS hat der Boden der K_{hoch}-Variante von den vier Untersuchungseinheiten den niedrigsten Wert und unterscheidet sich damit signifikant von den drei anderen Varianten, welche einen organischen Kohlenstoff-Anteil von 1,72 % (G_{hoch}-Variante) und 1,77 % (R_{hoch}- und S_{hoch}-Variante) haben.

Hinsichtlich des Humusgehalts weist der Boden der K_{hoch}-Variante ebenfalls den niedrigsten Anteil an der TS auf. Mit 2,78 % unterscheidet er sich signifikant von der R_{hoch}-Variante und der S_{hoch}-Variante mit jeweils 3,05 %.

5 DISKUSSION

5.1 Wachstumseigenschaften

Hinsichtlich der Wachstumseigenschaften wurden Deckungsgrad, maximale Wuchshöhe sowie ausgebildete Biomasse betrachtet.

Aufgrund der klimatischen Bedingungen im Gewächshaus kam es in den K-Varianten zur Bildung eines Moosrasens. Dieser wurde herangezogen, um den Deckungsgrad der grünen Pflanzenteile sowie die Spross-Frisch- und Spross-Trockenmasse zu bestimmen. Das Höhenwachstum war jedoch so gering, dass dieses in der Bonitur der maximalen Wuchshöhe vernachlässigt wurde. Unter Freilandbedingungen würde es allerdings nicht zu einem solchen Mooswachstum kommen. Mit Hilfe der Unterstockbearbeitung, zumeist chemisch oder mechanisch, kann das Mooswachstum reduziert werden.

Zu Beginn der Versuchsdurchführung zeigten die verschiedenen Varianten eine ähnliche Entwicklung im Deckungsgrad. An Tag 34 haben alle Varianten die höchste Deckungsgradstufe und somit ein Klassenmittel von 87,5 % erreicht. Eine Steigerung war hiernach nicht weiter möglich. Dahingegen ist ab Tag 57 ein starker Rückgang des Deckungsgrades in der $R_{niedrig}$-Variante sowie den beiden G-Varianten zu verzeichnen. Grüne Pflanzenteile haben sich gelb verfärbt (siehe Anhang VII). Dies wurde nicht durch mangelnde Wasserversorgung herbeigeführt. Stattdessen handelt es sich beim Rotschwingel mit fortschreitender Entwicklung um eine natürliche Verfärbung. Beim Gelbklee ist diese Verfärbung hingegen durch die Weiße Fliege *(Trialeurodes vaporariorum)* bedingt. Deren Larven benötigen viele Nährstoffe und nehmen daher große Mengen Pflanzensaft auf (Dimitrov 2005). Hierdurch wurde die Physiologie des Gelbklees beeinträchtigt, Blätter begannen zu welken und fielen ab.

Aus Abbildung 5 lässt sich ablesen, dass die maximale Wuchshöhe der niedrig versorgten Variante ab Tag 37 aufgrund von Welkeerscheinungen stets geringer ausgefallen ist, als bei den hoch versorgten Varianten. Darüber hinaus nahm auch die Wuchshöhe der R_{hoch}-Variante ab. Mit zunehmender Länge verloren die Halme an Aufrichtung und hingen leicht herab. Von den drei eingesäten

Versuchsvarianten zeigte der Rotschwingel dennoch das höchste Wachstum und, abgesehen von der zu starken Welke zwischen Tag 34 und Tag 43, eine verhältnismäßig geringe Reaktion auf den beigeführten Trockenstress. Gelbklee hingegen reagierte im Verhältnis zur eigenen Wuchshöhe stark auf die niedrige Wasserversorgung. Seine maximale Wuchshöhe ab Tag 93 variierte je nach Trockenstress zwischen 14,1 cm und 21,1 cm. Sand-Thymian war mit einer maximalen Wuchshöhe von 14,9 cm die am niedrigsten wachsende Pflanze und reagierte am geringsten auf den herbeigeführten Trockenstress.

Die Auswertung der Spross-Frisch- und der Spross-Trockenmasse zeigt, dass vor allem die K-Varianten eine hohe Spross-Frischmasse entwickelt haben. Dies lag zum einen daran, dass Erdreste an der geernteten Pflanzenmasse das Ergebnis beeinflusst haben (siehe Anhang VIII), zum anderen am hohen Wasseranteil im Moos (siehe 4.4. Wassergehalt im Spross). Nach Trocknung fiel der Unterschied der Spross-Masse zwischen K-Variante und den eingesäten Varianten somit deutlich geringer aus. Lediglich die K_{hoch}-Variante zeigte einen signifikanten Unterschied auf.

Der Vergleich zwischen den Pflanzenarten hinsichtlich ihres Wurzelwachstums ergab starke Unterschiede. Das Moos in den K-Varianten hat keine Wurzeln gebildet, die R-Varianten hingegen haben knapp 220 g Wurzel-Frischmasse gebildet.

Insgesamt zeigt der Versuch, dass sich alle Varianten auch bei niedriger Wasserversorgung vollständig entwickeln konnten. Die eingesäten Pflanzenarten unterschieden sich in ihrer maximalen Wuchshöhe sowie in Wurzel-Frischmasse. Auf die niedrige Wasserversorgung und den beigeführten Trockenstress reagierten die verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich stark. Während sich die maximale Wuchshöhe beim Sand-Thymian durch Wassermangel kaum veränderte, zeigte der Gelbklee starke Rückgänge in seiner Wuchshöhe. Hinsichtlich Deckungsgrad sowie Frisch- und Trockenmasse konnten keine Unterschiede innerhalb der gleichen Pflanzenart aufgrund von verschiedener Wasserversorgung festgestellt werden.

5.2 Wasserhaushalt

Für die Interpretation der Wasserhaushalte der verschiedenen Begrünungspflanzen werden nachfolgend die Ergebnisse von Wassergehalt im Spross, volumetrische Bodenfeuchtigkeit sowie Sickerwassermenge diskutiert.

Wie zuvor erwähnt, macht Wasser einen hohen Anteil der Biomasse bei Moos aus, sodass sich sein Wassergehalt im Spross signifikant von dem der anderen Varianten unterscheidet. Auch zwischen den eingesäten Varianten kam es zu signifikanten Unterschieden. Hierbei unterscheiden sich die niedrig und hoch versorgten Varianten innerhalb der gleichen Pflanzenart jedoch nicht. Während eine niedrige Wasserversorgung in K- und S-Variante geringere Wassergehalte im Spross verursachte als bei hoher Wasserversorgung, wiesen die niedrig versorgten G- und R-Varianten sogar höhere Wassergehalte auf. Ein Trend ist somit nicht erkennbar.

Abbildung 9 zeigt den Verlauf der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit im Versuchszeitraum. Hierbei sind Gießtermine daran zu erkennen, dass die Bodenfeuchtigkeit in allen Varianten gleichzeitig schlagartig zugenommen hat und anschließend wieder zurückging. Für die statistische Auswertung der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit wurde ein Box-Plot für den Zeitraum Tag 59 bis Tag 89 erstellt. Hieraus lässt sich ablesen, dass die K-Variante sowohl bei hoher als auch bei niedriger Wasserversorgung über eine hohe Bodenfeuchtigkeit verfügte. Die „Wurzeln“ des Mooses dienen in erster Linie der Verankerung im Boden und nicht der Wasseraufnahme (Bozchenko 2017), sodass dem Boden kaum Wasser entzogen wurde. Abgesehen von den K-Varianten, zeigte auch die S_{hoch}-Variante eine hohe Bodenfeuchtigkeit. Bei niedriger Wasserversorgung war die Bodenfeuchtigkeit in der S-Variante jedoch sehr viel geringer, sodass der Median der Bodenfeuchtigkeit in der $S_{niedrig}$-Variante bei lediglich 32,40 % lag. Dennoch blieb die Menge des Sickerwassers verhältnismäßig hoch. Dies könnte eventuell mit einer geringen Wurzelbildung und somit einer geringen Wasserspeicherkapazität zusammenhängen.

Obwohl die $G_{niedrig}$- und $S_{niedrig}$-Varianten ähnliche volumetrische Bodenfeuchtigkeiten von über 30 % aufwiesen, konnten in der $S_{niedrig}$-Variante

deutlich größere Mengen Sickerwasser aufgefangen werden, was für seinen geringeren Wasserbedarf spricht.

Wie unter 2.6 Wasserversorgung der Rebe bei Unterstockbegrünung beschrieben, wurde der Rotschwingel in früheren Forschungen als wenig wasserzehrend beschrieben. Hierbei wurde er mit Schwarzmalve *(Medicago lupulina)*, Fetthenne *(Chenopodium album),* Ackerkratzdistel *(Cirsium arvense)*, Weg-Malve *(Malva neglecta)* und gewöhnlichem Löwenzahn *(Taraxacum officinale)* verglichen (Lopes et al. 2015). Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde er jedoch mit Gelbklee und Sand-Thymian verglichen. Bei niedriger Wasserversorgung zeigte der Rotschwingel im Vergleich mit den anderen Pflanzenvarianten die geringste volumetrische Bodenfeuchtigkeit sowie die geringste Sickerwassermenge, was wiederum für einen hohen Wasserverbrauch im Vergleich zu den anderen Versuchsvarianten spricht.

Hinsichtlich des Wasserhaushaltes der verschiedenen Pflanzenvarianten konnten im Rahmen dieser Forschungsarbeit somit einige Unterschiede festgestellt werden. Zum Teil ergab dies sogar signifikante Unterschiede innerhalb der gleichen Pflanzenart bei unterschiedlicher Wasserversorgung.

Um genauere Aussagen über den tatsächlichen Wasserhaushalt der verschiedenen Pflanzen treffen zu können, sollten bei weiteren Forschungen jedoch genauere Analysen hinsichtlich der Verdunstung gemacht werden. Sowohl Transpirationskoeffizienten als auch Evaporationsverluste sollten hierbei berücksichtigt werden. So konnten beim Abwiegen der Sickerwassermengen an mehreren Terminen deutliche Unterschiede zwischen den Wiederholungen derselben Variante, sowohl in der G_{hoch}- als auch in der $S_{niedrig}$-Variante, festgestellt werden. Diese wurden im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung jedoch nicht weiter untersucht.

5.3 Nährstoffhaushalt

Um Aussagen über den Nährstoffhaushalt der acht Versuchsvarianten treffen zu können, wurden die Nährstoffgehalte in Spross, Wurzel und Boden analysiert.

Die Nährstoffgehalte beziehen sich hierbei auf die Trockensubstanz, sodass sich die Unterschiede zwischen den Varianten ändern würden, wenn man die relativen Nährstoffgehalte in absolute Gehalte umrechnet. Da sich die Versuchsvarianten in ihren Trockenmassen jedoch nicht stark unterscheiden, wurde auf eine Umrechnung in absolute Nährstoffgehalte verzichtet.

Aus Abbildung 12 geht hervor, dass der prozentuale Anteil der Makronährstoffe in Spross und Wurzel der K_{hoch}-Variante stets geringer war als bei den eingesäten Varianten. Das liegt zum einen daran, dass Moose einen geringeren Nährstoffbedarf haben als höhere Pflanzen und zum anderen daran, dass die „Wurzeln“ in erster Linie zur Verankerung dienen und nicht zur Aufnahme von Bodenwasser und den darin gelösten Nährstoffen (Bozchenko 2017).

Darüber hinaus konnten in allen untersuchten Makronährstoffen, mit Ausnahme von Schwefel, die höchsten Gehalte in der G_{hoch}-Variante festgestellt werden. Vor allem bei der Betrachtung der Gesamt-Stickstoff- und Phosphorgehalte wurden starke Unterschiede zu den drei anderen Varianten deutlich. Die hohen Gesamt-Stickstoffgehalte lassen sich damit erklären, dass Gelbklee als Leguminose in der Lage ist, Symbiosen mit Knöllchenbakterien *(Rhizobiaceae)* einzugehen, welche elementaren, molekularen Stickstoff binden und in reduzierter Form biologisch verfügbar machen können. Dieser reduzierte Stickstoff wird an die Wirtspflanze, in diesem Fall Gelbklee, abgegeben, welche wiederum die Bakterien zur Deckung des Energiebedarfs mit Kohlenstoffverbindungen versorgt (Zehner und Göttfert 2015).

Für die Stickstoffbindung der Knöllchenbakterien werden außerdem größere Mengen Phosphor benötigt, sodass der Gelbklee als Leguminose höhere Phosphorgehalte aufwies. Die Kalium-, Magnesium- und Schwefelgehalte fielen sowohl in der G_{hoch}- als auch in der S_{hoch}-Variante sichtbar höher aus als in der K_{hoch}- und der R_{hoch}-Variante.

Bei den Mikronährstoffen waren die Unterschiede zwischen den Varianten deutlich geringer und zeigten keine Trends. Je nach Nährstoff wiesen unterschiedliche Pflanzenarten die höchsten Nährstoffgehalte auf. Der Mangan-

sowie der Eisengehalt war in der K_{hoch}-Variante sogar höher als in der G_{hoch}-, R_{hoch}- und S_{hoch}-Variante.

Die Nährstoffanalyse der Böden erfolgte lediglich in den hoch versorgten Varianten. Die eingesäten Varianten wiesen höhere Zinkgehalte auf als die K-Variante. Bei Betrachtung von Phosphat und Eisen wurden in der K-Variante die höheren Werte nachgewiesen.

Besonders starke Unterschiede im Phosphatgehalt konnten zwischen K_{hoch}- und G_{hoch}-Variante festgestellt werden. Die niedrigen Phosphatgehalte im Boden der G_{hoch}-Variante korreliert mit den Ergebnissen der Nährstoffanalyse in Spross und Wurzel. Hier wies die G_{hoch}-Variante besonders hohe Phosphorgehalt auf. Kalium-, Kupfer-, Mangan- und Borgehalt im Boden waren in den eingesäten Varianten ebenfalls niedriger als in der K-Variante. Auch hier wies die G_{hoch}-Variante besonders niedrige Werte auf.

Daraus kann geschlossen werden, dass Gelbklee im Vergleich zu den anderen beiden Pflanzenarten besonders nährstoffzehrend ist und die stärkste Konkurrenz zur Rebe darstellt. Diese Ausarbeitung kann also die Ergebnisse aus früheren Forschungen bekräftigen, in denen durch die Einsaat von Klee niedrigere Phosphorgehalte im Boden verursacht wurden. Daraus kann man schließen, dass Gelbklee im Vergleich zu den anderen beiden Pflanzenarten besonders nährstoffzehrend ist und die stärkste Konkurrenz zur Rebe darstellt. Zudem kann diese Ausarbeitung die Ergebnisse aus früheren Forschungen bekräftigen, in denen durch die Einsaat von Begrünungspflanzen niedrigere Phosphorgehalte im Boden verursacht wurden (Karl et al. 2016).

Auch in den Nitratgehalten zeigten die G-Varianten starke Abweichungen von den restlichen Varianten – mit Werten von bis zu 47,0 mg/100 g feldfrischer Boden ($G_{niedrig}$-Variante) waren sie signifikant höher. Dies könnte damit begründet werden, dass die Nichtleguminosen dem Boden Stickstoff entziehen (Steinert 2017) oder dadurch, dass Gelbklee als Leguminose Luft-Stickstoff fixieren kann, wobei der Großteil zwar für das eigene Wachstum genutzt wird, ein nicht unerheblicher Teil jedoch auch über abgestorbene Wurzeln und Wurzelausscheidungen in den Boden übergeht (Weggler 2023).

Im Rahmen der Bodenanalysen wurden neben den Nährstoffen auch pH-Wert, C/N-Verhältnis sowie organischer Kohlenstoff- und Humusanteil bestimmt. Auch hier konnten Forschungsergebnisse von Karl et al. (2016) bekräftigt werden. Die Böden mit Einsaat wiesen höhere organische Kohlenstoffgehalte auf und damit einhergehend höhere Humusgehalte. Dies verschafft dem Boden eine höhere Wasser-, Nährstoff- und Schadstoffspeicherkapazität. Außerdem trägt dies zur Ausbildung der Bodenstrukturen bei und schafft Lebensräume für Bodenorganismen, sodass höhere organische Kohlenstoff- und Humusgehalte prinzipiell als gut einzuschätzen sind. Die Analysen ergaben jedoch Humuswerte, die teilweise über dem Zielwert von 1,8 % bis 3,0 % für mittlere bis schwere Böden lagen (DLR Rheinpfalz). Unter Freilandbedingungen würden an dieser Stelle jedoch noch Wechselwirkungen hinzukommen, welche den Humusabbau fördern, zum Beispiel durch Humus als Nahrungsquelle für Bodenmikroorganismen und –tiere.

Auch die Auswertung der C/N-Verhältnisse sowie der pH-Werte ergab, dass sich eine Begrünungseinsaat positiv auf den Boden auswirken kann. Wünschenswert sind hohe C/N-Verhältnisse, da diese langfristig für Humusaufbau sorgen. Die statistische Auswertung ergab, dass das C/N-Verhältnis der R_{hoch}- und S_{hoch}-Variante signifikant höher war als das der K_{hoch}-Variante. Die pH-Werte lagen alle im wünschenswerten Bereich zwischen pH 6,0 und 7,0, bei welchem die Bedingungen zur Nährstoffaufnahme am günstigsten sind. Die K_{hoch}-Variante unterschied sich signifikant von den anderen Varianten und lag mit einem pH-Wert von 6,92 eher an der Obergrenze, vor allem unter dem Aspekt, dass es sich bei dem untersuchten Boden um einen lehmigen Sandboden handelt und hier tendenziell niedrigere pH-Werte wünschenswert sind (Schumann 1998).

Um die Forschungsfrage „Welche Begrünungspflanzen eignen sich hinsichtlich Wachstumseigenschaften, Wasser- und Nährstoffhaushalt bei verschiedener Wasserversorgung für die Unterstockbegrünung im Weinbau?“ abschließend zu beantworten, lässt sich festhalten, dass eine Umsetzung in der Praxis grundsätzlich für alle geprüften Pflanzenarten denkbar ist. Auch bei niedriger Wasserversorgung konnten sich alle Varianten vollständig entwickeln.

Hierbei zeigte der Sand-Thymian zwar hohe Wassergehalte im Spross, jedoch auch die geringste Reaktion auf den beigeführten Trockenstress. Gelbklee und Rot-Schwingel begannen früher zu welken.

Rot-Schwingel bildete eine große Wurzelmasse aus und führte bei niedriger Wasserversorgung zur niedrigsten Bodenfeuchtigkeit, was für einen eher hohen Wasserbedarf spricht.

Dahingegen erwies sich Gelbklee als recht nährstoffzehrend, weshalb auf die Anpflanzung von Gelbklee auf nährstoffarmen Böden abgesehen werden sollte.

5.4 Limitation und Forschungsausblick

Zu bedenken gilt, dass die Untersuchung unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus stattgefunden hat. Hierbei wurden Interaktionen mit der Rebe oder die Verdrängungswirkung gegenüber unerwünschter Spontanflora nicht berücksichtigt. Wie sich die Arten im Freiland verhalten, muss in weiteren Versuchen erforscht werden.

Darüber hinaus blieben Transpiration und Evaporation in diesem Versuch gänzlich unbeachtet. Weitere Forschungen zum Wasserhaushalt von möglichen Begrünungspflanzen sollten diese Verdunstungseffekte berücksichtigen. Für genauere Aussagen über die Nährstoffhaushalte verschiedener Begrünungspflanzen könnte zudem das aufgefangene Sickerwasser beprobt werden.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In dem Versuch wurden verschiedenen Begrünungspflanzen auf ihre Eignung als Unterstockbegrünung im Weinbau hinsichtlich ihrer Wachstumseigenschaften sowie ihres Wasser- und Nährstoffhaushaltes untersucht. Die Durchführung erfolgte als Topfversuch im Gewächshaus des DLR Rheinpfalz und fand von Mai 2023 bis September 2023 statt. Hierfür wurden die Pflanzenvarianten Gelbklee, Rot-Schwingel, Sand-Thymian sowie eine Kontrollvariante ohne Einsaat gewählt. Ab 80 % Bodendeckung erfolgte je Pflanzenvariante eine Unterscheidung in hohe und niedrige Wasserversorgung, sodass hieraus acht Versuchsvarianten resultierten. Dies geschah in vierfacher Wiederholung.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden Deckungsgrad, maximale Wuchshöhe und Biomasse, Bodenfeuchtigkeit, Sickerwassermenge, Nährstoffgehalt in Pflanze und im Boden bonitiert und ausgewertet.

Hierbei ergab sich in den Wachstumseigenschaften keine aussagekräftigen Unterschiede zwischen den hoch und niedrig versorgten Varianten einer gleichen Pflanzenart.

Hinsichtlich des Wasserhaushaltes zeigt sich, dass Gelbklee und Rotschwingel einen höheren Wasserbedarf haben als Sand-Thymian, welcher aufgrund seiner geringen Wurzelbildung jedoch nur geringen Einfluss auf die Wasserspeicherkapazität des Bodens hat. Die Auswirkungen auf den Nährstoffgehalt in Pflanze und Boden sowie auf die Bodenzusammensetzung deckt sich mit Aussagen ähnlicher Versuche. Neben positive Auswirkungen auf den Boden, hinsichtlich pH-Wert, C/N-Verhältnis, organischen Kohlenstoff- und Humusgehalt durch die Einsaat von Begrünungspflanzen konnten auch negative Effekte auf die Nährstoffgehalte festgestellt werden. Hier zeigte sich vor allem der Gelbklee als besonders nährstoffzehrend.

In künftigen Arbeiten sollten Verdunstungseffekte sowie Nährstoffanalysen des Sickerwassers einbezogen werden, um genauere Ergebnisse zu erzielen und diese zu begründen.

ANHANG

I. Sieben des Substrats



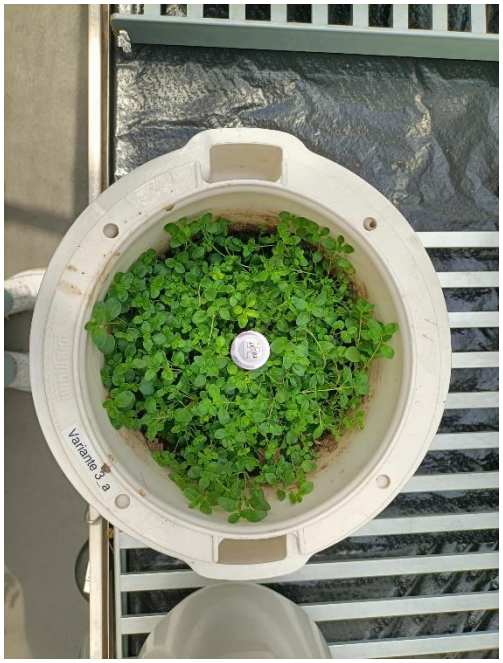
II. Randomisierte Aufstellung der Kick-Brauckmann Pflanztöpfe nach Einsaat und Ausstattung mit TMS Bodenloggern



III. Beispiel-Fotos für die Bonitur des Deckungsgrads



Tag 22: $G_{niedrig}$-Variante



Tag 34: S_{hoch}-Variante

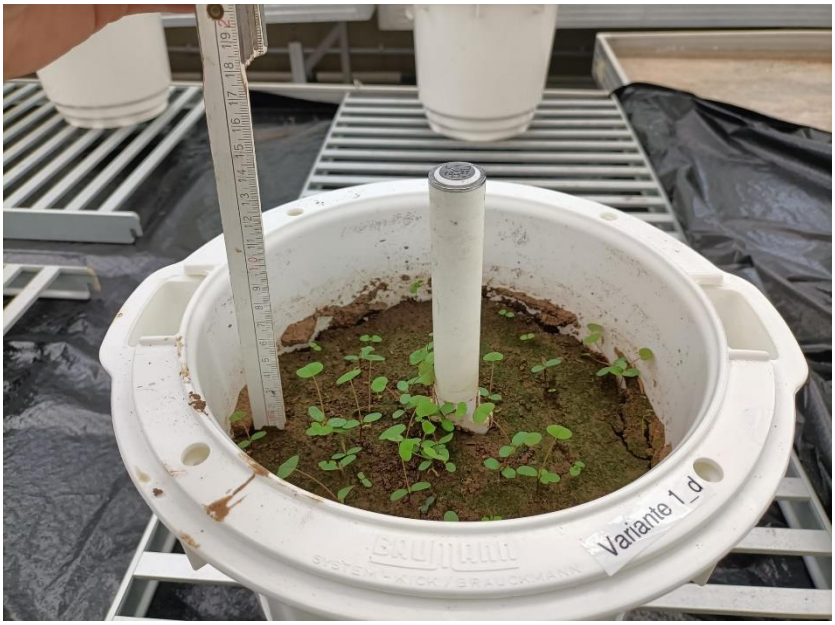


Tag 50: $K_{niedrig}$-Variante



Tag 57: R_{hoch}-Variante

IV. Bonitur der maximalen Wuchshöhe mittels Zollstock



V. Abernten der Versuchsvarianten für die Bestimmung der Biomasse



VI. Starke Welke an Tag 37 an $G_{niedrig}$-Variante



VII. Gelbfärbung der $R_{niedrig}$-Variante bedingt durch natürliche phänotypische Veränderung sowie der $G_{niedrig}$-Variante bedingt durch die Weiße Fliege





VIII. Erdreste an abgeerntetem Moos der K-Variante



LITERATURVERZEICHNIS

Abad, F. J.; Marín, D.; Imbert, B.; Virto, I.; Garbisu, C.; Santesteban, L. G. (2023): Under-vine cover crops: Impact on physical and biological soil proprieties in an irrigated Mediterranean vineyard. In: *Scientia Horticulturae* 311, S. 111797. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111797.

Abad, Javier; Diana, Marín; L. Gonzaga, Santesteban; José Félix, Cibriáin; Ana, Sagüés (2020): Under-vine cover crops: impact on weed development, yield and grape composition. In: *OENO One* 54 (4), S. 975–983. DOI: 10.20870/oeno-one.2020.54.4.4149.

Bauer, Karl; Regner, Ferdinand; Friedrich, Barbara (2017): Weinbau. 11., aktualisierte Auflage, geänderte Neuauflage. München: avBuch im Cadmos Verlag (AV-Fachbuch).

Bavougian, Christina M.; Read, Paul E. (2018): Mulch and groundcover effects on soil temperature and moisture, surface reflectance, grapevine water potential, and vineyard weed management. In: *PeerJ* 6, e5082. DOI: 10.7717/peerj.5082.

Ben-Salem, Nahed; Álvarez, Sara; López-Vicente, Manuel (2018): Soil and Water Conservation in Rainfed Vineyards with Common Sainfoin and Spontaneous Vegetation under Different Ground Conditions. In: *Water* 10 (8), S. 1058. DOI: 10.3390/w10081058.

Blasse, W. (1961): Differenzierte Bodenpflegemaßnahmen im Obstbau und deren Einfluß auf den Verlauf der Bodenfeuchtigkeit. In: *Archiv Gartenb.* 1958-1960 (9), S. 599–615.

Bozchenko, N. P. (2017): Moos wie Bioindikator Der Umweltverschmutzung. In: *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика МА Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора МИ Кучина, Томск, 3-7 апреля 2017 г. Т. 2.—Томск, 2017.* 2, S. 930–931.

Braun-Blanquet, J. (1964): Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. Dritte, Neubearbeitete und Wesentlich Vermehrte Auflage. Wien, Österreich: Springer Vienna.

Centinari, M.; Vanden Heuvel, J. E.; Goebel, M.; Smith, M. S.; Bauerle, T. L. (2016): Root-zone management practices impact above and belowground growth in Cabernet Franc grapevines. In: *Australian Journal of Grape and Wine Research* 22 (1), S. 137–148. DOI: 10.1111/ajgw.12162.

Chou, Ming-Yi; Heuvel, Justine (2018): Annual Under-Vine Cover Crops Mitigate Vine Vigor in a Mature and Vigorous Cabernet franc Vineyard. In: *Am J Enol Vitic.* 70, ajev.2018.18037. DOI: 10.5344/ajev.2018.18037.

Coniberti, A.; Ferrari, V.; Disegna, E.; Dellacassa, E.; Lakso, A. N. (2018): Under-trellis cover crop and deficit irrigation to regulate water availability and enhance Tannat wine sensory attributes in a humid climate. In: *Scientia Horticulturae* 235, S. 244–252. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.03.018.

Cooper, Chris; Saudners, Rob (2022): Controlling weeds offers frost and yield benefits. Hg. v. Hutchinsons - Crop Production Specialists. o.O. Online verfügbar unter https://www.hutchinsons.co.uk/controlling-weeds-offers-frost-and-yield-benefits/, zuletzt geprüft am 22.06.2024.

Currle, Otto; Bauer, Otmar; Hofäcker, Werner; Schumann, Fritz; Frisch, Wolfgang (1983): Biologie der Rebe. Aufbau, Entwicklung, Wachstum. Neustadt an der Weinstraße: Meininger.

Cussans, G.; Lutman, P.; Berti, A.; Zanin, G.; Garcia Baudin, J. M.; Barralis, G. et al. (1995): HYPP (Hypermédia pour la Protection des Plantes). Malherbologie Encyclopédie en six Langues. CD/ROM. IRNA Editions.

Delta-T Devices Ltd (2016): User Manual for the SM150. Soil Moisture Sensor. Cambridge, Vereinigtes Königreich. Online verfügbar unter https://delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/SM150_Manual_version_1.2.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2023.

Dimitrov, Atanas Georgiev (2005): Integrierte Produktion von Tomaten (Lycopersicon esculentum Mill.) im Gewächshaus unter besonderer Berücksichtigung der integrierten Bekämpfung der Weissen Fliege (Trialeurodes vaporariorum Westwood). Zugl.: Berlin, Humboldt-Univ., Diss., 2005. Berlin: Tenea (Tenea Wissenschaft).

DIN EN ISO 11885:2009-09, Wasserbeschaffenheit_- Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO_11885:2007); Deutsche Fassung EN_ISO_11885:2009.

DIN ISO 10694:1996-08, Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von Organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach Trockener Verbrennung (Elementaranalyse).

Dittrich, Felix; Iserloh, Thomas; Treseler, Cord-Henrich; Hüppi, Roman; Ogan, Sophie; Seeger, Manuel; Thiele-Bruhn, Sören (2021): Crop Diversification in Viticulture with Aromatic Plants: Effects of Intercropping on Grapevine Productivity in a Steep-Slope Vineyard in the Mosel Area, Germany. In: *Agriculture* 11 (2), S. 95. DOI: 10.3390/agriculture11020095.

DLR Rheinpfalz: N-Düngebedarfsermittlung. Merkblatt. Hg. v. DLR Rheinpfalz. Neustadt an der Weinstraße.

Donnini, Silvia; Tessarin, Paola; Ribera-Fonseca, Alejandra; Di Foggia, Michele; Parpinello, Giuseppina Paola; Rombolà, Adamo Domenico (2016): Glyphosate impacts on polyphenolic composition in grapevine (Vitis vinifera L.) berries and wine. In: *Food chemistry* 213, S. 26–30. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.06.040.

Dreisiebner-Lanz, Sabrina (2019): Unterstockbegrünungen: Anforderungen, Versuche, Schlussfolgerungen und Ausblick. Bio Ernte Steiermark / Fachgruppe Technik. o.O.

Europäische Kommission (2019): Der europäische Grüne Deal. Mitteilung der Kommission. Hg. v. Europäische Kommission. Brüssel, Belgien. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN, zuletzt geprüft am 06.07.2024.

Fleishman, Suzanne M.; Eissenstat, David M.; Hoffer, Grant M.; Centinari, Michela (2023): Cover crops and a devigorating rootstock can impart substantial agroecosystem services to high-resource vineyards: A multi-year study. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 344, S. 108287. DOI: 10.1016/j.agee.2022.108287.

Fox, Rolf; Steinbrenner, Peter (2023): Bewuchslenkung statt Unkrautbekämpfung im Unterstockbereich. Bodenpflege, Begrünung, Bodenbearbeitung. Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg. Weinsberg, 03.06.2023. Online verfügbar unter https://lvwo.landwirtschaft-bw.de/,Lde/Startseite/Fachinformationen/Bewuchslenkung+statt+Unkrautbekaempfung+im+Unterstockbereich?LISTPAGE=669638, zuletzt geprüft am 22.06.2024.

Garoglio, P. G. (1971): La nutrition azotic chez la vigne. Sodia: Edit. de l'Academie Bulgare des Sciences, 1977. o.O.

Gärtel, W. (1959): Beobachtungen über den Einfluß der Kaliumernährung auf das Auftreten von Oidium bei Amerikanerreben. Hg. v. Weinberg u. Keller. Traben-Trabach / Mosel (6).

Geisler, G. (1961): Transpirationsuntersuchungen an Reben-Arten im Vergleich zu einer Kultursorte. In: *Pflanzenzüchtung* (31), S. 321–347.

Hanni, Evelyn (2013): Unterstockpflege im Weinbau. Hg. v. Südtiroler Landwirt. Bozen, Italien (11). Online verfügbar unter https://bia.unibz.it/esploro/outputs/journalArticle/Unterstockpflege-im-Weinbau/99100648493590124l/filesAndLinks?institution=39UBZ_INST&index=0, zuletzt geprüft am 28.06.2024.

Herzog, Hans (2020): Why under vine weeding? Hg. v. Hans Herzog. Blenheim, Neuseeland. Online verfügbar unter https://www.herzog.co.nz/blogs/news/why-under-vine-weeding, zuletzt geprüft am 23.06.2024.

Hoffmann, Uwe (Hg.) (2014): Biologischer Weinbau. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Rebe & Wein).

Huth, Claudia (2022): Hochwasservorsorge- bzw. Starkregenkonzept für die Verbandsgemeinde Maikammer. Maßnahmen zum Erosionsschutz im Weinbau. DLR Rheinpfalz - Institut für Weinbau und Oenologie. o.O., 13.04.2022. Online verfügbar unter https://vg-maikammer.de/wp-content/uploads/2022/08/Maikammer-HSK_Massnahmen-zum-Erosionschutz-im-Weinbau_HUTH_13.04.2022.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2024.

Jordan, Lindsay M.; Björkman, Thomas; Vanden Heuvel, Justine E. (2016): Annual Under-vine Cover Crops Did Not Impact Vine Growth or Fruit Composition of Mature Cool-climate ‘Riesling’ Grapevines. In: *hortte* 26 (1), S. 36–45. DOI: 10.21273/HORTTECH.26.1.36.

Karl, Adam; Merwin, Ian A.; Brown, Michael G.; Hervieux, Rebecca A.; Vanden Heuvel, Justine E. (2016): Impact of Undervine Management on Vine Growth, Yield, Fruit Composition, and Wine Sensory Analyses in Cabernet franc. In: *Am J Enol Vitic.* 67 (3), S. 269–280. DOI: 10.5344/ajev.2016.15061.

Keller, Markus (2015): Science of grapevines. Anatomy and physiology. 2nd ed. Amsterdam, Heidelberg: Elsevier Academic Press. Online verfügbar unter http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1606/2014953999-d.html.

Lopes, C.; Monteiro, A.; Rückert, F. E.; Gruber, B.; Steinberg, B.; Schultz, H. R. (2015): Transpiration of grapevines and co-habitating cover crop and weed species in a vineyard. A “snapshot” at diurnal trends. 111 Pages / VITIS - Journal of Grapevine Research, Vol. 43 No. 3 (2004): Vitis. DOI: 10.5073/vitis.2004.43.111-117.

Marks, J. N. J.; Lines, T. E. P.; Penfold, C.; Cavagnaro, T. R. (2022): Cover crops and carbon stocks: How under-vine management influences SOC inputs and turnover in two vineyards. In: *The Science of the total environment* 831, S. 154800. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154800.

Mehofer, Martin; Baumgarten, Andreas; Bauer, Karl; Fardossi, Adel; Kneissl, Gerald; Kührer, Erhard et al. (2014): Sachgerecht Düngung im Weinbau. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Lehr- und Forschungszentrum Wein- und Obstbau. Wien, Österreich.

Mohr, Horst Diedrich (Hg.) (2012): Farbatlas Krankheiten, Schädlinge und Nützlinge an der Weinrebe. 2., überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Ulmer.

Morisod, Thomas (2018): Bodenpflege im Weinbau. Schaffung günstiger Bedingungen für die Entwicklung der Reben. Unter Mitarbeit von P. Droz, S. Emery, Ch. Linder und D. Rojard. Hg. v. AGIDEA. Lausanne, Schweiz.

Morozova, Ksenia; Andreotti, Carlo; Armani, Mariachiara; Cavani, Luciano; Cesco, Stefano; Cortese, Luca et al. (2017): Indirect effect of glyphosate on wine fermentation studied by microcalorimetry. In: *J Therm Anal Calorim* 127 (2), S. 1351–1360. DOI: 10.1007/s10973-016-5891-y.

Parker, E. R.; Jenny, H. (1945): Water infiltration and related soil properties as affected by soil cultivation and organic fertilization. In: *Soil Science* (60), S. 353–376.

Petgen, Matthias (2015): Zur Biologie der Rebe: Was passiert bei Wasserstress? Wasser im Weinberg. DLR Rheinpfalz, Abteilung Weinbau und Oenologie. Neustadt an der Weinstraße, 28.07.2015.

Robinson, D. A.; Campbell, C. S.; Hopmans, J. W.; Hornbuckle, B. K.; Jones, S. B.; Knight, R. et al. (2008): Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological

Watershed-Scale Observatories: A Review. In: *Vadose Zone Journal* 7 (1), S. 358–389. DOI: 10.2136/vzj2007.0143.

Sautter, L. (1971): Einfluss der NPK-Düngung auf die Photosynthese der Reben. Dissertattion. Universität Hohenheim.

Scheidweiler, Mathias (2017): Chancen und Grenzen der gezielten Unterstockbegrünung, Erfahrungen aus Forschung und Praxis. Institut für allgemeinen und ökologischen Weinbau, Hochschule Geisenheim. Internationaler Arbeitskreis für Bodenbewirtschaftung und Qualitätsmanagement im Weinbau. Krems, Österreich, 10.05.2017.

Schumann, Fritz (Hg.) (1998): Weinbau-Lexikon. Neustadt/Weinstraße: Meininger Verl.

Statistisches Bundesamt (2023): Europäischer Green Deal: Klimaneutralität bis 2050. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/GreenDeal/_inhalt.html#, zuletzt aktualisiert am 14.12.2023., zuletzt geprüft am 06.07.2024.

Steinert, Konrad (2017): Leguminosen sind egoistisch. In: *Praxisnah - Züchtung, Produktion, Verwertung* (2).

Vanden Heuvel, Justine (2017): Adopting Under-Vine Cover Crops in Vinifera Vineyards. In: *Appellation Cornell*.

Vanden Heuvel, Justine; Centinari, Michela (2021): Under-Vine Vegetation Mitigates the Impacts of Excessive Precipitation in Vineyards. In: *Frontiers in plant science* 12, S. 713135. DOI: 10.3389/fpls.2021.713135.

VDLUFA (Hg.) (1991): Methodenbuch. Böden (Grundwerk 1991). Speyer (Band I, A2.1.1).

VDLUFA (Hg.) (1996): Methodenbuch. Böden (Grundwerk 1991). Speyer (Band I, D2.1).

VDLUFA (Hg.) (2002a): Methodenbuch. Böden (Grundwerk 1991). Speyer (Band I, A6.1.4.1).

VDLUFA (Hg.) (2002b*): Methodenbuch. Böden (Grundwerk 1991). Speyer (Band I, A6.4.1).

VDLUFA (Hg.) (2004): Methodenbuch. Futtermittel (Grundwerk 1976). Speyer (Band III, 4.1.2).

VDLUFA (Hg.) (2011): Methodenbuch. Umweltanalytik (Grundwerk 2011). Speyer (Band VII, 2.2.2.6).

VDLUFA (Hg.) (2012a): Methodenbuch. Böden (Grundwerk 1991). Speyer (Band I, A6.2.1.1).

VDLUFA (Hg.) (2012b*): Methodenbuch. Böden (Grundwerk 1991). Speyer (Band I, A2.2.5).

VDLUFA (Hg.) (2016): Methodenbuch. Böden (Grundwerk 1991). Speyer (Band I, A5.1.1).

Vukicevich, E.; Lowery, T.; Hart, M. (2019): Effects of living mulch on young vine growth and soil in a semi-arid vineyard. 113-122 Pages / VITIS - Journal of Grapevine Research, Vol 58 No 3 (2019): Vitis. DOI: 10.5073/vitis.2019.58.113-122.

Wang, Qian Janice; Dalsgard, Julie; Giacalone, Davide (2022): Shopping for a sustainable future: Two case studies on consumer perception of organic cotton and wine. In: *Food Quality and Preference* 96, S. 104405. DOI: 10.1016/j.foodqual.2021.104405.

Weggler, Karin (2023): Ähnlicher Ertrag bei geringeren Kosten: Das schaffen Leguminosen im Grünland. Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg. Aulendorf.

Weinbauberater des Beratungsrings (2024): Leitfaden Weinbau 2024. Unter Mitarbeit von Hansjörg Hafner. Hg. v. Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau. Lana (BZ), Italien.

Wild, Jan; Kopecký, Martin; Macek, Martin; Šanda, Martin; Jankovec, Jakub; Haase, Tomáš (2019): Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 268, S. 40–47. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.12.018.

Wolf, T. K. (2008): Wine grape production guide for eastern North America. Hg. v. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service. Ithaca, NY.

Zaller, Johann G.; Cantelmo, Clemens; Santos, Gabriel Dos; Muther, Sandrina; Gruber, Edith; Pallua, Paul et al. (2018): Herbicides in vineyards reduce grapevine root mycorrhization and alter soil microorganisms and the nutrient composition in grapevine roots, leaves, xylem sap and grape juice. In: *Environmental Science and Pollution Research* 25 (23), S. 23215–23226. DOI: 10.1007/s11356-018-2422-3.

Zehner, Susanne; Göttfert, Michael (2015): Knöllchenbakterien: Helfer der Landwirtschaft. In: *Biologie in unserer Zeit* 45 (5), S. 296–302. DOI: 10.1002/biuz.201510573.