

**Untersuchung geeigneter Begrünungspflanzen
im Unterstockbereich von Reben (*Vitis vinifera* L.)
als nachhaltige Alternative zur chemischen und
mechanischen Beikrautregulierung**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktorin der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Agrar-, Ernährungs- und Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Katharina Weihbrecht

aus Heilbronn

Bonn, 2026

Referent: Prof. Dr. Heinrich W. Scherer

Korreferent: Prof. Dr. Ralf Pude

Tag der mündlichen Prüfung: 18.06.2026

Angefertigt mit Genehmigung der Agrar-, Ernährungs- und Ingenieurwissenschaftlichen
Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Vorwort

Diese Arbeit wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes vom Forschungsring des Deutschen Weinbaus (FDW) gefördert und am Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinpfalz in Zusammenarbeit mit der Universität Bonn durchgeführt.

Die Idee zum Projektthema entstand durch die eigene Erfahrung im familiären Weingut und die Berichte von Winzerinnen und Winzern, die auf die Schwierigkeit der mechanischen Unterstockbearbeitung, insbesondere bei Weinbergen in Hanglagen oder bei ungünstigen Witterungsbedingungen, aufmerksam machten. Die veränderten Klimabedingungen und die aktuelle wirtschaftliche Lage in der Weinbranche verstärken die Dringlichkeit, alternative Bodenmanagementmethoden für den Bereich unter den Rebstöcken zu erforschen. Ziel dieser Arbeit ist es, einen wissenschaftlich fundierten Lösungsansatz aufzuzeigen, der sowohl das Potential als auch die praktische Umsetzung einer Unterstockbegrünung im Hinblick auf die genannten Herausforderungen umfasst.

Von Beginn an wurde die Projektidee von Dr. Claudia Huth und Prof. Jochen Bogs wissenschaftlich begleitet. Ich bin sehr dankbar über die gemeinsame Konzipierung und die wertvollen Anregungen zur Umsetzung des Projektes. Dr. Claudia Huth hat durch ihre Leitung der Wasserschutzberatung RLP die Kontakte zu Kooperationsbetrieben vermittelt und die fachliche Relevanz des Themas für die Praxis herausgestellt. Vielen Dank, Claudia, dein Einsatz war für mich eine wertvolle Motivation und eine sehr große Hilfe.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Heinrich W. Scherer für die engagierte Betreuung sowie die konstruktiven und bestärkenden Anregungen. Prof. Dr. Ralf Pude danke ich ebenfalls herzlich für die stets unterstützende Begleitung im Rahmen der Betreuung. Bei Dr. Stefan Pätzold bedanke ich mich für die Kontaktherstellung und fachliche Beratung. Vielen Dank euch allen für die angenehmen Projekttreffen sowie die gute und unkomplizierte Zusammenarbeit.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Weinbau und Oenologie am DLR Rheinpfalz, insbesondere der Gruppe Weinbau, gilt mein Dank für die vielfältige Hilfe bei der Durchführung der Versuche. Besonders möchte ich mich bei den Aushilfskräften und den Mitarbeitern des Staatsweingutes für die praktische Hilfe im Weinberg bedanken.

Außerdem freue ich mich über das große Interesse und das Engagement der Studierenden des Dualen Studienganges für Weinbau und Oenologie am Weincampus Neustadt. Sie haben im Zuge ihrer Bachelorarbeit am Forschungsprojekt mitgewirkt.

Den Winzern danke ich für die Bereitstellung und Bewirtschaftung von Test- bzw. Versuchsfeldern sowie den wertvollen fachlichen Austausch. Durch den Umbau der APV-Sämaschine meines Bruders war es erst möglich, Methoden für die mechanische Einsaat der Unterstockbegrünung zu testen und damit die Praxistauglichkeit herzustellen.

Für die wichtige Unterstützung bedanke ich mich bei meinen Freundinnen und Freunden, meiner Familie und meinem Ehemann. Ohne den Rückhalt, den ihr mir vor allem in sehr arbeitsintensiven Phasen gegeben habt, wäre die Bewerksstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Zusammenfassung

Durch den Klimawandel und den wirtschaftlichen Druck stehen Weinbaubetriebe vor der Herausforderung, nachhaltige Strategien zur Bodenbewirtschaftung und Beikrautregulierung zu entwickeln. Dabei rückt der Unterstockbereich stärker in den Fokus, da er wesentlich zur Wasser- und Nährstoffversorgung der Rebe beiträgt. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, geeignete Begrünungspflanzen für diesen Bereich zu identifizieren, die sich langfristig etablieren, Beikräuter unterdrücken und dabei den Boden und die Reben positiv beeinflussen.

Zu diesem Zweck wurden sechs Begrünungsvarianten mit Arten aus den Familien Fabaceae, Poaceae und Lamiaceae an mehreren Standorten in den Weinbaugebieten Pfalz und Württemberg sowie in ergänzenden Klimakammer-Versuchen geprüft. Im Fokus standen die Etablierungsfähigkeit, die Beikrautregulierung, die Wuchseigenschaften, die Wurzelverteilung sowie die Auswirkungen auf Bodenparameter wie volumetrische Feuchtigkeit, Bodentemperatur, Niederschlagsinfiltration, Nitrat-Auswaschung und die mikrobielle Biomasse. Parallel dazu wurden die Wirkung auf das frühmorgentliche Blattwasserpotential der Rebe, die Traubenstruktur, die Traubengesundheit mit Blick auf *Botrytis cinerea*, der Stockertrag und das Beerengewicht untersucht.

Die Ergebnisse zeigen eine zeitlich begrenzte Etablierung und Wirkung der Klee-Arten *Medicago lupulina* und *Trifolium repens* auf die Beikrautunterdrückung. Die Süßgräser-Art *Festuca rubra*, die Kräuter-Art *Thymus serpyllum* sowie die Kräuter-Komponenten der Mischung „Rebzeilebegrünung“ erwiesen sich als robuste bodenbedeckende Arten mit positiven Effekten auf die Bodenfeuchtigkeit, Temperaturregulation und Reduzierung der *Botrytis cinerea*-Anfälligkeit der Reben. Die Beikrautregulierung gelang über die Dauer am zuverlässigsten mit *Festuca rubra* und der Mischung „Rebzeilenbegrünung“. Diese zeigten jedoch ein vergleichsweise hohes Wachstum und wuchsen zumindest zeitweise in die Traubenzone. Die Unterstockbegrünung beeinflusste sowohl die mikrobielle Biomasse als auch die Infiltrationsrate positiv und zeigte eine Reduktion der Boden-Nitrat-Gehalte. Außerdem war eine Reduktion des frühmorgentlichen Blattwasserpotentials und des Stockertrages feststellbar.

Insgesamt belegt die Studie, dass die Unterstockbegrünung eine vielversprechende Maßnahme für eine zukunftsfähige, ökologisch orientierte Bodenmanagementstrategie ist. Sie kann dazu beitragen, den Einsatz von Herbiziden zu reduzieren, die Bodenstruktur zu stabilisieren und die Traubenqualität zu verbessern. Um das Risiko negativer Folgen wie Trockenstress und Ertragsverlust bei der Rebe zu verringern und eine dauerhafte Beikrautregulierung zu gewährleisten, ist jedoch eine an den Standort angepasste Pflanzenwahl entscheidend.

Abstract

Climate change and economic pressures are challenging wine growers to develop sustainable strategies for soil management and weed control. The area under the vines is becoming increasingly important as it contributes significantly to the water and nutrient supply of the vines. The aim of this study was to identify suitable cover crops for this area that establish themselves in the long term, suppress weeds and positively affect the soil or the vines.

To this purpose, six cover crop variants with species from the Fabaceae, Poaceae, and Lamiaceae families were tested at several locations in the wine-growing regions of Pfalz and Württemberg, as well as in supplementary climate chamber experiments. The focus was on establishment ability, weed control, growth characteristics, root distribution, and effects on soil parameters such as volumetric moisture, soil temperature, precipitation infiltration, nitrate leaching, and microbiological biomass. At the same time, the effect on the early morning leaf water potential of the vine, the grape structure, grape health in relation to *Botrytis cinerea*, vine yield, and berry weight were investigated.

The results show a temporary establishment and effect of the clover species *Medicago lupulina* and *Trifolium repens* on weed suppression. The Poaceae species *Festuca rubra*, the herb species *Thymus serpyllum* and the herb components of the “Rebzeilenbegrünung” mixture proved to be robust ground-covering species with positive effects on soil moisture, temperature regulation, and reduction of *Botrytis cinerea* susceptibility in the vines. Weed control was most reliable over the entire period with *Festuca rubra* and the “Rebzeilenbegrünung” mixture. However, these showed comparatively high growth and, at least temporarily, grew into the grape zone. Under-vine cover crops had a positive effect on both microbial biomass and infiltration rate and showed a reduction in soil nitrate levels. In addition, a reduction in early morning leaf water potential and vine yield was observed.

Overall, the study shows that under-vine cover crops is a promising measure for a sustainable, ecologically oriented soil management strategy. It can help reduce the use of herbicides, stabilize soil structure, and improve grape quality. However, in order to reduce the risk of negative consequences such as drought stress and yield loss in vines and to ensure long-term weed control, it is crucial to select plants that are adapted to the site.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung.....	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
Glossar	XV
1 Einleitung.....	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Bodenmanagement im Unterstockbereich von Reben als qualitätsorientierte Maßnahme	3
2.2 Beikrautregulierung durch den Einsatz von Begrünungspflanzen und deren Einfluss auf rebphysiologische und bodenanalytische Parameter	8
3 Material und Methoden	15
3.1 Auswahl der Begrünungspflanzen	16
3.1.1 Bewertungskriterien.....	16
3.1.2 Untersuchung vorausgewählter Begrünungspflanzen	18
3.1.3 Begrünungsvarianten zur Bewertung als Unterstockbegrünung	23
3.2 Versuche unter kontrollierten Bedingungen	26
3.2.1 Wachstum der Begrünungspflanzen auf unterschiedlichen Bodenarten....	27
3.2.2 Wasser- und Nährstoffverbrauch der Begrünungspflanzen.....	30
3.2.3 Trockenheitsverträglichkeit der Begrünungspflanzen.....	31
3.2.4 Herbizidverträglichkeit der Begrünungspflanzen	33
3.3 Freilandversuche.....	35
3.3.1 Versuchsflächen	35
3.3.2 Versuchsvarianten.....	38
3.3.3 Witterungsverlauf	43
3.4 Wachstum der Pflanzen	46
3.4.1 Bodendeckung nach LONDO	46
3.4.2 Beikrautregulierende Wirkung	46
3.4.3 Maximale Wuchshöhe.....	47
3.4.4 Oberirdische Frisch- und Trockenmasse	47
3.4.5 Wurzelmasse	47

3.4.6	Pflanzenanalytik	48
3.5	Einfluss der Begrünungspflanzen auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens	49
3.5.1	Volumetrische Bodenfeuchte, Boden- und Lufttemperatur	49
3.5.2	Infiltrierte Wassermenge (Kick-Brauckmann-Kulturgefäße)	50
3.5.3	Infiltrationsrate	50
3.5.4	Bodenanalytik.....	51
3.6	Einfluss der Begrünungspflanzen auf rebphysiologische Parameter	52
3.6.1	Frühmorgentliches Blattwasserpotential	52
3.6.2	Biegegrad für Lockerbeerigkeit	53
3.6.3	<i>Botrytis cinerea</i> Befallshäufigkeit und Befallsstärke.....	53
3.6.4	Stockertrag	53
3.6.5	Einzelbeerengewicht	54
3.6.6	Traubenmostanalytik.....	54
3.7	Datenauswertung	55
4	Ergebnisse	57
4.1	Versuche unter kontrollierten Bedingungen	57
4.1.1	Wachstum der Pflanzen	57
4.1.2	Wasser- und Nährstoffverbrauch der Begrünungspflanzen.....	58
4.1.3	Trockenheitsverträglichkeit der Begrünungspflanzen.....	62
4.1.4	Herbizid-Verträglichkeit der Begrünungspflanzen	64
4.2	Freilandversuche.....	67
4.2.1	Wachstum der Pflanzen	68
4.2.1.1	Bodendeckung der Begrünungsvarianten auf verschiedenen Versuchsstandorten	68
4.2.1.2	Beikrautregulierung der Varianten auf verschiedenen Versuchsstandorten	73
4.2.1.3	Maximale Wuchshöhe der Pflanzen	80
4.2.1.4	Oberirdische Frischmasse und Wurzelmasse	81
4.2.2	Einfluss der Begrünungspflanzen auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens	83
4.2.2.1	Volumetrische Bodenfeuchte und Bodentemperatur	83
4.2.2.2	Infiltrationsrate und Bodenanalytik	86
4.2.3	Einfluss der Begrünungspflanzen auf rebphysiologische Parameter	87

4.2.3.1	Frühmorgentliches Blattwasserpotential	88
4.2.3.2	Traubenqualität und -quantität	91
5	Diskussion	98
5.1	Bewertung der Begrünungspflanzen als Maßnahme zur Beikrautregulierung	98
5.1.1	Etablierung auf Weinbau-Standorten	98
5.1.2	Verträglichkeit gegenüber Vollsonne und Halbschatten	102
5.1.3	Trockenheitsverträglichkeit	103
5.1.4	Winterhärte	104
5.1.5	Herbizid-Verträglichkeit	104
5.1.6	Keimfähigkeit bei Licht und niedrigeren Temperaturen	106
5.1.7	Schnelle und dauerhafte Bodenbedeckung	108
5.1.8	Beikrautregulierende Wirkung	109
5.1.9	Geringer Wasser- und Nährstoffbedarf	110
5.1.10	Niedrige Wuchshöhe	112
5.1.11	Geringe Wurzeltiefe	113
5.1.12	Saatgutverfügbarkeit	114
5.2	Eignung einer Unterstockbegrünung als mögliche Alternative zu chemischen und mechanischen Bodenmanagementverfahren	115
5.3	Ausblick und Perspektiven für die weinbauliche Praxis	121
6	Fazit	124
7	Literaturverzeichnis	127
8	Anhang	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spontanvegetation mit teilweise „kritischen“ Beikräutern (links) und traditionelle Beikrautregulierung mit maschineller Bearbeitung und Herbizid-Applikation (rechts), erstellt mit BioRender.com.	7
Abbildung 2: Systematische Literaturanalyse nach MENGIST et al. (2020) zur Begrünung im Unterstockbereich von Reben ("Under Vine Cover Crop"), Suchdatum: 03.01.2025 unter Scopus.com.....	9
Abbildung 3: Potentiale einer Unterstockbegrünung im Weinbau, erstellt mit BioRender.com.	10
Abbildung 4: Aufbau des Versuchsdesigns.	15
Abbildung 5: Zeitlicher mittlerer Verlauf der Lufttemperatur (+ 15 cm), Oberflächentemperatur (+ 2 cm), Bodentemperatur (- 6 cm) (°C) und volumetrische Bodenfeuchte (- 6 cm) (cm ³ /cm ³) im Zeitraum 01.04.2021 bis 28.05.2021 in Kontrollvarianten (n = 3) der Versuchsfläche MAULBERG.	19
Abbildung 6: <i>Medicago lupulina</i> L. (MASCLEF 1893).....	23
Abbildung 7: <i>Festuca rubra</i> L. (KOPS 1853).	23
Abbildung 8: <i>Thymus serpyllum</i> L. (CHAUMETON 1844).....	24
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen (STOMA GmbH 2025).	26
Abbildung 10: Zeitlicher mittlerer Verlauf der Lufttemperatur (+ 15 cm), Oberflächentemperatur (+ 2 cm), Bodentemperatur (- 6 cm) (°C) und volumetrischen Bodenfeuchte (- 6 cm) (cm ³ /cm ³); links: Versuchsreihe (VR) 1 mit sandigem Lehm Boden (sL) im Zeitraum 14.02.2022 (Tag 0 = Einsaat) bis 24.05.2022 (Tag 99 = Versuchsende) in Kontrollvarianten (n = 3); Mitte und rechts: Versuchsreihe (VR) 2 mit Sandboden (S) und tonigem Lehm Boden (tL) im Zeitraum 22.07.2022 (Tag 0 = Einsaat) bis 24.09.2022 (Tag 64 = Versuchsende) in Kontrollvarianten (n = 2).	29
Abbildung 11: Zeitlicher mittlerer Verlauf der Lufttemperatur (+ 15 cm), Oberflächentemperatur (+ 2 cm), Bodentemperatur (- 6 cm) (°C) und volumetrischen Bodenfeuchte (- 6 cm) (cm ³ /cm ³); links: hohe Bewässerung (W+) und rechts: reduzierte Bewässerung (W-), jeweils mit sandigem Lehm Boden (sL) im Zeitraum 03.05.2023 (Tag 0 = Einsaat) bis 28.09.2023 (Tag 148 = Versuchsende) in Kontrollvarianten (n = 4).	33
Abbildung 12: Versuchsvarianten in der Fläche HUMO: V0 = Kontrolle, V1 = Mechanisch, V2 = Chemisch, V3 = Begr_Med (<i>Medicago lupulina</i>), V4 = Begr_Fes (<i>Festuca rubra</i>), V5=Begr_Thym (<i>Thymus serpyllum</i>), V6 = Begr_MixR (Mischung „Rebzeilenbegrünung“), V7 = Begr_MixM (Mischung „Mythopia 3“), Einsaat am 15.09.2021, Fotoaufnahmen vom 15.05./19.07.2023 (Bildquellen: K. Weihbrecht).	41
Abbildung 13: Linienverlauf von gemittelten Tagestemperaturen (°C) ca. 2 m über dem Boden und Niederschlagssummen (mm) als Balken über den Versuchszeitraum (Daten: Agrarmeteorologie RLP 2025); gemessen an der Wetterstation am DLR Rheinpfalz in Mussbach, Neustadt/Wstr. (49.36832° N, 8.18546° E, 140 m ü. NN, Entfernung der Luftlinie nach HUMO: 630 m / MECKEN: 1,4 km; Einsaattermin: 15./16.09.2021.	44

- Abbildung 14:** Linienverlauf von gemittelten Tagestemperaturen (°C) ca. 2 m über dem Boden und Niederschlagssummen (mm) als Balken über den Versuchszeitraum (Daten: Agrarmeteorologie RLP 2025) ; gemessen an der Wetterstation in Ruppertsberg, Bad Dürkheim (49.39447° N, 8.19233° E, 140 m ü. NN, Entfernung der Luftlinie nach DEIDES: 2,4 km; Einsaattermin: 31.08.2022.....44
- Abbildung 15:** Linienverlauf von gemittelten Tagestemperaturen (°C) ca. 2 m über dem Boden und Niederschlagssummen (mm) als Balken über den Versuchszeitraum (Daten: Meteostat 2025); gemessen an der Wetterstation in Öhringen (49.2167° N, 9.5167° E, 276 m ü. NN), Entfernung der Luftlinie nach BRETZ: 10,1 km; Einsaattermin: 23.05.2022.....45
- Abbildung 16:** Schema des TMS-Datenloggers zur Erfassung der Bodenfeuchte und der Temperatur im Boden bzw. über der Bodenoberfläche (WILD et al. 2019).49
- Abbildung 17:** Die von TOMST® zur Verfügung gestellte Kalibrationsfunktion für die Bestimmung der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit bei lehmigem Sand (WILD et al. 2019)..50
- Abbildung 18:** Entwicklung des Deckungsgrades (%) (links) der Begrünungsvarianten über 64 Tage nach Einsaat auf den Bodenarten Sand (S), sandiger Lehm (sL) und toniger Lehm (tL); dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 3$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.....57
- Abbildung 19:** Entwicklung der maximalen Wuchshöhe (cm) der Begrünungsvarianten über 64 Tage nach Einsaat auf den Bodenarten Sand (S), sandiger Lehm (sL) und toniger Lehm (tL); dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 3$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.....58
- Abbildung 20:** Links: Oberirdische Frischmasse (g), Mitte: oberirdische Trockenmasse (g) und rechts: Wurzelmasse (g) pro Kulturgefäß der Begrünungsvarianten 99 Tage nach Einsaat auf der Bodenart sandiger Lehm; Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Tukey-HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) mit sqrt-Transformation bei Wurzelmasse; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.59
- Abbildung 21:** Volumetrische Bodenfeuchte (%) der Begrünungsvarianten mit Kontrolle (ohne Einsaat) auf sandigem Lehm; links: 12 bis 40 Tage nach Einsaat (TnE), Mitte: 41 bis 69 Tage nach Einsaat, rechts: 70 bis 98 Tage nach Einsaat; dargestellt sind Boxplots ($n = 3$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Zeitraumes: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.60
- Abbildung 22:** Infiltrierte Wassermenge (g) der Begrünungsvarianten mit Kontrolle (ohne Einsaat) auf sandigem Lehm von Tag 16 bis 99 nach Einsaat; Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 3$); unterschiedliche Buchstaben: Tukey-HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.60
- Abbildung 23:** Oben: Gehalte an Makronährstoffen (g/kg TS), unten: Gehalte an Mikronährstoffen (mg/kg TS) in der oberirdischen Biomasse der Begrünungsvarianten nach 98 Tagen nach Einsaat; Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb der Nährstoffgruppe: Tukey-HSD-Test nach

- ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für Zink; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*. 61
- Abbildung 24:** Oben: Deckungsgrad der Einsaaten (%), Mitte: Deckungsgrad der Streu (%), unten: Maximale Wuchshöhe (cm) der Einsaaten unter verschiedenen Bewässerungsvarianten (hohe Bewässerung: W+, geringe Bewässerung: W-) nach 34, 82/86 und 148 Tagen nach Einsaat (TnE); Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*. *Starke Trockenstresssymptomatik und Befall von Gewächshaus-Mottenschildlaus (*Trialeurodes vaporariorum*) 63
- Abbildung 25:** Keimlänge (mm) von *Medicago lupulina* (Begr_Med) in Abhängigkeit der Konzentrationsstufen (0 bis 5) der Herbizid-Wirkstoffe Flazasulfuron (Flaz), Glyphosat (Glyph) und ihrer Kombination (Flaz + Glyph); Säulen zeigen die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Herbizid-Variante: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); gepunktete Linien sind lineare Regressionen der Keimlängen über alle Konzentrationsstufen je Herbizid-Variante (Regressionsgleichungen und R^2 -Werte siehe oben rechts)..... 65
- Abbildung 26:** Keimlänge (mm) von *Festuca rubra* (Begr_Fes) in Abhängigkeit der Konzentrationsstufen (0 bis 5) der Herbizid-Wirkstoffe Flazasulfuron (Flaz), Glyphosat (Glyph) und ihrer Kombination (Flaz + Glyph); Säulen zeigen die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Herbizid-Variante: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); gepunktete Linien sind lineare Regressionen der Keimlängen über alle Konzentrationsstufen je Herbizid-Variante (Regressionsgleichungen und R^2 -Werte siehe oben rechts)..... 66
- Abbildung 27:** Keimlänge (mm) von *Thymus serpyllum* (Begr_Thym) in Abhängigkeit der Konzentrationsstufen (0 bis 5) der Herbizid-Wirkstoffe Flazasulfuron (Flaz), Glyphosat (Glyph) und ihrer Kombination (Flaz + Glyph); Säulen zeigen die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Herbizid-Variante: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); gepunktete Linien sind lineare Regressionen der Keimlängen über alle Konzentrationsstufen je Herbizid-Variante (Regressionsgleichungen und R^2 -Werte siehe oben rechts)..... 67
- Abbildung 28:** Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort HUMO; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für 2022 und 2023, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“. 68
- Abbildung 29:** Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort MECKEN; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für 2022, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2023 und 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym =

Thymus serpyllum, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“. 69

Abbildung 30: Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort DEIDES; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bei 2023, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“. 70

Abbildung 31: Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort BRETZ; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bei 2023, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_Prun = *Prunella vulgaris* und Begr_Trif = *Trifolium repens*. 71

Abbildung 32: Durchschnittliche Deckungsgrade (%) der Begrünungspflanzen ($> 10\%$) aus der Begrünungsvariante Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Begr_MixR) im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES. 72

Abbildung 33: Durchschnittliche Deckungsgrade (%) der Begrünungspflanzen ($> 10\%$) aus der Begrünungsvariante Mischung „Mythopia 3“ (Begr_MixM) im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES. 73

Abbildung 34: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort HUMO; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 74

Abbildung 35: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort MECKEN; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 75

Abbildung 36: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort DEIDES; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2023, HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“. 76

Abbildung 37: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort BRETZ; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$)

mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_Prun = *Prunella vulgaris* und Begr_Trif = *Trifolium repens*. 77

Abbildung 38: Durchschnittliche Deckungsgrade (%) der Beikräuter (> 10 %) in der Kontrollvariante im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES und BRETZ. 78

Abbildung 39: Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad verschiedener Begrünungsvarianten (%) und deren beikrautunterdrückender Wirkung (%); Daten vom Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES und BRETZ; dargestellt sind lineare Regressionsanalysen für Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“. Angegeben sind die Regressionsgleichungen und die Bestimmtheitsmaße (R^2). 79

Abbildung 40: Maximale Wuchshöhe (cm) verschiedener Pflanzenarten; Daten vom Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES und BRETZ; Messung von zwölf Individuen einer Pflanzenart pro Messzeitpunkt und Fläche unabhängig der Versuchsglieder; dargestellt sind Boxplots mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR (Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_Trif = *Trifolium repens*. *Excl. *Hord. murinum* 80

Abbildung 41: Gesamte oberirdische Frischmasse (links) und Wurzelmasse abzügl. Rebwurzeln (rechts, unterteilt nach Bodentiefen) in g/m^2 in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO vom 07.10.2024 (oberirdische Frischmasse) bzw. 07.11.2024 (Wurzelmasse); Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Tukey-HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für Wurzelmasse 15 bis 30 cm; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 82

Abbildung 42: Volumetrische Bodenfeuchte (cm^3/cm^3) in 6 cm Tiefe in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO im Zeitraum 2022 bis 2024 jeweils Mai bis September; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 83

Abbildung 43: Volumetrische Bodenfeuchte (cm^3/cm^3) in 40 cm Tiefe in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO im Zeitraum 2022 bis 2024 jeweils Mai bis September; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 84

Abbildung 44: Bodentemperatur (°C) in 6 cm Tiefe in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO im Zeitraum 2022 bis 2024 jeweils Mai bis September; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 85

Abbildung 45: Links: Infiltrationsrate (mm/min) am 24.07.2024, Mitte: Gehalt an organischem Kohlenstoff (% TS) in 0 bis 15 cm Bodentiefe am 21.08.2024 und rechts: mikrobielle Biomasse (mg/100 g TS) in 0 bis 15 cm Bodentiefe am 21.08.2024; dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) bei Infiltrationsrate; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 86

Abbildung 46: Nitrat-N (mg/kg) in 0 bis 30 cm Bodentiefe zu unterschiedlichen Messzeitpunkten; dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) bzw. HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für Mai 2023 (Yeo-Johnson-Transformation) Nov 2023 und Nov 2024; Mittelwerte wurden Ausreißer-bereinigt; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis). 87

Abbildung 47: Frühmorgentliches Blattwasserpotential (Ψ) in MPa unter verschiedenen Bodenmanagementvarianten an vier Standorten (HUMO, MECKEN, DEIDES, BRETZ) in den Jahren 2022 bis 2024 zu den Entwicklungsstadien BBCH 63 bis 65 (Beginn der Blüte bis Vollblüte), BBCH 75 bis 77 (Erbsengröße bis Beginn Traubenschluss), BBCH 81 (Beginn der Reife) und BBCH 89 (Vollreife); dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für BRETZ zum BBCH 81 in 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = 89

Abbildung 48: Biplots der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit PERMANOVA-Ergebnissen für die Jahre 2023 (oben) und 2024 (unten) der Versuchsfläche HUMO, die die Effekte verschiedener Bodenmanagementvarianten auf verschiedene Rebenparameter darstellen. Die Ellipsen zeigen die 95 %-Konfidenzintervalle der jeweiligen Varianten ($n = 4$). Die Pfeile markieren die Variablen, die zur Trennung der Varianten beitragen, darunter BodDe = (Gesamt-)Bodendeckung (%), LockerBe = Lockerbeerigkeit (°), BotBH = *Botrytis cinerea* Befallshäufigkeit (%), BotBS = *Botrytis cinerea* Befallsstärke (%), MoGew = Mostgewicht (°Oe), StErt = Stockertrag (kg), BeGew = Einzelbeerengewicht (g); die PERMANOVA-Ergebnisse (F- und p-Werte) sind oben rechts dargestellt; Begrünungsvarianten mit mind. 30 % Deckung: Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum* (ab 2024), Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“. 92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definitionen häufig verwendeter Fachbegriffe aus der weinbaulichen Praxis.....	XV
Tabelle 2: Bewertungskriterien für die Auswahl geeigneter Pflanzenarten für die Unterstockbegrünung.....	16
Tabelle 3: Begrünungsvarianten mit Saatstärke lt. Herstellerangaben und Ergebnissen der Wachstumsbewertung aus Vorversuch; NA = Not Available (ohne Ergebnis).	20
Tabelle 4: Begrünungsvarianten der Versuche unter kontrollierten Bedingungen mit Bezugsquelle und Saatstärke (g) für die Anzucht in Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen.	27
Tabelle 5: Varianten getestet auf verschiedenen Substraten (Bodenarten) mit Angabe der Bodenanalysenergebnisse vom 30.11.2022 der LUFA Speyer.....	28
Tabelle 6: Gießmengen (ml) pro Kulturgefäß mit demineralisiertem Wasser an den verschiedenen Tagen nach Einsaat (TnE) der Versuchsreihen 1 und 2.	30
Tabelle 7: Varianten mit verschiedenen Gießmengen (ml) pro Kulturgefäß mit demineralisiertem Wasser und Angaben der Bodenanalysen-Ergebnisse vom 29.04.2023. ...	31
Tabelle 8: Gießmengen (ml) pro Kulturgefäß mit demineralisiertem Wasser an den verschiedenen Tagen nach Einsaat (TnE).	32
Tabelle 9: Varianten des Petrischalen-Versuchs mit Konzentrationsstufen der Herbizide Katana® (Flazasulfuron) und Boom effekt® (Glyphosat), die sich aus den Mischverhältnissen von destilliertem (dest.) Wasser zu Herbizid ergeben.....	34
Tabelle 10: Verschiedene Versuchsflächen der Freilandversuche mit Ergebnissen der Bodenanalysen (LUFA Speyer, 17.09.21/17.11.22) vor Versuchsbeginn im Unterstockbereich in 0 bis 30 cm aus einer repräsentativen Mischprobe (Bodenanalyse: Kap. 3.5.4).	36
Tabelle 11: Begrünungsvarianten der Freilandversuche mit Bezugsquelle und Saatstärke (g/m ²).	39
Tabelle 12: Übersicht der Varianten und angewandten Methoden mit Messzeitpunkten der Freilandversuche.	42
Tabelle 13: Untersuchte Nährstoffe der Pflanzenanalytik durch die LUFA Speyer.	48
Tabelle 14: Untersuchte Parameter der Bodenanalytik durch die LUFA Speyer.....	51
Tabelle 15: Ergebnisse der Gesamt-Bodendeckung sowie der Parameter der Traubenqualität und –quantität der einzelnen Bodenmanagementvarianten in den Jahren 2022 bis 2024 der Versuchsfläche HUMO; dargestellt sind Mittelwerte ± Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$).....	94

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ANOVA	A nalysis of V ariance (Varianzanalyse)
BBCH	Biologische B undesanstalt, B undessortenamt und C hemische Industrie (Skala)
Begr_Fes	Begrünungsvariante mit Rot-Schwingel (<i>Festuca rubra rubra</i>)
Begr_Med	Begrünungsvariante mit Gelbklee (<i>Medicago lupulina</i>)
Begr_MixM	Begrünungsvariante mit Mischung „Mythopia 3“
Begr_MixR	Begrünungsvariante mit Mischung „Rebzeilenbegrünung“
Begr_Spon	Begrünungsvariante mit Spontanvegetation (Kontrolle)
Begr_Thym	Begrünungsvariante mit Sand-Thymian (<i>Thymus serpyllum</i>)
BRETZ	Versuchsfläche „Bretzfeld“
C _{org}	Organischer Kohlenstoff
CRD	C ompletely R andomized D esign (Vollständig randomisierter Versuchsplan)
DEIDES	Versuchsfläche „Deidesheim“
DLR	D ienstleistungszentrum L ändlicher R aum
EC	E lectrical c onductivity (Elektrische Leitfähigkeit)
et al.	et alii (und andere)
FDR	F requency D omain R eflectometry (Verfahren zur Bestimmung der Bodenfeuchte)
FDW	F orschungsring des D eutschen W einbaus
FR	F ar-red (Fernrotstrahlung)
FTIR	F ourier- T ransform-Infrarotspektroskopie
GPS	G lobal P ositioning S ystem
HUMO	Versuchsfläche „Hundertmorgen Nord“
LAI	L eam A rea I ndex (Blattflächen Index)
LUFA	L andwirtschaftliche U ntersuchungs- und F orschungsanstalt
MECKEN	Versuchsfläche „Meckenheimer Straße“
n	Anzahl bzw. Stichprobengröße
N _{min}	Mineralischer Stickstoff (Nitrat + Ammonium)
NDVI	N ormalized D ifference V egetation I ndex (Normierter Differenz-Vegetationsindex)
p	Wahrscheinlichkeitswert (p-Wert) zur statistischen Signifikanzprüfung
PAR	P hotosynthetically A ctive R adiation (Photosynthetisch aktive Strahlung)
RCBD	R andomized C omplete B lock D esign (Randomisierte vollständige Blockanlage)
SD	S tandard D eviation (Standardabweichung)
SOC	S oil O rganic C arbon (Bodenorganischer Kohlenstoff)
TDT	T ime- D omain- T ransmissometry (Verfahren zur Bestimmung der Bodenfeuchte)
TnE	T age n ach E insaat
TS	Trockensubstanz
UV	Ultraviolett
VR	Versuchsreihe

Glossar

Tabelle 1: Definitionen häufig verwendeter Fachbegriffe aus der weinbaulichen Praxis.

Begriff	Definition
<i>Rebanlage:</i>	
Begrünung	In der Weinbaupraxis wird unter einer Begrünung das spontane Wachstum oder eine Einsaat von Pflanzen verstanden, welche häufig in der Gasse (Gassenbegrünung) stattfindet (MÜLLER et al. 2019).
Rebgasse/ Gasse	Begrünte oder unbegrünte Abschnitte zwischen den Rebzeilen zum Befahren mit schmalspurigen Traktoren (MÜLLER et al. 2019).
Rebzeile/ Zeile	Zeile bzw. Reihe, in der die Rebstöcke gepflanzt sind.
Unterstockbereich	Umfasst den gesamten Bodenbereich um den Rebstock (30 bis 50 cm Breite) (MÜLLER et al. 2019).
Traubenzone	Der Bereich des Rebstockes, in dem sich die Weintrauben befinden.
Laubwand	Die Laubwand erstreckt sich von Kopfbereich des Rebstockes bis zum Ende der Triebspitzen.
Junganlage	Eine junge Rebanlage, in der noch kein Vollertrag bzw. noch keine Produktion von Weintrauben möglich ist (MÜLLER et al. 2019).
Ertragsanlage	Ab dem dritten Standjahr (= vier Jahre nach der Pflanzung) wird die Rebanlage als Ertragsanlage bezeichnet (MÜLLER et al. 2019).
<i>Technische Geräte für den Einsatz im Unterstockbereich von Reben:</i>	
Scheibenpflug	Der Scheibenpflug ist ein Gerät für die schnelle mechanische Unterstockbearbeitung. Die Hohlzscheibe wird leicht schräg entlang der Rebzeile geführt und wirft somit den Boden unter die Zeile. Damit werden Beikräuter unter den Rebstöcken abgedeckt und im Wuchs gehemmt (Braun Maschinenbau GmbH 2023).
Rollhacke	Das Arbeitsprinzip gleicht dem des Scheibenpfluges, wobei anstelle der Hohlzscheibe zwei bis vier Sternelemente montiert sind. Die Rollhacke lockert und bewegt den Boden entlang der Stocklinie und stört dabei die Entwicklung der Beikräuter im Unterstockbereich (Braun Maschinenbau GmbH 2023).
Mulcher	Ein Mulcher ist ein Gerät zum Abmähen oder Abschlagen und Zerkleinern von Pflanzen. Die zerkleinerten Pflanzenteile bleiben als Mulch liegen (WALG 2016).
Unterstockkreisel/ Kreiselkrümmer	Ein oder mehrere Zinkenpaare (Kreisel) bewegen sich versetzt hintereinander, entlang einer horizontalen Kreisbahn. Dadurch bearbeiten sie den Boden im Unterstockbereich (Bearbeitungsbreite ca. 30 cm) flach und zerstören aktiv das Wurzelwerk der Beikräuter. Mit Hilfe einer Tastertechnologie schlägt das Gerät vor dem Rebstock aus und dahinter wieder ein, sodass der Bereich um den Rebstock effizient bearbeitet wird (Braun Maschinenbau GmbH 2023).

1 Einleitung

Der Weinbau steht im Zuge des Klimawandels vor großen Herausforderungen, die ein Überdenken der traditionellen Bewirtschaftungsmethoden notwendig machen: Die Zunahme von Frühjahrs- und Sommertrockenheit einerseits und Starkregenereignissen andererseits führen zu einer unvorhersehbaren Wasserverfügbarkeit und machen ein nachhaltiges Wasser- und Bodenmanagement unabdingbar. Dem Boden direkt unter den Rebstöcken kommt dabei eine zentrale Rolle zu, da sich hier ein Großteil der Rebwurzeln befindet (LINARES TORRES et al. 2018) und dieser Bereich maßgeblich die Versorgung der Rebe mit Wasser und Nährstoffen beeinflusst.

Traditionell wird der Unterstockbereich entweder durch den Einsatz von Herbiziden oder durch mechanischen Bodenbearbeitungsgeräten von Beikräutern freigehalten. Dadurch soll die Gesundheit der Reben und damit die gewünschte Qualität und Quantität der Trauben gewährleistet werden. Der Einsatz von Herbiziden ist jedoch aufgrund möglicher Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit umstritten (JACQUET et al. 2021). Die konventionelle mechanische Bearbeitung stellt eine alternative Methode dar, die auch in ökologisch zertifizierten Betrieben eingesetzt werden kann. Allerdings sind auch hier Nachteile zu verzeichnen, insbesondere hinsichtlich der Erosionsanfälligkeit, der Gefahr von Stockverletzungen, des erhöhten Arbeitsaufwandes und der damit verbundenen Energie-, Maschinen- und Personalkosten sowie der erschwerten Umsetzbarkeit, hauptsächlich im Steillagenweinbau (HANNI 2009; STEINKELLNER 2019).

Vor dem Hintergrund aktueller umweltpolitischer Entwicklungen, wie den Zielen des europäischen Green Deals zur Reduktion von Pestiziden und Nährstoffverlusten, gewinnt die Suche nach nachhaltigen Alternativen an Bedeutung. Eine vielversprechende Option ist die gezielte Begrünung des Unterstockbereichs. Durch die Etablierung konkurrenzschwacher, bodendeckender Pflanzenarten können Beikräuter effektiv unterdrückt und gleichzeitig positive Effekte auf die Bodenstruktur und die Biodiversität erzielt werden (ABAD et al. 2022; GUERRA et al. 2022).

Bisherige Studien zeigen aber auch, dass die Etablierung einer gezielten Unterstockbegrünung auf Standorten mit geringer Wasserverfügbarkeit oder hohem Beikrautdruck mit gewissen Herausforderungen verbunden sein kann (DITTRICH et al. 2021; KARL et al. 2016a). Darüber hinaus können in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen und der Pflanzenwahl auch negative Folgen für die Rebe, wie beispielsweise reduzierte Rebwüchsigkeit und Ertragsverlust, auftreten (CHOU & VANDEN HEUVEL 2018; CONIBERTI et al. 2018a).

Die vorliegende Arbeit greift diese Aspekte auf und hat zum Ziel, die Unterstockbegrünung als nachhaltige Maßnahme zur Beikrautregulierung zu prüfen und eine standortangepasste Auswahl geeigneter Begrünungspflanzen zu identifizieren. Im Fokus stehen Pflanzenarten aus den Familien der Leguminosen (Fabaceae), Süßgräser (Poaceae) und Lippenblütler (Lamiaceae), die hinsichtlich ihrer Wuchseigenschaften sowie ihres Einflusses auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens und auf die Traubenproduktion der Rebe bewertet werden. Ihre Wirksamkeit zur Beikrautunterdrückung wird im Vergleich zu einer Spontanbegrünung, einer chemischen Variante sowie einer mechanischen Bodenbearbeitung untersucht.

Die Versuche fanden auf Rebflächen mit unterschiedlichen Standortbedingungen statt, die sich in Bodenart, Klimabedingungen, Hangneigung und Bewirtschaftungshistorie unterscheiden. Nur dadurch konnten differenzierte Aussagen zum Etablierungserfolg und zur beikrautregulierenden Wirkung der Begrünungen getroffen werden. Darüber hinaus wurde untersucht, ob sich begrünte Systeme hinsichtlich Bodenfeuchte und -temperatur, Infiltrationsvermögen, Nährstoffauswaschung sowie Indikatoren für die Bodenfruchtbarkeit von chemisch oder mechanisch offen gehaltenen Böden unterscheiden.

Die Freilanduntersuchungen wurden durch kontrollierte Untersuchungen im Gewächshaus ergänzt, um Wachstumseigenschaften und die Effekte einzelner Pflanzenarten auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens und damit auch den möglichen Einfluss auf das Rebewachstum zu konkretisieren.

2 Literaturübersicht

2.1 Bodenmanagement im Unterstockbereich von Reben als qualitätsorientierte Maßnahme

Eine Begrünung der Rebgasse in Form einer Spontanvegetation oder durch etablierte Pflanzen nach einer Einsaat gehört mittlerweile zur guten fachlichen Praxis. Der Bereich direkt unter den Rebstöcken wird hingegen meist vegetationsfrei gehalten (ZIEGLER 2012).

Es gibt mehrere Gründe für das Entfernen von spontan auftkommenden Beikräutern: Beikräuter im Unterstockbereich können eine starke Wasser- und Nährstoffkonkurrenz für die Rebe darstellen und die Traubenproduktion gefährden (SUSAJ et al. 2013; WALG 2016). Bestimmte Vertreter der Standortflora sind besonders problematisch, da sie als Alternativwirte für Pathogene und Schädlinge gelten. Als Wirtspflanzen für die Winden-Glasflügelzikade, ein potentieller Überträger der Stolbur-Krankheit bei Reben, zählen beispielsweise die Ackerwinde (*Convolvulus arvensis*) und die Große Brennnessel (*Urtica dioica*) (MAIXNER et al. 2013; STEINKELLNER 2019). Gemeine Quecke (*Elymus repens*), Ackerschachtelhalm (*Equisetum arvense*) und Schwarzer Nachtschatten (*Solanum nigrum*) sind sehr schwer zu regulieren und breiten sich daher stark aus (WALG 2016). Gleiches gilt für ausdauernde Beikräuter, die sich über ihr dichtes Wurzelgeflecht ausbreiten. Dazu gehören der Schachtelhalm (*Equisetum* spp.), der Stumpfbblättrige Ampfer (*Rumex obtusifolius*) und die Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*) (GEHRING 2011). Beikräuter, wie Weißer Gänsefuß (*Chenopodium album*), Amarant (*Amaranthus* spp.) (GEHRING 2011), Kompasslattich (*Lactuca serriola*) (CHADHA et al. 2019) und Kanadisches Berufkraut (*Erigeron canadensis*) (VANHIE et al. 2020), sind Beispiele für schnell wachsende und schossende einjährige Samenbeikräuter, die innerhalb kurzer Zeit enorme Wuchshöhen erreichen und so in die Traubenzone einwachsen können. Als Folge einer dadurch geringeren Abtrocknung der Trauben sowie einer erschwerten Applikation von Pflanzenschutzmitteln können vermehrt Schädlinge, wie die Kirschessigfliege oder Pilzkrankheiten, wie die Grauschimmelfäule (*Botrytis cinerea*) und der Falsche Mehltau (*Plasmopara viticola*), auftreten.

Die Entwicklung einiger der genannten kritischen Beikräuter könnte sich künftig durch steigende Temperaturen und ausbleibende Frühjahrs- und Sommerniederschläge weiter verstärken. So könnten wärmeliebende Arten, insbesondere C4-Pflanzen, wie Hirse- oder Amarant-Arten, vermehrt auftreten. Zudem begünstigen länger andauernde und häufigere Trockenperioden die Ausbreitung von mehrjährigen Wurzelbeikräutern, Arten mit Überdauerungsorga-

nen sowie an Trockenheit angepassten invasiven Arten wie dem Stachel-Lattich (*Lactuca serriola*) und dem Kanadischen Berufkraut (*Erigeron canadensis*) (CHADHA et al. 2019; GEHRING 2011).

Obwohl gezeigt werden konnte, dass die Nutzung einer natürlichen Vegetation als dauerhafte Abdeckung unter Reben zu einer Verbesserung der Bodengesundheit beitragen kann, z. B. durch eine erhöhte mikrobielle Aktivität (CHOU et al. 2018; GRIESSER et al. 2022), bleibt das Risiko negativer Auswirkungen durch kritische Beikräuter bestehen. Regelmäßiges Mähen, etwa mit einem Unterstockmulcher, kann erforderlich sein, um eine übermäßige Pflanzenhöhe zu vermeiden (MAINARDIS et al. 2020). Das Kurzhalten der Vegetation kann kurzfristig als Wasserbewirtschaftungsstrategie dienen, indem es die Konkurrenz der Begrünung um Bodenwasser vorübergehend reduziert. Allerdings begünstigt das Mähen auch mehrjährige Pflanzenarten mit tiefreichenden Wurzeln und Speicherorganen, die an ein schnelles Nachwachsen angepasst sind (MAINARDIS et al. 2020).

Eine wesentliche Einschränkung bei der Verwendung natürlicher Vegetation ist die fehlende Kontrolle über die Pflanzenzusammensetzung, was zur Ausbreitung unerwünschter oder konkurrenzstarker Arten führen kann.

Die Regulierung von unerwünschten Beikräutern im Unterstockbereich von Reben durch chemische oder mechanische Freihaltung stellt demnach eine bewährte Strategie dar. In den meisten konventionell wirtschaftenden Weinbaubetrieben kommen hierfür hauptsächlich nichtselektive oder breit wirksame Herbizide zum Einsatz. Im deutschen Weinbau sind zur Beikrautregulierung derzeit die Herbizidwirkstoffe Glyphosat, Cycloxydim, Fluazifop, Flumioxazin, Flazasulfuron, Propyzamid, Pelargonsäure, und Napropamid mit Einschränkungen zugelassen (BVL 2025; DLR MOSEL 2025; LVWO WEINSBERG 2025). Diese Mittel unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wirkungsweise:

- Glyphosat wirkt systemisch als Blattherbizid und hemmt das Enzym 5-Enolpyruvylshikimat-3-phosphat-Synthase (EPSPS) im Shikimat-Stoffwechselweg, der für die Bildung aromatischer Aminosäuren notwendig ist. Dadurch wird die Eiweißsynthese gestört, was zum Absterben der behandelten Pflanzen führt (DUKE 2020).
- Cycloxydim ist ein systemisch wirkendes Graminizid, das über die Blätter aufgenommen wird und die Fettsäuresynthese durch Hemmung des Enzyms Acetyl-CoA-Carboxylase (ACCase) blockiert (WILLOUGHBY & FORSTER 2022).
- Fluazifop bzw. Fluazifop-p-butyl gehört zur Gruppe der Aryloxyphenoxypropionate, wird über das Blatt aufgenommen, im Gewebe zu Fluazifop hydrolysiert und stört ebenfalls die Fettsäuresynthese selektiv in Süßgräsern (ROKICH et al. 2009).

- Flumioxazin ist ein nichtselektives Blatt- und Bodenherbizid mit Kontaktwirkung. Es hemmt die Chlorophyllbildung (BIGOT et al. 2007).
- Flazasulfuron wird über Wurzeln und Blätter aufgenommen und hemmt die Aminosäuresynthese, stört die Zellteilung und beeinträchtigt dadurch das Pflanzenwachstum von einkeimblättrigen (Gräser) und zweikeimblättrigen Beikräutern (MAGNÉ et al. 2006).
- Propyzamid ist ein wurzelwirksamer Herbizid-Wirkstoff, der nach Aufnahme über die Wurzeln das Wachstum v. a. von einkeimblättrigen Gräsern durch Hemmung der Mikrotubuli-Bildung während der Zellteilung blockiert (WILLOUGHBY & FORSTER 2022).
- Pelargonsäure ist eine natürlich vorkommende Fettsäure und wirkt als breit wirksames Kontaktmittel: Sie lagert sich in Zellmembranen ein und verursacht deren Undichtigkeit. Zudem führt die durch Sonnenlicht ausgelöste Bildung von Singulett-Sauerstoff zu einer Lipid-Peroxidation der Membranen, woraus ein schnelles Absterben und Austrocknen der Pflanze resultiert (CIRIMINNA et al. 2019).
- Napropamid ist ein Bodenherbizid, das vorwiegend als Voraufbrauchmittel eingesetzt wird. Es wirkt, indem es die Zellteilung in keimenden Pflanzen hemmt und so das Aufkommen von ein- und zweikeimblättrigen Beikrautarten verhindert (QI et al. 2015).

Glyphosat ist das am häufigsten eingesetzte Herbizid in der EU (Europäische Kommission 2020). Im Bereich des Obst- und Weinbaus werden, je nach Anbaugebiet, zwischen 65 und 100 % der konventionellen Anbauflächen mit Glyphosat behandelt (SCHULTE et al. 2016). In Deutschland lag der jährliche Glyphosat-Verbrauch 2019 bei etwa 3.060 Tonnen (BMEL 2022). Der weitaus überwiegende Teil des Verbrauchs entfällt auf die Landwirtschaft, wovon etwa 20 % auf den Obst, Gemüse- und Weinbau zurückgehen (LFL BAYERN 2016). Aufgrund der hohen Wirksamkeit und Schwierigkeit des Einsatzes maschineller Unterstockbearbeitung vor allem im Steillagen-Weinbau wird aktuell in vielen konventionell arbeitenden Weinbaubetrieben der Unterstockbereich mittels Glyphosat behandelt. Glyphosat steht wegen seiner negativen Auswirkungen auf die Umwelt und Biodiversität sowie neuerdings auch auf die menschliche Gesundheit in der Kritik (JACQUET et al. 2021; VAN BRUGGEN et al. 2021). Die Zulassung von Glyphosat ist von der Europäischen Kommission am 28. November 2023 um zehn Jahre verlängert worden, sodass der Wirkstoff nun bis zum 15. Dezember 2033 in der EU zugelassen ist (BMEL 2024). Der Einsatz ist jedoch streng reguliert: Während der Einsatz anderer Herbizide in der Regel nur in Naturschutzgebieten verboten ist, gilt für Glyphosat ein Anwendungsverbot sowohl in Naturschutz- als auch in Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebieten mit Rechtsverordnung (BMEL 2024).

Herbizide werden generell wegen ihrer Umweltauswirkungen in Frage gestellt (ABAD et al. 2020). Einige Studien aus dem Weinbau haben gezeigt, dass Herbizide die Wurzelmykorrhizierung von Reben und die Anzahl bestimmter Bodenmikroorganismen reduzieren sowie die Nährstoffzusammensetzung in Wurzeln, Blättern, Most und Xylemsaft von Weinreben verändern können (CHOU et al. 2018; WINTER et al. 2018; ZALLER et al. 2018). Diese Veränderungen können die alkoholische Gärung und somit die Weinqualität negativ beeinflussen (MOROZOVA et al. 2017).

Die mechanische Beikrautregulierung ist eine Alternative zur Herbizid-Behandlung und wird insbesondere im ökologischen Weinbau eingesetzt (RENAUD-GENTIÉ et al. 2019). Dabei kommen spezielle, für den Unterstockbereich entwickelte Gerätetypen zum Einsatz, wie etwa Scheibenpflug, Rollhacke, Fingerhacke, Flachschar, Bürsten- oder Mulchgeräte (WALG 2016). Diese Geräte sind in der Regel an einem Schmalspurtraktor montiert und häufig mit einer sensorgesteuerten Technik ausgestattet, die eine rebenschonende Bearbeitung ermöglicht. Durch die Anschaffung der Geräte sowie die aufgrund der geringeren Dauerwirkung notwendigen häufigeren Bodenbearbeitungen entstehen im Vergleich zur Herbizid-Anwendung deutlich höhere Kosten (JACQUET et al. 2021; STEINKELLNER 2019). Zudem erschweren Weinberglagen mit Seitenhang, Steilhang oder Terrassen ebenso wie ungünstige Bodenbeschaffenheiten (schwere, tonhaltige oder sehr trockene Böden) den Einsatz der Geräte. Neben der Art der eingesetzten Technik, der Lage und der Bodeneigenschaften bestimmt die Art und Dichte des Unterstockbewuchses sowie der Stockabstand den Erfolg einer Unterstockpflege (WALG 2016). Gründe für geringe Erfolge der Beikrautregulierung sind beispielsweise ein zu hoher Bewuchs, Witterungsbedingungen, eine unpassende Wahl und Einstellung der Geräte sowie ein schnelles Wiederaanwachsen von Beikräutern (MANZONE et al. 2020). Beim maschinellen Einsatz in der Nähe des Rebstockes besteht das Risiko einer Wurzel- oder Stammverletzungen der Rebe. Ferner können unerwünschte Inselbildung durch Anhäufung der Erde sowie Schollenbildung auftreten (WALG 2016). Eine mechanische Unterstockbearbeitung hat auch ökologische Belastungen zur Folge: Eine Bodenstörung im Zusammenhang mit der mechanischen Bodenbearbeitung führt zum Abbau organischer Substanz (FERREIRA et al. 2020), verändert die Population von Bodenmikroorganismen, verringert die Wasserinfiltration und erhöht die Bodenerosionsanfälligkeit sowie die Nitrat-Freisetzung (ABAD et al. 2020; BEN-SALEM et al. 2018).

Die Europäische Kommission hat einen Aktionsplan entwickelt, der darauf abzielt, den Einsatz und das Risiko von chemischen und gefährlichen Pestiziden sowie Nährstoffverluste bis 2030 um 50 % zu reduzieren (BREMNER et al. 2021). Im Weinbau betreffen diese Anforderungen

nicht nur die Applikation von Herbiziden, sondern auch den Einsatz mechanischer Bodenbearbeitungsgeräte. Durch die Bodenbewegung wird die Mineralisation gefördert, was zu einer verstärkten Nährstofffreisetzung führen kann und dadurch das Risiko der Nitrat-Auswaschung erhöht. Darüber hinaus kann es bei offengehaltenen Unterstockbereichen zu Nährstoffverlusten durch Bodenerosion kommen. Aufgrund der politischen Dringlichkeit und der genannten möglichen Nachteile chemischer oder mechanischer Verfahren besteht ein hoher Forschungsbedarf an alternativen Methoden zur Unterstockbearbeitung.

In der Abbildung 1 sind die jeweiligen Auswirkungen eines Nichteingreifens sowie die Anwendung traditioneller Maßnahmen zur Beikrautregulierung für den Unterstockbereich dargestellt.

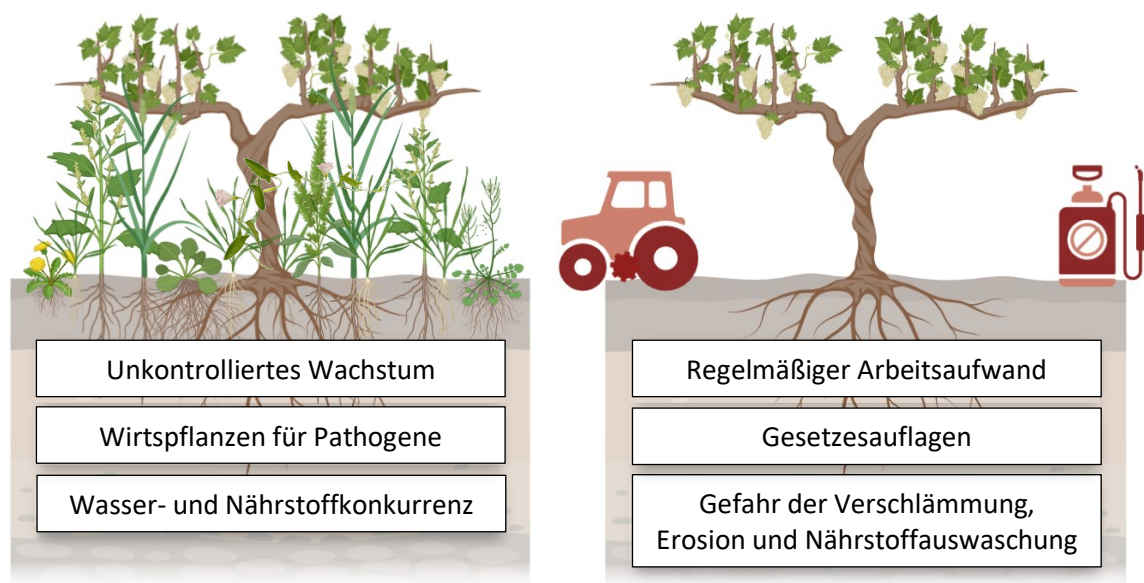


Abbildung 1: Spontanvegetation mit teilweise „kritischen“ Beikräutern (links) und traditionelle Beikrautregulierung mit maschineller Bearbeitung und Herbizid-Applikation (rechts), erstellt mit BioRender.com.

Um unerwünschte Beikräuter zu beseitigen bzw. zu unterdrücken, wurden als Alternative zum Herbizid-Einsatz und einer mechanischen Bearbeitung bereits verschiedenste Lösungsansätze erprobt. Dazu gehören beispielsweise eine thermische Behandlung durch Abflammen, Heißwasser, Heißschaum oder Heißdampf (PERGHER et al. 2019). Ebenso stellt eine elektrische Beikrautregulierung, wie das Electroherb-Verfahren der Herstellerfirma Zasso eine Alternative dar (LANG et al. 2022; PETGEN & KURZ 2019). Weitere Lösungsansätze zeigen sich in der Ausbringung diverser Abdeckungsmaterialien im Unterstockbereich, z. B. Grasschnitt, Stroh, Rindenmulch oder Holzhäcksel. Außerdem beschäftigen sich aktuelle Studien mit dem Einsatz einer spritzbaren Mulchschicht aus einer ölasierten Natriumalginat-Verbindung und einer wasserbasierten Stärkeverbindung, welche eine physikalische Barriere bildet und somit die Keimung und das Wachstum von Beikräutern unterdrückt (FOLLAK et al. 2024). Viele der alternativen

Verfahren besitzen einen hohen Ressourcenverbrauch in Form von natürlichen Rohstoffen, Wasser und Energie oder sind technisch schwer umsetzbar (FOLLAK et al. 2024; LANG et al. 2022; REGNERY 2013).

Anstelle einer Mulchschicht aus eingebrachten Rohstoffen besteht die Möglichkeit, eine lebendige Streuschicht in Form einer Begrünung aufzubauen und zur Beikrautregulierung zu nutzen. Welche Erkenntnisse die bisherige Forschung hierzu geliefert hat, wird im folgenden Kapitel erläutert.

2.2 Beikrautregulierung durch den Einsatz von Begrünungspflanzen und deren Einfluss auf rebphysiologische und bodenanalytische Parameter

Bei der Betrachtung von Strategien zur Bewältigung von unerwünschten Beikräutern gibt es bereits Empfehlungen aus dem Garten- oder Ackerbau, gezielt Pflanzen einzusetzen, um den gewünschten Effekt einer Beikrautregulierung zu erreichen (BAUER & HENSEL 2019; BRUST et al. 2014). Begrünungspflanzen sind in der Lage, die unerwünschte Standortflora zu verdrängen, um Ressourcen zu konkurrieren und allelopathische Verbindungen freizusetzen (STURM et al. 2018). Die hohe Empfindlichkeit von Beikräutern gegenüber Beschattung könnte der Hauptgrund für die unterdrückende Wirkung von Begrünungspflanzen sein, allerdings haben noch keine Studien diesen Zusammenhang geklärt (CABRERA-PÉREZ et al. 2024). Außerdem beeinflusst die erzeugte Biomasse die Lichtverfügbarkeit für Beikräuter und führt zur Nährstoffkonkurrenz (DEN HOLLANDER et al. 2007). Die Senkung der Bodentemperatur und -feuchtigkeit kann ebenso Einfluss auf die Keimung von Beikrautsamen nehmen (TEASDALE & MOHLER 1993). In einer Studie wurde die Unterdrückung von Beikräutern auf die Besiedlung von Bakterien und Pilze auf Beikrautsamen zurückgeführt, die durch mikrobielle Veränderungen im Boden durch Begrünungspflanzen hervorgerufen werden (NGOUAJIO & MCGIFFEN 2002). Die Mechanismen der Beikautregulierung durch Begrünungspflanzen sind sehr vielfältig und für den Einsatz im Unterstockbereich aufgrund der in Kapitel 2.1 aufgezählten Risiken durch Beikräuter und möglicher Nachteile durch traditionelle Methoden als zielführend anzusehen.

Eine Unterstockbegrünung im Weinbau als Alternative zur chemischen und mechanischen Freihaltung wurde bisher jedoch in sehr reduzierter Anzahl an Forschungsarbeiten evaluiert (Abbildung 2, Seite 9).

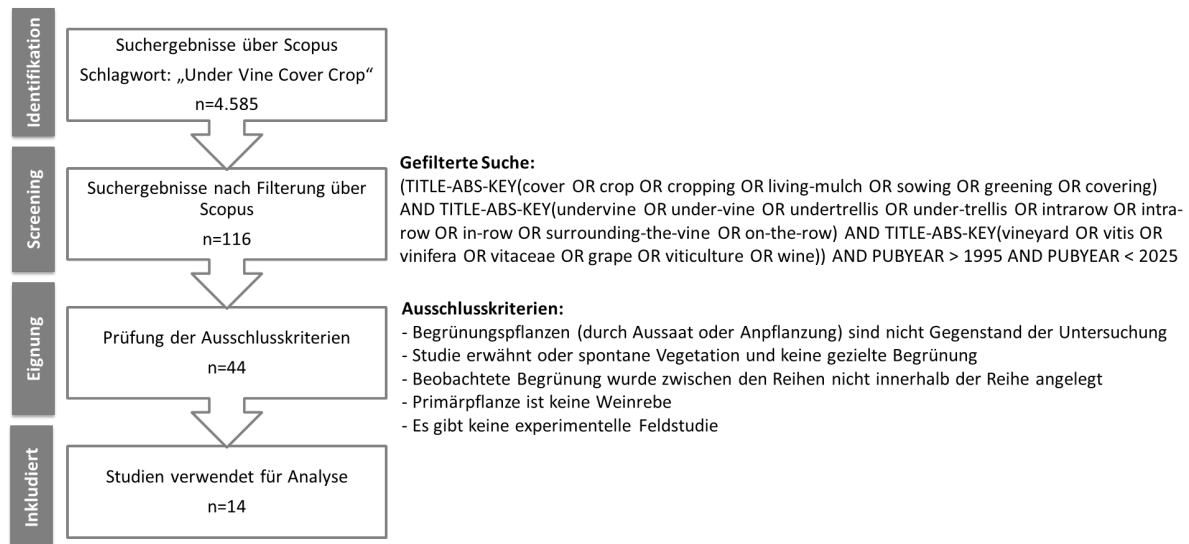


Abbildung 2: Systematische Literaturanalyse nach MENGIST et al. (2020) zur Begrünung im Unterstockbereich von Reben ("Under Vine Cover Crop"), Suchdatum: 03.01.2025 unter Scopus.com.

Die systematische Literaturrecherche in der Datenbank Scopus zeigt: Etwa 65 % der nach Filterung berücksichtigten Publikationen stammen aus den letzten zehn Jahren (2015 bis 2024) und weisen eine steigende Tendenz auf, was auf ein zunehmendes Forschungsinteresse hinweist. Insgesamt 51 % der Arbeiten sind auf den europäischen Weinbau und einzelne Studien (4 %) auf den deutschen Weinbau zurückzuführen. Nach Anwendung der Ausschlusskriterien konnten 44 Studien für die Vorrecherche dieser Arbeit genutzt werden. Davon wurden 14 Studien zusammen mit weiteren Arbeiten aus der allgemeinen Literaturrecherche im folgenden Abschnitt zur Darstellung des aktuellen Forschungsstands zur Unterstockbegrünung herangezogen.

Einige dieser Studien haben gezeigt, dass der Einsatz von Begrünungspflanzen im Unterstockbereich von Reben eine wirksame Methode der Beikrautregulierung darstellt (ABAD et al. 2022; CENTINARI 2017; CENTINARI et al. 2016; GUERRA et al. 2022; VUKICEVICH et al. 2019). Der 0,3 bis 0,5 m breite Unterstockbereich entspricht bei 2 m Gassenbreite 15 bis 25 % der gesamten Rebfläche. Dieser Bereich kann durch den Anbau von Pflanzen auf vielfältige Weise ökologisch aufgewertet werden (Abb. 3, Seite 10).

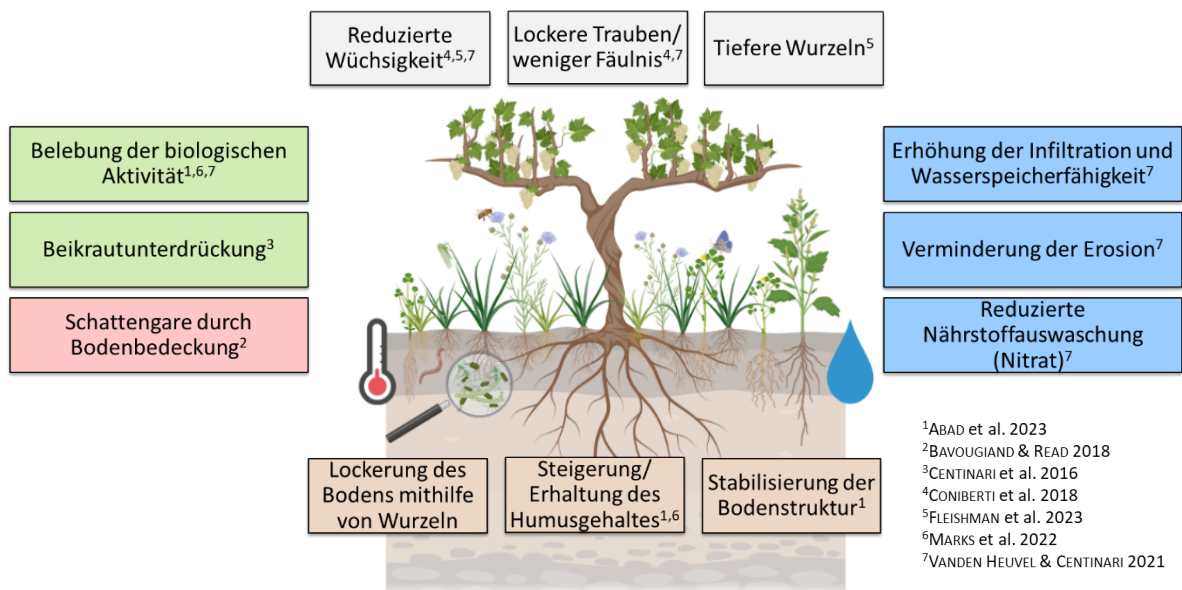


Abbildung 3: Potentiale einer Unterstockbegrünung im Weinbau, erstellt mit BioRender.com.

Neben ihrer Rolle zur Beikrautunterdrückung tragen Begrünungspflanzen zur Verbesserung der biologischen Vielfalt bei, indem sie die Wurzelentwicklung, die Bodenfauna und die Insektenvielfalt fördern (VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021), die biologische Bodenaktivität unterstützen (MARKS et al. 2022), den Nährstoffkreislauf schließen und die langfristige Bodenfruchtbarkeit verbessern (ABAD et al. 2023). Außerdem können Begrünungspflanzen den Gehalt an organischer Substanz im Boden erhöhen und verbessern die Bodenstruktur (ABAD et al. 2023; MARKS et al. 2022). Aus hydrologischer Sicht können Begrünungspflanzen die Infiltrationsrate des Bodens erhöhen und den Oberflächenabfluss verringern, was dazu beiträgt, Bodenerosion, Verschlammung und Nährstoffauswaschung, insbesondere Nitrat-Verluste, zu verhindern (VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021). Darüber hinaus beeinflusst die Bodenbedeckung durch Pflanzen das Mikroklima, indem sie starke Schwankungen der Bodentemperatur verringert und vor Überhitzung schützt sowie die Dynamik der Bodenfeuchtigkeit verändert (BAVOUGIAN & READ 2018). Diese Effekte verbessern die Resilienz von Weinbergen, insbesondere bei Klimaschwankungen, wie extremen Niederschlagsereignissen oder langanhaltenden Trockenperioden. Die Auswirkungen einer Unterstockbegrünung auf die Erhöhung der Bodenfeuchtigkeit sind jedoch nach wie vor unzureichend belegt. Während Studien darauf hindeuten, dass Begrünungspflanzen die Wasserinfiltration und -speicherung erhöhen (VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021), deuten andere darauf hin, dass sie mit den Weinreben um Wasser konkurrieren können, insbesondere in trockenen Klimazonen (BAVOUGIAN & READ 2018).

Auch die Auswirkungen von Unterstockbegrünungen auf das Wachstum von Reben sind nicht immer eindeutig. Einige Untersuchungen haben gezeigt, dass Begrünungspflanzen durch die Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe die Wuchskraft der Reben reduzieren (FLEISHMAN et al.

2023; GIESE et al. 2014; KARL et al. 2016a) und die geringere Blattfläche und damit auch Assimilatverfügbarkeit zu einer geringeren Trauben- und Beerengröße führen kann (CHOU & VANDEN HEUVEL 2018; CONIBERTI et al. 2018b). Eine Verringerung der Wuchskraft der Reben kann in stark wüchsigen Rebanlagen von Vorteil sein, da lockerere Trauben das Risiko der Traubenfäule (*Botrytis cinerea*) reduzieren (CONIBERTI et al. 2018a; FLEISHMAN et al. 2023; VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021). In semi-ariden Regionen können Begrünungen den Trockenstress jedoch verstärken und zu geringeren Erträgen führen (FLEISHMAN et al. 2023). Gleichzeitig wird durch eine Unterstockbegrünung die Wurzellängendichte in tieferen Bodenschichten erhöht, was zu einer verbesserten Widerstandsfähigkeit gegen Trockenheit führt (FLEISHMAN et al. 2023). Die Grenze zwischen vorteilhafter und schädlicher Konkurrenz ist bislang nicht eindeutig definiert und bedarf weiterer Forschung (VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021).

Die Auswirkungen der Unterstockbegrünung auf die Rebe hängen stark vom Alter der Reben (GIESE et al. 2014; JORDAN et al. 2016) sowie von der Art der verwendeten Begrünungspflanzen ab. Die Wahl der passenden Pflanzenart richtet sich nach standorttypischen (z. B. Bodenart, Boden-pH-Wert) und klimatischen Bedingungen sowie den Bewirtschaftungsstrategien des Betriebes (MARKS et al. 2022).

In den untersuchten Studien zeigte sich, dass insbesondere Leguminosen (Fabaceae), Süßgräser (Poaceae) sowie kriechende Pflanzen für die Unterstockbegrünung geeignet sind. Aufgrund ihrer schnellen und dichten Bodendeckung wurden Leguminosen bisher als besonders gut geeignet eingestuft, da sie dadurch Beikräuter regulieren können. Darunter haben sich folgende niedrigwachsende Arten für eine Unterstockbegrünung bewährt: Michelis-Klee (*Trifolium michelianum*), Kleinköpfiger Schneckenklee (*Medicago polymorpha*), Gelbklee (*Medicago lupulina*) und Gestutzter Schneckenklee (*Medicago truncatula*) (CAPRI et al. 2023) sowie der Hornklee (*Lotus corniculatus*) (ABAD et al. 2020; CAPRI et al. 2023; VUKICEVICH et al. 2019), Weißklee (*Trifolium repens*) (DREISIEBNER-LANZ 2020; KARL et al. 2016b) und Erdbeer-Klee (*Trifolium fragiferum*) (ABAD et al. 2020). Allerdings weisen viele Arten der Fabaceae aufgrund ihrer intensiven Biomasseproduktion vergleichsweise hohe Transpirationsraten auf (CAPRI et al. 2023), was insbesondere auf Standorten mit begrenztem Wasserangebot berücksichtigt werden muss. Als geeignet gilt in diesem Zusammenhang beispielsweise *Medicago polymorpha*, da diese Art trotz guter Bodenbedeckung und Biomasseproduktion einen moderaten Wasserverbrauch hat (CAPRI et al. 2023). Zu berücksichtigen ist auch, dass Leguminosen aufgrund ihrer Symbiose mit Knöllchenbakterien auf Standorten mit geringen Humus- und Nitrat-Gehalten (z. B. sandige Böden) ohne zusätzliche Stickstoffdüngung etabliert werden können. Die Knöllchenbakterien fixieren den Luftstickstoff, wandeln diesen enzymatisch in Ammonium um

und leiten ihn direkt über das Xylem in die Pflanzen. Auf diese Weise kann die Begrünungspflanze Biomasse aufbauen, ohne Nitrat aus dem Boden aufnehmen zu müssen. Nach der Seneszenz oder gezielten Einarbeitung der Leguminosenbiomasse wird der gebundene Stickstoff durch mikrobielle Prozesse mineralisiert und nitrifiziert, sodass das entstehende Nitrat von den Rebwurzeln aufgenommen werden kann (KARL et al. 2016b; WISE & WALTER-PETERSON 2018). Allerdings ist das Risiko einer Nitrat-Auswaschung bei verschiedenen als Unterstockbegrünung eingesetzten Leguminosen bislang nicht bekannt (VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021).

Süßgräser (Poaceae) erwiesen sich ebenfalls als geeignete Begrünungspflanzen mit einer hohen Anpassungsfähigkeit. Hierbei wurden insbesondere mehrjährige Schwingel-Arten genannt, wie Schaf-Schwingel (*Festuca ovina*) (DREISIEBNER-LANZ 2020; GIESE et al. 2014), Furchen-Schwingel (*Festuca rupicola*) (DREISIEBNER-LANZ 2020), Rot-Schwingel (*Festuca rubra*) (BAVOUGIAN & READ 2018; FLEISHMAN et al. 2023; VUKICEVICH et al. 2019) und Rohr-Schwingel (*Festuca arundinacea*) (CENTINARI 2017; CHOU & VANDEN HEUVEL 2018; GIESE et al. 2014). Weitere mögliche Süßgräser-Arten sind Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne*) (CAPRI et al. 2023; GIESE et al. 2014), Büffelgras (*Bouteloua dactyloides*) (VUKICEVICH et al. 2019) und Wiesen-Rispengras (*Poa pratensis*) (CAPRI et al. 2023). Die Gräser unterscheiden sich in einem breiten Spektrum hinsichtlich ihres Wasserverbrauchs und ihrer Biomassebildung. Beispielsweise zeigte Schaf-Schwingel im Vergleich zu den meisten der genannten Süßgräser die geringste Transpirationsrate, wies jedoch gleichzeitig eine reduzierte Biomasseproduktion auf (CAPRI et al. 2023).

Kriechende Pflanzenarten, wie das Kleine Habichtskraut (*Hieracium pilosella*), die Gundelrebe (*Glechoma hederacea*) und des Fünffingerkraut (*Potentilla reptans*) kombinierten eine vollständige Bodenabdeckung mit niedrigem Wasserverbrauch und eignen sich dadurch besonders für den Unterstockbereich in Trockenlagen (SCHMID & HANNI 2015). In Deutschland wurden zudem Gewöhnlicher Oregano (*Origanum vulgare*) und Gewöhnlicher Thymian (*Thymus vulgaris*) als Begrünungspflanzen im Unterstockbereich erprobt (DITTRICH et al. 2021). Da die Aussaat der Pflanzen teuer ist und die Etablierung einer Bodendeckung lange dauert, wurden in beiden Studien Setzlinge ausgepflanzt (DITTRICH et al. 2021; SCHMID & HANNI 2015). Obwohl die Ansiedlung auf diese Weise erfolgreich war, ist sie aufgrund der Anzucht und Auspflanzung der Begrünungspflanzen sowie der Entfernung unerwünschter Beikräuter sehr zeit- und kostenaufwendig (SCHMID & HANNI 2015).

Als weitere Möglichkeit zur Unterstockbegrünung wurden Buchweizen (*Fagopyrum esculentum*) und Rübsen (*Brassica rapa*) (CENTINARI et al. 2016), Gewöhnliches Hirtentäschel (*Capsella bursa-pastoris*) (VUKICEVICH et al. 2019) sowie Radieschen (*Raphanus sativus*) und Gewöhnliche Wegwarte (*Cichorium intybus*) (CHOU & VANDEN HEUVEL 2018) erfolgreich getestet.

Auffällig ist, dass sich einige Studien mit einjährigen Bodendeckern als Unterstockbegrünung beschäftigen, insbesondere in Regionen wie dem Nordosten der USA. Die Begrünungspflanzen dienen vorwiegend dazu, in niederschlagsreichen Regionen die Wuchskraft zu reduzieren und müssen jedes Jahr neu angelegt werden, um den Anbaupraktiken zu entsprechen (CENTINARI et al. 2016; CHOU & VANDEN HEUVEL 2018; JORDAN et al. 2016). Im Gegensatz zu einjährigen Begrünungen erfordern mehrjährige Begrünungen nur eine einmalige Bodenvorbereitung und Einsaat und bilden im Idealfall eine langfristige Bodendeckung (CENTINARI et al. 2016). Dies reduziert den Bewirtschaftungsaufwand, da keine wiederholte Bodenbearbeitung oder Herbizid-Anwendungen erforderlich sind, was im Laufe der Zeit zu Kosteneinsparungen bei Arbeits-, Kraftstoff- und Materialkosten führt (VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021).

Die Studien verdeutlichen jedoch auch, dass die Standortbedingungen (Bodenstruktur, Wasserverfügbarkeit, Klima) eine entscheidende Rolle bei der Auswahl geeigneter Begrünungspflanzen spielen. Die Anpassung der Pflanzen an lokale Boden- und Klimabedingungen bestimmt maßgeblich den Etablierungserfolg sowie den Einfluss auf Bodenressourcen und Rebenwachstum. Dabei ist eine ausreichende Bodenbedeckung unerlässlich, um unerwünschte Beikräuter effektiv zu unterdrücken und die gewünschten positiven Effekte auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt sowie die Bodenstruktur zu erzielen (STAHR et al. 2020; VUKICEVICH et al. 2019).

Aus dem Kontext aktueller Studien sowie dem bestehenden Forschungsbedarf insbesondere im deutschen Weinbau ergab sich folgende Forschungsfrage: *Welche Pflanzen eignen sich als Begrünung im Unterstockbereich von Reben (Vitis vinifera L.), um eine nachhaltige Alternative zur chemischen und mechanischen Beikrautregulierung zu bieten, unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf Boden und Rebe?*

Anhand der Forschungsfrage und dem aktuellen Stand der Forschung wurden die folgenden Hypothesen als Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit festgelegt:

H₁: Die Begrünungspflanzen unterscheiden sich je nach Art in ihren Wuchseigenschaften sowie ihrer Wasser- und Nährstoffaufnahme und damit auch in ihrem potentiellen Einfluss auf die Rebe.

H₂: Begrünungspflanzen können über mehrere Jahre im Unterstockbereich etabliert werden und das Beikrautwachstum regulieren.

H₃: Ein begrünter Boden weist im Vergleich zu einem offenen Boden, erzielt durch mechanische oder chemische Verfahren, eine geringere Auswaschung von Nitrat, geringere Bodentemperaturen, eine Pufferwirkung auf die Bodenfeuchtigkeit (Verzögerung der Austrocknung und Abfangen von Starkregenereignissen), ein höheres Infiltrationsvermögen und langfristig eine höhere Bodenfruchtbarkeit (Humusgehalt, mikrobielle Aktivität, Wurzelwachstum) auf.

H₄: Eine Unterstockbegrünung beeinflusst die Traubenproduktion der Rebe, z. B. durch Auflockerung der Traubenstruktur, geringere *Botrytis cinerea*-Infektion der Trauben und Reduzierung des Traubenertrages.

3 Material und Methoden

Die Untersuchung geeigneter Begrünungspflanzen für den Unterstockbereich erfolgte in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten. Das Versuchsdesign ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

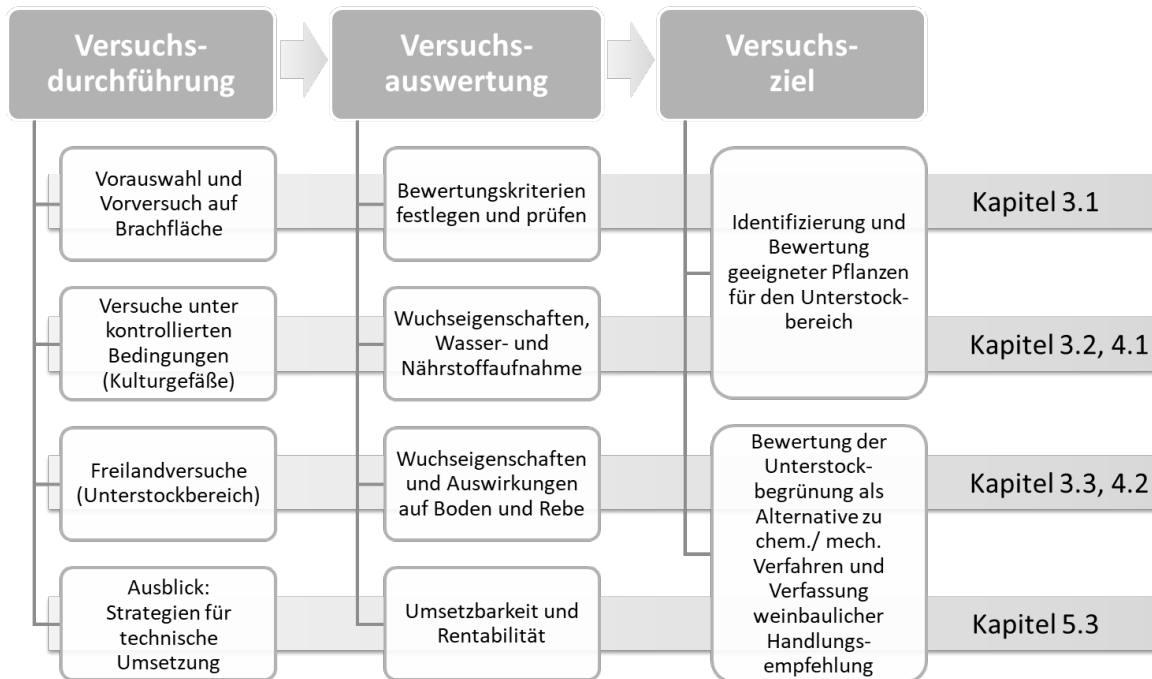


Abbildung 4: Aufbau des Versuchsdesigns.

Zu Studienbeginn stand die Vorauswahl potentieller Pflanzenarten im Fokus, die zunächst auf Brachflächen in einem Vorversuch getestet wurden (Kapitel 3.1.2). Kapitel 3.2 und 4.1 beschreiben weiterführende Versuche unter kontrollierten Laborbedingungen, bei denen die Pflanzen in Petrischalen oder Kulturgefäßen gezielt hinsichtlich ihres Keimverhaltens, ihres Wachstums sowie ihrer Wasser- und Nährstoffaufnahme untersucht wurden. Freilandversuche mit Begrünungseinsaaten im Unterstockbereich dienten der Untersuchung des Wuchses und der Auswirkungen auf bodenanalytische und rebphysiologische Parameter (Kapitel 3.3 und 4.2). Anhand dieser Ergebnisse konnte geprüft werden, inwieweit eine Unterstockbegrünung als Alternative zu chemischen und mechanischen beikrautregulierenden Verfahren geeignet ist. Mögliche Strategien für die technische Umsetzung werden im Ausblick der Diskussion vorgestellt, um Winzerinnen und Winzern zusammen mit der standortangepassten Pflanzenwahl eine praktische Handlungsempfehlung anbieten zu können (Kapitel 5.3).

3.1 Auswahl der Begrünungspflanzen

Für die Untersuchung einer Unterstockbegrünung mussten zunächst potentielle Pflanzenarten identifiziert werden. Dafür wurden im folgenden Kapitel Bewertungskriterien festgelegt.

3.1.1 Bewertungskriterien

Die in Tabelle 2 aufgeführten Bewertungskriterien beinhalten Anforderungen an potentielle Pflanzen für die Unterstockbegrünung im Weinbau, die vorwiegend morphologische und physiologische Eigenschaften umfassen. Neben der theoretischen Herleitung aus der Literatur wurden diese Kriterien auf Basis von Erfahrungen aus der weinbaulichen Praxis zum Thema Begrünung und Unterstockbodenmanagement ergänzt und angepasst.

Tabelle 2: Bewertungskriterien für die Auswahl geeigneter Pflanzenarten für die Unterstockbegrünung.

Bewertungskriterien	Beschreibung	Begründung
<i>Anpassung an Standortbedingungen:</i>		
Etablierfähigkeit auf Weinbergsböden	Die eingesetzten Begrünungspflanzen sollten an weinbaulich genutzte Standorte angepasst sein. Diese Böden weisen häufig ein erhöhtes Nährstoffvorkommen auf und der pH-Wert liegt typischerweise im schwach sauren bis neutralen Bereich (optimal für Reben: pH 6,5 bis 7,2). Darüber hinaus treten verschiedene Bodenarten auf, z. B. sandiger Lehm, Lehm, toniger Lehm.	Weinbergsflächen werden gezielt für den Anbau von Reben ausgewählt und durch Düngemaßnahmen optimiert. Begrünungspflanzen müssen mit den daraus resultierenden Standortbedingungen zurechtkommen.
Verträglichkeit Vollsonne und Halbschatten	Die Arten sollten sowohl volle Sonne als auch Halbschatten vertragen.	Je nach Jahreszeit und damit Laubwandfläche der Reben wird der Unterstockbereich zeitweise beschattet.
Trockenheitsverträglichkeit	Pflanzen sollen die Fähigkeit haben, auch bei auftretenden Trockenperioden zu überleben.	Im Sommer kann es zeitweise zu Trockenperioden kommen. Auf diese sollten sich Begrünungspflanzen einstellen können und danach weiterwachsen. Eine Bewässerung ist nicht immer vorhanden bzw. (langfristig) möglich.
Winterhärte	Pflanzen sollten gegenüber niedrigen Temperaturen im Winter widerstandsfähig sein.	Eine Vegetationsdecke über das komplette Jahr erfordert

		eine Überwinterung bei Tiefsttemperaturen von -10 bis -15 °C (DWD 2025).
Herbizid-Verträglichkeit	Begrünungspflanzen sollten trotz möglicher Herbizid-Rückstände oder durch Herbizid-Behandlungen veränderter Bodenverhältnisse erfolgreich keimen und wachsen.	Der Unterstockbereich von Reben wird häufig mit Herbiziden, z. B. Glyphosat behandelt. Soll auf eine Unterstockbegrünung umgestellt werden, müssen die Einsaaten mit diesen Bedingungen zurechtkommen.
<i>Anforderungen an eine Unterstockbegrünung im Weinbau:</i>		
Keimfähigkeit bei Licht und niedrigeren Temperaturen	Saatgut sollte nicht in den Boden eingearbeitet werden müssen und auch bei kühleren Herbsttemperaturen keimen.	In der Rebzeile ist ein Anwalzen der Einsaat praktisch nicht umsetzbar bzw. erschwert. Zum Einsaattermin im Frühjahr oder Herbst können niedrige Temperaturen auftreten.
Schnelle und dauerhafte Bodenbedeckung	Die Pflanzen besitzen die Fähigkeit, den Boden möglichst schnell und möglichst dauerhaft zu bedecken.	In Bezug auf den Erosionsschutz, Reduzierung der Nährstoffauswaschung und Durchsetzung gegenüber Beikräutern ist eine schnelle und dauerhafte Bodenbedeckung durch die Einsaaten erforderlich.
Beikrautregulierende Wirkung	Vermögen, sich gegenüber Beikräutern durchzusetzen und diese zu verdrängen.	Die Beikräuter werden auf Grundlage unterschiedlicher Mechanismen von den Begrünungspflanzen verdrängt (siehe Kapitel 2.2).
Geringer Wasser- und Nährstoffverbrauch	Insgesamt sollte der Wasserbedarf gering und der Wasserverlust durch Verdunstung über die Blätter (Transpiration) auf ein Minimum reduziert sein. Auch der Nährstoffverbrauch sollte möglichst gering bzw. für den Bedarf der Rebe vorteilhaft sein.	Starker Trockenstress, der die Traubenproduktion und Gesundheit der Rebe maßgeblich beeinflusst, soll vermieden werden. Die damit einhergehende Nährstoffverfügbarkeit im Boden beeinflusst die Qualität und Quantität der Trauben.
Niedrige Wuchshöhe	Ein Wachstum der Begrünungspflanzen in die Traubenzone (i. d. R. ab ca. 80 cm) sollte verhindert werden.	Freihaltung bzw. Durchlüftung der Traubenzone muss für die Traubengesundheit gewährleistet sein (siehe Kapitel 2.1).
Geringe Wurzeltiefe	Pflanze bildet Wurzeln vorwiegend im Bereich 0 bis 30 cm aus.	Eine Konkurrenz zur Rebe um Wasser in tieferen Bodenschichten wird bei Verwendung einer flachwurzelnden Begrünung reduziert.

Saatgutverfügbarkeit	Das Saatgut sollte kommerziell erhältlich und bestenfalls regional und kostengünstig sein	Damit die Einsaat von Weinbau-Betrieben umgesetzt werden kann, soll bereits bei der Auswahl geeigneter Pflanzen auf Verfügbarkeit und den Einsatz nicht invasiver Arten (Schäden für das Ökosystem können nicht ausgeschlossen werden) geachtet werden.
-----------------------------	---	---

Schwerpunkte für die Vorauswahl der Pflanzen lagen in der Saatgutverfügbarkeit, schneller und dauerhafter Bodendeckung. Zudem wurden Arten mit niedrigem Wuchs und geringer Wurzeltiefe bevorzugt, um eine negative Beeinträchtigung der Rebe zu vermeiden. Die Auswahl erfolgte dabei nicht mit dem Anspruch, abschließend optimale Begrünungspflanzen auszuwählen, die alle Kriterien erfüllen. Ziel war es, Arten aus unterschiedlichen Pflanzenfamilien bzw. Kategorien (vgl. Kapitel 2.2) festzulegen, von denen auszugehen ist, dass sie einige der Kriterien erfüllen und gleichzeitig ein breites Spektrum potentieller Auswirkungen auf die bodenanalytischen und rebphysiologischen Parametern abbilden.

3.1.2 Untersuchung vorausgewählter Begrünungspflanzen

Die vorausgewählten Pflanzen sind niedrigwachsende Leguminosen (Klee-Arten), wassersparende Süßgräser (Schwingel-Arten), Kräuter-Arten sowie Sedum-Arten und diverse Mischungen (Tab. 3, Seite 20). Von Saatgut-Mischungen wurde angenommen, dass die Vielzahl an verschiedenen Pflanzen zu einer gegenseitigen Ergänzung führt und dadurch insgesamt eine bessere Standortanpassung sowie zügige und dauerhafte Bodendeckung und höhere Biodiversität entsteht.

Auf einer Brachfläche einer langjährigen Rebfläche mit der Lagebezeichnung „MAULBERG“ (49.370314° N, 8.186277° E) des Staatsweingutes Neustadt (DLR Rheinpfalz) in Neustadt an der Weinstraße (Anbaugebiet Pfalz) sollten die ausgewählten Begrünungsvarianten im Rahmen eines Vorversuchs hinsichtlich ihres Wachstums bewertet werden. Hierfür wurde die im vorjährigen Herbst gerodete 252 m² große Fläche am 31.03.2021 gemulcht und zweimal gefräst. Am selben Tag wurden 42 Plots der Größe 3 m x 2 m (6 m²) in vollständig randomisierte Blöcke (RCBD-Design) eingeteilt und alle 14 Begrünungsvarianten mit einer dreifachen Wiederholung händisch eingesät. Die dabei angewandte Saatstärke (Tab. 3, Seite 20) richtete sich nach den Empfehlungen der Saatguthändler. Im Rahmen der Einsaatversuche wurden weder eine Rückverfestigung des Bodens durch Walzen noch eine zusätzliche Bewässerung durchge-

führt. Abbildung 5 zeigt die klimatischen Bedingungen vom Zeitraum der Einsaat bis zum Boniturtermin. Für die Messung an drei Stellen, jeweils in einer Wiederholung der Variante Kontrolle (Spontanbegrünung), wurden TMS-Datenlogger verwendet (Kapitel 3.5.1).

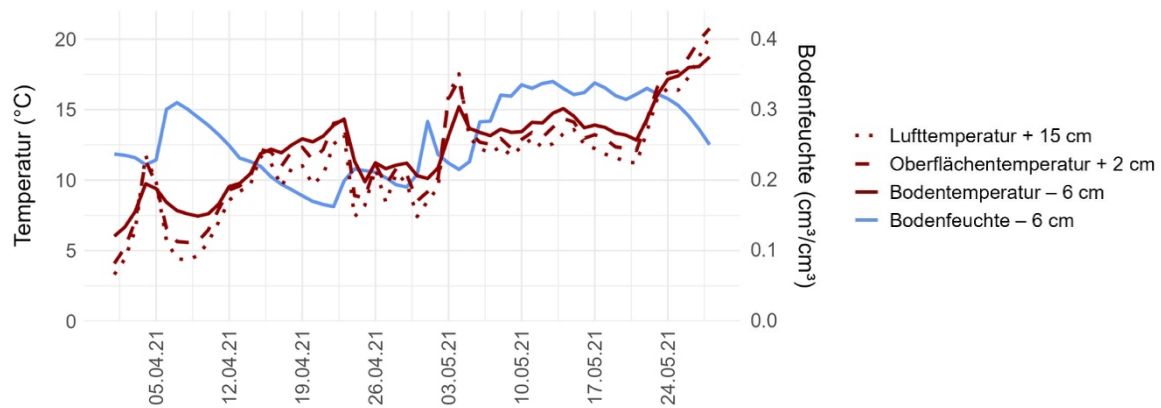


Abbildung 5: Zeitlicher mittlerer Verlauf der Lufttemperatur (+ 15 cm), Oberflächentemperatur (+ 2 cm), Bodentemperatur (- 6 cm) (°C) und volumetrische Bodenfeuchte (- 6 cm) (cm³/cm³) im Zeitraum 01.04.2021 bis 28.05.2021 in Kontrollvarianten ($n = 3$) der Versuchsfäche MAULBERG.

Die Temperaturen bei 15 cm über der Bodenoberfläche wiesen einen mittleren Wert von 11,38 °C auf. Die Bodenfeuchte lag im Mittel bei 0,27 cm³/cm³.

Acht Wochen nach der Einsaat, am 28.05.2021, wurde das Wachstum der Einsaaten bonitiert. Hierfür wurden die in der juvenilen Phase befindlichen Pflanzen (mit erkennbaren Laubblättern) hinsichtlich der Anzahl erkennbarer Individuen bewertet. Die Bewertung erfolgte visuell innerhalb eines Schätzrahmens von 40 cm x 40 cm (0,16 m²) und wurde mit den Kategorien "-" (keine Individuen), "+/-" (1 bis 10 Individuen) und "+" (über 10 Individuen) dokumentiert. Bonitiert wurde einmalig jeweils eine Messstelle pro Plot (pro Wiederholung) in der Mitte des Plots. Die Bewertung wurde aus den drei Einzelbewertungen pro Variante zusammengefasst (Tab. 3, S. 20). Eine Gesamtbewertung mit "+" enthält demnach mindestens zwei Einzelbewertungen mit "+".

Tabelle 3: Begrünungsvarianten mit Saatstärke lt. Herstellerangaben und Ergebnissen der Wachstumsbewertung aus Vorversuch; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

	Begrünungsvarianten	Lateinischer Name	Saatstärke (g/m ²)	Bewertung
1	Spontanbegrünung (keine Einsaat)			
2	Weißklee	<i>Trifolium repens</i>	1,5	+
3	Gelbklee	<i>Medicago lupulina</i>	2,0	+
4	Hornklee	<i>Lotus corniculatus</i>	1,5	+/-
5	Rot-Schwingel	<i>Festuca rubra</i>	4,0	+
6	Schafschwingel	<i>Festuca ovina</i>	4,0	+
7	Sand-Thymian	<i>Thymus serpyllum</i>	0,5	+
8	Römische Kamille	<i>Chamaemelum nobile</i>	0,5	+
9	Mischung Gras/Klee:		2,75	+
	Rot-Schwingel	<i>Festuca rubra</i>	2,0	+
	Weißklee	<i>Trifolium repens</i>	0,75	+
10	Mischung Sedum:		1,5	-
	Scharfer Mauerpfeffer	<i>Sedum acre</i>	0,5	-
	Weißer Mauerpfeffer	<i>Sedum album</i>	0,5	-
	Felsen-Fetthenne	<i>Sedum rupestre</i>	0,5	-
11	Mischung "Mythopia 3":		1,5	+
	Gelbklee	<i>Medicago lupulina</i>	0,75	+/-
	Hornklee	<i>Lotus corniculatus</i>	0,42	+/-
	Weißklee	<i>Trifolium repens</i>	0,315	+/-
	Gemeiner Wundklee	<i>Anthyllis vulneraria</i>	0,0075	-
	Kleiner Wiesenknopf	<i>Sanguisorba minor</i>	0,00304	-
	Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i>	0,00278	-
	Ringelblume	<i>Calendula officinalis</i>	0,00068	-
	Acker-Vergissmeinnicht	<i>Myosotis arvensis</i>	0,00038	-
	Gemeines Sonnenröschen	<i>Helianthemum nummularium</i>	0,00015	-
	Rundblättrige Glockenblume	<i>Campanula rotundifolia</i>	0,00008	-
	kleines Habichtskraut	<i>Hieracium pilosella</i>	0,00008	-
	Venus-Frauenspiegel	<i>Legousia speculum-veneris</i>	0,00008	-
	Rotes Seifenkraut	<i>Saponaria ocymoides</i>	0,00008	-
	Echter Thymian	<i>Thymus vulgaris</i>	0,00008	-
	Hornveilchen	<i>Viola cornuta</i>	0,00008	+/-
	Milder Mauerpfeffer	<i>Sedum sexangulare</i>	0,00004	-
12	Mischung "Mythopia 4":		1,5	+/-
	Erdklee	<i>Trifolium subterraneum</i>	0,57	-
	Gelbklee	<i>Medicago lupulina</i>	0,495	+/-
	Hornklee	<i>Lotus corniculatus</i>	0,36	-
	Weißklee	<i>Trifolium repens</i>	0,06	+/-
	Gemeiner Wundklee	<i>Anthyllis vulneraria</i>	0,006	-
	Kleiner Wiesenknopf	<i>Sanguisorba minor</i>	0,00304	-
	Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i>	0,00270	-
	Schopfiger Hufeisenklee	<i>Hippocrepis comosa</i>	0,0015	-
	Ringelblume	<i>Calendula officinalis</i>	0,00053	-
	Acker-Vergissmeinnicht	<i>Myosotis arvensis</i>	0,00038	-
	Gemeines Sonnenröschen	<i>Helianthemum nummularium</i>	0,00015	-
	Rundblättrige Glockenblume	<i>Campanula rotundifolia</i>	0,00008	-
	Reiherschnabel	<i>Erodium cicutarium</i>	0,00008	-
	Zypressen-Wolfsmilch	<i>Euphorbia cyparissias</i>	0,00008	-
	kleines Habichtskraut	<i>Hieracium pilosella</i>	0,00008	-
	Venus-Frauenspiegel	<i>Legousia speculum-veneris</i>	0,00008	-
	Mittlerer Wegerich	<i>Plantago media</i>	0,00008	-
	Rotes Seifenkraut	<i>Saponaria ocymoides</i>	0,00008	-
	Feld-Thymian	<i>Thymus pulegioides</i>	0,00008	-

	Echtes Stiefmütterchen	<i>Viola arvensis</i>	0,00008	-
	Weißer Mauerpfeffer	<i>Sedum album</i>	0,00004	-
13	Eigene Mischung 1:		2,0	+
	Rot-Schwingel	<i>Festuca rubra</i>	0,4	+
	Kleiner Wiesenknopf	<i>Sanguisorba minor</i>	0,3	+/-
	Gartekresse	<i>Lepidium sativum</i>	0,2	+/-
	Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i>	0,18	-
	Gelbklee	<i>Medicago lupulina</i>	0,14	+/-
	Echter Gamander	<i>Teucrium chamaedrys</i>	0,12	-
	Teppichkamille	<i>Anthemis nobilis</i>	0,12	+
	Hornklee	<i>Lotus corniculatus</i>	0,1	-
	Walderdbeere	<i>Fragaria vesca</i>	0,1	-
	Weißklee	<i>Trifolium repens</i>	0,08	+/-
	Kriechender Günsel	<i>Ajuga reptans</i>	0,04	-
	Kleine Braunelle	<i>Prunella vulgaris</i>	0,04	-
	Blut-Storchschnabel	<i>Geranium sanguineum</i>	0,04	-
	Kleiner Frauenmantel	<i>Alchemilla erythropoda</i>	0,04	-
	Bodendecker-Hornkraut	<i>Cerastium tomentosum</i>	0,04	-
	Scharfer Mauerpfeffer	<i>Sedum acre</i>	0,02	-
	Weißer Mauerpfeffer	<i>Sedum album</i>	0,02	-
	Kleines Habichtskraut	<i>Hieracium pilosella</i>	0,02	-
14	Eigene Mischung 2:		2,0	+
	Gelbklee	<i>Medicago lupulina</i>	0,56	+/-
	Hornklee	<i>Lotus corniculatus</i>	0,4	+/-
	Echter Buchweizen	<i>Fagopyrum esculentum</i>	0,4	+/-
	Weißklee	<i>Trifolium repens</i>	0,32	+/-
	Gartekresse	<i>Lepidium sativum</i>	0,1	+/-
	Teppichkamille	<i>Anthemis nobilis</i>	0,04	+/-
	Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i>	0,04	-
	Kleine Braunelle	<i>Prunella vulgaris</i>	0,04	-
	Blut-Storchschnabel	<i>Geranium sanguineum</i>	0,04	-
	Bodendecker-Hornkraut	<i>Cerastium tomentosum</i>	0,04	-
	kleines Habichtskraut	<i>Hieracium pilosella</i>	0,02	-
Nicht im Vorversuch enthalten, jedoch in Freilandversuchen mitaufgenommen (Begründung s.u.):				
NA	Mischung "Rebzeilenbegrünung":		2,0	NA
	Kleiner Wiesenknopf	<i>Sanguisorba minor</i>	0,15	NA
	Buchweizen	<i>Fagopyrum esculentum</i>	0,15	NA
	Gemeiner Wundklee	<i>Anthyllis vulneraria</i>	0,12	NA
	Sand-Esparsette	<i>Onobrychis arenaria</i>	0,11	NA
	Echtes Labkraut	<i>Galium verum</i>	0,06	NA
	Schafgarbe	<i>Achillea millefolium</i>	0,05	NA
	Gartenkresse	<i>Lepidium sativum</i>	0,04	NA
	Färberkamille	<i>Anthemis tinctoria</i>	0,04	NA
	Staudenlein	<i>Linum perenne</i>	0,03	NA
	Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i>	0,03	NA
	Linsen	<i>Lens culinaris</i>	0,03	NA
	Gelbklee	<i>Medicago lupulina</i>	0,03	NA
	Fettwiesen-Margerite	<i>Leucanthemum ircutianum</i>	0,03	NA
	Wiesensalbei	<i>Salvia pratensis</i>	0,02	NA
	Traubenkropfkraut	<i>Silene vulgaris</i>	0,02	NA
	Purpurklee	<i>Trifolium rubrum</i>	0,02	NA
	Mittlerer Wegerich	<i>Plantago media</i>	0,02	NA
	Klatschmohn	<i>Papaver rhoeas</i>	0,02	NA
	Karsthäusernelke	<i>Dianthus carthusianorum</i>	0,01	NA
	Ferkelkraut	<i>Hypochoeris radicata</i>	0,01	NA
	Oregano	<i>Origanum vulgare</i>	0,01	NA
	Nickendes Leimkraut	<i>Silene nutans</i>	0,01	NA

Die Ergebnisse des Vorversuches zeigten eine positive ("+") Bewertung des Wachstums von *Trifolium repens*, *Medicago lupulina*, *Festuca rubra*, *Festuca ovina*, *Thymus serpyllum* und *Chamaemelum nobile* sowie der Mischungen „Mythopia 3“ und der beiden eigenen Mischungen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden unter Berücksichtigung der Bewertungskriterien drei Varianten ausgewählt, die als Modellarten für die vertiefte experimentelle Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit dienten. Unter den beiden Leguminose-Arten fiel die Wahl auf *Medicago lupulina*, da diese Art trockenheitstoleranter als *Trifolium repens* ist (KOMAINDA et al. 2019). Zudem kann *Medicago lupulina* aufgrund seiner Fähigkeit zur Wiederauskeimung mehrjährig etabliert werden (SPOHN et al. 2015). Beim Vergleich der beiden Schwingel-Arten zeigte sich im Vorversuch bei *Festuca rubra* eine deutlich dichtere Bodendeckung, was auch durch die Fachliteratur hinsichtlich einer höheren Bestandsdichte bestätigt wird (BRAUN et al. 2020). Trotz der geringeren Trocken- und Hitzetoleranz im Vergleich zu *Festuca ovina* (BRAUN et al. 2020) wurde die ausläuferbildende Unterart *Festuca rubra* ssp. *rubra* ausgewählt, da hierbei eine schnellere und dauerhafte Etablierung im Bestand erwartet wird. *Thymus serpyllum* wurde als Vertreter der kriechenden Pflanzen ausgewählt. Obwohl *Chamaemelum nobile* zur kriechenden und niedrig wachsenden Kamille-Art zählt, kann sie bis zu 50 cm hoch werden (FILIPOVIĆ et al. 2024), *Thymus serpyllum* dagegen nur etwa 10 cm und bildet gleichzeitig eine gute Bodendeckung (HRYTSYNA et al. 2022).

Für die Freilandversuche wurden zu den drei Einzelsaat-Varianten zwei Mischungen aufgenommen, die kommerziell verfügbar waren: Die Mischung „Mythopia 3“ (Camen Samen Steg e.K., Lauenau, Deutschland) mit klee-dominierenden Arten, die ebenfalls eine gute Bewertung im Wachstum zeigte, sowie die Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Saaten Zeller GmbH & Co. KG, Eichenbühl, Deutschland) mit verschiedenartigen Kräutern und Leguminosen. Diese wurde zwar nicht als solche im Vorversuch berücksichtigt, es wurden jedoch einige der enthaltenen Pflanzenarten als "+/-" bewertet: *Fagopyrum esculentum*, *Sanguisorba minor*, *Lepidium sativum* und *Medicago lupulina*. Der Hersteller dieser Firma wirbt mit mehrjähriger Standzeit, niedrigem Wuchs, Trockenheitsresistenz und sicherem Auflaufen (SAATEN ZELLER GMBH & Co. KG 2025).

3.1.3 Begrünungsvarianten zur Bewertung als Unterstockbegrünung

Variante Begr_Med: Gelbklee (*Medicago lupulina* L.)



Abbildung 6: *Medicago lupulina* L. (MASCLEF 1893).

Taxonomie, Morphologie und Wachstum:

- Familie: Leguminosen (Fabaceae)
- Synonyme: Hopfenklee, Hopfen-Schneckenklee, Hopfen-Luzerne
- Zweikeimblättrig
- Ein- oder zweijährig, wirkt oft mehrjährig durch Wiederauskeimung (SPOHN et al. 2015)
- Grün überwinternd (BfN 2003)
- Wurzeltiefe: bis zu 50 cm (HEGI & GAMS 1964)
- Wuchshöhe: 10 bis 30 cm (LAUBER et al. 2018)
- Blätter: dreiteilig, typisch für Klee-Arten (LAUBER et al. 2018)
- Blüten: gelb, angeordnet in dichten Köpfchen (LAUBER et al. 2018)
- Blütezeit 5-9 (EGGENBERG et al. 2018)

Vorkommen und Standortansprüche:

- Verbreitung: Europa, Asien und Nordafrika (EGGENBERG et al. 2018)
- Lebensräume: nährstoffreiche Äcker (BfN 2003), Wiesen, Weiden, Wegränder und Schuttplätze (EGGENBERG et al. 2018), vor allem in Kalk- und Lehmgebieten (SPOHN et al. 2015)
- Zeigerwerte nach ELLENBERG (1991): L7 T5 Kx R8 F4- Nx S0 M-v
- Anspruchslos, gedeiht auf verschiedenen Böden (BfN 2003)

Nutzung als Unterstockbegrünung:

- Fähigkeit zur Stickstoff-Fixierung durch Symbiose mit Knöllchenbakterien (*Rhizobiaceae*) (ZEHNER & GÖTTFERT 2015)
- Geeignet als Unterstockbegrünung (HOFMANN 2014)

Variante Begr_Fes: Gewöhnlicher Rot-Schwingel (*Festuca rubra* L. ssp. *rubra*)



Abbildung 7: *Festuca rubra* L. (KOPS 1853).

Taxonomie, Morphologie und Wachstum:

- Familie: Süßgräser (Poaceae)
- Einkeimblättrig
- Mehrjährig (BfN 2003)
- Grün überwinternd (BfN 2003)
- Wuchshöhe: 25 bis 80 cm (MÜLLER et al. 2021)
- Wurzeltiefe: bis zu 50 cm (BROWN et al. 2010)
- Bildet lange unterirdische Ausläufer (Rhizome), die es ermöglichen, sich nach Schäden schnell zu regenerieren (KÜHN et al. 2004)
- Ährchen oft rötlich oder bräunlich (MÜLLER et al. 2021)
- Blütezeit: 5 bis 7 (MÜLLER et al. 2021)

Vorkommen und Standortansprüche:

- Verbreitung: Europa, Asien und Nordamerika (EGGENBERG et al. 2018)
- Lebensräume: Wiesen, Weiden, Waldränder, Halbtrockenrasen, Grünlandbrachen (MÜLLER et al. 2021)
- Zeigerwerte nach ELLENBERG (1991): Lx Tx K5 R6 F6- Nx S0 M-
- Bevorzugt trockene bis mäßig frische Standorte und hat geringe Ansprüche an Nährstoffverfügbarkeit (LfL Bayern 2025)

Nutzung als Unterstockbegrünung:

- Geeignet für Bodenabdeckung (DILLEY & NONNECKE 2006)
- Positiver Effekt auf Infiltrationsrate und Durchlüftung des Bodens (DILLEY & NONNECKE 2006)
- Vergleichsweise niedrige Transpirationsrate (LOPES et al. 2004)
- Geringe Wasserkonkurrenz gegenüber Reben (GIESE et al. 2015)

Variante Begr_Thym: Sand-Thymian (*Thymus serpyllum* L.)

Abbildung 8: *Thymus serpyllum* L.
(CHAUMETON 1844).

Taxonomie, Morphologie und Wachstum:

- Familie: Lippenblütler (Lamiaceae)
- Synonyme: Feld-Thymian, Quendel
- Zweikeimblättrig
- Mehrjährig (BfN 2003)
- Grün überwinternd (BfN 2003)
- Bodendeckend, niedriger Wuchs (bis 10 cm) (HRYTSYNA et al. 2022)
- Produziert leicht flüchtige ätherische Öle (BfN 2003)
- Bildung von Feinwurzeln
- Blüte: Rosa bis lila, typische Lippenblüten
- Blütezeit: 7 bis 9 (MÜLLER et al. 2021)

Vorkommen und Standortansprüche:

- Verbreitung: Europa, Asien und Nordafrika (EGGENBERG et al. 2018)
- Lebensräume: Silikatfelsflure, Sandtrockenrasen, trockene Kiefernwälder (BfN 2003)
- Kalkmeidend (BfN 2003)
- Zeigerwerte nach ELLENBERG (1991): L7 T6 K5 R5 F2- N1

Nutzung als Unterstockbegrünung:

- Einsatz als Unterstockbegrünung im Weinbau zur Schaffung eines Zusatznutzens (Ernte) im Falle von *Thymus vulgaris* (DITTRICH et al. 2021)
- Im Gegensatz zu *Thymus vulgaris* niedrigerer Wuchs (LAUBER et al. 2018) und schwach verholzt (SPOHN et al. 2015), dadurch kein bzw. geringer Rückschnitt erforderlich

Variante Begr_MixR: Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Saaten Zeller GmbH & Co. KG, Eichenbühl, Deutschland)

Der Gewichts-Anteil der Leguminosen in der Saatgutmischung „Rebzeilenbegrünung“ beträgt ca. 31 %, die restlichen 69 % entfallen auf verschiedene krautige Blütenpflanzen, darunter Asteraceae, Rosaceae, Polygonaceae und weitere Familien, die ein breites Spektrum an Blütenformen, Blühzeiten und Wurzelsysteme abbilden. In der „Rebzeilenbegrünung“ dominieren anteilmäßig vor allem Buchweizen (*Fagopyrum esculentum*), Kleiner Wiesenknopf (*Sanguisorba minor*), Wundklee (*Anthyllis vulneraria*) und Sand-Esparsette (*Onobrychis arenaria*). Bei Berücksichtigung des Einzelkorngewichtes liegt der höchste Anteil bei Schafgarbe (*Achillea millefolium*), Traubenkropfkraut (*Silene vulgaris*), Fettwiesen-Margerite (*Leucanthemum ircutianum*) und Ferkelkraut (*Hypochoeris radicata*).

Variante Begr_MixM: Mischung „Mythopia 3“ (Camen Samen Steg e.K., Lauenau, Deutschland)

Die Saatgutmischung „Mythopia 3“ setzt sich zu nahezu 99,5 % des Gewichtes aus Leguminosen und zu 0,5 % aus krautigen Arten zusammen. Die Mischung besteht (auch unter Berücksichtigung des Einzelkorngewichtes) vorwiegend aus den niedrigwachsenden Klee-Arten Gelbklee (*Medicago lupulina*), Hornklee (*Lotus corniculatus*) und Weißklee (*Trifolium repens*).

Da die beiden Saatgut-Mischungen Begr_MixR und Begr_MixM keine Öko-Zertifizierung besitzen und somit nicht für ökologisch-zertifizierte Betriebe eingesetzt werden können, wurden als Alternative in der Versuchsfläche in Bretzfeld (BRETZ) die folgenden Ersatzvarianten mitgeführt. Dieser Versuchsstandort unterscheidet sich von den anderen Flächen durch eine bessere Wasserverfügbarkeit und einen schwereren Boden (Kap. 3.3.).

(Ersatz-)Variante Begr_Trif: *Trifolium repens* (Weißklee)

Trifolium repens wurde bereits in Kapitel 3.1.2 als potentiell geeignete Art eingestuft. Aufgrund seines Potentials, insbesondere für Standorte mit guter Wasserversorgung, erscheint der Einsatz auf der Fläche BRETZ als sinnvoll und vielversprechend.

(Ersatz-)Variante Begr_Prun: *Prunella vulgaris* (Kleine Braunelle)

Prunella vulgaris hat als mehrjähriger Lippenblütler das Potential eines Bodendeckers und wächst auch auf schwereren Böden (WISTRÖM et al. 2018).

3.2 Versuche unter kontrollierten Bedingungen

Zur Untersuchung des Pflanzenwachstums und der Keimung unter standardisierten Umweltbedingungen (definierte Bewässerung sowie Licht-, Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse) wurden zwei unterschiedliche Versuchsansätze durchgeführt: Die Einsaat-Versuche (Kapitel 3.2.1 bis 3.2.3) erfolgten in Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen (Stoma GmbH, Siegburg, Deutschland), die in einer Klimakammer bzw. im Gewächshaus aufgestellt wurden. Ergänzend dazu wurde ein Keimungsversuch in Petrischalen im Gewächshaus durchgeführt (Kapitel 3.2.4).

Die in Abbildung 9 dargestellten Kick-Brauckmann-Kulturgefäße bestehen aus einem Übertopf und einem Einsatztopf mit einem Volumen von 7 Litern, einem Innendurchmesser von 21 cm und einer Gesamthöhe von 25,5 cm. Die Gefäße waren für das Bewässern mit genau dosierter Wassergabe von oben ausgelegt (siehe rechte Darstellung in Abbildung 9, ohne Drahtpflanzenhalter). Über einen Auslaufstutzen und Schläuche wurde das durch den Boden sickende, überschüssige Gießwasser in Sammelgefäßen (3 Liter Volumen) aufgefangen.

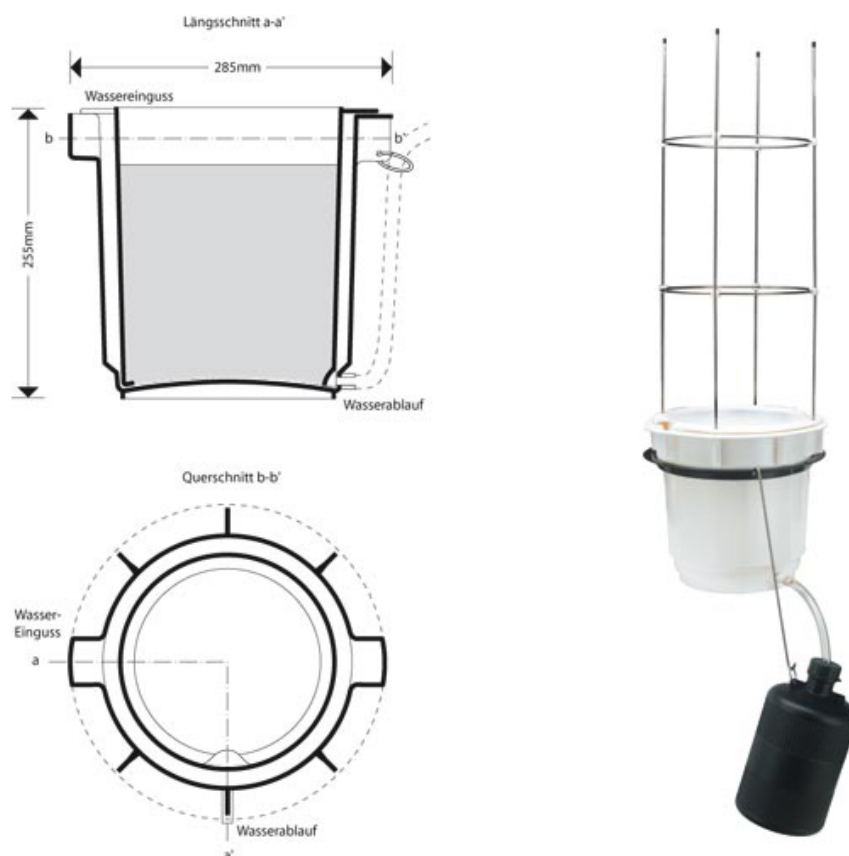


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen (STOMA GmbH 2025).

Die getesteten Begrünungsvarianten der Versuche unter kontrollierten Bedingungen mit Bezugsquelle und Saatstärke für die Anzucht in Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Saatstärke richtet sich nach der vierfachen Menge der Herstellerempfehlung.

Tabelle 4: Begrünungsvarianten der Versuche unter kontrollierten Bedingungen mit Bezugsquelle und Saatstärke (g) für die Anzucht in Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen.

Begrünungsvariante	Bezugsquelle	Saatstärke
Variante Begr_Med: Gelbklee (<i>Medicago lupulina</i> L.)	Sativa Biosaatgut GmbH, Jestetten, Deutschland	0,28 g pro Kulturgefäß (entspricht 8 g/m ²)
Variante Begr_Fes: Gewöhnlicher Rot-Schwingel (<i>Festuca rubra</i> L. ssp. <i>rubra</i>)	Appels Wilde Samen GmbH, Darmstadt, Deutschland (Kap. 3.2.1 und 3.2.2) bzw. Revierberatung Wolmersdorf GmbH & Co. KG, Nindorf, Deutschland (Kap. 3.2.3 und 3.2.4)	0,56 g pro Kulturgefäß (entspricht 16 g/m ²)
Variante Begr_Thym: Sand-Thymian (<i>Thymus serpyllum</i> L.)	Saatgut-Vielfalt, Walter Wolf, St. Blasien, Deutschland	0,07 g pro Kulturgefäß (entspricht 2 g/m ²)

3.2.1 Wachstum der Begrünungspflanzen auf unterschiedlichen Bodenarten

Um die Wachstumseigenschaften der Begrünungspflanzen für die Unterstockbegrünung im Weinbau auf unterschiedlichen Bodenarten zu untersuchen, wurden Einsaat-Versuche mit Begr_Med, Begr_Fes und Begr_Thym in Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen in der Klimakammer angelegt.

Zunächst wurde der Versuch mit einer Einsaat auf sandigem Lehm Boden durchgeführt (VR 1), um ihn zu einem späteren Zeitpunkt mit den Bodenarten Sand und toniger Lehm zu wiederholen (VR 2). Die standardisierten Bedingungen hinsichtlich Lufttemperatur und -feuchte, Lichtverhältnisse und Gießmengen ermöglichten eine Reproduzierbarkeit und somit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Die verschiedenen Bodensubstrate stammen aus bestehenden oder kürzlich gerodeten Weinbergslagen und wurden mit einem Spaten bzw. einer Schaufel in einer Bodentiefe von 0 bis 30 cm entnommen. Anschließend wurden die Substrate über mehrere Tage luftgetrocknet und mittels Bodensieb (Sterico GmbH, Düsseldorf, Deutschland) mit einer Maschenweite von 3 mm gesiebt, sodass Steine und Fremdmaterial entfernt wurden und ein möglichst homogenes Substrat entstand. Die Bodenanalysen der jeweiligen Substrate wurden durch die Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Speyer durchgeführt. Tabelle 5 zeigt

eine Übersicht der verwendeten Substrate mit den Bodenanalysenergebnissen (Methode: Kap. 3.5.4).

Tabelle 5: Varianten getestet auf verschiedenen Substraten (Bodenarten) mit Angabe der Bodenanalysenergebnisse vom 30.11.2022 der LUFA Speyer.

Varianten	Lage	Standort	Bodenart	pH-Wert	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	C/N	N	Humus
					mg/100 g TS					%
Kontrolle_S Begr_Med_S Begr_Fes_S Begr_Thym_S	Hinter dem Woog, Bad Dürkheim, Pfalz	49,49148° N, 8,14778° E	Sand (S)	6,67	23	6	4	12,1	68	1,4
Kontrolle_sL Begr_Med_sL Begr_Fes_sL Begr_Thym_sL	Maulberg, Neustadt/Wstr., Pfalz	49,370314° N, 8,186277° E	sandiger Lehm (sL)	6,86	27	30	17	11,3	113	2,2
Kontrolle_tL Begr_Med_tL Begr_Fes_tL Begr_Thym_tL	Harschberg-Bretzfeld, Württemberg	49,17852° N, 9,39065° E	toniger Lehm (tL)	7,42	27	48	33	10,4	106	1,9

Jeweils 7,5 kg der Substrate wurden in die Kick-Brauckmann-Kulturgefäße gefüllt. Die Begrünungsvarianten wurden händisch auf den jeweiligen Substratvarianten eingesät (Saatstärken siehe Tab. 4, Seite 27). Zusätzlich wurde eine Kontrollvariante ohne Einsaat mitgeführt, die lediglich der Einstellung der Gießmenge diene. Für jede Variante wurden mindestens drei Wiederholungen (Begrünungsvarianten in VR 1 mit vier Wiederholungen) angelegt, die nach dem Prinzip eines vollständig randomisierten Versuchsplans (CRD-Design) auf den Regalen der Klimakammer verteilt wurden.

In der tageslichtabgeschlossenen Klimakammer des DLR Rheinpfalz wurde ein Tag-Nacht-Rhythmus durch Halogenlampen simuliert (16 h Tag / 8 h Nacht). Folgende Lichtverhältnisse wurden in der Klimakammer auf Höhe der Oberkante der Kulturgefäße (110 cm Abstand) mit einem Spektral-PAR-Messgerät (PG200N, UPRtec Corp., Taiwan) gemessen (Messdatum: 12.06.2022):

Beleuchtungsstärke:	9.934 lux
Bestrahlungsstärke:	264,5 mW/m ²
Photonenflussdichte UV (350 bis 400 nm):	1,1 µmol m ⁻² s ⁻¹
Photonenflussdichte PAR (400 bis 700 nm):	149,1 µmol m ⁻² s ⁻¹
Photonenflussdichte FR (700 bis 800 nm):	12,2 µmol m ⁻² s ⁻¹

Die eingestellte Lufttemperatur lag bei 18 °C und die relative Luftfeuchtigkeit bei 65 %. Die tatsächlich gemessene Luftfeuchte betrug durchschnittlich 70,7 % (SD = 8,5 %) in VR 1 und

61,5 % (SD = 16,3) in VR 2, gemessen auf Topfhöhe mit Datenlogger HOBO U23 Pro v2, Onset Computer Corp., Bourne, USA. In den Kontrollvarianten (ohne Einsaat) wurden mittels TMS-Datenlogger (Kapitel 3.6.1) die Temperatur und Bodenfeuchte gemessen und in Abbildung 10 dargestellt.

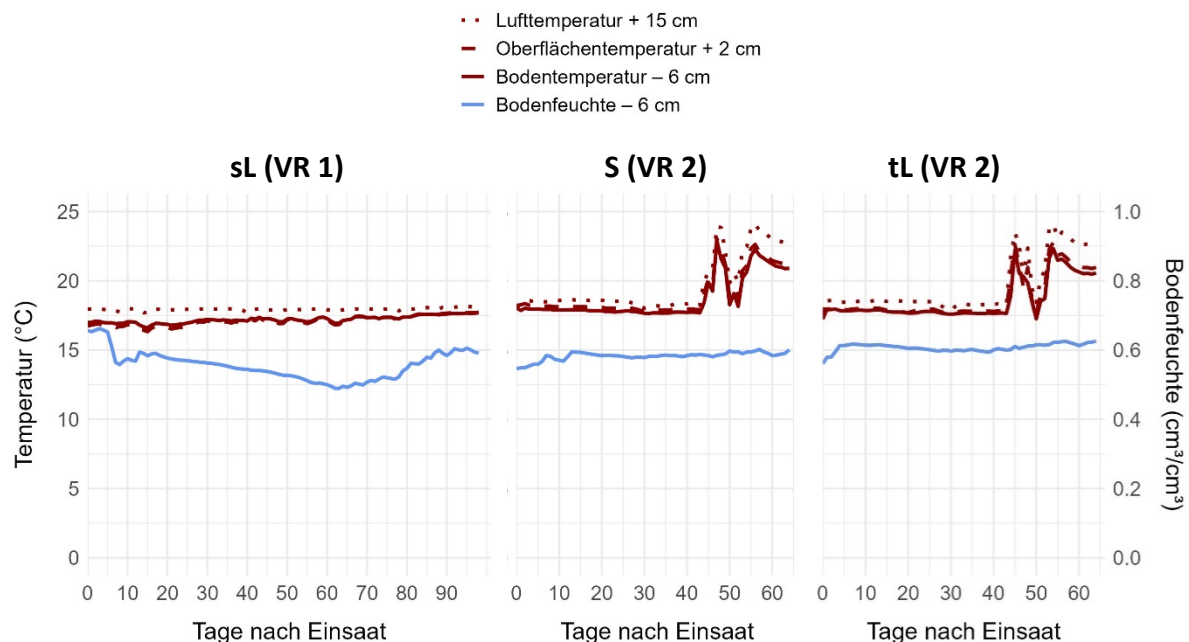


Abbildung 10: Zeitlicher mittlerer Verlauf der Lufttemperatur (+ 15 cm), Oberflächentemperatur (+ 2 cm), Bodentemperatur (- 6 cm) (°C) und volumetrischen Bodenfeuchte (- 6 cm) (cm³/cm³); links: Versuchsreihe (VR) 1 mit sandigem Lehm Boden (sL) im Zeitraum 14.02.2022 (Tag 0 = Einsaat) bis 24.05.2022 (Tag 99 = Versuchsende) in Kontrollvarianten ($n = 3$); Mitte und rechts: Versuchsreihe (VR) 2 mit Sandboden (S) und tonigem Lehm Boden (tL) im Zeitraum 22.07.2022 (Tag 0 = Einsaat) bis 24.09.2022 (Tag 64 = Versuchsende) in Kontrollvarianten ($n = 2$).

Die Temperaturen bei 15 cm über der Bodenoberfläche wiesen mittlere Werte von 17,9 °C (sL, VR1) und 19,8 °C (S und tL, VR2) auf. Die Bodenfeuchte-Werte der Kontrolle lagen im Mittel bei 0,56 cm³/cm³ (sL, VR1), 0,58 cm³/cm³ (S, VR2) und 0,60 cm³/cm³ (tL, VR2). Sowohl die Streuung der gemessenen Luftfeuchte als auch der Temperaturverlauf in Abbildung 10 deuten auf einen Defekt der Klimakammer ab Tag 43 nach Einsaat in der Versuchsreihe 2 hin. Aus diesem Grund wurde der Versuch an Tag 64 beendet. Um die Bodenfeuchte in der Kontrolle konstant zu halten, wurde die Gießmenge entsprechend erhöht. Die zugegebenen Mengen von demineralisiertem Wasser beider Versuchsreihen sind in Tabelle 6 auf Seite 30 aufgeführt.

Tabelle 6: Gießmengen (ml) pro Kulturgefäß mit demineralisiertem Wasser an den verschiedenen Tagen nach Einsaat (TnE) der Versuchsreihen 1 und 2.

Versuchsreihe 1 (sandiger Lehm):

TnE	0	3	10	43	50	58	64	67	71	75	78	81	85	88	92
Gießmenge (ml)	2000	1000	300	100	100	100	200	200	200	200	500	500	500	500	500

Versuchsreihe 2 (Sand und toniger Lehm):

TnE	0	3	21	28	31	46	50	56	61
Gießmenge (ml)	2000	100	100	100	100	300	400	400	500

Die Wassermengen waren in allen Varianten der jeweiligen Versuchsreihe identisch und wurden mithilfe eines Becherglases und einer Feinwaage abgemessen. Die Mengen orientierten sich an dem angestrebten Bereich von 70 bis 80 % der maximalen Wasserkapazität in der Kontrollvariante des Substrats sandiger Lehm. Zur Überprüfung diente das Messgerät SM 150 Soil Moisture (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Vereinigtes Königreich), mit dem die entsprechende Bodenfeuchte von 35 bis 40 % nach dem FDR-Prinzip (frequenzabhängige Kapazitätsmessung) in 5 cm Bodentiefe vor und nach dem Gießvorgang kontrolliert wurde. Dieser Sollwert der Bodenfeuchte wurde für die Kontrollvariante mit sandigem Boden der Versuchsreihe 2 übernommen.

Die Dauer des Versuchs von der Einsaat bis zur abschließenden Bonitur betrug insgesamt 64 Tage. Während des Wachstums der Pflanzen wurden alle Gefäße beikrautfrei gehalten, indem aufkeimende Beikräuter händisch entfernt wurden. In jeder Wiederholung der Begrünungsvarianten wurden der Deckungsgrad gemäß dem LONDO-Schema (Kap. 3.4.1) erhoben. Parallel dazu wurde die maximale Wuchshöhe der Einsaaten dokumentiert (Kap. 3.5.3). Beide Parameter wurden in regelmäßigen Abständen an insgesamt folgenden Messterminen erfasst: 0, 14, 22, 30, 37, 50, 58 und 64 Tage nach Einsaat für die Versuchsreihe 1 mit sandigem Lehm (sL) sowie 0, 6, 12, 21, 28, 34, 40, 49, 56 und 63 Tage nach Einsaat für die Versuchsreihe 2 mit Sand (S) und tonigem Lehm (tL).

3.2.2 Wasser- und Nährstoffverbrauch der Begrünungspflanzen

Um die Wachstumseigenschaften sowie den Wasser- und Nährstoffhaushalt der Begrünungspflanzen zu untersuchen, wurden Begr_Med, Begr_Fes, Begr_Thym zusammen mit der Kontrollvariante aus der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Versuchsreihe 1 (Einsaat auf sandigem Lehm Boden) vertiefend analysiert. Am Ende des Versuchs (Tag 99 nach Einsaat) wurde in den Begrünungsvarianten sowohl die oberirdische Frisch- und Trockenmasse (Kap. 3.4.4) als auch die Wurzelmasse (Kap. 3.4.5) der Pflanzen pro Kulturgefäß erfasst. Die volumetrische Boden-

feuchte wurde mithilfe eines TMS-Datenloggers kontinuierlich über die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet (Kap. 3.5.1). Zudem wurde die infiltrierte Wassermenge (Kap. 3.5.2) im Zeitraum von Tag 16 bis Tag 99 nach der Einsaat ermittelt. Zur Beurteilung der Nährstoffaufnahme wurden die Pflanzeninhaltsstoffe durch die LUFA Speyer gemäß den standardisierten Laborverfahren (Kapitel 3.4.6) analysiert. Die Analysen umfassten sowohl Makronährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel) als auch Mikronährstoffe (Kupfer, Mangan, Zink, Bor und Eisen). Für alle Parameter, die ausschließlich die Begründungsvarianten betreffen, wurden vier Wiederholungen je Variante gemessen und ausgewertet. Bei der Erfassung der Bodenfeuchte und der Infiltrationsmenge wurde zusätzlich die Kontrollvariante berücksichtigt. Hier waren es drei Wiederholungen pro Variante.

3.2.3 Trockenheitsverträglichkeit der Begrünungspflanzen

Unter kontrollierten Bedingungen wurde in Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen (Kap. 3.2) untersucht, wie sich das Wachstum der Begrünungsvarianten Begr_Med, Begr_Fes und Begr_Thym unter reduzierter Bewässerung im Vergleich zu einer höheren Bewässerungsvariante verändert. Hierfür wurde frisches Bodensubstrat mit der Bodenart sandiger Lehm aus der Weinbergslage Maulberg in Neustadt/Wstr. gemäß Kapitel 3.2.1 entnommen und vorbereitet. Die Gefäße wurden mit jeweils 6,3 kg des Substrats gefüllt. Die Begrünungsvarianten wurden, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, zusammen mit einer Kontrollvariante in vierfacher Wiederholung pro Bewässerungsregime angelegt. Verteilt wurden die Gefäße nach dem CRD-Design auf den Tischen des Gewächshauses des DLR Rheinpfalz. Tabelle 7 zeigt die Bodenanalysen des Substrates, durchgeführt von der LUFA Speyer (Kap. 3.5.4), zusammen mit den im Versuch getesteten Bewässerungsvarianten W+ (hohe Gießmenge) und W- (reduzierte Gießmenge).

Tabelle 7: Varianten mit verschiedenen Gießmengen (ml) pro Kulturgefäß mit demineralisiertem Wasser und Angaben der Bodenanalysen-Ergebnisse vom 29.04.2023.

Varianten	Gieß- menge	Lage	Standort	Bodenart	pH-Wert	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	C/N	N	Humus
						mg/100 g TS					%
Kontrolle_W+ Begr_Med_W+ Begr_Fes_W+ Begr_Thym_W+	1.200 bis 1.600 ml pro Woche	Maulberg, Neustadt/ Wstr., Pfalz	49,370314° N, 8,186277° E	sL	6,6	29	42	17	10,9	160	3,0
Kontrolle_W- Begr_Med_W- Begr_Fes_W- Begr_Thym_W-	600 bis 800 ml pro Woche										

Die Bewässerung erfolgte im Abstand von zwei bis sieben Tagen mit demineralisiertem Wasser analog zu Kap. 3.2.1. Von der Einsaat bis zur Erreichung einer Bodendeckung von 80 % (Tag 34) wurden alle Varianten gleichermaßen bewässert. Anschließend richteten sich die Gießmengen an dem angestrebten Bereich von 80 bis 90 % der maximalen Wasserkapazität für W+ (hohe Bewässerung) und 60 bis 70 % der maximalen Wasserkapazität für W- (reduzierte Bewässerung) in den Kontrollvarianten. Zur Überprüfung diente das Messgerät SM 150 Soil Moisture (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, Vereinigtes Königreich), mit dem die entsprechende Bodenfeuchte von 40 bis 45 % (W+) und 30 bis 35 % (W-) nach dem FDR-Prinzip (frequenzabhängige Kapazitätsmessung) vor und nach dem Gießvorgang in 5 cm Bodentiefe kontrolliert wurde. Die genaue Auftragung der Gießmengen der Bewässerungsvariante W+ und W- sind in Tabelle 8 aufgetragen.

Tabelle 8: Gießmengen (ml) pro Kulturgefäß mit demineralisiertem Wasser an den verschiedenen Tagen nach Einsaat (TnE).

W+ (hohe Bewässerung):

TnE	0 bis 33	34	37	40	43	48	50	54	57	63	67	70	77	82	86	89
Gießmenge (ml)	3.600	600	600	600	600	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
TnE		92	96	98	103	107	110	112	117	120	124	127	131	134	138	145
Gießmenge (ml)		800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800

W- (reduzierte Bewässerung):

TnE	0 bis 33	34	37	40	43	48	50	54	57	63	67	70	77	82	86	89
Gießmenge (ml)	3.600	300	300	300	300	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
TnE		92	96	98	103	107	110	112	117	120	124	127	131	134	138	145
Gießmenge (ml)		400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400

Eine Beschattung an der Decke des Gewächshauses schützte vor direkter Sonneneinstrahlung. Installierte Pflanzen-LEDs waren auf einen Tag-Nacht-Zyklus mit jeweils zwölf Stunden Licht und zwölf Stunden Dunkelheit eingestellt und hatten einen Abstand von 110 cm zur Oberkante der Kulturgefäße. Folgende Lichtverhältnisse wurden im Gewächshaus auf Höhe der Kulturgefäße mit einem Spektral-PAR-Messgerät (PG200N), UPRtec Corp., Taiwan gemessen (Messdatum: 31.08.2023):

Beleuchtungsstärke: 11.703 lux
Bestrahlungsstärke: 2094 mW/m²
Photonenflussdichte UV (350 bis 400 nm): 3,6 µmol m⁻² s⁻¹
Photonenflussdichte PAR (400 bis 700 nm): 488,0 µmol m⁻² s⁻¹
Photonenflussdichte FR (700 bis 800 nm): 40,3 µmol m⁻² s⁻¹

Die Lufttemperatur wurde auf 15 °C während der Nacht und 26 °C am Tag eingestellt. Die Luftfeuchte konnte nicht reguliert werden. Die Ist-Werte der Lufttemperatur und -feuchte wurden neben den Kulturgefäßen mit einem Datenlogger (HOBO U23 Pro v2, Onset Computer

Corp., Bourne, USA) gemessen. Die gemessene Luftfeuchte betrug im Versuchszeitraum durchschnittlich 53,7 % (SD = 15,7 %), die Lufttemperatur lag durchschnittlich bei 23,9 °C (SD = 4,9 °C). Abbildung 11 zeigt die Bedingungen der Bodenfeuchte und Temperaturen, die mit TMS-Datenloggern (Kap. 3.5.1) in den Kontrollvarianten aufgezeichnet wurden.

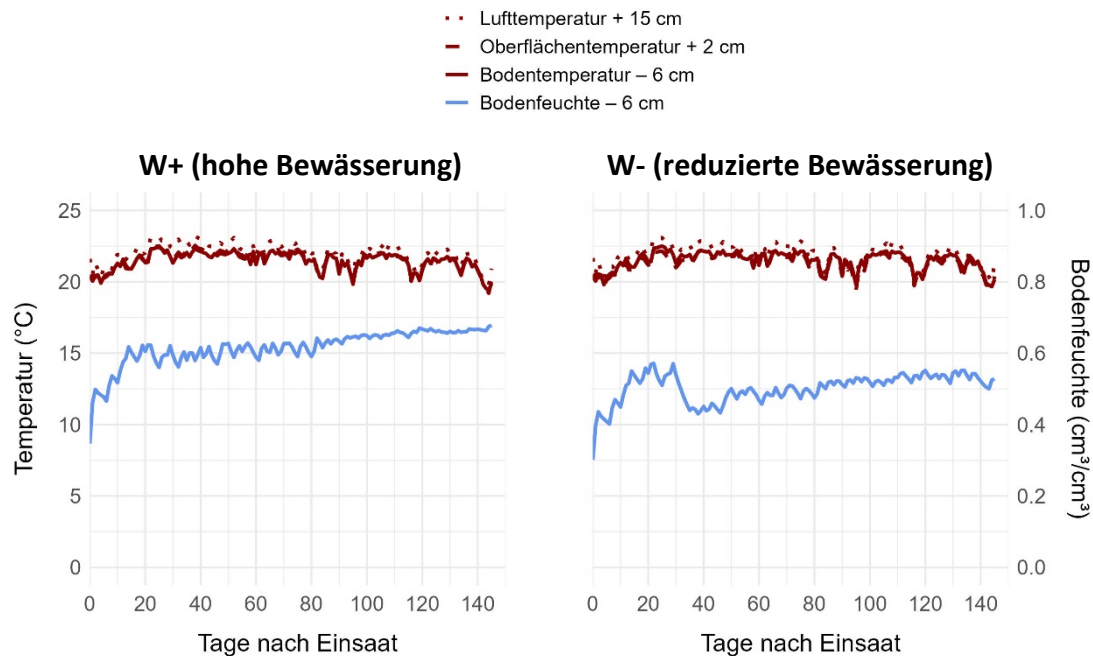


Abbildung 11: Zeitlicher mittlerer Verlauf der Lufttemperatur (+ 15 cm), Oberflächentemperatur (+ 2 cm), Bodentemperatur (- 6 cm) (°C) und volumetrischen Bodenfeuchte (- 6 cm) (cm³/cm³); links: hohe Bewässerung (W+) und rechts: reduzierte Bewässerung (W-), jeweils mit sandigem Lehm Boden (sL) im Zeitraum 03.05.2023 (Tag 0 = Einsaat) bis 28.09.2023 (Tag 148 = Versuchsende) in Kontrollvarianten ($n = 4$).

Die Temperaturen bei 15 cm über der Bodenoberfläche wiesen mittlere Werte von 22,0 °C (W+) und 21,9 °C (W-) auf. Die Bodenfeuchte-Werte der Kontrolle lagen im Mittel bei 0,61 cm³/cm³ (W+) und 0,50 cm³/cm³ (W-).

Die Dauer des Versuchs betrug von der Einsaat bis zur abschließenden Bonitur insgesamt 148 Tage. Während des Wachstums der Pflanzen wurden alle Gefäße beikrautfrei gehalten, indem aufkeimende Beikräuter händisch entfernt wurden. Der Deckungsgrad der Pflanzen wurde für jede Wiederholung der Begrünungsvarianten an Tag 34, 82 und 148 nach Einsaat gemäß dem LONDO-Schema (Kapitel 3.4.1) erhoben. Parallel dazu wurde die maximale Wuchshöhe der Einsaaten (Kapitel 3.4.3) erfasst.

3.2.4 Herbizidverträglichkeit der Begrünungspflanzen

Da Herbizide im Weinbau häufig im Unterstockbereich zur Beikrautregulierung eingesetzt werden und auch auf einer der Freilandversuchsflächen vor der Einsaat der Unterstockbegrünung zur Anwendung kamen, sollte mithilfe eines Petrischalen-Versuchs überprüft werden,

inwieweit Rückstände die Keimung der Begrünungspflanzen beeinträchtigen können. Untersucht wurde die Wirkung unterschiedlicher Herbizide in unterschiedlichen Konzentrationsstufen auf die Keimlängen-Bildung der Varianten Begr_Med, Begr_Fes und Begr_Thym. Die Versuche fanden im Gewächshaus des DLR Rheinpfalz statt. Es kamen dieselben Herbizid-Präparate zum Einsatz, die in Freilandversuchen sowohl in der chemischen Variante als auch vor der Einsaat in der Versuchsfläche MECKEN (Kap. 3.3) verwendet wurden:

- Boom efekt® (Albaugh LLC, Slowenien) mit dem Wirkstoff Glyphosat (360 g/L)
- Katana® (ISK Biosciences Europe, Belgien) mit dem Wirkstoff Flazasulfuron (250 g/kg)
- Eine Mischung beider Herbizide im Verhältnis 1:1 der Stammlösungen

Basierend auf den maximal zulässigen Aufwandmengen im Weinbau (200 g/ha für Katana®; 5 Liter/ha für Boom efekt® bei 200 Liter Wasser) wurden Stammlösungen hergestellt (Tab. 9, Konzentrationsstufe 5). Die Angaben „Flazasulfuron“ und „Glyphosat“ beziehen sich dabei auf die Wirkstoffe, die in den jeweiligen Herbizid-Mitteln enthalten sind. Aus der Stammlösung wurden jeweils vier abgestufte Konzentrationen (Konzentrationsstufe 4 bis 1) mit destilliertem Wasser angesetzt. Für die kombinierte Variante (Flaz+Glyph) wurde aus den beiden Stammlösungen mit Flazasulfuron und Glyphosat eine 50:50-Lösung hergestellt. Die Kontrollvariante (Stufe 0) enthielt ausschließlich destilliertes Wasser.

Tabelle 9: Varianten des Petrischalen-Versuchs mit Konzentrationsstufen der Herbizide Katana® (Flazasulfuron) und Boom efekt® (Glyphosat), die sich aus den Mischverhältnissen von destilliertem (dest.) Wasser zu Herbizid ergeben.

Varianten	Konzentrationsstufen	Mischverhältnisse dest. Wasser zu Herbizid		
		Flazasulfuron („Flaz“)	Flazasulfuron + Glyphosat („Flaz+Glyph“)	Glyphosat („Glyph“)
Begr_Med Begr_Fes Begr_Thym	0	0	0	0
	1	1 : 16.000	1 : 16.000 + 1 : 640	1 : 640
	2	1 : 8.000	1 : 8.000 + 1 : 360	1 : 360
	3	1 : 4.000	1 : 4.000 + 1 : 160	1 : 160
	4	1 : 2.000	1 : 2.000 + 1 : 80	1 : 80
	5	1 : 1.000	1 : 1.000 + 1 : 40	1 : 40

Die Behandlungen wurden in vierfacher Wiederholung in Petrischalen angesetzt, welche randomisiert im Gewächshaus verteilt wurden (CRD-Design). In jede Schale wurden 35 ml der entsprechenden Lösung pipettiert. Anschließend wurden jeweils zehn Samen einer Pflanzenart (Begr_Med, Begr_Fes und Begr_Thym) hinzugefügt. Die Petrischalen wurden mit einem Deckel verschlossen. Das Versuchslayout umfasste drei Begrünungsvarianten, drei Herbizidvarianten, fünf Konzentrationsstufen mit jeweils vier Wiederholungen sowie die Kontrollgruppe.

pen mit destilliertem Wasser. In der Summe ergab dies 192 Petrischalen. Die Klimaeinstellungen im Gewächshaus entsprachen den Angaben in Kapitel 3.2.3. Die Pflanzen-LEDs wurden jedoch nicht eingesetzt. Die gemessene Luftfeuchte betrug im Versuchszeitraum durchschnittlich 45,2 % (SD = 10,7 %), die Lufttemperatur lag bei 17,2 °C (SD = 2,9 °C). Die Messungen erfolgten mithilfe eines Datenloggers (HOBO U23 Pro v2, Onset Computer Corp., Bourne, USA) auf Höhe der Petrischalen.

Die Keimlängen aller zehn Keimlinge pro Petrischale wurden zum Versuchsende mit einem Lineal auf Millimeter genau erfasst, wobei jeweils die gesamte Länge aus Wurzel und Spross gemessen wurde. Gekrümmte Keimlinge wurden mithilfe einer Pinzette entlang des Lineals ausgerichtet und ihre Länge in Millimetern abgelesen. Der Zeitraum vom Versuchsstart am 08.01.2024 bis zum Versuchsende am 07.02.2024 betrug 30 Tage.

3.3 Freilandversuche

Ziel der Freilandversuche war es, Begrünungspflanzen für den Unterstockbereich im Weinbau hinsichtlich ihrer Etablierungsfähigkeit, Unterdrückung der Beikräuter und Auswirkungen auf Boden und Rebe zu bewerten. Zudem dienten Vergleiche mit einer chemischen und mechanischen Variante der Prüfung, ob eine Unterstockbegrünung als Alternative zur Beikrautregulierung geeignet ist.

3.3.1 Versuchsflächen

Die verschiedenen Begrünungsvarianten wurden unter praxisnahen Bedingungen im Unterstockbereich von Weinbergslagen in den Anbaugebieten Pfalz (Neustadt/Wstr., Deidesheim) und Württemberg (Bretzfeld) getestet (Tab. 10, Seite 36).

Tabelle 10: Verschiedene Versuchsflächen der Freilandversuche mit Ergebnissen der Bodenanalysen (LUFA Speyer, 17.09.21/17.11.22) vor Versuchsbeginn im Unterstockbereich in 0 bis 30 cm aus einer repräsentativen Mischprobe (Bodenanalyse: Kap. 3.5.4).

Versuchsflächen	Standort	Bodenart	pH-Wert	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	C/N	N	Humus
				mg/ 100 g getrockneter Boden					%
HUMO: Neustadt/Wstr., Pfalz	49.370314° N, 8.186277° E	sandiger Lehm (sL)	7,27	40	29	13	12,1	94	2,0
MECKEN: Neustadt/Wstr., Pfalz	49.37954° N, 8.19489° E	lehmgiger Sand (lS)	7,49	53	36	12	11,1	95	1,8
DEIDES: Deidesheim, Pfalz	49.41114° N, 8.17124° E	schwach lehmiger Sand (l'S)	6,97	23	21	13	10,5	100	1,8
BRETZ: Bretzfeld, Würt- temberg	49.17874° N, 9.39065° E	toniger Lehm (tL)	7,42	27	48	33	10,4	106	1,9

Die ausgewählten Versuchsstandorte unterscheiden sich gezielt in ihren Bodeneigenschaften, dem Alter der Rebanlage sowie in den klimatischen Bedingungen, um standortübergreifend beurteilen zu können, welche Begrünpflanzen sich unter welchen Bedingungen am besten etablieren. Im Folgenden werden die Versuchsanlagen Hundertmorgen Nord (HUMO) und Meckenheimer Str. (MECKEN) in Neustadt/Wstr. sowie in Deidesheim (DEIDES) und in Bretzfeld (BRETZ) im Detail beschrieben.

HUMO: Der Standort der Rebfläche „Hundertmorgen Nord/ Im vorderen Emmeswasen“ vom Staatsweingut mit Johannitergut des DLR Rheinpfalz (integrierte Bewirtschaftung) liegt in Neustadt-Mußbach (49.3734° N, 8.1821° E, 142 m ü. NN, ohne Hangneigung). Der Boden ist ein sandiger Lehm (Analysen LUFA Speyer) auf Rigosol-Parabraunerde über Lößlehm (Pleistozän) (LGB RLP 2025). Die Rebsorte Riesling (Klon N90 auf SO4) wurde 2014 mit einem Pflanzabstand von 2,0 m × 1,0 m gepflanzt und in einem flachen Halbbogen mit einer Kopfhöhe von ca. 85 cm erzogen. Die Traubenzone befindet sich in ca. 80 bis 130 cm Höhe. Zwischen den Rebzeilen war eine dauerhafte Gassenbegrünung mit Gräser-Leguminosen-Kräuter-Bestand etabliert, die zwei- bis dreimal jährlich gemulcht wurde. Die Fläche wurde bis Versuchsbeginn ausschließlich mechanisch im Unterstock gepflegt.

MECKEN: Die Versuchsfläche „Meckenheimer Straße/Im Glockenzehnt“ ist von der Fläche HUMO 1,2 km Luftlinie entfernt (49.37954° N, 8.19489° E, 135 m ü. NN, ohne Hangneigung) und wird ebenfalls vom Staatsweingut mit Johannitergut des DLR Rheinpfalz integriert bewirtschaftet. Der Boden ist ein lehmiger Sand (Analysen LUFA Speyer) auf Rigosol-Parabraunerde über Lößlehm (Pleistozän) (LGB RLP 2025). 2007 wurde hier mit der Rebsorte Sauvignon Blanc

auf eine SO4-Unterlage in Zeilen mit 2,1 m Abstand und 1,07 m Stockabstand bepflanzt und in einem flachen Halbbogen mit einer Kopfhöhe von ca. 85 cm erzogen. Die Traubenzone befindet sich in ca. 80 bis 130 cm Höhe. Die Gassen wiesen eine Begrünung aus Gräsern, Leguminosen und Kräutern auf, die im Frühsommer in jeder zweiten Gasse mit einer Kreiselegge oberflächlich gestört wurde. Im Gegensatz zur Fläche HUMO wurde der Unterstockbereich hier in den Jahren vor Versuchsbeginn chemisch mit Roundup PowerFlex® (Wirkstoff: Glyphosat) und Katana® (Wirkstoff: Flazasulfuron) behandelt. Die letzte Applikation beider Mittel fand ca. 20 Wochen bzw. die Applikation nur mit Roundup PowerFlex® ca. 8 Wochen vor der Einsaat statt.

DEIDES: Die Fläche „Gemmingen“ liegt in der Gemeinde Deidesheim (49.41114° N, 8.17124° E, 198 m ü. NN, mit 17 % Hangneigung) auf Rigosol-Parabraunerde über Lößlehm (Pleistozän) (LGB RLP 2025) mit sandigem Schluff als Bodenart (Analyse LUFA Speyer). Sie wird konventionell von „Die Weitlauffs“ bewirtschaftet. Die Rebsorte Riesling (Klon: KIE) auf der Unterlage SO4 wurde dort im Jahr 2022 mit 2,1 m Gassenabstand und 1,1 m Stockabstand neu gepflanzt. Die Reben wurden auf 65 cm Kopfhöhe erzogen, um einen Halbbogen zu erzeugen. Der Unterstockbereich wurde im selben Jahr vor Versuchsbeginn nicht bearbeitet und wies nur lückig- und niedrigwachsenden spontanen Bewuchs auf. Im ersten Jahr wurde eine alternierende Gassenbegrünung mit Kreuzblütlern und Leguminosen eingesät und in den Folgejahren jeweils zweimal pro Jahr gewalzt.

BRETZ: Dieser Standort liegt im Weinanbaugebiet Württemberg auf dem „Harschberg“ in Bretzfeld (49.17874° N, 9.39065° E, 255 m ü. NN, mit 20 % Hangneigung). Der Boden ist geprägt durch kalkhaltigen Pelosol-Rigosol aus Tonfließerde auf Ton- und Mergelstein der Grabfeld-Formation (früher: Gipskeuper) (LGRB 2025). Die Bodenart ist toniger Lehm (Analyse Lufa Speyer). Die Versuchsfläche wurde 2022 mit Cabernet Cortis auf der Unterlage Kober 5 BB bepflanzt. Die Anlage ist durch einen Gassenabstand von 2,2 m und einen Stockabstand von 1,1 m charakterisiert. Die Kopfhöhe beträgt für die Erziehung im Flachbogen 85 cm. Der Unterstockbereich wurde im selben Jahr vor Versuchsbeginn nicht bearbeitet und wies nur lückig- und niedrigwachsenden spontanen Bewuchs auf. Im ersten Jahr wurde eine Gassenbegrünung mit Kreuzblütlern und Leguminosen eingesät und in den Folgejahren ein- bis zweimal pro Jahr gemulcht.

In den Ertragsanlagen HUMO und MECKEN in Neustadt/Wstr. wurde am 15. bzw. 16. September 2021 ein Versuch in einem vollständig randomisierten Blockdesign (siehe Anhang 2) mit vier Wiederholungen über insgesamt 13 Rebzeilen (mit Zwischenzeilen außer

Versuch) begonnen. Die Größe eines Versuchsglieds betrug bei 0,5 m Breite des Unterstockbereichs 7,5 m² (Zeilenlänge von 15 Reben) in HUMO bzw. 14 m² (Zeilenlänge 20 Reben) in MECKEN.

In den Junganlagen DEIDES (in Deidesheim) und BRETZ (in Bretzfeld) wurde am 31. August 2022 bzw. am 23. Mai 2022 ein Versuch in einem vollständig randomisierten Blockdesign (siehe Anhang 3) mit vier Wiederholungen über insgesamt vier Rebzeilen mit jeweils zwei Blöcken übereinander in DEIDES bzw. über sechs Rebzeilen in BRETZ begonnen. Die Größe eines Versuchsglieds betrug bei 0,5 m Breite des Unterstockbereichs 7,5 m² (Zeilenlänge von 15 Reben).

Im Unterstockbereich der Flächen sollten die in Kapitel 3.1.3 ausgewählten Begrünungsvarianten (Tab. 11) über eine Dauer von zwei bis drei Jahren nach Einsaat (bis September 2024) geprüft werden, um deren Wachstum auf den unterschiedlichen Standorten zu bewerten. Aus diesem Grund wurden über den gesamten Versuchszeitraum in allen Varianten im Unterstockbereich keine zusätzlichen der genannten Bodenmanagementmaßnahmen durchgeführt. Auch eine künstliche Bewässerung fand in keinen der Versuchsflächen statt. Das Laubwandmanagement (Rebschnitt, Ausbrechen, Heften, Laubschnitt und Entblätterung) sowie der Pflanzenschutz (Fungizid-Applikationen v. a. gegen *Plasmopara viticola* und *Erysiphe necator*) wurden betriebsüblich durchgeführt und unterschieden sich nicht innerhalb der Varianten einer Versuchsfläche.

3.3.2 Versuchsvarianten

Zwei bzw. drei Tage vor Versuchsbeginn wurde der Unterstockbereich in den Ertragsanlagen mechanisch (Scheibenpflug) bearbeitet. Zu Versuchsbeginn wurde die Fläche in allen Versuchsanlagen und in allen Varianten nach dem folgenden Ablauf vorbereitet und eingesät. Dabei erfolgten die Saatbettvorbereitung und Einsaat am selben Tag (Versuchsbeginn s. o.).

Mit händischem Hacken und Rechen wurden noch vorhandene Beikräuter weitestgehend entfernt und ein flaches Saatbett bereitet. Anschließend wurden die Begrünungsvarianten per Hand mit einer Saatsbreite von 0,5 m im Unterstockbereich eingesät. Die Saatgutmenge wurde für jedes Versuchsglied einzeln mithilfe einer Feinwaage abgewogen. Die Saatstärke richtet sich nach den Händler-Empfehlungen, wurden jedoch aus Gründen der besseren Etablierung um 20 % erhöht. An allen Standorten wurden die Varianten unbehandelte Kontrolle (Ohne Einsaat) sowie die Begrünungsvarianten Begr_Med, Begr_Fes und Begr_Thym geprüft. In den Flächen HUMO, MECKEN und DEIDES wurden die Saatgut-Mischungen Begr_MixR und

Begr_MixM untersucht. Da in der Versuchsfläche BRETZ, die sich in einem ökologisch zertifizierten Weingut befindet, ausschließlich öko-zertifiziertes Saatgut verwendet werden durfte, wurden anstelle der Mischungen Begr_MixR und Begr_MixM die Einzelarten Begr_Trif und Begr_Prun eingesät. Zudem wurden die Begrünungsvarianten Begr_Med, Begr_Fes und Begr_Thym durch öko-zertifizierte Saatgutvarianten ersetzt (Tab. 11).

Tabelle 11: Begrünungsvarianten der Freilandversuche mit Bezugsquelle und Saatstärke (g/m²).

Begrünungsvarianten	Bezugsquelle	Saatstärke (g/m ²)
Begr_Med: Gelbklee (<i>Medicago lupulina</i> L.) als Mantelsaat	Appels Wilde Samen GmbH, Darmstadt, Deutschland	2,4
Begr_Fes: Gewöhnlicher Rot-Schwingel (<i>Festuca rubra</i> L. ssp. <i>rubra</i>)	Appels Wilde Samen GmbH, Darmstadt, Deutschland	4,8
Begr_Thym: Sand-Thymian (<i>Thymus serpyllum</i> L.)	Jelitto Staudensamen GmbH, Schwarmstedt, Deutschland	0,6
Begr_MixR: Mischung „Rebzeilenbegrünung“	Saaten Zeller GmbH & Co. KG, Eichenbühl, Deutschland	1,2
Begr_MixM: Mischung „Mythopia 3“	Camen Samen Steg e.K., Lauenau, Deutschland	1,8
Ersatzvarianten mit öko-zertifiziertem Saatgut für Versuchsfläche BRETZ:		
Begr_Trif: Weißklee (<i>Trifolium repens</i>) DE-ÖKO	Semo Bio GmbH, Weinsberg, Deutschland	2,4
Begr_Prun Kleine Braunelle (<i>Prunella vulgaris</i>) DE-ÖKO	Jelitto Staudensamen GmbH, Schwarmstedt, Deutschland	0,6
Begr_Med: Gelbklee (<i>Medicago lupulina</i> L.) DE-ÖKO	Semo Bio GmbH, Weinsberg, Deutschland	2,4
Begr_Fes: Gewöhnlicher Rot-Schwingel (<i>Festuca rubra</i> L. ssp. <i>rubra</i>) DE-ÖKO	Semo Bio GmbH, Weinsberg, Deutschland	4,8
Begr_Thym: Sand-Thymian (<i>Thymus serpyllum</i> L.) DE-ÖKO	Jelitto Staudensamen GmbH, Schwarmstedt, Deutschland	0,6

Die Kontrolle diente als Referenz für das unbeeinflusste Aufkommen und Wachstum der Spontanvegetation. Über die gesamte Versuchsdauer wurde diese Variante nicht bearbeitet. Ebenso wurden bei allen Begrünungsvarianten nach der Einsaat keine zusätzlichen Maßnahmen im Unterstockbereich durchgeführt. Eine Ausnahme stellt die Anlage DEIDES dar: Hier wurde in allen Varianten am 13.06.2024 eine Akku-Motorsense (FSA 50, STIHL Vertriebszentrale AG & Co. KG, Dieburg, Deutschland) eingesetzt, um die zu hochwachsenden Beikräuter mit rotierenden Nylonfaden ab einer Höhe von 50 cm abzutrennen.

In den Ertragsanlagen HUMO und MECKEN wurden zusätzlich Vergleichsvarianten mit mechanischer und chemischer Unterstockbehandlung eingeführt, um zu prüfen, ob eine Unterstockbegrünung diese Maßnahmen ersetzen kann. Eine mechanische Bodenbearbeitung erfolgte betriebsüblich fünf- bis sechsmal pro Jahr mit einem Scheibenpflug der Firma Rust Spezialgeräte für den Weinanbau GmbH (Meckenheim, Deutschland). Die Termine in HUMO/MECKEN während des Versuchszeitraumes waren am 17.03., 29.03., 19.04., 09./10.05., 23./31.05. und 04./05.07.2022, am 05.04., 19.04., 15.05., 26.05. und 13.06.2023 sowie am 22.03., 09.04., 25.04., 07.06. und 22.07.2024.

Die chemische Variante wurde ab dem zweiten Versuchsjahr (2023) in die Untersuchung integriert. Zur Beikrautregulierung kamen Herbizide in zwei jährlichen Applikationen zum Einsatz. Die erste Anwendung erfolgte jeweils im Frühjahr mit einer Wirkstoffkombination aus Glyphosat und Flazasulfuron, während die zweite Anwendung im Sommer ausschließlich mit Glyphosat durchgeführt wurde. Die folgenden Herbizide wurden während des Versuchszeitraumes verwendet:

- Roundup PowerFlex® (Bayer CropScience Deutschland GmbH, Monheim, Deutschland) mit dem Wirkstoff Glyphosat (480 g/l)
- Boom efekt® (Albaugh LLC, Slowenien) mit dem Wirkstoff Glyphosat (360 g/l)
- Katana® (ISK Biosciences Europe, Belgien) mit dem Wirkstoff Flazasulfuron (250 g/kg)

Am 27.04.2023 wurde 1,5 l/ha Roundup PowerFlex® (entspricht 720 g/ha Glyphosat) sowie 40 g/ha Katana® (entspricht 10 g/ha Flazasulfuron) im Unterstockbereich auf ca. 0,6 m Breite appliziert. Am 26.07.2023 wurde eine weitere Applikation mit 1,5 l/ha Roundup PowerFlex® (entspricht 720 g/ha Glyphosat) durchgeführt. Im Folgejahr, am 13.05.2024, erfolgte eine Applikation mit 1,5 l/ha Roundup PowerFlex® (entspricht 720 g/ha Glyphosat) sowie 40 g/ha Katana® (entspricht 10 g/ha Flazasulfuron). Zuletzt wurde am 22.07.2024 mit 2,0 l/ha Boom efekt® (entspricht ebenfalls 720 g/ha Glyphosat) appliziert. Die Wassermenge, die zusätzlich pro Herbizid-Applikation ausgebracht wurde, betrug 100 l/ha.

Die folgende Abbildung 12 auf Seite 41 zeigt die verschiedenen Versuchsvarianten in der Fläche HUMO.

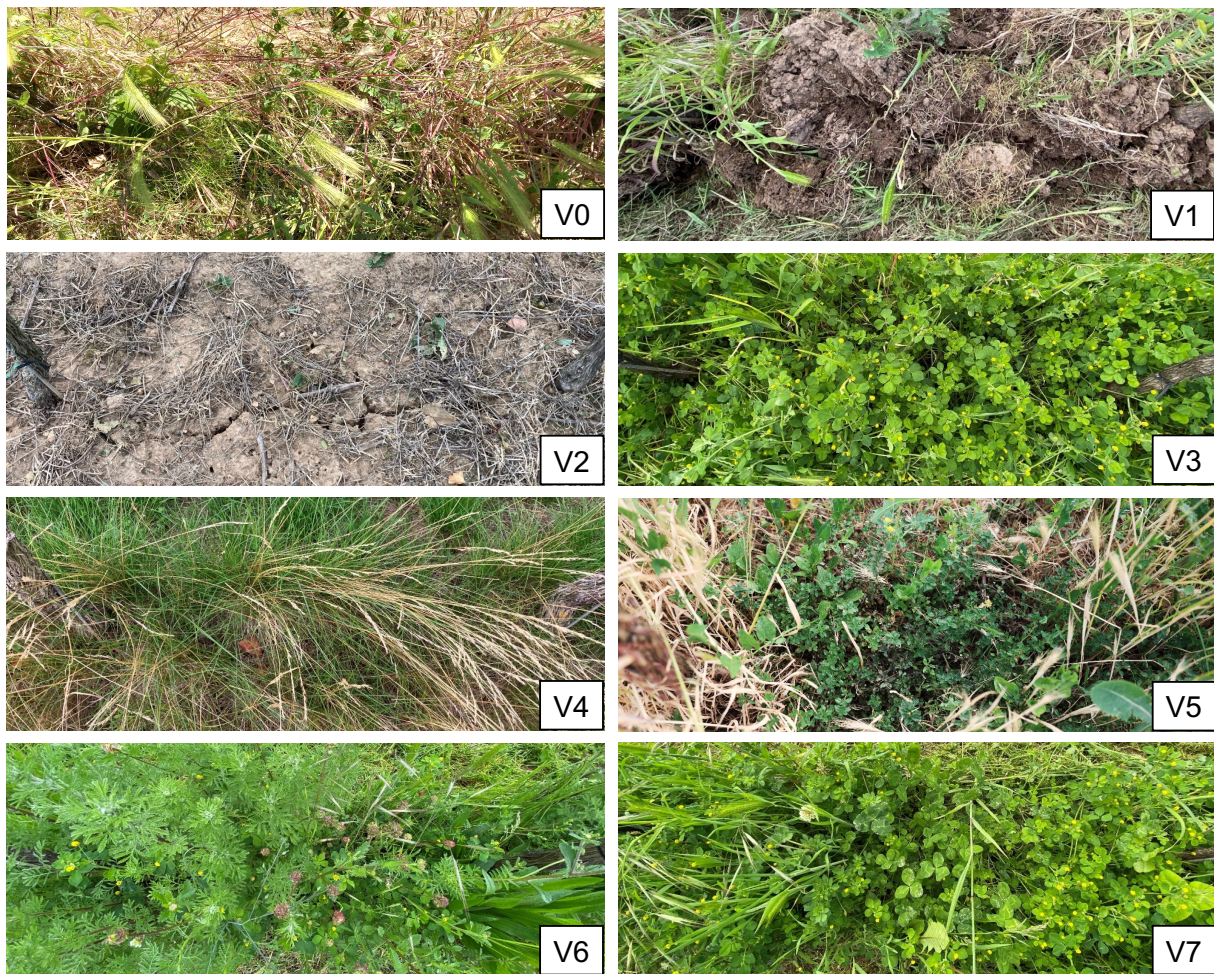


Abbildung 12: Versuchsvarianten in der Fläche HUMO: V0 = Kontrolle, V1 = Mechanisch, V2 = Chemisch, V3 = Begr_Med (*Medicago lupulina*), V4 = Begr_Fes (*Festuca rubra*), V5=Begr_Thym (*Thymus serpyllum*), V6 = Begr_MixR (Mischung „Rebzeilenbegrünung“), V7 = Begr_MixM (Mischung „Mythopia 3“), Einsaat am 15.09.2021, Fotoaufnahmen vom 15.05./19.07.2023 (Bildquellen: K. Weihbrecht).

Zur Bewertung der Begrünungspflanzen wurden verschiedene Merkmale erfasst, die sowohl die Wachstumsentwicklung als auch die Funktionalität im Unterstockbereich abbilden. Der Deckungsgrad nach LONDO diente dabei der Einschätzung der Bodenbedeckung der eingesäten Pflanzen und damit auch der Anschauung der Beikrautunterdrückung durch die einzelnen Varianten. Die Wuchshöhe lieferte quantitative Hinweise auf ein mögliches Risiko für das Einwachsen in die Traubenzone. Die oberirdische Biomasse (Frisch- und Trockenmasse) ermöglichte eine Bewertung der Etablierung der Begrünung, während die Wurzelmasse eine Einschätzung der Durchwurzelungstiefe und damit zur potentiellen Wasser- und Nährstoffkonkurrenz gegenüber der Rebe erlaubte. Die Auswahl der bodenbezogenen Parameter zielte darauf ab, die Beeinflussung verschiedener Bodenmanagementmaßnahmen auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt zu erfassen. Die kontinuierliche Messung der Bodenfeuchte und Temperatur diente der Erfassung mikroklimatischer Effekte, die insbesondere in Hinblick auf Was-

serverfügbarkeit und Verdunstung für die Rebe relevant sind. Die Infiltrationsrate wurde herangezogen, um Auswirkungen auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens nach Niederschlägen zu bewerten. Ergänzend wurden klassische Bodenparameter (pH-Wert, Humusgehalt, Nährstoffe) analysiert, um mögliche Veränderungen der Bodenfruchtbarkeit zu erkennen. Für die Abschätzung möglicher Auswirkungen auf die Reben wurden sowohl vegetative als auch generative Parameter erhoben. Das Schnittholzgewicht diente in Ertragsanlagen als Maß für das vegetative Wachstum im Jahresverlauf. In Junganlagen wurden stattdessen Triebblängen und -dicken gemessen, da sich die Pflanzen noch in der Aufbauphase befinden und der Rebschnitt in den ersten Jahren nicht standardisiert verläuft. Schließlich wurde die Traubenstruktur und -gesundheit in Hinblick auf den Grauschimmelbefall (*Botrytis cinerea*), Ertrag, Einzelbeerengewicht und Mostinhaltsstoffe aufgenommen, um mögliche Einflüsse der Begrünung auf die Traubenqualität und -quantität zu identifizieren.

Auf der Hauptversuchsfläche HUMO wurden sämtliche Parameter erhoben, um eine umfassende Bewertung der Auswirkungen unterschiedlicher Unterstockmanagementstrategien auf bodenphysikalische und pflanzenbauliche Kenngrößen zu erzielen. Die zusätzlichen Versuchsfelder MECKEN, DEIDES und BRETZ wurden zusätzlich angelegt, um die Etablierung ausgewählter Begrünungsvarianten unter unterschiedlichen Standortbedingungen zu prüfen sowie erste Rückschlüsse auf die Wirkung in Junganlagen zu ermöglichen. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht der Varianten und der angewandten Methoden in den verschiedenen Versuchsfeldern.

Tabelle 12: Übersicht der Varianten und angewandten Methoden mit Messzeitpunkten der Freilandversuche.

Fläche und Varianten	Methoden (Kapitel)	Termine
HUMO:	3.4.1 Bodendeckung nach LONDO	16.05./15.07./30.09.2022, 15.05./19.07./21.09.2023, 03.05./10.07./25.09.2024
Kontrolle	3.4.2 Beikrautregulierende Wirkung	Siehe 3.4.1
Mechanisch	3.4.3 Maximale Wuchshöhe	Siehe 3.4.1
Chemisch	3.4.4 Oberirdische Frisch- und Trockenmasse	07.10.2024
Begr_Med	3.4.5 Wurzelmasse	07.11.2024
Begr_Fes	3.5.1 Vol. Bodenfeuchte, Boden- und Lufttemperatur	Kontinuierlich, Messintervall von 15 Minuten
Begr_Thym	3.5.3 Infiltrationsrate	24.07.2024
Begr_MixR	3.5.4 Bodenanalytik (N_{min})	08.11.2022, 25.05./ 27.11.2023, 22.05./ 20.11.2024
Begr_MixM	3.5.4 Bodenanalytik (C_{org} und mikrobielle Biomasse)	21.08.2024
	3.6.1 Frühmorgentliches Blattwasserpotential	12.08.2022, 09.06./13.07./10.08./14.09.2023, 14.06./17.07./07.08./29.08.2024

	3.6.2 Biegegrad für Lockerbeerigkeit 3.6.3 <i>Botrytis cinerea</i> Befallshäufigkeit und Befallsstärke 3.6.4 Stockertrag 3.6.5 Einzelbeerengewicht 3.6.6 Traubenmostanalytik	19.09.2022,11.09.2023,17.09.2024 Siehe 3.6.2 20.09.2022,19.09.2023,19.09.2024 20.09.2022,12.09.2023,18.09.2024 Siehe 3.6.5
MECKEN: Kontrolle Mechanisch Chemisch Begr_Med Begr_Fes Begr_Thym Begr_MixR Begr_MixM	3.4.1 Bodendeckung nach LONDO 3.4.2 Beikrautregulierende Wirkung 3.4.3 Maximale Wuchshöhe 3.6.1 Frühmorgentliches Blattwasserpotential	16.05./15.07./30.09.2022, 25.05./19.07./22.09.2023, 03.05./12.07./20.09.2024 Siehe 3.4.1 Siehe 3.4.1 12.08.2022, 09.06./13.07./10.08.2023, 14.06./ 08.08.2024
DEIDES: Kontrolle Begr_Med Begr_Fes Begr_Thym Begr_MixR Begr_MixM	3.4.1 Bodendeckung nach LONDO 3.4.2 Beikrautregulierende Wirkung 3.4.3 Maximale Wuchshöhe 3.6.1 Frühmorgentliches Blattwasserpotential	26.05./01.07./22.09.2023, 05.05./12.07./24.09.2024 Siehe 3.4.1 Siehe 3.4.1 29.06./16.08./14.09.2023 13.06./18.07./07.08./29.08.2024
BRETZ: Kontrolle Begr_Med Begr_Fes Begr_Thym Begr_Trif Begr_Prun	3.4.1 Deckungsgrad nach LONDO 3.4.2 Beikrautregulierende Wirkung 3.4.3 Maximale Wuchshöhe 3.6.1 Frühmorgentliches Blattwasserpotential	24.05./11.07./07.09.2023, 02.05./22.07./28.09.2024 Siehe 3.4.1 Siehe 3.4.1 11.07./11.08.23

3.3.3 Witterungsverlauf

Die Witterungsverläufe über die jeweiligen Versuchszeiträume naheliegender Wetterstationen zu den Versuchsflächen HUMO, MECKEN, DEIDES und BRETZ sind in Abbildung 13 bis 15 auf Seite 44 bis 45 aufgetragen.

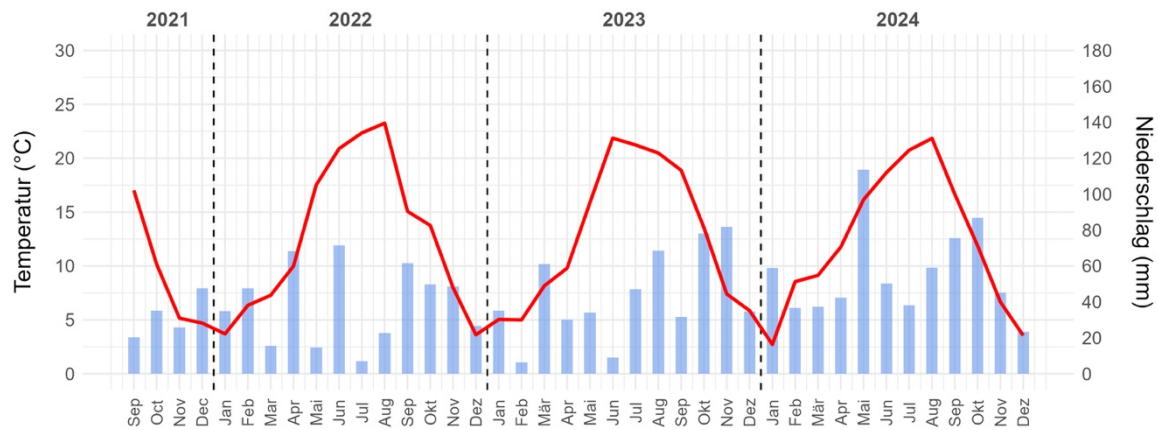


Abbildung 13: Liniendiagramm von gemittelten Tagestemperaturen (°C) ca. 2 m über dem Boden und Niederschlagssummen (mm) als Balken über den Versuchszeitraum (Daten: Agrarmeteorologie RLP 2025); gemessen an der Wetterstation am DLR Rheinpfalz in Mussbach, Neustadt/Wstr. (49.36832° N, 8.18546° E, 140 m ü. NN, Entfernung der Luftlinie nach HUMO: 630 m / MECKEN: 1,4 km; Einsaattermin: 15./16.09.2021.

Die Wetterstation nahe der Versuchsflächen HUMO und MECKEN zeigte, dass die durchschnittlichen Temperaturen über drei Jahre zwischen 12,7 °C und 12,8 °C lagen, wobei folgende Höchstwerte verzeichnet wurden: 23,2 °C im August 2022, 21,9 °C im Juni 2023 und 21,8 °C im August 2024. Die Gesamtniederschlagsmenge war im Jahr 2022 mit 469 mm die niedrigste im Versuchszeitraum. Besonders trocken war es im Juli und August mit nur 7 mm bzw. 23 mm. Im Jahr 2023 lag der Gesamtniederschlag bei 517 mm. Während der Juni mit lediglich 9 mm außergewöhnlich trocken blieb, kam es kurz vor der Lese im August zu einem deutlichen Anstieg der Niederschläge. Im Jahr 2024 war die Niederschlagsmenge mit 667 mm deutlich höher, wobei besonders im Mai (114 mm) sowie zur Lesezeit im August und September (59 mm bzw. 76 mm) nasse Bedingungen herrschten.

Die von der Wetterstation Ruppertsberg aufgezeichneten Daten zeigen ein ähnliches Bild (Abb. 14).

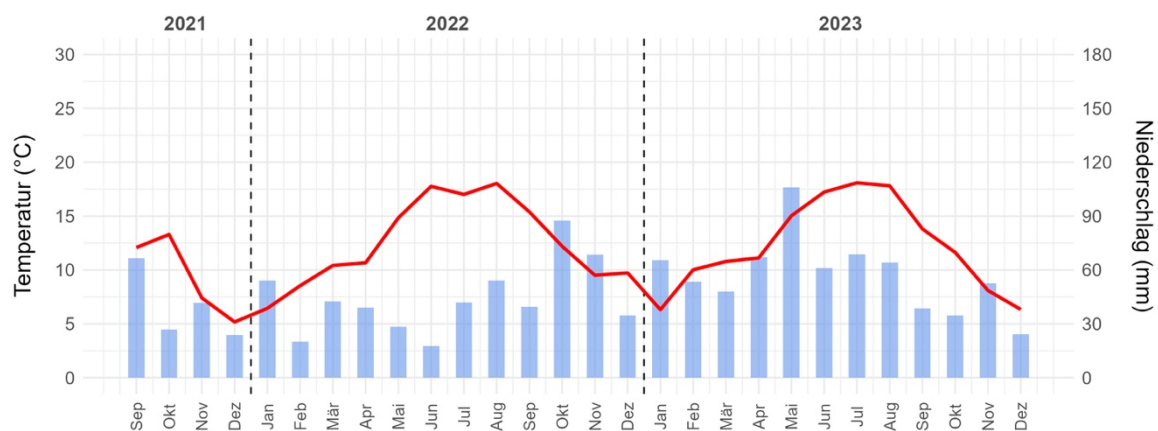


Abbildung 14: Liniendiagramm von gemittelten Tagestemperaturen (°C) ca. 2 m über dem Boden und Niederschlagssummen (mm) als Balken über den Versuchszeitraum (Daten: Agrarmeteorologie RLP 2025) ; gemessen an der Wetterstation in Ruppertsberg, Bad Dürkheim (49.39447° N, 8.19233° E, 140 m ü. NN, Entfernung der Luftlinie nach DEIDES: 2,4 km; Einsaattermin: 31.08.2022.

Die durchschnittlichen Jahrestemperaturen lagen im Jahr 2023 bei 12,5 °C und im Jahr 2024 bei 12,2 °C. Die höchsten Monatsmittel wurden im August 2023 (18,0 °C) und Juli 2024 (18,1 °C) gemessen. Die Niederschlagsverteilung variierte deutlich zwischen den Jahren. Während der Gesamtjahresniederschlag 2023 517 mm betrug, war 2024 mit 667 mm deutlich feuchter. Besonders hohe Monatswerte wurden im Mai 2024 mit 106 mm sowie im September 2023 mit 88 mm gemessen. In den Sommermonaten 2023 war der Juni mit nur 18 mm äußerst trocken.

Abbildung 15 zeigt die Klima-Aufzeichnung der Wetterstation in Öhringen für die Versuchsfläche BRETZ.

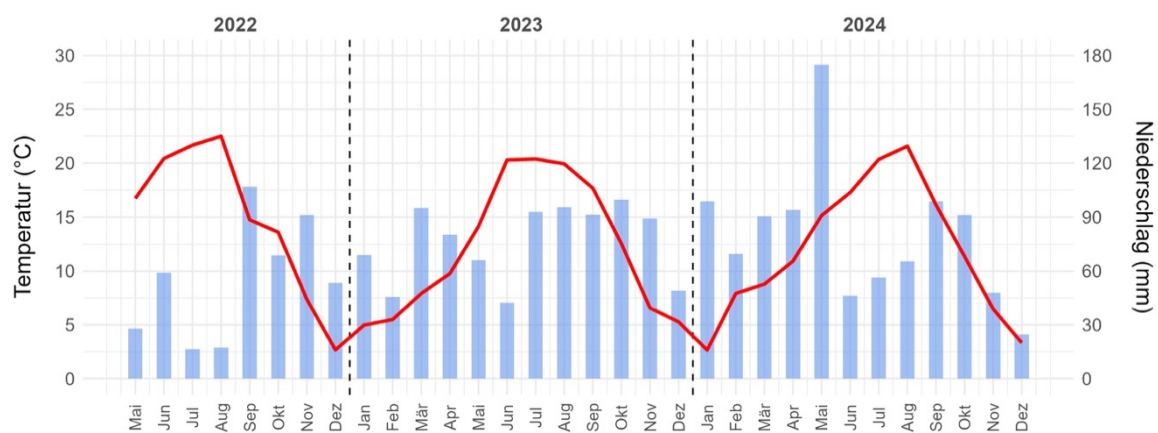


Abbildung 15: Linienvorlauf von gemittelten Tagestemperaturen (°C) ca. 2 m über dem Boden und Niederschlags-summen (mm) als Balken über den Versuchszeitraum (Daten: Meteostat 2025); gemessen an der Wetterstation in Öhringen (49.2167° N, 9.5167° E, 276 m ü. NN), Entfernung der Luftlinie nach BRETZ: 10,1 km; Einsaattermin: 23.05.2022.

Nach dem Einsaattermin im Mai 2022 folgten verhältnismäßig warme, jedoch auch trockene Monate. Besonders warm waren die Sommermonate Juli (21,7 °C) und August (22,5 °C). Gleichzeitig betrugen die Niederschlagsmengen im Mai 28 mm, im Juni 59 mm, im Juli 16 mm und im August lediglich 17 mm. In den Jahren 2023 und 2024 lagen die durchschnittlichen Monatstemperaturen bei 12,1 °C bzw. 11,8 °C. Die höchsten Temperaturen dieser Jahre wurden ebenfalls in den Sommermonaten gemessen: Im Juli waren es durchschnittlich 20,4 °C und im August 2024 21,6 °C. Insgesamt waren die Niederschlagsmengen in 2023 und 2024, mit der Ausnahme von Juni 2023 (42 mm) und Juni 2024 (46 mm), deutlich höher als bei den anderen Versuchsflächen: 2023 betrug die Niederschlagssumme 916 mm und 2024 958 mm.

3.4 Wachstum der Pflanzen

3.4.1 Bodendeckung nach LONDO

In Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen erfolgte die Schätzung der gesamten Bodenoberfläche von 0,0346 m² pro Gefäß. In den Freilandversuchen wurden pro Versuchsglied vier standardisierte Boniturflächen von jeweils 0,4 m² (0,4 m Breite × 1,0 m Länge bzw. 1,1m Länge) zwischen zwei Rebstöcken festgelegt. Auf den definierten Boniturflächen wurde der sichtbare Bodenbedeckungsgrad durch eingesäte Pflanzenarten, spontane Beikrautarten, Streu und offene Bodenstellen jeweils einer von 13 Deckungsgradklassen der LONDO-Skala zugeordnet (LONDO 1976). Dabei wurden für die Einsaaten und Beikräuter nur grüne bzw. lebendige Pflanzen(-teile) erfasst. Alle abgestorbenen Pflanzen(-teile) wurden der Kategorie Streu zugeordnet. Diese Skala reicht von <1 % Bedeckung (Klasse 1) bis 91 bis 100 % Bedeckung (Klasse 13). Die Schätzwerte wurden über die Vegetation jeweils einmal in den Monaten Mai, Juli und September erfasst. Für die Auswertung wurden die Klassenmittelwerte herangezogen, um den mittleren Deckungsgrad (%) je Wiederholung für jedes Jahr zu berechnen.

3.4.2 Beikrautregulierende Wirkung

Zur quantitativen Bewertung der beikrautunterdrückenden Wirkung durch die eingesäten Begrünungsvarianten wurde der Wirkungsgrad nach ABBOTT (1925) berechnet. Diese Methode dient dazu, die Wirkung einer Maßnahme im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle auszudrücken. In diesem Fall bedeutet es die Reduktion der Bodenbedeckung durch spontane Beikräuter im Vergleich zur Kontrolle (Spontanbegrünung).

Die Berechnung erfolgte gemäß nachstehender Formel:

$$\text{Beikrautunterdrückende Wirkung (\%)} = \left(\frac{B_{\text{Kontrolle}} - B_{\text{Einsaat}}}{B_{\text{Kontrolle}}} \right) \times 100$$

Hierbei gilt:

$B_{\text{Kontrolle}}$ = Deckungsgrad der Beikräuter in der Kontrollvariante
(Mittelwert aus vier Wiederholungen innerhalb derselben Messreihe, d. h. derselbe Zeitpunkt und dieselbe Versuchsfläche)

B_{Einsaat} = Deckungsgrad der Beikräuter in der eingesäten Begrünungsvariante

Bei berechneten negativen Werten wurden diese durch Null ersetzt, da eine beikrautregulierende Wirkung von 0 % angenommen wurde.

3.4.3 Maximale Wuchshöhe

Mit einem Zollstock wurden die maximalen Wuchshöhen (cm) der einzelnen Pflanzenarten im natürlichen, nicht aufgerichteten Zustand erfasst. Für die Anzuchtversuche unter klimatischen Bedingungen wurde eine Messung pro Kulturgefäß durchgeführt. In Freilandversuchen wurden pro Fläche und Messtermin mindestens zehn der auftretenden Individuen über alle Wiederholungen hinweg gemessen.

3.4.4 Oberirdische Frisch- und Trockenmasse

Auf zuvor definierten Flächen wurden die oberirdisch gewachsenen Pflanzenteile erfasst. Im Freilandversuch wurden hierfür Messstellen ausgewählt, die eine nahezu 100 % Bodendeckung der Begrünungsvarianten aufwiesen. Für die Vergleichsvarianten wurden möglichst repräsentative Messstellen gewählt. Je Versuchsglied wurde auf einer mit einem Metall-Rahmen definierten Fläche von 0,16 m² (40 cm x 40 cm) das oberirdische Pflanzenmaterial mit einer Grasschere vollständig abgeerntet und nach Abwiegen als oberirdische Frischmasse (g) festgehalten. Die Proben wurden in Papiertüten in einem Umluft-Trockenschrank (UNB 300, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Deutschland) bei 104 °C bis zur Gewichtskonstanz (ca. 24 h) getrocknet, um die Trockensubstanz mit einer Feinwaage zu bestimmen. Die Gewichte der Frisch- und Trockenmasse wurden auf eine Fläche von 1 m² umgerechnet.

3.4.5 Wurzelmasse

Für Versuche in Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen wurde pro Gefäß das vollständige Bodenmaterial als Probe herangezogen. Im Freilandversuch wurden dieselben Messstellen ausgewählt, die bereits für die oberirdische Biomasse (Kap. 3.4.4) herangezogen wurden. Die Probenahme mit einem Einstich pro Versuchsglied erfolgte mittig zwischen zwei Rebstöcken mit einem Wurzelbohrer (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg), um eine Bodenprobe in 45 cm Bodentiefe mit einem Durchmesser von 8 cm zu ziehen. Die Probe wurde dabei in Tiefen von 0 bis 15 cm, 15 bis 30 cm und 30 bis 45 cm unterteilt. Die Bodenproben wurden mit einem Bodensieb (Sterico GmbH, Düsseldorf, Deutschland) mit einer Maschenweite von 3 mm ausgewaschen. Der Vorgang wurde so lange wiederholt, bis die Erde vollständig entfernt wurde. Die im Sieb verbliebenen Wurzeln wurden luftgetrocknet und die an der starken Verholzung und Dunkelfärbung erkennbaren Rebwurzeln aussortiert. Anschließend wurden die Wurzeln mit der Feinwaage abgewogen, um so die Wurzelmassen (g) zu erhalten, die auf eine Fläche von 1 m² umgerechnet wurden.

3.4.6 Pflanzenanalytik

Die Pflanzenproben wurden, wie in Kap. 3.4.4 beschrieben, entnommen und zur Nährstoffanalyse bei 104 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend an die LUFA Speyer zur Bestimmung von Makro- und Mikronährstoffen übersendet. Die Wahl dieser höheren Trocknungstemperatur diente der vollständigen Wasserentfernung für die Bestimmung der Trockenmasse. Da jedoch bei Temperaturen über 100 °C flüchtige Stickstoff-Verbindungen (z. B. Ammonium oder organisch gebundener N) teilweise verloren gehen können, ist es möglich, dass der ermittelte Gesamtstickstoff-Gehalt geringfügig unterschätzt wurde. Gleiches gilt für den Gesamtkohlenstoff-Gehalt (Tab. 13, Seite 60).

Tabelle 13: Untersuchte Nährstoffe der Pflanzenanalytik durch die LUFA Speyer.

Parameter	Einheit	Analysemethode	LUFA-/VDLUFA-Code
Trockenmasse	%	Trocknung bei 105 °C	VDLUFA 3.1/2/5:1976
Gesamtstickstoff (N)	g/kg TS	Elementaranalyse nach Dumas (Verbrennung)	VDLUFA 4.1.2:2004
Phosphor (P)	g/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss (HNO ₃)	DIN EN ISO 11885:2009-09
Kalium (K)	g/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss	DIN EN ISO 11885:2009-09
Calcium (Ca)	g/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss	DIN EN ISO 11885:2009-09
Magnesium (Mg)	g/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss	DIN EN ISO 11885:2009-09
Schwefel (S)	g/kg TS	ICP-OES oder Elementaranalyse	DIN EN ISO 11885:2009-09
Eisen (Fe)	mg/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss	VDLUFA 2.2.2.6:2011
Mangan (Mn)	mg/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss	VDLUFA 2.2.2.6:2011
Zink (Zn)	mg/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss	VDLUFA 2.2.2.6:2011
Kupfer (Cu)	mg/kg TS	ICP-OES nach Mikrowellenaufschluss	VDLUFA 2.2.2.6:2011
Bor (B)	mg/kg TS	ICP-OES oder Kolorimetrie nach Mikrowellenaufschluss	DIN EN ISO 11885:2009-09

3.5 Einfluss der Begrünungspflanzen auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens

3.5.1 Volumetrische Bodenfeuchte, Boden- und Lufttemperatur

Für die Messung der volumetrischen Bodenfeuchte (cm^3/cm^3) sowie der Boden- und Lufttemperaturen ($^{\circ}\text{C}$) wurde TOMST® TMS-Datenlogger (TOMST s.r.o., Tschechische Republik) verwendet (Abb. 17). Laut Hersteller hat das Standardgerät dabei folgende Messpunkte: Bodenfeuchtesensor bei - 6 cm Bodentiefe und Temperatursensoren bei - 6, + 2 und + 15 cm (TOMST s.r.o. 2025). In der Anlage HUMO wurde zusätzlich ein Modell mit einer Kabeleinheit bei - 40 cm Bodentiefe installiert, um die Bodenfeuchte und -temperatur auch in tieferen Bodenschichten zu untersuchen.

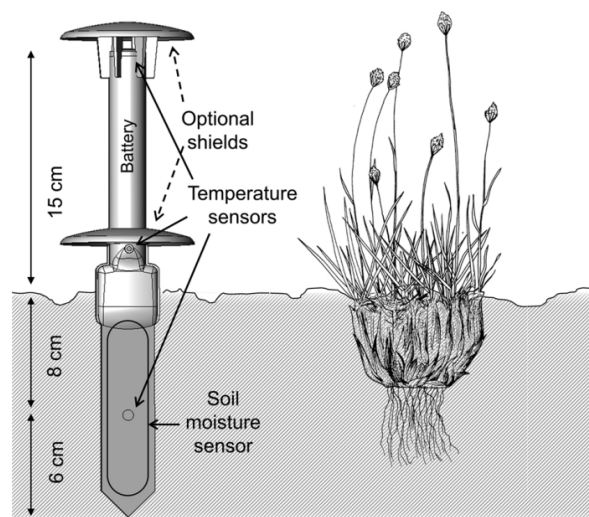


Abbildung 16: Schema des TMS-Datenloggers zur Erfassung der Bodenfeuchte und der Temperatur im Boden bzw. über der Bodenoberfläche (WILD et al. 2019).

Für die Freilandversuche wurde jeweils ein Standard-Logger zu Versuchsbeginn im Unterstockbereich jedes Versuchsglieds aller Varianten und aller Versuchsflächen mittig zwischen zwei Rebstöcken installiert. Über die gesamten Messzeiträume nahmen die Datenlogger Messungen in 15-Minuten-Intervallen auf und speicherten sie auf einer internen Speicherkarte. Die Rohwerte für die volumetrische Bodenfeuchte wurden mithilfe der Time-Domain-Transmission-Methode (TDT) erfasst und anschließend mithilfe der Kalibrierungsfunktion in der mitgelieferten Lolly-Software in die volumetrische Bodenfeuchte (cm^3 Wasser/ cm^3 Boden) umgerechnet.

Die Funktion der Kalibrationskurve am Beispiel der Bodenart „sandiger Lehm“ 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 17 zeigt die aus der Gleichung resultierende Verlaufskurve der Roh-Werte gegenüber der volumetrischen Bodenfeuchte.

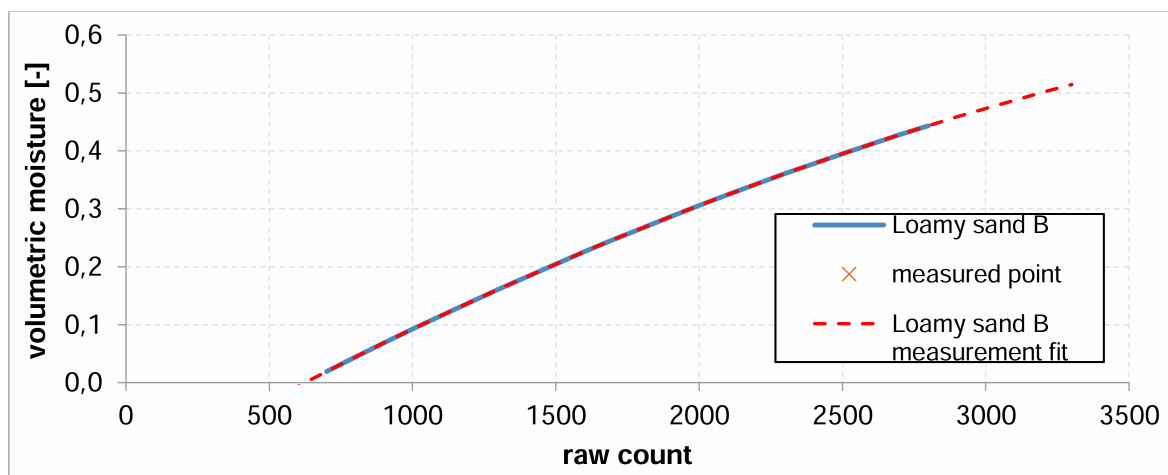


Abbildung 17: Die von TOMST® zur Verfügung gestellte Kalibrationsfunktion für die Bestimmung der volumetrischen Bodenfeuchtigkeit bei lehmigem Sand (WILD et al. 2019).

Die Einzelwerte der Bodenfeuchte und Temperaturen wurden innerhalb eines Zeitraumes zu Mittelwerten zusammengefasst und statistisch verrechnet.

3.5.2 Infiltrierte Wassermenge (Kick-Brauckmann-Kulturgefäße)

Für die Ermittlung der infiltrierten Wassermenge (I) wurden die an den Kick-Brauckmann-Kulturgefäßen installierten Auffangflaschen aller Gefäßeinheiten regelmäßig geleert und der Inhalt mit einer Standwaage abgewogen.

3.5.3 Infiltrationsrate

Die Infiltrationsrate von Wasser in den Boden wurde pro Versuchsglied an zwei Messstellen jeweils zwischen den Rebstöcken im Unterstockbereich mit dem Doppelring-Infiltrometer gemessen. Diese Methode besteht aus zwei konzentrischen Metallzylindern, wobei der innere Ring (18 cm Durchmesser) innerhalb des äußeren Rings (28 cm Durchmesser) platziert wird. Die Ringe wurden mithilfe eines Gummihammers und eines Holzbretts gleichmäßig

5 cm tief in den Boden eingeschlagen. Bei der mechanischen Variante wurde der Boden aufgrund loser Bodenschollen auf der Oberfläche zuvor leicht angedrückt und eingeebnet.

Für die Messung wurden beide Ringe gleichzeitig mit Wasser gefüllt, wobei darauf geachtet wurde, dass der Wasserstand im inneren und äußeren Ring gleich blieb, um seitliche Flusstörungen zu minimieren (BOUWER 1986). Über einen Zeitraum von 60 Sekunden wurde der Wasserstand konstant gehalten, indem Wasser mithilfe eines Messbechers nachgefüllt wurde. Das jeweils nachgefüllte Wasservolumen im inneren Ring wurde an jedem Messpunkt gemessen und als infiltrierte Wassermenge (ml/min) dokumentiert. Zur Berechnung der Infiltrationsmenge pro Fläche (mm) wurde die folgende Formel verwendet:

$$\text{Infiltration (mm)} = \frac{V \text{ (ml)}}{1000} \times \frac{1}{A \text{ (m}^2\text{)}}$$

Die Messung erfolgte im zylindrischen Gefäß mit einem Durchmesser von 18 cm. Die zugehörige Oberfläche beträgt:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (9\text{cm})^2 = 254,47 \text{ cm}^2 = 0,025447 \text{ m}^2$$

3.5.4 Bodenanalytik

Für jede Bodenprobe wurden 4 bis 5 Einstiche im Unterstockbereich in 0 bis 30 cm Bodentiefe gezogen. Der mit dem Bohrstock gezogene Grund wurde von Steinen und organischem Material befreit und in einem Gefrierbeutel (Volumen 3 Liter) gesammelt. Diese wurden gekühlt transportiert und bis zur Analyse bei der LUFA eingefroren. Die standardisierten Verfahren sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Untersuchte Parameter der Bodenanalytik durch die LUFA Speyer.

Bodenparameter	Einheit	Analytische Methode	VDLUFA-/ Norm-Code
Trockenmasse (TM)	%	Trocknung bei 105 °C	VDLUFA I, A2.1.1:1991
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/100 g FS	Extraktion mit 0,0125 M CaCl ₂ , Photometrie	VDLUFA I, A6.1.4.1:2002
Ammonium-N (NH ₄ -N)	kg/ha	Umrechnung aus Extraktmenge	VDLUFA I, A6.1.4.1:2002
Nitrat (NO ₃ ⁻)	mg/100 g FS	Extraktion mit 0,0125 M CaCl ₂ , Photometrie	VDLUFA I, A6.1.4.1:2002
Nitrat-N (NO ₃ -N)	kg/ha	Umrechnung aus Extraktmenge	VDLUFA I, A6.1.4.1:2002
Bodenart (Textur)	–	Fingerprobe oder Sedimentationsanalyse	VDLUFA I, D2.1:1996

pH-Wert (CaCl ₂)	–	pH-Messung in CaCl ₂ -Lösung (0,01 M)	VDLUFA I, A5.1.1:2016
Organischer Kohlenstoff (Corg)	% TS	Elementaranalyse (Verbrennung bei 950 °C)	DIN ISO 10694:1996-08
mikrobielle Biomasse	mg/100g TS	Substratinduzierte Atmung (SIR) nach Zugabe von Glucose	DIN EN ISO 14240-1:2011
Gesamtstickstoff (Nges)	mg/100 g TS	Elementaranalyse (Dumas-Verfahren)	VDLUFA I, A2.2.5:2012
C/N-Verhältnis	–	Berechnung aus Corg und Nges	berechnet
Humusgehalt	% TS	Berechnung: Corg × 1,72	berechnet
Phosphat (P ₂ O ₅ , CAL)	mg/100 g TS	Extraktion mit CAL-Lösung, Photometrie	VDLUFA I, A6.2.1.1:2012
Kalium (K ₂ O, CAL)	mg/100 g TS	Extraktion mit CAL, Flammenphotometrie/ICP-OES	VDLUFA I, A6.2.1.1:2012
Magnesium (Mg)	mg/100 g TS	Extraktion mit CaCl ₂ oder CAL, ICP-OES	VDLUFA I, A6.2.4.1:1991
Bor (B, CAT)	mg/kg TS	Extraktion mit heißem Wasser, Photometrie (Azomethin-H)	VDLUFA I, A6.4.1:2002
Kupfer (Cu, CAT)	mg/kg TS	Extraktion mit CAT-Lösung, ICP-OES oder AAS	VDLUFA I, A6.4.1:2002
Mangan (Mn, CAT)	mg/kg TS	Extraktion mit CAT, ICP-OES oder AAS	VDLUFA I, A6.4.1:2002
Zink (Zn, CAT)	mg/kg TS	Extraktion mit CAT, ICP-OES oder AAS	VDLUFA I, A6.4.1:2002

3.6 Einfluss der Begrünungspflanzen auf rebphysiologische Parameter

3.6.1 Frühmorgentliches Blattwasserpotential

Das Wasserpotential wurde vor Sonnenaufgang mittels Scholander-Druckkammer M-615 (PMS Instrument Company, Albany, USA) nach SCHOLANDER et al. (1965) gemessen. Es wurde jeweils ein unbeschädigtes Haupttriebblatt auf Höhe der Traubenzone von mindestens zwei Reben pro Versuchsglied herangezogen. Das am Blattstiel abgeschnittene Blatt wurde in der Druckkammer luftdicht eingeschlossen, sodass das Schnittende etwas aus der Kammer ragte. Anschließend wurde das Blatt langsam ansteigend unter Druck gesetzt. Sobald Wasser beginnt an der Schnittstelle auszutreten, ist das Gleichgewicht erreicht, d. h. der Druck in der Kammer entspricht der Spannung, unter der der Wasserstrom dieses Blattes an der Pflanze vor dem Schnitt stand. Dieser Wert entspricht gleichzeitig der Saugspannung im gesamten Wurzelraum der Pflanze. Das frühmorgentliche Blattwasserpotential wird als negativen Wert in MPa angegeben.

3.6.2 Biegegrad für Lockerbeerigkeit

Zur Einschätzung der Traubenstruktur wurde der Biegegrad der Hauptachse der Trauben als indirektes Maß für die Flexibilität der Traube ermittelt. Dazu wurden 100 Trauben aus allen Positionen der Laubwand (ausgenommen Geiztrauben) und von beiden Seiten der Rebzeilen (50/50) gemäß IPACH et al. (2005) in fünf Klassen (90°, 45 bis 90°, 10 bis 45°, 0 bis 10° und 0°), entsprechend den Kategorien „sehr locker“, „locker“, „dicht“, „kompakt“ und „sehr kompakt“, eingeteilt. Aus den Klassenmitteln wurde für jedes Versuchsglied der durchschnittliche Biegegrad (°) berechnet.

3.6.3 *Botrytis cinerea* Befallshäufigkeit und Befallsstärke

Die Befallshäufigkeit und die Befallsstärke durch *Botrytis cinerea* an den Trauben wurde an insgesamt 100 Trauben (Auswahl der Trauben siehe Biegegrad) anhand eines siebenstufigen Schemas erfasst (0 %, 1 bis 5 %, 6 bis 10 %, 11 bis 25 %, 26 bis 50 %, 51 bis 75 %, 76 bis 100 %), basierend auf der EPPO-Richtlinie PP 1/17(3) „*Botrytis cinerea* on grapevine“.

Die Befallshäufigkeit (%) beschreibt den Anteil der befallenen Trauben an der Gesamtanzahl der bewerteten Trauben und wird wie folgt berechnet:

$$\text{Befallshäufigkeit (\%)} = \frac{\text{Anzahl befallener Trauben}}{\text{Gesamtzahl der bewerteten Trauben}} \times 100$$

Als befallen gelten alle Trauben mit einem geschätzten Befall größer 0 %.

Die Befallsstärke (auch Befallsintensität) (%) beschreibt den mittleren Befallsgrad bezogen auf alle bewerteten Trauben. Dazu wird jeder Befallsklasse ein arithmetischer Mittelwert zugewiesen.

$$\text{Befallsstärke (\%)} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times f_i}{\text{Gesamtzahl der bewerteten Trauben}}$$

Hierbei gilt:

x_i = Mittelwert der Befallsklasse i

f_i = Anzahl der Trauben in Klasse i

3.6.4 Stockertrag

Für den Stockertrag wurden sechs repräsentative Rebstöcke markiert. Kriterien für die Auswahl dieser Stöcke waren eine vollständige Ausbildung eines Halbbogens und eine möglichst gute Etablierung der Bodendeckung durch Einsaaten. Rebstöcke mit fehlendem Austrieb und

Krankheiten (z. B. Esca, Echter Mehltau und Falscher Mehltau) wurden dabei nicht berücksichtigt. Die markierten Stöcke wurden zur Lesereife für jedes Versuchsglied separat gelesen und abgewogen, um den Stockertrag (kg) zu ermitteln.

3.6.5 Einzelbeerengewicht

Für das Einzelbeerengewicht wurden zur Lesereife pro Versuchsglied 100 Beeren entnommen, 50 von jeder Seite der Rebzeile. Die Beeren wurden so gesammelt, dass möglichst viele Trauben (mit Ausnahme der Geiztrauben) an allen unterschiedlichen Positionen der Laubwand herangezogen wurden. Auch die Entnahme der Beeren geschah an möglichst allen Positionen der Traube mit maximal zwei Beeren pro Traube. Die 100-Beerenprobe diente der Gewinnung des durchschnittlichen Beerengewichts (g), indem die Gesamtmenge mit einer Feinwaage abgewogen und durch den Wert 100 geteilt wurde.

3.6.6 Traubenmostanalytik

Mit den 100-Beerenproben (Kap. 3.6.5) wurde eine Traubenmostanalyse durchgeführt, um das Mostgewicht und die Gesamtsäure zu bestimmen. Zur Probenaufbereitung wurden die Beeren zunächst in einen Gefrierbeutel gegeben und mit dem BagMixer® 400 CC (Interscience, Saint-Nom-la-Bretèche, Frankreich) für 40 Sekunden auf Stufe 4 homogenisiert. Die so entstandene Maische wurde anschließend mit einer Tischpresse abgepresst, der gewonnene Most durch ein Sieb vorgeklärt und in Zentrifugenröhrchen überführt. Die Zentrifugation erfolgte mit der Hettich Rotanta 460 R (Andreas Hettich GmbH & Co. KG, Tuttlingen, Deutschland) bei 4500 Umdrehungen pro Minute über 5 Minuten, wodurch eine klare Phasentrennung erzielt wurde. Der Überstand wurde vorsichtig dekantiert und die Probe wurde durch ein Filterpapier in einen Standzylinder überführt, um feinste Partikel zu entfernen.

Die anschließende Analyse der Mostproben erfolgte mittels Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FT-IR) mit dem WineScan™ FT120 (FOSS Analytical A/S, Hillerød, Dänemark). Die Messung basiert auf der Absorption infraroter Strahlung durch molekulare Bindungen in der Probe (BERGER 2013). Die erhaltenen Spektren werden mithilfe integrierter Kalibrationsmodelle ausgewertet und die Messwerte für das Dichte (g/cm^3) und Gesamtsäure (g/l) ausgegeben. Über die Dichte ρ lässt sich das Mostgewicht ($^{\circ}\text{Oechsle}$) wie folgt berechnen:

$$^{\circ}\text{Oechsle} = (\rho - 1) \times 1000$$

3.7 Datenauswertung

Wurden innerhalb eines Versuchsglieds mehrere Messwerte erhoben, wurden diese zu einem Mittelwert zusammengefasst, sodass die biologische Replikationsebene ($n = 3$ oder $n = 4$) als statistische Grundlage für die Auswertung diente.

Die statistischen Analysen wurden mit der Software **R** (Version 4.x, R Core Team, 2024) durchgeführt. Zur Prüfung signifikanter Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten kam, abhängig von den jeweiligen Voraussetzungen, entweder eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) oder ein nichtparametrischer Kruskal-Wallis-Test zum Einsatz.

Für jede Zielvariable wurde zunächst die Normalverteilung der Residuen mittels des Shapiro-Wilk-Tests (*shapiro.test*) überprüft. Die Homogenität der Varianzen wurde mit dem Levene-Test (*leveneTest* aus dem Paket **car**) getestet. Waren eine oder beide Voraussetzungen verletzt, wurden geeignete Transformationen vorgenommen, um die Voraussetzungen für die ANOVA herzustellen. Zum Einsatz kamen folgende Methoden:

- Logarithmische Transformation (*log*)
- Quadratwurzeltransformation (*sqrt*)
- Box-Cox-Transformation (*boxcox*, Paket **MASS**)
- Yeo-Johnson-Transformation (*yeojohnson*, Paket **car**)

Konnte durch die Transformation keine Normalverteilung und/oder Varianzhomogenität erreicht werden, wurde der Kruskal-Wallis-Test (*kruskal.test*) durchgeführt. Zur paarweisen Post-hoc-Analyse kam in diesem Fall der Dunn-Test mit Bonferroni-Korrektur (*dunn.test* aus dem Paket **agricolae**) zum Einsatz.

Waren die Voraussetzungen erfüllt, wurde die ANOVA (*aov*) durchgeführt. Zur Bestimmung signifikanter Gruppenunterschiede wurde anschließend der Tukey-HSD-Test mit der Funktion *HSD.test* aus dem Paket **agricolae** angewendet. Die Signifikanzgrenze wurde mit $\alpha = 0,05$ festgelegt.

Die Ergebnisse wurden grafisch aufbereitet, um Unterschiede zwischen den Mittelwerten sowie die Streuung anschaulich darzustellen. Die Boxplots zeigen Mittelwert, Median, Quartile und Ausreißer je Variante. Zusätzlich wurden Balkendiagramme mit Mittelwerten $\pm$ Standardabweichung (SD) erstellt. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wurden durch Buchstabenkennzeichnungen oberhalb der Balken oder Boxen visualisiert. Die Diagramme wurden mit den Paketen **ggplot2** und **ggpubr** erstellt und entsprechend dem zugrundeliegenden statistischen Verfahren angepasst.

Zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Deckungsgrad verschiedener Begrünungsvarianten und deren beikrautunterdrückender Wirkung wurden lineare Regressionsanalysen mit der Funktion `lm` aus dem Paket **stats** durchgeführt. Für die grafische Darstellung und Diagnose der Regressionsmodelle kamen zusätzlich die Pakete **ggpubr**, **broom** und **car** zum Einsatz.

Zur Erkennung von Mustern und Zusammenhängen in den multivariaten Daten zur Traubenqualität- und -quantität wurden Hauptkomponentenanalysen (PCA) mithilfe der Pakete **factoextra** und **FactoMineR** durchgeführt. Alle numerischen Variablen wurden z-standardisiert (*scale = TRUE*), um Vergleichbarkeit trotz unterschiedlicher Maßeinheiten zu gewährleisten. Die Ergebnisse wurden als Biplots dargestellt, in denen sowohl die Varianten als auch die Variablenbeiträge visualisiert wurden. Die Visualisierung erfolgte mit den Paketen **ggplot2** und **ggrepel**. Zur Bewertung signifikanter Unterschiede in der multivariaten Datenstruktur zwischen den Varianten wurde zusätzlich eine permutative Varianzanalyse (PERMANOVA) mit dem Paket **vegan** durchgeführt. Als Distanzmaß wurde die euklidische Distanz verwendet. Die Analyse erfolgte auf Basis von 999 Permutationen unter Verwendung der Gruppierungsvariable Variante. Das Ergebnis wurde als F-Wert und p-Wert in den PCA-Biplot integriert.

Die Nitratgehalte (Kap. 4.2.2.2) zeigten innerhalb eines Messtermins und einer Variante teils starke Schwankungen, die auf natürliche Unterschiede sowie auf Einflussfaktoren wie Temperatur und Bodenfeuchte zurückzuführen sind. Um eine Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden, wurden die Daten einer Ausreißerbereinigung unterzogen. Als Ausreißer wurden Werte definiert, die mehr als das 1,5-fache des Interquartilsabstands (IQR) außerhalb des oberen bzw. unteren Quartils lagen. Diese Werte wurden durch den Mittelwert der Datenpunkte innerhalb der Variante ersetzt.

4 Ergebnisse

4.1 Versuche unter kontrollierten Bedingungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung der Begrünungspflanzen *Medicago lupulina* (Begr_Med), *Festuca rubra* (Begr_Fes) und *Thymus serpyllum* (Begr_Thym) unter kontrollierten Bedingungen dargestellt. Untersucht wurden dabei vier Teilaspekte: das Wuchsverhalten, der Wasser- und Nährstoffverbrauch, die Trockenheitsverträglichkeit sowie die Herbizidverträglichkeit der Begrünungspflanzen.

4.1.1 Wachstum der Pflanzen

In den Liniengraphen der Abbildung 18 ist die Entwicklung des Deckungsgrades (%) der Pflanzen während der Anzucht in Kick-Brauckmann-Gefäßen in der Klimakammer über einen Zeitraum von 64 Tagen dargestellt. Es zeigten sich tendenziell Unterschiede im zeitlichen Verlauf des Deckungsgrades in Abhängigkeit der Begrünungsvariante und der Bodenart.

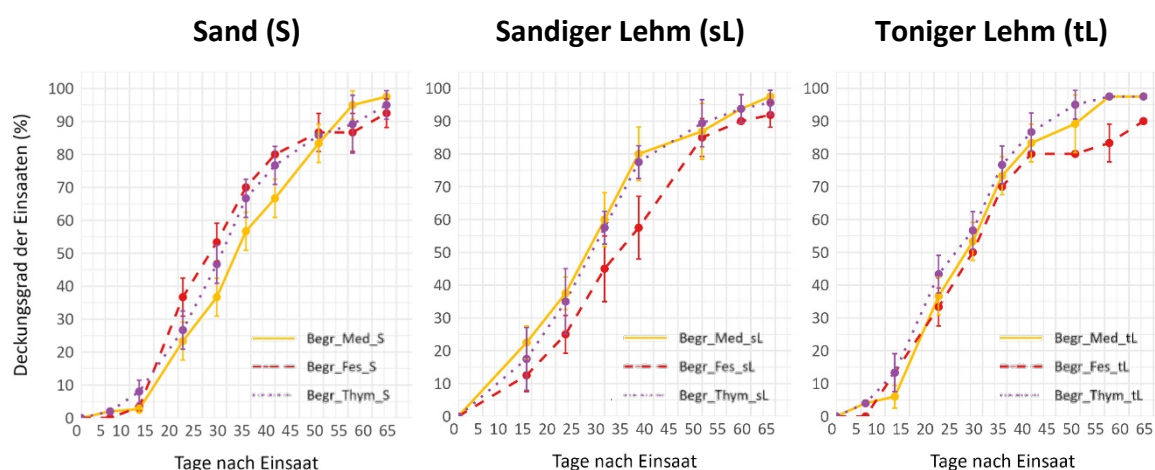


Abbildung 18: Entwicklung des Deckungsgrades (%) (links) der Begrünungsvarianten über 64 Tage nach Einsaat auf den Bodenarten Sand (S), sandiger Lehm (sL) und toniger Lehm (tL); dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 3$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.

Auf sandigem Boden (S) zeigte Begr_Fes durch eine langsamere Keimung eine spätere Deckung, die danach sichtbar zunahm und zwischen Tag 12 und 40 höher war als die der anderen Begrünungsvarianten. Zum Ende des Versuchs war der Deckungsgrad von Begr_Med_S am höchsten. Die Einsaat auf dem Boden der Bodenart sandiger Lehm zeigte bei Begr_Med_sL und Begr_Thym_sL über den gesamten Zeitraum ähnlich hohe Deckungsgrade auf, die höher waren als die der Variante Begr_Fes_sL. Auf tonigem Lehm Boden war die Deckung von Begr_Thym_tL fast über die gesamte Zeit am höchsten. Begr_Fes_tL wies ab Tag 40 eine tendenziell niedrigere Deckung im Vergleich zu den anderen Varianten auf.

Alle Begrünungsvarianten erreichten auf allen Standorten nach 28 bzw. 30 Tagen 50 % Bodenbedeckung, mit Ausnahme von Begr_Med auf Sandboden: hier dauerte es 34 Tage. Mindestens 90 % Bodendeckung wurde bei Begr_Thym_tL nach 49 Tagen erreicht. Bei Begr_Fes_S, Begr_Thym_S und Begr_Fes_tL waren es 63 Tage. Die übrigen Begrünungsvarianten in Kombination mit den verschiedenen Bodenarten zeigten ab Tag 56 bzw. 58 90 % Bodendeckung.

In den Liniendiagrammen der Abbildung 19 wird deutlich, dass die Verläufe der maximalen Wuchshöhen in allen drei Bodenarten ähnlich waren. Jedoch traten vor allem zwischen den Begrünungsvarianten tendenzielle Unterschiede auf.

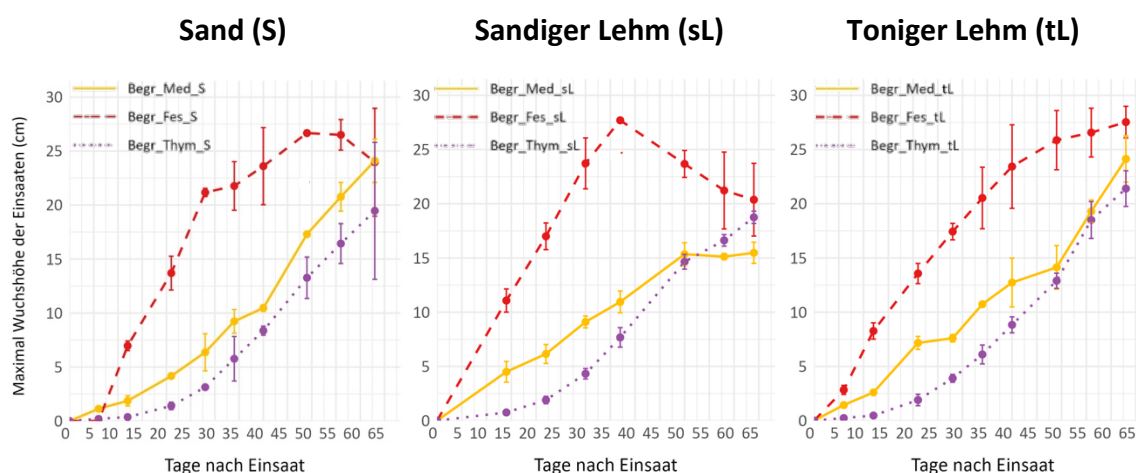


Abbildung 19: Entwicklung der maximalen Wuchshöhe (cm) der Begrünungsvarianten über 64 Tage nach Einsaat auf den Bodenarten Sand (S), sandiger Lehm (sL) und toniger Lehm (tL); dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 3$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.

Begr_Fes erreichte bereits nach 30 bzw. 34 Tagen Wuchshöhen von über 20 cm und zeigte auf allen Standorten die höchsten Werte (bis zu 28 cm bei sL an Tag 37) mit einer abfallenden Tendenz zum Ende des Versuchszeitraums bei den Bodenarten S und sL. Die Wuchshöhen von Begr_Med sowie Begr_Thym nahmen langsamer zu und erreichten bis zu 24 cm (Begr_Med_S und Begr_Med_tL) sowie 21 cm (Begr_Thym_tL) am letzten Messtermin.

4.1.2 Wasser- und Nährstoffverbrauch der Begrünungspflanzen

Im Rahmen des in Abschnitt 4.1.1 dargestellten Anzuchtversuchs auf sandigem Lehm Boden erfolgte eine weiterführende Untersuchung des Wasser- und Nährstoffgehalts der Begrünungspflanzen. Im Säulendiagramm (Abb. 20) werden die pflanzenspezifischen Unterschiede bei der Bildung der oberirdischen Frischmasse und der Wurzelmasse sichtbar.

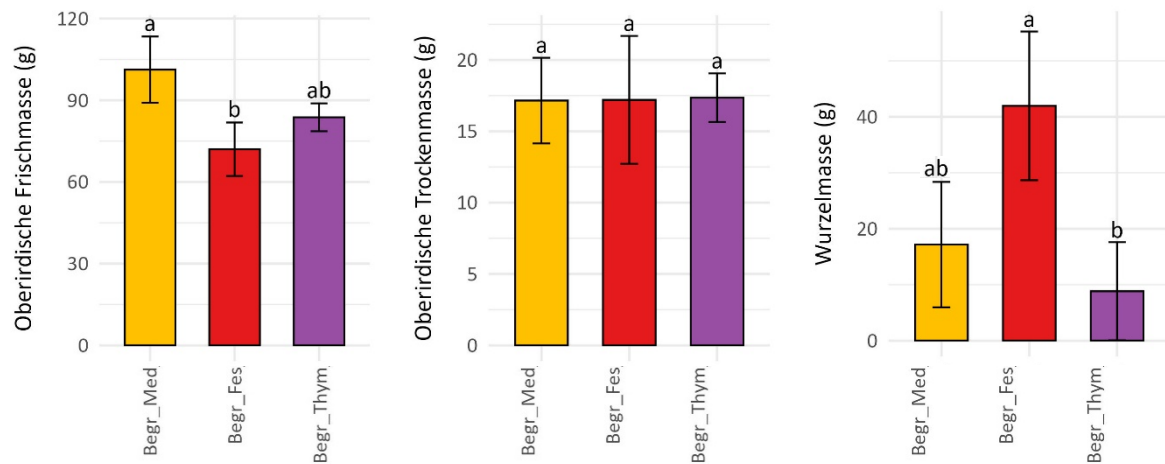


Abbildung 20: Links: Oberirdische Frischmasse (g), Mitte: oberirdische Trockenmasse (g) und rechts: Wurzelmasse (g) pro Kulturgefäß der Begrünungsvarianten 99 Tage nach Einsaat auf der Bodenart sandiger Lehm; Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Tukey-HSD-Test nach A-NOVA ($p < 0,05$) mit sqrt-Transformation bei Wurzelmasse; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.

Die oberirdische Frischmasse von Begr_Med (101,3 g) ist höher als Begr_Fes (72,0 g). In Bezug auf die oberirdische Trockenmasse zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten, die Werte lagen zwischen 17,2 bis 17,4 g. Bei der Wurzelmasse hingegen wies Begr_Fes mit 42,0 g einen höheren Mittelwert auf als Begr_Med (17,2 g) und Begr_Thym (8,8 g).

Die Boxplot-Darstellung in der Abbildung 21 auf Seite 60 zeigt die volumetrische Bodenfeuchte zu verschiedenen Zeiträumen nach der Einsaat in Abhängigkeit der jeweiligen Begrünungsvariante.

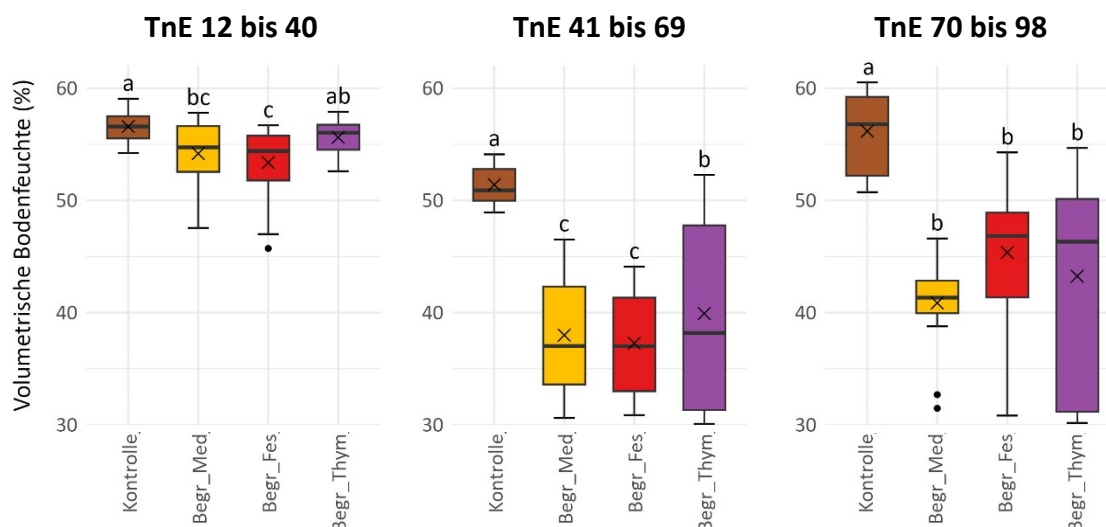


Abbildung 21: Volumetrische Bodenfeuchte (%) der Begrünungsvarianten mit Kontrolle (ohne Einsaat) auf sandigem Lehm; links: 12 bis 40 Tage nach Einsaat (TnE), Mitte: 41 bis 69 Tage nach Einsaat, rechts: 70 bis 98 Tage nach Einsaat; dargestellt sind Boxplots ($n = 3$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Zeitraumes: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.

In der Kontrolle waren über alle Beobachtungszeiträume hinweg stets die höchsten Bodenfeuchte-Werte zu verzeichnen, die sich - mit Ausnahme von Begr_Thym im Zeitraum 12 bis 40 Tage nach der Einsaat - signifikant von den übrigen Varianten unterschieden. In diesem Zeitraum lag die mittlere Bodenfeuchte in der Kontrolle bei 56,6 % und war damit höher als bei Begr_Med (54,2 %) und Begr_Fes (53,4 %). Begr_Thym erreichte mit 55,6 % ein vergleichbares Niveau zur Kontrolle. In der zweiten Periode (Tag 41 bis 69) fiel die Bodenfeuchte von Begr_Med (32,7 %) und Begr_Fes (30,0 %) signifikant unter das Niveau von Begr_Thym (39,2 %). Die Kontrollvariante zeigte mit 47,3 % unter allen Varianten den höchsten Wert. Zum Ende der Versuchsdauer (Tag 70 bis 98) waren alle Werte der Begrünungsvarianten auf einem ähnlichen Niveau: Begr_Med (37,5 %), Begr_Fes (40,0 %) und Begr_Thym (43,2 %) und lagen damit signifikant unter der Kontrolle (56,4 %).

Die während des Anzuchtversuches aufgefangene infiltrierte Wassermenge von Tag 16 bis 99 nach Einsaat ist in Abbildung 22 dargestellt.

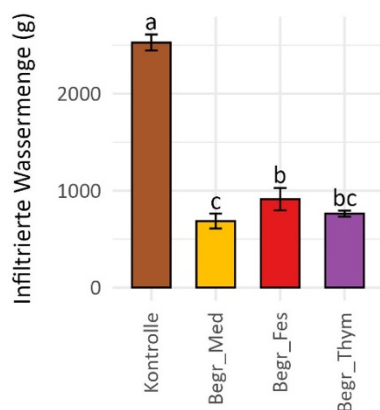


Abbildung 22: Infiltrierte Wassermenge (g) der Begrünungsvarianten mit Kontrolle (ohne Einsaat) auf sandigem Lehm von Tag 16 bis 99 nach Einsaat; Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 3$); unterschiedliche Buchstaben: Tukey-HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.

Die Kontrolle wies mit 2528,3 g die mit Abstand höchste infiltrierte Wassermenge auf. Begr_Med hatte mit 686,3 g den geringsten Wert, welcher signifikant geringer war als der von Begr_Fes (912,7 g). Die Wassermenge bei Begr_Thym lag bei 762,7 g und unterschied sich nicht signifikant von Begr_Med oder Begr_Fes.

Die Säulendiagramme der Abbildung 23 verdeutlichen, dass sich die Gehalte an Makro- und Mikronährstoffen in der oberirdischen Biomasse je nach Nährstoff signifikant zwischen den Begrünungsvarianten unterschieden.

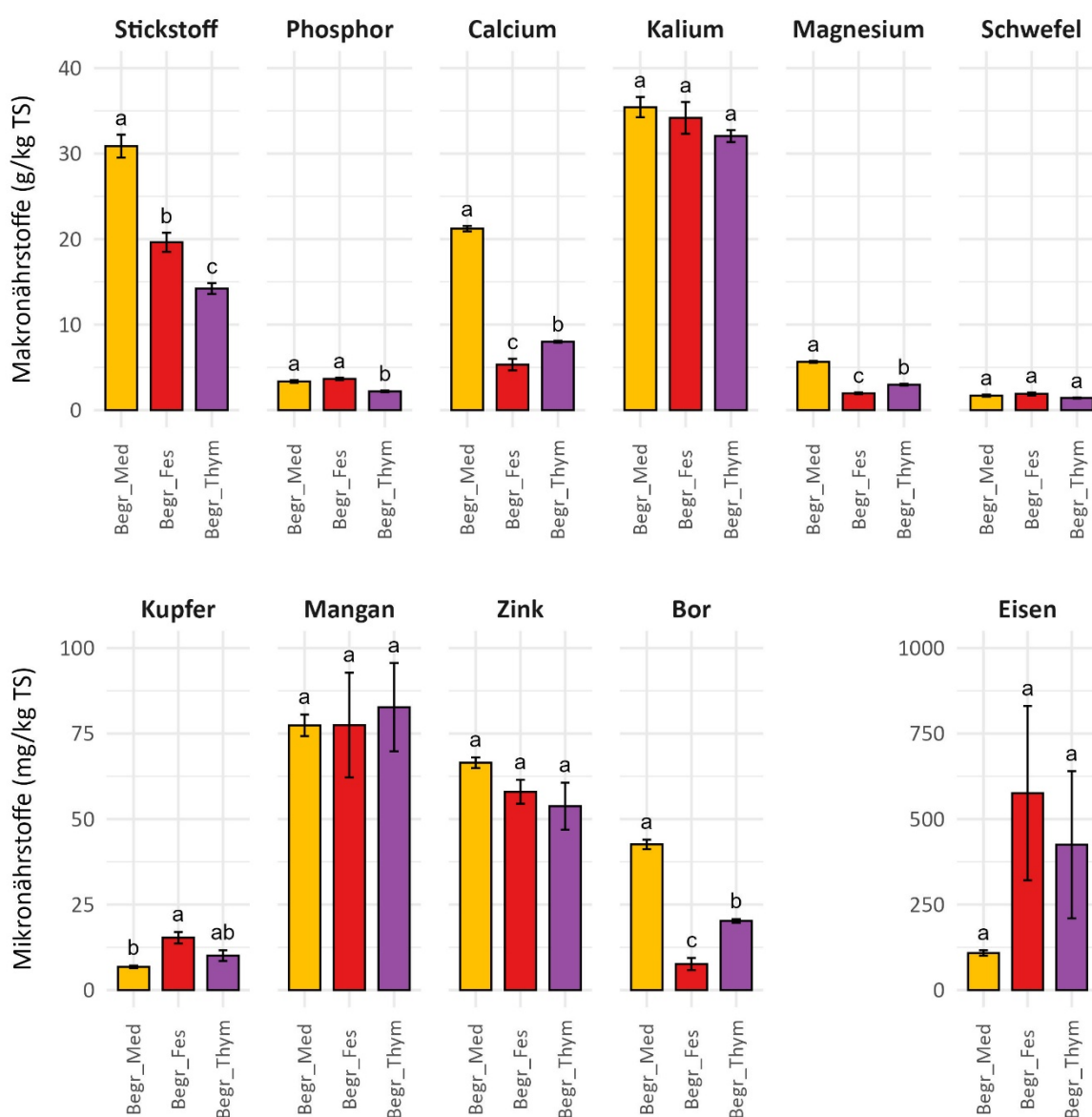


Abbildung 23: Oben: Gehalte an Makronährstoffen (g/kg TS), unten: Gehalte an Mikronährstoffen (mg/kg TS) in der oberirdischen Biomasse der Begrünungsvarianten nach 98 Tagen nach Einsaat; Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb der Nährstoffgruppe: Tukey-HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für Zink; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*.

Der Stickstoff-Gehalt war in der Variante Begr_Med (30,9 g/kg) am höchsten und in Begr_Thym (14,2 g/kg) am niedrigsten. Begr_Fes lag mit 19,6 g/kg zwischen den beiden Varianten. Die Calcium- (21,2 g/kg) und Kalium-Gehalte (35,4 g/kg) waren unter Begr_Med höher als bei den anderen Varianten. Für Phosphor (3,4 bis 3,7 g/kg), Magnesium (2,0 bis 5,7 g/kg) und Schwefel (1,4 bis 1,9 g/kg) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede. Bei Betrachtung der Mikronährstoffgehalte wird deutlich, dass bei Kupfer Begr_Med mit 6,8 mg/kg geringere Werte aufwies als Begr_Fes (15,3 mg/kg). Bor war in Begr_Med mit 42,6 mg/kg in signifikant höheren Mengen vorhanden, während Begr_Fes mit 7,6 mg/kg den niedrigsten Wert aufwies und Begr_Thym mit 20,2 mg/kg dazwischenlag. Für Mangan (77,4 bis 82,7 mg/kg), Zink (53,8 bis 66,4 mg/kg) und Eisen (108,4 bis 575,9 mg/kg) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

4.1.3 Trockenheitsverträglichkeit der Begrünungspflanzen

Im Gewächshausversuch mit Kick-Brauckmann-Gefäßen wurden die Begrünungsvarianten ab Tag 34 differenzierten Bewässerungsregimen unterzogen. Anhand der Balkenhöhen und der Signifikanzgruppenverteilung in der Abbildung 24 auf Seite 63 zeigt sich, dass die getesteten Begrünungspflanzen unterschiedlich auf die reduzierte (W-) und hohe (W+) Wasserverfügbarkeit reagierten, sowohl in Bezug auf den Deckungsgrad als auch auf die Wuchshöhe.

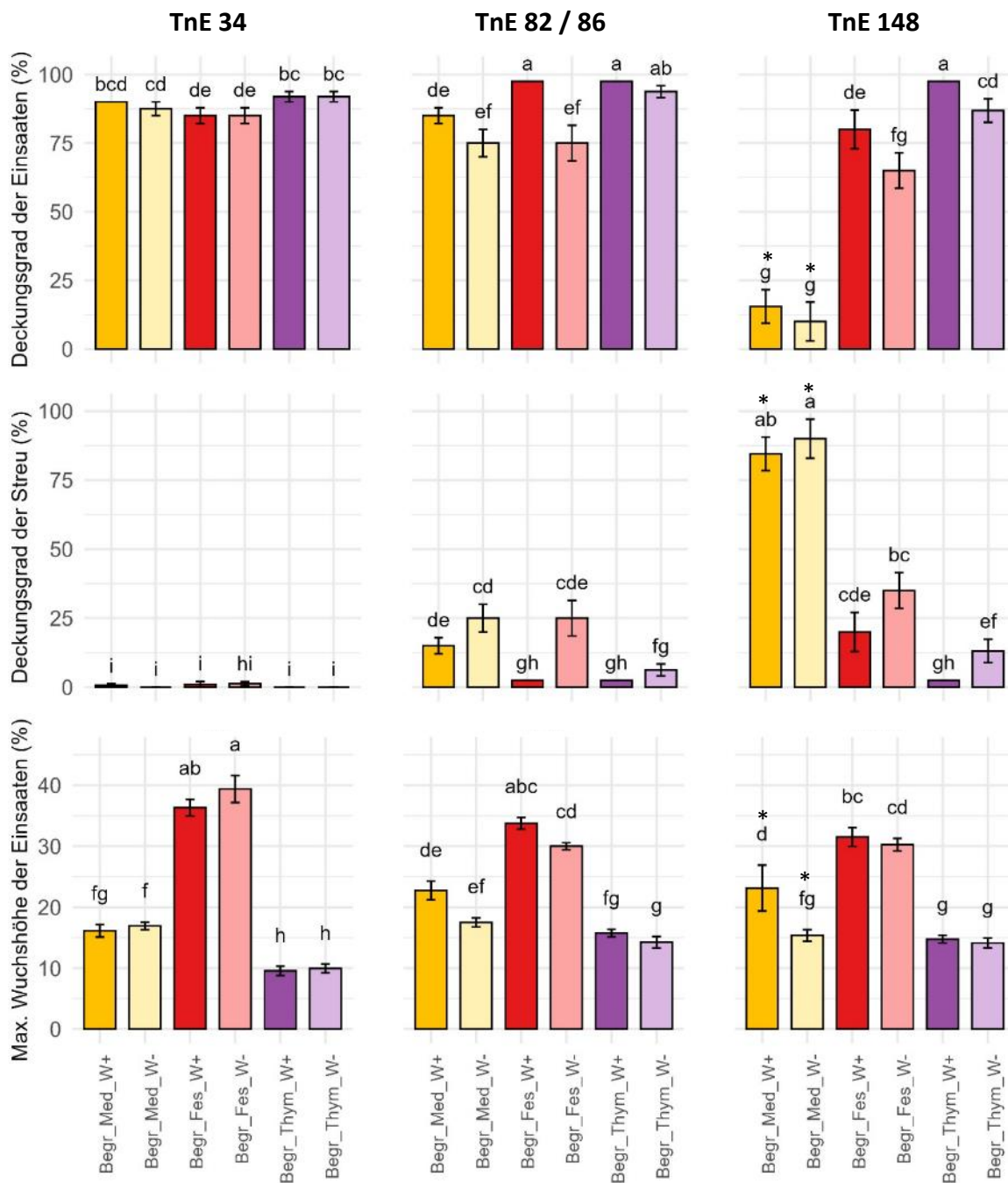


Abbildung 24: Oben: Deckungsgrad der Einsaaten (%), Mitte: Deckungsgrad der Streu (%), unten: Maximale Wuchshöhe (cm) der Einsaaten unter verschiedenen Bewässerungsvarianten (hohe Bewässerung: W+, geringe Bewässerung: W-) nach 34, 82/86 und 148 Tagen nach Einsaat (TnE); Säulen zeigen Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*. *Starke Trockenstresssymptomatik und Befall von Gewächshaus-Mottenschildlaus (*Trialeurodes vaporariorum*)

Zum Startpunkt unterschiedlicher Bewässerungsvarianten (Tag 34 nach Einsaat) unterschieden sich lediglich die Begrünungsvarianten untereinander. Die Deckungsgrade lagen zwischen 85,0 % (Begr_Fes) und 91,9 % (Begr_Thym). An Tag 82 zeigte Begr_Fes als einzige Begrünungsvariante eine deutliche Reaktion zur reduzierten Bewässerung: der Deckungsgrad nahm im Vergleich zur hohen Bewässerung um 22,5 % ab. Nach 148 Tagen nach Einsaat wurden die

Deckungsgrade von Begr_Fes und Begr_Thym um 15 bzw. 10 % durch eine reduzierte Bewässerung gesenkt. Aufgrund eines Befalls durch *Trialeurodes vaporariorum* war eine Bewertung des Wachstums von Begr_Med am Ende des Versuchs (TnE 148) nicht möglich.

Während die Deckungsgrade der Streu zu TnE 34 in allen Varianten auf einem sehr niedrigen Niveau (< 5 %) lagen, veränderte sich der Anteil nach 82 bzw. 86 Tagen (TnE 82/86) deutlich und es zeigten sich erstmals Unterschiede zwischen den Begrünungsarten und Bewässerungsvarianten: Der Streuanteil war bei Begr_Med unter beiden Bewässerungsvarianten und bei Begr_Fes unter reduzierter Bewässerung deutlich höher als die anderen Varianten. Zum Endzeitpunkt (TnE 148) zeigte Begr_Med die höchsten Deckungsgrade der Streu von 70 % (W-) und 64 % (W+). Dies deutet auf einen fortgeschrittenen Absterbeprozess hin, möglicherweise in Verbindung mit dem dokumentierten Schädlingsbefall (*Trialeurodes vaporariorum*). Begr_Fes wies mittlere Streuanteile auf, ohne sich zwischen den Bewässerungsvarianten zu unterscheiden. Begr_Thym zeigte insgesamt die geringsten Streuanteile, die unter reduzierter Bewässerung signifikant abnahmen.

Die Wuchshöhen unterschieden sich zu Beginn (TnE 34) zwischen den Varianten Begr_Thym (9,6 / 10,0 cm), Begr_Med (16,1 / 16,9 cm) und Begr_Fes (36,3 / 39,4 cm). Die Wuchshöhe wurde durch die verschiedenen Bewässerungsregime nicht beeinträchtigt.

4.1.4 Herbizid-Verträglichkeit der Begrünungspflanzen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Keimungsversuche verschiedener Begrünungsvarianten Begr_Med, Begr_Fes und Begr_Thym unter Gewächshausbedingungen in Petrischalen dargestellt. Dabei wurden die Effekte der Herbizide Glyphosat und Flazasulfuron untersucht (Abb. 25 bis 27, S. 65 bis 67).

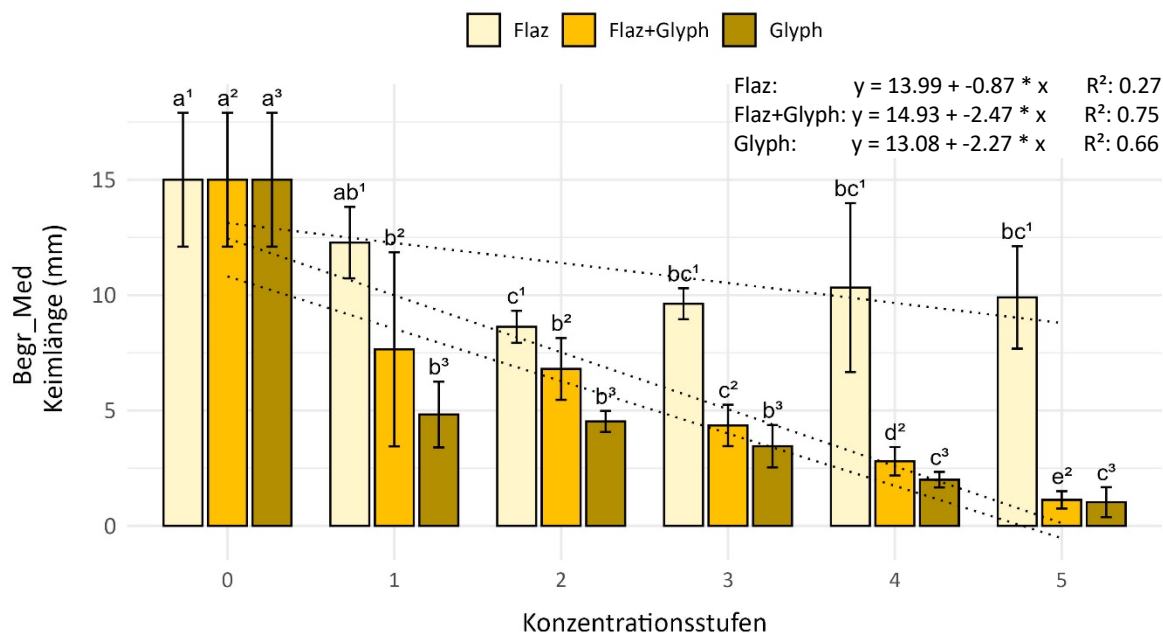


Abbildung 25: Keimlänge (mm) von *Medicago lupulina* (Begr_Med) in Abhängigkeit der Konzentrationsstufen (0 bis 5) der Herbizid-Wirkstoffe Flazasulfuron (Flaz), Glyphosat (Glyph) und ihrer Kombination (Flaz + Glyph); Säulen zeigen die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Herbizid-Variante: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); gepunktete Linien sind lineare Regressionen der Keimlängen über alle Konzentrationsstufen je Herbizid-Variante (Regressionsgleichungen und R^2 -Werte siehe oben rechts).

Die graphische Darstellung in Abbildung 25 verdeutlicht, dass bei Begr_Med bereits die geringste Konzentrationsstufe (1) von Glyphosat zu einer Reduktion der Keimlänge von 15 auf 4,8 mm führte und die Kombination aus Flazasulfuron und Glyphosat zu einer Reduktion auf 7,7 mm. Die weiteren Konzentrationsstufen verstärkten den Effekt von Flazasulfuron auf die Keimlänge nicht. Unter den Varianten Glyphosat und Herbizid-Kombination wurden die Keimlänge in Konzentrationsstufe 5 im Vergleich zu Stufe 2 nochmals signifikant reduziert (1,0 bzw. 1,1 mm). Bei Begr_Med war die Wirkung von Glyphosat und der Herbizidkombination deutlich ausgeprägter als die von Flazasulfuron (Steigung = -0,9) allein, was sich insbesondere in den steileren Regressionsgeraden (Steigung = -2,3 bis -2,5) mit einem hohen R^2 -Wert von bis zu 0,75 zeigt.

Anhand der Unterschiede in den Balkenlängen und Signifikanzgruppen zeigt sich im Diagramm der Abbildung 26 (Seite 66), dass die Wirkung der Herbizide auf Begr_Fes im Vergleich zu Begr_Med stärker war.

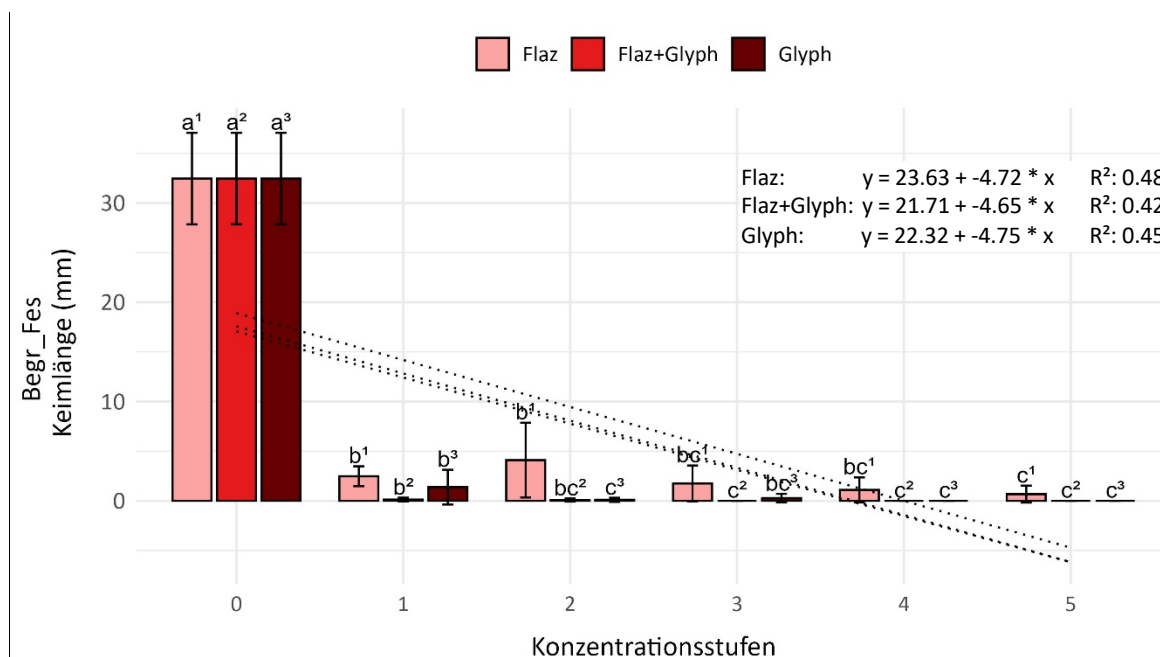


Abbildung 26: Keimlänge (mm) von *Festuca rubra* (Begr_Fes) in Abhängigkeit der Konzentrationsstufen (0 bis 5) der Herbizid-Wirkstoffe Flazasulfuron (Flaz), Glyphosat (Glyph) und ihrer Kombination (Flaz + Glyph); Säulen zeigen die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Herbizid-Variante: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); gepunktete Linien sind lineare Regressionen der Keimlängen über alle Konzentrationsstufen je Herbizid-Variante (Regressionsgleichungen und R^2 -Werte siehe oben rechts).

Bei Begr_Fes zeigte sich bereits in der ersten Konzentrationsstufe eine signifikante Reduzierung der Keimlänge durch alle Herbizid-Varianten. Während die Keimlänge in der Kontrolle bei 32,5 mm lag, betrug sie bei Flazasulfuron 2,5 mm, bei Glyphosat 1,4 mm und bei der Herbizid-Kombination 0,1 mm. Ab Stufe 2 wurde der reduzierende Effekt durch Glyphosat nochmals verstärkt und es war eine Keimlänge von 0,1 mm zu verzeichnen. Der Effekt durch Flazasulfuron wurde ab Stufe 5 verstärkt mit einer Reduktion auf 0,7 mm Keimlänge. Bei Begr_Fes zeigte sich die stärkste Wirkung aller Herbizidvarianten mit Regressionssteigungen von -4,65 bis -4,75 und Bestimmtheitsmaßen zwischen $R^2 = 0,42$ und $0,48$.

Bei Begr_Thym war ein stärkerer Effekt durch Glyphosat als durch Flazasulfuron erkennbar, der in Abbildung 27 auf Seite 67 graphisch aufgetragen ist.

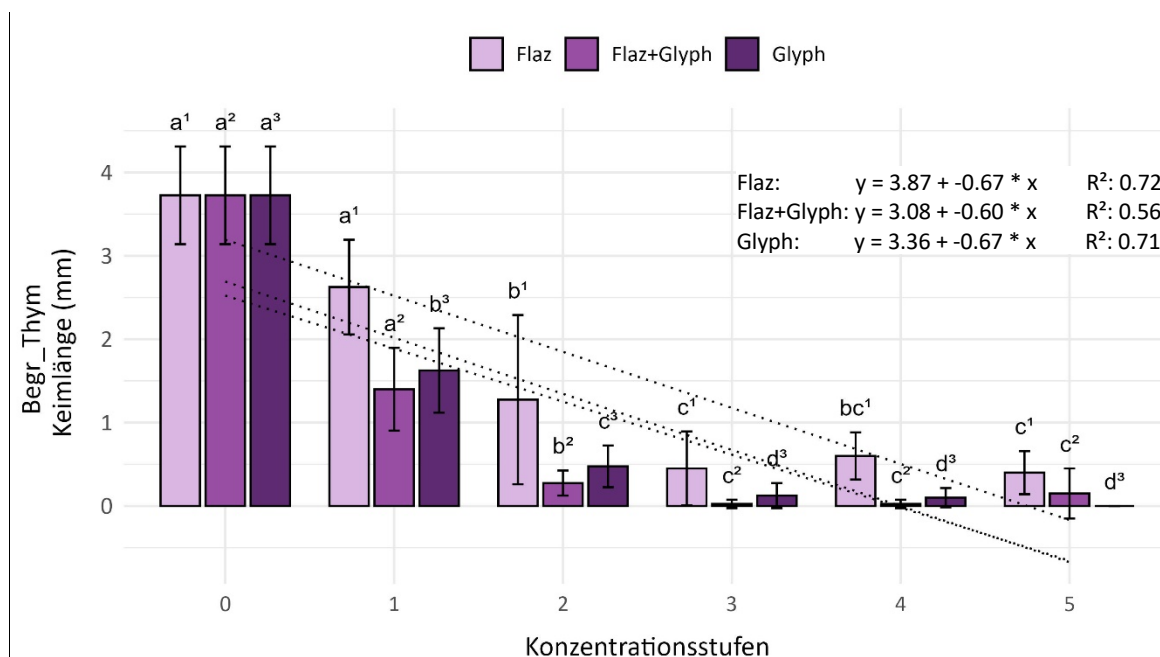


Abbildung 27: Keimlänge (mm) von *Thymus serpyllum* (Begr_Thym) in Abhängigkeit der Konzentrationsstufen (0 bis 5) der Herbizid-Wirkstoffe Flazasulfuron (Flaz), Glyphosat (Glyph) und ihrer Kombination (Flaz + Glyph); Säulen zeigen die Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Herbizid-Variante: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$); gepunktete Linien sind lineare Regressionen der Keimlängen über alle Konzentrationsstufen je Herbizid-Variante (Regressionsgleichungen und R^2 -Werte siehe oben rechts).

In Konzentrationsstufe 1 führte Glyphosat (1,6 mm) im Vergleich zur Kontrolle (3,7 mm) zu einer signifikanten Reduktion der Keimlänge. Flazasulfuron (0,7 mm) sowie die Kombination aus Flazasulfuron und Glyphosat (0,3 mm) bewirkten erst ab Konzentrationsstufe 2 eine signifikant verringerte Keimlänge. Stufe 3 verstärkte den reduzierenden Effekt bei allen drei Herbizidvarianten im Vergleich zur Stufe 2, wobei die Keimlängenbildung besonders bei der Kombination aus Flazasulfuron und Glyphosat nahezu vollständig unterdrückt wurden. Begr_Thym zeigte die flachsten Regressionssteigungen (-0,60 bis -0,67). Die kontinuierlich abnehmenden Keimlängen entlang der Konzentrationsstufen spiegeln sich auch in den linearen Regressionsanalysen wider, mit Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 0,56$ bis $0,72$ für alle Herbizid-Behandlungen.

4.2 Freilandversuche

Die Begrünungsvarianten *Medicago lupulina* (Begr_Med), *Festuca rubra* (Begr_Fes) und *Thymus serpyllum* (Begr_Thym) wurden an den Versuchsstandorten HUMO, MECKEN, DEIDES und BRETZ untersucht. Zusätzlich wurden die Mischungen „Rebzeilenbegrünung“ (Begr_MixR) und „Mythopia 3“ (Begr_MixM) in HUMO, MECKEN und DEIDES und die Reinsaat *Prunella vulgaris* (Begr_Pru) und *Trifolium repens* (Begr_Trif) in BRETZ getestet.

4.2.1 Wachstum der Pflanzen

Anhand des Deckungsgrades der Einsaaten und der Beikräuter wurde die Etablierfähigkeit und Beikrautregulierung der Begrünungspflanzen geprüft. Zudem wurde der Wuchs der Pflanzen anhand der Wuchshöhe und Biomasse bewertet.

4.2.1.1 Bodendeckung der Begrünungsvarianten auf verschiedenen Versuchsstandorten

In der Boxplot-Darstellung der Abbildung 28 sind die bonitierten Deckungsgrade der einzelnen Varianten in den Monaten Mai, Juli und September als Mittelwert für die Jahre 2022, 2023 und 2024 aus der Versuchsfläche Hundertmorgen Nord (HUMO) aufgetragen.

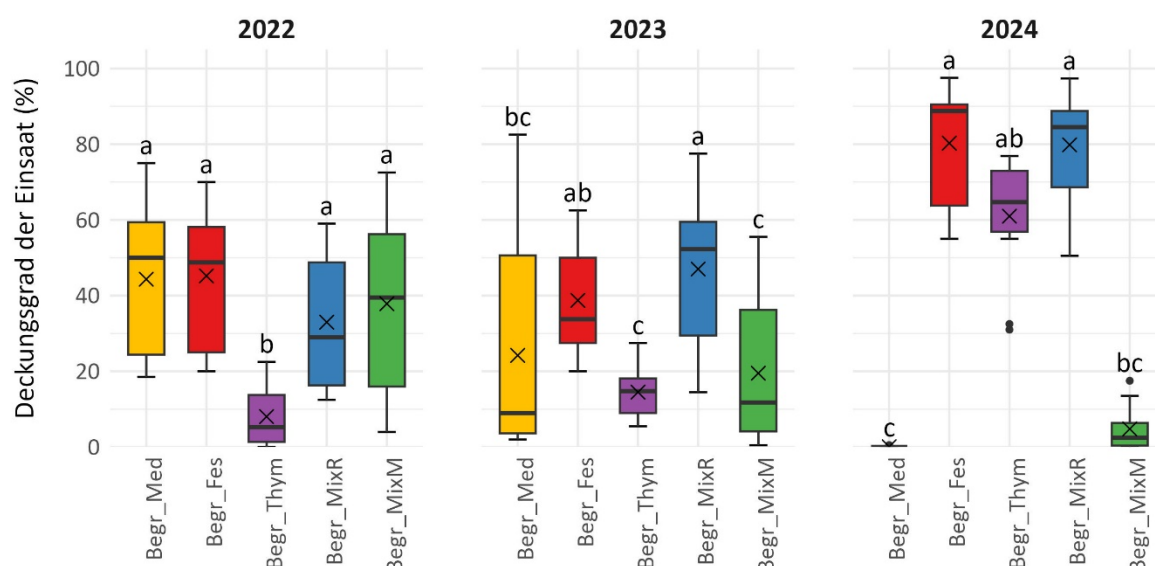


Abbildung 28: Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort HUMO; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für 2022 und 2023, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“.

Im ersten Jahr (2022) erreichten sowohl Begr_Med als auch Begr_Fes mit durchschnittlich 44,3 % bzw. 45,2 % vergleichbare mittlere Deckungsgrade. Auch die Mischungen (Begr_MixR und Begr_MixM) lagen mit 33,0 % bzw. 37,9 % im mittleren Bereich. Mit einem Mittelwert von 8,0 % wies Begr_Thym eine signifikant schwächere Etablierung als alle anderen Varianten auf. Im Jahr 2023 verstärkten sich die Unterschiede zwischen den Varianten. Begr_MixR erreichte mit durchschnittlich 47,0 % den höchsten Deckungsgrad und wies, zusammen mit Begr_Fes (38,8 %), eine insgesamt stabile Etablierung auf. Im Gegensatz dazu fiel Begr_Med deutlich auf 24,2 % zurück und zeigte eine hohe Streuung ($SD = 28,2$ %). Die niedrigsten Werte wurden bei Begr_Thym (14,5 %) und Begr_MixM (19,5 %) beobachtet. Im dritten Versuchsjahr

(2024) zeigte sich ein stark differenziertes Bild. Die Varianten Begr_Fes und Begr_MixR erzielten mit 79,9 % bzw. 80,3 % die höchsten Deckungsgrade und wurden der besten Signifikanzgruppe zugeordnet. Auch Begr_Thym erreichte mit 61,0 % einen vergleichbar hohen Wert. Demgegenüber blieb Begr_Med mit lediglich 0,08 % nahezu vollständig aus. Die Variante Begr_MixM etablierte sich ebenfalls nur schwach mit einem mittleren Deckungsgrad von 4,79 %.

Im Vergleich zur Versuchsfläche Hundertmorgen Nord (HUMO) zeigte sich in der Fläche Meckenheimer Str. (MECKEN), in der zeitgleich eingesät wurde, ein differenziertes Etablierungsverhalten der Begrünungsvarianten. Dies wird in der Boxplot-Darstellung der Abbildung 29 verdeutlicht.

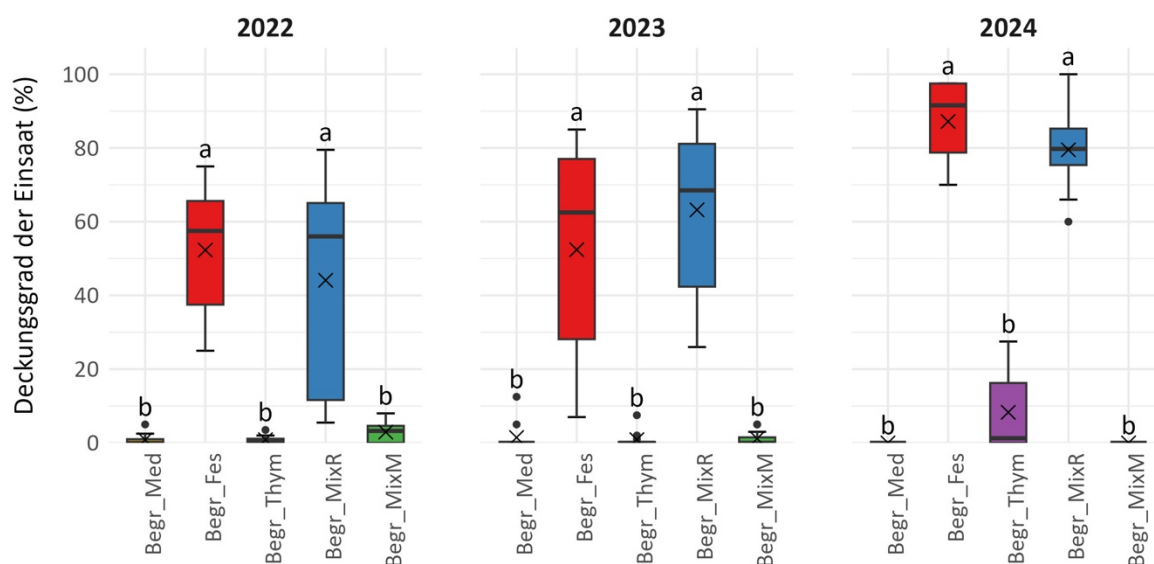


Abbildung 29: Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort MECKEN; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für 2022, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2023 und 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“.

Im ersten Versuchsjahr zeigten sich deutliche Unterschiede in der Etablierung der Begrünungsvarianten. Sowohl Begr_Fes (52,3 %) als auch die Begr_MixR (44,1 %) wiesen die beste Etablierung auf. Begr_Med sowie Begr_Thym blieben mit mittleren Werten von unter 1 % nahezu vollständig aus. Auch die Mischung Begr_MixM etablierte sich nur sehr schwach (2,9 %). Ein ähnliches Bild zeigte sich im zweiten Jahr (2023). Begr_MixR konnte sich weiter steigern und erzielte mit durchschnittlich 63,2 % den höchsten Deckungsgrad, Begr_Fes erreichte 52,4 %. Beide Varianten trennten sich deutlich von den anderen Varianten (Begr_Med, Begr_Thym, Begr_MixM), die bei unter 2 % lagen. Im dritten Jahr (2024) erreichten Begr_Fes (87,2 %) und Begr_MixR (79,5 %) die höchsten Deckungsgrade mit geringer Streuung ($SD =$

10,9 bzw. 11,0). Begr_Thym zeigte zwar eine Verbesserung gegenüber den Vorjahren (8,3 %), blieb aber deutlich zurück und wurde der schwächeren Gruppe zugeordnet. Begr_Med und Begr_MixM wiesen keinen messbaren Deckungsgrad mehr auf (0,0 %).

Im Boxplot-Diagramm der Abbildung 30 sind die Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort Deidesheim (DEIDES) dargestellt. Im ersten Jahr 2023 nach der Einsaat zeigten sich auf in der Neuanlage überwiegend hohe Deckungsgrade.

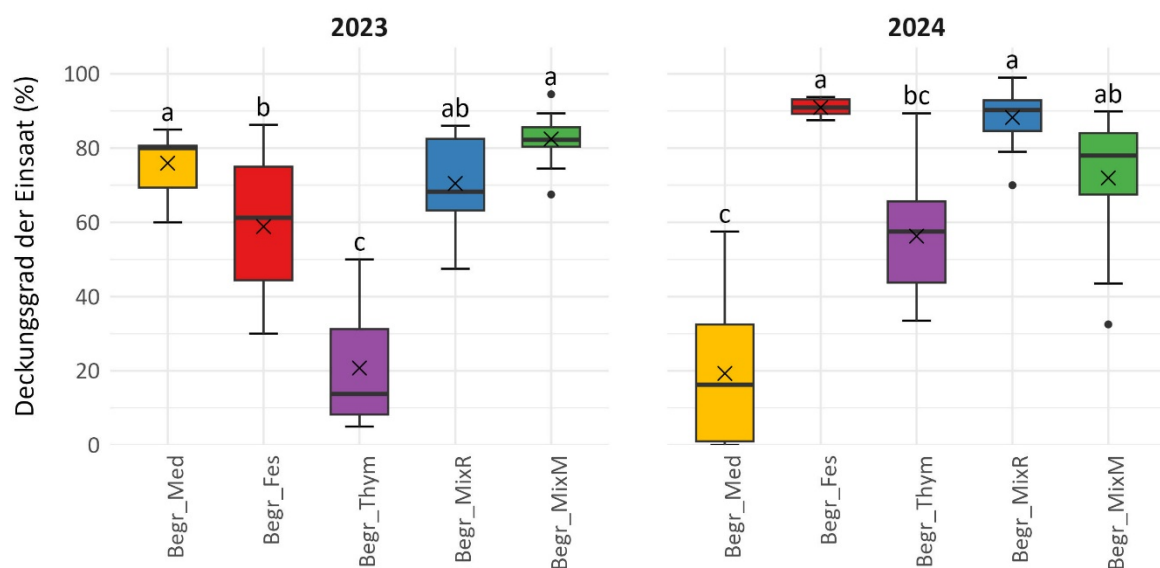


Abbildung 30: Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort DEIDES; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bei 2023, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“.

2023 wurde die höchste Bodendeckung mit einem Mittelwert von 82,4 % von Begr_MixM erreicht. Auch Begr_Med (75,9 %) und Begr_MixR (70,5 %) wiesen vergleichbar hohe Werte auf. Begr_Fes lag mit einem Mittelwert von 58,9 % im mittleren Bereich, jedoch mit einer höheren Streuung ($SD = 18,9$ %). Signifikant schwächer schnitt Begr_Thym mit 20,8 % Deckung ab. Im Jahr 2024 erreichten Begr_Fes (90,9 %), Begr_MixR (88,2 %) und Begr_MixM (72,0 %) vergleichbar hohe Deckungsgrade. Begr_Thym (56,3 %) lag signifikant unter Begr_Fes und Begr_MixR. Begr_Med wies mit 19,3 % einen vergleichbaren Wert auf, der insgesamt am niedrigsten war.

Das Boxplot-Diagramm der Abbildung 31 auf Seite 71 zeigt die Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort Bretzfeld (BRETZ).

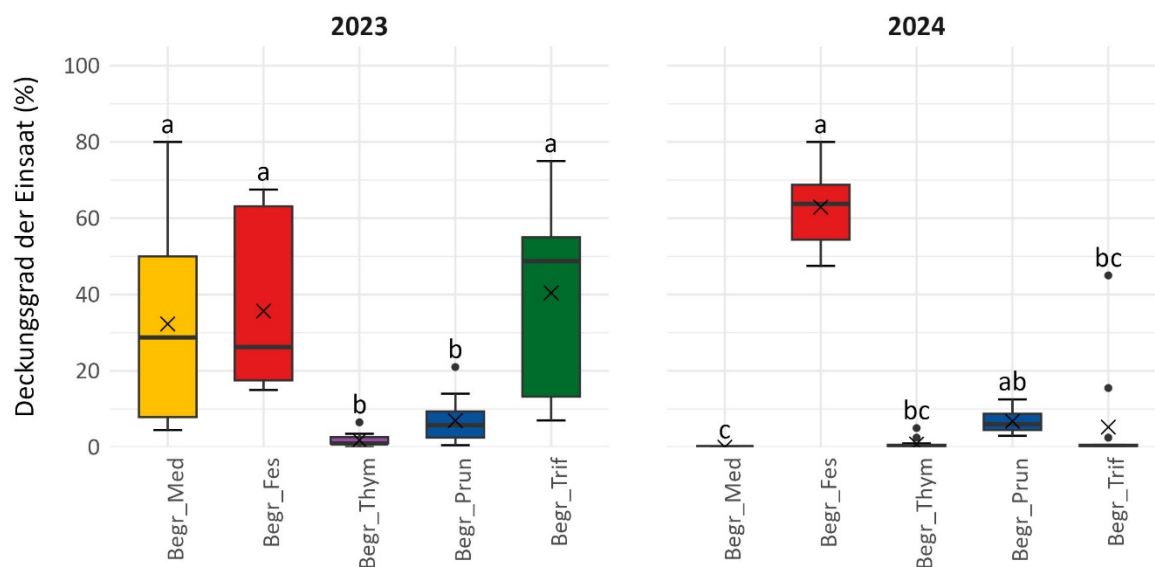


Abbildung 31: Deckungsgrade (%) der Begrünungsvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort BRETZ; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bei 2023, Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_Prun = *Prunella vulgaris* und Begr_Trif = *Trifolium repens*.

Die Untersuchungen im ersten Versuchsjahr 2023 ergaben die höchsten Deckungsgrade bei Begr_Trif (40,4 %) sowie Begr_Fes (35,7 %). Auch Begr_Med wies mit 32,3 % eine vergleichbare Etablierung auf. Deutlich schlechter schnitten Begr_Prun (7,0 %) und Begr_Thym (1,8 %) ab. Im zweiten Jahr 2024 konnte sich lediglich Begr_Fes mit einem Mittelwert von 62,9 % etablieren. Alle anderen Varianten zeigten einen starken Rückgang der Bodendeckung. Begr_Med fiel vollständig aus (0 %), Begr_Thym erreichte erneut sehr geringe Werte (0,8 %) und auch Begr_Trif (5,3 %) sowie Begr_Prun (6,8 %) blieben auf niedrigem Niveau. Dabei zeigte Begr_Prun gegenüber Begr_Med einen signifikant höheren Deckungsgrad.

Zur Bewertung des Auftretens einzelner Arten innerhalb der Begrünungsmischungen Begr_MixR und Begr_MixM werden in den Diagrammen 32 und 33 (Seite 72 und 73) die durchschnittlichen Deckungsgrade über drei Vegetationsperioden hinweg standortübergreifend dargestellt.

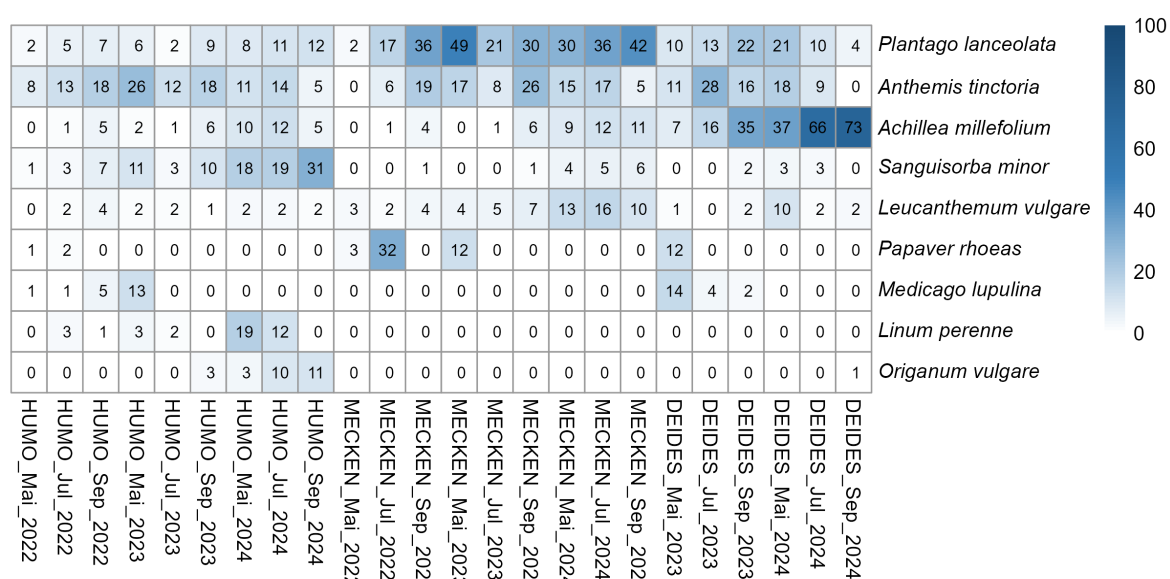


Abbildung 32: Durchschnittliche Deckungsgrade (%) der Begrünungspflanzen (> 10 %) aus der Begrünungsvariante Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Begr_MixR) im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES.

Durch die versuchsflächenspezifische Auftragung der prozentualen Deckungsgradverteilung einzelner Kräuter-Arten aus der Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Begr_MixR) wird durch die Farbunterschiede (hell = geringer Deckungsgrad, dunkel = hoher Deckungsgrad) deutlich, dass die höchste Summe der Deckungsgrade über alle Standorte und Jahre hinweg Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*) sowie Färber-Hundskamille (*Anthemis tinctoria*) waren. Dabei wurden die höchsten Werte (36 bis 49 %) von *Plantago lanceolata* in MECKEN (2022-2024) bonitiert. *Anthemis tinctoria* trat mit Höchstwerten von 26 bis 28 % im Jahr 2023 in allen Versuchsflächen (HUMO, MECKEN und DEIDES) auf. Gemeine Schafgarbe (*Achillea millefolium*) trat ebenfalls standortübergreifend sehr konstant auf, insbesondere mit hohen Deckungsgraden im Juli und September 2024 in DEIDES (66 bzw. 73 %). Kleiner Wiesenknopf (*Sanguisorba minor*) zeigte in der Fläche die beste Entwicklung, mit maximal 31 % im September 2024. Die höchsten Deckungsgrade von Fettwiesen-Margerite (*Leucanthemum vulgare*) und Klatschmohn (*Papaver rhoeas*) wurden vor allem in MECKEN mit bis zu 16 % im Juli 2024 bzw. 32 % im Juli 2022 bonitiert. Gelbklee (*Medicago lupulina*), Ausdauernder Lein (*Linum perenne*) und Oregano (*Origanum vulgare*), traten punktuell in DEIDES und HUMO auf mit Werten von 11 bis 19 %.

In der Begrünungsvariante Begr_MixM zeigten sich mit Deckungsgraden > 10 % nur zwei der enthaltenen Pflanzenarten (Abb. 33, S.73).

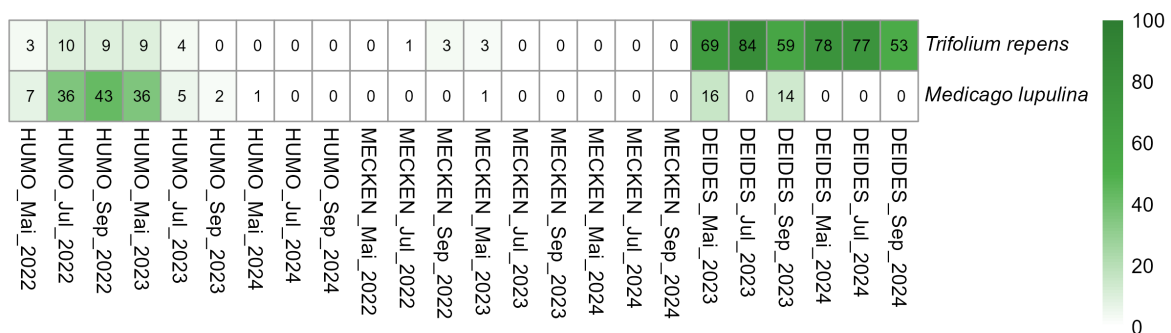


Abbildung 33: Durchschnittliche Deckungsgrade (%) der Begrünungspflanzen (> 10 %) aus der Begrünungsvariante Mischung „Mythopia 3“ (Begr_MixM) im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES.

In der Versuchsfläche MECKEN wurde über alle Jahre hinweg nahezu keine Etablierung (max. 3 %) festgestellt. In der Fläche HUMO ist vor allem Gelbklees (*Medicago lupulina*) aus der Mischung gewachsen mit Deckungen von bis zu 43 % im September 2022. In der Fläche DEIDES war es dagegen Weißklees (*Trifolium repens*), der sich mit Deckungsgraden von bis zu 84 % im Juli 2023 zeigte.

4.2.1.2 Beikrautregulierung der Varianten auf verschiedenen Versuchsstandorten

Zur Einschätzung der beikrautregulierenden Wirkung verschiedener Bodenmanagementvarianten wurden die Deckungsgrade der Beikräuter über alle Versuchsjahre und Flächen (HUMO, MECKEN, DEIDES und BRETZ) als Boxplots dargestellt. Für jedes Jahr wurden drei Boniturtermine (im Mai, Juli und September) über den Vegetationszeitraum zusammengefasst. Abbildung 34 auf Seite 74 zeigt, dass der Deckungsgrad der Beikräuter am Standort HUMO zwischen den Jahren 2022 und 2024 sowie zwischen den Varianten deutlich variiert.

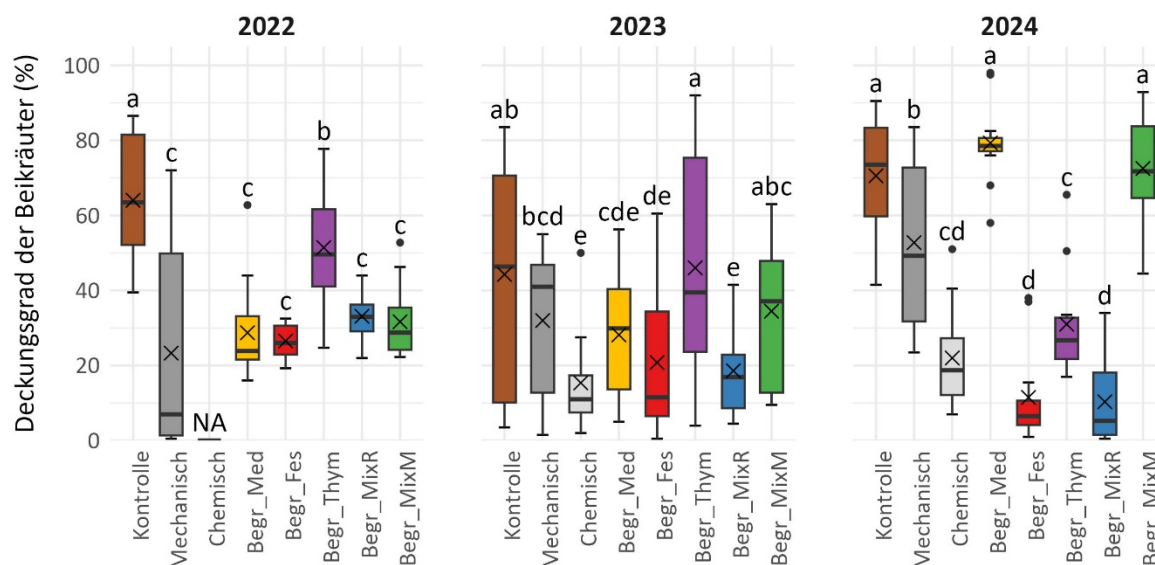


Abbildung 34: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort HUMO; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Im Jahr 2022 wies die unbehandelte Kontrolle mit 64,0 % den höchsten mittleren Deckungsgrad der Beikräuter auf. Die Begrünungsvariante Begr_Thym wies mit 51,4 % einen geringeren Wert auf. Die übrigen Varianten zeigten die niedrigste Beikrautdeckung: Die Begrünungsvarianten Begr_Med, Begr_Fes, Begr_MixR und Begr_MixM erreichten Werte zwischen 26,5 % (Begr_Fes) und 33,1 % (Begr_MixR). Die Beikrautdeckung der mechanische Variante war mit 23,3 % vergleichbar niedrig und wies eine hohe Streuung auf (SD = 29,1 %, Minimum = 0,5 % und Maximum = 72,0 %). Im Jahr 2023 erzielte Begr_Thym (46,0 %) den höchsten Deckungsgrad und unterschied sich statistisch zwar nicht von der Kontrolle (44,3 %) und Begr_MixM (34,5 %), dafür aber von der mechanischen Variante (32,0 %), Begr_Fes (20,8 %), Begr_MixR (18,6 %) und der in diesem Jahr eingeführten chemischen Variante (15,4 %). Alle Begrünungsvarianten, mit Ausnahme von Begr_Thym, lagen signifikant unter der Kontrollvariante. Im Jahr 2024 wiesen Begr_Med (79,3 %), Begr_MixM (72,5 %) und die Kontrolle (70,5 %) die höchsten Deckungsgrade auf. Die mechanische Variante erreichte einen signifikant geringeren Wert von 52,8 %. Nochmals geringer waren die Deckungen von Begr_Thym (14 %), der chemischen Variante (22,0 %), Begr_Fes (11,5 %) und Begr_MixR (10,3 %).

Die in der Abbildung 35 auf Seite 75 kombinierten Boxplot-Diagramme veranschaulichen die Beikrautdeckung in der Versuchsfläche in der Meckenheimer Straße in Neustadt/Wstr. (MECKEN) in den Jahren 2022 bis 2024.

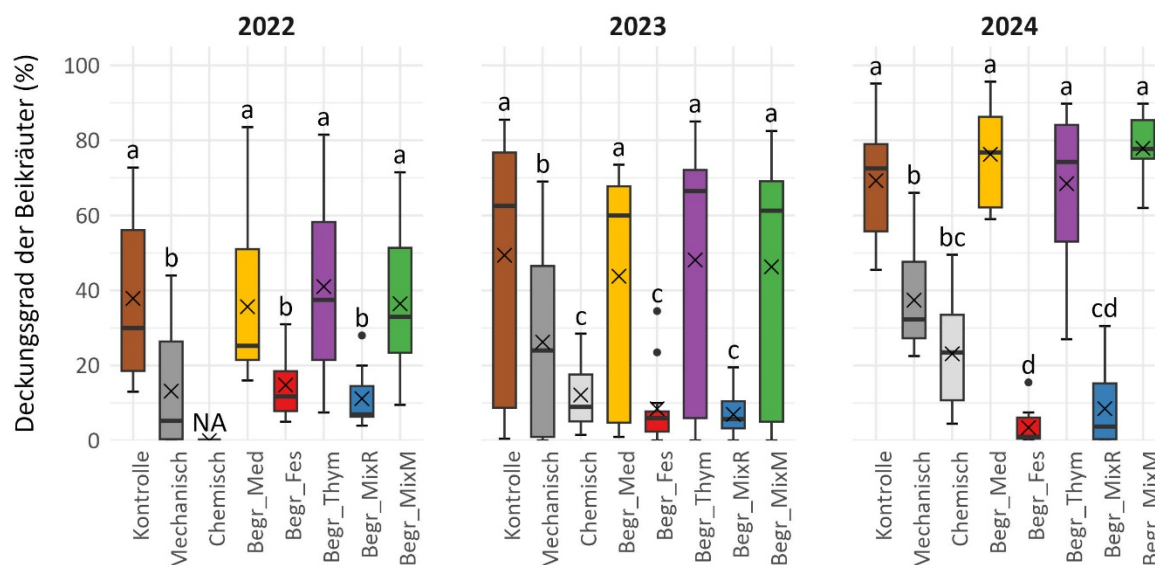


Abbildung 35: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 am Standort MECKEN; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Im Jahr 2022 erreichten die Begrünungsvarianten Begr_Thym (41,0 %), Begr_MixM (36,5 %) und Begr_Med (35,7 %) Beikraut-Deckungsgrade, die sich statistisch nicht von der unbehandelten Kontrolle (37,9 %) unterschieden. Geringer waren Begr_Fes (14,8 %), die mechanische Variante (13,2 %) und Begr_MixR (11,2 %). Die Boxplots im Jahr 2023 zeigten ein ähnliches Bild: Begr_Thym (48,1 %), Begr_MixM (46,3 %) und Begr_Med (43,8 %) unterschieden sich nicht signifikant zur Kontrolle (49,4 %). Der mittlere Beikraut-Deckungsgrad der mechanischen Variante lag mit 26,3 % darunter. Am niedrigsten waren die Werte der chemischen Variante (12,2 %) sowie der Varianten Begr_Fes (8,5 %) und Begr_MixR (7,0 %). Im Jahr 2024 wiesen Begr_MixM (77,9 %), Begr_Med (76,3 %), die Kontrolle (69,3 %) und Begr_Thym (68,5 %) die höchsten Werte auf. Die mechanische Variante erreichte 37,4 % und die chemische Variante 23,1 %. Beide Variante unterschieden sich damit von der Kontrolle. Auch Begr_MixR (8,5 %) und Begr_Fes (3,5 %) wiesen eine geringere Beikrautdeckung auf als die Kontrolle. Darüber hinaus lagen diese Werte unter der mechanischen Variante und die von Begr_Fes zusätzlich unter der chemischen Variante.

Die Ergebnisse zur Beikrautdeckung in Deidesheim (DEIDES) in den Jahren 2023 und 2024 sind in den Boxplots der Abbildung 36 auf Seite 76 visualisiert.

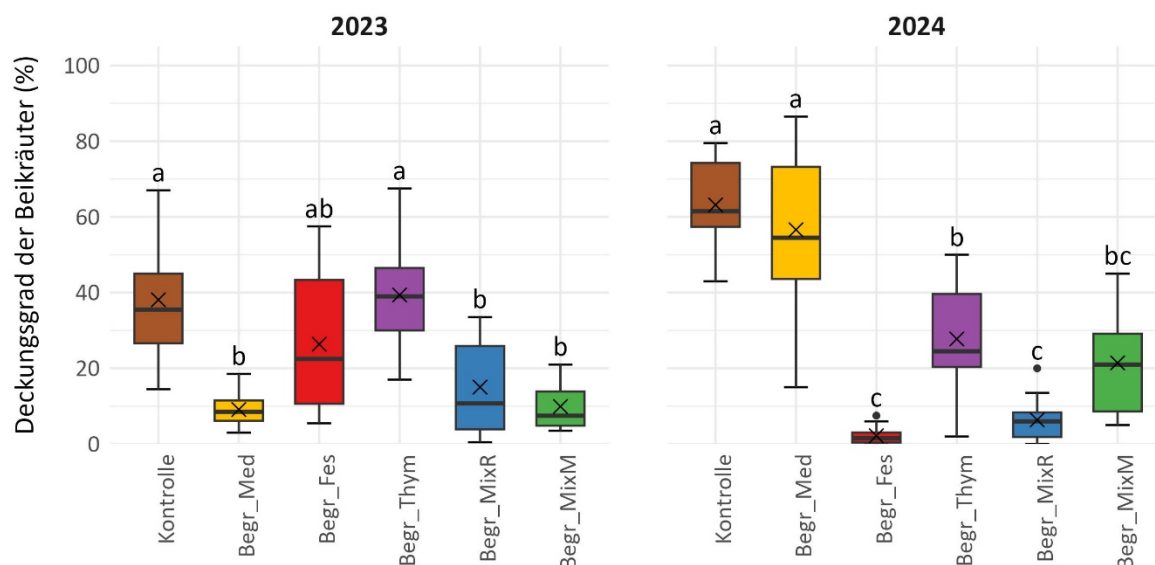


Abbildung 36: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort DEIDES; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für 2023, HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“.

Im Jahr 2023 wurden in Begr_Thym mit 39,4 %, in der Kontrolle mit 38,1 % und in Begr_Fes mit 26,4 % vergleichbar hohe Deckungswerte der Beikräuter beobachtet. Begr_MixR (15,0 %), Begr_MixM (9,9 %) und Begr_Med (9,1 %) zeigten im Vergleich zur Kontrolle deutlich geringere Werte. Im Jahr 2024 stieg der Beikraut-Deckungsgrad in der Kontrolle auf 63,2 %. Begr_Med zeigte mit 56,6 % ebenfalls eine hohe Deckung. Die Variante Begr_Thym erreichte 27,8 %, während Begr_MixM mit 21,4 % einen ähnlichen Deckungsgrad aufwies. Die niedrigste Bedeckung wurde für Begr_MixR mit 6,4 % und für Begr_Fes mit 2,2 % erfasst, mit geringer Streuung von $SD = 6,2$ % und $SD = 2,4$ %.

Die Verteilung der Beikrautdeckung in den Jahren 2023 und 2024 in der Versuchsfläche in Bretzfeld (BRETZ) ist in Abbildung 37 auf Seite 77 dargestellt.

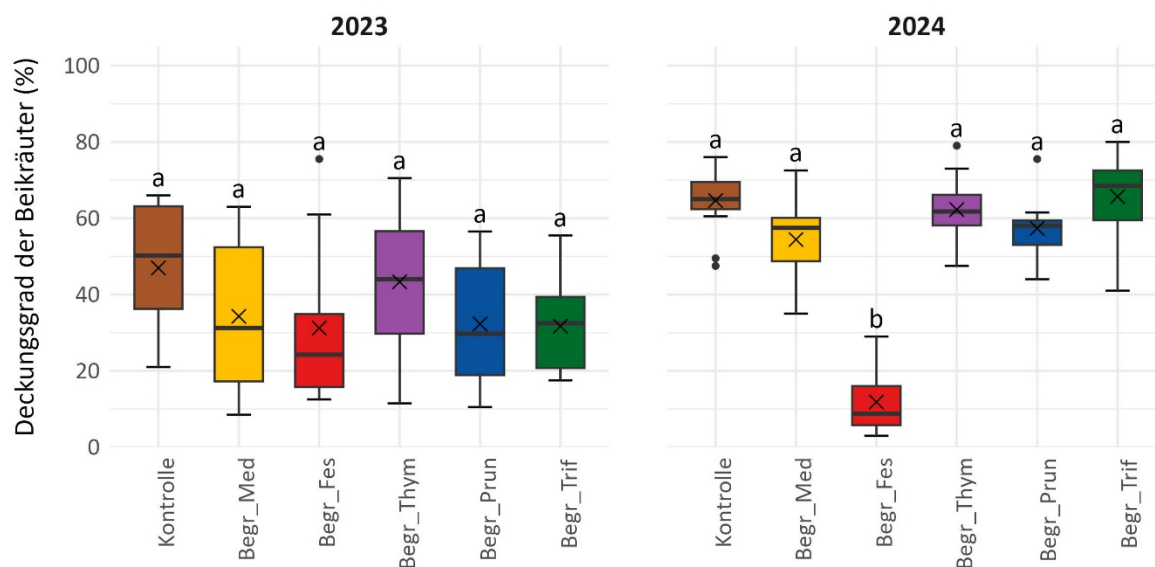


Abbildung 37: Deckungsgrade der Beikräuter (%) in den Bodenmanagementvarianten im Vegetationszeitraum 2023 bis 2024 am Standort BRETZ; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_Prun = *Prunella vulgaris* und Begr_Trif = *Trifolium repens*.

Im Jahr 2023 wies die unbehandelte Kontrolle mit 47,0 % zwar den höchsten mittleren Deckungsgrad auf, es gab jedoch keine nennenswerten Unterschiede zu den anderen Begrü- nungsvarianten (Werte zwischen 43,3 % und 31,2 %). Im Jahr 2024 erhöhte sich der mittlere Deckungsgrad in nahezu allen Varianten. Die höchsten Werte wurden für Begr_Trif (65,7 %), Begr_Thym (62,2 %), Begr_Prun (57,3 %) und Begr_Med (54,4 %) erfasst. Die Kontrolle lag bei 64,6 %. Begr_Fes wies mit 11,8 % die niedrigste mittlere Deckung mit einer vergleichsweise geringen Streuung ($SD = 8,7 \%$, $Min = 3,0 \%$ und $Max = 29,0 \%$) auf.

Abbildung 38 auf Seite 78 zeigt die durchschnittlichen Deckungsgrade häufiger (Werte $> 10 \%$ Deckung), spontanwachsender Beikräuter in der Kontrollvariante über alle Versuchsflächen und -jahre hinweg.

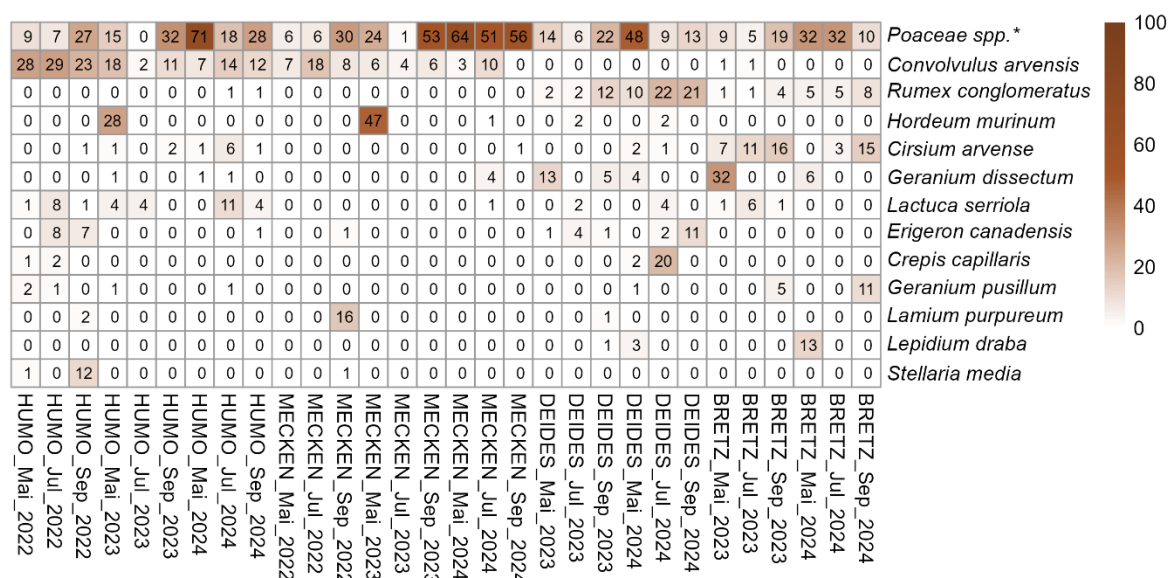


Abbildung 38: Durchschnittliche Deckungsgrade (%) der Beikräuter (> 10 %) in der Kontrollvariante im Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES und BRETZ.

*Excl. *Hord. murinum*

Besonders auffällig ist die Dominanz von Süßgräsern (*Poaceae* spp.), die über alle Standorte hinweg auftraten. Innerhalb der Flächen wurden die Höchstwerte immer im Mai 2024 erzielt: 71 % in HUMO, 64 % in MECKEN, 48 % in DEIDES und 32 % in BRETZ. Auch Ackerwinde (*Convolvulus arvensis*) war mit einer Ausnahme (MECKEN, Sep 2024) über alle Termine in HUMO und MECKEN präsent, insbesondere 2022 in HUMO (23 bis 29 %). Knäuel-Ampfer (*Rumex conglomeratus*) trat punktuell sehr stark auf, vor allem 2024 in DEIDES (10 bis 21 %). Mäuse-Gerste (*Hordeum murinum*) trat im Mai 2023 verstärkt in den Ertragsanlagen MECKEN (47 %) und HUMO (28 %) auf. Ein erhöhtes Auftreten von Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*) wurde im September 2023 (16 %) und September 2024 (15 %) in der Fläche BRETZ nachgewiesen. Im Mai 2023 trat hier Schlitzblättriger Storchschnabel (*Geranium dissectum*) großflächig (32 %) auf. Kompass-Lattich (*Lactuca serriola*) kam hauptsächlich im Monat Juli vor und wurde mit maximal 11 % im Juli 2024 in der Fläche HUMO bonitiert. Kanadisches Berufkraut (*Erigeron canadensis*) erzielte die höchste Deckung im September 2024 am Standort DEIDES. Hier wurde bereits im Juli 2024 der Höchstwert von Kleinköpfigem Pippau (*Crepis capillaris*) erfasst (20 %). Vereinzelt wurden außerdem Kleiner Storchschnabel (*Geranium pusillum*) (BRETZ_Sep_2024: 11 %), Purpur-Taubnessel (*Lamium purpureum*) (MECKEN_Sep_2022: 16 %), Pfeilkresse (*Lepidium draba*) (BRETZ_Mai_2024: 13 %) und Vogelmiere (*Stellaria media*) (HUMO_Sep_2022: 12 %) bonitiert.

Zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen dem Deckungsgrad der Einsaaten und der berechneten beikrautunterdrückenden Wirkung wurden lineare Regressionsanalysen durchgeführt, die in Abbildung 39 dargestellt sind.

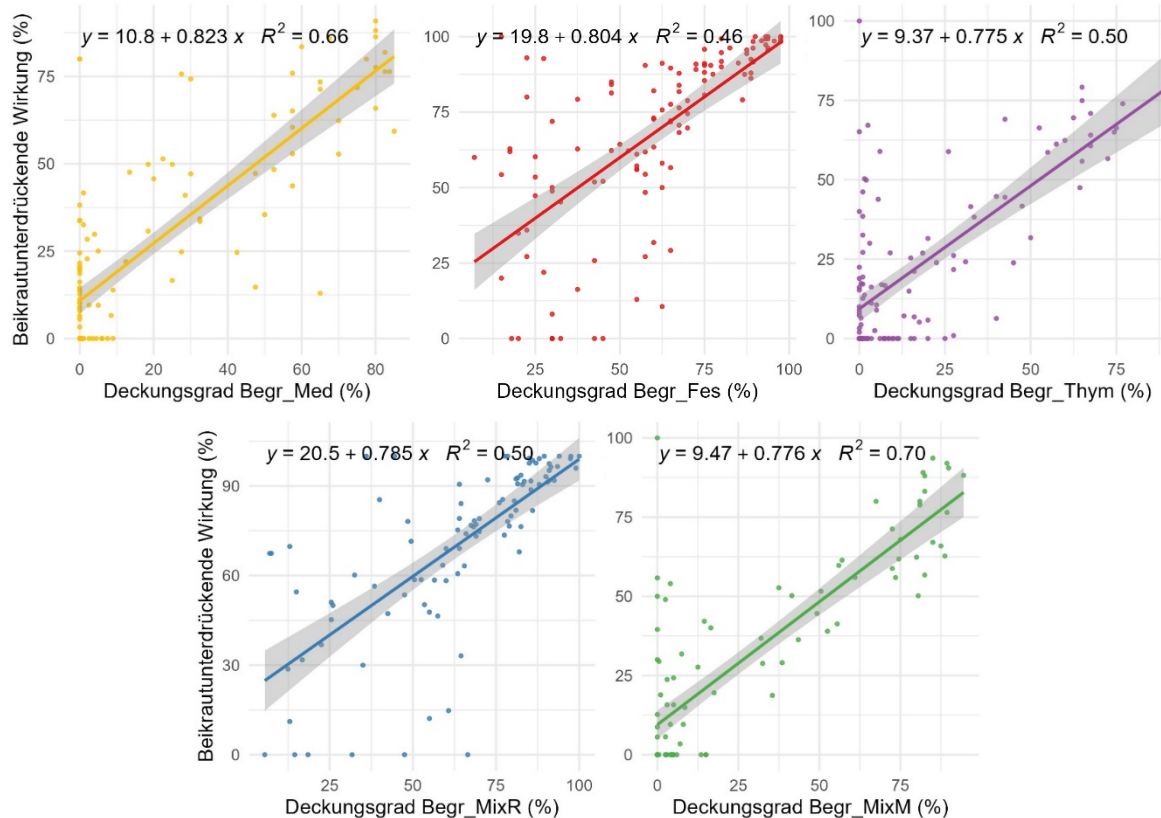


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen dem Deckungsgrad verschiedener Begrünungsvarianten (%) und deren beikrautunterdrückender Wirkung (%); Daten vom Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES und BRETZ; dargestellt sind lineare Regressionsanalysen für Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“. Angegeben sind die Regressionsgleichungen und die Bestimmtheitsmaße (R^2).

Die Regressionsanalysen zeigen, dass mit zunehmender Bodenbedeckung der Begrünung auch die unterdrückende Wirkung auf spontan auflaufende Beikräuter steigt (positive Steigung der Geraden). Die Steigungen der Regressionsgeraden lagen zwischen 0,775 (Begr_Thym) und 0,823 (Begr_Med). Die Bestimmtheitsmaße (R^2) reichen von 0,46 (Begr_Fes) bis 0,70 (Begr_MixM) und verdeutlichen die Unterschiede in der Modellgüte. Die höchste Erklärungsleistung wurde für Begr_MixM ($R^2 = 0,70$) und Begr_Med ($R^2 = 0,66$) ermittelt. Die Achsenabschnitte lagen zwischen 9,5 % (Begr_MixM) und 20,5 % (Begr_MixR). Diese Werte geben die geschätzte beikrautunterdrückende Wirkung bei einem Deckungsgrad von 0 % an. Sie deuten darauf hin, dass einige Varianten bereits ohne vollständige Bodendeckung eine Unterdrückungswirkung entfalten. Insbesondere Begr_MixR (20,5 %) und Begr_Fes (19,8 %) weisen hohe Ausgangswerte auf. Varianten wie Begr_Med (10,8 %) oder Begr_MixM (9,5 %) zeigen

dagegen eine geringere Anfangswirkung. Die Deckungsgrade der Begrünungsvarianten, bei denen eine beikrautunterdrückende Wirkung von 50 % erreicht wurde, lagen zwischen 37,5 % (Begr_Fes und Begr_MixR), 47,6 % (Begr_Med) und 52,3 bzw. 52,4 % (Begr_MixM und Begr_Thym).

4.2.1.3 Maximale Wuchshöhe der Pflanzen

Die maximale Wuchshöhe der Arten von den Einsaaten und Beikräutern wurde über alle Boniturzeitpunkte hinweg erhoben und als Boxplots in Abbildung 40 dargestellt. Alle dargestellten Arten traten gemäß Kapitel 4.2.1.1 mit mindestens 10 % Deckung in den Versuchsflächen auf.

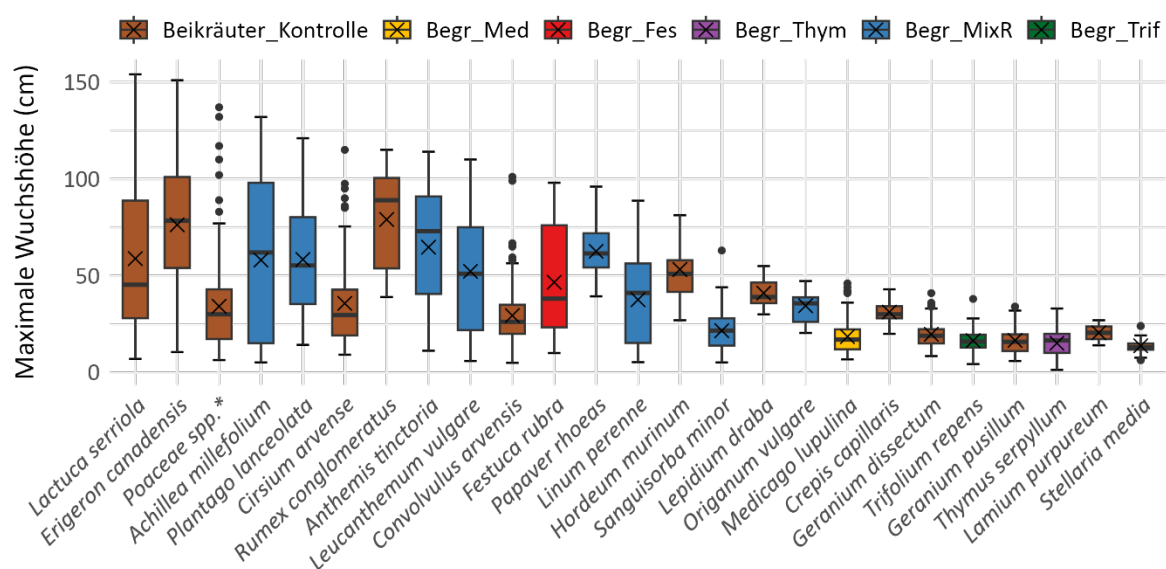


Abbildung 40: Maximale Wuchshöhe (cm) verschiedener Pflanzenarten; Daten vom Vegetationszeitraum 2022 bis 2024 an den Standorten HUMO, MECKEN und DEIDES und BRETZ; Messung von zwölf Individuen einer Pflanzenart pro Messzeitpunkt und Fläche unabhängig der Versuchsglieder; dargestellt sind Boxplots mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR (Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_Trif = *Trifolium repens*. *Excl. *Hord. murinum*

Die höchsten maximalen Wuchshöhen wurden bei den Beikräutern in der Kontrollvariante gemessen: Kompass-Lattich (*Lactuca serriola*) erreichte eine Maximalhöhe von 154,0 cm und einen Mittelwert (MW) von 58,8 cm, Kanadisches Berufkraut (*Erigeron canadensis*) wuchs bis 151,0 cm hoch (MW = 76,3 cm) und Süßgräser (*Poaceae* spp.) erreichten eine maximale Höhe von 137,0 cm, bei einem Mittelwert von 34,2 cm. Hohe Einzelpflanzen wurden auch in der Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Begr_MixR) registriert: Schafgarbe (*Achillea millefolium*) mit 132,0 cm (MW = 58,1 cm) und Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*) mit 121,0 cm (MW = 58,4 cm). Arten mit mittleren Maximalhöhen waren Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*) (Max = 115,0 cm, MW = 35,7 cm), Knäuel-Ampfer (*Rumex conglomeratus*) (Max = 115,0 cm, MW =

79,0 cm), Ackerwinde (*Convolvulus arvensis*) (Max = 101,0 cm, MW = 29,4 cm) sowie die beiden Begrünungspflanzen aus Begr_MixR Färberkamille (*Anthemis tinctoria*) (Max = 114,0 cm, MW = 64,7 cm) und Fettwiesen-Margerite (*Leucanthemum vulgare*) (Max = 110,0 cm, MW = 52,2 cm). Ackerwinde (*Convolvulus arvensis*) erreichte maximal 101,0 cm (Mittelwert = 29,4 cm) und Rotschwingel (*Festuca rubra*) der Begrünungsvariante Begr_Fes erreichte Wuchshöhen von bis zu 98,0 cm (MW = 46,8 cm). Es folgten Klatschmohn (*Papaver rhoeas*) (Max = 96,0 cm, MW = 62,6 cm) und Ausdauernder Lein (*Linum perenne*) (Max = 88,7 cm, MW = 37,6 cm) aus Begr_MixR sowie Mäusegerste (*Hordeum murinum*) (Max = 81,2 cm, MW = 53,2 cm). Des Weiteren wurden Maximalwerte von 63 cm (Kleiner Wiesenknopf (*Sanguisorba minor*)) bis 24 cm (Vogelmiere (*Stellaria media*)) verzeichnet. Darunter waren auch die eingesäten Arten der Begrünungsvarianten Begr_Med, Begr_Trif und Begr_Thym: Gelbklees (*Medicago lupulina*) erreichte maximal 46,0 cm (MW = 18,5 cm), Weißklee (*Trifolium repens*) maximal 38,0 cm (MW = 16,5 cm) und Sand-Thymian (*Thymus serpyllum*) maximal 33,0 cm (MW = 15,1 cm).

4.2.1.4 Oberirdische Frischmasse und Wurzelmasse

Um die Effekte der Bodenmanagementvarianten auf die Biomassebildung zu quantifizieren, wurden die gesamte oberirdische Frischmasse sowie die Wurzelmassen abzüglich Rebwurzeln in den Bodentiefen 0 bis 15 cm, 15 bis 30 cm und 30 bis 45 cm bestimmt und in Abbildung 41 auf Seite 82 dargestellt.

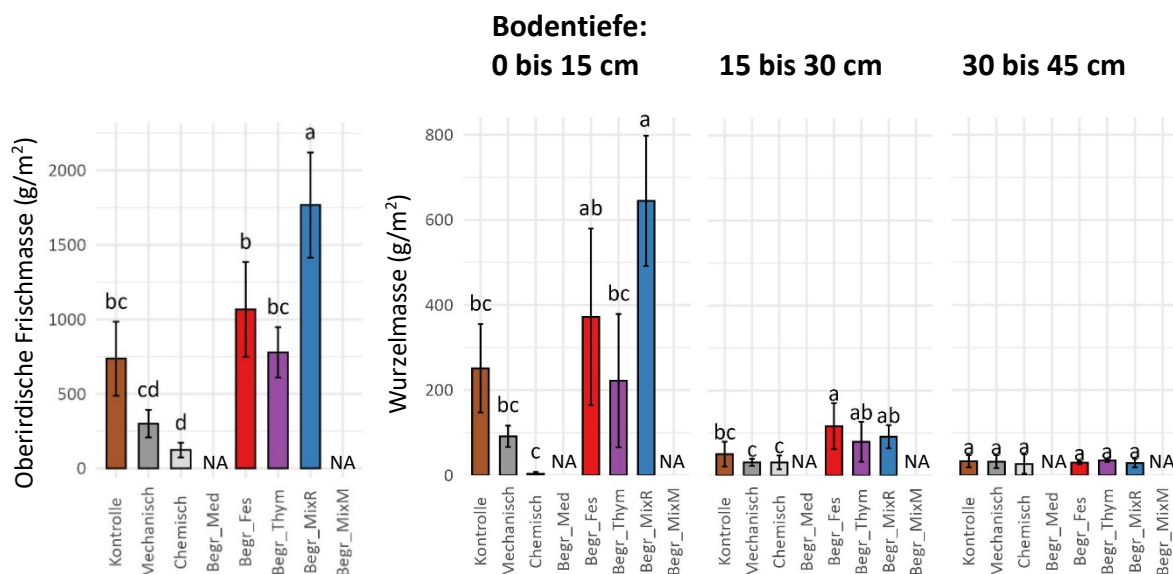


Abbildung 41: Gesamte oberirdische Frischmasse (links) und Wurzelmasse abzügl. Rebwurzeln (rechts, unterteilt nach Bodentiefen) in g/m² in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO vom 07.10.2024 (oberirdische Frischmasse) bzw. 07.11.2024 (Wurzelmasse); Säulen zeigen Mittelwerte ± Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Tukey-HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für Wurzelmasse 15 bis 30 cm; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Die oberirdische Frischmasse unterschied sich deutlich zwischen den Varianten. Die höchste Masse wurde in der Variante Begr_MixR mit durchschnittlich 1767,5 g/m² erreicht. Darunter lagen Begr_Fes (1067,2 g/m²), Begr_Thym (778,6 g/m²) und die Kontrolle (736,4 g/m²). Die mechanische Variante lag mit 300,2 g/m² deutlich unter Begr_Fes und die chemische Variante lag mit 123,1 g/m² unter allen Begrünungsvarianten sowie der Kontrolle.

Die Wurzelmassen zeigten insbesondere in der obersten Schicht (0 bis 15 cm) ein erhöhtes Vorkommen. Hier waren die Werte bei Begr_MixR mit 644,6 g/m² im Mittel am höchsten. Vergleichbar hoch waren auch die Werte von Begr_Fes (372,1 g/m²). Die Kontrolle (251,2 g/m²), Begr_Thym (222,2 g/m²) und die mechanische Variante (91,4 g/m²) bildeten in dieser Bodenschicht statistisch nachweisbare geringere Wurzelmassen aus als Begr_MixR. Die chemische Variante lag mit 3,4 g/m² signifikant unter Begr_MixR und Begr_Fes. In der Bodenschicht 15 bis 30 cm erreichte Begr_Fes mit 116,3 g/m² den höchsten Wert, der zwar deutlich unter der mechanischen (31,1 g/m²) und der chemischen Variante (30,9 g/m²) lag, sich jedoch nicht signifikant von Begr_MixR (91,5 g/m²), Begr_Thym (79,3 g/m²) und der Kontrolle (50,2 g/m²) unterschied. In 30 bis 45 cm Bodentiefe fielen alle Werte deutlich ab (34,6 bis 26,1 g/m²) und waren statistisch nicht mehr voneinander unterscheidbar.

4.2.2 Einfluss der Begrünungspflanzen auf den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Bodens

Die folgenden Auswertungen zur Bodenfeuchte und -temperatur, Infiltrationsrate sowie zu bodenanalytischen Parametern stammen aus der Versuchsfläche Hundertmorgen Nord (HUMO). Die Begrünungsvarianten, die gemäß Kapitel 4.2.1.1 einen Deckungsgrad der Einsaat von weniger als 10 % aufwiesen, wurden von der Analyse ausgeschlossen (2022: Begr_Thym; 2024: Begr_Med und Begr_MixM). Die chemische Variante wurde ab 2023 eingeführt.

4.2.2.1 Volumetrische Bodenfeuchte und Bodentemperatur

Die Abbildung 42 zeigt Boxplots der erfassten Bodenfeuchtwerte im 15-Minuten-Rhythmus im Vegetationszeitraum Mai bis September. Die Messtiefe im Boden lag bei 6 cm.

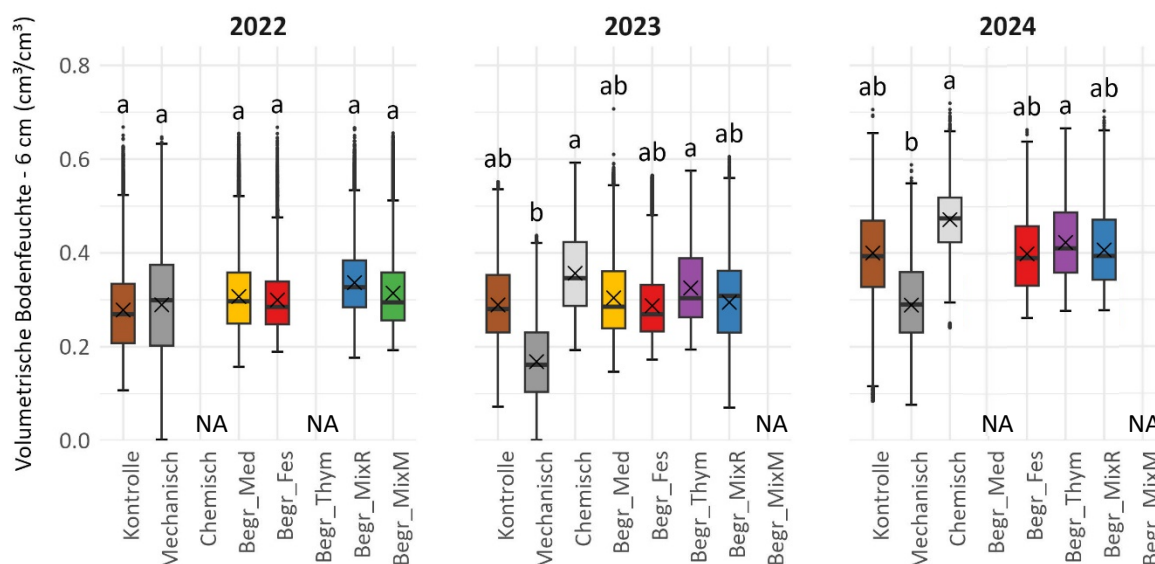


Abbildung 42: Volumetrische Bodenfeuchte (cm³/cm³) in 6 cm Tiefe in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO im Zeitraum 2022 bis 2024 jeweils Mai bis September; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = Medicago lupulina, Begr_Fes = Festuca rubra, Begr_Thym = Thymus serpyllum, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Im Jahr 2022 waren bei der Betrachtung der volumetrischen Bodenfeuchte keine Unterschiede zwischen den Varianten zu verzeichnen (MW = 0,28 bis 0,33 cm³/cm³). Im Jahr 2023 wies die mechanische Bodenbearbeitung mit 0,17 cm³/cm³ den niedrigsten Bodenfeuchtegehalt aller Varianten auf. Die chemische Behandlung zeigte mit 0,36 cm³/cm³ den höchsten Feuchtegehalt, während die übrigen Varianten mit Werten zwischen 0,29 und 0,40 cm³/cm³ ein mittleres Niveau hielten. Im Jahr 2024 wurde im Vergleich zu 2023 ein allgemeiner Anstieg der Bodenfeuchte über alle Varianten hinweg beobachtet. Die chemische Variante erreichte

mit $0,47 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ erneut den höchsten Wert, welcher mit dem von Begr_Thym ($0,47 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) vergleichbar war. Die Bodenfeuchte der mechanischen Variante lag deutlich darunter ($0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Im mittleren Bereich gruppierten sich die übrigen Varianten mit Werten zwischen $0,40$ und $0,46 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Auffällig sind zudem die unterschiedlichen Minimalwerte der Bodenfeuchte über die Varianten: Die Differenzen der Minimalwerte lagen in allen drei Jahren zwischen $0,19$ und $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Die chemische Variante sowie die Begrünungsvarianten (mit Ausnahme von Begr_MixR in 2023) zeigten stets die höchsten Minimalwerte, die mechanische Variante jeweils die niedrigsten. Dazwischen lag die Kontrollvariante, deren Minimalwerte in einzelnen Jahren ebenfalls vergleichsweise niedrig ausfielen und Unterschiede von bis zu $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Begr_Thym und Begr_MixR in 2024) zu den übrigen Varianten verursachte.

Wie die folgende Boxplot-Darstellung der Abbildung 43 zeigt, konnten bei Betrachtung der Bodenfeuchte in 40 cm Tiefe in den Jahren 2023 und 2024 keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden.

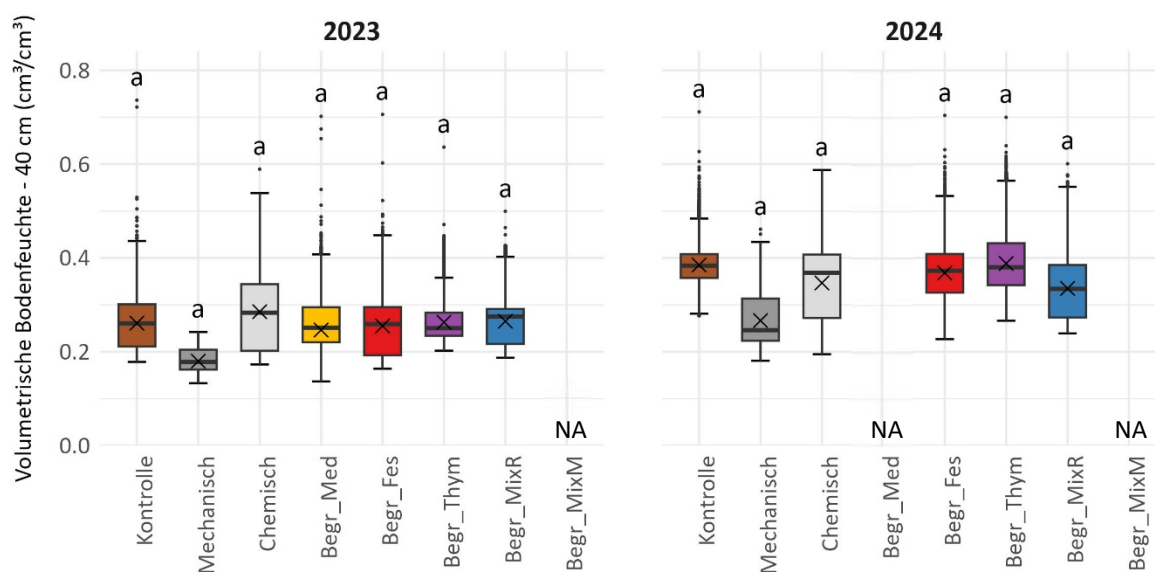


Abbildung 43: Volumetrische Bodenfeuchte (cm^3/cm^3) in 40 cm Tiefe in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO im Zeitraum 2022 bis 2024 jeweils Mai bis September; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Die Werte der volumetrischen Bodenfeuchte in 40 cm Tiefe waren unter allen Varianten vergleichbar und betrugen im Jahr 2023 $0,18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Mechanisch) bis $0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Chemisch) und im Jahr 2024 $0,27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Mechanisch) bis $0,39 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (Kontrolle und Begr_Thym).

Abbildung 44 zeigt den Einfluss der verschiedenen Bodenmanagement-Varianten auf die Bodentemperatur in 6 cm Tiefe.

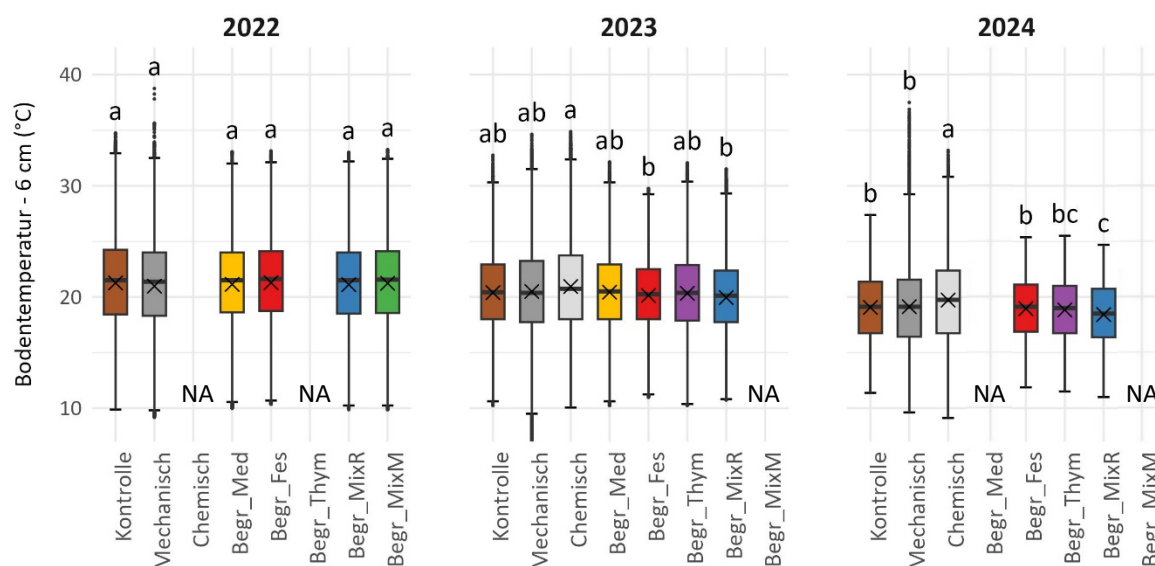


Abbildung 44: Bodentemperatur (°C) in 6 cm Tiefe in den Bodenmanagementvarianten in der Fläche HUMO im Zeitraum 2022 bis 2024 jeweils Mai bis September; dargestellt sind Boxplots ($n = 4$) mit Mittelwerten (Kreuze) und Ausreißern (Punkte); unterschiedliche Buchstaben innerhalb eines Jahres: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Im ersten Versuchsjahr (2022) zeigten sich bei der Bodentemperatur keine Unterschiede zwischen den Varianten (21,1 bis 21,3 °C). Im Jahr 2023 wies die chemische Behandlung mit 20,9 °C die höchste durchschnittliche Bodentemperatur auf. Unterschiede wurden beim Vergleich mit Begr_Fes (20,1 °) und Begr_MixR (20,3 °) verzeichnet. Im Jahr 2024 wurde in der chemischen Variante mit 19,7 °C die höchste Temperatur gemessen, wodurch der signifikante Unterschied zu allen anderen Varianten errechnet wurde. Deutlich unter den Varianten Kontrolle (19,1 °C), mechanisch (19,1 °C) und Begr_Fes (19,0 °C) lag die Variante Begr_MixR (18,4 °C). Dazwischen lag Begr_Thym mit 18,8 °C. Die höchsten Werte der Bodentemperatur wurden in 2022 in der mechanischen Variante (38,8 °C), 2023 in der chemischen Variante (34,9 °C) und 2024 in der mechanischen Variante (37,5 °C) gemessen. Teilweise lagen die übrigen Varianten mit einer Differenz von bis zu 12,8 °C unter den Höchstwerten (Begr_MixR in 2024: 24,7 °C).

4.2.2.2 Infiltrationsrate und Bodenanalytik

Zur Beurteilung der Auswirkungen der Varianten auf bodenphysikalische und mikrobiologische Eigenschaften wurden die Ergebnisse der Infiltrationsrate, Gehalt an organischem Kohlenstoff sowie die mikrobielle Biomasse in den Säulendiagrammen der Abbildung 45 auf Seite 95 aufgetragen.

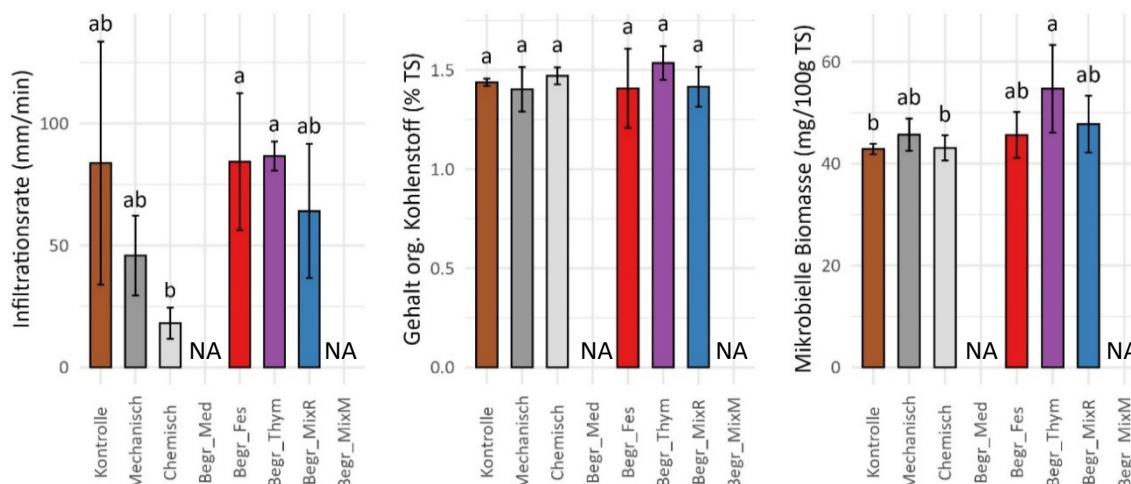


Abbildung 45: Links: Infiltrationsrate (mm/min) am 24.07.2024, Mitte: Gehalt an organischem Kohlenstoff (% TS) in 0 bis 15 cm Bodentiefe am 21.08.2024 und rechts: mikrobielle Biomasse (mg/100 g TS) in 0 bis 15 cm Bodentiefe am 21.08.2024; dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) bei Infiltrationsrate; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Die höchsten Infiltrationsraten wurden bei den Begrünungsvarianten Begr_Thym (86,6 mm/min) und Begr_Fes (84,3 mm/min) festgestellt. Deutlich darunter lag die chemische Variante (18,1 mm/min). Davon waren die Kontrolle (83,8 mm/min), Begr_MixR (64,1 mm/min) und die mechanische Variante (45,8 mm/min) statistisch nicht zu unterscheiden.

Die Messung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff im Boden lieferte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Es wurden Werte zwischen 1,40 % (Mechanisch) und 1,54 % (Begr_Thym) C_{org} im getrockneten Boden (TS) ermittelt.

Die höchste mikrobielle Biomasse wurde in der Variante Begr_Thym mit 54,7 mg/100 g TS gemessen, gefolgt von Begr_MixR (47,8 mg/100 g TS), Begr_Fes (45,6 mg/100 g TS) sowie der mechanischen Variante (45,7 mg/100 g TS). Deutlich niedriger als Begr_Thym waren die mikrobiellen Biomassen bei der Kontrolle (42,9 mg/100 g TS) und der chemischen Variante (43,1 mg/100 g TS).

Zur Bewertung der Stickstoff-Dynamik im Oberboden wurde der Nitrat-N-Gehalt zu fünf Messzeitpunkten im Verlauf der Versuchsjahre erfasst und die Ergebnisse in Form von Säulendiagrammen in Abbildung 46 visualisiert.

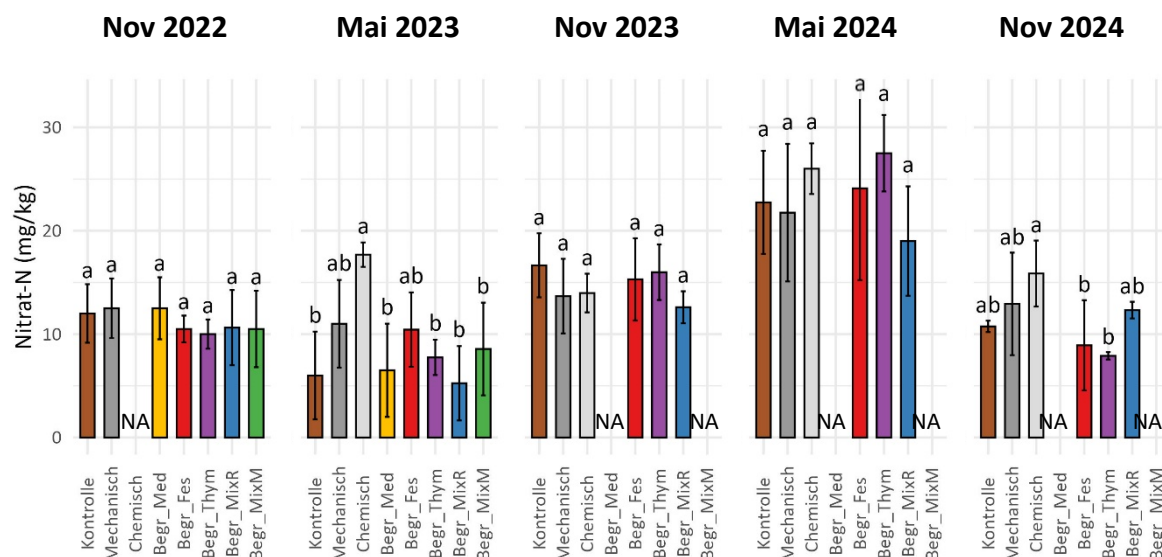


Abbildung 46: Nitrat-N (mg/kg) in 0 bis 30 cm Bodentiefe zu unterschiedlichen Messzeitpunkten; dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) bzw. HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) für Mai 2023 (Yeo-Johnson-Transformation) Nov 2023 und Nov 2024; Mittelwerte wurden Ausreißer-bereinigt; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

Im November 2022 zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Die Nitrat-Gehalte lagen überwiegend im Bereich von etwa 10 und 12,5 mg/kg. Im Mai 2023 wies die chemische Variante (17,7 mg/kg) signifikant höhere Werte als die Kontrolle (6,0 mg/kg), Begr_Med (6,5 mg/kg), Begr_Thym (7,8 mg/kg), Begr_MixR (5,3 mg/kg) und Begr_MixM (8,6 mg/kg) auf. Die Werte der mechanischen Variante (11,0 mg/kg) und Begr_Fes (10,4 mg/kg) blieben im mittleren Bereich. Im November 2023 (12,6 bis 16,7 mg/kg) und im Mai 2024 (19,0 bis 27,5 mg/kg) wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Zum Ende des Versuchszeitraumes, im November 2024, wies die chemische Variante (15,8 mg/kg) deutlich höhere Gehalte als Begr_Fes (8,8 mg/kg) und Begr_Thym (8,0 mg/kg) auf. Die Nitrat-N-Gehalte der mechanischen Variante (13,0 mg/kg), der Variante Begr_MixR (12,0 mg/kg) und der Kontrolle (10,5 mg/kg) lagen im mittleren Bereich.

4.2.3 Einfluss der Begrünungspflanzen auf rebphysiologische Parameter

Zur Beurteilung eines möglichen Einflusses der Begrünungspflanzen auf die Rebe werden im Folgenden die Ergebnisse des Blattwasserpotentials sowie der Parameter zur Traubenqualität und -quantität aufgeführt.

4.2.3.1 Frühmorgentliches Blattwasserpotential

Zur Beurteilung eines möglichen Einflusses der Begrünungspflanzen auf den Trockenstress der Reben wurde das frühmorgentliche Blattwasserpotential über alle Versuchsjahre und -flächen hinweg erfasst und in Abbildung 47 auf Seite 89 dargestellt. Die Begrünungsvarianten, die gemäß Kapitel 4.2.1.1 einen Deckungsgrad der Einsaat von weniger als 10 % aufwiesen, wurden von der Analyse ausgeschlossen (HUMO 2022: Begr_Thym; HUMO 2024: Begr_Med und Begr_MixM; MECKEN 2022 bis 2024: Begr_Med, Begr_Thym und Begr_MixM; BRETZ 2023: Begr_Thym und Begr_Prun; BRETZ 2024: Begr_Med, Begr_Thym, Begr_Prun, Begr_Trif). Die chemische Variante wurde in den Flächen HUMO und MECKEN im Jahr 2023 eingeführt.

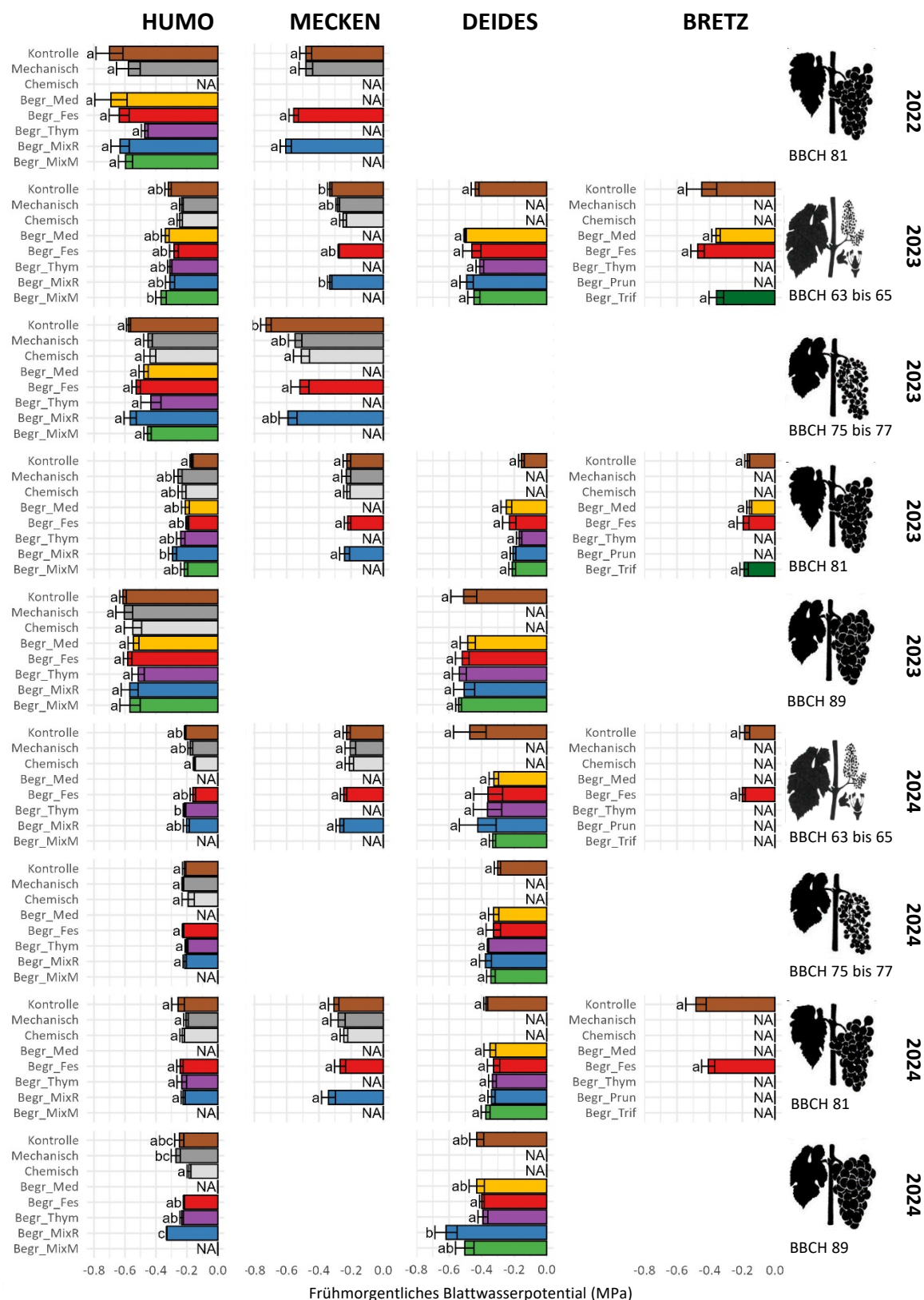


Abbildung 47: Frühmorgentliches Blattwasserpotential (Ψ) in MPa unter verschiedenen Bodenmanagementvarianten an vier Standorten (HUMO, MECKEN, DEIDES, BRETZ) in den Jahren 2022 bis 2024 zu den Entwicklungsstadien BBCH 63 bis 65 (Beginn der Blüte bis Vollblüte), BBCH 75 bis 77 (Erbsengröße bis Beginn Traubenschluss), BBCH 81 (Beginn der Reife) und BBCH 89 (Vollreife); dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$) bzw. Dunn-Test (Bonferroni) nach Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) für BRETZ zum BBCH 81 in 2024; Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; NA = Not Available (ohne Ergebnis).

HUMO: In der Fläche Hundertmorgen Nord zeigten alle Varianten zum ersten Messzeitpunkt zu BBCH 81 in 2022 Blattwasserpotentiale zwischen -0,47 und -0,70 MPa. Es wurden keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Im zweiten Jahr 2023 im BBCH-Stadium 63 bis 65 war das Wasserpotential in der mechanischen (-0,25 MPa) und chemischen Variante (-0,25 MPa) höher als in Begr_MixM (-0,37 MPa). Die übrigen Varianten lagen mit Werten zwischen -0,28 und -0,34 MPa im mittleren Bereich. Zum BBCH 75 bis 77 gab es keine Unterschiede zwischen den Varianten (-0,43 bis 0,58 MPa). Dagegen war während BBCH 81 die Kontrolle (-0,17 MPa) deutlich höher als Begr_MixR (-0,29 MPa). Alle übrigen Werte lagen zwischen -0,20 und -0,26 MPa und unterschieden sich nicht davon. Zum letzten Messtermin 2023 zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Varianten (-0,52 bis -0,61 MPa). Zum ersten Messtermin in 2024 (BBCH 63 bis 65) zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Varianten: Die chemische Variante wies mit -0,15 MPa ein höheres Blattwasserpotential als Begr_Thym mit -0,22 MPa auf. Die übrigen Varianten erreichten Werte von -0,16 bis -0,21 und lagen damit im mittleren Bereich. Zum BBCH-Stadium 75 bis 77 waren keine Unterschiede zwischen den Varianten festzustellen. Alle Werte bewegten sich in einem Bereich zwischen -0,19 MPa und -0,23 MPa. Auch zum BBCH 81 wurden keine Unterschiede festgestellt. Die mittleren Blattwasserpotentiale lagen zwischen -0,21 MPa und -0,26 MPa. Zum letzten Messzeitpunkt (BBCH 89) waren die Werte der chemischen Variante (-0,19 MPa) deutlich höher als die von der mechanischen Variante (-0,27 MPa) und von Begr_MixR (-0,33 MPa). Begr_MixR unterschied sich zudem deutlich von den beiden Begrünungsvarianten Begr_Fes (-0,22 MPa) und Begr_Thym (-0,23 MPa).

MECKEN: In der Versuchsfläche Meckenheimer Str. wurden zum ersten Messzeitpunkt 2022 (BBCH 81) vergleichbare Blattwasserpotentiale unter den Varianten erfasst (-0,48 bis -0,61 MPa). Im Jahr 2023 zeigten sich zu BBCH 63 bis 65 wie die chemische Variante mit -0,25 MPa das höchste Blattwasserpotential und unterschied sich von Begr_MixR (-0,33 MPa) und der Kontrolle (-0,33 MPa). Die mechanische Variante (-0,28 MPa) und Begr_Fes (-0,28 MPa) lagen im mittleren Bereich. Im BBCH-Stadium 75 bis 77 war das Blattwasserpotential der chemischen Variante (-0,51 MPa) und der Variante Begr_Fes (-0,52 MPa) höher als das der Kontrolle (-0,73 MPa). Die mechanische Variante und Begr_MixR waren mit Werten von -0,55 MPa und -0,59 MPa vergleichbar zu den Varianten. Zu BBCH 81 lagen alle gemessenen Blattwasserpotentiale eng beieinander (-0,22 bis -0,24 MPa) und es wurden keine Unterschiede festgestellt. Der nächste Messtermin war zum BBCH 63 bis 65 im Jahr 2024. Hier wurden unter den Varianten vergleichbare Blattwasserpotentiale zwischen -0,21 und -0,27 MPa erfasst. Auch zu BBCH 81, dem letzten Messtermin, konnten keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden (-0,25 und -0,34 MPa).

DEIDES: In der Fläche in Deidesheim wurden an allen drei Messzeitpunkten im Jahr 2023 keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt: Zu BBCH 63 bis 65 lagen die Blattwasserpotentiale zwischen -0,41 und -0,50 MPa, zu BBCH 81 zwischen -0,16 MPa und -0,25 MPa und zu BBCH 89 zwischen -0,49 und -0,54 MPa auf. Im Jahr 2024 wurde weder zu BBCH 63 bis 65 (-0,33 MPa bis -0,47 MPa), noch zu BBCH 75 bis 77 (-0,30 bis -0,38 MPa) und BBCH 81 (-0,33 bis -0,38 MPa) Unterschiede festgestellt. Erst zum spätesten Termin (BBCH 89) zeigten sich Unterschiede: Die Varianten Begr_Thym (-0,39 MPa) und Begr_Fes (-0,40 MPa) wiesen deutlich höhere Blattwasserpotentiale als Begr_MixR (-0,62 MPa) auf. Die übrigen Varianten lagen mit -0,43 bis -0,50 MPa im mittleren Bereich.

BRETZ: In der Versuchsfläche in Bretzfeld gab es zu allen gemessenen Zeitpunkten keine Unterschiede zwischen den Varianten. Die Werte lagen in 2023 zu BBCH 63 bis 65 bei -0,36 und -0,47 MPa und zu BBCH 81 bei -0,16 bis -0,20 MPa. In 2024 wurden aufgrund des geringen Deckungsgrades der anderen Varianten nur Messwerte in der Kontrolle und Begr_Fes erfasst, die zu beiden Messzeitpunkten vergleichbare Werte lieferten: -0,19 und -0,20 MPa zu BBCH 63 bis 65 sowie -0,48 und -0,40 zu BBCH 81.

4.2.3.2 Traubenqualität und -quantität

Abbildung 48 auf Seite 91 zeigt die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit PERMANOVA zur Untersuchung der Effekte verschiedener Bodenmanagementvarianten auf Parameter für die Traubenqualität und -quantität in den Jahren 2023 und 2024 in der Fläche HUMO. Dabei wurden die Begrünungsvarianten herangezogen, die gemäß Kapitel 4.2.1.1 einen Deckungsgrad der Einsaat von mindestens 30 % aufwiesen (2023: Begr_Fes und Begr_MixR, 2024: Begr_Fes, Begr_MixR und Begr_Thym). Die (Gesamt-)Bodendeckung wurde als Mittelwert der Boniturtermine im Mai, Juli und September des jeweiligen Jahres berechnet und in die Analyse einbezogen. Die Parameter zur Traubenqualität und -quantität (Lockerbarkeit, *Botrytis cinerea*-Befallshäufigkeit und -befallsstärke, Mostgewicht, Gesamtsäure, Stockertrag und Einzelbeerengewicht) wurden zur Lese bzw. unmittelbar davor erhoben.

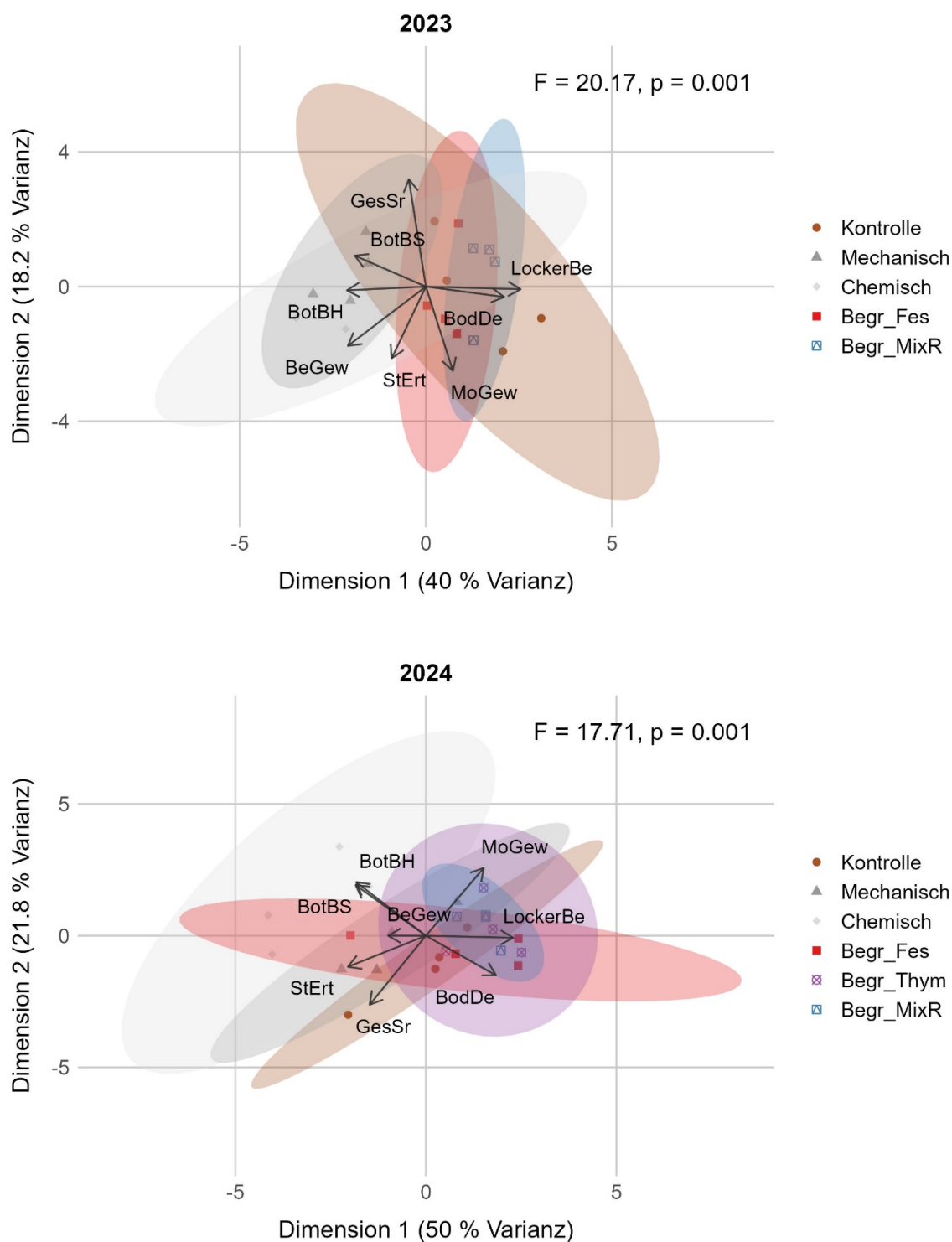


Abbildung 48: Biplots der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit PERMANOVA-Ergebnissen für die Jahre 2023 (oben) und 2024 (unten) der Versuchsfläche HUMO, die die Effekte verschiedener Bodenmanagementvarianten auf verschiedene Rebenparameter darstellen. Die Ellipsen zeigen die 95 %-Konfidenzintervalle der jeweiligen Varianten ($n = 4$). Die Pfeile markieren die Variablen, die zur Trennung der Varianten beitragen, darunter BodDe = (Gesamt-)Bodendeckung (%), LockerBe = Lockerbeerigkeit (°), BotBH = *Botrytis cinerea* Befallshäufigkeit (%), BotBS = *Botrytis cinerea* Befallsstärke (%), MoGew = Mostgewicht (°Oe), GesSr = Gesamtsäure (g/l), StErt = Stockertrag (kg), BeGew = Einzelbeerengewicht (g); die PERMANOVA-Ergebnisse (F- und p-Werte) sind oben rechts dargestellt; Begrünungsvarianten mit mind. 30 % Deckung: Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum* (ab 2024), Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“.

Im Jahr 2023 zeigten sich deutliche Unterschiede in den bodenanalytischen Parametern in Abhängigkeit des Unterstockbodenmanagements. Die durchgeführte Redundanzanalyse (RDA) erklärt mit den beiden ersten Achsen 58,2 % der Gesamtvarianz (40 % durch Dimension 1 und 18,2 % durch Dimension 2) und verdeutlicht eine signifikante Trennung der Varianten (PERMANOVA: $F = 20,17$, $p = 0,001$). Insbesondere die Begrünungsvarianten (Begr_Fes und Begr_MixR) weisen eine klare Distanz zur unbehandelten Kontrolle auf. Die Begrünungsvarianten sind dabei vor allem mit einer höheren Gesamt-Bodendeckung, einer geringeren *Botrytis cinerea*-Befallshäufigkeit und einer höheren Lockerbeerigkeit assoziiert, wie die Ausrichtung der Umweltvektoren (BodDe, LockerBe und BotBH) andeutet. Die Kontrolle nimmt im Diagramm eine Zwischenstellung ein und liegt näher bei den Begrünungen als bei der chemischen oder mechanischen Variante. Die mechanische Variante orientiert sich verstärkt im negativen Bereich der Dimension 1 und ist damit positiv assoziiert mit *Botrytis cinerea* Befallshäufigkeit und Befallsstärke.

Die Redundanzanalyse des Jahres 2024 verdeutlicht einen stärkeren Einfluss der gemessenen Umweltparameter auf die Differenzierung der Varianten. Die beiden ersten Hauptachsen, Dimension 1 und Dimension 2, erklären gemeinsam 71,8 % der Gesamtvarianz der erhobenen Daten (50 % + 21,8 %). Der F-Wert ($F = 17,71$) sowie der zugehörige p-Wert ($p = 0,001$) belegen eine signifikante Differenz zwischen den untersuchten Bodenmanagementvarianten im Hinblick auf die einbezogenen Parameter.

Dimension 1 trennt die Varianten vorrangig anhand von Merkmalen wie Bodendeckung (BodDe), Lockerbeerigkeit (LockerBe) und dem Beerengewicht (BeGew). Varianten mit hohen Ausprägungen der Bodendeckung und Lockerbeerigkeit sind Begr_Thym und Begr_MixR, sie liegen im positiven Bereich dieser Achse. Auch Begr_Fes liegt in diesem Bereich, wenngleich mit etwas größerer Distanz zu den Hauptstrukturparametern, was auf gute, aber leicht abgeschwächte Leistungen im Vergleich zur Mischung hindeutet.

Dimension 2 hingegen steht in enger Beziehung zu Variablen wie *Botrytis cinerea* Befallshäufigkeit (BotBH) und Befallsstärke (BotBS) sowie dem Gesamtsäuregehalt des Mostes (GesSr). Auch hier werden Varianten mit hohen Ausprägungen dieser Merkmale entlang der Achse positioniert.

Die mechanisch bearbeitete Variante und die Kontrolle liegen zwischen der chemischen Variante und den Begrünungsvarianten, tendieren jedoch ebenfalls ins negative Spektrum von Dimension 1. Die chemisch behandelte Variante befindet sich nahe der Kontrollgruppe und

zeigt ebenfalls geringe Werte bei Begrünung und Strukturparametern, während die *Botrytis*-Variablen deutlich ausgeprägt sind.

Die folgende Tabelle 15 zeigt die Mittelwerte und die Anova-Ergebnisse der einzelnen Parameter für die Traubenqualität und -quantität.

Tabelle 15: Ergebnisse der Gesamt-Bodendeckung sowie der Parameter der Traubenqualität und -quantität der einzelnen Bodenmanagementvarianten in den Jahren 2022 bis 2024 der Versuchsfläche HUMO; dargestellt sind Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ($n = 4$); unterschiedliche Buchstaben: HSD-Test nach ANOVA ($p < 0,05$).

	(Gesamt-)Bodendeckung (%)			Biegegrad (°) für Lockerbeerigkeit		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Ktrl	71,4 $\pm$ 6,6 ab	96,0 $\pm$ 2,4 a	94,4 $\pm$ 4,5 a	9,0 $\pm$ 1,1 b	101,9 $\pm$ 10,1 a	19,8 $\pm$ 6,2 ab
Mech	29,1 $\pm$ 2,3 c	51,1 $\pm$ 9,1 c	64,7 $\pm$ 8,0 b	19,7 $\pm$ 4,7 a	55,8 $\pm$ 2,4 c	20,8 $\pm$ 4,0 ab
Chem	NA	77,6 $\pm$ 8,1 b	40,0 $\pm$ 4,7 c	NA	54,6 $\pm$ 10,2 c	11,9 $\pm$ 2,2 b
Begr _Med	78,3 $\pm$ 2,5 ab	96,7 $\pm$ 1,9 a	NA	16,3 $\pm$ 4,1 ab	71,5 $\pm$ 13,4 bc	NA
Begr _Fes	79,2 $\pm$ 3,5 a	99,3 $\pm$ 0,6 a	98,7 $\pm$ 0,0 a	16,2 $\pm$ 2,2 ab	81,5 $\pm$ 11,1 ab	26,5 $\pm$ 9,3 a
Begr _Thym	68,8 $\pm$ 7,0 b	96,4 $\pm$ 3,0 a	97,6 $\pm$ 0,4 a	NA	86,9 $\pm$ 13,3 ab	31,4 $\pm$ 1,7 a
Begr _MixR	75,6 $\pm$ 3,1 ab	96,8 $\pm$ 2,0 a	98,3 $\pm$ 1,9 a	21,2 $\pm$ 6,8 a	88,5 $\pm$ 8,5 ab	28,3 $\pm$ 4,7 a
Begr _MixM	76,1 $\pm$ 0,8 ab	91,9 $\pm$ 3,1 a	NA	21,1 $\pm$ 6,6 a	78,5 $\pm$ 7,6 ab	NA
	<i>Botrytis cinerea</i> Befallshäufigkeit (%)			<i>Botrytis cinerea</i> Befallsstärke (%)		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
Ktrl	64,4 $\pm$ 7,7 a	48,2 $\pm$ 7,5 a	59,0 $\pm$ 5,3 b	5,0 $\pm$ 0,8 a	2,5 $\pm$ 1,3 a	6,1 $\pm$ 0,9 b
Mech	43,7 $\pm$ 20,7 ab	59,1 $\pm$ 4,0 a	63,8 $\pm$ 0,5 ab	1,9 $\pm$ 0,8 a	3,4 $\pm$ 1,1 a	8,4 $\pm$ 1,4 ab
Chem	NA	63,0 $\pm$ 13,8 a	81,0 $\pm$ 6,2 a	NA	2,4 $\pm$ 1,1 a	14,4 $\pm$ 3,5 a
Begr _Med	37,3 $\pm$ 11,8 ab	47,3 $\pm$ 10,4 a	NA	2,7 $\pm$ 0,9 a	1,8 $\pm$ 0,6 a	NA
Begr _Fes	30,9 $\pm$ 13,3 b	59,8 $\pm$ 2,8 a	55,0 $\pm$ 12,5 b	1,9 $\pm$ 1,6 a	2,0 $\pm$ 0,3 a	7,6 $\pm$ 4,8 b
Begr _Thym	NA	47,9 $\pm$ 7,0 a	59,0 $\pm$ 17,3 b	NA	2,0 $\pm$ 0,8 a	7,7 $\pm$ 0,8 b

Begr_MixR	37,5±16,3	ab	47,2±5,0	a	60,5±6,8	ab	2,2±1,4	a	1,6±0,5	a	7,3±2,3	b
Begr_MixM	38,8±15,3	ab	54,5±7,0	a	NA		1,8±1,0	a	2,1±0,4	a	NA	

	Mostgewicht (°Oe)						Gesamtsäure im Most (g/l)					
	2022		2023		2024		2022		2023		2024	
Ktrl	83,8±3,7	a	89,1±2,6	a	76,9±6,0	a	9,5±0,6	a	8,7±0,4	a	12,8±1,0	a
Mech	83,1±2,6	a	87,8±2,6	a	77,6±5,2	a	9,4±0,6	a	8,8±0,3	a	12,7±0,8	a
Chem	NA		87,4±1,3	a	77,5±5,7	a	NA		8,7±0,3	a	12,3±1,1	a
Begr_Med	83,5±6,3	a	89,3±1,1	a	NA		9,5±0,7	a	8,7±0,3	a	NA	
Begr_Fes	82,2±5,1	a	88,9±1,6	a	79,4±0,9	a	9,7±0,3	a	8,7±0,5	a	12,4±0,9	a
Begr_Thym	NA		89,9±2,0	a	80,5±3,5	a	NA		8,7±0,2	a	11,9±0,5	a
Begr_MixR	84,4±2,9	a	87,9±0,7	a	81,7±1,8	a	9,2±0,2	a	8,8±0,3	a	11,6±0,5	a
Begr_MixM	84,9±2,5	a	90,2±1,0	a	NA		9,1±0,4	a	8,6±0,2	a	NA	

	Stockertrag (kg)						Einzelbeerengewicht (g)					
	2022		2023		2024		2022		2023		2024	
Ktrl	2,6±0,2	a	1,7±0,3	a	4,1±0,4	ab	1,5±0,1	a	1,1±0,1	a	1,7±0,1	a
Mech	2,9±0,2	a	1,6±0,1	a	4,1±0,5	ab	1,5±0,1	a	1,2±0,1	a	1,7±0,1	a
Chem	NA		1,9±0,3	a	4,4±0,5	a	NA		1,2±0,1	a	1,7±0,1	a
Begr_Med	2,8±0,4	a	1,6±0,4	a	NA		1,5±0,1	a	1,1±0,2	a	NA	
Begr_Fes	2,9±0,2	a	1,7±0,2	a	3,8±0,1	ab	1,5±0,1	a	1,1±0,1	a	1,7±0,2	a
Begr_Thym	NA		1,5±0,3	a	3,4±0,4	b	NA		1,1±0,1	a	1,7±0,1	a
Begr_MixR	2,7±0,6	a	1,5±0,5	a	3,7±0,2	ab	1,4±0,1	a	1,1±0,1	a	1,7±0,1	a
Begr_MixM	2,5±0,3	a	1,4±0,2	a	NA		1,5±0,1	a	1,1±0,1	a	NA	

Im Hinblick auf die gesamte Bodenbedeckung zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Bodenmanagementvarianten in allen Jahren. Die Kontrolle und die Begrünungsvarianten wiesen durchweg die höchsten Werte auf, während die mechanische und chemische Variante deutlich geringere Deckungsgrade erreichten. Die Kontrolle steigerte ihre Bodenbedeckung von 71 % im Jahr 2022 auf über 94 % in den Folgejahren. Besonders Begr_Fes zeigte mit nahezu vollständiger Bedeckung in allen Jahren konstant hohe Werte und unterschied sich signifikant von der mechanischen Variante. Diese wies 2022 mit rund 29 % die geringste Bedeckung auf und blieb auch in den Folgejahren mit etwa 51 % (2023) und 65 % (2024) deutlich unterhalb der Kontrolle und der Begrünungsvarianten. Die chemische Variante erreichte 2023 mit rund 78 % mittlere Werte und wies 2024 mit 40 % die geringste Bodenbedeckung aller Varianten auf.

Die Biegegrade als Indikator für die Lockerbeerigkeit unterschieden sich signifikant zwischen den Varianten. Im Jahr 2022 zeigten die mechanische Variante, Begr_MixR und Begr_MixM (20° bis 21°) signifikant höhere Biegegrade als die Kontrolle (9°). Im Jahr 2023 erreichte die Kontrolle mit 102° den höchsten mittleren Biegegrad und lag gemeinsam mit Begr_MixR (89°), Begr_Thym (82°), Begr_MixM (79°) und Begr_Fes (72°) signifikant über den Werten der mechanischen Variante (56°) und der chemischen Variante (55°). Im Jahr 2024 wiesen Begr_Fes (31°), Begr_MixR (28°) und Begr_Thym (27°) signifikant höhere Biegegrade auf als die chemische Variante (12°), während die mechanische Variante (21°) auf mittlerem Niveau lag.

Bei *Botrytis cinerea* traten in einzelnen Jahren signifikante Unterschiede zwischen den Varianten auf. 2022 war die Befallshäufigkeit in der Kontrolle mit rund 64 % signifikant höher als bei Begr_MixR (38 %) und Begr_Fes (31 %), die die geringsten Befallsraten aufwiesen. Auch 2024 zeigten sich deutliche Unterschiede: Die chemische Variante erreichte mit etwa 81 % die höchste Befallshäufigkeit und lag damit signifikant über der Kontrolle und den Begrünungsvarianten Begr_Fes, Begr_Thym und Begr_MixR (55 bis 60 %). Entsprechend war auch die Befallsstärke 2024 bei der chemischen Variante mit rund 14 % signifikant höher als bei den übrigen Varianten, die Werte zwischen 6 und 8 % aufwiesen.

Für das Mostgewicht und die Gesamtsäure traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten auf.

Ein signifikanter Unterschied wurde 2024 beim Stockertrag festgestellt: Begr_Thym erzielte mit rund 3,4 kg je Rebstock einen signifikant geringeren Ertrag als die chemische Variante (4,4 kg).

Das Einzelbeerengewicht blieb über alle Varianten und Jahre hinweg konstant und unterschied sich nicht signifikant.

5 Diskussion

5.1 Bewertung der Begrünungspflanzen als Maßnahme zur Beikrautregulierung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden drei unterschiedliche Begrünungsvarianten auf ihre Eignung als Unterstockbegrünung im Weinbau geprüft: *Medicago lupulina* (Gelbklee), *Festuca rubra* (Rot-Schwingel) und *Thymus serpyllum* (Sand-Thymian). Zusätzlich wurden die Mischungen „Rebzeilenbegrünung“ und „Mythopia 3“ sowie *Prunella vulgaris* (Kleine Braunelle) und *Trifolium repens* (Weißklee) in die Freilandversuche aufgenommen. Die Bewertung der Begrünungspflanzen erfolgte auf Grundlage agronomischer, ökologischer und praxisbezogener Anforderungen für die Etablierung im Bereich unter den Rebstöcken. Die entsprechenden Bewertungskriterien wurden bereits in Kapitel 3.1.1 definiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche unter kontrollierten Klimabedingungen sowie der Freilandversuche in den Ertragsanlagen HUMO und MECKEN in Neustadt/Wstr. (Pfalz) und in den Junganlagen DEIDES in Deidesheim (Pfalz) und BRETZ in Bretzfeld (Württemberg) diskutiert. Dabei erfolgt eine Einordnung der getesteten Begrünungspflanzen anhand der zuvor festgelegten Kriterien.

5.1.1 Etablierung auf Weinbau-Standorten

Weinbergsflächen werden gezielt für den Anbau von Reben ausgewählt und durch Pflanzenschutz-, Bodenpflege- und Düngemaßnahmen optimiert. Als ideale Voraussetzungen für den Weinbau in gemäßigten Klimazonen gelten mindestens 1.300 Sonnenstunden pro Jahr, eine durchschnittliche Tagestemperatur von mindestens 15 °C zur Zeit der Rebblüte und 18 °C während der Vegetationsperiode sowie Jahresniederschläge von mindestens 400 bis 500 mm (Deutsches Weininstitut 2024). Ebenso entscheidend ist die Nährstoffverfügbarkeit und Bodenbeschaffenheit: Ein pH-Wert zwischen 5,8 und 7,2 bietet optimale Bedingungen für die Nährstoffverfügbarkeit und gilt auch für die Rebe als bevorzugter Bereich (MÜLLER et al. 2019). Diese für den Weinbau optimierten Standortbedingungen wirken sich nicht nur positiv auf das Wachstum der Reben aus, sondern beeinflussen ebenso die Entwicklung und Konkurrenzkraft von Begrünungspflanzen im Unterstockbereich, die unterschiedliche Anforderungen an die Temperatur, den pH-Wert, die Nährstoff- sowie die Wasserverfügbarkeit stellen (ELLENBERG 1991).

Dabei weisen die Weinbergsböden häufig erhöhte Gehalte an Makronährstoffen wie Stickstoff, Phosphat und Kalium auf. Insbesondere die hohen Kalium- und Phosphat-Gehalte resultieren aus mineralischen und organischen Düngemaßnahmen ab den 1970er Jahren, die sich an damals üblichen, heute nicht mehr gängigen Ertragshöhen orientierten. So berichtet ZIEGLER

(2011), dass ca. 80 % der pfälzischen Weinbergsböden eine Überversorgung mit Phosphat und etwa 75 % eine Überversorgung mit Kalium aufweisen. Diese Befunde bestätigen sich auch in den vorliegenden Untersuchungen, da alle Freilandstandorte insgesamt hohe Gehalte an Phosphat, Kalium und Magnesium zeigten. Eine Ausnahme stellte die Versuchsfläche BRETZ (Württemberg) dar, die geringe Magnesium-Gehalte in der Versorgungsstufe B aufwies (Einstufung nach Nährstoffklassen aus FDW-Arbeitskreis Bodenkunde & Pflanzenernährung Weinbau 2018 zur Einschätzung des Düngedarfs der Reben). Auch die in den Klimakammerversuchen eingesetzten Substrate waren durchweg mit Phosphat Überversorgt und wiesen geringe bis moderate Stickstoff- und Humusgehalte auf.

HANSEN et al. (2023) konnten zeigen, dass Leguminosen im Vergleich zu Nicht-Leguminosen unter Bedingungen niedriger Bodenfruchtbarkeit einen höheren relativen Biomasseanteil aufwiesen als bei mittlerer Fruchtbarkeit, da sie durch Symbiose mit Rhizobien, die atmosphärischen Stickstoff fixieren können, weniger von der Bodenstickstoffverfügbarkeit abhängig sind. Diese Beobachtungen decken sich nur teilweise mit den Ergebnissen dieser Studie: So zeigte *Medicago lupulina* in der Klimakammer auf allen Substraten, darunter auch auf sandigem Boden mit geringem Stickstoff- und Humusgehalt, ein ähnlich gutes Wachstum und somit eine gewisse Substratunabhängigkeit unter kontrollierten Bedingungen. Auch im Freiland konnte auf allen Bodenarten von schwachlehmigem Sand bis tonigem Lehm eine vergleichbare Etablierung erzielt werden. Dies deutet auf eine gewisse Unabhängigkeit von der Nährstoffverfügbarkeit sowie der Bodenart hin, auch wenn laut Literatur *M. lupulina* eine Präferenz für feinkörnige, schlecht drainierte Böden mit geringem Humusgehalt aufweist (BOND et al. 2007) und Lehm Böden als optimal für die Entwicklung gelten (SPOHN et al. 2015). Trotzdem wird die Art insgesamt als anspruchslos und anpassungsfähig charakterisiert (BfN 2003). Einzig auf der Fläche MECKEN, mit lehmigem Sandboden, fand nahezu kein Wachstum statt. Im Vergleich zu den übrigen Versuchsstandorten liegt diese Fläche hinsichtlich Korngrößenverteilung und Nährstoffverfügbarkeit im mittleren Bereich. Eine mögliche Erklärung für das ausbleibende Wachstum liegt im Einsatz von Herbiziden vor der Einsaat, der in Kapitel 5.1.5 (Herbizid-Verträglichkeit) näher diskutiert wird. Zu berücksichtigen gilt zudem, dass die Stickstoff-Fixierung bei Leguminosen maßgeblich durch die Nährstoffverfügbarkeit und den pH-Wert des Bodens beeinflusst wird. Höhere Phosphat-Gehalte verbessern die Stickstoff-Fixierung deutlich, da sie das Wurzelwachstum und die Ausbildung zahlreicher Wurzelknöllchen (Rhizobien) fördern (SCHULZE et al. 2006). Ein niedriger Boden-pH wirkt sich hingegen negativ auf das Überleben und die Aktivität der Rhizobien aus, deren Optimum bei pH-Werten zwischen 6,0 und 7,5 liegt (MA et al. 2025). Damit bieten viele Weinbergsböden gute Bedingungen für die Rhizobien-Aktivität der Leguminosen. Schwefel gilt ebenfalls als wichtiger Faktor für die Effizienz der N₂-

Fixierung, da er an der Synthese relevanter Enzyme beteiligt ist (SCHERER 2008), wurde in den hier verwendeten Substraten jedoch nicht erfasst.

Auch *Festuca rubra* bewährte sich in den Versuchen als besonders robuste Art. Auf allen Substraten erreichte sie über die gesamte Versuchsdauer hinweg eine nahezu vollständige Bodenbedeckung. Selbst auf den Freilandflächen etablierte sich *F. rubra* zügig und bildete dichte, stabile Bestände. Lediglich im Sandboden verzögerte sich die Anfangsentwicklung, während auf tonigem Lehm gegen Ende des Versuches eine Wachstumsstagnation auftrat. Diese hohe Anpassungsfähigkeit wird in der Literatur ebenfalls bestätigt (LFL Bayern 2025; Ellenberg 1991). Obwohl einige Arten der Familie der Süßgräser einen höheren Stickstoff-Bedarf haben, stellt diese Art eher geringe Ansprüche an die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen sowie den pH-Wert des Bodens (ELLENBERG 1991). Bei besserem Nährstoffangebot kann es deshalb vorkommen, dass *F. rubra* von anderen Arten verdrängt wird (LFL Bayern 2025). Dieser Effekt konnte jedoch nicht festgestellt werden. Stattdessen war beispielsweise eine deutliche Unterdrückung der Mäusegerste und anderen Süßgräsern durch *F. rubra* zu beobachten. Auch BRAUN et al. (2020) und RYDGREN et al. (2016) betonen die gute Etablierbarkeit dieser Art, die vor allem in der Toleranz gegenüber Trockenheit, Frost, Nährstoffverfügbarkeit und dem Salzgehalt des Bodens begründet liegt.

Thymus serpyllum zeigte ein uneinheitliches Bild: In den Freilandversuchen konnte auf tonigem Lehm Boden in Württemberg sowie auf lehmigem Sandboden in MECKEN nahezu keine Bedeckung festgestellt werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit Literaturangaben, wonach *T. serpyllum* eine geringe Toleranz gegenüber verdichteten übermäßig feuchten und kalkreichen Böden aufweist (North Carolina State University 2025). Beide Standorte wiesen pH-Werte von mindestens 7,4 auf. Obwohl *T. serpyllum* natürlicherweise auf nährstoffarmen, kalkarmen Sandtrockenrasen vorkommt (BfN 2003; Ellenberg 1991), wuchs die Art in der Klimakammer auf tonigem Lehm aus Württemberg dennoch am besten. Diese Diskrepanz deutet darauf hin, dass der pH-Wert allein nicht ausreichend ist, um die Etablierung zu erklären. Die Ursache kann das durch Sieben veränderte Bodengefüge sein. Aggregatgrößen unter 5 mm fördern in der Regel eine Etablierung deutlich, da der Bodenschluss besser ist und Wasser sowie Nährstoffe besser vom Keimling aufgenommen werden kann (Usowicz et al. 2013). So zeigt sich eine insgesamt gute Etablierung bei allen in der Klimakammer getesteten Begrünungspflanzen über alle Substrate. Aus Erfahrungen von Böschungseinsaaten im Erd- und Verkehrswegebau nach BLOEMER & DIEKHOF (2013) lässt sich ableiten, dass nicht nur das Bodengefüge, sondern auch die Lichtverfügbarkeit, Feuchte und Temperatur für die Keimung und Entwicklung von

Begrünungseinsaaten eine entscheidende Rolle spielen. Diese Einflussfaktoren werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Im Vergleich der Mischungen untereinander erwies sich die kräuterreiche Begrünungsmischung „Rebzeilenbegrünung“ als besonders etablierungsstark. Auf allen untersuchten Flächen entstand eine stabile Bodenbedeckung über den gesamten Versuchszeitraum, wobei die Artenzusammensetzung je nach Standort variierte. *Plantago lanceolata*, *Leucanthemum vulgare* und *Papaver rhoeas* dominierten beispielsweise in MECKEN, während *Anthemis tinctoria* vor allem in HUMO und *Achillea millefolium* in DEIDES häufiger auftraten. Diese Ergebnisse bestätigen die Einschätzung von MCKENZIE-GOPSILL et al. (2022) und ELHAKEEM et al. (2021), dass Begrünungsmischungen durch ihre Artenvielfalt insgesamt eine zuverlässigere Etablierung und Beikrautunterdrückung erreichen als Reinsaaten. Wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen, sind Begrünungsmischungen häufig so konzipiert, dass einzelne Arten mit sehr unterschiedlichen Standortbedingungen zurechtkommen. Auf diese Weise entsteht eine langfristige Bodenbedeckung, deren Artzusammensetzung sich nicht nur zwischen den Flächen, sondern auch zwischen den Jahren und Jahreszeiten unterscheiden kann.

CHAPAGAIN et al. (2020) betonen, dass bei der Konzipierung von Begrünungsmischungen vor allem die funktionale Komplementarität entscheidend ist. Dazu zählen Faktoren, wie der Hauptzweck der Begrünung, die Eignung zum Anbausystem, die ober- und unterirdische Verträglichkeit der Arten, die funktionale Ergänzung verschiedener Funktionen für das Ökosystem, die Standorttauglichkeit, die Wachstumsdauer, Kosten und Arbeitsaufwand sowie die Neigung zur Persistenz und Beikrautregulierung.

Im Vergleich zur „Rebzeilenbegrünung“ zeigte die kleedominante Mischung „Mythopia 3“, bestehend aus 16 Pflanzenarten, ein deutlich eingeschränkteres Artenspektrum: Hauptsächlich entwickelten sich *Trifolium repens* und *Medicago lupulina*. *Lotus corniculatus* war als dritte Hauptkomponente vertreten, konnte sich jedoch nur in sehr geringem Maße etablieren. Der Gewichtsanteil der enthaltenen Kräuter-Arten lag in Summe bei 1 % und damit deutlich unter dem der „Rebzeilenbegrünung“. Die Mischungskomponenten zeigten somit keinen erkennbaren Mehrwert im Hinblick auf die Etablierung. Trotzdem konnten sich *Trifolium repens* und *Medicago lupulina* insbesondere zu Beginn in HUMO und DEIDES etablieren, während in MECKEN kaum Aufwuchs beobachtet wurde. *Trifolium repens* ist eine geeignete Begrünungspflanze für Standorte mit guter Wasserversorgung und humusreichen Lehm- bis Tonböden (NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY 2025), deren spontanes Wachstum bereits in großer Anzahl auf ähnlichen Flächen der Junganlage BRETZ beobachtet wurde. Auch die Einsaat dieser Art

als Reinsaat auf der Fläche BRETZ führte wie zu erwarten zu einer zügigen, aber nicht dauerhaften, Etablierung - ähnlich wie es bei *Medicago lupulina* beobachtet wurde. Die kurze Etablierung der Klee-Arten ist weniger auf den Standort als vielmehr auf deren Biologie zurückzuführen. Innerhalb der Gattung *M. lupulina* können sowohl einjährige als auch zweijährige und mehrjährige Wuchsformen vorkommen (MALYSHEVA et al. 2022). *M. lupulina* ist in der Regel einjährig, kann jedoch durch reichliche Samenproduktion und ausgeprägte Hartschaligkeit der Körner, die eine gestaffelte Keimung über mehrere Jahre ermöglicht, mehrjährige Bestände aufrechterhalten (CLARK 2008). Voraussetzung dafür ist, dass die Konkurrenz durch andere Pflanzen nicht zu stark ist und die Bedingungen für die Keimung geeignet sind.

Prunella vulgaris gilt als mehrjähriger Lippenblütler mit dem Potential eines Bodendeckers und wächst auch auf schwereren Böden (WISTRÖM et al. 2018). Obwohl in der Versuchsfläche BRETZ die laut Literatur optimale Bodenart gegeben war, konnte sich *P. vulgaris* aus unbekannten Gründen nicht etablieren.

Insgesamt zeigt sich, dass eine erfolgreiche Etablierung von Begrünungspflanzen im Unterstockbereich stark von artspezifischen Ansprüchen, Bodeneigenschaften und managementbedingten Faktoren abhängt. Artenreiche Mischungen oder standorttolerante Einzelarten scheinen für eine Unterstockbegrünung am erfolgversprechendsten zu sein.

Gerade vor dem Hintergrund der hohen Nährstoffverfügbarkeit vieler Weinbergsböden und der neutralen bis alkalischen pH-Werte scheinen Begrünungen mit geringen Nährstoffansprüchen und hoher Konkurrenzkraft das höchste Potential zu besitzen.

5.1.2 Verträglichkeit gegenüber Vollsonne und Halbschatten

Je nach Alter der Rebstöcke, Erziehungssystem, Reihenorientierung, Hangneigung und Reihenabstand wird der Unterstockbereich durch die Laubwand der Rebe unterschiedlich stark beschattet. In einem vertikal ausgerichteten Laubwandsystem gelangen im Tagesverlauf etwa 60 bis 80 % des verfügbaren Tageslichts auf die Bodenoberfläche unter den Rebstöcken (GLADSTONE & DOKOOZLIAN 2003). Zur Mittagszeit liegt die direkte Einstrahlung lediglich bei 2,5 bis 9 % der vollen Sonnenstrahlung (HUNTER et al. 2020; SHRESTHA & FIDELIBUS 2005). Da in Nord-Süd ausgerichteten Rebanlagen - entspricht der Mehrzahl der Flächen in deutschen Weinbaugebieten - der Lichteinfall vor allem am Vor- und Nachmittag erfolgt, ist dennoch von einer ausreichenden Lichtverfügbarkeit für das Wachstum der Pflanzen im Unterstockbereich auszugehen (SHRESTHA & FIDELIBUS 2005). Unter den getesteten Pflanzen benötigen *Thymus serpyllum* sowie einige Kräuter der Mischung „Rebzeilenbegrünung“, wie *Plantago lanceolata*, *Anthemis tinctoria*, *Leucanthemum vulgare* und *Sanguisorba minor*, besonders viel Licht und gedeihen am besten bei voller Sonneneinstrahlung (mindestens sechs Stunden täglich). Die

Klee-Arten *Medicago lupulina* und *Trifolium repens* tolerieren auch halbschattige Bedingungen (zwei bis sechs Stunden Sonne pro Tag), während *Festuca rubra* als besonders lichttolerant gilt und sowohl in voller Sonne als auch im Schatten wächst (NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY 2025).

Die Ergebnisse einer Studie von MAURO et al. (2014) zeigen, dass eine reduzierte Lichtverfügbarkeit (50 %) die Etablierung und Konkurrenzkraft von Leguminosen im Unterstockbereich von Obstbauanlagen deutlich beeinträchtigen kann. Trotz einer verlängerten Wachstumsdauer und erhöhter Pflanzenhöhe führten Beschattungseffekte zu geringerer Bodenbedeckung und Biomasse, was die Beikrautunterdrückung schwächte.

In den Freilandversuchen zeigten die Begrünungspflanzen jedoch keine sichtbaren Einschränkungen durch die zeitweise Beschattung im Unterstockbereich. Die Bodendeckung der Begrünungspflanzen nahm während der Vegetationsperiode der Rebe, in der sich auch das Beschattungspotential durch das Laubwandwachstum erhöht, kontinuierlich zu. Rückgänge in der Bodenbedeckung wurden lediglich in der Phase ausgeprägter Sommertrockenheit (insbesondere im Juni 2023) beobachtet und sind daher eher auf Trockenstress infolge reduzierter Bodenfeuchte als auf Lichtmangel zurückzuführen (siehe Abbildung 28 bzw. Anhang 8 mit detaillierter Verlaufsdarstellung).

5.1.3 Trockenheitsverträglichkeit

In mediterranen Regionen können Begrünungen aufgrund der langen Trockenzeit, besonders bei Frühjahrsansaat, unter Wassermangel leiden, wodurch ihre Etablierung und Bodenbedeckung beeinträchtigt werden (NOVARA et al. 2020). Da auch viele Weinbergstandorte in Deutschland in den letzten Jahren zunehmend von längeren Trockenperioden und Wasserknappheit betroffen sind (SCHULTZ & HOFMANN 2008), ist die Trockentoleranz von Pflanzen ein entscheidender Faktor für ihre Eignung als dauerhafte Begrünungspflanzen im Weinbau.

Die Ergebnisse des Klimakammerversuchs mit unterschiedlichen Bewässerungsmengen sowie die Beobachtungen der Freilandversuche erlauben eine differenzierte Bewertung der Trockentoleranz der Begrünungsvarianten.

Die Versuche verdeutlichen, dass sich die untersuchten Arten in ihrer Trockenheitsanpassung deutlich unterscheiden. *Medicago lupulina* zeigte sowohl in der Klimakammer als auch im Freiland deutliche Anfälligkeiten gegenüber Trockenheit und konnte sich auch nach wiedereintretenden Niederschlägen nicht mehr erholen. Dieses Verhalten bestätigt die in der Literatur beschriebene Strategie der Art, die Biomasseproduktion und Samenbildung hauptsächlich in die

feuchteren Herbst- und Frühjahrsmonate zu verlagern (PARDINI et al. 2002). Unter Trockenstress tritt entsprechend eine deutliche Reduktion der Biomasse auf (KOMAINDA et al. 2019). Stirbt die Pflanze während der Blüte- bzw. Samenreifephase ab, können keine Samen gebildet werden, wodurch der Fortbestand der Art verhindert wird. Demgegenüber konnte *Festuca rubra* durch ihre regenerativen Eigenschaften und unterirdischen Organe Trockenperioden besser überstehen und sich nach Trockenheit rasch erholen, wodurch ihre Eignung für Standorte mit wechselnder Wasserverfügbarkeit bestätigt wird (TALEB et al. 2023). Zudem ist diese Art in der Lage, durch das Einrollen ihrer Blattspreiten bei Bedarf die Transpiration zu verringern (HOWARTH 1920). *Thymus serpyllum* erwies sich insgesamt als die stabilste Art unter Trockenstress. Diese Anpassung ist durch die geringe Blattoberfläche und den niedrigen Wasserverbrauch erklärbar (DADACH et al. 2015; MORADI et al. 2014). Damit wird deutlich, dass diese Art für trockene und sandige Weinbaustandorte besonders geeignet erscheint.

5.1.4 Winterhärte

Eine mehrjährige Etablierung einer Unterstockbegrünung setzt den Einsatz von frostharten Pflanzenarten voraus. Die niedrigste Temperatur, die im Rahmen des Freilandversuchs in Neustadt an der Weinstraße gemessen wurde, betrug - 13 °C (AGARMETEOROLOGIE RLP 2025). Trotz dieser Kälte zeigten die meisten Begrünungsvarianten nach einer Herbstesaat im Folgejahr ein sicheres Auflaufen und die Deckungsgrade nahmen über den Winter hinweg nicht ab. Die in dieser Studie getesteten Arten gelten gemäß den USDA-Winterhärtezonen bis unter - 28 °C als winterfest und sind damit für alle mitteleuropäischen Weinbauregionen gut geeignet (NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY 2025). Diese Frosthärte ist darauf zurückzuführen, dass die Arten den Winter beispielsweise durch unterirdische Rhizome oder in Samenform im Boden überdauern (PARDINI et al. 2002; ROGNLI 1988). Zwar können oberirdische Blätter bei Minustemperaturen absterben, doch im Frühjahr erfolgt i. d. R. der Wiederaustrieb aus bodennahen Knoten. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass manche Arten, wie *Thymus serpyllum*, empfindlich auf Winternässe reagieren (PIGOTT 1955). Staunässe kann zu Wurzelfäule und damit zur Unterbrechung der Wasseraufnahme führen, woraus eine potentielle Gefahr für die Überwinterung resultiert.

5.1.5 Herbizid-Verträglichkeit

In vielen konventionellen Weinbaubetrieben werden im Unterstockbereich regelmäßig Herbizide, insbesondere Glyphosat, zur Beikrautregulierung eingesetzt (SCHULTE et al. 2016). Dabei können nach bis zu 21 Monaten im Boden noch Rückstände von Glyphosat und insbesondere seines Abbauprodukts Aminomethylphosphonsäure (AMPA) nachgewiesen werden (SIMONSEN

et al. 2008). Da häufig eingesetzte Herbizide, wie Glyphosat und Flazasulfuron, nicht selektiv wirken, können Rückstände dieser Wirkstoffe die Keimung sowie das Jugendwachstum empfindlicher Arten beeinträchtigen (SOARES et al. 2023). Dies stellt insbesondere dann ein Problem dar, wenn die Einsaat der Begrünungspflanzen im Herbst erfolgt und in den Wochen zuvor noch Herbizide appliziert wurden. Deshalb ist ein wesentliches Kriterium für die Praxistauglichkeit von Begrünungspflanzen im Unterstockbereich ihre Fähigkeit, sich auch unter Herbizid-belasteten Bedingungen keimen und etablieren zu können.

Im Freilandversuch zeigte sich ein auffälliger Unterschied im Auflaufen und der Etablierung der Begrünungsvarianten *Medicago lupulina*, *Thymus serpyllum* und der Mischung „Mythopia 3“ zwischen den benachbarten Versuchsflächen MECKEN und HUMO. Während in MECKEN das Wachstum dieser Varianten nahezu vollständig ausblieb, entwickelten sich dieselben Arten in der Fläche HUMO, bei identischem Einsaatzeitpunkt und gleicher Saatbettbereitung, sichtbar und etablierten sich zumindest in Teilen der Parzellen. Eine mögliche Erklärung für diesen Unterschied liegt in der Vorbewirtschaftung: In MECKEN wurde in den Jahren zuvor und zuletzt ca. acht Wochen vor der Einsaat eine Herbizid-Applikation durchgeführt, während in HUMO ausschließlich mechanisch gearbeitet wurde. Ursache für das Ausbleiben bestimmter Arten könnte beispielsweise eine gestörte Keimung aufgrund von Herbizid-Rückständen (KANISSERY et al. 2019) oder eine veränderte Bodenstruktur (ROMANO-ARMADA et al. 2017) und damit ein unzureichender Bodenschluss des Saatgutes sein.

Aufgrund dieser Beobachtungen im Freiland wurde ein Gewächshaus-Versuch zum Keimverhalten der Begrünungspflanzen *Medicago lupulina*, *Festuca rubra* und *Thymus serpyllum* angelegt. Hier konnte gezeigt werden, dass Herbizide mit den Wirkstoffen Glyphosat und Flazasulfuron das Keimverhalten aller getesteten Begrünungspflanzen negativ beeinflussten. Dabei zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Herbizid-Konzentration und der Reduktion der Keimlänge. Diese Ergebnisse stimmen mit früheren Untersuchungen überein, die ebenfalls einen linearen Effekt von Herbizid-Konzentrationen auf Keimung und frühe Pflanzenentwicklung beschreiben (MONDAL et al. 2017). Glyphosat beeinträchtigte das Keimverhalten aller Begrünungspflanzen bereits bei der geringsten Konzentrationsstufe. Besonders *Festuca rubra* reagierte sehr empfindlich. Auch wenn auf der Fläche MECKEN im Freilandversuch Wachstumseinschränkungen bei manchen Arten, nicht aber bei *F. rubra*, festgestellt wurden, gibt es eine erhöhte Empfindlichkeit von Süßgräsern gegenüber Glyphosat (NORDMEYER 2016). Dies deutet darauf hin, dass bereits geringe Mengen an Glyphosat-Rückständen im Oberboden die Keimung und das frühe Wachstum empfindlicher Arten stark beeinträchtigen können. Auch Flazasulfuron beeinträchtigte die Keimlänge von *Festuca rubra* am stärksten. Im

Gegensatz dazu zeigten sich *Medicago lupulina* und *Thymus serpyllum* etwas robuster, reagierten aber bei höheren Konzentrationen auch mit einer Reduktion der Keimlänge.

Für die Praxis bedeutet dies, dass neben der Pflanzenart auch standortbezogene Faktoren eine wesentliche Rolle spielen. Studien zeigen, dass Bodenart und pH-Wert sowie die mikrobielle Aktivität den Abbau und damit die Wirksamkeit von Herbiziden beeinflussen können (ARAÚJO et al. 2003; MALKOMES 2006). Ebenso wirken sich Nährstoff- und Wasserversorgung sowie Witterungsbedingungen, wie Niederschlag und Temperatur auf den Abbau, die Bindung oder die Mobilisierung der Wirkstoffe im Boden aus (ALEXA et al. 2009). Dies erschwert eine verlässliche Abschätzung der tatsächlichen Wirkstoffkonzentration im Boden und damit potentielle Auswirkung auf das Keimverhalten der Begrünungspflanzen. Zwar konnte im Klimakammer-Versuch nachgewiesen werden, dass Herbizide in weinbautypischer Konzentration sowie in weiteren Verdünnungen einen deutlichen Einfluss auf das Keimverhalten der Begrünungspflanzen haben. Jedoch konnte nicht abschließend geklärt werden, ob das beobachtete Ausbleiben der Keimung in der Fläche MECKEN auf Herbizid-Rückstände, eine veränderte Bodenstruktur oder andere Standortfaktoren zurückzuführen war.

5.1.6 Keimfähigkeit bei Licht und niedrigeren Temperaturen

Die Lichtverfügbarkeit und Bodentemperatur sind zentrale Einflussfaktoren für die erfolgreiche Keimung von Begrünungspflanzen (STOLLE 2007). Leguminosen wie *Medicago lupulina* und *Trifolium repens* zeigen eine gute Keimung sowohl bei Dunkelheit (= Dunkelkeimer) als auch bei Licht (=Lichtkeimer) (VAN ASSCHE et al. 2003). Für Vertreter der Klee-Arten wird generell eine flache Einarbeitung des Saatguts empfohlen, um eine gleichmäßige Keimung zu fördern (PARTZSCH 2010). Auch monokotyledone Arten (Gräser) sind lichtneutral (MAGYAR et al. 2004). Im Falle von *Festuca rubra* wurden bessere Keimergebnisse bei Dunkelheit festgestellt (SZABÓ-SZÖLLÖSI et al. 2024). Bei Lichtkeimern stellt der Umweltfaktor Licht mit die wichtigste Einflussgröße für die Keimung dar (MAGYAR et al. 2004). Einige der geprüften Kräuter-Arten sind Lichtkeimer: *Thymus serpyllum* (PARTZSCH 2016) sowie *Achillea millefolium*, *Plantago lanceolata* (MAGYAR et al. 2004) und *Prunella vulgaris*. Deshalb sollten diese Arten bei einer Einsaat nicht bzw. maximal 1 cm tief in den Boden eingearbeitet werden.

Für die Unterstockbegrünung sind Lichtkeimer bzw. Arten, die bei oberflächlicher Ausbringung und ohne Einarbeitung keimen können, besonders vorteilhaft. Dies ist unter weinbaulichen Bedingungen wichtig, da der Unterstockbereich durch Reben und Drahtrahmen nur eingeschränkt mechanisch bearbeitbar ist, insbesondere was den Einsatz schwerer Geräte, wie Wal-

zen zum Andrücken des Saatgutes, betrifft. Die getesteten Arten zeigten eine zuverlässige Keimung bei oberflächlicher Ausbringung, sodass eine Rückverdichtung nicht erforderlich war. Dies unterstreicht ihre gute Eignung für die Einsaat unter den Stöcken in bestehende Rebflächen.

Neben dem verfügbaren Licht spielt auch die Bodentemperatur eine entscheidende Rolle für die Etablierung der Unterstockbegrünung, da sie insbesondere bei einer herbstlichen Einsaat die Keimung und frühe Entwicklung der Pflanzen maßgeblich bestimmt (LARDSCHNEIDER 2004). Die Einsaat einer Unterstockbegrünung sollte durch den reduzierten Beikrautdruck im September oder Oktober erfolgen. Zu dieser Jahreszeit können die Tages- aber insbesondere die Nachttemperaturen weit unter 10 °C sinken (DWD 2025). Daher ist die Keimfähigkeit der Pflanzenarten unter niedrigen Bodentemperaturen ein zentrales Kriterium und ein weiterer Schlüsselfaktor für ihre Praxistauglichkeit. *Medicago lupulina* stellt zwar keine spezifischen Anforderungen an die Bodentemperatur, jedoch wurde beobachtet, dass eine Überwinterung des Saatgutes die Keimung erschweren kann (PARTZSCH 2010). Genaue Bodentemperaturen wurden in der Studie zwar nicht genannt, trotzdem sollte dies bei der Frage des Einsaattermins (Kapitel 5.3) berücksichtigt werden. Die optimale Keimtemperatur von *Festuca rubra* beträgt 15 °C (SZABÓ-SZÖLLÖSI et al. 2024; VIVANCO et al. 2021), während *Thymus serpyllum* und *Prunella vulgaris* ab etwa 15 bis 20 °C keimen (DADACH et al. 2015; PARTZSCH 2016).

Beim Klimakammerversuch zeigte *Festuca rubra* im Vergleich zu *Thymus serpyllum* bei einer durchschnittlichen Lufttemperatur von 19 °C ein tendenziell langsames Wachstum. Dieser Unterschied lässt sich durch die in der Literatur angegebenen optimalen Temperaturbereiche der jeweiligen Arten erklären (DADACH et al. 2015; PARTZSCH 2016; SZABÓ-SZÖLLÖSI et al. 2024; VIVANCO et al. 2021). Im Freiland zeigten im Herbst eingesäte Arten wie die Klee-Arten *Medicago lupulina* und *Trifolium repens*, die Kräuter-Arten *Anthemis tinctoria*, *Plantago lanceolata* und *Achillea millefolium* sowie die Grasart *Festuca rubra* bereits über die Winter- und Frühjahrsmonate einen sichtbaren Keimungsprozess. Dokumentiert wurde dies zum ersten Boniturzeitpunkt im Mai 2022 in der Fläche HUMO bzw. im Mai 2023 in der Fläche DEIDES. Das Wachstum der Kräuter war zu diesem Zeitpunkt jedoch sehr gering und nahm bis zum Juli des Jahres deutlich zu. *Thymus serpyllum* zeigte im Gegensatz zum Klimakammerversuch ein insgesamt verzögertes Wachstum.

Im Herbst herrschen in weinbaulichen Regionen wie Neustadt an der Weinstraße in der Pfalz (Flächen HUMO und MECKEN) häufig noch günstige Keimungs- und Aufwuchsbedingungen: Die durchschnittliche Tagesmitteltemperatur liegt dort im September bei etwa 16 °C und im Oktober bei 11 °C, bei vergleichsweise hohen Niederschlagsmengen von

60 bis 70 mm im September und 50 bis 60 mm im Oktober (Fünf-Jahres-Mittel, Agrarmeteorologie RLP 2025). Beim Vergleich der gemessenen Temperaturwerte mit den oben genannten optimalen Keimtemperaturen der getesteten Arten, ergeben sich in Kombination mit ausreichender Bodenfeuchte gute Voraussetzungen für eine zügige Keimung der Begrünungspflanzen vor dem Winter.

Insgesamt zeigten die getesteten Arten eine zuverlässige Keimung bei oberflächlicher Ausbringung, sodass ein Anwalzen nicht erforderlich war. Dies unterstreicht ihre gute Praxistauglichkeit für die Einsaat in bestehende Rebflächen. Angesichts der Bedeutung der Bodentemperatur stellt sich jedoch die Frage nach dem optimalen Einsaatzeitpunkt sowie einer geeigneten Saatbettbereitung für eine erfolgreiche Etablierung. Diese Aspekte werden in Kapitel 5.3 im Hinblick auf die Perspektiven für die Weinbauliche Praxis näher erläutert.

5.1.7 Schnelle und dauerhafte Bodenbedeckung

Eine schnelle und gleichzeitig dauerhafte Bodenbedeckung der Unterstockbegrünung ist essenziell für die Weinbauliche Praxis, insbesondere zur Erosionsvermeidung, Reduzierung der Nährstoffauswaschung und Beikrautunterdrückung. Zum einen erspart eine zügige Bodenbedeckung und damit Beikrautregulierung die Notwendigkeit, im ersten Jahr nach der Einsaat nachzuarbeiten und unerwünschte Beikräuter entfernen zu müssen. Zum anderen wird durch eine Etablierung über mehrere Jahre eine erneute Einsaat überflüssig und trägt somit zur Wirtschaftlichkeit der Maßnahme bei (SCHEIDWEILER et al. 2017).

In den Klimakammer-Versuchen zeigten sich bei allen getesteten Arten (*Medicago lupulina*, *Festuca rubra* und *Thymus serpyllum*) eine kontinuierlich steigende Bedeckung der Bodenoberfläche. Unabhängig von der Bodenart wurden nach maximal 56 Tagen 90 % Deckung erreicht. Die Tatsache, dass über die gesamte Versuchsdauer für die Pflanzen Optimalbedingungen bezüglich Bodenfeuchte und Bodentemperatur herrschten (vgl. Kapitel 5.1.6) und das Vierfache der empfohlenen Saatgut-Menge verwendet wurde, lässt nur bedingt einen Bezug zur praktischen Anwendung zu.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass für eine schnelle Anfangsdeckung zwar auch kurzlebige Arten wie *Medicago lupulina* und *Trifolium repens* geeignet sind, eine dauerhafte Bodenbedeckung jedoch vor allem durch persistentere Arten wie *Festuca rubra* oder durch Saatgut-Mischungen, wie „Rebzeilenbegrünung“, gewährleistet wird. Studien, die Klee-Arten wie *Trifolium repens* als Unterstockbegrünung positiv bewertet haben, berücksichtigten häufig nicht die Dauer der Etablierung bzw. führten jährliche Neueinsaaten durch (CAPRI et al. 2023; KARL et al. 2016a). *Festuca rubra* und „Rebzeilenbegrünung“ erreichten über die Jahre und Flächen

stabile Werte von ca. 80 % Deckung. *Festuca rubra* konnte über drei Vegetationsperioden hinweg eine stabile Bodenbedeckung halten. Eine dauerhafte Etablierfähigkeit von *F. rubra* wurde auch von ABAD et al. (2021b) bestätigt. *F. rubra* wird aufgrund seiner Fähigkeit, dichte Rhizome zu bilden und damit schnell Lücken in der Grasnarbe zu schließen, häufig für Rasenflächen eingesetzt (BfN 2003). Die Mischung „Rebzeilenbegrünung“ profitiert von einzelnen Arten, die eine rasche Bodenbedeckung ermöglichen - wie *Papaver rhoeas* (Klatschmohn), *Plantago lanceolata* (Spitzwegerich) und *Anthemis tinctoria* (Färberkamille). Im Laufe der Jahre wachsen weitere Arten, wie *Linum perenne* (Ausdauernder Lein), *Leucanthemum ircutianum* (Fettwiesen-Margerite) und *Origanum vulgare* (Oregano), die nicht nur eine dauerhafte dichte Bodenbedeckung über mehrere Jahre ausbilden, sondern auch zu einer erhöhten Biodiversität beitragen (MCKENZIE-GOPSILL et al. 2022). Diese Ergebnisse unterstreichen das Potential von Begrünungsmischungen.

Thymus serpyllum entwickelte sich insgesamt langsam, zeigte jedoch über die Jahre eine konstante Zunahme, sodass im dritten Versuchsjahr 2024 in HUMO bzw. im zweiten Versuchsjahr 2024 in DEIDES über 50 % Deckung erreicht wurde. Das zeigt, dass sich die Art trotz anfänglich schwacher Etablierung langfristig erfolgreich durchsetzen kann und somit das Potential für eine dauerhafte Begrünung hat.

5.1.8 Beikrautregulierende Wirkung

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass Begrünungspflanzen im Unterstockbereich eine beikrautregulierende Wirkung entfalten, die mit mechanischen und chemischen Bodenmanagementverfahren vergleichbar ist. Auch andere Studien bestätigen die Eignung einer Unterstockbegrünung als nachhaltige Methode zur Beikrautregulierung (ABAD et al. 2020; JORDAN et al. 2016; KARL et al. 2016a). Dabei gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Arten der Begrünungspflanzen. Zu den Pflanzenarten, die bereits im ersten Jahr eine gute Wirksamkeit erzielten, zählen *Medicago lupulina*, *Trifolium repens*, *Festuca rubra* und die Mischung „Rebzeilenbegrünung“. Wie die Regressionsanalysen zeigen, hängt ihre Wirkung vorwiegend davon ab, wie gut sich die Pflanzen etablieren und den verfügbaren Raum besetzen. Eine zügige Anfangsentwicklung erhöht das Konkurrenzpotential gegenüber Beikräutern deutlich, da Pflanzen mit schneller Keimung und frühem Lichtabfang bereits in der Anfangsphase einen entscheidenden Ressourcenvorteil erlangen (KRUIDHOF et al. 2008). Dabei betonten MACLAREN et al. (2019), dass weder die Artenvielfalt noch die funktionelle Diversität der Begrünung die Ressourcennutzung oder die Beikrautunterdrückung so stark beeinflussen wie die Biomassebildung. Leguminosen

werden aufgrund ihrer raschen Entwicklung, der Freisetzung allelopathischer Substanzen sowie der Förderung mikrobieller Stoffwechselaktivität eine besonders wirksame Beikrautregulierung zugesprochen (FISK et al. 2001). Auch ABAD et al. (2020) bestätigten die Eignung von Leguminosen zur Beikrautregulierung im Unterstockbereich von Reben. Ihre Wirkung ist jedoch zeitlich begrenzt und die hohe Biomasseproduktion kann zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch führen (vgl. Kapitel 5.1.9). Die Ergebnisse dieser Studie zeigten spätestens im dritten Jahr keine Wirksamkeit gegenüber Beikräutern bei den getesteten Leguminosen. Feine Süßgräser wie *F. rubra* erzielten aufgrund ihrer dichten und dauerhaften Narbenbildung eine starke Unterdrückung von Beikräutern (BREUILLIN-SESSOMS et al. 2021). Hier erwies sich die Beikrautregulierung über drei Jahre hinweg als am zuverlässigsten und war zeitweise wirksamer als die mechanische oder chemische Unterstockbearbeitung. Dass auch Kräuter-Arten, die eine deutliche Biomasse produzieren bzw. den Boden bedecken, Beikräuter effektiv verdrängen können, wurde auch von MCKENZIE-GOPSILL et al. (2022) bestätigt. Auffallend ist der Verlauf von *Thymus serpyllum*: Obwohl sich die Art zunächst langsamer etablierte, verbesserte sich ihre Beikrautunterdrückung in den Folgejahren deutlich, wodurch die Bedeutung einer langfristigen Persistenz bestätigt wird. Werden Begrünungspflanzen durch Fröste im Winter oder Trockenheit im Sommer abgetötet, können bereits unterdrückte Beikräuter erneut austreiben und zudem neue Beikräuter keimen, da Sonnenlicht die Bodenoberfläche erreicht (BRUST et al. 2014). Daher sollten Begrünungsarten ein langfristiges und kontinuierliches Wachstum aufweisen, um konkurrenzstark gegenüber Beikräutern zu bleiben.

Ob Begrünungspflanzen als Mischung, Einzelart, ein- oder zweikeimblättrige Art eingesetzt werden, ist für die Auswahl geeigneter Arten zur Unterstockbegrünung aus verschiedenen Gesichtspunkten relevant. Für die Beikrautunterdrückung ist jedoch weniger die Zusammensetzung entscheidend, sondern vielmehr eine hohe Biomasseproduktion und die langanhaltende Persistenz der Pflanzen (OSIPITAN et al. 2019).

5.1.9 Geringer Wasser- und Nährstoffbedarf

Die Wasserverfügbarkeit im Unterstockbereich spielt eine zentrale Rolle für die Entwicklung der Rebe, da sich hier der Großteil der Wurzeln befindet (LINARES TORRES et al. 2018). Dies ist insbesondere in niederschlagsarmen Jahren und auf durchlässigen Böden von hoher Relevanz. Die untersuchten Begrünungspflanzen unterscheiden sich in ihrer Intensität der Wasseraufnahme sowie ihrer Transpirationsrate, welche sich auf den Bodenfeuchtegehalt auswirken.

Der Anzuchtversuch in der Klimakammer zeigte eine deutliche Reduzierung der Bodenfeuchte durch *Medicago lupulina*. Diese konzentriert sich auf die Keimungs- und Blühphase. Insgesamt

zeigt diese Art aber einen kurzen Lebenszyklus und einen relativ geringen Jahreswasserbedarf (PARDINI et al. 2002). Die Transpirationsrate von $12,1 \text{ mm d}^{-1}$ ist im Vergleich zu anderen Leguminosen als gering einzustufen (CAPRI et al. 2023). Im Vergleich zu *Festuca rubra* und *Thymus serpyllum* konnten bei *M. lupulina* eine stärkere Biomasseentwicklung sowie, anhand der reduzierten Infiltrationsmenge, eine deutliche Wasserausnutzung beobachtet werden. *F. rubra* wurde in früheren Forschungen als wenig wasserzehrend beschrieben. Hierbei wurde die Art mit Ackerkratzdistel (*Cirsium arvense*), Weg-Malve (*Malva neglecta*) und Gewöhnlichem Löwenzahn (*Taraxacum officinale*) verglichen (LOPES et al. 2004). Im Vergleich zu *M. lupulina* war die volumetrische Bodenfeuchtigkeit vergleichbar und die Sickerwassermenge höher, woraus sich einen etwas geringeren Wasserverbrauch von *F. rubra* ableiten lässt. Die Variante mit *T. serpyllum* wies zunächst eine höhere Bodenfeuchte als die übrigen Begrünungsvarianten auf, wobei sich die Werte zum Ende des Versuchszeitraums den anderen Varianten annäherten. Grundsätzlich handelt es sich bei dieser Art um einen Xerophyten, der im Vergleich zu anderen Thymian-Arten eine besonders ausgeprägte Trockentoleranz aufweist (DADACH et al. 2015; MORADI et al. 2014). In den Freilandversuchen dieser Studie zeigten die Begrünungsvarianten keinen negativen Effekt auf die Bodenfeuchte. Im Fall von *T. serpyllum* und der chemischen Variante war die Bodenfeuchte in 6 cm Tiefe sogar höher als bei der mechanischen Bearbeitung mit der Scheibe. Die Effekte der Bodenbearbeitung und Begrünung im Hinblick auf Verdunstung, Beschattung und Wasserverfügbarkeit werden in Kapitel 5.2 näher erläutert.

Da die oberirdischen Trockenmassen der getesteten Varianten im Klimakammerversuch nahezu identisch waren (maximale Abweichung 0,2 g), können die gemessenen Gehalte der untersuchten Inhaltsstoffe der oberirdischen Trockenmasse als Indikator für Unterschiede in der Nährstoffaufnahme zwischen den Arten herangezogen werden. Der Stickstoff-Gehalt war in der Variante mit *Medicago lupulina* am höchsten. Diese Beobachtung lässt sich durch die Fähigkeit zur biologischen Stickstoff-Fixierung durch Symbiose mit Rhizobien erklären (vgl. ZEHNER & GÖTTFERT 2015). Somit leisten sie einen aktiven Beitrag zur Stickstoff-Anreicherung im Boden und können langfristig zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit beitragen (ABAD et al. 2021a). Auch bei Calcium und Magnesium wurden unter *M. lupulina* deutlich höhere Gehalte gemessen als in den anderen Varianten. Im Bereich der Mikronährstoffe zeigten sich signifikante Unterschiede bei Kupfer und Bor: Während *M. lupulina* geringere Kupfer-Gehalte aufwies, war der Bor-Gehalt in dieser Variante signifikant erhöht. Da Leguminosen über arbuskuläre Mykorrhizapilze effizient Phosphor, Bor und Calcium aufnehmen (BONILLA & BOLANOS 2009), können sie hier stärker mit Reben konkurrieren. Im Gegensatz zu Leguminosen wirken Gräserarten wie *F. rubra* als sogenannte Stickstoff-Zehrer (SCHANDERL 1943). Sie entziehen dem

Boden durch ihre hohe ober- und unterirdische Biomassebildung große Mengen an Nitrat-Stickstoff, wodurch der Gesamtstickstoff-Gehalt im Boden im Vergleich zu unbedeckten oder mit Leguminosen begrünter Flächen deutlich sinken kann. Diese Wirkung beruht auf dem ausgeprägten Nährstoffaufnahmevermögen der Gräser, insbesondere im oberflächennahen Wurzelraum (ABAD et al. 2021a). *T. serpyllum* wies hingegen signifikant niedrigere Stickstoff- und Phosphor-Gehalte auf, woraus sich ein schwaches Konkurrenzverhalten hinsichtlich dieser für die Rebe wichtigen Nährstoffe ableiten lässt. Trotzdem profitiert diese Art von höheren Nährstoffgehalten, wie sie in Weinbauflächen häufig vorkommen (ZIEGLER 2011) und kann unter solchen Bedingungen eine erhöhte Biomasse produzieren (PAL et al. 2016).

Bei der Interpretation der Nährstoff-Gehalte ist zu berücksichtigen, dass sich die oberirdische Biomasse im Versuch nicht signifikant unterschied. Dadurch sind die gemessenen Gehalts-Werte zwischen den Varianten unmittelbar vergleichbar und erlauben eine direkte Einschätzung der artspezifischen Unterschiede in der Nährstoffaufnahme. Bei stark unterschiedlichen Erträgen wäre hingegen auch von abweichenden Nährstoff-Gehalten auszugehen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Analysen lediglich die Gesamtkonzentrationen der Nährstoffe in der oberirdischen Biomasse der Pflanzen widerspiegeln. Aussagen über die tatsächliche Konkurrenz zur Rebe erfordern jedoch auch Kenntnisse über die Nährstoffverfügbarkeit im Boden, die in dieser Untersuchung nicht erfasst wurde. Für eine umfassende Bewertung, inwieweit die ausgewählten Pflanzenarten als Unterstockbegrünung eine Konkurrenz zur Rebe in Bezug auf Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit darstellen, müssen weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Dazu zählen nach DITTRICH et al. (2025) unter anderem Effekte auf die Bodenstruktur sowie die Aktivität und Diversität der Bodenorganismen, die wiederum Nährstoffmobilisierung und Bodenfruchtbarkeit beeinflussen. Darüber hinaus spielt der zeitliche Verlauf des Ressourcenverbrauchs eine zentrale Rolle, da er sich mit der Entwicklungsphase der Begrünungspflanzen verändert, während der Wasser- und Nährstoffbedarf der Rebe während der Vegetationsperiode ebenfalls stark variiert (MÜLLER et al. 2019).

5.1.10 Niedrige Wuchshöhe

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Unterstockbegrünung ist, dass die Pflanzen nicht in die Traubenzone einwachsen und so das Mikroklima und damit die Traubenqualität negativ beeinflussen. Die Wuchshöhe blieb bei allen Arten im Klimakammer-Versuch gering: *Festuca rubra* erreichte maximal 30 bis 40 cm, *Medicago lupulina* etwa 20 bis 30 cm und *Thymus serpyllum* blieb dauerhaft unter 10 cm.

Die maximale Wuchshöhe der eingesetzten Begrünungspflanzen im Freiland variierte deutlich zwischen den untersuchten Arten. Arten wie *Festuca rubra* oder *Plantago lanceolata*, *Anthemis tinctoria* und *Leucanthemum vulgare*, die in der Mischung „Rebzeilenbegrünung“ enthalten sind, zeigten mittlere Wuchshöhen im Bereich von etwa 50 bis 80 cm. Jedoch wurden auch Maximalhöhen von ca. 100 cm (*F. rubra*) bzw. bis 130 cm („Rebzeilenbegrünung“) erreicht. Bei klassischen Spaliererziehungen kann die Traubenzone bereits bei 80 cm beginnen, wodurch eine negative Beeinflussung, z. B. durch die geringere Durchlüftung der Trauben nicht ausgeschlossen werden kann (Fox 2003). Trotz vereinzelter Einwachsens in die Traubenzone, konnte in dieser Arbeit jedoch kein negativer Effekt durch die Begrünungsvarianten auf die Traubengesundheit in Bezug auf die Befallsstärke und -häufigkeit von *Botrytis cinerea* festgestellt werden.

Deutlich niedrigere Wuchshöhen wurden für *Medicago lupulina*, *Thymus serpyllum* und *Trifolium repens* beobachtet. Hier betrug der Maximalwert etwa 45 cm (*M. lupulina*). *Thymus serpyllum* zeigte die geringsten Wuchshöhen im gesamten Versuch und stellt aufgrund seiner kriechenden und bodendeckenden Wuchsform eine in Hinblick auf die Wuchshöhe ideale Pflanze für die Unterstockbegrünung dar.

Die Literaturwerte von LAUBER et al. (2018), MÜLLER et al. (2021) und HRYTSYNA et al. (2022) unterscheiden sich von den in dieser Studie gemessenen Werten minimal und fallen tendenziell niedriger aus. Diese Ergebnisse könnten auf dem erhöhten Nährstoffangebot der Weinbergsstandorte basieren. Laut Literatur erreicht *Medicago lupulina* Wuchshöhen von 10 bis 30 cm (LAUBER et al. 2018), *Festuca rubra* 25 bis 80 cm (MÜLLER et al. 2021) und *Thymus serpyllum* maximal 10 cm (HRYTSYNA et al. 2022).

5.1.11 Geringe Wurzeltiefe

Für eine Unterstockbegrünung ist eine geringe Wurzeltiefe grundsätzlich vorteilhaft, da sie die Konkurrenz um tiefere Wasser- und Nährstoffvorräte, auf die eine langjährig tiefwurzelnde Kultur wie die Rebe zugreift, weitgehend vermeidet (CHOU & VANDEN HEUVEL 2018). Entscheidend ist daher, in welchem Bodensegment die Hauptwurzelausprägung und -aktivität der Begrünungspflanzen liegen. Allerdings kann ein flaches Wurzelsystem auch nachteilig sein: Begrünungspflanzen, die nur flach unter der Bodenoberfläche wurzeln, sind in Trockenperioden besonders anfällig für Wasserstress (VADEZ et al. 2008) und können dadurch absterben. Insofern erfordert die Auswahl geeigneter Arten einen Kompromiss zwischen geringer Konkurrenz zur Rebe und ausreichender Trockenheitsresistenz.

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass die getesteten Unterstockbegrünungen überwiegend flachwurzeln Strukturen aufwiesen. Besonders *Thymus serpyllum* und *Festuca rubra* konzentrierten ihre Wurzel ausprägung auf die obersten 20 cm, während *Medicago lupulina* zwar überwiegend im Oberboden wurzelte, aber vereinzelt auch tiefere Wurzeln entwickelte. Diese Wurzelverteilung ist im Hinblick auf die Konkurrenz zur Rebe günstig, da die Rebwurzeln vor allem aus tieferen Bodenschichten Wasser und Nährstoffe erschließen. Der Hauptwurzelbereich der Rebe liegt, je nach Standortbedingungen und Unterlagensorte zwischen 20 und 60 cm und reicht häufig deutlich tiefer (LANARI et al. 2025). Gleichzeitig bedeutet die Beschränkung auf oberflächennahe Bodenschichten, dass Begrünungspflanzen stärker von kurzfristiger Wasserverfügbarkeit abhängig sind und bei längeren Trockenphasen rasch unter Stress geraten können. Damit entsteht ein Spannungsfeld zwischen geringer Konkurrenz zur Rebe und potentiell geringerer Persistenz der Begrünung unter Trockenphasen. Die hohe Wurzelmasse im Oberboden, wie sie besonders bei *F. rubra* und in der Mischung „Rebzeilenbegrünung“ festgestellt wurde, lässt jedoch auch positive Nebeneffekte erwarten. Eine dichte Durchwurzelung des obersten Bodensegments kann zur Stabilisierung der Bodenstruktur, zur Verbesserung der Infiltration und zur Reduktion von Erosion beitragen (ABAD et al. 2021a). Im Vergleich dazu wies *T. serpyllum* im Oberboden zwar eine insgesamt geringere Wurzelmasse auf, jedoch einen hohen Anteil an Feinwurzeln. Diese sind besonders relevant, da sie bevorzugt Symbiosen mit Mykorrhizapilzen eingehen und dadurch die Nährstoffaufnahme verbessern können (AMELUNG et al. 2018).

In tieferen Bodenschichten (> 30 cm) war die Wurzelbiomasse der Begrünungspflanzen kaum noch nachweisbar und unterschied sich nicht mehr von den mechanischen und chemischen Vergleichsvarianten. Dies bestätigt, dass Unterstockbegrünungen überwiegend oberflächenorientiert wurzeln und den tieferen Wurzelraum der Rebe nicht nutzen. Unter weinbaulichen Gesichtspunkten ist dies vorteilhaft, da es die direkte Konkurrenz reduziert, verdeutlicht aber zugleich, dass der Beitrag zur Nutzung tieferer Wasser- oder Nährstoffreserven begrenzt bleibt. Dagegen zeigen vorausgegangene Studien von HEGI & GAMS (1964) sowie von BROWN et al. (2010), dass die untersuchten Begrünungspflanzen durchaus auch in tieferen Bodenschichten Wurzeln bilden können. *M. lupulina* (HEGI & GAMS 1964) und *F. rubra* (BROWN et al. 2010) bilden Wurzelsysteme aus, die bis zu 50 cm tief reichen können.

5.1.12 Saatgutverfügbarkeit

Für eine praxisnahe Umsetzung in Weinbaubetrieben ist bei der Auswahl geeigneter Pflanzen sowohl auf deren Verfügbarkeit im Landhandel als auch auf die Verwendung nichtinvasiver

Arten zu achten, da potentielle ökologische Schäden nicht auszuschließen sind. *Trifolium fragiferum* (Erdbeerklee) ist ein Beispiel für eine Art, die bereits aufgrund ihrer bodendeckenden, niedrigwachsenden Wuchsform und Langlebigkeit erfolgreich als Unterstockbegrünung in spanischen Rebflächen getestet wurde (ABAD et al. 2020). Das Saatgut dieser Art ist in Deutschland jedoch nicht erhältlich. Mögliche Gründe dafür können in fehlenden Sortenzulassungen und den Regelungen des Saatgutverkehrsgesetzes (HANKE & FLACHOWSKY 2017), der Marktrelevanz oder unpassenden Standortbedingungen liegen. Andere Arten, wie *Potentilla reptans* (Fünffingerkraut) oder *Festuca myuros* (Mäuseschwanz-Federschwingel), wurden in deutschen sowie österreichischen Rebflächen mit niedrigem und häufig flächendeckendem Wuchs beobachtet. Da es sich hierbei um natürlich vorkommende Beikräuter handelt, die in der Landwirtschaft keine gezielte Nutzung erfahren, ist entsprechendes Saatgut ebenfalls nicht verfügbar. Eine gezielte Etablierung über eine Einsaat mit diesen Arten ist daher derzeit nicht möglich. In einer österreichischen Pilotstudie von EITLE (2022) wurden zwar lokal selektierte Beikrautarten wie *Fragaria vesca* (Wald-Erdbeere) über eine Pflanzung im Unterstockbereich etabliert. Aufgrund der hier schwachen Entwicklung wurde dort jedoch für zukünftige Projekte der Einsatz von Einsaaten angestrebt.

Die in der vorliegenden Studie eingesetzten Arten waren alle über deutsche Landhändler während des gesamten Versuchszeitraumes verfügbar. Die Saatgutkosten für die Einsaat des Unterstockbereichs (50 cm Breite) einer Weinbergsfläche von einem Hektar variierten dabei jedoch stark. Während die Klee- und Gräserarten zwischen 41 und 66 €/ha kosten, liegt 2024/2025 die Mischung „Rebzeilenbegrünung“ bei 198 €/ha und *Thymus serpyllum* bei 875 €/ha. Für eine wirtschaftliche Bewertung sind neben den Saatgutkosten auch die Etablierungsdauer und damit das Einsparpotential durch den reduzierten Einsatz chemischer und mechanischer Unterstockmanagementverfahren zu berücksichtigen (Kostenrechnung siehe Anhang 7).

5.2 Eignung einer Unterstockbegrünung als mögliche Alternative zu chemischen und mechanischen Bodenmanagementverfahren

Die Ergebnisse zeigen, dass Begrünungspflanzen eine wirksame Beikrautregulierung bieten, die mit mechanischen und chemischen Bodenmanagementverfahren im Unterstockbereich vergleichbar ist. Die Wirkung der mechanischen Bodenbearbeitung auf die Beikrautunterdrückung variierte zwischen den Monaten und Jahren erheblich, da sie stark vom Zeitpunkt der Bodenbearbeitung beeinflusst wurde. Das Nachwachsen von Beikräutern in der mechanischen Variante war vor allem im Herbst ausgeprägt, wenn die Bodenbearbeitung frühzeitig

eingestellt wurde. Dies konnte beispielsweise im Herbst 2024 in der Fläche HUMO beobachtet werden. Eine mechanische Bodenbearbeitung kann neue Beikrautsamen an die Oberfläche bringen und die Stickstoff-Mineralisierung im Boden fördern, wodurch die Keimung und das Wachstum der Beikräuter begünstigt wird (GUERRA & STEENWERTH 2011). Der dadurch ausgelöste Nitrat-Schub kann sich dabei, je nach Bearbeitungszeitpunkt, negativ auf das vegetative Wachstum (z. B. mastiger Wuchs, schlechte Holzausreife), den Ertrag (z. B. dichtbeerige kompakte Trauben) und die Qualität (z. B. *Botrytis*-Befall) der Trauben auswirken (HELWI 2020). In der vorliegenden Studie konnte ein solcher Effekt jedoch nicht nachgewiesen werden.

Die chemische Behandlung führte zu einer konsistenten Beikrautregulierung über den kompletten Versuchszeitraum. Es gab jedoch eine Ausnahme: Im Juli 2023 in der Versuchsfläche HUMO wuchs die Ackerwinde (*Convolvulus arvensis*) weiter, während die meisten Pflanzen aufgrund von Trockenheit welkten. Dieser Beikrautart wird außerdem eine gewisse Resistenz gegenüber Glyphosat zugesprochen (HUANG et al. 2019). Im Allgemeinen können bestimmte Arten der Spontanflora ein Risiko für das Rebenwachstum in Hinblick auf den erhöhten Wasser- und Nährstoffverbrauch (SUSAJ et al. 2013; WALG 2016) oder der potentiellen Übertragung von Krankheitserregern (MAIXNER et al. 2013) darstellen. In der unbehandelten Kontrollvariante zeigte sich im ersten Versuchsjahr auf allen Flächen eine natürliche Vegetationsentwicklung mit Bodendeckungsgraden zwischen 38 und 64 %. Darunter befanden sich bereits potentiell kritische Beikräuter wie *Convolvulus arvensis* (Ackerwinde), die als Wirtspflanze der Winden-Glasflügelzikade, einem möglichen Überträger der Stolbur-Krankheit bei Reben, gilt (MAIXNER et al. 2013; STEINKELLNER 2019). Auch *Lactuca serriola* (Kompass-Lattich) und *Erigeron canadensis* (Kanadisches Berufkraut) traten früh auf. Beide Arten können durch ihr starkes Höhenwachstum bis in die Traubenzone einwachsen und dadurch das Risiko für einen Schädlings- und Pilzbefall der Trauben verstärken (FOX 2003; WALG 2016). Die Zusammensetzung der Arten und deren Deckungsgrade variierten dabei deutlich je nach Standort und Versuchsjahr. Über den Beobachtungszeitraum zeigte sich zudem eine zunehmende Dominanz von Süßgräsern. Dieses Phänomen lässt auf eine Verschiebung der Vegetation hin zu konkurrenzstarken Arten schließen. Diese Entwicklung kann insbesondere im Hinblick auf Wasser- und Nährstoffkonkurrenz zur Rebe problematisch sein (SUSAJ et al. 2013).

Trotz tendenziell geringerer Minimalwerte zeigte die Kontrollvariante hinsichtlich der Bodenfeuchte keine nachteiligen Effekte im Vergleich zu den anderen Bodenmanagementvarianten. Deutlicher war hingegen der Einfluss der mechanischen Bodenbearbeitung. Sie reduzierte die Bodenfeuchte in der obersten Bodenschicht (- 6 cm). Während dieser Effekt für die tieferlie-

genden Rebwurzeln vermutlich von geringer Bedeutung ist, könnte er die Aktivität der Bodenmikroorganismen sowie die Artenzusammensetzung des gesamten Bodenmikrobioms negativ beeinflussen (BOGATI & WALCZAK 2022). Weitere Studien zeigen, dass wiederholte mechanische Bearbeitung durch die Unterbrechung der Porenkontinuität und den Verlust organischer Substanz die Bodenfeuchte reduziert (STRUDLEY et al. 2008; MODIBA et al. 2024). Die höchsten Feuchtwerte wurden in der chemischen Variante gemessen, die sich jedoch statistisch nicht von den Begrünungsvarianten unterschied. Der erwartete Effekt einer geringeren Verdunstung infolge der Bodenbeschattung durch die Vegetation konnte somit nicht eindeutig bestätigt werden. Dies entspricht den Beobachtungen von HOREL et al. (2024), wonach Begrünungssysteme im Mittel keinen negativen Einfluss auf die Bodenfeuchte zeigen, da sich Wasserverbrauch und Wasserrückhalt gegenseitig kompensieren. Grundsätzlich hat ein bewachsener Boden das Potential, den Wasserhaushalt über das Jahr hinweg besser zu regulieren. Dies bedeutet, dass im Frühjahr, während der aktiven Wachstumsphase der Begrünungspflanzen, der Wasserverbrauch durch die photosynthesebedingte Transpiration höher ist. Das kann zu einer vorübergehend reduzierten Bodenfeuchte führen. Im Herbst profitiert ein bewachsener Boden durch die bodenbedeckungsspezifische Verringerung der Evaporation sowie durch die Wurzelsysteme von einer erhöhten Infiltrationsrate, wodurch Niederschläge effizienter aufgenommen werden können. In der Folge kann in tieferen Bodenschichten eine höhere Bodenfeuchte als in vegetationsfreien bearbeiteten Flächen gemessen werden (MARQUES et al. 2020). Diese Effekte auf die Bodenfeuchte konnten bei einer Messtiefe von 40 cm, in der der Hauptwurzelbereich der Rebe liegt (LANARI et al. 2025), jedoch nicht nachgewiesen werden.

Das Vorhandensein von Begrünungspflanzen trug wie in der Studie von ABAD et al. (2023) zu einer Verringerung der Bodentemperaturen bei. *Festuca rubra* wies im Vergleich zur chemischen Behandlung niedrigere durchschnittliche Bodentemperaturen sowie niedrigere Höchsttemperaturen auf. Dies zeigt, dass die Vegetationsdecke Schutz vor Sonneneinstrahlung bietet und so eine übermäßige Erwärmung des Bodens verhindert (BAVOUGIAN & READ 2018). Der Effekt zeigte sich in einem Jahr (2024) auch in der mechanischen Variante und der Kontrollvariante, wodurch die Vorteile der natürlichen Vegetation nochmals bestätigt wurden. Grundsätzlich zeigten die Begrünungsvarianten im Vergleich zur Kontrolle eine stabilere Vegetationsbedeckung auf und sorgten so für eine gleichmäßigere Bodenbedeckung im Laufe der Zeit. Diese Stabilität ist besonders vorteilhaft, da die Vegetationsbedeckung nicht nur dazu beiträgt, extreme Bodentemperaturen zu mildern, sondern auch die Bodenerosion verringert und die Wasserinfiltration verbessert (ABAD et al. 2023). Die im Versuch gemessenen Infiltrationsraten waren bei einer Bodenbedeckung mit *Thymus serpyllum* oder *Festuca rubra* etwa 4,7-fach höher als in der chemischen Variante. Dies stellt einen erheblichen Vorteil dar, insbesondere vor

dem Hintergrund zunehmend häufiger auftretender Starkregenereignisse. Eine Vegetationsbedeckung trägt zur Minderung der Bodenerosion bei, indem sie die Oberfläche physisch vor dem Aufprall von Regentropfen schützt und dadurch die Sprengung der Bodenkrümel mit anschließendem Abtrag von Feinsediment und oberflächlicher Verschlammung und Verdichtung verringert (STAHR et al. 2020; VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021).

Begrünungen können zur Reduktion der Nitrat-Verlagerung in tiefere Bodenschichten beitragen (NOURI et al. 2022; SULAS et al. 2017). Wie auch im vorliegenden Versuch nachgewiesen, zeigten die Messungen im Oberboden (0 bis 30 cm) im Mai 2023 und November 2024 in den Begrünungsvarianten sowie in der Kontrolle niedrigere Bodennitrat-Gehalte im Vergleich zur chemischen Variante. Diese Beobachtungen stimmen mit den Ergebnissen von BAUMGÄRTEL und OLFS (2014) überein, wonach Begrünungspflanzen überschüssigen Boden-Nitrat-Stickstoff aufnehmen und so eine Nitrat-Auswaschung erheblich reduzieren können, insbesondere in den niederschlagsreichen Herbst- und Wintermonaten, in denen keine Nährstoffaufnahme durch die Reben erfolgt. Der Nitrat-Rückhalt ist nicht nur aus pflanzenbaulicher Sicht von Bedeutung, sondern auch im Hinblick auf den Wasserschutz (MEERGANS et al. 2020; SERPA et al. 2017). Eine verstärkte Nitrat-Auswaschung in tiefere Bodenschichten kann zur Belastung des Grundwassers führen, ein in vielen Weinbaugebieten zunehmendes Problem, das sich regelmäßig in den Nitrat-Messnetzen der Länder widerspiegelt (BAUMGÄRTEL & OLFS 2014). Während besonders tiefwurzelnde Begrünungsarten als vorteilhaft gelten, konnte in den vorliegenden Versuchen auch mit der flachwurzelnden Art *Thymus serpyllum* ein deutlicher Effekt auf die Reduktion der Nitrat-Gehalte im Boden von 0 bis 30 cm Tiefe beobachtet werden.

In verschiedenen Studien konnte bereits gezeigt werden, dass eine dauerhafte Begrünung unter Reben, etwa durch spontane oder gezielte Vegetation, zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit beiträgt, insbesondere durch eine Erhöhung der mikrobiellen Aktivität (CHOU et al. 2018; DITTRICH et al. 2025; GRIESSER et al. 2022). Auch im dreijährigen Unterstockbegrünungs-Versuch traten deutliche Effekte bei der mikrobiellen Biomasse auf, einem wichtigen Indikator für das Bodenleben. Besonders hervorzuheben ist hier die Variante mit *Thymus serpyllum*, die eine höhere mikrobielle Biomasse als die chemische Variante aufwies. Dieses Ergebnis deutet auf eine besonders aktive Bodenmikrobiologie hin, wenngleich keine Aussage über die Aktivität spezifischer Mikroorganismen getroffen werden konnte.

Im Gegensatz dazu zeigten sich beim organischen Kohlenstoff-Gehalt im Boden keine klaren Veränderungen. Der Befund, dass sich die mikrobielle Biomasse erhöhte, ohne dass der Ge-

samtgehalt an organischem Kohlenstoff anstieg, lässt darauf schließen, dass kurzfristige Veränderungen eher auf die Qualität und Verfügbarkeit organischer Substrate als auf die Gesamtmenge zurückzuführen sind. Hauptsächlich durch mikrobielle Prozesse im Boden entsteht langfristig stabiler Humus: Die meisten an Mineraloberflächen gebundenen organischen Substanzen („Ton-Humus-Komplexe“) stammen aus Abbauprodukten und toten Zellbestandteilen von Mikroorganismen. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Rhizosphäre, der Wurzelbereich der Pflanzen, in dem kontinuierlich Zucker, Aminosäuren und organische Säuren als Wurzelexsudate ausgeschieden werden. Diese Substanzen dienen den Bodenmikroben als Nahrungsquelle und fördern so dauerhaft das Bodenleben (LEHMANN & KLEBER 2015). Die Förderung der Bodenorganismen durch Begrünung kann somit langfristig zur Bildung stabiler Humusformen beitragen (MUELLER et al. 2024; POIRIER et al. 2018). Die Förderung arbuskulärer Mykorrhizapilze sowie eine potentielle Stimulation der Nitrifikation durch aromatische Arten wie *T. serpyllum* (DITTRICH et al. 2025) weisen zudem auf spezifische positive Effekte hin, die das Rebenwachstum positiv beeinflussen können.

Für die praktische Umsetzung einer Unterstockbegrünung im Weinbau ist jedoch nicht allein die Verbesserung der Bodengesundheit ausschlaggebend. Ebenso entscheidend ist, welchen Einfluss die Begrünung auf die Rebenentwicklung sowie auf die Traubenquantität und -qualität hat. In diesem Zusammenhang zeigten insbesondere die Begrünungsvarianten *Festuca rubra*, *Thymus serpyllum* und die Mischung „Rebzeilenbegrünung“ im Vergleich zur chemischen Variante positive Effekte auf die Traubengesundheit und -struktur, vor allem durch eine reduzierte Anfälligkeit gegenüber *Botrytis cinerea*.

Begrünungspflanzen tragen zu einem geringeren vegetativen Wachstum der Rebe, besser belüfteten Laubwänden und lockereren Trauben bei. Infolgedessen drücken sich die Beeren weniger ab und Pilzkrankheiten an der Rebe reduzieren sich (JUDIT et al. 2011). Frühere Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass eine permanente Unterstockbegrünung im Vergleich zur Beikrautregulierung mit Herbiziden das Auftreten von Krankheiten reduzieren kann, selbst wenn Wachstumsparameter der Reben unverändert bleiben (CONIBERTI et al. 2018a). In der Hauptkomponentenanalyse (PCA) von 2023 und 2024 korrelierte das Auftreten von Traubenfäule negativ mit Lockerbeerigkeit (positiv korreliert mit der Kompaktheit der Trauben). Dies deutet darauf hin, dass die Vegetation unter den Reben im Vergleich zu offenem Boden zu einer geringeren Nährstoff- und Wasserversorgung der Trauben führt und damit das Potential für die Entwicklung von *Botrytis cinerea* verringert (MUNDY et al. 2022). Ein direkter Zusammenhang der Begrünung auf die Nährstoff- und Wasserversorgung konnte in dieser Studie jedoch nicht festgestellt werden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass nicht nur die gewählte

Pflanzenart, sondern auch das angewandte Management einen erheblichen Einfluss auf die Traubengesundheit haben kann. So zeigte sich im September 2024, dass sowohl die mechanische Bodenbearbeitung als auch die unbehandelte Kontrolle im Vergleich zur Begrünung mit *Festuca rubra* ähnlich hohe Vegetationsbedeckungen und gleichzeitig geringere *Botrytis cinerea*-Werte aufwiesen. Die Art der Begrünungspflanze allein ist somit nicht ausschlaggebend. Entscheidend ist vielmehr der durch Konkurrenz oder Bodenbedeckung vermittelte Einfluss auf Wasser- und Nährstoffhaushalt. Dieser führt zu einer geringeren Traubenkompaktheit und damit zu einer geringeren Fäulnisgefahr (VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021). SILVESTRONI et al. (2024) berichten, dass eine durch Konkurrenz der Begrünungspflanzen bedingte geringere Wüchsigkeit der Reben mit einer reduzierten Anfälligkeit für Pilzkrankheiten verbunden war. Zusätzlich schwächen Begrünungspflanzen durch ihre Bodendeckung die Luftbewegung in Bodennähe und reduzieren die Sporenverbreitung. Gleichzeitig wird der sogenannte Splash-Effekt, also das Hochspritzen mit Pilzsporen enthaltener Wassertropfen bei Niederschlag, durch die Vegetationsschicht deutlich abgeschwächt. Diese Mechanismen tragen nicht nur zur Reduktion von *Botrytis cinerea* bei, sondern verringern laut HASANALIYEVA et al. (2024) auch das Risiko weiterer pilzlicher Infektionen, wie *Plasmopara viticola* (Falscher Mehltau) oder *Erysiphe necator* (Echter Mehltau), die ebenfalls zu den bedeutendsten Rebkrankheiten gehören (INNEREBNER et al. 2021).

Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass zu stark wachsende Begrünungspflanzen das Mikroklima verschlechtern, den vegetativen Rebenwuchs einschränken sowie in eine Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe treten. Je nach Standortbedingungen, Alter der Reben und Wahl der Begrünungsart kann dies kontraproduktiv für die Rebgesundheit sein (CONIBERTI et al. 2018b; VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021). Diese Risiken entsprechen jenen, die in der Literatur typischerweise mit dem Vorkommen von Beikräutern in Verbindung gebracht werden (WALG 2016). Im Jahr 2022 zeigte die Kontrolle mit einem deutlichen Wachstum an Beikräutern eine höhere Inzidenz von Traubenfäule als eine Begrünung mit *Festuca rubra*. Eine mögliche Erklärung sind ungünstige mikroklimatische Bedingungen der Traubenzone, verursacht durch übermäßigen Beikrautwuchs, insbesondere von Arten wie Kompass-Lattich (*Lactuca serriola*) und Kanadischem Berufkraut (*Erigeron canadensis*), die in diesem Versuchsjahr dominierten. Ein Einwachsen in die Traubenzone kann negative Auswirkungen auf die Pflanzenschutzapplikationen, die Durchlüftung und die Besonnung der Trauben haben (FLEISHMAN et al. 2023; JORDAN et al. 2016; VANDEN HEUVEL & CENTINARI 2021).

Während die Wüchsigkeitsparameter in dieser Studie nicht bewertet wurden, zeigten CONIBERTI et al. (2018b), dass eine Unterstockbegrünung mit *Festuca rubra* im Vergleich zur

Herbizid-Behandlung zu deutlich niedrigeren Werten für das Schnittholzgewicht und einer abnehmenden Beschattung der Traubenzone führte. Ähnliche Ergebnisse zeigten FLEISHMAN et al. (2023): Im Vergleich zur Herbizid-Behandlung reduzierten die Begrünungspflanzen mit Rot-schwingel das vegetative Wachstum der Weinreben (Schnittholzgewicht) in allen Jahren um 22 % signifikant. Interessanterweise wirkten sich die Begrünungspflanzen weniger konsistent auf den Ertrag aus als auf das vegetative Wachstum. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das vegetative Wachstum direkt auf Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe reagiert, während der Ertrag von zusätzlichen Faktoren wie Blüten- und Fruchtansatz, klimatischen Bedingungen und der Ressourcenallokation innerhalb der Rebe abhängt (CHACÓN-VOZMEDIANO et al. 2020).

Die Mostzusammensetzung (Mostzuckergehalt und Gesamtsäuregehalt) zeigte keine Unterschiede zwischen den Varianten. Auch in früheren Studien zur Unterstockbegrünung im Weinbau wurden keine oder nur geringfügige Auswirkungen des Bodenmanagements im Unterstockbereich auf die Mostzusammensetzung beobachtet (GIESE et al. 2015; HICKEY et al. 2016; KARL et al. 2016a).

Neben physiologischen Parametern kann sich die Unterstockbegrünung auch auf die sensorische Qualität des Weins auswirken. CONIBERTI et al. (2018b) berichten, dass Weine aus Unterstockbegrünungsvarianten höhere °Brix-Werte, gesteigerte Anthocyan-Gehalte und intensivere Fruchtaromen aufwiesen als solche aus Herbizid-Varianten. Erklärt wird dies mit einem durch die Unterstockbegrünung induzierten moderaten Trockenstress, der eine lockerere Traubenstruktur und höhere Assimilateinlagerung in die Beeren zur Folge hat. Auch wenn in der vorliegenden Studie keine sensorische Bewertung erfolgte, legen die beobachteten physiologischen Effekte nahe, dass Begrünungen wie *Festuca rubra* oder *Thymus serpyllum* qualitätsfördernd wirken können, sofern ihre Etablierung kontrolliert und standortangepasst erfolgt.

5.3 Ausblick und Perspektiven für die weinbauliche Praxis

Eine Einsaat bestimmter Begrünungspflanzen im Unterstockbereich kann zur Unterdrückung unerwünschter Beikräuter genutzt werden. Ziel dieser Studie war es, nach einmaliger Saattbettbereitung und Einsaat eine mehrjährige Begrünung zu etablieren, in die nicht mehr durch Pflegemaßnahmen eingegriffen werden muss, ohne dass dabei negative Effekte für den Boden und die Rebe entstehen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Auswahl geeigneter, gegebenenfalls standorttoleranter Begrünungspflanzen sowie die Beachtung der Herbizid-Vorbehandlung des Standorts entscheidend für den Etablierungserfolg einer Unterstockbegrünung sind. Besonders in der

Umstellungsphase von chemischer Beikrautregulierung hin zu Begrünungssystemen ist dies von großer Bedeutung. Gleichzeitig schränkt die aktuelle Gesetzeslage die Anwendung von Herbiziden in bestimmten Gebietskulissen zunehmend ein. Seit 2021 ist der Einsatz von Glyphosat in Wasserschutz- und Heilquellenschutzgebieten durch die Novellierung der Pflanzenschutz-Anwenderverordnung (PflSchAnwV) nicht mehr zulässig (BMLEH 2021). Damit entfällt für viele Betriebe in diesen Gebieten eine bislang zentrale Option zur Beikrautkontrolle. In diesen Fällen stellt eine standortangepasste und funktionale Unterstockbegrünung eine sinnvolle ökologische Alternative dar, vorausgesetzt, sie lässt sich unter den gegebenen Standortbedingungen erfolgreich etablieren.

Für die Rentabilität und Durchführbarkeit der Saatbettbereitung und Einsaat einer Unterstockbegrünung ist entsprechende Gerätetechnik erforderlich. Zur flachen Saatbettbereitung im Unterstockbereich hat sich ein Unterstock-Kreisel (z. B. Braun Maschinenbau GmbH, Landau, Deutschland) als zielführend erwiesen. Bei sehr dichtem und hohem Bewuchs sollte der Unterstockbereich mit einem Scheibenpflug oder einer Rollhacke vorbereitet werden. Die Einsaat im Unterstockbereich gelang in ersten Versuchen mit einer pneumatischen Sämaschine. Dabei wurden die über die Maschinenbreite angebrachten Saatschläuche gebündelt und beidseitig nach links und rechts in den Unterstockbereich geführt. Das Saatgut wurde pneumatisch auf die mit dem Unterstock-Kreisel vorbereitete Bodenoberfläche geblasen. Anschließendes Andrücken mit einer Walze war technisch nicht umsetzbar. Trotzdem gelingt bei Lichtkeimern (viele Gräser und Kräuter) und anschließend günstiger Witterung (z. B. direktes Regenereignis nach der Einsaat) eine Etablierung. Im ersten Jahr zeigen die eingesäten Pflanzen häufig noch eine geringe Deckung, wodurch ein Nacharbeiten und Entfernen auftretender Beikräuter stattfinden muss, um die Wasser- und Lichtkonkurrenz zu den eingesäten Pflanzen zu reduzieren. Hierbei bieten sich Fadenmäher oder Unterstockmulchgeräte an. Ist die Begrünung einmal angewachsen, benötigt sie wenig oder keine Pflege mehr und konkurriert andere Arten der Standortflora aus.

Die Kosten für die Anfangsinvestition (Saatgut, Geräte zur Saatbettbereitung, Sätechnik) amortisieren sich im Laufe der Jahre durch den reduzierten Einsatz von Maschinen und Chemikalien (Kostenrechnung siehe Anhang 7). So kann z. B. bei vorhandener Bedeckung mit *Festuca rubra* im Vergleich zu einer mechanischen Bearbeitung oder dem Herbizid-Einsatz bereits nach drei Jahren eine Kostenreduktion erreicht werden. Ein gutes Saatbett und ausreichend Regen sorgen für den nötigen Bodenschluss des Saatguts. Der Einsaatzeitpunkt sollte aufgrund günstiger Bodenfeuchte und -temperaturen deshalb in die Spätsommer- oder Herbstmonate gelegt werden. In bisherigen Versuchen gelang die Etablierung überwinternder

Arten mit einer Einsaat im September. Auch Oktober ist denkbar. Der Vorteil besteht darin, dass zu diesem Zeitpunkt die Arbeitsspitze durch die Traubenernte beendet ist und eine Freisetzung von Nitrat durch die Bodenbearbeitung keinen Einfluss mehr auf die Traubenqualität hat. Zu dieser Zeit ist jedoch aus Gründen des Grundwasserschutzes auf eine flache Bodenbearbeitung, die mit der Freisetzung geringer Nitrat-Mengen einhergeht, zu achten. Nach der Einsaat auflaufende Beikräuter helfen, Nährstoffauswaschung und Erosion zu vermeiden, die in dieser Zeit kritisch sein können. Sie werden meist im Frühsommer sukzessive von den eingesäten Pflanzen verdrängt.

Chemische Methoden wie der Einsatz von Herbiziden verursachen nicht nur wiederkehrende Mittelkosten, sondern erfordern auch durch den Sachkundenachweis attestiertes Fachwissen im Umgang und regelmäßige Anwendung. Mechanische Bearbeitung ist sehr arbeits- und kostenintensiv und in Zeiten der Klimakrise mit immer häufiger auftretenden Starkregenereignissen der Schlüsselfaktor für Erosionsereignisse. Im Vergleich zu diesen Nachteilen der klassischen Verfahren zur Unterstockbodenpflege stellt eine gut etablierte Begrünung die nachhaltigste Alternative dar. Zunehmende Sommertrockenheit und häufigere Starkregenereignisse erfordern ein resilientes Boden- und Wassermanagement. Eine gut angepasste Unterstockbegrünung kann als klimatischer Puffer wirken. Zwar ist zunächst mit einem höheren Arbeitsaufwand bei Etablierung und Pflege zu rechnen, langfristig bringt diese Begrünungsform jedoch ökologische Vorteile und wirtschaftliche Einsparungen.

6 Fazit

Die vorliegende Studie zeigt, dass eine gezielte Begrünung des Unterstockbereichs im Weinbau grundsätzlich möglich ist und einen vielversprechenden Ansatz zur nachhaltigen Regulierung von Beikräutern bietet. Die Ergebnisse bestätigen die Grundannahme, dass sich die untersuchten Begrünungspflanzen in ihren morphologischen Eigenschaften sowie ihrer Wirkung auf bodenspezifische und rebphysiologische Parameter deutlich unterscheiden.

Hypothese 1, dass die Begrünungspflanzen sich je nach Art in ihren Wuchseigenschaften sowie ihrer Wasser- und Nährstoffaufnahme und damit auch in ihrem potentiellen Einfluss auf die Rebe unterschieden, wurde bestätigt. Es konnten klare artspezifische Unterschiede im Wuchsverhalten sowie in der Entwicklung der Bodenbedeckung und Biomasse festgestellt werden. Während beispielsweise *Medicago lupulina*, *Festuca rubra* und die Mischung „Rebzeilenbegrünung“ eine zügige und stabile Bodendeckung erreichten, blieb *Thymus serpyllum* über längere Zeit zurück, wuchs jedoch kontinuierlich und zeigte dabei eine deutlich geringere Wuchshöhe. **Hypothese 2**, die auf eine dauerhafte Etablierung abzielt, konnte für mehrere Arten, darunter *F. rubra*, *T. serpyllum* und „Rebzeilenbegrünung“ bestätigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Etablierung stark von der Pflanzenwahl sowie standort- und managementspezifischen Faktoren abhängt und nicht pauschal garantiert werden kann. Bei einer erfolgreichen Etablierung konnten Beikrautreduktionen erreicht werden, die zunächst mit der mechanischen und zu einem späteren Zeitpunkt auch mit der chemischen Variante vergleichbar waren.

Die Untersuchung der bodenphysikalischen Parameter bestätigte zudem **Hypothese 3** in wesentlichen Aspekten. Begrünte Varianten wiesen, insbesondere im Vergleich zur chemisch offenen Kontrolle, signifikant geringere Bodentemperaturen, höhere Infiltrationsraten sowie tendenziell höhere Werte bei der mikrobiellen Biomasse auf. Das deutet auf eine Pufferfunktion gegenüber klimatischen Extremereignissen wie Hitze und Starkregen hin. Gleichzeitig zeigten sich in begrünten Varianten geringere Nitrat-Gehalte im Oberboden, woraus sich eine reduzierte Nitrat-Auswaschung ableitet. Die höhere Wurzelbiomasse in den obersten Bodenschichten trägt dabei zur Stabilisierung der Bodenstruktur bei und unterstützt die langfristige Bodenfruchtbarkeit.

Die **Hypothese 4** konnte in den Grundannahmen bestätigt werden, auch wenn zwischen den untersuchten Parametern der begrünten und offenen Unterstockvarianten in der Mehrzahl keine statistisch abgesicherten Unterschiede errechnet werden konnten. Zwar zeigte sich nur in Einzelfällen ein signifikanter Einfluss auf den Ertrag (z. B. Ertragsreduktion unter *Thymus*

serpyllum), doch wiesen die Trauben der begrünten Varianten insgesamt eine geringere *Botrytis cinerea*-Anfälligkeit auf. Besonders *Medicago lupulina*, *Festuca rubra* und die Mischung „Rebzeilenbegrünung“ beeinflussten die Traubenstruktur durch Förderung der Lockerbeerigkeit. Zu empfindlichen Entwicklungsphasen der Rebe, wie etwa zur Blüte oder zum Beginn der Traubenreife, beeinflussten die Begrünungspflanzen die Wasserverfügbarkeit für die Reben und führten zu moderatem Trockenstress. Belegt wurde dies durch Messungen der frühmorgentlichen Blattwasserpotentiale, die sich teilweise durch die Begrünung in einen negativeren Wert verschoben.

Die Untersuchung zeigt, dass Unterstockbegrünungen mit standortangepassten Arten eine nachhaltige und praktikable Alternative zu chemischer und mechanischer Beikrautregulierung darstellen können. Dabei wurde deutlich, dass nicht alle getesteten Arten gleichermaßen geeignet sind, sondern ihre Eignung stark von den Zielsetzungen des Betriebs und den lokalen Standortbedingungen abhängt. *Medicago lupulina* (Gelbklee) und *Trifolium repens* (Weißklee) zeigten nur eine zeitlich begrenzte Etablierung und beikrautregulierende Wirkung. Ihr Einsatz ist daher eher als kurzfristige Begrünung zur Erosionsminderung oder als Gründüngung geeignet, jedoch nicht zur dauerhaften Unterstockbegrünung. *Festuca rubra* (Rot-Schwingel) erwies sich als die zuverlässigste Art zur dauerhaften Beikrautunterdrückung. Sie etablierte sich langfristig, zeigte eine gute Bodenbedeckung und verbesserte Bodenfeuchte und Temperaturregulation. Die Tatsache, dass die oberirdische Biomasse dieser Art bei Trockenheit sehr schnell abstirbt und oberirdische Streu bildet, kann für die Rebe in Hinblick auf eine reduzierte Wasser- und Nährstoffkonkurrenz sowie Verdunstungsschutz des Bodenwassers ein großer Vorteil sein. Aufgrund ihrer hohen Halmlänge kann sie jedoch in die Traubenzone einwachsen und sollte daher bevorzugt in Lagen mit höherem Stammaufbau und damit höherer Traubenzone eingesetzt werden. *Thymus serpyllum* (Sand-Thymian) zeigte sich als niedrig wachsende, bodendeckende Art mit positiven Effekten auf Bodenfeuchte, Temperaturregulation und Traubengesundheit (geringere *Botrytis cinerea*-Anfälligkeit). Gleichzeitig war jedoch eine Reduktion des frühmorgentlichen Blattwasserpotentials und des Stockertrags zu beobachten, woraus sich auf eine mögliche Konkurrenz um Wasser schließen lässt. Aufgrund seines langsamen Wachstums eignet sich *T. serpyllum* besonders für sandige Lagen mit geringem Beikrautwachstum, in denen zudem eine Reduktion des Ertrags zugunsten der Traubenqualität akzeptiert wird. Die Mischung „Rebzeilenbegrünung“ vereinte mehrere robuste Kräuter-Arten und zeigte vergleichbare Vorteile wie *F. rubra* hinsichtlich Bodenklima, Beikrautunterdrückung und Krankheitsprävention. Sie ist besonders geeignet für ökologisch orientierte Betriebe, die eine möglichst hohe Biodiversität im Unterstockbereich anstreben und eine höhere Wuchshöhe, z. B. durch erhöhten Stockaufbau, akzeptieren können.

Insgesamt wird deutlich, dass eine gezielte Auswahl der Begrünungspflanzen entscheidend ist, um das Gleichgewicht zwischen ökologischen Vorteilen und potentieller Konkurrenz für die Rebe zu wahren. Künftig gilt es, die Schwelle zwischen förderlicher Wirkung auf Boden- und Traubengesundheit sowie schädlicher Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe noch genauer zu definieren. Dies bleibt ein zentrales Forschungsthema für die Weiterentwicklung nachhaltiger Unterstockbegrünungssysteme.

7 Literaturverzeichnis

- Abad, J., Hermoso de Mendoza, I., Marín, D., Orcaray, L., & Santesteban, L. G. (2021a). Cover crops in viticulture. A systematic review (1): Implications on soil characteristics and biodiversity in vineyard. *OENO One*, 55(1), 295-312. doi:10.20870/oeno-one.2021.55.1.3599
- Abad, J., Hermoso de Mendoza, I., Marín, D., Orcaray, L., & Santesteban, L. G. (2021b). Cover crops in viticulture. A systematic review (2): Implications on vineyard agronomic performance. *OENO One*, 55(2), 1-27. doi:10.20870/oeno-one.2021.55.2.4481
- Abad, J., Marín, D., Cibrián, J. F., Sagüés, A., & Santesteban, L. G. (2022). Cover crops under the vines: a viable alternative for weed management in Mediterranean vineyards. *IVES Technical Reviews, vine and wine*. doi:10.20870/ives-tr.2022.7282
- Abad, J., Marín, D., Imbert, B., Virto, I., Garbisu, C., & Santesteban, L. G. (2023). Under-vine cover crops: Impact on physical and biological soil properties in an irrigated Mediterranean vineyard. *Scientia Horticulturae*, 311. doi:10.1016/j.scienta.2022.111797
- Abad, J., Marín, D., Santesteban, L. G., Cibrián, J. F., & Sagüés, A. (2020). Under-vine cover crops: impact on weed development, yield and grape composition. *OENO One*, 54(4), 975-983. doi:10.20870/oeno-one.2020.54.4.4149
- Abbott, W. S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265-267
- Agrarmeteorologie RLP. (2025). Agrarmeteorologie Rheinland-Pfalz. Zugriff am 18.05.2025 unter <https://www.wetter.rlp.de/Agrarmeteorologie>
- Alexa, E., Bragea, M., Sumalan, R., Lăzureanu, A., Negrea, M., & Iancu, S. (2009). Dynamic of glyphosate mineralization in different soil types. *Romanian Agricultural Research*, 26(5), 57-60.
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Aufl.). Berlin, Deutschland: Springer Spektrum.
- Araújo, A. S. F., Monteiro, R. T. R., & Abarkeli, R. (2003). Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. *Chemosphere*, 52(5), 799-804. doi:10.1016/S0045-6535(03)00266-2
- Bauer, U., & Hensel, W. (2019). *Ganzjährig attraktive Beete mit Blatt und Blüte: Vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten für jeden Garten*. München, Deutschland: Gräfe und Unzer Verlag GmbH.
- Baumgärtel, G., & Olf, H.-W. (2014). Nitratauswaschung – Ursachen und Maßnahmen zur Minimierung. In aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz (Hrsg.), *Nährstoffe effizient nutzen* (S. 23-34). Bonn, Deutschland: aid-Medien.
- Bavougian, C. M., & Read, P. E. (2018). Mulch and groundcover effects on soil temperature and moisture, surface reflectance, grapevine water potential, and vineyard weed management. *PeerJ*, 6, e5082. doi:10.7717/peerj.5082
- Becker, A., Dietrich, J., Kohl, E., Kranich, H., Michelfelder, U., & Sauer, E. (2017). *Weinbau und Kellerwirtschaft: Daten für die Betriebsplanung* (16. überarb. Aufl.). Darmstadt, Deutschland: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- Ben-Salem, N., Álvarez, S., & López-Vicente, M. (2018). Soil and Water Conservation in Rainfed Vineyards with Common Sainfoin and Spontaneous Vegetation under Different Ground Conditions. *Water*, 10(8). doi:10.3390/w10081058

- Berger, T. (2013). *Erstellung und Validierung einer Kalibration von Traubenminor- und Majorbestandteilen als Grundlage einer qualitätsorientierten Traubengeldauszahlung auf Basis der FT-MIR Analytik*. (Dissertation). Technische Universität Kaiserslautern, Deutschland.
- BfN (Bundesamt für Naturschutz). (2003). *FloraWeb: Daten und Informationen zu Wildpflanzen und zur Vegetation Deutschlands*. Zugriff am 16.04.2024 unter <https://www.floraweb.de>
- Bigot, A., Fontaine, F., Clément, C., & Vaillant-Gaveau, N. (2007). Effect of the herbicide flumioxazin on photosynthetic performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Chemosphere*, 67(6), 1243-1251.
- Bloemer, S., & Diekhoff, S. (2013). Optimierung und Beschleunigung von Keimung und Vegetationsentwicklung bei Böschungsansaaten im Erd- und Verkehrswegebau. *Straße und Autobahn*, 6, 409-420.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft). (2022). *Überblick: Das Verfahren der Neubewertung und Wiedergenehmigung von Glyphosat*. Zugriff am 12.01.2023 unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/pflanzenschutz/neubewertung-glyphosat-verfahren.html>
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft). (2024). *Fragen und Antworten zu Glyphosat*. Zugriff am 18.04.2025 unter https://www.bmel.de/SharedDocs/FAQs/DE/faq-glyphosat/FAQ-glyphosat_List.html
- BMLEH (Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat). (2021). *Fünfte Verordnung zur Änderung der Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung*. Zugriff am 08.06.2025 unter <https://www.bmel.de/SharedDocs/Gesetzestexte/DE/5-aenderung-pflanzenschutz-anwendungs-vo.html>
- Bogati, K., & Walczak, M. (2022). The impact of drought stress on soil microbial community, enzyme activities and plants. *Agronomy*, 12(1), 189.
- Bond, W., Davies, G., & Turner, R. (2007). *The biology and non-chemical control of Black Medick (Medicago lupulina L.)*. Zugriff am 10.12.2022 unter <https://garden-organic.files.svdcn.com/production/documents/medicago-lupulina.pdf?dm=1726651593>
- Bonilla, I., & Bolaños, L. (2009). Mineral nutrition for legume – rhizobia symbiosis: B, Ca, N, P, S, K, Fe, Mo, Co, and Ni: A review. In E. Lichtfouse (Hrsg.), *Organic farming, pest control and remediation of soil pollutants (Sustainable Agriculture Reviews, Bd. 1, S. 253-274)*. Dordrecht, Niederlande: Springer. doi:10.1007/978-1-4020-9654-9_13
- Bouwer, H. (1986). Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. In *Methods of Soil Analysis*, A. Klute (Hrsg.), *Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 825-844. doi:10.2136/sssabookser5.1.2ed.c32
- Braun Maschinenbau GmbH. (2023). *Produktkatalog 2023: Smart Viticulture made in Germany*. Zugriff am 17.04.2025 unter https://braun-maschinenbau.info/wp-content/uploads/BRAUN_Produktkatalog_2023.pdf
- Braun, R. C., Patton, A. J., Watkins, E., Koch, P. L., Anderson, N. P., Bonos, S. A., & Brilman, L. A. (2020). Fine fescues: A review of the species, their improvement, production, establishment, and management. *Crop Science*, 60(3), 1142-1187. doi:10.1002/csc2.20122
- Bremmer, J., Gonzalez-Martinez, A., Jongeneel, R., Huiting, H., Stokkers, R., & Ruijs, M. (2021). *Impact assessment of EC 2030 Green Deal targets for sustainable food*

- production* (Wageningen Economic Research Report Nr. 150). Wageningen, Niederlande: Wageningen Economic Research.
- Breuillin-Sessoms, F., Petrella, D. P., Trappe, J. M., Mihelich, N. T., Patton, A. J., & Watkins, E. (2021). Field evaluation of weed suppression in fine fescue (*Festuca* spp.). *Crop Science*, 61(4), 2812-2826.
- Brown, R. N., Percivalle, C., Narkiewicz, S., & DeCuollo, S. (2010). Relative rooting depths of native grasses and amenity grasses with potential for use on roadsides in New England. *HortScience*, 45(3), 393-400.
- Brust, J., Weber, J., & Gerhards, R. (2014). Do cover crop mixtures have the same ability to suppress weeds as competitive monoculture cover crops? *Julius-Kühn-Archiv*, 443, 422-430. Quedlinburg, Deutschland: Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen. doi:10.5073/jka.2014.443.054
- BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit). (2025). Online-Datenbank zugelassener Pflanzenschutzmittel. Zugriff am 16.04.2025 unter https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/01_ZugelPSM/01_OnlineDatenbank/psm_onlineDB_node.html
- Cabrera-Pérez, C., Royo-Esnal, A., Català, B., Baraibar, B., & Recasens, J. (2024). Cover crops terminated with roller-crimper to manage *Cynodon dactylon* and other weeds in vineyards. *Pest Management Science*, 80(4), 2162-2169.
- Capri, C., Fiorini, A., Gatti, M., Richards, A., & Poni, S. (2023). Screening of cover crop species for sustainable vineyard floor management. *Acta Horticulturae*(1370), 1-10. doi:10.17660/ActaHortic.2023.1370.1
- Centinari, M. (2017). Impacts of under-trellis cover crops. *Australian and New Zealand Grapegrower and Winemaker*(638), 33-34.
- 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. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(1), 137-148. doi:10.1111/ajgw.12162
- Chacón-Vozmediano, J. L., Martínez-Gascueña, J., García-Navarro, F. J., & Jiménez-Ballesta, R. (2020). Effects of water stress on vegetative growth and 'merlot' grapevine yield in a semi-arid mediterranean climate. *Horticulturae*, 6(4), 95. doi:10.3390/horticulturae6040095
- Chadha, A., Florentine, S. K., Chauhan, B. S., Long, B., & Jayasundera, M. (2019). Influence of soil moisture regimes on growth, photosynthetic capacity, leaf biochemistry and reproductive capabilities of the invasive agronomic weed; *Lactuca serriola*. *PLoS One*, 14(6), e0218191.
- Chapagain, T., Lee, E. A., & Raizada, M. N. (2020). The potential of multi-species mixtures to diversify cover crop benefits. *Sustainability*, 12(5), 2058.
- Chaumeton, F. (1844). Tyrbas de Chamberet JB, Panckoucke E, Pierre Jean François Turpin PJF (1844) Flore médicale. *Published by Panckoucke*.
- Chou, M. Y., & Vanden Heuvel, J. E. (2018). Annual Under-Vine Cover Crops Mitigate Vine Vigor in a Mature and Vigorous Cabernet franc Vineyard. *American Journal of Enology and Viticulture*, 70(1), 98-108. doi:10.5344/ajev.2018.18037
- Chou, M. Y., Vanden Heuvel, J., Bell, T. H., Panke-Buisse, K., & Kao-Kniffin, J. (2018). Vineyard under-vine floor management alters soil microbial composition, while the fruit microbiome shows no corresponding shifts. *Scientific Reports*, 8(1), 11039. doi:10.1038/s41598-018-29346-1

- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Ilharco, L. M., & Pagliaro, M. (2019). Herbicides based on pelargonic acid: Herbicides of the bioeconomy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1476-1482. doi:10.1002/bbb.2046
- Clark, A. (2008). *Managing cover crops profitably* (3rd ed., SARE Handbook Series no. 9). College Park, MD, USA: Sustainable Agriculture Research and Education (SARE).
- Coniberti, A., Ferrari, V., Disegna, E., García Petillo, M., & Lakso, A. N. (2018a). Complete vineyard floor cover crop to reduce grapevine susceptibility to bunch rot. *European Journal of Agronomy*, 99, 167-176. doi:10.1016/j.eja.2018.07.006
- Coniberti, A., Ferrari, V., Disegna, E., García Petillo, M., & Lakso, A. N. (2018b). Under-trellis cover crop and planting density to achieve vine balance in a humid climate. *Scientia Horticulturae*, 227, 65-74. doi:10.1016/j.scienta.2017.09.012
- Dadach, M., Mehdadi, Z., & Latreche, A. (2015). Effect of water stress on seed germination of *Thymus serpyllum* L. from Tessala mount. *Journal of Plant Sciences*, 10(4), 151.
- Den Hollander, N. G., Bastiaans, L., & Kropff, M. J. (2007). Clover as a cover crop for weed suppression in an intercropping design. *European Journal of Agronomy*, 26(2), 104-112. doi:10.1016/j.eja.2006.08.005
- Dilley, C. A., & Nonnecke, G. R. (2006). Sustainable Weed Management Systems to Improve Soil Quality in Midwest Viticulture. *Iowa State University Research and Demonstration Farms Progress Reports*, 2005(1).
- Dittrich, F., Canfora, L., Orrù, L., Liu, B., Tebbe, C. C., & Thiele-Bruhn, S. (2025). Diversifying Grapevines With Aromatic Plants Changes the Soil Habitat, Microbial Community Composition and Functions Toward More Efficient Substrate Use and Nutrient Allocation. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 4(2). doi:10.1002/sae2.70071
- Dittrich, F., Iserloh, T., Treseler, C.-H., Hüppi, R., Ogan, S., Seeger, M., & Thiele-Bruhn, S. (2021). Crop Diversification in Viticulture with Aromatic Plants: Effects of Intercropping on Grapevine Productivity in a Steep-Slope Vineyard in the Mosel Area, Germany. *Agriculture*, 11(2). doi:10.3390/agriculture11020095
- DLR Mosel (Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Mosel). (2025). Pflanzenschutzmittelliste 2025 für den Weinbau. Zugriff am 16.04.2025 unter <https://www.dlr.rlp.de/DLR-RLP/Aktuelles/Ueberblick/IntegrierterPflanzenschutz-Mittelliste2025>
- Dreisiebner-Lanz, S. (2020). Unterstockbegrünungen: Anforderungen, Versuchsergebnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick. Zugriff am 14.01.2023 unter <https://obstwein-technik.eu/Core?aktiveNavigationsID=879&fachbetaegelID=453>
- Duke, S. O. (2020). Glyphosate: environmental fate and impact. *Weed Science*, 68(3), 201-207.
- DWD (Deutscher Wetterdienst). (2025). Wetter und Klima im Überblick. Zugriff am 06.05.2025 unter <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc>
- Eggenberg, S., Bornand, C., Juillerat, P., Jutzi, M., Möhl, A., Nyffeler, R., & Santiago, H. (2018). *Flora Helvetica. Guide d'Excursions*. Bern, Schweiz: Haupt Verlag.
- Eitle, M. (2022). *Pilotstudie zur Unterstockbegrünung*. DER WINZER online. Zugriff am 26.03.2025 unter <https://www.der-winzer.at/news/2022/11/pilotstudie-zur-unterstockbegrueung.html>
- Elhakeem, A., Bastiaans, L., Houben, S., Couwenberg, T., Makowski, D., & van der Werf, W. (2021). Do cover crop mixtures give higher and more stable yields than pure stands? *Field Crops Research*, 270, 108217.

- Ellenberg, H. (1991). Indicator values of vascular plants in central Europe 1. *Indicator values of vascular plants not including Rubus. Scripta Geobot*, 18, 9-166.
- Europäische Kommission (2020). Fragen und Antworten: EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 – Mehr Raum für die Natur in unserem Leben. Zugriff am 29.04.2024 unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/qanda_20_886
- Ferreira, C. S. S., Veiga, A., Caetano, A., Gonzalez-Pelayo, O., Karine-Boulet, A., Abrantes, N., Keizer, J., & Ferreira, A. J. D. (2020). Assessment of the Impact of Distinct Vineyard Management Practices on Soil Physico-Chemical Properties. *Air, Soil and Water Research*, 13. doi:10.1177/1178622120944847
- Filipović, V., Marković, T., Dimitrijević, S., Song, A., Prijić, Ž., Mikić, S., Čutović, N., & Ugrenović, V. (2024). The First Study on Cultivating Roman Chamomile (*Chamaemelum nobile* (L.) All.) for Its Flower and Essential Oil in Southeast Serbia. *Horticulturae*, 10(4), 396.
- Fisk, J. W., Hesterman, O. B., Shrestha, A., Kells, J. J., Harwood, R. R., Squire, J. M., & Sheaffer, C. C. (2001). Weed suppression by annual legume cover crops in no-tillage corn. *Agronomy Journal*, 93(2), 319-325.
- Fleishman, S. M., Eissenstat, D. M., Hoffer, G. M., & Centinari, M. (2023). Cover crops and a devigorating rootstock can impart substantial agroecosystem services to high-resource vineyards: A multi-year study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 344. doi:10.1016/j.agee.2022.108287
- Follak, S., Kirchinger, M., Menger, A., Redl, M., Schmid, A., Heßdörfer, D., Lardschneider, E., Remmele, E., Riedle-Bauer, M., Rosner, F., Steinkellner, S., Winter, S., & Rathbauer, J. (2024). Evaluation of a Biodegradable and Sprayable Mulch Material for Weed Control in Vineyards and Orchards. *Applied Fruit Science*, 66(5), 1727-1736. doi:10.1007/s10341-024-01163-z
- Fox, R. (2003). Überlegungen zur Rebenerziehung und Drahtrahmengestaltung. *Infodienst-LVWO Weinsberg*. Zugriff am 15.08.2025 unter <https://lvwo.landwirtschaft-bw.de/Lde/669718?LISTPAGE=669706>
- Gehring, K. (2011). *Herausforderungen der Klimaänderung an die Unkrautkontrolle. In Klimaänderung in Bayern – Antworten des Pflanzenbaus* (Tagungsband, Freising-Weihenstephan, Deutschland, 23.-24. Februar 2011). Freising-Weihenstephan, Deutschland: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).
- Giese, G., Velasco-Cruz, C., Roberts, L., Heitman, J., & Wolf, T. K. (2014). Complete vineyard floor cover crops favorably limit grapevine vegetative growth. *Scientia Horticulturae*, 170, 256-266. doi:10.1016/j.scienta.2014.03.011
- Giese, G., Wolf, T. K., Velasco-Cruz, C., Roberts, L., & Heitman, J. (2015). Cover Crop and Root Pruning Impacts on Vegetative Growth, Crop Yield Components, and Grape Composition of Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(2), 212-226. doi:10.5344/ajev.2014.14100
- Gladstone, E., & Dokoozlian, N. K. (2003). Influence of leaf area density and trellis/training system on the light microclimate within grapevine canopies. *Vitis*, 42(3), 123-131. doi:10.5073/vitis.2003.42.123-131.
- Griesser, M., Khalil, S., De Berardinis, F., Porret, O. F., Hörmayer, R., Mayer, N., Kühner, E., & Forneck, A. (2022). Under-vine vegetation in vineyards: a case study considering soil hydrolytic enzyme activity, yield and grape quality in Austria. *OENO One*, 56(4), 81-93. doi:10.20870/oeno-one.2022.56.4.5518
- Guerra, B., & Steenwerth, K. (2011). Influence of Floor Management Technique on Grapevine Growth, Disease Pressure, and Juice and Wine Composition: A Review.

- American Journal of Enology and Viticulture*, 63(2), 149-164.
doi:10.5344/ajev.2011.10001
- Guerra, J. G., Cabello, F., Fernandez-Quintanilla, C., Pena, J. M., & Dorado, J. (2022). Use of Under-Vine Living Mulches to Control Noxious Weeds in Irrigated Mediterranean Vineyards. *Plants (Basel)*, 11(15). doi:10.3390/plants11151921
- Hanke, M.-V., & Flachowsky, H. (2017). Gesetzliche Grundlagen und Verordnungen für das Inverkehrbringen von Pflanzenmaterial. In *Obstzüchtung und wissenschaftliche Grundlagen*, 159-164. Berlin, Deutschland: Springer Spektrum.
- Hanni, E. (2009). Mechanische Unterstockbearbeitung - Möglicher Herbizidersatz oder zusätzlicher Aufwand? *Obstbau Weinbau*, 43(9), 237-239.
- Hansen, V., Meilvang, L. V., Magid, J., Thorup-Kristensen, K., & Jensen, L. S. (2023). Effect of soil fertility level on growth of cover crop mixtures and residual fertilizing value for spring barley. *European Journal of Agronomy*, 145, 126796.
- Hasanaliyeva, G., Furiosi, M., Rossi, V., & Caffi, T. (2024). Cover crops lower the dispersal of grapevine foliar pathogens from the ground and contribute to early-season disease management. *Front Plant Sci*, 15, 1498848. doi:10.3389/fpls.2024.1498848
- Hegi, G., & Gams, H. (1964). *Illustrierte Flora von Mitteleuropa* (Vol. 4.3). München, Deutschland: Carl Hanser Verlag.
- Helwi, P. (2020). *Nitrogen Management in Vineyards (EHT-143)*. Tamu, USA: Texas A&M AgriLife Extension Service. Zugriff am 17.05.2025 unter https://aggie-horticulture.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/13/2020/06/Nitrogen-Management-in-Vineyards_EHT-143.pdf
- Hickey, C. C., Hatch, T. A., Stallings, J., & Wolf, T. K. (2016). Under-Trellis Cover Crop and Rootstock Affect Growth, Yield Components, and Fruit Composition of Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture*, 67(3), 281-295.
doi:10.5344/ajev.2016.15079
- Hofmann, U. (2014). *Biologischer Weinbau*. Stuttgart, Deutschland: Ulmer.
- Horel, Á., Bakacsi, Z., Vass, C., & Zsigmond, T. (2024). Inter-row soil management affecting soil moisture in non-irrigated vineyard ecosystems: A meta-analysis. *Soil Use and Management*, 40(4), e13159. doi:10.1111/sum.13159
- Howarth, W. O. (1920). Notes on the Habitats and Ecological Characters of Three Subvarieties of *Festuca Rubra* L. (sens. ampl.). *Journal of Ecology*, 8(3), 216-231.
doi:10.2307/2255614
- Hrytsyna, M., Skybitska, M., & Novikevich, O. (2022). Diagnostic traits of medicinal herbal raw material of species of *Thymus* genus. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 13(2), 137-152. doi:10.15421/022219
- Huang, Z., Liu, Y., Zhang, C., Jiang, C., Huang, H., & Wei, S. (2019). Molecular basis of natural tolerance to glyphosate in *Convolvulus arvensis*. *Scientific Reports*, 9(1), 8133.
- Hunter, J. J. K., Tarricone, L., Volschenk, C., Giacalone, C., Melo, M. S., & Zorer, R. (2020). Grapevine physiological response to row orientation-induced spatial radiation and microclimate changes. *OENO One*, 54(2), 411-433. doi:10.20870/oeno-one.2020.54.2.3100
- Innerebner, G., Roschatt, C., & Schmid, A. (2021). Stationäre Applikation von Pflanzenschutzmitteln im Weinbau. *Obstbau Weinbau-Fachmagazin des Südtiroler Beratungsrings*, 58(5), 5-9.
- Ipach, R., Huber, B., Hofmann, H., & Baus, O. (2005). Richtlinie zur Prüfung von Wachstumsregulatoren zur Auflockerung der Traubenstruktur und zur Vermeidung von Fäulnis an Trauben. *Outline for an EPPO-Guideline*.

- Jacquet, F., Delame, N., Vita, J. L., Huyghe, C., & Reboud, X. (2021). The micro-economic impacts of a ban on glyphosate and its replacement with mechanical weeding in French vineyards. *Crop Protection*, 150, 105778.
- Jordan, L. M., Björkman, T., & Vanden Heuvel, J. E. (2016). Annual Under-vine Cover Crops Did Not Impact Vine Growth or Fruit Composition of Mature Cool-climate 'Riesling' Grapevines. *HortTechnology*, 26(1), 36-45. doi:10.21273/horttech.26.1.36
- Judit, G., Gábor, Z., Ádám, D., Tamas, V., & Gyorgy, B. (2011). Comparison of three soil management methods in the Tokaj wine region. *Mitteilungen Klosterneuburg*, 61, 187-195.
- Kanissery, R., Gairhe, B., Kadyampakeni, D., Batuman, O., & Alferez, F. (2019). Glyphosate: Its environmental persistence and impact on crop health and nutrition. *Plants*, 8(11), 499. doi:10.3390/plants8110499
- Karl, A. D., Merwin, I. A., Brown, M. G., Hervieux, R. A., & Vanden Heuvel, J. E. (2016a). Impact of Undervine Management on Vine Growth, Yield, Fruit Composition, and Wine Sensory Analyses in Cabernet franc. *American Journal of Enology and Viticulture*, 67(3), 269-280. doi:10.5344/ajev.2016.15061
- Karl, A. D., Merwin, I. A., Brown, M. G., Hervieux, R. A., & Vanden Heuvel, J. E. (2016b). Under-vine Management Impacts Soil Properties and Leachate Composition in a New York State Vineyard. *HortScience*, 51(7), 941-949. doi:10.21273/hortsci.51.7.941
- Komainda, M., Küchenmeister, K., Küchenmeister, F., Breitsameter, L., Wrage-Mönnig, N., Kayser, M., & Isselstein, J. (2019). Forage legumes for future dry climates: Lower relative biomass losses of minor forage legumes compared to *Trifolium repens* under conditions of periodic drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(5), 460-469. doi:10.1111/jac.12337
- Kops, J. (1853). *Flora Batava: Of afbeelding en beschrijving van Nederlandsche gewassen* (Bd. 7, Deel VII). Sepp en Zoon.
- Kruidhof, H., Bastiaans, L., & Kropff, M. (2008). Ecological weed management by cover cropping: effects on weed growth in autumn and weed establishment in spring. *Weed Research*, 48(6), 492-502.
- Kühn, I., Durka, W., & Klotz, S. (2004). BioFlor: a new plant-trait database as a tool for plant invasion ecology. *Diversity and Distributions*, 10(5/6), 363-365.
- Lanari, V., Pallotti, L., Lattanzi, T., & Silvestroni, O. (2025). Grapevine Root Distribution and Density in Deep Soil Layers Under Different Soil Management Practices. *Plants*, 14(12), 1823.
- Lang, C. P., Kurz, O., Löbmann, A., Klauk, B., Petersen, J., & Petgen, M. (2022). Could electricity be an alternative method of weed control in the vineyard? *Julius-Kühn-Archiv*(468).
- Lardschneider, E. (2004). Düngung und Bodenpflege im ökologischen Anbau. *Boden und Pflanzenernährung im Obstbau, Weinbau und Bioanbau* (pp. 189-201). Laimburg, Italien: Versuchszentrum Laimburg / Südtiroler Beratungsring für Obst- und Weinbau.
- Lauber, K., Wagner, G., Gygax, A., & Wagner, G. (2018). *Flora Helvetica: flore illustrée de Suisse: avec 3200 descriptions de plantes à fleurs, de fougères et de plantes cultivées, avec cartes de distribution*. Bern, Schweiz: Haupt Verlag.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68. doi:10.1038/nature16069
- LfL Bayern (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft). (2016). Einsatzumfang von Glyphosat. Zugriff am 29.04.2024 unter <https://www.lfl.bayern.de/ips/unkraut/192703/index.php>

- LfL Bayern (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft). (2025). Zugriff am 05.05.2025 unter <https://www.lfl.bayern.de/ipz/gruenland/022473/index.php>
- LGB RLP (Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz). (2025). GeoBox-Viewer RLP. Zugriff am 05.04.2025 unter <https://geobox-i.de/GBV-RLP/>
- LGRB (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau). (2025). GeoFachdaten BW Bodenkarte von Baden-Württemberg (BK50). Zugriff am 10.05.2025 unter <https://maps.lgrb-bw.de/>
- Linares Torres, R., De La Fuente Lloreda, M., Junquera Gonzalez, P., Lissarrague García-Gutierrez, J. R., & Baeza Trujillo, P. (2018). Effect of soil management strategies on the characteristics of the grapevine root system in irrigated vineyards under semi-arid conditions. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 24(4), 439-449. doi:10.1111/ajgw.12359
- Londo, G. (1976). The decimal scale for releves of permanent quadrats. *Vegetatio*, 33(1), 61-64.
- Lopes, C., Monteiro, A., Ruckert, F., Gruber, B., Steinberg, B., & Schultz, H. (2004). Transpiration of grapevines and co-habiting cover crop and weed species in a vineyard. A "snapshot" at diurnal trends. *Vitis*, 43(3), 111-118.
- Lorenz, D., Eichhorn, K., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., & Weber, E. (1994). Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala. *Wein-Wissenschaft*, 49(2), 66-70.
- LVWO Weinsberg (Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg). (2025). Pflanzenschutzmittelliste 2025 – Herbizide im Weinbau. Zugriff am 16.04.2025 unter <https://lvwo.landwirtschaft-bw.de/Lde/Startseite/Fachinformationen/Rebschutz>
- Ma, Y., Xiao, C., Liu, J., & Ren, G. (2025). Nutrient-dependent regulation of symbiotic nitrogen fixation in legumes. *Hortic Res*, 12(3), uhae321. doi:10.1093/hr/uhae321
- MacLaren, C., Swanepoel, P., Bennett, J., Wright, J., & Dehnen-Schmutz, K. (2019). Cover crop biomass production is more important than diversity for weed suppression. *Crop Science*, 59(2), 733-748.
- Magné, C., Saladin, G., & Clément, C. (2006). Transient effect of the herbicide flazasulfuron on carbohydrate physiology in *Vitis vinifera* L. *Chemosphere*, 62(4), 650-657.
- Magyar, E., Opitz von Boberfeld, W., Szemán, L., & Laser, H. (2004). Keimungsvergalten von Kräutersaatgut unter variierten Umweltbedingungen. *Die Bodenkultur*, 55(1), 13-19.
- Mainardis, M., Boscutti, F., Rubio Cebolla, M. D. M., & Pergher, G. (2020). Comparison between flaming, mowing and tillage weed control in the vineyard: Effects on plant community, diversity and abundance. *PLoS One*, 15(8). doi:10.1371/journal.pone.0238396
- Maixner, M., Porten, M., & Schmitt, T. (2013). Wechselwirkungen zwischen der Bewirtschaftung und der Biodiversität von Weinbau-Steillagen. *Julius-Kühn-Archiv*(436), 62.
- Malkomes, H.-P. (2006). Einfluss einiger neuerer Herbizide auf mikrobielle Aktivitäten im Boden sowie auf einige aus dem Boden isolierte Pilze unter Laborbedingungen. *Heft 7*, 58(7), 165-173.
- Malysheva, N. Y., Shelenga, T. V., Solovyeva, A. E., & Malyshev, L. L. (2022). Specific features of the biochemical composition of life forms of black medic (*Medicago lupulina* L.). *Ecological genetics*, 20(3), 231-242.

- Manzone, M., Demeneghi, M., Marucco, P., Grella, M., & Balsari, P. (2020). Technical solutions for under-row weed control in vineyards: Efficacy, costs and environmental aspects analysis. *Journal of Agricultural Engineering*, 51(1), 36-42. doi:10.4081/jae.2020.991
- 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. *Sci Total Environ*, 831, 154800. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.154800
- Marques, M. J., Ruiz-Colmenero, M., Bienes, R., García-Díaz, A., & Sastre, B. (2020). Effects of a Permanent Soil Cover on Water Dynamics and Wine Characteristics in a Steep Vineyard in the Central Spain. *Air, Soil and Water Research*, 13. doi:10.1177/1178622120948069
- Masclef, A. (1893). *Atlas des plantes de France, utiles, nuisibles et ornementales* (Vol. 1): Librairie des Sciences Naturelles, P. Klincksieck, éditeur.
- Mauro, R., Sortino, O., Dipasquale, M., & Mauromicale, G. (2014). Phenological and growth response of legume cover crops to shading. *The Journal of Agricultural Science*, 152(6), 917-931.
- McKenzie-Gopsill, A., Mills, A., MacDonald, A. N., & Wyand, S. (2022). The importance of species selection in cover crop mixture design. *Weed Science*, 70(4), 436-447. doi:10.1017/wsc.2022.28
- Meergans, F., Aue, C., Knieper, C., Kochendörfer, S., Lenschow, A., & Pahl-Wostl, C. (2020). *Im Spannungsfeld von Wasser-, Energie-und Landwirtschaftspolitik: Neue Wege für den Wasserschutz in der Weser-Ems-Region* (No. 13/2020). Analysen und Stellungnahmen. doi:10.23661/as13.2020
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7, 100777.
- Meteostat. (2025). Meteostat Wetterdaten. Zugriff am 18.05.2025 unter <https://meteostat.net>
- Modiba, M. M., Ocansey, C. M., Ibrahim, H. T. M., Birkás, M., Dekemati, I., & Simon, B. (2024). Assessing the impact of tillage methods on soil moisture content and crop yield in Hungary. *Agronomy*, 14(8), 1606. doi:10.3390/agronomy14081606
- Mondal, S., Kumar, M., Haque, S., & Kundu, D. (2017). Phytotoxicity of glyphosate in the germination of *Pisum sativum* and its effect on germinated seedlings. *Environ Health Toxicol*, 32, e2017011. doi:10.5620/eht.e2017011
- Moradi, P., Ford-Lloyd, B., & Pritchard, J. (2014). Plant-water responses of different medicinal plant thyme (*Thymus* spp.) species to drought stress condition. *Australian Journal of Crop Science*, 8(5), 666-673.
- Morozova, K., Andreotti, C., Armani, M., Cavani, L., Cesco, S., Cortese, L., Gerbi, V., Mimmo, T., Spena, P. R., & Scampicchio, M. (2017). Indirect effect of glyphosate on wine fermentation studied by microcalorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(2), 1351-1360.
- Mueller, C. W., Baumert, V., Carminati, A., Germon, A., Holz, M., Kögel-Knabner, I., Peth, S., Schlüter, S., Uteau, D., Vetterlein, D., Teixeira, P., & Vidal, A. (2024). From rhizosphere to detritosphere – Soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*, 193. doi:10.1016/j.soilbio.2024.109396
- Müller, E., Lipps, H.-P., & Walg, O. (2019). *Der Winzer. Weinbau* (7. Aufl). Stuttgart, Deutschland: Eugen Ulmer KG.

- Müller, F., Ritz, C. M., Welk, E., & Wesche, K. (2021). Rothmaler-Exkursionsflora von Deutschland. *Gefäßpflanzen: Grundband*. Springer.
- Mundy, D. C., Elmer, P., Wood, P., & Agnew, R. (2022). A Review of Cultural Practices for Botrytis Bunch Rot Management in New Zealand Vineyards. *Plants (Basel)*, 11(21). doi:10.3390/plants11213004
- Ngouajio, M., & McGiffen, M. E. (2002). Going organic changes weed population dynamics. *HortTechnology*, 12(4), 590-596.
- Nordmeyer, H. (2016). Glyphosatanwendung bei Direktsaat von Winterweizen unter Berücksichtigung der Bodenbearbeitungshistorie. *Julius-Kühn-Archiv*(452), 290.
- North Carolina State University. (2025). North Carolina Extension Gardener Plant Toolbox. Zugriff am 30.05.2025 unter https://plants.ces.ncsu.edu/find_a_plant/
- Nouri, A., Lukas, S., Singh, S., Singh, S., & Machado, S. (2022). When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(15), 4736-4749.
- Novara, A., Catania, V., Tolone, M., Gristina, L., Laudicina, V. A., & Quatrini, P. (2020). Cover Crop Impact on Soil Organic Carbon, Nitrogen Dynamics and Microbial Diversity in a Mediterranean Semiarid Vineyard. *Sustainability*, 12(8). doi:10.3390/su12083256
- Osipitan, O. A., Dille, J. A., Assefa, Y., Radicetti, E., Ayeni, A., & Knezevic, S. Z. (2019). Impact of cover crop management on level of weed suppression: a meta-analysis. *Crop Science*, 59(3), 833-842.
- Pal, J., Adhikari, R., & Negi, J. (2016). Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on growth and green herb yield of *Thymus serpyllum*. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(1), 406-410.
- Pardini, A., Faiello, C., Snowball, R., Mancuso, S., & Longhi, F. (2002). Cover crop species and their management in vineyards and olive groves. *Advances in horticultural science*. 16 (N. 3-4), 2002, 1000-1010.
- Partzsch, M. (2010). Zur Keimungsbiologie acht ausgewählter kurzlebiger Ruderal-und Segetalarten. *Hercynia NF*, 43(1), 149-166.
- Partzsch, M. (2016). Zur Keimungsbiologie von zwölf ausgewählten Xerothermrassen-, Saum- und Waldarten-Teil 6: Lamiaceae. *Hercynia-Ökologie und Umwelt in Mitteleuropa*, 49(1/2), 27-45.
- Pergher, G., Gubiani, R., & Mainardis, M. (2019). Field Testing of a Biomass-Fueled Flamer for In-Row Weed Control in the Vineyard. *Agriculture*, 9(10). doi:10.3390/agriculture9100210
- Petgen, M., & Kurz, O. (2019). Unterstockbodenpflege 4.0 - vorläufige Bilanz. *Der Deutsche Weinbau*, 16-17, 35-42.
- Pigott, C. (1955). *Thymus L.* *Journal of Ecology*, 43(1), 365-387.
- Poirier, V., Roumet, C., & Munson, A. D. (2018). The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 246-259. doi:10.1016/j.soilbio.2018.02.016
- Qi, Y., Liu, D., Zhao, W., Liu, C., Zhou, Z., & Wang, P. (2015). Enantioselective phytotoxicity and bioactivity of the enantiomers of the herbicide napropamide. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 125, 38-44.
- Regnery, D. (2013). Mit Lava und Co herbizidfrei gegen Beikräuter im Unterstockbereich. *Das Deutsche Weinmagazin*, 13, 11-13.
- Renaud-Gentié, C., Dieu, V., Thiollot-Scholtus, M., & Mérot, A. (2019). Addressing organic viticulture environmental burdens by better understanding interannual impact variations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(7), 1307-1322. doi:10.1007/s11367-019-01694-8

- Rognli, O. A. (1988). Species aspects of breeding herbage varieties for northern marginal regions. *Agricultural and Food Science*, 60(4), 181-189.
- Rokich, D. P., Harma, J., Turner, S. R., Sadler, R. J., & Tan, B. H. (2009). Fluazifop-p-butyl herbicide: Implications for germination, emergence and growth of Australian plant species. *Biological Conservation*, 142(4), 850-869.
- Romano-Armada, N., Amoroso, M. J., & B. Rajal, V. (2017). Effect of glyphosate application on soil quality and health under natural and zero tillage field condition. *Soil & Environment*, 36(2), 141-154. doi:10.25252/se/17/51241
- Rydgren, K., Auestad, I., Hamre, L. N., Hagen, D., Rosef, L., & Skjerdal, G. (2016). Long-term persistence of seeded grass species: An unwanted side effect of ecological restoration. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 13591-13597.
- Saaten Zeller GmbH & Co. KG (Saaten Zeller GmbH & Co. KG, Eichenbühl-Guggenberg, Deutschland). (2025). Zugriff am 07.05.2025 unter <https://www.saaten-zeller.de/landwirtschaft/weinbergsbegruenung>
- Schanderl, H. (1943). Untersuchungen über den Stickstoffhaushalt von Nichtleguminosen und Leguminosen. *Planta*, 33(3), 424-457.
- Scheidweiler, M., Kerbeck, M. F., & Kauer, R. (2017). Chancen und Grenzen der gezielten Unterstockbegrünung - Erfahrungen aus der Praxis. *Tagungsband zum XIX. Kolloquium internationaler Arbeitskreis für Bodenbewirtschaftung und Qualitätsmanagement im Weinbau*. Krems, Österreich: Weinbaukompetenzzentrum Krems.
- Scherer, H. W. (2008). Impact of sulfur on N₂ fixation of legumes. In N. A. Khan, S. Singh, & S. Umar (Hrsg.) *Sulfur assimilation and abiotic stress in plants*, 43-54. Berlin, Deutschland: Springer.
- Schmid, A., & Hanni, E. (2015). Pflanzen für den Unterstockbereich. *Obstbau, Weinbau: Fachmagazin des Beratungsrings*, 3, 87-89.
- Schulte, M., Thiel, J., & Theuvsen, L. (2016). Der Einsatz von Glyphosat im deutschen Sonderkulturanbau – Eine qualitative Erhebung und ökonomische Bewertung. *Thünen Report*, 44, 135-157. doi:10.3220/REP1479977706000
- Schultz, H., & Hofmann, M. (2008). Einfluss der Klimaentwicklung auf den Wasserhaushalt von Rebstandorten Möglichkeiten der Modellierung von Steillagenregionen. *Beitrag zum Integrierten Klimaschutzprogramm des Landes Hessen (Inklim 2012 II plus) im Auftrag des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie*. Wiesbaden, Deutschland: Fachgebiet Weinbau der Forschungsanstalt Geisenheim.
- Schulze, J., Temple, G., Temple, S. J., Beschow, H., & Vance, C. P. (2006). Nitrogen fixation by white lupin under phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 98(4), 731-740.
- Serpa, D., Nunes, J., Keizer, J., & Abrantes, N. (2017). Impacts of climate and land use changes on the water quality of a small Mediterranean catchment with intensive viticulture. *Environmental Pollution*, 224, 454-465.
- Shrestha, A., & Fidelibus, M. (2005). Grapevine row orientation affects light environment, growth, and development of black nightshade (*Solanum nigrum*). *Weed Science*, 53(6), 802-812.
- Silvestroni, O., Dottori, E., Pallotti, L., Lattanzi, T., Santilocchi, R., & Lanari, V. (2024). Using Legume-Enriched Cover Crops to Improve Grape Yield and Quality in Hillside Vineyards. *Agronomy*, 14(11). doi:10.3390/agronomy14112528
- Simonsen, L., Fomsgaard, I. S., Svensmark, B., & Spliid, N. H. (2008). Fate and availability of glyphosate and AMPA in agricultural soil. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 43(5), 365-375.

- Soares, C., Fernandes, B., Paiva, C., Nogueira, V., Cachada, A., Fidalgo, F., & Pereira, R. (2023). Ecotoxicological relevance of glyphosate and flazasulfuron to soil habitat and retention functions – Single vs combined exposures. *Journal of Hazardous Materials*, 442, 130128.
- Spohn, M., Golte-Bechtle, M., & Spohn, R. (2015). *Was blüht denn da?* (2. Aufl. ed.). Stuttgart, Deutschland: Kosmos.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., & Streck, T. (2020). *Bodenkunde und Standortlehre* (4. Aufl. ed.). Stuttgart, Deutschland: utb GmbH.
- Steinkellner, S. (2019). Nationale Machbarkeitstudie zum Glyphosatausstieg. *Endbericht zum Forschungsprojekt Nummer 101347*.
- Stolle, M. (2007). 5.4 Ansaaten (Offenland). *Handbuch naturnahe Begrünung von Rohböden*, 92-107. Stuttgart, Deutschland: Teubner Verlag.
- STOMA GmbH (STOMA GmbH, Siegburg, Deutschland). (2025). Pflanzkulturgefäß Kick/Brauckmann. Zugriff am 07.05.2025 unter <https://www.stoma-gmbh.de/planzkulturgefassa-kick-brauckmann.html>
- Strudley, M. W., Green, T. R., & Ascough II, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4-48. doi:10.1016/j.still.2008.01.007
- Sturm, D. J., Peteinatos, G., Gerhards, R., & Riemens, M. (2018). Contribution of allelopathic effects to the overall weed suppression by different cover crops. *Weed Research*, 58(5), 331-337. doi:10.1111/wre.12316
- Sulas, L., Mercenaro, L., Campesi, G., & Nieddu, G. (2017). Different cover crops affect nitrogen fluxes in mediterranean vineyard. *Agronomy Journal*, 109(6), 2579-2585.
- Susaj, L., Susaj, E., Belegu, M., Mustafa, S., Dervishi, B., & Ferraj, B. (2013). Effects of different weed management practices on production and quality of wine grape cultivar Kallmet in North-Western Albania. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11(1), 379-382.
- Szabó-Szóllósi, T., Baracsi, É., Csontos, P., Papp, L., Kisvarga, S., Orlóci, L., Házi, J., Kende, Z., Saláta, D., Fuchs, M., Keleti, J., Tarnawa, Á., Rusvai, K., & Penksza, K. (2024). Evaluation of Native Festuca Taxa for Sustainable Application in Urban Environments: Their Characteristics, Ornamental Value, and Germination in Different Growing Media. *Soil Systems*, 8(3). doi:10.3390/soilsystems8030099
- Taleb, M. H., Majidi, M. M., Pirnajmedin, F., & Maibody, S. (2023). Plant functional trait responses to cope with drought in seven cool-season grasses. *Sci Rep*, 13(1), 5285. doi:10.1038/s41598-023-31923-y
- Teasdale, J., & Mohler, C. (1993). Light transmittance, soil temperature, and soil moisture under residue of hairy vetch and rye. *Agronomy Journal*, 85(3), 673-680.
- TOMST s.r.o. (2025). TMS Dataloggers. Zugriff am 08.05.2025 unter <https://tomst.com/web/en/systems/tms/tms-4/>
- Usowicz, B., Lipiec, J., Usowicz, J. B., & Marczewski, W. (2013). Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: Comparison of measured and model-predicted data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 536-541.
- Vadez, V., Rao, S., Kholova, J., Krishnamurthy, L., Kashiwagi, J., Ratnakumar, P., Sharma, K., Bhatnagar-Mathur, P., & Basu, P. (2008). Root research for drought tolerance in legumes: Quo vadis? *Journal of Food Legumes*, 21(2), 77-85.
- Van Assche, J. A., Debucquoy, K. L. A., & Rommens, W. A. F. (2003). Seasonal cycles in the germination capacity of buried seeds of some Leguminosae (Fabaceae). *New Phytologist*, 158(2), 315-323. doi:10.1046/j.1469-8137.2003.00744.x

- van Bruggen, A. H. C., Finckh, M. R., He, M., Ritsema, C. J., Harkes, P., Knuth, D., & Geissen, V. (2021). Indirect Effects of the Herbicide Glyphosate on Plant, Animal and Human Health Through its Effects on Microbial Communities. *Frontiers in Environmental Science*, 9. doi:10.3389/fenvs.2021.763917
- Vanden Heuvel, J., & Centinari, M. (2021). Under-Vine Vegetation Mitigates the Impacts of Excessive Precipitation in Vineyards. *Front Plant Sci*, 12, 713135. doi:10.3389/fpls.2021.713135
- Vanhie, T. R., Tardif, F. J., Smith, P., Vazan, S., Cowbrough, M., & Swanton, C. J. (2020). An integrated weed management strategy for the control of horseweed (*Conyza canadensis*). *Weed Science*, 69(1), 119-127. doi:10.1017/wsc.2020.92
- Vivanco, P., Oliveira, J. A., & Martín, I. (2021). Optimal germination conditions for monitoring seed viability in wild populations of fescues. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19(3). doi:10.5424/sjar/2021193-18025
- Vukicevich, E., Lowery, T., & Hart, M. (2019). Effects of living mulch on young vine growth and soil in a semi-arid vineyard. *Vitis: Journal of Grapevine Research*, 58(3), 113-122.
- Walz, O. (2016). *Möglichkeiten und Grenzen der mechanischen Unterstockbodenpflege*. Tagungsband der 60. WINTERTAGUNG, Bad Kreuznach.
- Wild, J., Kopecký, M., Macek, M., Šanda, M., Jankovec, J., & Haase, T. (2019). Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 40-47. doi:10.1016/j.agrformet.2018.12.018
- Willoughby, I. H., & Forster, J. (2022). The herbicide cycloxydim is an effective alternative to propyzamide or glyphosate for the control of the forest grass weeds *Molinia caerulea*, *Calamagrostis epigejos*, *Deschampsia flexuosa* and *Holcus lanatus*. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 95(2), 274-286. doi:10.1093/forestry/cpab035
- Winter, S., Bauer, T., Strauss, P., Kratschmer, S., Paredes, D., Popescu, D., Landa, B., Guzman, G., Gomez, J. A., Guernion, M., Zaller, J. G., & Batary, P. (2018). Effects of vegetation management intensity on biodiversity and ecosystem services in vineyards: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 55(5), 2484-2495. doi:10.1111/1365-2664.13124
- Wise, A., & Walter-Peterson, H. (2018). *Expanding the Use of Under-Vine Cover Crops in New York Vineyards* (Appellation Cornell Research Focus No. 2018-2). Geneva, NY, USA: Cornell University, College of Agriculture and Life Sciences.
- Wiström, B., Nilsen, A. B., & Bjørn, M. C. (2018). *Use of cover crops when establishing woody plantings* (IGN Rapport Nr. 281). Copenhagen, Denmark: University of Copenhagen, Department of Geosciences and Natural Resource Management.
- Zaller, J. G., Cantelmo, C., Santos, G. D., Muther, S., Gruber, E., Pallua, P., Mandl, K., Friedrich, B., Hofstetter, I., Schmuckenschlager, B., & Faber, F. (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. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(23), 23215-23226. doi:10.1007/s11356-018-2422-3
- Zehner, S., & Göttfert, M. (2015). Knöllchenbakterien: Helfer der Landwirtschaft: Mikrobe des Jahres 2015. *Biologie in unserer Zeit*, 45(5), 296-302.
- Ziegler, B. (2011). *Rebendüngung*. In *Weinbau Informationen: Ausgewählte Themen für die Praxis* (Broschürenreihe der Abteilung Weinbau & Oenologie, Gruppe Weinbau, des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum Rheinland). Neustadt an der Weinstraße, Deutschland: DLR Rheinland.

- Ziegler, B. (2012). *Bodenpflege im Weinbau*. In *Weinbau Informationen: Ausgewählte Themen für die Praxis* (Broschürenreihe der Abteilung Weinbau & Oenologie, Gruppe Weinbau, des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum Rheinpfalz). Neustadt an der Weinstraße, Deutschland: DLR Rheinpfalz.

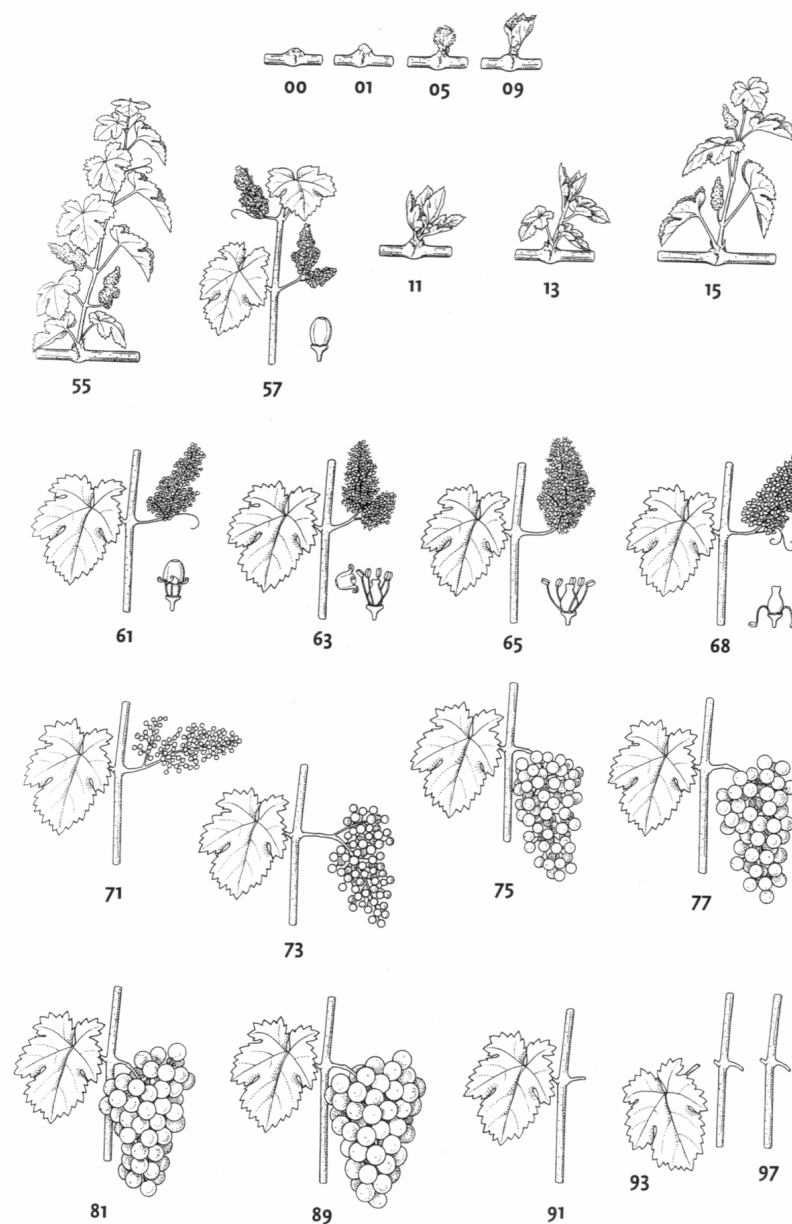
8 Anhang

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Entwicklungsstadien der Weinrebe, BBCH-Skala nach LORENZ et al. (1994).....	142
Anhang 2: Versuchsplan der Ertragsflächen HUMO (links) und MECKEN (rechts).....	143
Anhang 3: Versuchsplan der Junganlagen DEIDES (links) und BRETZ (rechts).....	144
Anhang 4: Fotoaufnahmen der Begrünungsvarianten (v. l. n. r.) Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Aufnahme am 11.07.2024 in MECKEN), Rot-Schwingel (Aufnahme am 11.07.2024 in MECKEN), Sand-Thymian (Aufnahme am 10.07.2024 in HUMO) und Mischung Mythopia 3 (Aufnahme 13.07.2022 in HUMO) (Bildquellen: K. Weihbrecht).....	145
Anhang 5: Fotoaufnahmen der einzelnen Maßnahmen zum Vorgehen der Saatbettbereitung und Einsaat in allen Versuchsflächen (v. l. n. r.): Scheibenpflug zur Vorbearbeitung, Hacken, Rechen und Einsaat per Hand (Bildquellen: K. Weihbrecht/ J. Schiller).....	146
Anhang 6: Lösungsvorschlag zur technischen Umsetzung der Unterstockbegrünung: Saatbettvorbereitung mit Unterstockkreisel der Firma Braun GmbH, Landau, Deutschland und Einsaat mit umgebauter pneumatischer Sämaschine der Firma APV – Technische Produkte GmbH, Hötzelndorf, Österreich (Bildquelle: K. Weihbrecht).....	147
Anhang 7: Kostenrechnung der Methoden zur Etablierung einer Unterstockbegrünung sowie Literaturwerte für chemische und mechanische Beikrautregulierung (nach BECKER et al. 2017).....	148
Anhang 8: Detaillierte zeitlicher Verlauf des mittleren Deckungsgrades der Begrünungsvarianten in der Versuchsfläche HUMO (Einsaattermin: 15.09.2021); Begr_Med = <i>Medicago lupulina</i> , Begr_Fes = <i>Festuca rubra</i> , Begr_Thym = <i>Thymus serpyllum</i> , Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; n = 4.....	149

Anhang 1: Entwicklungsstadien der Weinrebe, BBCH-Skala nach LORENZ et al. (1994).**BBCH Beschreibung**

00	Vegetationsruhe	65	Vollblüte; ca. 50 % der Blütenköppchen sind abgeworfen
01	Beginn des Knospenschwellens: Augen beginnen sich innerhalb der Knospenschuppen zu vergrößern	68	Abgehende Blüte; ca. 80 % der Blütenköppchen sind abgeworfen
05	„Wolle-Stadium“: wolleartiger brauner Haarbesatz deutlich sichtbar	69	Ende der Blüte
09	Knospenaufbruch: grüne Triebspitze wird sichtbar	71	Fruchtsatz; Fruchtknoten beginnen sich zu vergrößern; „Putzen der Beeren“ wird abgeschlossen
11	Erstes Blatt entfaltet und vom Trieb abgespreizt	73	Beeren sind schrotkorngroß; Trauben beginnen sich abzusenken
13	3 Blätter entfaltet	75	Beeren sind erbsengroß; Trauben hängen
15	5 Blätter entfaltet fortlaufend bis	77	Beginn des Traubenschlusses
19	9 und mehr Blätter entfaltet	79	Ende des Traubenschlusses
55	„Gescheine“ (Infloreszenzen) vergrößern sich; Einzelblüten sind dicht zusammengedrängt	81	Beginn der Reife; Beeren beginnen hell zu werden (bzw. beginnen sich zu verfärben)
57	„Gescheine“ (Infloreszenzen) sind voll entwickelt; die Einzelblüten spreizen sich	85	Weichwerden der Beeren
61	Beginn der Blüte; die ersten Blütenköppchen lösen sich vom Blütenboden	89	Vollreife der Beeren (Lesereife)
63	Vorblüte; ca. 30 % der Blütenköppchen sind abgeworfen	91	Nach der Lese; Holzreife wird abgeschlossen
		93	Beginn des Laubfalls
		97	Ende des Laubfalls



Anhang 2: Versuchsplan der Ertragsflächen HUMO (links) und MECKEN (rechts).

Versuchsfläche: HUMO

Rebsorte: Riesling

Standort: 49.370314° N, 8.186277° E

Gemarkung: Neustadt-Mußbach

Anlage: Hundertmorgen Nord

Flächengröße: 15,6 ar

Gassenbegrünung: vollständig begrünt

Bodenart: sandiger Lehm

Unterstockmanagement

vor Versuchsbeginn: mechanisch

Versuchsfläche: MECKEN

Rebsorte: Sauvignon Blanc

Standort: 49.37954° N, 8.19489° E

Gemarkung: Neustadt-Mußbach

Anlage: Meckenheimer Str.

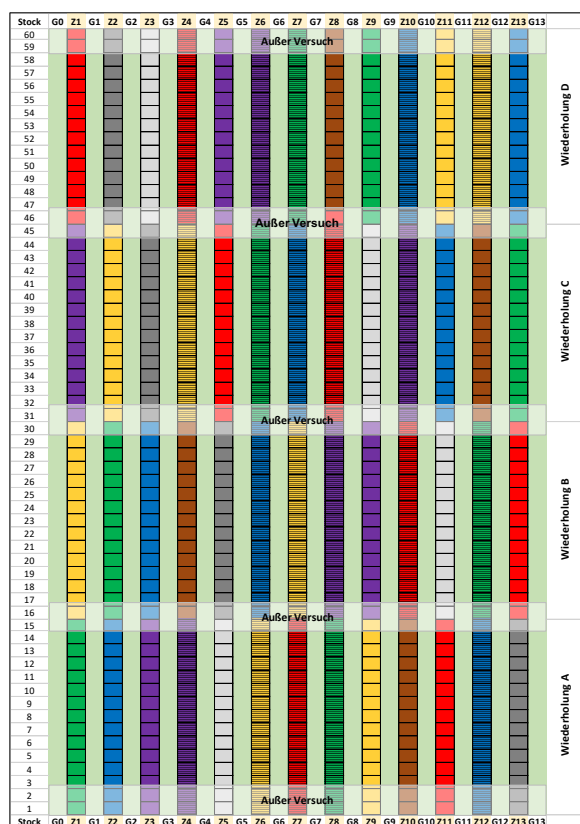
Flächengröße: 23,4 ar

Gassenbegrünung: alternierend begrünt

Bodenart: lehmiger Sand

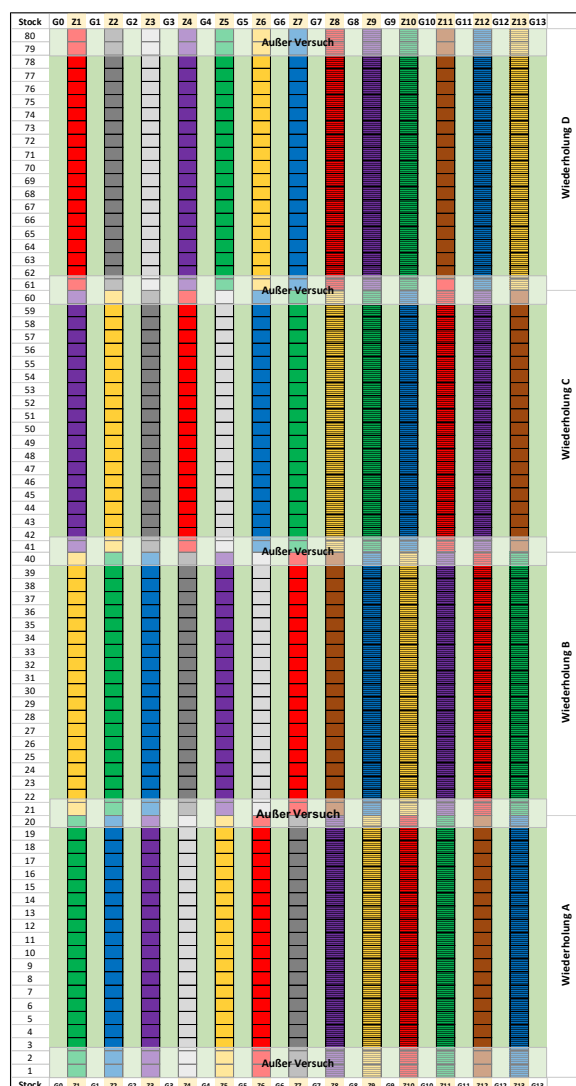
Unterstockmanagement

vor Versuchsbeginn: Herbizid-Behandlung



Varianten	Einsaattermin		Saatstärke
	Sep 21	Sep 22*	
V0: Nullkontrolle			
V1: mechanisch (Scheibenpflug)			
V2: chemisch (Glyphosat & Flazasulfuron)			
V3: Gelbklee Mantelsaat <i>Medicago Lupulina</i>			2,0 +20%
V4: Rot-Schwingel <i>Festuca rubra</i>			4,0 +20%
V5: Sand-Thymian <i>Thymus serpyllum</i>			0,5 +20%
V6: Mischung1 (Rebzeilenbegrünung)			1,0 +20%
V7: Mischung 2 (Mythopia 3)			1,5 +20%

* Die eingesäten Flächen des zweiten Einsaattermins wurden aufgrund eines geringeren Deckungsgrades in dieser Arbeit nicht berücksichtigt



Anhang 3: Versuchsplan der Junganlagen DEIDES (links) und BRETZ (rechts).

Versuchsfläche: DEIDES

Rebsorte: Riesling

Standort: 49.41114° N, 8.17124° E

Gemarkung: Deidesheim

Anlage: Gemminger

Flächengröße: 8,3 ar

Gassenbegrünung: vollständig begrünt

Bodenart: sandiger Lehm

Unterstockmanagement

vor Versuchsbeginn: mechanisch

Versuchsfläche: BRETZ

Rebsorte: Cabernet Cortis

Standort: 49.17874° N, 9.39065° E

Gemarkung: Bretzfeld

Anlage: Harschberg

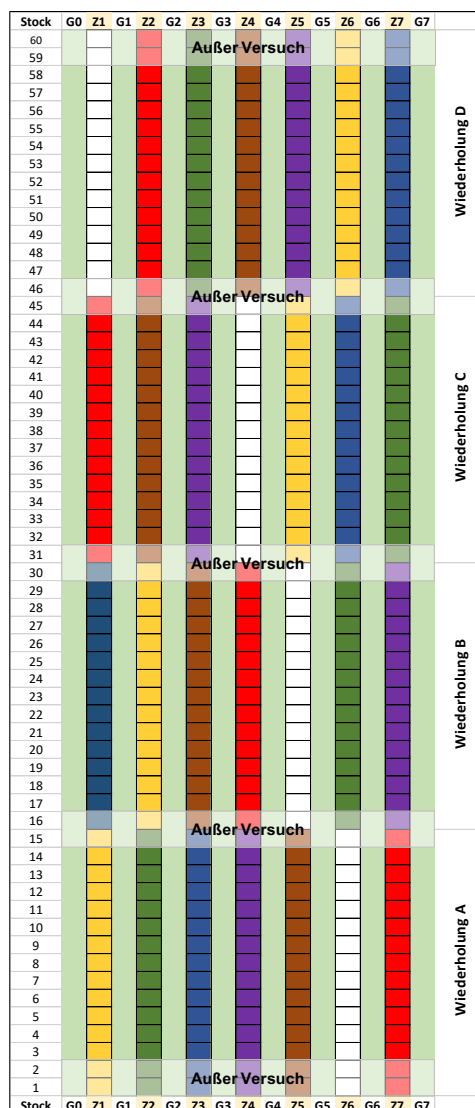
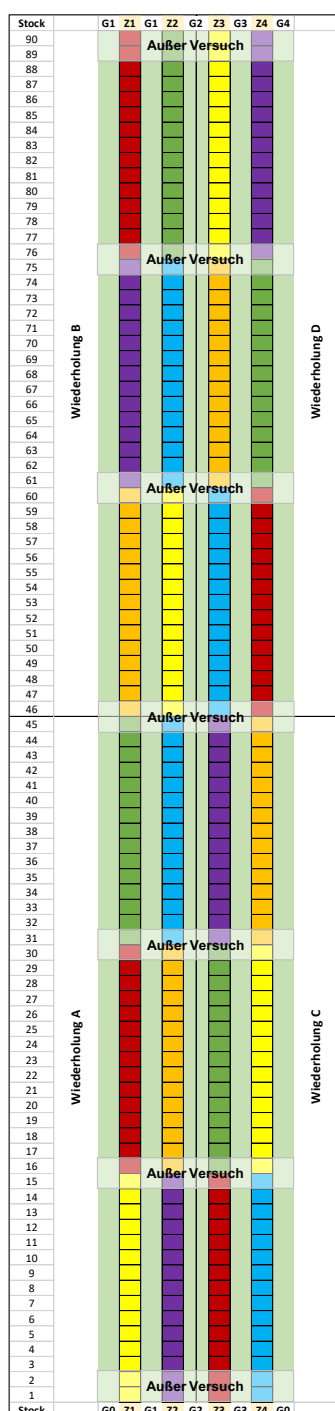
Flächengröße: 10,2 ar

Gassenbegrünung: alternierend begrünt

Bodenart: toniger Lehm

Unterstockmanagement

vor Versuchsbeginn: mechanisch



Varianten	Einsaattermin	Saatstärke
V0: Nullkontrolle	Mai / Sep 2022	
V3: Gelbklee Mantelsaat <i>Medicago Lupulina</i>		2,0 +20%
V4: Rot-Schwingel <i>Festuca rubra</i>		4,0+ 20%
V5: Sand-Thymian <i>Thymus serpyllum</i>		0,5 +20%
V6: Mischung1 (Rebzeilenbegrünung)		1,0 +20%
V7: Mischung 2 (Mythopia 3)		1,5 +20%
V8: Kleine Braunelle <i>Prunella vulgaris</i>		0,5 +20%
V9: Weißklee <i>Trifolium repens</i>		1,5 +20%
Außer Versuch		

Anhang 4: Fotoaufnahmen der Begrünungsvarianten (v. l. n. r.) Mischung „Rebzeilenbegrünung“ (Aufnahme am 11.07.2024 in MECKEN), Rot-Schwingel (Aufnahme am 11.07.2024 in MECKEN), Sand-Thymian (Aufnahme am 10.07.2024 in HUMO) und Mischung Mythopia 3 (Aufnahme 13.07.2022 in HUMO) (Bildquellen: K. Weihbrecht).



Anhang 5: Fotoaufnahmen der einzelnen Maßnahmen zum Vorgehen der Saatbettbereitung und Einsaat in allen Versuchsflächen (v. l. n. r.): Scheibenpflug zur Vorbearbeitung, Hacken, Rechen und Einsaat per Hand (Bildquellen: K. Weihbrecht/ J. Schiller).



Anhang 6: Lösungsvorschlag zur technischen Umsetzung der Unterstockbegrünung: Saatbettvorbereitung mit Unterstockkreisel der Firma Braun GmbH, Landau, Deutschland und Einsaat mit umgebauter pneumatischer Sämaschine der Firma APV - Technische Produkte GmbH, Hötzelstdorf, Österreich (Bildquelle: K. Weihbrecht).



Anhang 7: Kostenrechnung der Methoden zur Etablierung einer Unterstockbegrünung sowie Literaturwerte für chemische und mechanische Beikrautregulierung (nach BECKER et al. 2017).

Einmalige Kosten für Saatbettbereitung und Einsaat der Unterstockbegrünung:

Methode	Maßnahme	Arbeitsaufwand ¹		Schlepper ²		Geräte ³	Material ⁴	Summe
		Std./ha	€/ha	Std./ha	€/ha	€/ha	€/ha	€/ha
Unterstockbegrünung händisch (gemessen in Junganlage DEIDES und BRETZ mit geringerem Beikrautdruck)	Hacken	11,1	167 €	–	–	–	–	167 €
	Rechen	11,1	167 €	–	–	–	–	167 €
	Einsaat	16,7	251 €	–	–	–	60 €	311 €
								645 €
Unterstockbegrünung händisch (gemessen in Ertragsanlage HUMO und MECKEN mit höherem Beikrautdruck)	Hacken	72,3	1.085 €	–	–	–	–	1.085 €
	Rechen	11,1	167 €	–	–	–	–	167 €
	Einsaat	16,7	251 €	–	–	–	60 €	311 €
								1.563 €
Unterstockbegrünung maschinell (1-mal Kreisel und Sämaschine in Kombination)	Unterstock- kreisel (beidseitig)	1,0	22 €	1,0	40 €	59 €	–	121 €
	Sämaschine	1,0	22 €	1,0	40 €	41 €	60 €	163 €
								284 €

Jährlich anfallende Kosten für Beikrautregulierungsmaßnahmen:

Chemische Beikrautregulierung (2-mal jährlich Herbizid)	Herbizid- spritze (beidseitig)	2,0	44 €	2,0	80 €	16 €	58 €	198 €
Mechanische Beikrautregulierung (4-mal jährlich, ohne Kombination, ohne Berücksichtigung der Stock- beschädigungen)	Scheiben- pflug (beidseitig)	8,0	176 €	8,0	320 €	33 €	–	529 €

¹ Arbeitszeit gemessen (Unterstockbegrünung händisch) bzw. aus Literatur und Erfahrungswerte durch DLR Rheinpfalz, Gruppe Weinbau (Unterstockbegrünung maschinell, chemische und mechanische Beikrautregulierung), Arbeitskosten: 22 €/Akh für Schlepperfahrten, 15 €/Akh bei einfacheren Arbeiten (Hacken, Rechen, Händische Einsaat)

² 40 €/Schlepperstunde

³ Abschreibungskosten für 15 Jahre mit 20 ha Betrieb bei 3 % Zinsen

⁴ Saatgutkosten für Rot-Schwingel; Herbizidkosten für Katana® und Roundup PowerFlex®

Anhang 8: Detaillierter zeitlicher Verlauf des mittleren Deckungsgrades der Begrünungsvarianten in der Versuchsfäche HUMO (Einsaattermin: 15.09.2021); Begr_Med = *Medicago lupulina*, Begr_Fes = *Festuca rubra*, Begr_Thym = *Thymus serpyllum*, Begr_MixR = Mischung „Rebzeilenbegrünung“, Begr_MixM = Mischung „Mythopia 3“; n = 4.

