



Optimierung eines Verfahrens zum Beikrautmanagement im Feldgemüsebau mit einem spritzbaren Mulchmaterial auf Basis Nachwachsender Rohstoffe

"OptiMulch"

Dr. Theresa Bayerl
Jonatha-Christoph Räß-Mücke
Dr. Michael Kirchinger
Dr.-Ing. Daniela Dressler
Wolfgang Hollmach
Martin Schulz
Dr. Edgar Remmele

in Kooperation mit:



Straubing, 30. November 2025

Titel: Optimierung eines Verfahrens zum Beikrautmanagement im Feldgemüsebau mit einem spritzbaren Mulchmaterial auf Basis Nachwachsender Rohstoffe „OptiMulch“

Autoren: Dr. Theresa Bayerl¹
Jonatha-Christoph Räß-Mücke¹
Dr. Michael Kirchner¹
Dr.-Ing. Daniela Dressler¹
Wolfgang Hollmach²
Martin Schulz²
Dr. Edgar Remmele¹

Leitung Gesamtprojekt und Teilvorhaben TFZ: Dr. Edgar Remmele
Leitung Teilvorhaben LWG: Stefan Kirchner

Projektpartner: ¹ Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) • Schulgasse 18 • 94315 Straubing
² Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) • An der Steige 15 • 97209 Veitshöchheim

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus unter den Förderkennzeichen 38758/01 (DBU) und N/25/01 (StMELF) gefördert. Projektlaufzeit: 01.06.2023 bis 31.12.2025. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



© 2025
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Danksagung

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gebührt großer Dank für die Finanzierung des Vorhabens. Besonderer Dank gilt Frau Christiane Grimm für die stets sehr gute Zusammenarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen.

Für die Förderung der Projektphase "OptiMulch-Ertrag" danken wir dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus, insbesondere Herrn Dr. Werner Ortinger und Herrn Dr. Wolfram Schaecke, sehr herzlich.

Für die Unterstützung mit Maschinenbauteilen, Tipps und Ratschlägen geht ein großer Dank an die Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG und die Maschinenfabrik Schmotzer GmbH. Besonders bedanken möchten wir uns bei Herrn Stefan Kiefer und Herrn Thomas Bedenk.

Ferner gilt der Dank Herrn Josef Apfelbeck (Landesverband Bayerischer Feldgemüsebauer e.V.), den Landwirten Herrn Michael Strauß und Herrn Klaus-Peter Gerhard, Herrn Andreas Heer (BASF, Globaler Spezialist für Produktentwicklung, Einlegegurken), Herrn Florian Hageneder (Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Abensberg-Landshut, Abteilung Gartenbau), Herrn Hubert Eichinger (Fleischmann Stahl- und Maschinenbau GmbH), Herrn Brice Lemarechal (ehem. German Water and Energy Group, GWE) sowie Herrn Luis Schnepel (German Water and Energy Group, GWE) für die Unterstützung mit Know-How, Saatgut und Landmaschinen bei der Durchführung und Planung der Praxisversuche zum Anbau von Einlegegurken.

Weiterer Dank gilt Herrn Stefan Seubert (Gartenbau Seubert, Straubing), Herrn Alexander Dümig (Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, LWG), Herrn Andreas Sagstetter (Landwirt) und Herrn Michael Lorenz (Hymatec GmbH) sowie Herrn Jörg Miltenberger (Stadtgärtnerei Straubing) für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche im Rahmen des Vorhabens.

Die Autoren

Abstract (deutsch)

Im Gemüsebau ist ein effektives Beikrautmanagement unerlässlich, da Kulturpflanzen mit Beikräutern um Nährstoffe und Wasser konkurrieren und Beikräuter die Entwicklung der Kulturpflanzen beeinträchtigen können. Herbizide sind im konventionellen Anbau weit verbreitet, stehen jedoch zunehmend unter gesellschaftlicher Kritik und regulatorischem Druck. Mechanische und physikalische Alternativen, wie Hacken und die Verwendung von Mulchfolien, sind zeit- und kostenintensiv und verursachen zum Teil Plastikmüll. Als umweltfreundliche Alternative wurde im Rahmen der Projekte MuNaRo und ABOW ein spritzbares, biologisch abbaubares Mulchmaterial "LiquiMulch" auf Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt. Das Verfahren beruht auf einer Zwei-Komponenten-Mischung, die nach der Applikation auf dem Feld eine physikalische Barriere gegen Beikräuter bildet. Ziel des Vorhabens war die Optimierung des neuartigen Mulchverfahrens für den Freilandgemüsebau mit besonderem Fokus auf die Praxistauglichkeit des Verfahrens sowie der Entwicklung eines einfach und sicher bedienbaren Applikationsgeräts. In Feldversuchen konnte die beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchmaterials für Kulturen wie Zuckermais, Kürbis, Zucchini und Einlegegurke bestätigt werden. Die Effektivität hängt jedoch von Faktoren wie Bodenart, Bodenfeuchte, Beikrautdruck und Applikationspräzision ab. Eine Mulchschichtdicke von 3 mm bis 5 mm erwies sich als effizient. Eine Aussaat mit herkömmlicher Sätechnik nach der Applikation des Mulchmaterials ist praktikabel. Die Entwicklung der Kulturpflanzen verlief nach erfolgreicher Keimung unauffällig und die Ernteerträge wurden vom Mulchmaterial kaum beeinflusst. Bei Melonen kann hingegen keine Empfehlungen für den Einsatz des Verfahrens gegeben werden. Umweltuntersuchungen zeigen, dass das Mulchmaterial aerob abbaubar ist und keine Akkumulation im Boden zu erwarten ist. Ein Einfluss auf die Stickstoffmineralisierung wurde festgestellt, was bei Bedarf eine Anpassung der Düngung erforderlich macht. Messungen der Bodenfeuchte belegen eine verdunstungshemmende Wirkung des Mulchmaterials. Damit kann die Bodenfeuchte reguliert werden. Eine angepasste Bewässerungssteuerung ist entscheidend für den Erfolg des Verfahrens. Negative Auswirkungen auf Wildtiere, Insekten oder dem Vorkommen von Regenwürmern im Boden wurden nicht beobachtet. Wirtschaftlich ist das Mulchverfahren, insbesondere aufgrund der Materialkosten, derzeit noch nicht konkurrenzfähig gegenüber der Verwendung von Herbiziden oder Mulchfolien. Durch Rezepturoptimierung, wie dem Ersatz teurer Inhaltsstoffe und der Reduktion der Materialmenge, beispielsweise durch Aufschäumen, könnten die Kosten gesenkt werden. Die Entwicklung ölfreier Rezepturen und die Reduzierung des Materialaufwands stellen vielversprechende Ansätze dar. Auch die Treibhausgasemissionen würden durch wasserbasiertes Material erheblich reduziert werden. Eine abschließende Bewertung der Praxistauglichkeit und Umweltwirkungen der neuartigen Rezepturen ist allerdings erst nach weiteren Feldversuchen möglich. Die bisherigen Ergebnisse zeigen jedoch, dass die eingeschlagenen Ansätze in der Materialentwicklung zukunftsweisend und vielversprechend sind. Zusammenfassend stellt das innovative Mulchverfahren eine umweltfreundliche und größtenteils praxistaugliche Alternative zur Beikrautregulierung im Freilandgemüsebau dar. Für eine bessere Wirtschaftlichkeit sollte die Entwicklung einer ölfreien Rezeptur weiterverfolgt werden.

Abstract (englisch)

In vegetable cultivation, effective weed management is essential because crops compete with weeds for nutrients and water, and weeds can impair the development of crops. Herbicides are widely used in conventional farming but are increasingly subject to social criticism and regulatory pressure. Mechanical and physical alternatives, such as hoeing and the use of mulch films, are time- and cost-intensive and partly cause plastic waste. As an environmentally friendly alternative, a sprayable, biodegradable mulch material called "LiquiMulch" based on renewable raw materials was developed within the projects MuNaRo and ABOW. The process is based on a two-component mixture that forms a physical barrier against weeds after application in the field. The aim of the project was to optimize this novel mulching process for open-field vegetable cultivation, with a particular focus on its practical suitability and the development of a simple and safe application device. Field trials confirmed the weed-suppressing effect of the mulch material for crops such as sweet corn, pumpkin, zucchini, and pickling cucumber. However, effectiveness depends on factors such as soil type, soil moisture, weed pressure, and application precision. A mulch layer thickness of 3 mm to 5 mm proved to be efficient. Sowing with conventional seeding technology after application of the mulch material is feasible. After successful germination crop development proceeded without issues and harvest yields were hardly affected by the mulch material. However, no recommendations can be given for the use of the method with melons. Environmental studies show that the mulch material is aerobically degradable and is not expected to accumulate in the soil. An influence on nitrogen mineralization was observed, which may require adjustment of fertilization if necessary. Measurements of soil moisture demonstrate an evaporation-inhibiting effect of the mulch material. This allows soil moisture to be regulated. An adapted irrigation management is crucial for the success of the process. No negative impacts on wildlife, insects, or earthworm populations in the soil were observed. Economically, the novel mulching method is currently not competitive with the use of herbicides or mulch films, mainly due to high material costs. However, costs could be significantly reduced through formulation optimization, such as replacing expensive ingredients and reducing the amount of material, for example by foaming. The development of oil-free formulations and the reduction of material usage are promising approaches. Additionally, greenhouse gas emissions could be significantly reduced by the new water-based material. A final assessment of the practical suitability and environmental impacts of the novel formulations is only possible after further field trials. Nevertheless, the results so far show that the approaches taken in material development are forward-looking and promising.

In summary, the innovative mulching method offers an environmentally friendly and largely practical alternative for weed control in open-field vegetable cultivation. To improve economic viability, the development of an oil-free formulation should be pursued further.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch).....	7
Abstract (englisch)	8
Inhaltsverzeichnis.....	9
Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis.....	21
Abkürzungsverzeichnis	23
1 Einleitung und Motivation	25
2 Zielsetzung.....	27
3 Stand des Wissens.....	29
3.1 Beikrautregulierung im Feldgemüseanbau.....	29
3.1.1 Falsches Saatbeet	29
3.1.2 Herbizide.....	29
3.1.3 Mulchen	30
3.2 Umweltauswirkungen verschiedener Maßnahmen zur Beikrautregulierung	32
3.3 Anbauverfahren im Gemüsebau.....	33
3.4 Bodenökologie	34
4 Material und Methoden	37
4.1 Aufspritzbares Mulchmaterial.....	37
4.1.1 Rezeptur des im Feldversuch eingesetzten Mulchmaterials LiquiMulch	37
4.1.2 Entwicklung und Optimierung der Rezeptur	38
4.1.2.1 Geliermittel.....	38
4.1.2.2 Entwicklung neuer Formulierungen.....	39
4.1.2.3 Untersuchung der Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung der Vorzugsrezepturen.....	39
4.2 Untersuchungen der Umweltwirkungen des aufspritzbaren Mulchmaterials.....	40
4.2.1 Untersuchungen der Abbaubarkeit des aufspritzbaren Mulchmaterials	40
4.2.1.1 Analytik der Beständigkeit des Mulchmaterials auf der Erdoberfläche	40
4.2.1.2 Rückstandsanalytik des Mulchmaterials nach Einarbeitung in den Boden	40
4.2.1.3 Analytik der biologischen Abbaubarkeit des Mulchmaterials	40
4.2.1.4 Analytik der Stickstoffmineralisierung im Boden.....	41
4.2.1.5 Analytik des pH-Werts im Boden	42
4.2.2 Regenwurmbonitur.....	42
4.2.3 Einfluss auf Wildtiere	43

4.3	Applikationstechnik	44
4.3.1	System für die Applikation des Mulchmaterials	44
4.3.2	Trichterspritze zur manuellen Applikation des Mulchmaterials	46
4.3.3	Optimierung des Prototyp I Applikationsgeräts.....	46
4.3.3.1	Fehler- und Ursachendiagnose des Funktionsverlusts	46
4.3.3.2	Pumpentests	47
4.3.3.3	Technische Parameter für die Applikation mit dem Prototyp II "MulchSprayer Vegi"	49
4.4	Gewächshausversuche und Freilandversuche.....	51
4.4.1	Verträglichkeitsuntersuchungen mit unterschiedlichen Gemüsekulturen	51
4.4.2	Vorversuche für die Feldversuche am Standort Bamberg	51
4.4.2.1	Vorversuche für Feldversuch 2023.....	51
4.4.2.2	Vorversuche für Feldversuch 2024.....	52
4.4.2.3	Vorversuche für Feldversuch 2025.....	52
4.5	Feldversuche am Standort Bamberg	54
4.5.1	Versuchsflächen.....	54
4.5.2	Wetterdaten Bamberg	54
4.5.3	Bewässerung und Wasserhaushalt	55
4.5.3.1	Bewässerung des Feldversuchs 2023.....	55
4.5.3.2	Bewässerung des Feldversuchs 2024 und 2025	56
4.5.4	Versuchsaufbau und Design der Feldversuche in Bamberg.....	57
4.5.5	Gemüsekulturen	59
4.5.5.1	Zuckermais.....	59
4.5.5.2	Kürbis.....	59
4.5.5.3	Zucchini.....	60
4.5.5.4	Melone	61
4.5.5.5	Einlegegurke	61
4.5.6	Boniturparameter.....	64
4.5.6.1	Untersuchung des Bodenbedeckungsgrads durch Fotodokumentation.....	64
4.5.6.2	Erfassung der Beikrautarten und Wuchshöhe	65
4.5.6.3	Einfluss auf die Keimung und den Aufwuchs der Kulturpflanzen.....	65
4.5.6.4	Einfluss auf die Entwicklung der Kulturpflanzen	66
4.5.6.5	Ertragsbonitur.....	66
4.6	Ökonomische Einordnung.....	69
4.6.1	Ökonomische Einordnung des Verfahrens	69
4.6.2	Ökonomische Einordnung des Mulchmaterials.....	71
4.7	Treibhausgas- und Energiebilanz	72
4.8	Statistische Auswertung.....	75
5	Ergebnisse und Diskussion	77
5.1	Aufspritzbares Mulchmaterial	77
5.1.1	Rezeptur des in den Feldversuchen eingesetzten Mulchmaterials.....	77
5.1.2	Optimierung des Mulchmaterials - neue Formulierungen	78
5.1.2.1	Ölfreie Rezepturen	78
5.1.2.1.1	Untersuchung geeigneter Geliermittel	78
5.1.2.1.2	Rezepturentwicklung mit κ-Carrageen und Natriumalginat.....	80
5.1.2.1.3	Rezepturentwicklung mit Carboxymethylcellulose	86
5.1.2.1.4	Zusammenfassung - Ölfreie Rezeptur.....	89
5.1.2.2	Rezepturen mit Reststoffen	89

5.1.2.3	Rezepturen für geschäumtes Material	90
5.1.2.4	Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung der Vorzugsrezepturen ..	92
5.2	Ergebnisse der untersuchten Wechselwirkungen des Mulchmaterials mit der Umwelt	97
5.2.1	Abbaubarkeit des aufspritzbaren Mulchmaterials.....	97
5.2.1.1	Beständigkeit des Mulchmaterials auf der Feldoberfläche	97
5.2.1.2	Rückstände des Mulchmaterials nach Einarbeitung.....	99
5.2.1.3	Biologischer Abbau des Mulchmaterials nach DIN EN ISO 17556.....	100
5.2.1.4	Einfluss des Mulchmaterials auf die bodenchemischen und bodenbiologischen Eigenschaften	104
5.2.1.4.1	Einfluss des Mulchmaterials auf den Gehalt von mineralisiertem Stickstoff ...	104
5.2.1.4.2	Auswirkung des Mulchmaterials auf den pH-Wert des Bodens	107
5.2.2	Einfluss des Mulchmaterials auf die Regenwurmpopulation	108
5.2.3	Einfluss des Mulchmaterials auf den Wasserhaushalt	110
5.2.4	Einfluss des Mulchmaterials auf Wildtiere	113
5.3	Applikationstechnik.....	115
5.3.1	Applikationstechnik für den Feldversuch 2023.....	115
5.3.1.1	System für die Applikation des Mulchmaterials für die Reihenkultur - SAM ...	115
5.3.2	Applikationstechnik für die Feldversuche 2024 und 2025	116
5.3.2.1	Optimierung des Prototyp I Applikationsgeräts	116
5.3.2.1.1	Fehler- und Ursachendiagnose	117
5.3.2.1.2	Pumpen- und Leitungstests	118
5.3.2.1.3	Rahmenumbau	129
5.3.2.1.4	Leitungsbau	130
5.3.2.1.5	Hydraulik.....	132
5.3.2.1.6	Elektronische Steuerung.....	133
5.3.2.1.7	Testlauf/Auslitern	135
5.3.2.2	Prototyp II Applikationsgerät MulchSprayer Vegi für die Reihenkultur	137
5.4	Gewächshausversuche und Freilandversuche am Standort Straubing ..	141
5.4.1	Untersuchung alternativer Gemüsekulturen auf ihre Eignung für das Mulchmaterial im Gewächshaus	141
5.4.1.1	Grünkohl	141
5.4.1.2	Mangold	142
5.4.1.3	Erdbeeren	142
5.4.1.4	Pak Choi	144
5.4.1.5	Weißkohl.....	145
5.4.1.6	Kohlrabi.....	146
5.4.1.7	Tomaten.....	147
5.4.2	Vorversuche im Gewächshaus für die geplanten Feldversuche.....	147
5.4.2.1	Vorversuche für das Versuchsjahr 2023	147
5.4.2.2	Vorversuche für das Versuchsjahr 2024	151
5.4.2.3	Vorversuche für das Versuchsjahr 2025	153
5.5	Feldversuche am Standort in Bamberg	155
5.5.1	Versuchsflächen	155
5.5.1.1	Versuchsflächenvorbereitung im Versuchsjahr 2023	155
5.5.1.2	Versuchsflächenvorbereitung im Versuchsjahr 2024	155
5.5.1.3	Versuchsflächenvorbereitung im Versuchsjahr 2025	157
5.5.2	Analyse der Witterungsbedingungen	158
5.5.3	Ergebnisse der untersuchten Wechselwirkungen des Mulchmaterials mit verschiedenen Gemüsekulturen	160

5.5.3.1	Zuckermais.....	160
5.5.3.1.1	Beikrautunterdrückung	160
5.5.3.1.2	Kulturverträglichkeit.....	162
5.5.3.1.3	Fazit: Zuckermais	165
5.5.3.2	Kürbis.....	166
5.5.3.2.1	Beikrautunterdrückung	166
5.5.3.2.2	Kulturverträglichkeit.....	169
5.5.3.2.3	Fazit: Kürbis	172
5.5.3.3	Zucchini.....	173
5.5.3.3.1	Beikrautunterdrückung	173
5.5.3.3.2	Kulturverträglichkeit.....	175
5.5.3.3.3	Fazit: Zucchini	178
5.5.3.4	Melone	179
5.5.3.4.1	Beikrautunterdrückung	179
5.5.3.4.2	Kulturverträglichkeit.....	181
5.5.3.4.3	Fazit: Melone.....	184
5.5.3.5	Einlegegurke	185
5.5.3.5.1	Beikrautunterdrückung	185
5.5.3.5.2	Kulturverträglichkeit.....	187
5.5.3.5.3	Fazit: Einlegegurke.....	195
5.6	Ökonomische Einordnung.....	196
5.6.1	Ökonomische Einordnung des Verfahrens	196
5.6.2	Ökonomische Einordnung des Mulchmaterials.....	200
5.7	Treibhausgas- und Energiebilanz	202
5.8	Anmeldung des Mulchverfahrens zum Patent	207
6	Zusammenfassung	209
	Quellenverzeichnis	213
	Anhang	221

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der Ernteerträge in dt/ha der Gemüsekulturen Einlegegurke, Zucchini, Kürbis und Zuckermais über die Jahre 2010 bis 2024 (Datenquelle: Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat, [7]).....	34
Abbildung 2:	Ablauf der Stickstoffmineralisierung im Boden [4]	35
Abbildung 3:	Schematischer Aufbau des Abbaubarkeitsversuchs nach DIN EN ISO 17556:2019-09, 1: Luftstrom, 2: Luftstromregler, 3: Waschflasche mit Kaliumhydroxidlösung, 4: Flasche mit H ₂ O, 5: Probengefäß mit Material, 6: Waschflaschen mit Kaliumhydroxidlösung [44]	41
Abbildung 4:	Das Applikationsgerät SAM in der Rückansicht während der Applikation des Mulchmaterials in der Reihenkultur Zuckermais	44
Abbildung 5:	Manuelle Applikation des abgewogenen Mulchmaterials auf einer definierten Fläche im Freiland unter Verwendung einer Trichterspritze ..	46
Abbildung 6:	Versuchsaufbau für die Prüfung der Pumpen.....	48
Abbildung 7:	Aussaat der Einlegegurkensamen in das Mulchmaterial am 07.05.2025 mit Hilfe eines pneumatischen Sägeräts der Firma Fleischmann	64
Abbildung 8:	Prozentuale Zusammensetzung der beiden Komponenten A (gelb) und B (blau) von LiquiMulch nach der Rezeptur 114k [44]	77
Abbildung 9:	Prüfkörper mit κ-Carrageen und Natriumalginat als Geliermittel der ölfreien Rezeptur R 215b unter Verwendung von destilliertem Wasser (links) und R 218a unter Verwendung von Leitungswasser (rechts).....	81
Abbildung 10:	Prüfkörper der ölfreien Rezepturen R222i, R223b, R224h, R225b (von links nach rechts) unter Verwendung unterschiedlicher Gelierhilfsmittel für das Polymer Natriumalginat	82
Abbildung 11:	Prüfkörper der ölfreien Rezeptur R 226f basierend auf Natriumalginat und κ-Carrageen	82
Abbildung 12:	Prüfkörper der ölfreien Rezepturen R 220a (links) auf Basis von κ-Carrageen und Konjak und der Rezeptur R 228a-c (von links nach rechts) auf Basis von κ-Carrageen und Pektinamid AF, CB und CF.....	83
Abbildung 13:	Untersuchung der Beikrautunterdrückung der Rezeptur 226f im praxisnahen Test von 19.06. - 08.07.2024	84
Abbildung 14:	Prüfkörper mit unterschiedlichen Füllstoffen (von links nach rechts: Stärke (R 229a), Cellulosefasern (R 229b*), Kaffeesatz (R 229d), Sägespäne (R229f))	85
Abbildung 15:	Angefärbte Prüfkörper der Rezepturen 250b (links), angefärbt mit Rotebeeteextrakt und 250d (rechts), angefärbt mit Spirulina.....	86
Abbildung 16:	Extrem schnelle Gelierung bei Gelierversuch mit Carboxymethylcellulose und Eisen-III-chlorid (FeCl ₃) in Wasser verursacht Gel-Mikrobeads	87

Abbildung 17:	Prüfkörper der ölfreien Rezepturen mit Carboxymethylcellulose und Geliervverzögerer R 264g (links) mit Glucono- δ -lacton und R 263n (rechts) mit Natriumphosphat.....	88
Abbildung 18:	Prüfkörper der modifizierten Rezeptur R 114k mit Apfeltrester als Füllstoffersatz (R 255c+).....	90
Abbildung 19:	Prüfkörper der aufgeschäumten Rezeptur 114k durch Zugabe von Ammoniumhydrogencarbonat und der Verwendung des Geliermittels Konjak (R 207e).....	92
Abbildung 20:	Sprühbild der drei Vorzugsvarianten R 208b, 250b und 263n am Tag der Applikation am 17.04.2025 im Freiland am Standort Straubing	93
Abbildung 21:	Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials Rezeptur 208b mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025.....	94
Abbildung 22:	Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials Rezeptur 250b mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025.....	94
Abbildung 23:	Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials Rezeptur 263n mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025.....	95
Abbildung 24:	Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials nach der Rezeptur 114k mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025	96
Abbildung 25:	Boniturbilder eines Streifens der LiquiMulch 5 mm Variante der Parzelle 433 (oben), Versuch Zucchini im Zeitraum von Juni bis Ende Oktober im Jahr 202 und der LiquiMulch 4 mm Variante der Parzelle 521 (unten), Versuch Zucchini im Zeitraum von Mai bis Mitte September im Jahr 2024	98
Abbildung 26:	Rückstände des Mulchmaterials der Bodenprobe der LiquiMulch 2 mm Variante (links) und LiquiMulch 4 mm Variante (rechts) im Jahr 2024, 48 Tage nach Einarbeitung in den Boden.....	100
Abbildung 27:	Prozentualer Abbau von jeweils 2,5 g der beiden Referenzmaterialien Stärke und mikrokristalliner Cellulose über die Zeit	101
Abbildung 28:	Prozentualer Abbau von 2,5 g Mulchmaterial über die Zeit (MW $\pm$ SEM; n=2)	104
Abbildung 29:	Gesamtstickstoff zusammengesetzt aus Ammonium und Nitrat in den Parzellen des Zucchiniversuchs zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in der Vegetationsperiode 2023 (links) und 2024 (rechts), Erdprobentiefe 30 cm.....	105
Abbildung 30:	Gesamtstickstoff zusammengesetzt aus Ammonium und Nitrat in den Parzellen der Einlegegurke zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in der Vegetationsperiode 2023 (links) und 2024 (rechts), Erdprobentiefe 30 cm	106
Abbildung 31:	pH-Werte verschiedener Bodenproben zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Applikation des Mulchmaterials (MW; n=3)	108

Abbildung 32:	Regenwürmer (markiert durch rote Pfeile) auf bzw. unter dem Mulchmaterial und von Regenwürmern stammende Kothäufchen (markiert durch weiße Pfeile).....	109
Abbildung 33:	Individuen pro m ² der Regenwurmbonitur in den unterschiedlichen Versuchspartzen der Versuchsjahre 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertvergleich nach Tukey; p < 0,05, n=8)	110
Abbildung 34:	Vergleich des Bewässerungsvolumens in mm und der relativen Bodenfeuchte in % in 15 cm Tiefe für die vier unterschiedlichen Versuchsvarianten für den Monat Mai (links) und Juni (rechts) (MW ± SEM, n=3)	111
Abbildung 35:	Relative Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe über die Zeit von 01.07.-31.07.2025 und Niederschlagsmengen in mm	113
Abbildung 36:	Fotos der Wildtierkameras von Vögeln am Mulchmaterial auf der Versuchsfläche in Bamberg (links) und auf der Versuchsfläche in Straubing (rechts).....	114
Abbildung 37:	Ungleichmäßiges Spritzbild bei der Applikation der 20 cm Mulchstreifen	115
Abbildung 38:	2-D-Grafik des Prototyps I der Front-Heck-Gerätekombination für die Ausbringung des Mulchmaterials	116
Abbildung 39:	Bauformen der vier getesteten Pumpen - Drehkolbenpumpe (oben links), Sinuspumpe (oben rechts), Schraubenspindelpumpe (Bildquelle: Fristam Pumpen KG) (unten links), Zahnrادpumpe (unten rechts)	118
Abbildung 40:	Temperatur (T)- und Druck (p)-Verlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Drehkolbenpumpe.....	120
Abbildung 41:	Temperatur- und Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden des Pumpentests mit der Drehkolbenpumpe.....	121
Abbildung 42:	Temperatur- und Druckverlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Sinuspumpe.....	122
Abbildung 43:	Temperatur- und des Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Sinuspumpe.....	123
Abbildung 44:	Temperatur- und Druckverlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Schraubenspindelpumpe	125
Abbildung 45:	Temperatur- und Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden(links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Schraubenspindelpumpe	126
Abbildung 46:	Temperatur- und Druckverlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Zahnrادpumpe	127

Abbildung 47:	Temperatur- und Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Zahnradpumpe.....	128
Abbildung 48:	CAD-Zeichnung des Heckrahmens mit angebauter Halterung aus Stahlprofilen und einem zusätzlichen Oberlenker zur Befestigung des Verschieberahmens (graue Bauteile)	129
Abbildung 49:	Verschieberahmen AV4 der Maschinenfabrik Schmotzer GmbH, (Bildquelle: Maschinenfabrik Schmotzer GmbH).....	130
Abbildung 50:	Hydraulikschema für eine Flüssigphase des Applikationsgeräts.....	131
Abbildung 51:	Fließschema des Hydrauliksystems inklusive Vorlauf, Rücklauf und Lecköl	132
Abbildung 52:	Hydraulikanschlüsse und Durchflussteiler	133
Abbildung 53:	Elektronischer Schaltplan des Applikationsgeräts.....	134
Abbildung 54:	Bedienterminal des Applikationsgeräts zum Einbau in der Fahrerkabine	135
Abbildung 55:	Prototyp II MulchSprayer Vegi nach Umbau- und Optimierungsmaßnahmen in der Frontansicht - Stand 2025.....	137
Abbildung 56:	Prototyp II MulchSprayer Vegi nach Umbau- und Optimierungsmaßnahmen in der Heckansicht - Stand 2025.....	138
Abbildung 57:	Spritzbild bei der Applikation der 60 cm breiten Mulchstreifen mit dem MulchSprayer Vegi im Versuchsjahr 2024	139
Abbildung 58:	Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Pflanzendurchmesser (rechts) des Grünkohls über die Zeit ($MW \pm SEM$, $n = 3$)	141
Abbildung 59:	Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) und Wuchshöhe (rechts) der Mangoldpflanzen über die Zeit ($MW \pm SEM$, $n = 3$)	142
Abbildung 60:	Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Pflanzendurchmesser (rechts) der Erdbeeren über die Zeit ($MW \pm SEM$, $n = 3$).....	143
Abbildung 61:	Verschimmelte Erdbeere auf dem Mulchmaterial und Verfärbung des Mulchmaterials - Bild vom 22.08.23.....	144
Abbildung 62:	Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Wuchshöhe (rechts) der Pak Choi über die Zeit ($MW \pm SEM$, $n = 3$).....	145
Abbildung 63:	Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Wuchshöhe (rechts) des Weißkohls über die Zeit ($MW \pm SEM$, $n = 3$)	146
Abbildung 64:	Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Wuchshöhe (rechts) des Kohlrabis über die Zeit ($MW \pm SEM$, $n = 3$).....	147
Abbildung 65:	Relative Anzahl gekeimter Kürbissamen (links) und durchschnittliche Anzahl an angesetzten Blättern im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) beim Kürbis - Variante Saat vor Applikation, ($MW \pm SEM$, $n = 3$)	148

Abbildung 66:	Relative Anzahl gekeimter Zucchini­samen (links) und durchschnittliche Anzahl an an­ge­setzten Blättern im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) bei der Zucchini - Variante Saat vor Applikation, (MW $\pm$ SEM, n = 3)	149
Abbildung 67:	Relative Anzahl gekeimter Melonensamen (links) und durchschnittliche Anzahl an an­ge­setzten Blättern im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) bei den Melonen - Variante Saat vor Applikation, (MW $\pm$ SEM, n = 3)	150
Abbildung 68:	Relative Anzahl gekeimter Zuckermais­sa­men (links) und durchschnittliche Wuchshöhe im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) beim Zuckermais - Variante Saat vor Applikation, (MW $\pm$ SEM, n = 3)	151
Abbildung 69:	Anzahl gekeimter Gurkensamen bei einer Aussaat vor und nach Applikation und einer Wassersaugspannung von 500 hPa (MW)	152
Abbildung 70:	Anzahl gekeimter Gurkensamen bei einer Aussaat vor und nach Applikation und einer Wassersaugspannung von 200 hPa (MW)	153
Abbildung 71:	Keimungsverhalten der Einlegegurken dargestellt als relative Anzahl gekeimter Samen pro Topf über die Zeit für die getesteten Varianten Kontrolle, mit Mulchmaterial kontaminiertes Gießwasser, Aussaat in Saatloch mit einem Durchmesser von 3 cm, Sätechnik I herkömmliches Aussäen mit Sägerät und Abdecken mit Erde, Sätechnik II herkömmliches Säverfahren ohne Abdecken (MW, n=3)	154
Abbildung 72:	Vorbereitete Versuchsfläche am 12.06.2023, drei Tage vor der Applikation des Mulchmaterials	155
Abbildung 73:	Zustand der Versuchsfläche am 02.05.2024 nach starkem Niederschlag von 50 mm in 45 Minuten	156
Abbildung 74:	Zustand der Versuchsfläche am 02.06.2024 nach Starkregenereignis mit 61 mm Niederschlag am 21.05.2024.....	157
Abbildung 75:	Vorbereitete Beete der Versuchsfläche am 05.05.2025 kurz vor der Applikation des Mulchmaterials und Beete der Kontrollvariante mit verlegter Mulchfolie	158
Abbildung 76:	Monatliche Niederschlagsmengen und Monatsmitteltemperaturen in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025 im Versuchsfeld Bamberg im Vergleich zum jeweiligen langjährigen Mittel (langjährl. Mittel Niederschlag 1981-2010, Stations-ID 6195, Schesslitz-Koettensdorf; langjährl. Mittel Temperatur 1991-2020, Stations-ID 282, Bamberg-West, Deutscher Wetterdienst).....	159
Abbildung 77:	Bodenbedeckungsgrad (MW + SEM, n = 4) in den Parzellen des Zuckermais auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg im Jahr 2023	161
Abbildung 78:	Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Zuckermais im Jahr 2023 (MW, n=4)	162

Abbildung 79:	Relative Anzahl gekeimter Zuckermassamen nach der Aussaat (links) und nach (rechts) Nachsaat (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$) im Jahr 2023	163
Abbildung 80:	Ernteertrag Zuckermais in dt/ha und durchschnittliches Kolbengewicht der marktfähigen Sortierung (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$)	164
Abbildung 81:	Zuckermais - Durchschnittliche Kolbenlänge (links), -durchmesser (mitte) und -gewicht (rechts) von 10 zufällig ausgewählten Zuckermaiskolben pro Parzelle (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey, $p < 0,05$; $n = 4$)	165
Abbildung 82:	Bodenbedeckungsgrad in den Kürbis-Parzellen auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten), (MW + SEM, $n = 4$)	167
Abbildung 83:	Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Kürbis im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts) (MW, $n=4$)	168
Abbildung 84:	Relative Anzahl gekeimter Kürbissamen nach der Aussaat (links) und nach (rechts) der Nachsaat (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$), Jahr 2023	169
Abbildung 85:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Kürbisse des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$) ...	171
Abbildung 86:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger, zu kleiner Kürbisse pro Parzelle des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$)	172
Abbildung 87:	Starkbefallene Parzelle der Nullvariante Nr. 421 (links) und sehr geringer Beikrautaufwuchs der LiquiMulch Variante 4 mm Nr. 521 (rechts) in der Reihe der Versuchspartellen der Zucchini am 01.07. im Versuchsjahr 2024	173
Abbildung 88:	Bodenbedeckungsgrad in den Partellen der Zucchini auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten) (MW + SEM, $n = 4$)	174
Abbildung 89:	Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Zucchini im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW, $n=4$) ..	175
Abbildung 90:	Relative Anzahl gekeimter Zucchiniisamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat, Versuchsjahr 2023 (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$)	176
Abbildung 91:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Zucchini des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$) ...	177
Abbildung 92:	Starker Beikrautaufwuchs und verkümmerte Melonenpflanzen der LiquiMulch Varianten 2 mm Nr.231 (links) und geringer Beikrautaufwuchs in der LiquiMulch Variante 4 mm Nr. 531 in der Reihe der Versuchspartellen der Melone am 21.08. im Versuchsjahr 2024	179

Abbildung 93:	Bodenbedeckungsgrad in den Parzellen der Melone auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten), (MW + SEM, n = 4)	180
Abbildung 94:	Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Melone im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW, n=4)....	181
Abbildung 95:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Melonen des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 3, n = 4)	182
Abbildung 96:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger fauler Melonen des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 3, n = 4).....	183
Abbildung 97:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger aufgeplatzter Melonen pro Parzelle des Jahres 2024, (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 4)	184
Abbildung 98:	Bodenbedeckungsgrad in den Parzellen der Einlegegurke auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten), (MW + SEM, n = 4)	186
Abbildung 99:	Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Einlegegurke im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW, n=4)	187
Abbildung 100:	Relative Anzahl gekeimter Gurkensamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 4), Versuchsjahr 2023	188
Abbildung 101:	Relative Anzahl gekeimter Gurkensamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 4), Versuchsjahr 2024	189
Abbildung 102:	Relative Anzahl gekeimter Gurkensamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 4), Versuchsjahr 2025	190
Abbildung 103:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Einlegegurken des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 3, n = 4).....	191
Abbildung 104:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Einlegegurken des Jahres 2025, (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 9)	193
Abbildung 105:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Einlegegurken des Jahres 2025 der Sortierung 3-9 cm (links) und 10-15 cm (rechts) (MW ± SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; p < 0,05, n = 9).....	194
Abbildung 106:	Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger Einlegegurken: unförmig (links); gelb oder faul (rechts) des Jahres 2025	

(MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, n = 9)	195
Abbildung 107: Prozentuale Kosten der einzelnen Inhaltsstoffe des Mulchmaterials anteilig an den Gesamtkosten	200
Abbildung 108: Prozentuale Kosten der einzelnen Inhaltsstoffe des ölfreien Mulchmaterials nach R 226f anteilig am Gesamtpreis	201
Abbildung 109: Gegenüberstellung der THG-Emissionen von 1 kg Mulchmaterial; linke Säulen wasserbasierte Rezeptur, rechte Säulen ölbasierte Rezeptur .	203
Abbildung 110: Prozentuale Verteilung der THG-Emissionen des ölbasierten Materials mit Rapsöl (links) und Altspeiseöl (rechts)	204
Abbildung 111: Prozentuale Verteilung der THG-Emissionen des wasserbasierten Mulchmaterials OptiMulch mit Carrageen aus gezüchteten Algen (links) und aus in der Umwelt gesammelten Algen (rechts).....	205
Abbildung 112: Massenzusammensetzung des wasserbasierten Mulchmaterials....	205

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Rezeptur des Mulchmaterials LiquiMulch	37
Tabelle 2:	Übersicht über die getesteten Geliermittel und Gelierhilfsmittel	38
Tabelle 3:	Vorgehen bei der Regenwurmbonitur nach WALTER, R. und BURMEISTER J. (2019) [3]	43
Tabelle 4:	Fördermengen der Komponenten Ölphase und Wasserphase mit dem Applikationsgerät "SAM"	45
Tabelle 5:	Übersicht über die Fahrgeschwindigkeiten und Höheneinstellungen der Düsen zur Erzeugung verschiedener Schichtdicken und Streifenbreiten	45
Tabelle 6:	Übersicht über die getesteten Pumpen für die Optimierung des Applikationsgeräts	47
Tabelle 7:	Protokoll über den Ablauf der Pumpentests	49
Tabelle 8:	Fördermengen der Komponenten Ölphase und Wasserphase mit dem Applikationsgerät Prototyp II "Mulchsprayer Vegi"	50
Tabelle 9:	Übersicht über die Fahrgeschwindigkeiten und Höheneinstellungen der Düsen zur Erzeugung verschiedener Schichtdicken und Streifenbreiten	50
Tabelle 10:	Übersicht über die Anzahl an Saatstellen und Wiederholungen der Versuchsvarianten der jeweiligen Kultur bei den Gewächshausversuchen	52
Tabelle 11:	Übersicht über die unterschiedlichen Versuchsvarianten des Keimungsversuchs	53
Tabelle 12:	Übersicht über die Versuchsflächen der drei Versuchsjahre	54
Tabelle 13:	Witterungskenngrößen der im Versuchsfeld angebrachten Wetterstation	55
Tabelle 14:	Tropfabstände der Bewässerungsschläuche bei den Gemüsekulturen im Versuchsjahr 2023	56
Tabelle 15:	Tropfabstände der Bewässerungsschläuche bei den Gemüsekulturen im Versuchsjahr 2024	57
Tabelle 16:	Überblick über die Versuchsvarianten von 2023, 2024 und 2025	58
Tabelle 17:	Zeitpunkt des Abbruchs der Bonitur der Nullvariante in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025	58
Tabelle 18:	Versuchsvarianten des Tastversuchs II Einlegegurke am Standort Bamberg im Versuchsjahr 2023	62
Tabelle 19:	Übersicht über den Zeitpunkt der Erfassung der Beikrautart und Wuchshöhe	65
Tabelle 20:	Übersicht über die Erntezeiträume der Zucchini	66
Tabelle 21:	Übersicht über die Erntezeiträume der Melone	67

Tabelle 22:	Übersicht über die Erntezeiträume des Kürbisses	67
Tabelle 23:	Übersicht über die Erntezeitpunkte der Einlegegurke	68
Tabelle 24:	Vergleichsvarianten für die Analyse der Verfahrenskosten für die Kultivierung von Zucchini, Kürbis und Einlegegurke	69
Tabelle 25:	Allgemeine Annahmen für die Berechnung der Verfahrenskosten.....	70
Tabelle 26:	Spezifische Annahmen für die getesteten Kulturen Zucchini, Kürbis und Einlegegurke für die Berechnung der Verfahrenskosten.....	71
Tabelle 27:	Zuordnung der Bestandteile des ölbasierten Mulchmaterials zu den jeweiligen Datensätzen aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.11 [68] und weiteren Quellen.....	73
Tabelle 28:	Zuordnung der Bestandteile des wasserbasierten Mulchmaterials zu den jeweiligen Datensätzen aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.11 [68] und weiteren Quellen.....	74
Tabelle 29:	Gelierwirkung verschiedener Geliermittel mit den Gelierhilfsmittel NaCl, KCl, NH ₄ Cl, Ca-Citrat in verschiedenen Lösungsmitteln, + = erfolgreiche Gelierung, - = keine Gelierung, -/+ = teilweise Gelierung.....	79
Tabelle 30:	Rezeptur als Basis für eine ölfreie Zusammensetzung des Mulchmaterials (R 226f).....	83
Tabelle 31:	Rezeptur 263n auf Basis des Geliermittels Carboxymethylcellulose und dem Gelierhilfsmittel FeCl ₃	88
Tabelle 32:	Übersicht über die im Freilandversuch am Standort Straubing getesteten Vorzugsvarianten.....	92
Tabelle 33:	Fördermenge und Leitungsdruck in Abhängigkeit der Pumpendrehzahl, der Düsenanzahl und des Mischerblocks der wässrigen Komponente im Applikationsgerät	136
Tabelle 34:	Fördermenge und Leitungsdruck in Abhängigkeit der Pumpendrehzahl, der Düsenanzahl und des Mischerblocks der öligen Komponente im Applikationsgerät	136
Tabelle 35:	Übersicht über die technischen Daten des MulchSprayer Vegi	138
Tabelle 36:	Gesamtkosten in €/ha der unterschiedlichen Kultivierungsverfahren für die Kulturen Kürbis, Zucchini und Einlegegurke	196
Tabelle 37:	Absolute und relative Mehrkosten durch das LiquiMulch-Verfahren im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahrensvariante für die Kultur Kürbis (Hokkaido)	197
Tabelle 38:	Absolut und relative Mehrkosten des LiquiMulch-Verfahrens im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahrensvariante für die Zucchini.....	198
Tabelle 39:	Absolute und relative Mehrkosten des LiquiMulch-Verfahrens im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahrensvariante für die Einlegegurke	199

Abkürzungsverzeichnis

AMPA	Aminomethylphosphonsäure
C:N	Kohlenstoff zu Stickstoff Verhältnis
Ca ²⁺	Calcium-Kation
CaCl ₂	Calciumchlorid
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CaSO ₄	Calciumsulfat
CMC	Carboxymethylcellulose
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FeCl ₃	Eisen-III-Chlorid
GDL	D-Glucuronsäure-γ-lacton
GWE	German Water and Energy Group
H ₂ O	Wasser
ICTP	Institut für chemisch und technologische Polymere
ISO	Internationale Organisation für Normung
K ⁺	Kalium-Kation
KCl	Kaliumchlorid
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.
LDPE	Low Density Polyethylen
LWG	Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbaubau
MPA	Methylphosphonsäure
MW	Mittelwert
Na ₃ PO ₄	Natriumphosphat
NaCl	Natriumchlorid
NH ₄ ⁺	Ammonium-Kation
NH ₄ Cl	Ammoniumchlorid

NO ₃ ⁻	Nitrat
R	Rezeptur
SAM	System für die Applikation des Mulchmaterials
SEM	Standardfehler des Mittelwerts
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
THG	Treibhausgas
TRIS	Trishydroxymethylaminomethan
UV	Ultra-Violett

1 Einleitung und Motivation

Der Gemüseanbau im Freiland trägt wesentlich zur Nahrungsmittelversorgung in Deutschland bei. Im Jahr 2024 wurden auf einer Fläche von 125.550 Hektar Gemüse im Freiland angebaut. Die Bewirtschaftung dieser Flächen erfolgte durch insgesamt 5.633 landwirtschaftliche Betriebe, wobei 1.319 Betriebe ihre Bewirtschaftung vollständig ökologisch ausrichteten [15]. Die erwirtschaftete Erntemenge an Gemüse im Jahr 2024 betrug 3.967.700 t und zeigt seit dem Jahr 2022 einen steigenden Trend.

Aus den Zahlen geht deutlich hervor, dass ein Großteil der Bewirtschaftung der Anbauflächen im konventionellen Stil erfolgt. Zur Sicherstellung von Erträgen und Ernten ist beim konventionellen Freilandgemüseanbau der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, wie Herbiziden zur Beikrautvernichtung, weit verbreitet. Insgesamt werden jährlich 2,4 Millionen Tonnen Pflanzenschutzmittel weltweit auf landwirtschaftliche Böden ausgebracht, wodurch eine Fläche von 28,8 Millionen km² sehr hohen Pflanzenschutzmittelbelastungen ausgesetzt sind [70]. Dabei wird vermutet, dass circa ein Drittel der landwirtschaftlich erzeugten Produkte, wie beispielsweise Freilandgemüse, belastet sind. Herbizide werden zum Schutz der Kulturpflanzen vor störenden Beikräutern und deren Konkurrenz um Nährstoffe und Wasser eingesetzt und zielen auf hohe Erträge und Kosteneffizienz ab. Der ökologische Landbau unterscheidet sich vom konventionellen Landbau, indem er auf chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel, Düngemittel sowie Gentechnik verzichtet und sich auf Nachhaltigkeit, Umweltschutz und Tierwohl fokussiert [48]. Herbizide sind im ökologischen Landbau nicht zugelassen. Die Beikrautregulierung ist daher deutlich aufwendiger und erfolgt mechanisch, beispielsweise durch Hacken, oder physikalisch, etwa durch Abflammen.

Zur Sicherstellung der Unbedenklichkeit von Lebensmitteln werden in regelmäßigen Abständen Kontrollen der Pflanzenschutzrückstände durchgeführt. Im Jahr 2022 wurde in Deutschland bei 1,3 % der Lebensmittel die Rückstandshöchstmenge überschritten. Es ist jedoch zu beachten, dass die Belastung von Lebensmitteln weltweit erheblich variiert. In Nicht-EU-Staaten lag die Überschreitungsquote im Jahr 2022 beispielsweise bei 9,8 %. Angesichts der Tatsache, dass verschiedene Herbizide, das Risiko für Krebserkrankungen oder neurodegenerative Erkrankungen steigern können, ist dieser Anteil durchaus besorgniserregend [2][67]. Zu einem sehr umstrittenen Herbizid zählt zum Beispiel Glyphosat, von welchem vermutet wird, dass es selbst oder dessen Abbauprodukt kanzerogene Effekte auf den Menschen haben [62][36]. Neben der Gesundheit des Menschen können sich Pflanzenschutzmittel auch negativ auf das Ökosystem und die Biodiversität auswirken.

Das Ökosystem kann aber auch durch Mikro- und Makroplastik geschädigt werden, welches durch den Einsatz von Plastikmulchfolien entsteht. Mulchfolien werden unter anderem für das Beikrautmanagement eingesetzt. Aufgrund der notwendigen hohen Widerstandsfähigkeit werden Mulchfolien vor allem aus Low-Density Polyethylen (LDPE) hergestellt. Extreme Witterungsbedingungen, Zersetzung durch UV-Strahlung und mechanische Beschädigungen der Mulchfolien können zu Rückständen in der Umwelt führen. Da diese fossilen Kunststoffe biologisch nicht abbaubar sind, verbleiben sie teilweise als Makro-

und Mikroplastik in den Ackerböden und können die Bodengesundheit erheblich beeinträchtigen. Alternativ gibt es auf dem Markt mittlerweile auch biologisch abbaubare Mulchfolien, welche sich in Abhängigkeit der Umweltbedingungen verschieden schnell und vollständig zersetzen. Ähnlich zu den konventionellen Plastikmulchfolien bleiben jedoch Folienfetzen oft für lange Zeit am Feld liegen und sind für den Laien nicht unterscheidbar [8].

Im Hinblick auf immer weniger zugelassene Herbizide, aufkommende Resistenzen sowie einer drohenden Akkumulation von Mikro und Makroplastik in landwirtschaftlichen Böden müssen zukünftig Alternativen zum Beikrautmanagement etabliert werden. Der Einsatz neuartiger biologisch abbaubarer Funktionsmaterialien anstelle von Kunststoffmulchfolien beim Mulchen oder zur Bekämpfung von Unkraut ist deshalb besonders relevant, da herkömmliche Mulchfolien die größte Quelle für Mikroplastik in landwirtschaftlichen Böden darstellen [49]. Ein neuer Lösungsansatz ist beispielsweise die Verwendung eines spritzbaren Mulchmaterials, das ausschließlich aus biogenen Inhaltsstoffen besteht und sich nach Ende seiner Funktionszeit biologisch abbaut [66]. Als physikalische Barriere soll es den Aufwuchs von konkurrierendem Beikraut hemmen. Außerdem soll sich das Verfahren durch eine hohe Umweltverträglichkeit auszeichnen und so als umweltfreundliche Alternative im Beikrautmanagement Verwendung finden. Neben der Umweltverträglichkeit soll das Verfahren im besten Falle aber auch mit einer bedienerfreundlichen Applikation sowie einer im Vergleich zu anderen Verfahren Zeit- und Arbeitersparnis überzeugen. Um auch wirtschaftlich für die Gemüsebauern attraktiv zu sein, sollten die Kosten des neuen Verfahrens nicht über denen der konventionellen Verfahren liegen.

2 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist es, das neuartige Mulchverfahren mit einem spritzbaren Material aus biogenen Inhaltsstoffen für den Feldgemüseanbau praxistauglich auszugestalten. Ein wesentlicher Aspekt für die Akzeptanz in der Praxis ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Daher soll insbesondere die Optimierung der Rezeptur hinsichtlich der Kosten der Einzelkomponenten aber auch für das Handling bei Bereitstellung und Lagerung erfolgen. Außerdem gilt es, das Potenzial zur Kostenreduzierung bei der Aufwandmenge und bei der Optimierung des Applikationsgeräts zum Beispiel hinsichtlich Flächenproduktivität, Bedienerfreundlichkeit, Reinigung und Wartung auszuschöpfen.

Die besten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden dem Mulchverfahren in Kulturen mit längeren Vegetationszeiten und bei der Anwendung als Ersatz von Mulchfolien im Freilandgemüsebau zugesprochen. Daher liegt der Fokus der Untersuchungen des Mulchverfahrens vor allem auf Gemüsekulturen, die typischerweise auf Mulchfolien angebaut werden, wie z. B. Gurke und Zucchini, bei flächig wachsenden Kulturen wie Melone und Kürbis sowie beispielhaft an Zuckermais als Reihenkultur.

Im Rahmen von mehreren Praxisversuchen im Freiland und unter Glas sollen praktische Erkenntnisse über das Mulchverfahren gewonnen werden. Allen voran soll vor allem die beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchmaterials näher untersucht werden und mit bereits etablierten Verfahren zum Beikrautmanagement verglichen werden. Die Versuchsanstellung erfolgt während dreier Vegetationsperioden. Verglichen werden sollen die Versuchsvarianten mit einer „Nullvariante“ ohne beikrautregulierende Maßnahmen und einer „Kontrollvariante“ mit mechanischer oder physikalischer Beikrautregulierung (Mulchfolie). Bonitiert werden sollen unter anderem die beikrautunterdrückende Wirkung anhand der Bewertung des Beikrautaufwuchses und die Einflüsse auf die Kulturpflanzen, wie z. B. Ertrag und Vermarktungsfähigkeit. Weitere Umweltwirkungen, wie der Einfluss auf das Aufkommen von Wildtieren, auf Bodenmikroorganismen, Regenwürmer sowie die Abbaubarkeit und Effekte auf den Bodenwasserhaushalt (Niederschlagsaufnahme und Evaporation) sollen untersucht werden.

Neben einer effektiven Beikrautunterdrückung spielt aber auch die Verträglichkeit des Mulchmaterials durch die Kulturpflanze eine maßgebliche Rolle am Erfolg des Verfahrens. Dafür sollen im Vorhaben durch unterschiedliche Aussaatzeitpunkte, -verfahren sowie unterschiedlich eingesetzte Aufwandsmengen des Mulchmaterials eine praxisnahe Handlungsempfehlung für die untersuchten Kulturen identifiziert werden. Mit Hilfe unterschiedlicher Aussaatzeitpunkte soll außerdem evaluiert werden, ob besonders wüchsige Gemüsekulturen wie beispielsweise Kürbis oder Zucchini in der Lage sind, durch das Mulchmaterial durchzuwachsen. Mittels regelmäßigen Monitorings der Kulturpflanzenentwicklung soll die Entwicklung der Kulturpflanzen beobachtet werden, um etwaige negative Einflüsse des Mulchmaterials ausschließen zu können.

Exaktversuche sollen im Freiland und unter Glas durchgeführt werden. Die Versuchsanlagen sind teilrandomisiert und mehrfach wiederholt.

Eine ökonomische Bewertung sowie die Energie- und Treibhausgasbilanz für das Mulchverfahren sollen fortgeschrieben werden.

3 Stand des Wissens

3.1 Beikrautregulierung im Feldgemüseanbau

Zur Sicherung von Ertragsqualität und Ernte ist die Regulierung von störendem Beikraut im Freilandgemüseanbau unerlässlich, denn diese treten mit den Kulturpflanzen um Wasser, Nährstoffe und Licht in direkte Konkurrenz. Daneben steigert ein dichter Beikrautaufruchst das Risiko für Pilz- und Bakterienbefall der Kulturpflanzen, da sich eine erhöhte Luftfeuchtigkeit zwischen den Pflanzen negativ auf das Bestandsklima auswirkt. Zusätzlich kann das Beikraut auch als Wirtspflanze und Träger verschiedener Schädlinge oder Krankheiten zur Gefahr für die Kulturpflanzen werden und damit zu großen Ertragseinbußen führen. Für ein effektives Beikrautmanagement im Freilandgemüseanbau stehen dem Landwirt verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, welche im Detail im Folgenden erläutert werden [48].

3.1.1 Falsches Saatbeet

Zum einen besteht die Möglichkeit durch das Anlegen eines falschen Saatbeets bereits zwei bis drei Wochen vor Aussaat oder Pflanzung, etwas gegen das störende Beikraut zu unternehmen. Dabei wird der Samenvorrat einjähriger Samenunkräuter bereits vor der Aussaat im Oberboden erheblich reduziert. Zum Zeitpunkt des 2- bis 4-Blattstadiums erfolgt anschließend die Entfernung der aufgelaufenen Beikräuter, indem eine flache Bodenbearbeitung wie beispielsweise mit Striegel oder Egge durchgeführt wird. Außerdem kann das störende Beikraut auch durch thermische Verfahren wie Abflammen und Dämpfen, oder mechanische Verfahren wie Hacken, Fräsen oder Bürsten beseitigt werden [48].

3.1.2 Herbizide

Im Freilandgemüseanbau ist die Verwendung unterschiedlicher Herbizide ein weitverbreitetes Mittel zur Bekämpfung von konkurrierendem Beikraut. Herbizide werden dabei nach unterschiedlichen Kriterien, wie hinsichtlich der Wirkstoffaufnahme, ihrer Wirkungsweise und dem Einsatzzeitpunkt in verschiedene Gruppen eingeteilt. Zu den häufig im Feldgemüsebau eingesetzten Wirkstoffen zählen Pendimethalin, oder Flufenazet, sowie die Wirkstoffe Propyzamid, Aclonifen, Clomazone, Metribuzin, Dimethenamid-P, Bromoxynil, Metazachlor und Glyphosat [60]. Der Einsatz dieser Wirkstoffe wird allerdings kontrovers diskutiert, da beispielsweise Glyphosat im Verdacht steht eine krebserregende Wirkung zu besitzen [2][67].

Die Vermarktung von Glyphosat, als breitwirksames Herbizid begann im Jahr 1974 durch den amerikanischen Agrochemikalienhersteller Monsanto. Das Erste und wohl bekannteste Glyphosatbasierte Herbizid, das damals auf den Markt drängte, war *RoundUp*®, wobei weitere Produkte wie beispielsweise *Glyphogan*®, *Touchdown*®, oder *Glifloglex*® folgten. Ab 1995 stieg der Einsatz von *RoundUp*® dramatisch an, sodass es mittlerweile zum meist genutzten Herbizid weltweit zählt [55]. Sobald Glyphosat in die Umwelt gelangt, wird

es von Bodenmikroorganismen in seine eigentlich aktiven Formen der Aminomethylphosphonsäure (AMPA) und Methylphosphonsäure (MPA) umgewandelt. Diese Glyphosat Metabolite sind im Boden, im Wasser, in den Pflanzen aber auch in Lebensmitteln und Tieren nachweisbar, wodurch sie auch vom Menschen aufgenommen werden können. Bei wiederholter Aufnahme kann sich Glyphosat in den Nieren, der Leber oder im Darm anreichern [55]. Anfangs als unbedenklich für die Gesundheit des Menschen eingestuft, wird es mittlerweile von der Internationalen Agentur für Krebsforschung als "wahrscheinlich krebserregend" eingestuft. Neben dem Verdacht krebserregend zu sein, deuten aktuelle Studien auch darauf hin, dass Glyphosat und seine Metabolite negative Auswirkungen auf das Nervensystem haben könnten. Zudem wird ein Zusammenhang mit hormonellen Störungen und einer möglichen teratogenen Wirkung vermutet. Darüber hinaus besteht der Verdacht, dass sie schädliche Effekte auf die Leber sowie das kardiovaskuläre System ausüben können [55].

3.1.3 Mulchen

Im Freilandgemüseanbau gilt das Mulchen als bewährtes und wirksames Mittel gegen störende Beikräuter. Das Wort "Mulchen" stammt von dem deutschen Wort "molsch" und bedeutet so viel wie "leicht verrottbar". Darunter versteht man ein landwirtschaftliches Verfahren, bei dem unterschiedliche Abdeckmaterialien auf dem Acker ausgebreitet werden. Als physikalische Barriere verhindern diese Materialien das Aufwachsen von Beikraut und die Keimung von lichtkeimenden Saaten. Mulchen wirkt sich neben der Beikrautunterdrückung außerdem auch positiv auf die Bodentemperatur und den Bodenwasserhaushalt aus [40], nimmt aber viel Zeit in Anspruch. Zu den klassischen Mulchmaterialien zählen zahlreiche organische Materialien wie Stroh, Miscanthushäcksel, Miassilage, Kompost etc. [11].

Allerdings wird beim Mulchen immer häufiger auf synthetische Materialien wie die Plastikmulchfolie zurückgegriffen [41]. Plastikmulchfolien basieren meist auf fossilen Rohstoffen, wie beispielsweise Polyethylen, Polypropylen oder LDPE, und sind nicht biologisch abbaubar [1]. Bei Verwendung von Plastikmulchfolien zur Unkrautunterdrückung besteht ein erhöhtes Risiko, dass es dadurch zum Eintrag von Mikro- und Makroplastik in landwirtschaftlich genutzte Böden kommt. Durch die zum Teil verfahrensbedingten Beschädigungen der Mulchfolie sowie einer Schädigung der Folien durch UV-Strahlung, kann es zur Entstehung von größeren oder kleineren Folienfetzen kommen, die weiter in Mikroplastik fragmentieren. Bei wiederholter Anwendung von Plastikmulchfolien kann es zur Akkumulation von Mikroplastik kommen, wodurch das agrar-ökologische System aus dem Gleichgewicht geraten kann und die Bodengesundheit der Agrarflächen nachweislich Schaden erleidet [49]. Oxo-biologisch abbaubare Mulchfolien fanden ebenfalls Anwendung, wurden jedoch mit der Einführung der EU-Richtlinie (EU) 2019/904 vom Markt genommen [28]. Auch abbaubare Mulchfolien sind bereits am Markt verfügbar. Ihre Zersetzung hängt jedoch stark davon ab, ob es gelingt, die Folienteile in den Boden einzuarbeiten. Die ungleichmäßige Zersetzung biologisch abbaubarer Folien führt häufig dazu, dass Folienreste zurückbleiben. Diese sind oft über längere Zeit auf dem Feld sichtbar und sind für Laien

kaum von konventionellen Folien zu unterscheiden. In vielen Fällen wird deshalb den Anbauern (Pächtern) der Einsatz abbaubarer Folien von den Eigentümern untersagt.

Alternative Funktionsmaterialien zur Beikrautregulierung

Seit den 1980er Jahren wird intensiv an der Entwicklung umweltverträglicher und biologisch abbaubarer Materialien geforscht. Dabei rücken insbesondere Biopolymere wie Zellulose, Chitin, Chitosan, Alginat und Polypeptide in den Mittelpunkt der Forschung. Einige dieser Biopolymere wurden bereits auf ihre potenzielle Eignung als biologisch abbaubare Funktionsstoffe geprüft.

Ein innovativer Ansatz ist beispielsweise der Einsatz von sprühfähigen biologisch abbaubaren Funktionsmaterialien als alternative zu Plastikfolien. In der Literatur wurden dazu schon zahlreiche unterschiedliche neuartige Materialien und Untersuchungen zu deren Wirkung evaluiert. Dazu zählen unter anderem Mulchmaterialien auf Basis von Polysaccharid-Polymeren wie Stärke, Zellulose oder Chitosan. Das Institut für chemische und technologische Polymere (ICTP) entwickelte außerdem einen Sprühmulch aus natürlichen Polymeren von Seegräsern und Krustentieren [39][39]. Darüber hinaus wurden in weiteren wasserbasierten, biologisch abbaubaren und sprühfähigen Mulchmaterialien auch Protein-Polymere wie Gelatine sowie Polyethylenglykole und Polysiloxane eingesetzt [26]. Unter den Handelsnamen Ecoflex®, Bio-Flex® oder Ecocropp sind vereinzelt Produkte auf dem Markt verfügbar [1].

Das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) hat eine spritzbare Siloabdeckung entwickelt, welche auf einem Zwei-Komponenten System basiert [30]. Nach gegenseitigem Kontakt der beiden Komponenten gelieren diese miteinander und härten aus. Das Material selbst zeichnet sich unter anderem durch seine aerobe und anaerobe Abbaubarkeit aus. Es ermöglicht die sichere Silage des Grünguts, indem ein gasdichter Abschluss der Silage über mehrere Monate ermöglicht ist. Durch die einfache Applikation kann eine dreilagige Folieneabdeckung ersetzt werden [59][65]. Die Wirksamkeit zur Beikrautunterdrückung ist gegeben, der gasdichte Abschluss ist jedoch bei der Verwendung als Mulchmaterial unerwünscht. Neben der spritzbaren Silageabdeckung wurde am TFZ auch an neuartigen Funktionsmaterialien für das Beikrautmanagement geforscht. Im Rahmen des Vorhabens „Alternatives Beikrautmanagement im Obst- und Weinbau mit ökologisch unbedenklichen Substanzen und einem alternativen Mulchverfahren auf Basis Nachwachsender Rohstoffe - ABOW“ wurde ein spritzbares und biologisch abbaubares Zwei-Komponenten-Mulchmaterial aus biogenen Rohstoffen entwickelt [44][29]. In einem zeitlich zum Vorhaben OptiMulch parallelen Projekt ABOWPrax [45] wird die Praxistauglichkeit des neuartigen Materials für die Verwendung in Dauerkulturen weiter optimiert. Das Nutzungspotential des spritzbaren Mulchmaterials im Gemüseanbau wurde im Vorhaben "MuNaRo - Beikrautunterdrückung im Feldgemüsebau mit einem spritzbaren Zweikomponenten-Mulchmaterial auf Basis Nachwachsender Rohstoffe" näher untersucht [66]. Dabei konnte eine effektive physikalische Barrierewirkung des Mulchmaterials gegenüber Beikräutern beobachtet werden, wobei dieser Effekt stark von der Bodenvorbereitung und der Unversehrtheit des Materials abhängig ist. Auch eine geeignete Sätechnik und Pflanztechnik beeinflusst den Erfolg des Verfahrens. Als Verdunstungsschutz zeigt das Mulchmaterial einen

regulierenden Effekt auf die Bodenfeuchte. Außerdem kann es vor Bodenerosion schützen, denn nach Applikation an Karottendämmen konnte eine erhöhte Stabilität dieser beobachtet werden. Das Material zeichnet sich durch seine biologische Abbaubarkeit aus, wodurch es nicht im Boden akkumuliert und bisher keine negativen Auswirkungen des Mulchmaterials auf die Bodengesundheit gezeigt hat. Das Mulchverfahren eignet sich nicht für die Kultivierung aller Kulturpflanzen, da beispielsweise bei der Kultivierung von Kopfsalat Wuchsdepressionen in der vegetativen Juvenil-Wachstumsphase beobachtet werden konnten [66].

3.2 Umweltauswirkungen verschiedener Maßnahmen zur Beikrautregulierung

Neben den gesundheitlichen Risiken für den Menschen, führt der intensive Einsatz von Herbiziden zu zahlreichen Wirkstoffresistenzen. Dabei entwickeln Unkräuter die Fähigkeit widerstandsfähiger gegen den Wirkstoff eines Herbizids zu werden. Diese Unkräuter können dann trotz Herbizideinsatz weiterwachsen und sich ausbreiten. Zu europäischen Ländern, die besonders von Herbizid Resistenzen betroffen sind, zählen beispielsweise Frankreich und Spanien. In einem weltweiten Ranking von Ländern, die besonders von Herbizid Resistenzen betroffen sind, nimmt Spanien sogar den fünften Platz ein hinter Kanada, USA, Brasilien und Australien [51]. Durch den zunehmenden Einsatz steigt künftig auch bei Glyphosat das Risiko, dass Herbizid Resistenzen entstehen und die Wirksamkeit damit erheblich abnimmt. Um das Risiko für die Entstehung von Wirkstoffresistenzen zu umgehen, muss deshalb zukünftig der Einsatz von Herbiziden in der Landwirtschaft überdacht werden, um eine langfristige Sicherstellung der Lebensmittelproduktion zu gewährleisten [51].

Aber auch der Einsatz von Plastikmulchfolien ist umstritten, da Plastikmulchfolien den Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt verursacht. Zahlreiche Studien belegen, dass Mikroplastik, insbesondere aus Polyethylen, die Entwicklung und das Wachstum von Regenwürmern beeinträchtigen kann, da es im Darm nicht verdaut wird. Dadurch besteht die Gefahr, dass die Würmer trotz vollem Magen verhungern. Zudem beeinflusst Mikroplastik das Längenwachstum und die Reproduktionsfähigkeit der Würmer [64]. Auch bei Kulturpflanzen wie Weizen, wurde beobachtet, dass Mikroplastikrückstände das vegetative und reproduktive Wachstum negativ beeinflussen [49]. Neben negativen Auswirkungen auf Tiere und Kulturpflanzen direkt, kann der Eintrag von Mikroplastik in den Ackerboden auch dazu führen, dass sich die Bodenbeschaffenheit der Böden langfristig verändert. Davon betroffen sind vor allem Faktoren wie die Bodenverdichtung, die Korngröße der Bodenaggregate und die Verdunstung und Transpiration des Bodens, die sich indirekt auf die Pflanzenleistung auswirken können [13]. Mikroplastik im Boden kann die Wasserverdunstung beschleunigen, indem es die Wasserleitung durch Kanäle verbessert und zudem Veränderungen in der Bodenmikrobiologie bewirkt, insbesondere bei den Mikroben, die die Wurzeln besiedeln [49]. Um zu verhindern, dass die Gesundheit des sensiblen Ökosystems des Ackerbodens durch Mikroplastik langfristig geschädigt wird, sollte der Eintrag des nicht biologisch abbaubaren Plastikmülls in den Ackerboden dringend vermieden werden.

3.3 Anbauverfahren im Gemüsebau

Der Gemüseanbau in Deutschland hat eine bedeutende wirtschaftliche, ökologische und gesellschaftliche Rolle. Er trägt wesentlich zur Versorgung der Bevölkerung mit gesunden Nahrungsmitteln bei und ermöglicht Wertschöpfung im ländlichen Raum. Zu den bedeutendsten Kulturen zählen unter anderem Spargel, der mit 22.827 Hektar im Jahr 2024 flächenmäßig den größten Flächenumfang einnahm, sowie Speisezwiebeln oder Karotten [7]. Aber auch andere Gemüsekulturen sind Teil der deutschen Gemüseproduktion, wie beispielsweise Einlegegurken, verschiedene Kohllarten oder Eis- und Kopfsalat [34]. Bei der Kultivierung verschiedener Gemüsekulturen hat sich die Verwendung von Plastikmulchfolien zur Saisonverfrühung oder -verzögerung, sowie zum Beikrautmanagement etabliert. Zu den Kulturen, bei denen Mulchfolien häufig zur Beikrautunterdrückung angewendet werden zählen beispielsweise Zucchini, Kürbis, Melonen, Zuckermais oder Einlegegurken.

Der Anbau von Zucchini hat vor allem in den Exportländern wie Spanien und Italien eine große Bedeutung, aber auch in Deutschland steigt die Anbaufläche und die Erntemenge an. Mit einer Anbaufläche von 1.173 ha und einem Ernteertrag von 402,8 dt/ha im Jahr 2024 kann die steigende Inlandsproduktion die Importe aus dem Ausland immer mehr von Markt drängen [7]. Der Anbau im Freiland beginnt ab Mitte April und erfolgt üblicherweise in 2 - 3 Sätzen. Dabei wird die Zucchini gepflanzt; nach circa 40 - 45 Tagen startet die Ernte. Auch eine Direktsaat der Zucchini ist möglich, welche nach 50 - 55 Tagen geerntet werden kann. Eine Verfrühung der Ernte ist durch eine Vliesauflage oder Kleintunnel möglich. Wie bereits erwähnt zählt zu den üblichen Kulturarbeiten auch die Verlegung schwarzen Mulchfolien zur Unkrautbekämpfung sowie der die Verwendung von Herbiziden [48].

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, ist auch der Anbau von Speisekürbissen in Deutschland in den letzten Jahren stark gestiegen. Betrug die Anbaufläche im Jahr 2005 rund 1.200 ha, konnte bis zum Jahr 2024 ein Anstieg auf 5.258 ha Anbaufläche verzeichnet werden [7]. Kürbisse werden meist als Direktsaat von Anfang bis Mitte Mai ausgesät. Nach 85 - 125 Tagen kann je nach Sorte mit der Ernte begonnen werden, wobei der durchschnittliche Ernteertrag im Jahr 2024 bei 217,4 dt/ha lag. Auch im Kürbisanbau ist es üblich zur Unkrautbekämpfung Mulchfolien zu verwenden und zwischen den Reihen Herbizide gegen den Beikrautaufruchst einzusetzen [48].

In Deutschland werden Melonen nur vereinzelt angebaut, hauptsächlich in Lagen mit Weinbauklima oder in Gewächshäusern. Dafür werden meist Jungpflanzen gezogen, die ab Mitte Juni ohne Abdeckung gepflanzt werden können. Um den Boden zu erwärmen, empfiehlt es sich, zwei Wochen vor der Pflanzung eine schwarze Mulchfolie zu verlegen. Die Ernte der Melonen im Freiland erfolgt gestaffelt und beginnt Ende Juli bis Anfang September. Zur Bekämpfung von Beikraut ist der Einsatz von schwarzen Plastikmulchfolien weit verbreitet [48].

Auf einer Anbaufläche von circa 2.081 ha wurde im Jahr 2024 in Deutschland außerdem Zuckermais angebaut. Dabei konnte insgesamt ein Ertrag von 110,1 dt/ha erwirtschaftet werden [7]. Die Aussaat erfolgt ab Ende März bis Mitte Juni und findet üblicherweise in

mehreren Sätzen statt. Bis zur Ernte benötigen die unterschiedlichen Sätze circa 93 - 115 Tage. Folien kommen zum einen bei der Kultivierung von Fröhsorten zum Einsatz, um die Ernte zu verfröhen, oder bei Direktsaaten, die unter sehr dünne, transparente Folien gesät werden [48].

Die Einlegegurke zählt besonders in Bayern zu den wirtschaftlich bedeutendsten Gemüsekulturen. Besonders in Niederbayern spielt der Anbau der Einlegegurken eine große Rolle, weshalb dort das größte zusammenhängende Anbaugebiet mit etwa 1.000 ha. Europas besteht. Im Jahr 2024 wurden in Deutschland auf einer Fläche von 1.882 ha Einlegegurken angebaut, wobei ein Ernteertrag von 1.135,2 dt/ha erzielt wurde [7]. Die Aussaat der Einlegegurken erfolgt häufig unter Verwendung von pneumatischen Sämaschinen, welche die Mulchfolien durchstoßen und das Saatgut in der Erde ablegen. Je nach Einsatz von Vliesen kann die Ernte ab Mitte Juni oder ab Anfang Juli beginnen. Aufgrund des starken Wachstums ist in der Regel eine Ernte zwei- bis dreimal pro Woche notwendig, wobei häufig ein Gurkenflieger eingesetzt wird. Auch bei der Einlegegurke ist die Verwendung von schwarzen Mulchfolien zur Beikrautregulierung sowie der Einsatz von Herbiziden zwischen den Reihen Standard [48].

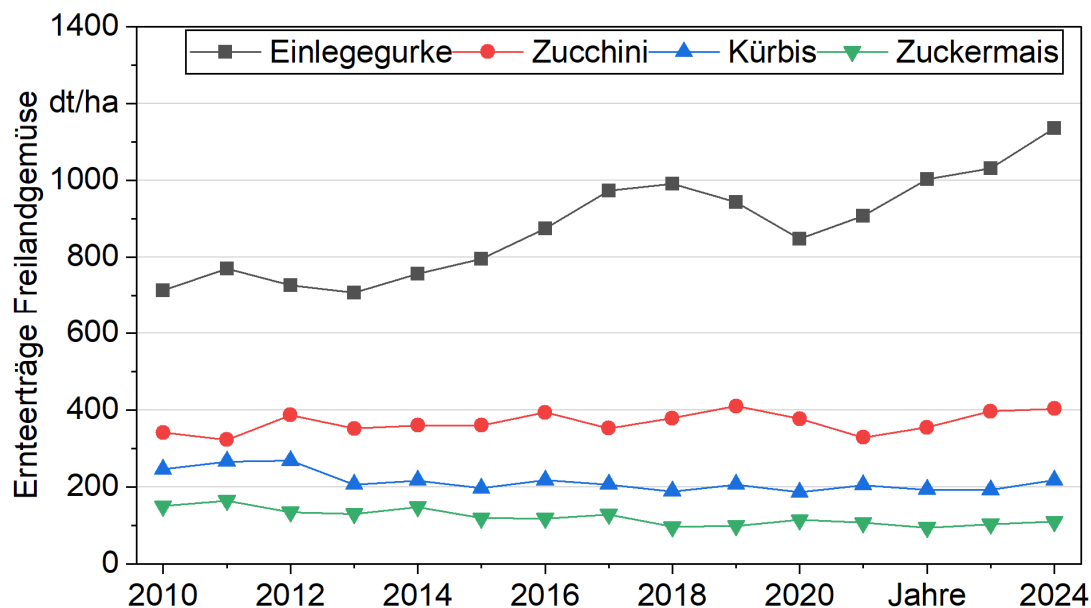


Abbildung 1: Entwicklung der Ernteerträge in dt/ha der Gemüsekulturen Einlegegurke, Zucchini, Kürbis und Zuckermals über die Jahre 2010 bis 2024 (Datenquelle: Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat, [7])

3.4 Bodenökologie

Die Bodenökologie beschäftigt sich mit den Wechselwirkungen im Boden, einschließlich der Auswirkungen menschlicher Eingriffe wie der Verwendung von Pestiziden oder Plastikmulchfolien. Diese Eingriffe können die Bodenbiologie und -ökologie beeinflussen, indem sie beispielsweise die Bodenorganismen schädigen, die Bodenfruchtbarkeit verändern oder die Prozesse der Mineralisierung und Nährstoffkreisläufe beeinträchtigen.

Pestizide können die Vielfalt und Aktivität der Bodenorganismen verringern, was wieder Auswirkungen auf beispielsweise die Stickstoffmineralisierung haben kann. Plastikmulchfolien können die Bodentemperatur, -feuchtigkeit und -belüftung verändern, was sich ebenfalls auf die Stickstoffmineralisierung auswirken kann.

Um die Auswirkungen verschiedener landwirtschaftlicher Verfahren auf die Bodengesundheit besser zu verstehen, ist es daher sehr hilfreich, sich mit den biologischen Prozessen im Boden auseinanderzusetzen. Ein viel untersuchter Parameter ist dabei die Untersuchung des mineralischen Stickstoffs im Boden. Mineralischer Stickstoff ist für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen wichtig, denn er stellt einen lebenswichtigen Nährstoff dar. Zu den wichtigsten Vertretern des mineralischen Stickstoffs zählt Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-). Im Rahmen der Stickstoffmineralisierung wird das Ammonium (NH_4^+), welches beispielsweise über die Düngung in den Boden gelangt, über die Nitrifikation zu Nitrat (NO_3^-) umgewandelt (Abbildung 2). Diese Umwandlung wird über die Bakterien *Nitrosomonas* und *Nitrobacter* biologisch katalysiert. Da die Verfügbarkeit von NH_4^+ im Boden für die Pflanzen schlechter ist, wird es langsamer von diesen aufgenommen. Dagegen ist NO_3^- aufgrund seiner Beweglichkeit im Boden deutlich besser für die Pflanzen verfügbar, allerdings kann eine übermäßige Bewässerung oder Starkregenereignisse auch zur Auswaschung des NO_3^- im Boden führen [4].

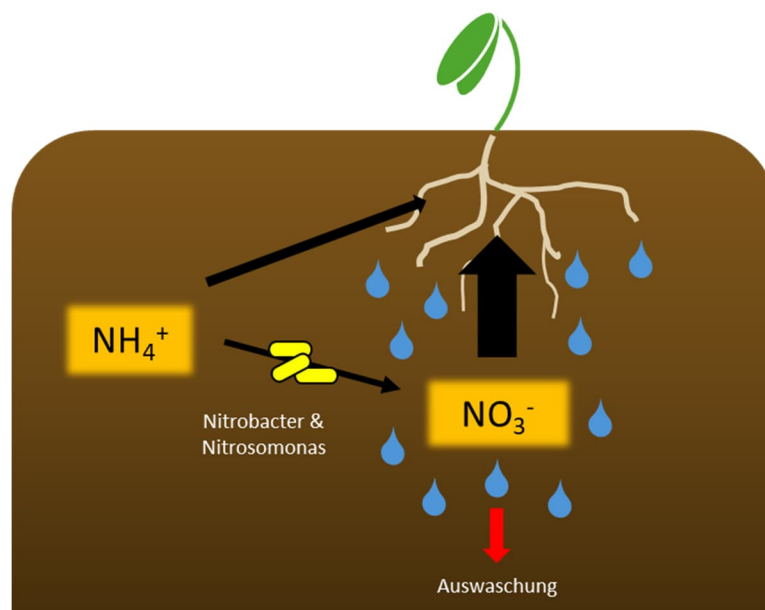


Abbildung 2: Ablauf der Stickstoffmineralisierung im Boden [4]

Auch über die Luft, welche aus 78,1 % (v/v) Stickstoff (N_2) besteht, kann Stickstoff in den Boden gelangen. Dementsprechend ist auch ein ausreichender Gasaustausch für die Stickstoffmineralisierung sehr wichtig. Studien haben gezeigt, dass Mulchschichten, wie Stroh den Gasaustausch beeinflussen können und sich dementsprechend negativ auf die Stickstoffmineralisierung auswirken können [5].

4 Material und Methoden

4.1 Aufspritzbares Mulchmaterial

4.1.1 Rezeptur des im Feldversuch eingesetzten Mulchmaterials LiquiMulch

Für die Versuche im Freiland wurde die im Rahmen des Projekts "ABOW" entwickelte Rezeptur R 114k verwendet [44]. Die Zusammensetzung des aus zwei Komponenten gebildeten Mulchmaterials ist in Tabelle 1 aufgeführt. Die beiden Komponenten werden im weiteren Berichtsverlauf als "Ölphase" für die Komponente A und als "Wasserphase" für die Komponente B bezeichnet.

Tabelle 1: Rezeptur des Mulchmaterials LiquiMulch

Komponente	Bestandteil	Funktion	Anteil in Masse-%
A	Rapsöl	Basis	30,8
	Natriumalginat	Geliermittel	1,3
	Calciumsulfat	Gelierhilfsmittel	1,5
	Zellulosefasern	Füllstoff	2,4
B	Wasser	Basis	45,6
	Stärke	Bindemittel	12,5
	Glycerin	Weichmacher	4,6
	Natriumphosphat	Steuerung der Gelierung	0,3
	Natriumbenzoat	Konservierungsmittel	1,1
	Sorbitol	Feuchthaltemittel	2,3

Die beiden Hauptbestandteile des LiquiMulchs sind Wasser und Rapsöl, welche vor allem als Lösungsmittel der beiden Komponenten dienen. Wie in Tabelle 1 dargestellt, basiert die Komponente A auf 30,8 % Rapsöl, welches als Lösungsmittel für 1,3 % Natriumalginat, 1,5 % Calciumsulfat und 2,4 % Cellulosefasern eingesetzt wird. Die Komponente B ist mit einem Anteil von 45,6 % wasserbasiert und enthält daneben 12,5 % Stärke als Füllstoff, 4,6 % Glycerin als Weichmacher, 0,3 % Natriumphosphat, 1,1 % Natriumbenzoat als Konservierungsmittel und 2,3 % Sorbitol als Feuchthaltemittel. Natriumalginat wird als Geliermittel eingesetzt, welches neben dem Gelierhilfsmittel Calciumsulfat für die Gelierung des Materials verantwortlich ist. Über die Anwesenheit von Natriumphosphat kann die Geliergeschwindigkeit nach Bedarf gesteuert werden. Das als Lebensmittelzusatzstoff E211 deklarierte Natriumbenzoat wird verwendet, um gegen Schimmelbildung vorzubeugen. Insgesamt sind über 50 Masseprozent des Mulchmaterials aus "Nachwachsenden Rohstoffen", da Rapsöl, Stärke, Zellulosefasern (BC200) und Glycerin Pflanzeninhaltsstoffe sind oder daraus hergestellt werden. [44].

4.1.2 Entwicklung und Optimierung der Rezeptur

Die Optimierung der Rezeptur des Mulchmaterials erfolgt in Abstimmung und synergistisch zu den Arbeiten im Vorhaben ABOWPrax [44].

4.1.2.1 Geliermittel

Für die Entwicklung einer ölfreien Rezeptur wurden als erster Schritt geeignete Geliermittel identifiziert, die für den Einsatz im Mulchmaterial in Frage kommen können. Dazu sind vor allem Geliermittel interessant, deren Gelierung auf der Anwesenheit von ein oder zweiwertigen Ionen basiert. Diese Abhängigkeit erlaubt es im Rahmen der Applikation die Geliergeschwindigkeit zu steuern. Für die Identifizierung des idealen Konzentrationsverhältnisses zwischen Geliermittel und Gelierhilfsmittel, wurden unterschiedliche Konzentrationen der beiden Komponenten in wässriger Lösung miteinander vermischt. Die getesteten Geliermittel und Gelierhilfsmittel sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, wurden als Grundlage für die ölfreie Zwei-Komponenten-Rezeptur zwei Geliermittel und zwei Gelierhilfsmittel für eine Komponente A und B festgelegt. Um die Stabilität des entstandenen Hydrogels zu erhöhen, wurde die Rezeptur anschließend mit unterschiedlichen Füllstoffen erweitert. Außerdem wurden für die Anpassung der Lichtdurchlässigkeit auch verschiedene Farbstoffe getestet. Die Polymerisierung der dabei entstandenen Prüfkörper wurde nach 24 h bewertet und über mehrere Tage beobachtet, um etwaige Veränderungen oder z. B. auch Schimmelbildung fest stellen zu können.

Tabelle 2: Übersicht über die getesteten Geliermittel und Gelierhilfsmittel

Polymer	Lösungsmittel	Gelierhilfsmittel
Natriumalginat		
κ-Carrageen		
Pektinamid AF		
Amid CB		
Pektinamid CF		
Chitosan	H ₂ O (Leitung), VE-Wasser	NaCl,
Guarkernmehl		KCl,
Konjak		NH ₄ Cl,
Johannisbrotkernmehl		Ca-Citrat
Caarageenmoos		
Milchsäure-Chitosan		
Xanthan		

4.1.2.2 Entwicklung neuer Formulierungen

Für die Optimierung der Rezeptur wurden verschiedene Reststoffe wie Apfeltrester, Semmelbrösel oder Kaffeesatz als neuer Füllstoff oder neuartige Geliermittel auf ihre Eignung hin untersucht. Da die Rezeptur der beiden Komponenten aus einer komplexen Zusammensetzung besteht, bei denen eine Änderung eines Inhaltsstoffs das Risiko eines Funktionsverlusts birgt, musste die Gelierfähigkeit der Gele und ihre Stabilität jeweils neu geprüft und analysiert werden. Sobald Veränderungen in den Eigenschaften der Gele festgestellt wurden, wurden die Komponenten angepasst oder gegebenenfalls ausgetauscht.

4.1.2.3 Untersuchung der Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung der Vorzugsrezepturen

Für die Untersuchung der Witterungsbeständigkeit und der Beikrautunterdrückung wurden die vielversprechendsten Rezepturen, die aus der Materialentwicklung hervorgegangen waren auf TFZ eigenen Versuchsflächen im Freien appliziert. Die Applikation fand am 17.04.2025 statt und wurde mit einer Trichterspritze, vergleiche hierzu Kapitel 4.3.2, durchgeführt. Es wurden alle Varianten dreifach wiederholt. Die Versuchstreifen waren randomisiert auf der Versuchsfläche verteilt und wurden jeweils mit einer Breite von 0,6 m und einer Länge von 3 m appliziert. Die Schichtdicke pro Variante betrug 5 mm. In regelmäßigen Abständen wurden die Streifen fotografisch dokumentiert und auf ihre Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung bonitiert.

4.2 Untersuchungen der Umweltwirkungen des aufspritzbaren Mulchmaterials

4.2.1 Untersuchungen der Abbaubarkeit des aufspritzbaren Mulchmaterials

4.2.1.1 Analytik der Beständigkeit des Mulchmaterials auf der Erdoberfläche

Die Auswertung der Beständigkeit und des Abbaus auf der Erdoberfläche wurde anhand der bei der fotografischen Dokumentation der Beikrautbonitur gewonnenen Daten durchgeführt. Bei der Beurteilung der Haltbarkeit spielen vor allen Faktoren wie die Rissbildung des Materials sowie die Farbeveränderung und die Veränderung der Konsistenz eine wichtige Rolle.

4.2.1.2 Rückstandsanalytik des Mulchmaterials nach Einarbeitung in den Boden

Die Analyse von Mulchrückständen im Erdreich nach Bodenschluss wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 17827-1:2016-10 [20] vorgenommen. Dafür wurde jeweils in jeder der vier Parzellen der LiquiMulch 5 mm Variante in der Kultur Melone an zwei unterschiedlichen Stellen in ca. 20 cm Tiefe eine Bodenprobe, jeweils ca. drei Liter, entnommen. Anschließend wurden diese für 48 h bei Raumtemperatur und im Dunklen getrocknet. Es wurden 2 kg der trockenen Probe eingewogen und mit Hilfe einer Siebmaschine gesiebt. Dafür wurden ausschließlich Siebe mit Rundlöchern mit Durchmessern von 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 3,15 mm und 2,0 mm verwendet. Bei einer Siebfrequenz von 200 *rounds per minute* (rpm) wurde die Probe für 15 Minuten gesiebt. Anschließend wurden die einzelnen Fraktionen manuell auf Mulchrückstände durchsucht und die Funde fotografisch dokumentiert.

4.2.1.3 Analytik der biologischen Abbaubarkeit des Mulchmaterials

Die Untersuchungen erfolgten in Abstimmung und synergistisch mit dem Vorhaben ABOWPrax [44].

Für die Evaluierung der Abbaubarkeit des aufspritzbaren Mulchmaterials wurden Abbaubarkeitsversuche im Labormaßstab durchgeführt. Die Versuchsanstellung erfolgte in Anlehnung an die DIN EN ISO 17556:2019-09 "Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoffmaterialien im Boden durch Messung des Sauerstoffbedarfs in einem Respirometer oder der Menge des entstandenen Kohlenstoffdioxids" [21]. Zur Standardisierung der Testbedingungen wurde am Tag des Versuchsaufbaus eine Standarderde nach den Vorgaben der DIN EN ISO 17556:2019-09 hergestellt. Diese setzt sich aus 70 % Quarzsand, 10 % Calciumbentonit, 16 % natürlichem Boden, 4 % Kompost und verschiedenen Salzen zusammen. Davon wurden jeweils 200 g in eine Gaswaschflasche eingewogen und mit 20 mL Wasser angefeuchtet. Die Gaswaschflasche wurde daraufhin mit einem Deckel mit zwei Gasröhrchen verschlossen, um später einen dichten Gasfluss anlegen zu können. Insgesamt wurden pro Durchlauf drei Varianten analysiert: eine Nullvariante, ohne Zugabe eines weiteren Stoffes, eine Referenzvariante unter Zugabe von Stärke oder mikrokristalliner Cellulose, sowie eine Variante unter Zugabe von LiquiMulch.

Es werden für alle Varianten jeweils 2,5 g vom jeweiligen Testmaterial eingesetzt. Eine Übersicht über den schematischen Aufbau der Abbaubarkeitsversuche zeigt Abbildung 3.

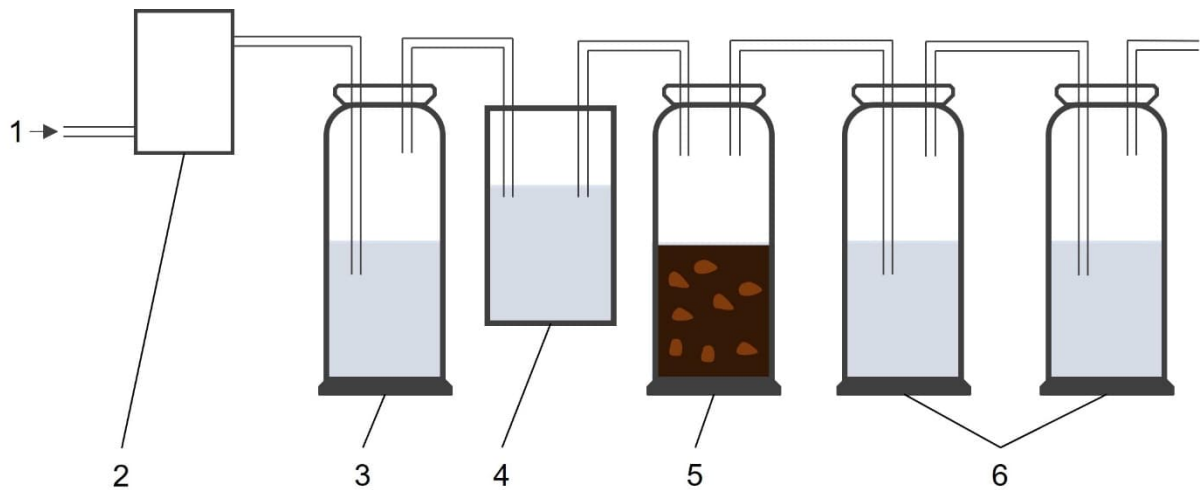


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Abbaubarkeitsversuchs nach DIN EN ISO 17556:2019-09, 1: Luftstrom, 2: Luftstromregler, 3: Waschflasche mit Kaliumhydroxidlösung, 4: Flasche mit H₂O, 5: Probengefäß mit Material, 6: Waschflaschen mit Kaliumhydroxidlösung [44]

In das geschlossene System wurde ein konstanter Luftstrom (1) eingeleitet, dessen Strömungsstärke mit einem Regler (2) eingestellt werden kann. Um das in der Luft enthaltene CO₂ herauszufiltern, wurde der Luftstrom anfangs durch eine 5 molare Kaliumhydroxidlösung (3) geleitet. Anschließend wurde der Luftstrom angefeuchtet, indem er die nachfolgende Waschflasche gefüllt mit H₂O (4) passierte. Von dort aus strömte die Luft durch das Probengefäß (5) und durch zwei in Reihe geschaltete weitere Waschflaschen (6), die jeweils 100 mL Kaliumhydroxidlösung ($c = 0,1 \text{ mol/L}$) enthielten. Das durch den Abbau entstandene Kohlenstoffdioxid wurde in diesen Flaschen aufgefangen, indem es mit den Hydroxidionen in der Lösung reagiert und so adsorbiert wurde [21].

4.2.1.4 Analytik der Stickstoffmineralisierung im Boden

Für die Untersuchung der Stickstoffmineralisierung wurden in regelmäßigen Abständen ca. ein bis zwei Liter Mischbodenproben der verschiedenen Varianten entnommen und analysiert. Die Proben wurden in einer Bodentiefe von 30 cm gezogen. Die Analytik der Bodenproben wurde vom Fachzentrum Analytik an der LWG in Veitshöchheim durchgeführt. Die genauen Zeitpunkte der Entnahme der Bodenproben, während der drei Versuchsjahre sind in den jeweiligen Daten zur Kulturführung im Anhang hinterlegt.

4.2.1.5 Analytik des pH-Werts im Boden

Die Analytik des pH-Werts des Bodens erfolgte in Anlehnung an die DIN EN ISO 10390 Norm "Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung des pH-Werts" [22]. Dabei wurden 5 mL der vorher homogenisierten Probe mithilfe eines Messlöffels in ein Probengefäß gegeben und mit 25 mL destilliertem Wasser versetzt. Anschließend wurde die Probe für 60 Minuten gerührt und für weitere 60 Minuten stehen gelassen. Mit einem pH-Messgerät wurde der pH-Wert der Probe gemessen. Für jede Variante wurde der pH-Wert dreifach wiederholt bestimmt, wobei die Messung bei Raumtemperatur durchgeführt wurde.

4.2.2 Regenwurmbonitur

Die Erfassung des Regenwurmbestands orientierte sich an der an der von WALTER, R. UND BURMEISTER J. (2019) beschriebenen Methode [3].

Tabelle 3 zeigt die Vorgehensweise bei der Regenwurmerfassung unter dem LiquiMulch. Dabei wurden pro Parzelle jeweils zwei Erdproben aus jeweils zwei Gruben mit einer Größe von 20 x 20 x 20 cm entnommen. Insgesamt wurden acht Erdproben pro Variante analysiert. Jede Probe wurde direkt nach der Entnahme auf einer Folie ausgebreitet und von Hand nach Regenwürmern durchsucht. Neben der Anzahl der darin enthaltenen Regenwürmer wurde außerdem auch die Masse der Regenwürmer bestimmt. Während der Auszählung der entnommenen Erdprobe wurden gleichzeitig 500 mL einer auf Wasser basierten Senflösung mit einer Konzentration von 5 g/L in die Grube gegossen, um die Anzahl und Biomasse der Regenwürmer in Bodenschichten tiefer 20 cm zu erfassen. Nach circa 30 min Einwirkzeit wurden die an der Oberfläche befindlichen Regenwürmer aufgesammelt und ebenfalls ausgezählt. Die ermittelte Anzahl der Regenwürmer wurde als Individuen/m² angegeben und das Gewicht in g/m². Die Regenwurmbonitur wurde zweimalig durchgeführt, vom 23.-24.10.2023 und vom 09.-10.10.2024.

Tabelle 3: Vorgehen bei der Regenwurmbonitur nach WALTER, R. und BURMEISTER J. (2019) [3]

Auswahl der Probe- Entnahmestelle	Probeentnahme durch Erdaushub	Zugabe der Senf- mehllösung (5 g/L)	Auswertung durch Zählen und Wiegen
 Pro Parzelle 2 Wiederholungen (n=8)	 	 	 

4.2.3 Einfluss auf Wildtiere

Um den Einfluss des Mulchmaterials auf die Wildtiere zu untersuchen, wurden Fotofallen auf den Freilandversuchsflächen installiert. Bei den Fotofallen handelt es sich um zwei Geräte des Modells Wild-Vision der Marke wildkamera.net. Die Kamera ist mit einem Bewegungsmelder ausgestattet, der bei Bewegungen im Erfassungsbereich auslöst und dabei mehrere Bilder aufnimmt. In regelmäßigen Abständen wurden die Bilder ausgewertet und auf die Anwesenheit von Wildtieren kontrolliert.

4.3 Applikationstechnik

4.3.1 System für die Applikation des Mulchmaterials

Die Applikation des Feldversuches im Jahr 2023 wurde mit dem Applikationsgerät SAM ("System für die Applikation des Mulchmaterials") durchgeführt. In Abbildung 4 ist das Applikationsgerät in der Rückansicht gezeigt. Dabei handelt es sich um einen Prototyp, der im Rahmen des Projekts ABOW vom TFZ entwickelt worden ist und für den Einsatz im Feldgemüsebau entsprechend adaptiert werden kann [44].



Abbildung 4: Das Applikationsgerät SAM in der Rückansicht während der Applikation des Mulchmaterials in der Reihenkultur Zuckermais

Der Rahmen des Geräts wurde aus Aluminiumprofilen gefertigt. Das Gerät ist für den Heck- oder Frontanbau konzipiert. Für die Applikation in Gemüsekulturen wurde eine Ausbringung in bis zu zwei Reihen umgesetzt. Die Energieversorgung des Applikationsgeräts wird über ein Stromaggregat mit einer Leistung von 3 kW gewährleistet. Die Förderung

der beiden Komponenten A und B erfolgt über zwei Schlauchpumpen. Mit Hilfe zweier Frequenzumwandler sind die Pumpendrehzahlen stufenlos regelbar. Die beiden Komponenten treffen im richtigen Mischungsverhältnis kurz vor der Applikation im Mischerblock aufeinander und werden über einen Statikmischer homogenisiert und zu einer Flachstrahldüse gefördert. Dort wird das vermischte flüssige LiquiMulch auf die Erdoberfläche appliziert. Die Steuerung erfolgt mit einer LabVIEW programmierten Software direkt am Gerät über einen Touch-Screen am Schaltschrank oder von außen über ein Tablet. Der maximale vertikale Verstellweg für die Düsensystemhalterung beträgt 100 cm. Das Gerät wiegt mit vollen Tanks ca. 700 kg.

Das Applikationsgerät SAM wurde als Alternative zu den im Projekt MuNaRo entwickelten Prototyp-Applikationsgerät von Amazone und Schmotzer verwendet, welches sich zum Applikationszeitpunkt des Feldversuchs 2023 im Umbau befand und deshalb für eine Applikation nicht verwendet werden konnte (Abbildung 4).

Für die Applikation des Mulchmaterials mit dem Applikationsgerät "SAM" im Rahmen der Feldversuche 2023, wurden die im Gerät verbauten Schlauch-Pumpen nach den Parametern wie in Tabelle 4 eingestellt.

Tabelle 4: Fördermengen der Komponenten Ölphase und Wasserphase mit dem Applikationsgerät "SAM"

Parameter - Pumpe	Durchfluss in l/min
Durchfluss Pumpe A (Öl-Phase)	5,8
Durchfluss Pumpe B (Wasser-Phase)	10,5

Je nach Gemüsekultur wurden zwei verschiedene Streifenbreiten appliziert. Entweder ein breiter Streifen mit einer Breite von 60 cm (Gurke, Zucchini, Melone, Kürbis) oder zwei schmale Streifen mit einer Breite von je 20 cm (Zuckermais). Für die Applikation der richtigen Schichtdicke galten für die beiden Schichtdicken die in Tabelle 5 aufgelisteten Parameter.

Tabelle 5: Übersicht über die Fahrgeschwindigkeiten und Höheneinstellungen der Düsen zur Erzeugung verschiedener Schichtdicken und Streifenbreiten

Schichtdicke in mm	Streifenbreite in cm	Fahrgeschwindigkeit in km/h	Höheneinstellung Düsen 60° in cm
5	20	0,50	37
	60	0,33	60
2	20	0,67	37
	60	1,00	60

4.3.2 Trichterspritze zur manuellen Applikation des Mulchmaterials

Für die Durchführung der Tastversuche zur Untersuchung der Witterungsbeständigkeit auf den TFZ eigenen Versuchsflächen im Freien wurde das Mulchmaterial manuell mit einer Trichterspritze appliziert. Dafür wurde vorab das für die geplante Fläche notwendige Mulchmaterial abgewogen und angerührt. Anschließend wurden die beiden Komponenten mit einer definierten Masse und dem entsprechenden Mischungsverhältnis in einem Eimer vorgemischt und unmittelbar nach dem Vermischen in die Trichterspritze überführt. Die Menge wurde direkt im Anschluss auf eine vorab ausgemessene und abgesteckte Fläche appliziert (Abbildung 5). Damit wurde sichergestellt, dass die Schichtdicke, die sich aus der Masse pro Quadratmeter ergibt, der für den Versuch vorgesehenen Dicke entspricht. Anschließend härtete das Mulchmaterial aus.



Abbildung 5: Manuelle Applikation des abgewogenen Mulchmaterials auf einer definierten Fläche im Freiland unter Verwendung einer Trichterspritze

4.3.3 Optimierung des Prototyp I Applikationsgeräts

4.3.3.1 Fehler- und Ursachendiagnose des Funktionsverlusts

Um die Ursachen für Fehlfunktion bzw. den Funktionsverlust des Applikationsgeräts herauszufinden, wurde im Zuge der Geräts-Optimierung eine umfassende Fehleranalyse durchgeführt. Dafür wurde das Gerät und zum Teil Gerätekompontenten zerlegt und auf Defekte und Ablagerungen untersucht.

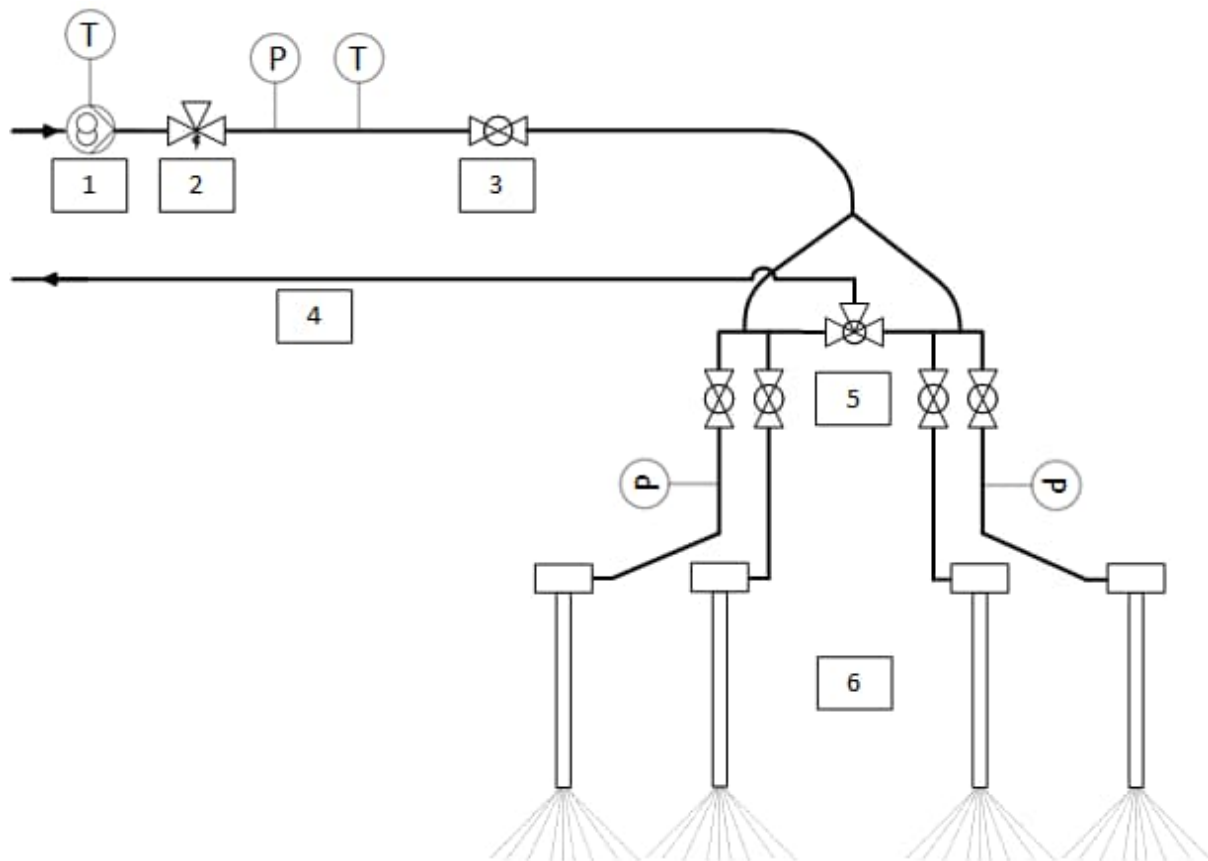
4.3.3.2 Pumpentests

Auf der Suche nach einer zuverlässigen Pumpe für die Förderung der beiden Komponenten A und B wurden unterschiedliche Pumpentypen von verschiedenen Herstellern beschafft und geprüft. Einen Überblick über die getesteten Pumpen gibt Tabelle 6.

Tabelle 6: Übersicht über die getesteten Pumpen für die Optimierung des Applikationsgeräts

Pumpentyp	Hersteller	Typ	Fördermenge in m ³ /h	Gewicht ohne Antrieb in kg
Zahnradpumpe	Scherzinger Pumpen GmbH & Co.KG	Salzlake- pumpe	5,8	6
Sinuspumpe	Watson-Marlow GmbH	Certa 200	7,8	49
Drehkolben- pumpe	Börger GmbH	AL 50	27,0	40
Doppelschrau- benpumpe	FRISTAM Pumpen Schaumburg GmbH	FDS1	20,0	40

Um diese Pumpen hinsichtlich Ihrer Funktionalität bei der Förderung der Flüssigphasen A und B testen zu können, wurde ein Flüssigkeitskreislauf ähnlich dem am Applikationsgerät nachgebaut (Abbildung 6). Wichtige Zielgrößen für die Evaluierung der getesteten Pumpen waren vor allem der Flüssigkeitsdruck, Temperaturveränderungen (Erwärmung) des Mediums beziehungsweise der Pumpe, Pulsationsverhalten während der Förderung sowie das Fördervolumen des Mediums.

**Legende:**

- 1: Test-Pumpe
- 2: Überdruckventil
- 3: Zweiwege-Kugelhahn
- 4: Rücklauf

- 5: Dreiwegehahn
- 6: Statikmischer mit Flachstrahldüsen
- P: Drucksensoren
- T: Temperatursensoren

Abbildung 6: Versuchsaufbau für die Prüfung der Pumpen

Die Schlauchleitungen des Testaufbaus bestand aus Schläuchen mit drei verschiedenen Durchmessern. Die Flüssigkeit wurde zunächst durch einen 1" Schlauch, der durch ein Y-Stück in zwei $\frac{3}{4}$ " Schläuche geteilt wurde, gefördert und durchströmte dann einen Verteiler, der die Flüssigkeit in vier $\frac{1}{2}$ " Schläuche aufteilte und zu den Düsen führte. Vom Verteiler führte außerdem ein 1" Schlauch zurück zum Tank als Rücklauf, der über den Dreiwegehahn geregelt wurde. Die Leitungslänge von Pumpe bis Düse betrug 7 m. Für die Erfassung der Drücke und der Temperaturen waren Drucksensoren im Vorlauf und im Verteiler sowie Temperatursensoren an Pumpengehäuse, im Medium (Vor- und Rücklauf) und für die Umgebungstemperatur verbaut. Die digitale Erfassung der Drücke und der Temperaturen wurde unter Verwendung einer über LabView programmierten Software durchgeführt und erfolgte sekundlich. Als Sicherheitsvorkehrung bei möglicherweise auftretenden Verstopfungen im Flüssigkeitskreislauf wurde ein Überdruckventil installiert, dass bei Drücken größer 6 bar im Vorlauf auslöste. Für die Pumpentests wurde ein Volumen von jeweils 50 L der beiden Komponenten zweimal für je 3 h mit einer Unterbrechung von einer Stunde durch den Testaufbau gefördert. Pro Testlauf wurde immer nur eine

Komponente separat evaluiert, nie beide gleichzeitig. Das System wurde dabei so eingestellt, dass der Druck an den Düsen circa 2 bar betrug. Zur Simulation eventuell auftretender Druckunterschiede wurden in Abständen von einer Stunde alle Düsen für einen Zeitraum von 10 min geschlossen, um den Systemdruck des Testaufbaus zu erhöhen. Die Pulsation des Sprühstrahls wurde mithilfe der Drucksensoren gemessen und in einem Druckbereich von 2 - 4 bar untersucht. Ein Überblick über das Testprotokoll ist in Tabelle 7 zusammengefasst. Als Messgrößen wurden für die Pumpentests folgende Parameter festgelegt: Temperatur und Druck des Vorlaufs (p Vorlauf, T Vorlauf), welcher dem Leitungsabschnitt bis circa 2 m nach der Pumpe entspricht, Temperatur der jeweiligen Testpumpe (T Pumpe), Temperatur des Mediums (T Medium), sowie dem Druck an den Düsen (p Düsen).

Tabelle 7: Protokoll über den Ablauf der Pumpentests

Protokoll	Zeit	Arbeitsschritte	Gemessene Parameter via LabView
Flüssigkeit fördern	3 h	• Normalbetrieb: offene Düsen (5) bei einem Düsendruck von 2 bar • Alle 60 min Düsen (5) für 10 min schließen • Alle 60 min für 10 min den Vorlaufdruck auf 4 bar durch Schließen des Kugelhahns (3) erhöhen	Druck in bar Temperatur in °C
Pause	1 h	• Sedimentieren der Feststoffe der jeweiligen Komponente • Abkühlen des Systems	Temperatur in °C
Flüssigkeit fördern	3 h	• Normalbetrieb: offene Düsen (5) bei einem Düsendruck von 2 bar • Alle 60 min Düsen (5) für 10 min schließen • Alle 60 min für 10 min den Vorlaufdruck auf 4 bar durch Schließen des Kugelhahns (3) erhöhen	Druck in bar Temperatur in °C

4.3.3.3 Technische Parameter für die Applikation mit dem Prototyp II "MulchSprayer Vegi"

Für die Applikation des Mulchmaterials mit dem optimierten Prototyp II Applikationsgerät "MulchSprayer Vegi" bei den Feldversuchen 2024 und 2025 wurden die im Gerät verbauten Zahnradpumpen nach den Parametern wie in Tabelle 8 eingestellt.

Tabelle 8: Fördermengen der Komponenten Ölphase und Wasserphase mit dem Applikationsgerät Prototyp II "Mulchsprayer Vegi"

Parameter - Pumpe	Durchfluss in l/min
Durchfluss Pumpe A (Öl)	14,3
Durchfluss Pumpe B (Wasser)	25,7

Für die Kulturen Gurke, Zucchini, Melone und Kürbis wurde eine Streifenbreite von 60 cm appliziert. Für die Applikation der richtigen Schichtdicke galten die in Tabelle 9 aufgelisteten Parameter.

Tabelle 9: Übersicht über die Fahrgeschwindigkeiten und Höheneinstellungen der Düsen zur Erzeugung verschiedener Schichtdicken und Streifenbreiten

Schichtdicke in mm	Streifenbreite in cm	Fahrgeschwindigkeit in km/h	Höheneinstellung Düsen 60° in cm
4	60	1,00	63
3	60	1,33	63
2	60	2,00	63

4.4 Gewächshausversuche und Freilandversuche

Im Rahmen der Untersuchung der Verträglichkeit verschiedener Gemüsekulturen mit dem aufspritzbaren Mulchmaterial wurden am Standort Straubing verschiedene Gewächshausversuche durchgeführt. Diese geschützten Bedingungen ermöglichen es, Einflussfaktoren, die vor allem bei Feldversuchen im Freiland auftreten können, auszuschließen und gezielt den Einfluss des Mulchmaterials auf die Kulturpflanzen zu untersuchen. Dabei lag der Schwerpunkt auf dem Wachstumsverhalten der Kulturpflanzen.

4.4.1 Verträglichkeitsuntersuchungen mit unterschiedlichen Gemüsekulturen

Es wurden Gewächshausversuche mit unterschiedlichen Gemüsekulturen durchgeführt und deren Verträglichkeit mit dem Mulchmaterial untersucht. Zu den getesteten Kulturen zählten Grünkohl, Mangold, Erdbeeren, Pak Choi, Weißkohl, Kohlrabi und Tomaten.

Für die Gewächshausversuche wurden grundsätzlich zwei Versuchsvarianten angelegt: eine unbehandelte Nullvariante und eine LiquiMulch-Variante. Die Streifenbreite betrug dabei 20 cm und hatte eine Schichtdicke von 5 mm. Bei den Kulturen Grünkohl, Mangold, Erdbeeren, Pak Choi, Weißkohl und Kohlrabi wurde jede Variante mit 3 - 4 Wiederholungen mehrfach durchgeführt. Unabhängig von der Kultur wurden pro Pflanzkiste zwei Kulturpflanzen gepflanzt. Bei den Versuchen der Tomate wurde jede Variante sechsfach wiederholt durchgeführt. In jedem Topf wurde eine nur eine Tomatenpflanze kultiviert. Die Bewässerung der Kulturen erfolgte ausschließlich über Kopf. In regelmäßigen Abständen wurde eine Kulturpflanzenbonitur durchgeführt, wobei die Wuchshöhe und die Anzahl der Blätter dokumentiert wurden. Außerdem wurden die Kulturpflanzen regelmäßig fotografiert.

4.4.2 Vorversuche für die Feldversuche am Standort Bamberg

4.4.2.1 Vorversuche für Feldversuch 2023

Im Vorfeld des Feldversuchs 2023 am LWG-Standort Bamberg wurden am TFZ in Straubing zur Untersuchung des geeigneten Aussaatzeitpunktes vor oder nach Applikation verschiedene Versuche unter Glas mit den für den im Feldversuch geplanten Gemüsekulturen Kürbis, Zucchini, Melone, Einlegegurke und Zuckermais durchgeführt. Ziel war es unter anderem zu untersuchen, ob die Keimlinge der Gemüse das Mulchmaterial ohne Beeinträchtigung durchstoßen können.

Für die Gemüsekulturen Kürbis, Zucchini, Einlegegurke und Zuckermais wurden zwei unterschiedliche Versuchsvarianten angelegt, eine unbehandelte Nullvariante und eine LiquiMulch-Variante mit einer Schichtdicke von 5 mm. Die Aussaat des Saatguts erfolgte in Kisten, die Anzahl an Saatstellen, sowie die durchgeführten Wiederholungen der Versuchsvarianten sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Die Applikation des Mulchmaterials erfolgte nach Aussaat. Die applizierte Streifenbreite betrug 20 cm. Jede Variante wurde dreifach wiederholt durchgeführt.

Außerdem wurde auch ein Vorversuch mit Melonen durchgeführt. Die Samen der Melonen wurden 24 h nach Applikation in das Mulchmaterial gesät. Dabei wurden die Versuchsvarianten Nullvariante (unbehandelt) und eine LiquiMulch-Variante mit einer Schichtdicke von 5 mm angelegt. Die applizierte Streifenbreite betrug 20 cm. Jede Variante wurde fünf-fach wiederholt durchgeführt.

Tabelle 10: Übersicht über die Anzahl an Saatstellen und Wiederholungen der Versuchsvarianten der jeweiligen Kultur bei den Gewächshausversuchen

Kultur	Anzahl Saatstellen	Wiederholungen
Kürbis	2	3
Zucchini	2	3
Einlegegurke	2	3
Zuckermais	3	5
Melone	3	5

Die Bewässerung der Kulturen erfolgte ausschließlich über Kopf. Einmal wöchentlich wurde eine Aufgangsbonitur beziehungsweise eine Kulturpflanzenbonitur durchgeführt, wobei die Wuchshöhe und Anzahl der Blätter erfasst wurden. Außerdem wurden die Kulturpflanzen regelmäßig fotografisch dokumentiert.

4.4.2.2 Vorversuche für Feldversuch 2024

Im Hinblick auf den Feldversuch 2024 wurden mit der Kultur Einlegegurke Vorversuche im Freiland auf den Versuchsflächen in Bamberg angelegt. Die Versuchsvarianten umfassten eine Nullvariante sowie drei unterschiedliche LiquiMulch Schichtdicken von 1,5 mm, 2,5 mm und 5 mm und zwei unterschiedliche Bewässerungsstrategien.

Eine detaillierte Versuchsbeschreibung "Tastversuche" ist im Kapitel 4.5.5.5 zu finden.

4.4.2.3 Vorversuche für Feldversuch 2025

Im Vorfeld zum Feldversuch 2025 wurden Keimungsversuche mit der Kulturpflanzen Einlegegurke im Gewächshaus durchgeführt. Um ideale Wachstumsbedingungen zu schaffen, wurde die Belichtung, Temperatur sowie Bewässerung auf die Anforderungen der Einlegegurke angepasst. Die Belichtung der Aussaatkisten erfolgte mithilfe von zwölf Natriumhochdruckdampflampen über 12 h pro Tag. Die dabei angestrebte Beleuchtungsstärke betrug circa 500 Lux bis maximal 8.500 Lux. Die Bewässerung der Kisten erfolgte über Kopf. Das Gewächshaus wurde tagsüber auf eine Temperatur von ca. 21 °C und in der Nacht auf ca. 16 °C temperiert. Bei der Verteilung der Kisten wurde auf eine randomisierte Anordnung der unterschiedlichen Varianten auf den Gewächshausstischen geachtet.

Um die Wachstumsbedingungen in den Aussaatkisten möglichst vergleichbar zu gestalten, wurden in den Randbereichen der Gewächshauskabinen keine Kisten aufgestellt.

Für die Keimungsversuche wurden Pikierplatten mit einem Siebboden verwendet, die mit einem homogenen durch Dämpfen hygienisierten Ackerboden befüllt wurden. Es wurde die Sorte 'Sebate' (Nunhems) und die Sorte 'Lehar' (Rijk Zwaan Welter GmbH) verwendet. Pro Saatstelle wurde jeweils ein Saatkorn eingelegt. Die Saattiefe betrug 2,5 cm. Pro Pikierplatte wurden zwei Saatreihen mit jeweils sieben Saatstellen angelegt. Insgesamt wurden fünf verschiedene Versuchsvarianten untersucht, welche in Tabelle 11 zusammengefasst sind. Alle Versuchsvarianten wurden jeweils sechsfach wiederholt beziehungsweise dreifach wiederholt pro Sorte.

Tabelle 11: Übersicht über die unterschiedlichen Versuchsvarianten des Keimungsversuchs

Variante	Behandlung	Mulchmaterial	Beschreibung
1	Kontrolle	-	Keine Behandlung
2	Gießwasser	-	Bewässerung mit Mulchmaterial kontaminiertem Gießwasser
3	Saatloch 3 cm	4 mm	aus Mulchmaterial ausgestanztes Saatloch mit 3 cm Durchmesser
4	Sätechnik 1	4 mm	Aussaat mit Sägerättaggregat
5	Sätechnik 2	4 mm	Aussaat mit Sägerättaggregat und anschließendem Andrücken mittels Andruckrolle

Die Keimung wurde ab dem ersten beobachteten Keimungsereignis täglich bonitiert. Neben der Keimung wurden auch die Entwicklung der Keimblätter bis zum Dreiblattstadium dokumentiert. Eine fotografische Dokumentation der Kisten erfolgte jeden zweiten Tag. Zudem wurden auftretende Besonderheiten wie Missbildungen oder Blattverfärbungen dokumentiert.

4.5 Feldversuche am Standort Bamberg

Im Rahmen des Vorhabens wurden in den Jahren 2023, 2024 und 2025 drei Feldversuche durchgeführt. Alle Feldversuche wurden auf den Versuchsflächen der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) in Bamberg durchgeführt. Die Stadt Bamberg befindet sich im fränkischen und schwäbischen Keuper-Lias-Land. Die Böden der Versuchsanstalt sind vor allem lehmiger Sand. Die Versuchsflächen werden ökologisch bewirtschaftet.

4.5.1 Versuchsflächen

Der Feldversuch 2023 wurde auf einer Gesamtversuchsfläche von circa 1.500 m² durchgeführt. Diese Fläche gehört zur Versuchsparzelle 18 des Gemüsebauversuchsbetriebs der LWG am Standort Bamberg. Insgesamt setzt sich die Versuchsfläche aus 18 parallel verlaufenden Beeten zusammen. Die Beetbreite beträgt 1,65 m (Tabelle 12). Die Vorfrucht dieser Fläche waren im Jahr 2021 und 2022 Luzernegras.

Die Gesamtfläche des Feldversuchs 2024 betrug wie im Vorjahr 1.500 m² und gehört zur Versuchsparzelle 17. Auf der Versuchsparzelle wurden 18 parallel verlaufende Beete angelegt, wobei die Beetbreite 1,65 m beträgt (Tabelle 12). Die Vorfrucht im Jahr 2023 war Klee gras.

Der Feldversuch des Versuchsjahres 2025 wurde auf einer Gesamtfläche von 825 m² durchgeführt und lag auf der Versuchsparzelle 12. Die Reihenabstand der zehn parallel angelegten Beete betrug 1,65 m (Tabelle 12). Die Vorfrucht auf dieser Fläche war im Jahr 2024 Klee gras.

Tabelle 12: Übersicht über die Versuchsflächen der drei Versuchsjahre

Versuchsjahr	Parzelle Nummer	Versuchsfläche in m ²	Beete Anzahl	Reihenabstand in m
2023	18	1500	18	1,65
2024	17	1500	18	1,65
2025	12	825	10	1,65

4.5.2 Wetterdaten Bamberg

Die Witterungsverläufe wurden durch die Deutsche Wetterdienst Station in Bamberg erfasst. Diese Station ist mit Sensoren zur Messung der Temperatur, relativen Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Feuchtigkeit, Windrichtung und -geschwindigkeiten ausgestattet. Die Wetterdaten sind auf der Website AgrarMeteorologie Bayern auf der Homepage der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft aufrufbar. Zu den wichtigsten Wetterparametern zählen die Temperatur, die Niederschläge, die Tagesmittelwerte sowie die Tagesmaxima

(Tabelle 13). Auch die Windgeschwindigkeit wird regelmäßig als Tagesmittel ausgegeben, um ein umfassendes Bild des regionalen Wetters zu erhalten.

Tabelle 13: Witterungskenngrößen der im Versuchsfeld angebrachten Wetterstation

Wetterkenngröße	Einheit
Tagesmitteltemperatur	°C
Tagesminimumtemperatur	°C
Tagesmaximaltemperatur	°C
Tagesniederschläge	mm
Mittlere Windgeschwindigkeit/Tag	m/s
Relative Luftfeuchtigkeit	%

4.5.3 Bewässerung und Wasserhaushalt

4.5.3.1 Bewässerung des Feldversuchs 2023

Die Bewässerung des Feldversuchs 2023 erfolgte über eine Tröpfchenbewässerung mit Schlauchtropfern, die oberirdisch auf der Feldoberfläche installiert wurden. Wie in

Tabelle 14 zusammengefasst, wurden die Tropfabstände für jede Kultur individuell gewählt, um eine optimale Bewässerung sicherzustellen. Die relative Bodenfeuchte der Versuchspartzen wurde mit den volumetrischen SMT-50 Sensoren gemessen. Die Daten wurden mithilfe des IoT4 Water-Grundgeräts von MMM Tech-support in eine Cloud übertragen und dort gespeichert. Die Sensoren waren in einer Tiefe von 5 cm und 15 cm installiert. Anhand der erfassten Bodenfeuchtwerte wird die Bewässerung der Beete gesteuert. Dabei richtete sich der Wasserbedarf sowie die daraus resultierende Bewässerungsmenge nach dem Wasserbedarf der Partzen der Kontrollvariante.

Tabelle 14: Tropfabstände der Bewässerungsschläuche bei den Gemüsekulturen im Versuchsjahr 2023

Kulturpflanze	Tropfabstand in cm
Einlegegurke	30
Zucchini	50
Melone	50
Kürbis	50
Zuckermais	50

4.5.3.2 Bewässerung des Feldversuchs 2024 und 2025

Für die Versuchsjahre 2024 und 2025 wurde die Bewässerung über ein softwaregesteuertes System realisiert, welches von der German Water and Energy Group (GWE) angeboten wurde. Hierzu wurde eine Unterflurbewässerung im Versuchsfeld installiert. Die Tropfabstände der im Feld verbauten Schläuche sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Die Bodenfeuchte wurde mit volumetrischen SMT-50-Sensoren in 5 cm und 15 cm Bodentiefe gemessen. Die Datenerfassung erfolgte über IoT4H2O Grundgeräte der Firma MMMtec support sowie ab 2024 zusätzlich mit LR & BL IP68 Sensorenerfassungsstationen der Firma Solem. Die Daten wurden in die jeweiligen firmeneigenen Clouds übertragen und dort gespeichert.

Die Steuerung der Bewässerung erfolgte ab 2024 über das Öffnen und Schließen von Magnetventilen mithilfe der LR-IP - 4 LoRa Bewässerungscomputer der Firma Solem. Die Module konnten über die Webanwendung „MySolem“ (<https://www.mysolem.com/login>) angesteuert werden.

Die Bewässerung erfolgte in Orientierung an der aktuell gemessenen Bodenfeuchte der unterschiedlichen Parzellen. Das Bewässerungsoptimum lag dabei bei einer relativen Bodenfeuchte zwischen 25 - 35 %. Jede Kulturpflanze und Variante wurde individuell nach dem jeweiligen Bedarf bewässert.

Tabelle 15: Tropfabstände der Bewässerungsschläuche bei den Gemüsekulturen in den Versuchsjahren 2024 und 2025

Kulturpflanze	Tropfabstand in cm
Einlegegurke	30
Zucchini	50
Melone	50
Kürbis	50

4.5.4 Versuchsaufbau und Design der Feldversuche in Bamberg

Feldversuch 2023

Im Versuchsjahr 2023 bestand die Fläche aus 18 Beeten und umfasste insgesamt 72 Versuchspartzellen. Dabei wurden die unterschiedlichen Versuchsvarianten teilrandomisiert auf der Versuchsfläche verteilt. Zwischen den Reihen wurde das Beikraut über eine mechanische Hacke entfernt. Die untersuchten Varianten sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Für jede Gemüsekultur wurden die gleichen Versuchsvarianten angewandt. Dabei wurden die Ergebnisse der Kultur Kürbis, Zucchini, Melone und Zuckermais jeweils vierfach bestimmt ($n=4$), während der Tastversuch bei Einlegegurke nur zweifach wiederholt ($n=2$) durchgeführt wurde. Ein detaillierter Versuchsplan ist in Anhang 1 dargestellt.

Feldversuch 2024

Bei der Versuchsanlage des Versuchsjahres 2024 handelte es sich um eine teilrandomisierte Streifenanlage mit insgesamt 18 Beeten auf denen 72 Versuchspartzellen angelegt wurden. Pro Beet war jeweils eine Versuchsvariante repräsentiert. Dabei wurden alle Varianten, unabhängig von der untersuchten Gemüsekultur vierfach wiederholt durchgeführt. Die Anordnung der Beete erfolgte zufällig auf der Versuchsfläche. Die Regulierung des Beikrauts zwischen den Reihen erfolgte über eine mechanische Hacke. Ein detaillierter Versuchsplan ist in Anhang 2 dargestellt. Eine Übersicht über die verschiedenen Versuchsvarianten zeigt Tabelle 16.

Feldversuch 2025

Im Versuchsjahr 2025 umfasste der Versuchsaufbau insgesamt 10 Beete mit insgesamt 29 Partzellen. An der Kopf- und Fußseite des Feldes befand sich ein 3 m und 5 m breiter Randbereich, welcher nicht bonitiert wurde. Bei der Versuchsanlage handelte es sich um eine teilrandomisierte Streifenanlage, wobei jede Versuchsvariante auf jeweils drei Beeten angelegt wurden, welche wiederum aus drei Partzellen bestanden. Damit ergab sich pro Versuchsvarianten eine Wiederholung von neun ($n = 9$). Die Anordnung der Beete erfolgte zufällig über die gesamte Versuchsfläche. Zwischen den Beeten wurde das Beikraut mittels mechanischer Hacke reguliert. Ein detaillierter Versuchsplan ist in Anhang 3 dargestellt. Eine Übersicht über die verschiedenen Versuchsvarianten zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16: Überblick über die Versuchsvarianten von 2023, 2024 und 2025

Variante	Beschreibung	2023	2024	2025
1	Nullvariante - ohne Beikrautregulierung	X	X	X
2	Kontrolle - betriebsübliche Beikrautbekämpfung durch manuelle Hacke	X	X	
3	Kontrolle - Mulchfolie			X
4	LiquiMulch, Schichtdicke 2 mm		X	
5	LiquiMulch, Schichtdicke 2,5 mm	X		
6	LiquiMulch, Schichtdicke 3 mm		X	X
7	LiquiMulch, Schichtdicke 4 mm		X	
8	LiquiMulch, Schichtdicke 5 mm	X		X

Im Folgenden werden die angewandten Versuchsvarianten der Feldversuche näher erläutert und beschrieben.

Nullvariante

In der Nullvariante wurde keine mechanische oder chemische Beikrautkontrolle in der Reihe durchgeführt, um Rückschlüsse auf den Beikrautdruck während der Vegetationsperiode zu erhalten. Die Nullvariante wurde vorzeitig abgebrochen, um ein Aussamen der Beikräuter zu verhindern. Die Endzeitpunkte sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Kontrolle - betriebsübliche Beikrautbekämpfung durch mechanische Hacke

Es wurde in den Versuchsjahren 2023 und 2024 eine mechanische Hacke mit Maschine oder manuell in der Reihe durchgeführt. Die Zeitpunkte der Beikrautregulierung sind in den Daten zur Kulturführung im Anhang 5, Anhang 6, Anhang 7, Anhang 8, Anhang 9, Anhang 10, Anhang 11, Anhang 12 und Anhang 13 aufgeführt.

Kontrolle - herkömmliche Mulchfolie

Im Versuchsjahr 2025 wurde im Beikrautmanagement keine mechanische Hacke in der Reihe eingesetzt. Stattdessen wurde als Vergleichsvariante eine herkömmliche Mulchfolie auf der Versuchsfläche ausgelegt.

Tabelle 17: Zeitpunkt des Abbruchs der Bonitur der Nullvariante in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025

Versuchsjahr	Abbruch Nullvariante
2023	19.-20.07.2023
2024	08.07.2024
2025	12.06.2025

4.5.5 Gemüsekulturen

4.5.5.1 Zuckermais

Im Rahmen des Feldversuchs wurde die Zuckermaissorte 'GSS3951' der Syngenta Agro GmbH gesät. Die Untersuchungen des Zuckermais erfolgten ausschließlich im Jahr 2023. Der Zuckermais wurde in zwei Reihen pro Beet ausgesät, wobei pro Reihe 36 Saatstellen festgelegt wurden. Der Saatabstand innerhalb der Reihe betrug 15 cm und der Abstand zwischen den Reihen 75 cm. Insgesamt wurden pro Versuchsparzelle 144 Zuckermaispflanzen kultiviert, was einer Pflanzendichte von 8 Pflanzen/m² entspricht. Die vier verschiedenen Versuchsvarianten wurden vierfach wiederholt durchgeführt. Ein detaillierter Versuchsplan ist im Anhang dieses Berichts zu finden (Anhang 1).

Der Zuckermais wurde am 12.06.2023 gesät und drei Tage später, am 15.06.2023, wurde LiquiMulch aufgespritzt. Dabei wurden gemäß des Versuchsplans zwei Mulchstreifen appliziert mit einer Breite von jeweils 20 cm und zwei unterschiedlichen Schichtdicken, 2,5 mm und 5 mm. Die Daten zur Kultivierung des Zuckermais sind in Anhang 4 aufgelistet.

4.5.5.2 Kürbis

Für die Untersuchung der Eignung des Mulchmaterials für die Kultivierung von Kürbissen kam die Sorte 'Orange Summer F1' des Saatgutherstellers Enza Zaden Deutschland GmbH & Co. KG zum Einsatz. Wie die Zucchini wurde der Kürbis nur in den Versuchsjahren 2023 und 2024 im Rahmen eines Feldversuchs untersucht.

Feldversuch 2023

Die Aussaat der Kürbissamen erfolgte vor der Applikation. In der Saatreihe betrug der Abstand 50 cm. Eine Versuchsparzelle erstreckte sich über zwei Beete mit jeweils 11 Saatstellen pro Reihe, was insgesamt eine Pflanzenanzahl von 22 Pflanzen pro Parzelle ergab. Die Pflanzendichte betrug 1,2 Pflanzen/m². Der Abstand zwischen den Reihen war 1,65 m. Die vier Versuchsvarianten wurden vierfach wiederholt durchgeführt.

Die Aussaat des Kürbisses erfolgte am 12.06.2023 und die anschließende Applikation des LiquiMulchs wurde am 15.06.2023 durchgeführt. Die Applikation der Mulchstreifen orientierte sich am Versuchsplan, wobei die Streifen mit einer Breite von 60 cm appliziert wurden mit jeweils einer Schichtdicke von 2,5 mm oder 5 mm (Anhang 1). Die detaillierten Daten zur Kulturführung sind in Anhang 7 zusammengefasst.

Feldversuch 2024

Im Jahr 2024 erfolgte die Aussaat des Kürbisses ebenfalls vor der Applikation des Mulchmaterials. Auf einer Länge von 10,8 m befanden sich 22 Saatstellen. Eine Parzelle erstreckte über ein Beet und hatte eine Pflanzendichte von 1,2 Pflanzen/m². Der Reihenabstand betrug 1,65 m. Insgesamt gab es fünf Versuchsvarianten, die vierfach wiederholt durchgeführt wurden.

Die Aussaat der Kürbisse erfolgte manuell und fand am 13.05.2024 statt. Am 14.05.2024 wurde das Mulchmaterial gemäß des Versuchsplans appliziert (Anhang 2). Die getesteten Schichtdicken waren 2 mm, 3 mm und 4 mm und die Streifenbreite betrug 60 cm. Die detaillierten Daten zur Kulturführung sind in Anhang 8 zusammengefasst.

4.5.5.3 Zucchini

Für die Untersuchungen zum Anbauverfahren von Zucchini wurde die Sorte 'Milos' der Syngenta Agro GmbH verwendet. Die Kultur Zucchini wurde in den Versuchsjahren 2023 und 2024 hinsichtlich ihrer Eignung bei Anwendung des Mulchverfahrens untersucht.

Feldversuch 2023

Die Zucchiniisamen wurden vor der Applikation des Mulchmaterials mit einem Saatabstand von 50 cm in der Reihe gesät. Pro Parzelle, die aus zwei Saatzeilen bestand, waren es 2 x 11, also insgesamt 22 Saatstellen mit einer Pflanzendichte von 1,2 Pflanzen/m². Der Abstand zwischen den beiden Pflanzzeilen betrug 1,65 m. Die Versuchsvarianten wurden vierfach wiederholt durchgeführt.

Die Aussaat der Zucchini erfolgte manuell und fand am 12.06.2023 statt. Die anschließende Applikation des LiquiMulchs erfolgte am 15.06.2023. Pro Überfahrt wurde ein 60 cm breiter Streifen in zwei unterschiedlichen Schichtdicken (2,5 mm, 5 mm) gemäß des Versuchsplans appliziert (Anhang 1). Die detaillierten Daten zur Kulturführung sind in Anhang 7 zusammengefasst.

Feldversuch 2024

Die Aussaat der Zucchiniisamen erfolgt manuell vor der Applikation des Mulchmaterials. Der Saatabstand in der Reihe betrug 50 cm. Eine Versuchsparzelle erstreckte über zwei Beete. Auf einer Länge von 5,5 m befanden sich 11 Saatstellen, so dass insgesamt 22 Pflanzen pro Parzelle gesät wurden mit einer Dichte von 1,2 Pflanzen/m². Der Abstand zwischen den Reihen betrug 1,65 m. Die vier Versuchsvarianten wurden vierfach wiederholt.

Die Aussaat erfolgte manuell und fand am 13.05.2024 statt. Die Applikation des LiquiMulchs erfolgte am 14.05.2024. Die applizierte Streifenbreite betrug 60 cm, wobei zwei unterschiedliche Schichtdicken aufgetragen wurden: 2 mm und 4 mm. Ein detaillierter Versuchsplan ist im Anhang dieses Berichts zu finden (Anhang 2). Die detaillierten Daten zur Kulturführung sind in Anhang 6 zusammengefasst.

4.5.5.4 Melone

Für die Untersuchungen der Melone wurde die Sorte 'Etchabi' des Saatgutherstellers Rijk Zwaan Welver GmbH verwendet. Untersuchungen mit der Melone fand ausschließlich in den beiden Versuchsjahren 2023 und 2024 statt.

Feldversuch 2023

Die Melonen wurden nach der Applikation des Mulchmaterials in das Material gepflanzt. Dabei wurden pro Pflanzreihe mit einer Länge von 5,5 m pro Parzelle, 11 Melonen mit einem Abstand von 50 cm gepflanzt. Die Gesamtanzahl an Melonen pro Parzelle bestehend aus zwei Beeten betrug 22 und die Pflanzendichte 1,2 Pflanzen/m². Der Abstand zwischen den Reihen betrug 1,65 m. Insgesamt gab es vier Versuchsvarianten, die vierfach wiederholt durchgeführt wurden. Ein detaillierter Versuchsplan ist im Anhang dieses Berichts zu finden (Anhang 1).

Die Pflanzung der Melonen erfolgte am 16.06.2023, einen Tag nach der Applikation am 15.06.2023. Die Streifenbreite betrug 60 cm und die zwei applizierten Schichtdicken waren 2,5 mm und 5 mm. Die detaillierten Daten zur Kulturführung sind in Anhang 9 zusammengefasst.

Feldversuch 2024

Wie im Vorjahr erfolgte die Pflanzung der Melonen nach der Applikation des Mulchmaterials. Der Pflanzabstand innerhalb der Reihe betrug 50 cm. Eine Parzelle erstreckte sich über zwei Beete mit einem Reihenabstand von 1,65 m. Pro Pflanzreihe wurden 11 Melonen gepflanzt, daraus ergibt sich eine Gesamtmelonenzahl von 22 Melonen pro Parzelle. Die resultierende Pflanzdichte lag bei 1,2 Pflanzen/m². Die vier Versuchsvarianten wurden jeweils vierfach wiederholt. Ein detaillierter Versuchsplan ist im Anhang 2 dieses Berichts zu finden.

Die Applikation der Parzellen der Melone erfolgte am 14.05.2024 und die anschließende Pflanzung am 15.05.2024. Die getesteten Schichtdicken betrugen jeweils 2 mm oder 4 mm gemäß dem Versuchsplan und wurden mit einer Streifenbreite von 60 cm appliziert. Die detaillierten Daten zur Kulturführung sind in Anhang 10 zusammengefasst.

4.5.5.5 Einlegegurke

Für die Feldversuche des Jahres 2023 und 2024 wurde die Sorte 'Sebate' des Unternehmens Nunhems Netherlands B.V. verwendet. Sebate ist eine Standardsorte im konventionellen Anbau und ist nicht resistent gegenüber Falschem Mehltau. Im Feldversuch 2025 kam die Biosorte 'Zircon' des Herstellers Nunhems Netherlands B.V. zum Einsatz, welche resistent gegenüber Falschem Mehltau, aber eher ertragsschwach, ist.

Feldversuch 2023

Im Versuchsjahr 2023 wurden zwei Tastversuche durchgeführt.

Tastversuch I

Die Aussaat der Samen erfolgte 24 h nach Applikation des LiquiMulchs. Der Pflanzabstand innerhalb der Reihe betrug 30 cm. Eine Parzelle mit einer Länge von 5,5 m erstreckte sich über zwei Beete. Pro Pflanzreihe wurden 18 Samen gesät, weshalb sich insgesamt 36 Pflanzen pro Parzelle befanden. Die Pflanzendichte betrug 2 Pflanzen/m². Der Abstand zwischen den Reihen war 1,65 m. Die vier Versuchsvarianten wurden zweifach wiederholt durchgeführt. Ein detaillierter Versuchsplan ist im Anhang dieses Berichts zu finden (Anhang 1).

Die Aussaat der Gurkensamen erfolgte manuell und fand am 16.06.2023 statt. Die Applikation des Mulchmaterials fand einen Tag zuvor, am 15.06.2023 statt. Pro Überfahrt wurde ein 60 cm breiter Streifen mit zwei unterschiedlichen Schichtdicken, 2,5 mm und 5 mm, appliziert. Die detaillierten Daten zur Kulturführung sind in Anhang 11 zusammengefasst.

Tastversuch II

Nach Beendigung der Bonitur der Nullvarianten am 20.07.2023 wurden in den Beeten der Einlegegurke zwei Parzellen frei, die anschließend Mitte September für einen zweiten Tastversuch genutzt werden konnten. Die Versuchsvarianten, die für den Tastversuch untersucht wurden, sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Versuchsvarianten des Tastversuchs II Einlegegurke am Standort Bamberg im Versuchsjahr 2023

Variante	Beschreibung
1	Kontrolle - betriebsübliche Beikrautbekämpfung manuelle Hacke
2	LiquiMulch, Schichtdicke 1,5 mm
3	LiquiMulch, Schichtdicke 2,5 mm
4	LiquiMulch, Schichtdicke 5 mm

Die Größe der unterschiedlichen Versuchsparzellen war für alle Varianten gleich und betrug 4,51 m². Pro Beet wurden jeweils zwei Reihen mit 16 Saatstellen angelegt, welche einen Abstand von 15 cm in der Reihe hatten. Die Applikation des LiquiMulchs erfolgte pro Saatreihe eines Beets unterschiedlich. Während die Aussaat in Saatreihe 1 vor Applikation des Mulchmaterials erfolgte, wurde in Saatreihe 2 nach Applikation des Mulchmaterials ausgesät. Die erste Aussaat des Saatguts der Einlegegurke erfolgte am 13.09.2023 und die zweite Aussaat nach Applikation des Mulchmaterials am 14.09.2023. Die Applikation des aufspritzbaren Mulchmaterials wurde dementsprechend am 13.09.2023 durchgeführt. Die Daten zur Kultivierung der Einlegegurke sind in Anhang 12 aufgelistet. Es wurde außerdem die Bewässerung variiert: Während Beet 1 über Wassersaugspannungssensoren bei Erreichung eines Schwellenwertes von 500 hPa bewässert wurde, erfolgte die Bewässerung von Beet 2 bei Erreichung des Schwellenwertes von 200 hPa.

Feldversuch 2024

Die Aussaat der Einlegegurkensamen erfolgte einen Tag nach Applikation des Mulchmaterials. Der Pflanzabstand in der Reihe betrug 50 cm. Eine Parzelle erstreckte sich mit einer Länge von 11,0 m über ein Beet. Die Anzahl an Pflanzen pro Parzelle betrug 22 Pflanzen und einer Pflanzdichte von 1,2 Pflanzen/m². Es wurden fünf verschiedene Versuchsvarianten untersucht, welche vierfach wiederholt durchgeführt wurden.

Die Aussaat erfolgte manuell und fand am 14.05.2024, am gleichen Tag wie die Applikation, statt. Die Mulchstreifen wurden gemäß dem Versuchsplan mit einer Schichtdicke von 2 mm, 3 mm und 4 mm und einer Streifenbreite von 60 cm (Anhang 2) appliziert. Die Daten zur Kultivierung der Einlegegurke sind in Anhang 13 aufgelistet.

Feldversuch 2025

Im Versuchsjahr 2025 fand die Aussaat der Einlegegurkensamen nach der Applikation des Mulchmaterials statt. Der Abstand zwischen den Saatstellen betrug 30 cm. Bei einer Parzellengröße von 14 m wurden pro Parzelle 46 Saatstellen belegt. Pro Saatstelle wurden ca. sechs Samenkörner gesät, welche nach Aufgang auf zwei Pflanzen vereinzelt wurden. Der Abstand zwischen der Reihe betrug 1,65 m. Die Versuchsvarianten Kontrolle und LiquiMulch 3 mm und 5 mm wurden neunfach wiederholt durchgeführt. Die Nullvariante wurde einfach wiederholt durchgeführt. Ein detaillierter Versuchsplan ist in Anhang dieses Berichts zu finden (Anhang 3).

Die Aussaat der Gurkensamen erfolgte maschinell unter Verwendung eines pneumatischen Sägeräts der Firma Fleischmann und erfolgte am 07.05.2025 (Abbildung 7). Pro Saatloch wurden vier bis sechs Samen abgelegt. Die Applikation des LiquiMulchs fand einen Tag vorher, am 06.05.2025, statt. Besonderes Augenmerk wurde daraufgelegt, dass die Sämaschine in der Höhenführung exakt eingestellt ist, so dass das Mulchmaterial bei der Überfahrt nicht zerstört wurde. Nach der Aussaat wurden die Beete des Versuchsfeldes mit einem doppelten Vlies abgedeckt, um das Saatgut vor Kälteeinbrüchen zu schützen und eine gute Keimung zu garantieren. Die Vliese wurden eine Woche vor Erntebeginn, am 12.06.2025 von Feld entfernt. Die Daten zur Kultivierung der Einlegegurke sind im Anhang 14 aufgelistet.



Abbildung 7: Aussaat der Einlegegurkensamen in das Mulchmaterial am 07.05.2025 mit Hilfe eines pneumatischen Sägeräts der Firma Fleischmann

4.5.6 Boniturparameter

4.5.6.1 Untersuchung des Bodenbedeckungsgrads durch Fotodokumentation

Für die Beurteilung der beikrautunterdrückenden Wirkung des Mulchmaterials wurde der Bodenbedeckungsgrad ermittelt. Die Berechnung des Bodenbedeckungsgrads erfolgte unter Verwendung der Software "Canopeo". Dabei analysiert das Programm anhand einer Fotografie einer zuvor festgelegten Bonitur-Fläche am Feld, alle grünen Pixel, die die Beikrautvegetation repräsentieren, und setzt diese ins Verhältnis zu der Gesamtpixelanzahl der Fotografie [63].

Um die Größe der fotografierten Bildausschnitte gleich zu halten, wurden für die softwaregestützte Beikrautbonitur zwei Zählrahmen in Anlehnung an den Göttinger Zähl- und Schätzrahmen eingesetzt. Die Größe des Zählrahmens, der für die Bonitur des Zuckermais verwendet wurde betrug 12 x 20 cm, wobei pro Parzelle immer fünf Bilder erfasst wurden. Die damit dokumentierte Fläche betrug 1.200 cm². Für alle anderen Kulturen wurde für die Bonitur des Beikrauts ein Zählrahmen mit einer Größe von 25 x 50 cm verwendet und damit insgesamt eine Fläche von 1.250 cm² erfasst. Die Fotodokumentation wurde für alle Varianten und Wiederholungen zu den in Anhang 15, Anhang 16 und Anhang 17 aufgeführten Terminen durchgeführt.

4.5.6.2 Erfassung der Beikrautarten und Wuchshöhe

Für die Erfassung der Beikrautarten wurden die Art und die Häufigkeiten der Arten, sowie die durchschnittliche Höhe des Beikrautes bestimmt. Basierend auf den Daten der Arten-Häufigkeit konnte pro Versuchsvariante die relative Verteilung der Beikräuter basierend auf den Daten des Bodenbedeckungsgrads errechnet werden. Einen Überblick über die Termine der Erfassung der Beikrautarten gibt Tabelle 19.

Tabelle 19: Übersicht über den Zeitpunkt der Erfassung der Beikrautart und Wuchshöhe

Versuchsjahr	Zeitpunkt der Erfassung
2023	14.07.2023
2024	24.06.2024

4.5.6.3 Einfluss auf die Keimung und den Aufwuchs der Kulturpflanzen

Die unterschiedlichen Kulturpflanzen wurden nach Aussaat in regelmäßigen Abständen fotografiert, um die Entwicklung der Kulturpflanze zu dokumentieren. Die Kulturpflanzenbonitur wurde ab dem Zeitpunkt der Aussaat durchgeführt, um Informationen über die Keimung und den Aufwuchs der Kulturpflanzen zu gewinnen. Aufgrund der unterschiedlichen Aussaatzeitpunkte vor oder nach Applikation liefert die Bonitur des Kulturpflanzenaufwuchses Informationen zur Eignung der ausgewählten Sä- und Pflanztechnik beziehungsweise des geeigneten Zeitpunktes, vor oder nach LiquiMulch-Applikation, für die jeweilige Kulturpflanze.

Feldversuch 2023

Um den Durchwuchserfolg der Kulturen Kürbis, Zuckermais und Zucchini zu bewerten, wurden die Anzahl der gekeimten Samen dokumentiert und ausgewertet. Auch bei der Einlegegurke wurde die Anzahl der aufwachsenden Pflanzen dokumentiert. Bei den Melonen war keine Aufwuchsbonitur notwendig, da die Melonen direkt in das Material gepflanzt wurden. Hier wurde direkt mit der Kulturpflanzenbonitur (4.5.6.4) begonnen. Die Aufwuchsbonitur erfolgte innerhalb der ersten beiden Wochen nach Aussaat täglich. Nach einer abschließenden Fehlstellenbonitur wurde an Stellen mit nicht gekeimten Samen nachgesät.

Feldversuch 2024

Wie im Vorjahr wurde der Aufgang der Kulturen Kürbis, Zucchini und Einlegegurke innerhalb der ersten 14 Tage in regelmäßigen Abständen dokumentiert. Bei den Kulturen Kürbis und Zucchini wurde außerdem auch der Durchwuchserfolg bewertet. Eine abschließende Fehlstellenbonitur zeigte die Sästellen auf, die anschließend nachgesät wurden. Bei der Melone wurde keine Aufgangsbonitur durchgeführt, da diese Kultur ins Mulchmaterial gepflanzt wurde.

Feldversuch 2025

Der Aufgangserfolg der Einlegegurke wurde durch eine einmalige Aufgangsbonitur am 22.05.2025 bewertet. Dabei wurden Fehlstellen ausgewertet, welche im Anschluss am gleichen Tag nachgesät wurden. Auch bei der Nachsaat wurde der Aufgang am 12.06.2025 analysiert.

4.5.6.4 Einfluss auf die Entwicklung der Kulturpflanzen

In allen Feldversuchen wurde im Anschluss an die Aufgangsbonitur über die gesamte Versuchslaufzeit eine Kulturpflanzenbonitur durchgeführt. Hierbei wurde die Entwicklung der Kulturpflanzen beobachtet und fotografisch dokumentiert. Außerdem wurden auch Auffälligkeiten in der Kulturpflanzenentwicklung evaluiert. Für die Abschätzung der Entwicklung der Pflanzen hinsichtlich Wuchshöhe wurde für die fotografische Kulturpflanzenbonitur ein Maßstab verwendet.

4.5.6.5 Ertragsbonitur

Die Ertebonitur erfolgt in Anlehnung an den Leitfaden "Planung, Anlage und Auswertung von Versuchen im ökologischen Gemüsebau" [6].

Zur Auswertung der Ernteerträge wurden die gesammelten Daten in Stück pro Parzelle und Kilogramm pro Parzelle in die übliche Einheit Dezitonne pro Hektar (dt/ha) umgerechnet. Diese Umrechnung wurde für alle Kulturen durchgeführt.

Zucchini

Die Ernte der Zucchini in den Versuchsjahren 2023 und 2024 erfolgte zu den in Tabelle 20 zusammengefassten Zeiträumen. Innerhalb dieser Zeit wurden die Zucchinipflanzen dreimal pro Woche geerntet. Das Erntegut wurde unterschieden in marktfähig und nicht marktfähig. Der marktfähige Ertrag wurde in drei verschiedene Sortierungen mit den Größen, 7 - 14 cm, 14 - 21 cm und > 21 cm eingeteilt. Dabei wurde von jeder Parzelle die Anzahl in Stück und das Gesamtgewicht in kg erfasst. Zu den nicht marktfähigen Zucchini zählten faule, deformierte oder zum Beispiel anderweitig kranke Früchte.

Tabelle 20: Übersicht über die Erntezeiträume der Zucchini

Versuchsjahr	Erntezeitraum	Anzahl Tage im Erntezeitraum
2023	24.07. - 16.10.2023	84
2024	01.07. - 16.09.2024	77

Melone

Witterungsbedingte Probleme und der daraus resultierende Fusarium-Befall führten in den Versuchsjahren 2023 und 2024 zu einer vorzeitigen Räumung des Bestands und zur Not-ernte der unreifen Früchte. Die geernteten Melonen wurden in marktfähig und nicht marktfähig eingeteilt. Für beide Sortierungen wurden pro Parzelle die Anzahl der geernteten Melonen in Stück sowie das Gesamtgewicht in kg dokumentiert. Tabelle 21 fasst die Erntezeiträume der Melone zusammen.

Tabelle 21: Übersicht über die Erntezeiträume der Melone

Versuchsjahr	Erntezeitraum
2023	14.08.2023, Einmalernte
2024	08.08. - 28.08.2024

Kürbis

Beim Kürbis wurde im Jahr 2023 eine Einmalernte durchgeführt. Im Jahr 2024 wurde zweimal geerntet. Die Erntezeitpunkte sind in Tabelle 22 aufgeführt. Beim Ernteertrag wurde unterschieden in marktfähig und nicht marktfähig. Zu den nicht marktfähigen Kürbissen zählten Früchte < 700 g, > 700 g aber mehr als 25 % grün, oder Kürbisse, die mit einem Virus befallen oder faulig waren. Alle anderen geernteten Kürbisse waren marktfähige Ware. Von allen Sortierungen wurden pro Parzelle die Anzahl in Stück sowie das Gesamtgewicht in kg dokumentiert.

Tabelle 22: Übersicht über die Erntezeiträume des Kürbisses

Versuchsjahr	Erntezeitraum
2023	02.10.2023, Einmalernte
2024	05.09. und 12.09.2024

Zuckermais

Die Ernte des Zuckermaises mit anschließender Bonitur erfolgte von 18.09 - 19.09.2023. Bei der Ertragserfassung des Zuckermais pro Parzelle wurden zum einen das Gesamtgewicht der Kolben in Lieschblättern aller Pflanzen in kg dokumentiert sowie die Anzahl der marktfähigen Kolben in Stück. Außerdem wurden auch die nicht marktfähigen Kolben erfasst, bei denen unterschieden wird in zu klein (< 12 cm), Lücken im Kornbesatz, unreif, oder durch Fraß oder Schimmel geschädigte Kolben. Von allen Sortierungen wurde die Anzahl in Stück sowie das Gewicht in kg erfasst. Neben einer allgemeinen Ertragserfassung wurde an zehn zufällig ausgewählten Kolben pro Variante und Wiederholung eine Qualitätsbonitur durchgeführt. Dabei wurde pro Parzelle das Kolbengewicht in g, die Kolbenlänge in cm, der Kolbendurchmesser in mm, sowie der Kornbesatz und die

Spitzenausfärbung dokumentiert. Der Kornbesatz wurde nach folgender neunstufiger Skala bewertet: 1 = sehr gering; 3 = gering; 5 = mittel; 7 = groß; 9 = sehr groß. Bei dieser Bewertung kommt es auf die Ausgeglichenheit des Kornbesatzes an, der sich aus gleichmäßiger Korngröße und regelmäßiger Anordnung ergibt. Auch bei der Bewertung der Spitzenfärbung wurde eine neunstufige Bonitur-Skala verwendet: 1 = sehr gering; 3 = gering, 5 = mittel, 7 = groß, 9 = sehr groß.

Einlegegurke

Die Ernte der Einlegegurken der Versuchsjahre 2023, 2024 und 2025 erfolgte zu den in Tabelle 23 zusammengefassten Zeiträumen. Die geernteten Einlegegurken wurden unterschieden in marktfähig und nicht marktfähig. Bei den marktfähigen Einlegegurken wurde eine Sortierung in drei verschiedene Klassen vorgenommen: 3 - 9cm, 10 - 15 cm und > 15 cm. Auch die nicht marktfähigen Einlegegurken wurden eingeteilt in unförmige und zum Beispiel erkrankte Früchte. Bei allen Sortierungen wurde die Anzahl in Stück sowie das Gesamtgewicht pro Parzelle ermittelt.

Im Tastversuch II erfolgte keine Ernte, da der Fokus dieses Versuchs auf den Aussaatbedingungen und der optimalen Bewässerung für die Keimung der Einlegegurkensamen lag. Dementsprechend wurde der Versuch kurz nach dem Aufwuchs der Einlegegurken bereits beendet.

Tabelle 23: Übersicht über die Erntezeitpunkte der Einlegegurke

Versuchsjahr	Erntezeitraum	Anzahl Tage im Erntezeitraum
2023	31.07. - 15.09.2023	46
2024	04.07. - 16.09.2024	74
2025	23.06. - 08.09.2025	77

4.6 Ökonomische Einordnung

4.6.1 Ökonomische Einordnung des Verfahrens

Zur ökonomischen Einordnung des Verfahrens wurden für die Kulturen Zucchini, Kürbis und Einlegegurken modellhafte Kulturführungen für die LiquiMulch-Variante festgelegt. Diesen Varianten wurden beispielhaften konventionellen Varianten der Kulturführung gegenübergestellt.

Die Festlegung der Verfahrensschritte und der Verfahrenskennndaten erfolgte in Anlehnung an die in der KTBL-Datensammlung "Gemüsebau - Freiland und Gewächshaus" [47], den "KTBL-Feldarbeitsrechner", den "Verfahrensrechner Pflanze" von KTBL und den beschriebenen Produktionsverfahren sowie anhand der Erfahrungen aus den Feldversuchen. Die Verfahrenskennndaten sind insbesondere die anzusetzenden flächenbezogenen Arbeitskraftstunden in AKh/ha, der flächenbezogene Dieserverbrauch in l/ha sowie die flächenbezogenen fixen und variablen Maschinenkosten in EUR/ha. Der Dieselpreis wurde ausgehend von den Annahmen des KTBL an das aktuelle Preisniveau angepasst. Die Arbeitslohnkosten orientierten sich an den aktuellen Arbeitslohnkosten im Jahr 2025. Anschließend erfolgte ein Kostenvergleich zwischen den Varianten.

Tabelle 24 zeigt die für die drei Gemüsekulturen definierten Varianten der Kulturführung. Darauf aufbauend, wurden die Gesamtverfahrenskosten sowie die absoluten und relativen Differenzkosten zwischen den Verfahrenskosten berechnet. Die Varianten unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Anbaumethode konventionell oder ökologisch, insbesondere bei den Maßnahmen der Beikrautregulierung (Herbizidanwendung, mechanische Behandlung, Mulchfolie) sowie der Ernteerträge.

Tabelle 24: Vergleichsvarianten für die Analyse der Verfahrenskosten für die Kultivierung von Zucchini, Kürbis und Einlegegurke

Vergleichsvarianten	Verfahren
V1	konventionell mit Mulchfolien (nicht abbaubar)
V2	konventionell mit Mulchfolie (abbaubar)
V3	konventionell mit LiquiMulch
V4	ökologisch mit Mulchfolie (nicht abbaubar)
V5	ökologisch mit Mulchfolie (abbaubar)
V6	ökologisch mit LiquiMulch

Die Kosten für das Mulchmaterial wurden anhand von tatsächlichen Angeboten für die LiquiMulch-Inhaltsstoffe ermittelt. Die Maschinenkosten für das Applikationsgerät „MulchSprayer Vegi“ wurden geschätzt. Der Arbeitszeitbedarf für die Applikation des LiquiMulchs wurde anhand der Erfahrungen aus den Feldversuchen abgeleitet.

In Tabelle 25 sind die für die Berechnung der Verfahrensdifferenzkosten getroffenen Annahmen aufgeführt, die nicht kulturspezifisch sind. Tabelle 26 enthält weitere spezifische Annahmen, die abhängig von der jeweiligen Kultur sind.

Die Berechnung der Verfahrenskosten erfolgte mithilfe eines im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel erstellten Tools. Die Ergebnisse wurden als Gesamtkosten und absoluten und relativen Kostendifferenz zwischen den LiquiMulch-Verfahren und den aufgeführten Varianten tabellarisch dargestellt.

Tabelle 25: Allgemeine Annahmen für die Berechnung der Verfahrenskosten

Kostenposition	Annahmen
Traktor	Allrad, Lastschaltgetriebe, 67 kW Fixkosten: 7,56 EUR/ha Variable Kosten (ohne Kraftstoff): 14,97 EUR/ha Dieselverbrauch: 5,3 l/ha Dieselkosten: 1,35 EUR/l
Applikationsgerät Mulchsprayer Vegi	Anschaffungspreis: 38.000 EUR Nutzungsdauer: 10 a Fixkosten: 4.203 EUR/a Variable Kosten (ohne Traktor): 1000 EUR/a Behälterinhalt für LiquiMulch-Komponenten: 2 mal 1.000 l
LiquiMulch-Applikation	Fahrgeschwindigkeit: 1,0 km/h Befüllzeit für beide Vorrats-Behälter: 840 s Wendezeit am Feldrand: 120 s LiquiMulch Materialkosten: 0,80 EUR/kg
Arbeitskraft	Arbeitslohnkosten Fest brutto effektiv: 26,16 EUR/ha Arbeitslohnkosten Saison brutto effektiv: 15,39 EUR/ha
Zinssatz	3 %
Wasser für Beregnung	Wasserkosten: 0,23 EUR/m ³
Wasser für Pflanzenschutz	Wasserkosten: 1,80 EUR/m ³
Mulchfolie abbaubar	Kosten: 0,17 EUR/m
Mulchfolie nicht abbaubar	Kosten 0,06 EUR/m
LiquiMulch-Material	Materialkosten: 0,80 EUR/l Dichte: 1,0 kg/l

Tabelle 26: Spezifische Annahmen für die getesteten Kulturen Zucchini, Kürbis und Einlegegurke für die Berechnung der Verfahrenskosten

	Annahme Einlegegurke	Annahme Zucchini	Annahme Kürbis
Feldgröße	100 m x 100 m	100 m x 100 m	100 m x 100 m
Reihenabstand	1,50 m:	1,50 m	1,50 m
LiquiMulch- Streifenbreite	0,60 m	0,60 m	0,60 m
Schichtdicke	3,0 mm:	3,0 mm	3,0 mm
Ausbringmenge	3 l/m ²	3 l/m ²	3 l/m ²
Anzahl bearbeiteter Reihen je Überfahrt	3	3	3
Arbeitszeitbedarf	5,32 h/ha	5,32 h/ha	5,32 h/ha

4.6.2 Ökonomische Einordnung des Mulchmaterials

Zur ökonomischen Einordnung des Materials wurden die Beschaffungskosten der verschiedenen Inhaltsstoffe beim jeweiligen Rohstoffhändler recherchiert. Dabei wurde der relative Anteil der Kosten einzelner Inhaltsstoffe am Gesamtpreis berechnet, um Rückschlüsse zu erhalten, welcher Inhaltsstoff sich am stärksten auf die Gesamtkosten auswirkt. Diese Analyse erfolgte unter Berücksichtigung des jeweiligen Massenanteils der Inhaltsstoffe am Gesamtgehalt der jeweiligen Rezeptur.

4.7 Treibhausgas- und Energiebilanz

Die Fortschreibung der Treibhausgas (THG)- und Energiebilanz erfolgt aufbauend auf die Ergebnissen in [66] und basiert auf den Methoden der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/44 [19][18]. Die wesentlichen Aspekte zum methodischen Vorgehen bei der Erstellung einer Ökobilanz sind nachfolgend beschrieben.

Zieldefinition

Ziel der Bilanzierung ist das Umweltprofil der neuen wasserbasierten Rezeptur des Mulchmaterials zu erarbeiten und mit dem Umweltprofil des ölbasierten Mulchmaterials zu vergleichen. Dabei wird der Einfluss verschiedener Einsatzstoffe auf die Höhe der THG-Emissionen bewertet. Der Schwerpunkt der Bewertung liegt auf den THG-Emissionen. Die Fortschreibung der Energiebilanz erfolgt verbal argumentativ, da für eine umfassendere Bewertung des wasserbasierten Materials keine ausreichende Datengrundlage zur Verfügung steht.

Systemgrenzen

Die Bewertung des Umweltprofils des Mulchmaterials erfolgt "von der Wiege bis zum Hof". Das bedeutet, dass alle Material- und Energieströme, die zur Herstellung des Mulchmaterials erforderlich sind, bis hin zur Entnahme der erforderlichen Rohstoffe aus der Umwelt betrachtet werden. Die Bilanzierung endet mit dem Mischen der zwei Komponenten "am Hof" und dem damit verbundenen Energieaufwand.

Bezugsgröße/funktionelle Einheit

Mulchmaterial: 1 kg gemischtes, aufspritzbares 2-Komponenten-Mulchmaterial ab Hof

Datenqualität und Datenherkunft

Für die Berechnung der Energie- und THG-Bilanz des LiquiMulchs sind unterschiedliche Eingangsdaten erforderlich. Eine wesentliche Quelle sind die in Kapitel 4.1.1 und 5.1.2.1.2 beschriebenen Rezepturen des Materials. Diesen Materialien wurden verfügbare Datensätze aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.11 zugeordnet (siehe Tabelle 27 und Tabelle 28). Das im Vorhaben MuNaRo [66] erstellte Umweltprofil für das ölbasierte Material wurde mit der Aktualisierung der ecoinvent-Datenbank ebenfalls aktualisiert. Dennoch liegen weiterhin nicht für alle erforderlichen Einsatzstoffe LCA-Datensätze vor. In diesen Fällen wurden Hilfsprozesse erzeugt oder die jeweiligen Vorprodukte der Einsatzstoffe zugrunde gelegt. Für die Bereitstellung von kappa Carrageen konnte auf diese Weise kein Ökobilanzdatensatz erzeugt werden. Daher wurden für die Abschätzung des Umweltprofils die THG-Emissionen von Carrageen E407 aus Dänemark und aus Indien aus der Carbon Cloud [9] zugrunde gelegt. Diese THG-Datensätze unterscheiden sich vor allem in der Bereitstellung der Algen. Für den dänischen Datensatz wurden kultivierte Algen zugrunde gelegt, im indischen Datensatz liegen die Algen als Abfallstoff vor. Neben den THG-Emissionen stehen keine weiteren Informationen zum Umweltprofil des Carrageens zur Verfügung. Diese Einschränkung in der Datenqualität führt dazu, dass die Bewertung des kumulierten Energieaufwands nur verbal argumentativ erfolgen kann. Das Ziel der Untersuchung, erste Erkenntnisse zum Umweltprofil des wasserbasierten Mulchmaterials zu

erarbeiten und dieses mit dem ölasierten Material zu vergleichen, kann trotz der Einschränkungen in der Datenqualität erreicht werden.

Tabelle 27: Zuordnung der Bestandteile des ölasierten Mulchmaterials zu den jeweiligen Datensätzen aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.11 [68] und weiteren Quellen

Komponente	Inhaltstoffe	Relativer Gehalt	Quelle THG-Rucksack
A	Pflanzenöl (Rapsöl) (Altspeiseöl)	30,08 %	Datensatz basierend auf TFZ-Bericht 59 [25] Datensatz basierend auf Annex V, EU 2018/2001 [27]
	Natriumalginat	1,23 %	Hilfsprozess Alginsäureproduktion: ecoinvent 3.11: market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO [68]
	CaSO ₄	1,47 %	ecoinvent 3.11: market for gypsum, mineral, RER [68]
	BC200	2,34 %	ecoinvent 3.11: market for cellulose fibre, CH [68]
B	Wasser	44,56 %	ecoinvent 3.11: market for tap water, agg., Europe without CH [68]
	Stärke	12,25 %	ecoinvent 3.11: maize starch production, DE [68]
	Glycerin	4,46 %	ecoinvent 3.11: market for glycerine, RER [68]
	Na ₃ PO ₄	0,27 %	ecoinvent 3.11: market for sodium phosphate, RER [68]
	Benzoat	1,11%	Hilfsprozess Natriumbenzoatproduktion: ecoinvent 3.11: market for benzoic acid, RER [68] ecoinvent 3.11: market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state, RER [68]
	Sorbitol	2,23	Vorprodukt: ecoinvent 3.11: market for glucose, GLO [68]

Tabelle 28: Zuordnung der Bestandteile des wasserbasierten Mulchmaterials zu den jeweiligen Datensätzen aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent 3.11 [68] und weiteren Quellen

Komponente	Inhaltstoffe	Relativer Gehalt	Quelle THG-Rucksack
A	Wasser	48,6 %	ecoinvent 3.11: market for tap water, Europe without CH [68]
	Natriumalginat	1 %	Hilfsprozess Alginsäurenproduktion: ecoinvent 3.11: market for sodium hydroxide, without water, in 50 % solution state, GLO [68]
	NaCl	0,12 %	ecoinvent 3.11: market for sodium chloride, powder, GLO [68]
B	Wasser	48,6 %	ecoinvent 3.11: market for tap water, agg., Europe without CH [68]
	κ-Carrageen	1 %	Carbon Cloud: Carrageenan. E407, DK [10] Carbon Cloud: Carraggenan. E407, India [9]
	Ca-Citrat	0,72 %	Hilfsprozess Ca-Citrat Produktion: ecoinvent 3.11: market for citric acid, GLO [68] ecoinvent 3.11: market for hydrated lime, packed, RER [68]

Indikatorenberechnung

Die Bewertung der THG-Emissionen erfolgt entsprechend des aktuellen Stands der Wissenschaft in Anlehnung an den aktuellen Sachstandsbericht (AR6) des IPPC [31] und wird als Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (kg CO₂-Äq.) zusammengefasst. Die Energiebilanz basiert auf dem Indikator des nicht erneuerbaren Energieaufwands nach DREIER (2000) [23].

4.8 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Softwarepaket Origin® 2025b von Origin-Lab®, USA. Zur Anwendung kamen Varianzanalysen (ANOVA) und paarweise Mittelwertvergleiche nach Tukey. Das Signifikanzniveau betrug bei allen Analysen $p < 0,05$.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Aufspritzbares Mulchmaterial

5.1.1 Rezeptur des in den Feldversuchen eingesetzten Mulchmaterials

Da sich die Rezeptur 114k, siehe Zusammensetzung in Abbildung 8, die in den Versuchen der Projekte ABOW und MuNaRo getestet wurde, als geeignet erwiesen hat, kam diese auch in den Feldversuchen 2023, 2024 und 2025 am Standort Bamberg zum Einsatz. Die Kombination des Geliermittels Natriumalginat mit den Gelierhilfsmitteln Natriumphosphat und Calciumsulfat führt zu einem zügigen Festwerden der Masse, was eine effektive Unterdrückung des Beikrauts durch eine physikalische Barriere ermöglicht (siehe Kapitel 5.5.3). Den bisherigen Ergebnissen zufolge baut sich das Material wie vorgesehen ab, siehe Kapitel 5.2). Negative Auswirkungen auf die Umwelt wurden bislang nicht festgestellt [44][66].

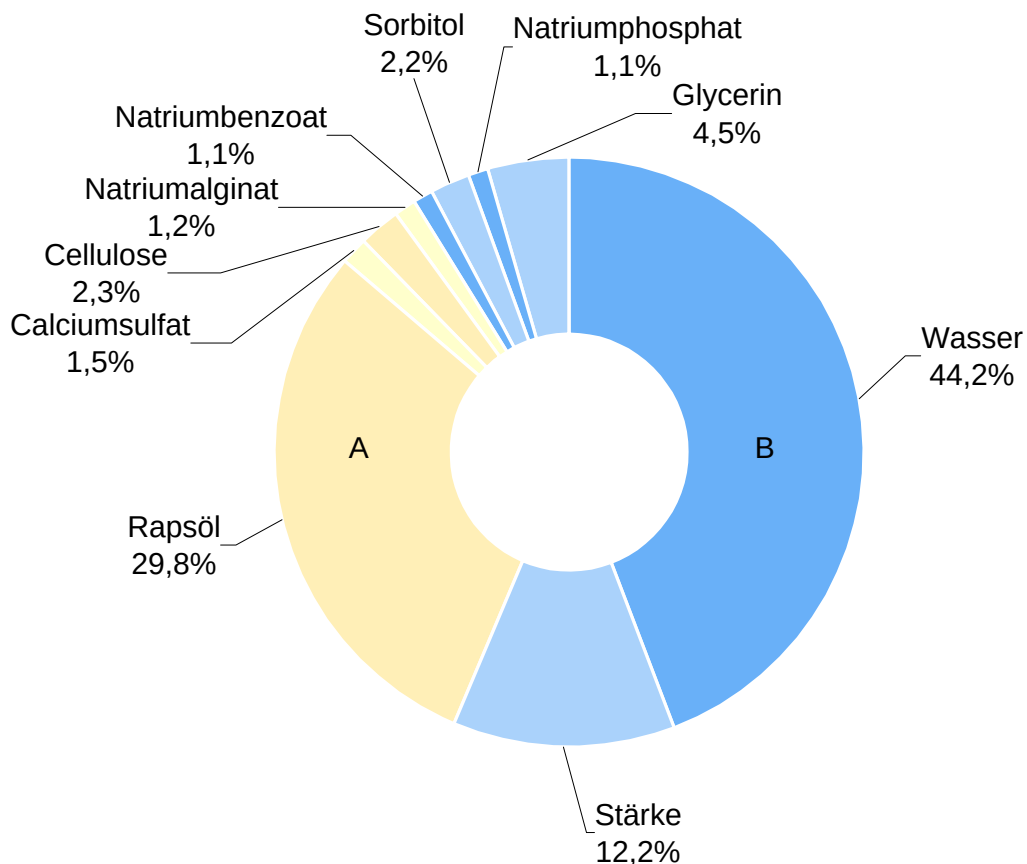


Abbildung 8: Prozentuale Zusammensetzung der beiden Komponenten A (gelb) und B (blau) von LiquiMulch nach der Rezeptur 114k [44]

5.1.2 Optimierung des Mulchmaterials - neue Formulierungen

Für die Optimierung des Mulchmaterials wurde die Eignung neuartiger Inhaltsstoffe untersucht, sowie die Entwicklung einer ölfreien Rezeptur angestrebt. Vielversprechende Rezepturen wurden auf ihre beikrautunterdrückende Wirkung weiter untersucht.

5.1.2.1 Ölfreie Rezepturen

5.1.2.1.1 Untersuchung geeigneter Geliermittel

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Mulchmaterials wurde an einer ölfreien Rezeptur geforscht. Ziel der Entwicklung einer neuen Formulierung des Mulchmaterials war der Ersatz von Rapsöl durch Wasser, um das Pflanzenöl als teuren Inhaltsstoff zu ersetzen und einem beim Abbau möglicherweise stickstoffzehrendem Effekt vorzubeugen.

Hierfür wurden unterschiedliche Geliermittel untersucht, die im Vergleich zu Natriumalginat eine ähnlich gute Gelierung zeigen, aber gleichzeitig in wässrigen Lösungen weniger viskos vorliegen. Zu den untersuchten Geliermitteln zählen die in Tabelle 29 aufgeführten Stoffe. Da die Gelierung der Polysaccharide meist von der Anwesenheit verschiedener Ionen abhängt, wurden die ausgewählten Geliermittel auf ihre Sensitivität gegenüber Natriumchlorid (NaCl), Kaliumchlorid (KCl), Ammoniumchlorid (NH₄Cl) und Calciumcitrat untersucht. Die Gelierung wurde zum einen in vollentsalztem (VE-) Wasser durchgeführt und zum anderen in Straubinger Leitungswasser, um die Interaktion von Ionen zu testen, die natürlicherweise im Leitungswasser vorkommen.

Das Geliermittel Natriumalginat zeigte unabhängig vom Lösungsmittel die größte Sensitivität auf Ca²⁺-Ionen, die durch das Calciumcitrat freigesetzt wurden. In VE-Wasser wurde eine geringe Gelierung unter der Anwesenheit von K⁺ und NH₄⁺, die durch Zugabe von KCl und NH₄Cl freigesetzt werden, beobachtet. Diese Gelierwirkung war jedoch in Leitungswasser nicht festzustellen. Nach Zugabe von NaCl konnte keine Gelierungsaktivität beobachtet werden. Dieser Effekt war wiederum unabhängig vom Lösungsmittel.

κ-Carrageen gelöst in VE-Wasser zeigte die größte Sensitivität gegenüber K⁺ und NH₄⁺-Ionen, während Calciumcitrat keinen Effekt auf die Gelierung des Gelbildners zeigte. NaCl konnte eine leichte Gelierung herbeiführen. Dagegen konnte die Gelierung von κ-Carrageen, gelöst in Leitungswasser, unter Zugabe der vier aufgeführten Salze eine Gelierung nicht ausgelöst werden.

Die niederveresterten amidierten Pektine Pektinamid AF, Amid CB und Pektinamid CF zeigten alle drei eine hohe Sensitivität gegenüber Ca²⁺- und K⁺-Ionen. Außerdem zeigten das Amid CB und Pektinamid CF eine hohe Sensitivität gegenüber Na⁺, die durch die Zugabe von NaCl freigesetzt wurden. Die Gelbildung war dabei unabhängig vom Lösungsmittel.

Bei den anderen getesteten Geliermitteln konnte keines der aufgeführten Salze die Gelierung der Polysaccharide initiieren.

Tabelle 29: Gelierwirkung verschiedener Geliermittel mit den Gelierhilfsmittel NaCl, KCl, NH₄Cl, Ca-Citrat in verschiedenen Lösungsmitteln, + = erfolgreiche Gelierung, - = keine Gelierung, -/+ = teilweise Gelierung

Polymer	VE - H ₂ O				H ₂ O			
	NaCl	KCl	NH ₄ Cl	Ca-Citrat	NaCl	KCl	NH ₄ Cl	Ca-Citrat
Natrium-Alginat	-	-/+	-/+	+	-	-	-	+
κ-Carrageen	-/+	+	+	-	-	-	-	-
Pektinamid AF	-/+	+	-/+	+	-/+	+	-/+	+
Amid CB	+	+	-/+	+	+	+	-	+
Pektinamid CF	+	+	-	+	+	+	-	+
Chitosan	-	-	-	-	-	-	-	-
Guarkernmehl	-	-	-	-	-	-	-	-
Konjak	-	-	-	-	-	-	-	-
Johannisbrot-kernmehl	-	-	-	-	-	-	-	-
Caarageen-moos	-	-	-	-	-	-	-	-
Milchsäure-Chitosan	-	-	-	-	-	-	-	-
Xanthan	-	-	-	-	-	-	-	-

Darüber hinaus wurde auch die Carboxymethylcellulose auf seine gelbildenden Eigenschaften getestet, welche laut Literatur eine hohe Sensitivität gegenüber Fe³⁺ Ionen zeigt [69]. Nach Zugabe von Eisen-III-Chlorid (FeCl₃) konnte eine starke Gelbildung beobachtet werden.

Als vielversprechendes Geliermittel erwiesen sich zusammenfassend das bereits verwendete Natriumalginat, κ-Carrageen, und die drei verschiedenen Pektine. Außerdem zeigte auch die Carboxymethylcellulose eine gute Gelbildung.

5.1.2.1.2 Rezepturentwicklung mit κ -Carrageen und Natriumalginat

Gelierhilfsmittel

Wie in Tabelle 29 dargestellt, kristallisierten sich Natriumalginat sowie κ -Carrageen als vielversprechende Geliermittel für die Herstellung eines Hydrogels heraus. Da die Gelbildung von κ -Carrageen durch die Anwesenheit von Cl^- -Ionen beeinflusst wird und die Gelbildung von Natriumalginat auf die Quervernetzung durch Ca^{2+} -Ionen basiert, eignen sich diese beiden Polymere hervorragend für die Herstellung eines ölfreien Hydrogels auf Zwei-Komponenten-Basis. Dabei werden die Komponenten so zusammengestellt, dass innerhalb der einzelnen Komponenten keine Gelierung stattfindet: eine Komponente enthält das Geliermittel A1 (z. B. κ -Carrageen) ohne die aktivierenden Ionen sowie das Gelierhilfsmittel B2 (z.B. Calciumsalz), während die andere Komponente das Geliermittel B1 (z. B. Natriumalginat) enthält sowie das Gelierhilfsmittel A2 (z.B. Chloridsalz). Beim Zusammenkippen der beiden Komponenten kommt es dann zur Gelierung, da die entsprechenden Ionen (Cl^- oder Ca^{2+}) mit den jeweiligen Geliermitteln in Kontakt treten können und diese aktivieren. Dieser Ansatz ermöglicht eine kontrollierte und gezielte Gelbildung erst beim Mischen der Komponenten, wodurch eine stabile und gut steuerbare Hydrogel Struktur entstehen kann.

Dementsprechend wurden verschiedene Kombinationen aus Geliermittel und Gelierhilfsmittel hinsichtlich ihrer Eignung bei der Herstellung eines ölfreien Hydrogels auf Basis von zwei Komponenten näher untersucht. Die Anwesenheit verschiedener Geliermittel und Gelierhilfsmittel in einer Lösung kann zu gegenseitigen Störungen der Gelierungsprozesse führen. Daher ist es notwendig, die Gelierfähigkeit jeder einzelnen Substanz sowie deren Kombination zu testen, um sicherzustellen, dass die Gelierung auch in der Mehrkomponenten-Konstellation zuverlässig erfolgt.

Als erster Schritt wurde das reaktivste Gelierhilfsmittel für κ -Carrageen identifiziert. Unter Verwendung von Leitungswasser als Lösungsmittel wurde mithilfe der drei Salze NaCl, NH_4Cl und KCl jeweils ein Hydrogel hergestellt. Die Gele zeigten eine gute Polymerisation und wurden schnell fest. Allerdings waren die Gele nicht reißfest und verloren etwas Wasser über die Zeit, wodurch sie schrumpften. Die hohe Geschwindigkeit der Gelierung verhinderte das Verfließen der Masse in der Kristallisierschale. Das stabilste Gel wurde durch die Verwendung von NaCl erzielt, weshalb in der weiteren Entwicklung die Fokussierung auf NaCl als Gelierhilfsmittel für κ -Carrageen gelegt wurde (Abbildung 9, R 218a). NaCl wurde ebenfalls als Gelierhilfsmittel für κ -Carrageen unter Verwendung von vollentsalztem Wasser untersucht, wobei auch hier ein elastisches Gel entstand, das jedoch nur langsam aushärtete und nicht reißfest war (Abbildung 9, R 215b). Über die Zeit verlor das Gel Wasser und schrumpfte. Aufgrund der mäßigen Löslichkeit von Natriumalginat in Wasser, waren die hergestellten Gele oft inhomogen. Da die Prüfkörper unter Verwendung von vollentsalztem Wasser eine deutlich geringere Geliengeschwindigkeit zeigten als die Gele mit Leitungswasser wurde für die weiteren Versuche Leitungswasser als Lösungsmittel bevorzugt. Außerdem stellt vollentsalztes Wasser in der Bereitstellung für den Landwirt eine deutlich größere Herausforderung dar, weshalb die Verwendung von Leitungswasser zu präferieren ist.

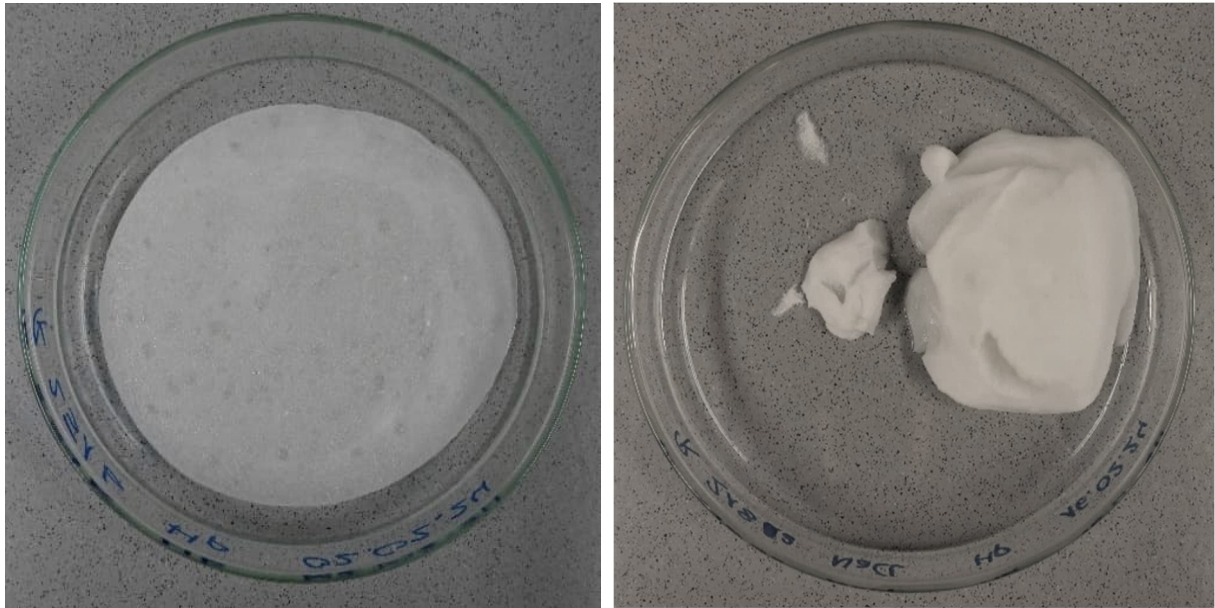


Abbildung 9: Prüfkörper mit κ -Carrageen und Natriumalginat als Geliermittel der ölfreien Rezeptur R 215b unter Verwendung von destilliertem Wasser (links) und R 218a unter Verwendung von Leitungswasser (rechts)

Auch für das zweite Polymer Natriumalginat wurde das reaktivste Gelierhilfsmittel bei der Herstellung eines Hydrogels, wie oben beschrieben, untersucht. Als Gelierhilfsmittel für die Initiierung der Gelbildung von Natriumalginat wurden folgende Calciumsalze untersucht: Calciumcarbonat (CaCO_3), Calciumsulfat (CaSO_4), Calciumchlorid (CaCl_2), Calcium-Acetat und Calcium Citrat. Unter Verwendung von CaCO_3 entstand eine homogene Masse, welche nicht richtig aushärtete (Abbildung 10, R 222i). Auch die Steigerung der Konzentration von CaCO_3 konnte den Grad der Gelierung nicht steigern. Ähnliche Beobachtungen wurden auch unter Verwendung von CaSO_4 gemacht (Abbildung 10, R 223b). Unter Zugabe von CaCl_2 konnte kein homogen-zusammenhängendes Gel hergestellt werden. Die Gelierung erfolgte zu schnell, weshalb dabei Gelperlen entstanden (Abbildung 10, R 224h). Auch Calciumacetat eignete sich nicht als Gelierhilfsmittel bei der Herstellung eines Hydrogels (Abbildung 10, R 225b).

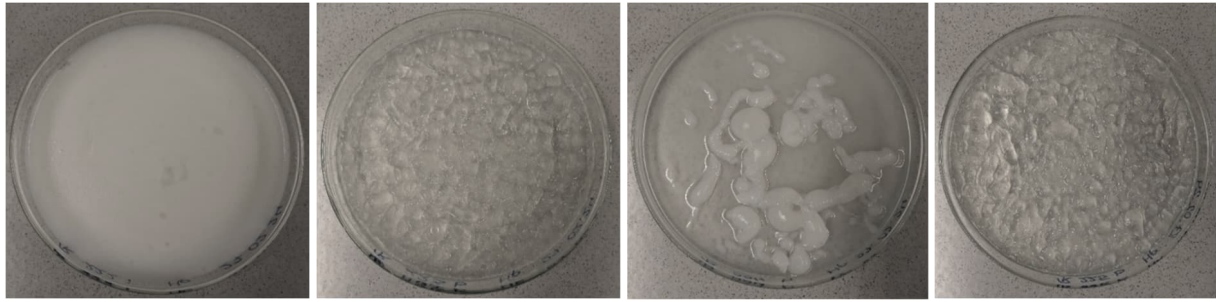


Abbildung 10: Prüfkörper der ölfreien Rezepturen R222i, R223b, R224h, R225b (von links nach rechts) unter Verwendung unterschiedlicher Gelierhilfsmittel für das Polymer Natriumalginat

Dagegen konnte unter Verwendung von Calciumcitrat ein homogenes Hydrogel hergestellt werden, welches sehr gut polymerisierte und ein elastisches Hydrogel bildete. Nach Anpassung des richtigen Konzentrationsverhältnisses zwischen Natriumalginat und Calciumcitrat wurde das stabilste Gel bei einem Verhältnis von 1:0,75 erreicht (Abbildung 11).

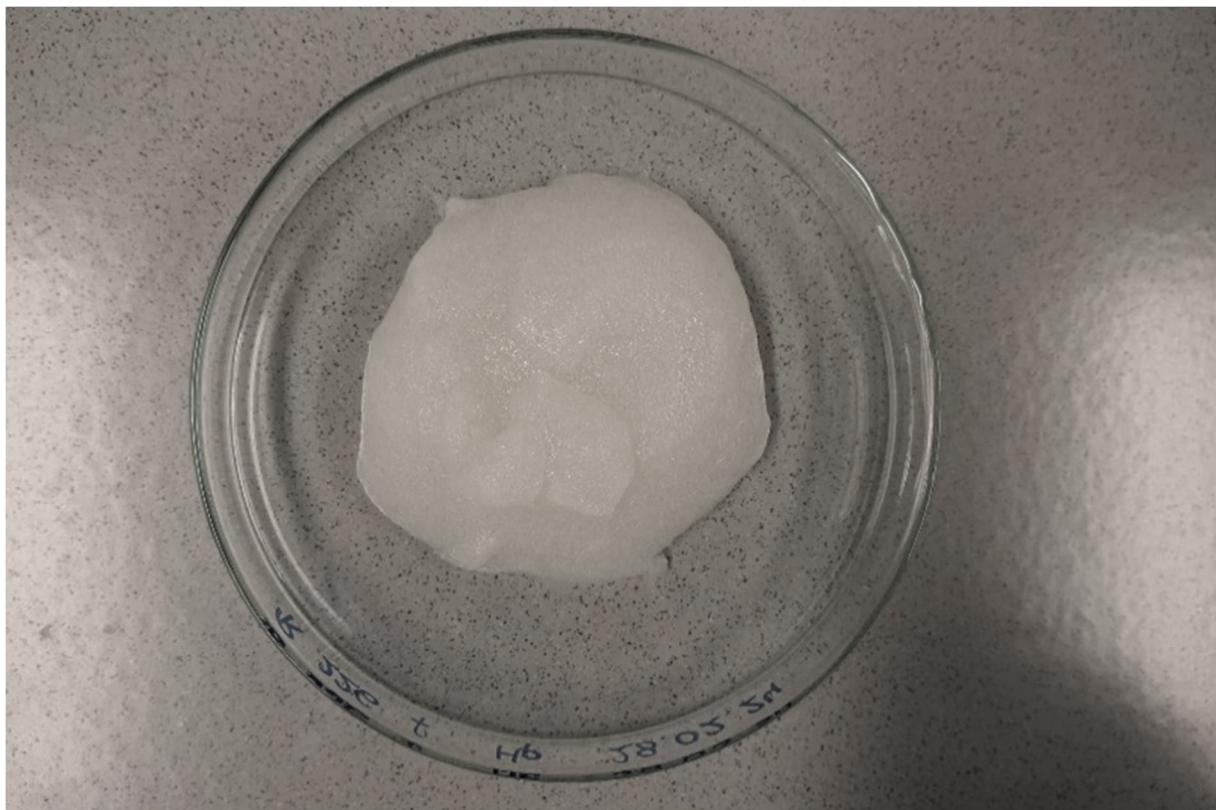


Abbildung 11: Prüfkörper der ölfreien Rezeptur R 226f basierend auf Natriumalginat und κ -Carrageen

Aufgrund der beobachteten schlechten Löslichkeit von Natriumalginat in Wasser wurden außerdem alternative Gelbildner für die Herstellung eines reinen Hydrogels untersucht. Es

wurde zum einen Konjak (R 220a) auf seine Eignung untersucht, sowie drei verschiedene Pektinamide (R 228). Vor allem die Pektinamide AF (R 228a), CB (R 228b) und CF (R 228c) zeigten im Vergleich zum Natriumalginat eine deutlich bessere Löslichkeit in Wasser. Allerdings war die Polymerisation der Gele nicht ausreichend, weshalb diese nicht richtig fest wurden (Abbildung 12). Dementsprechend wurde von der weiteren Verwendung dieser Polymere abgesehen.

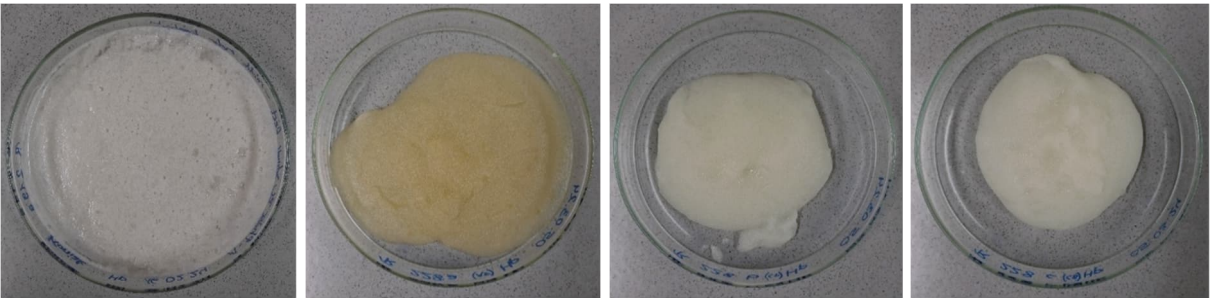


Abbildung 12: Prüfkörper der ölfreien Rezepturen R 220a (links) auf Basis von κ -Carrageen und Konjak und der Rezeptur R 228a-c (von links nach rechts) auf Basis von κ -Carrageen und Pektinamid AF, CB und CF

Basierend auf den Ergebnissen der Herstellung eines Hydrogels erwiesen sich die Polymere Natriumalginat und κ -Carrageen in Kombination mit den Gelierhilfsmitteln NaCl und Ca-Citrat also am vielversprechendsten für die Formulierung eines ölfreien Zwei-Komponenten-Mulchmaterials. Daraus ergibt sich für die ölfreie Zusammensetzung des Mulchmaterials die in Tabelle 30 zusammengefasste Rezeptur.

Tabelle 30: Rezeptur als Basis für eine ölfreie Zusammensetzung des Mulchmaterials (R 226f)

Komponente	Inhaltstoffe	Einwaage in g
A	H ₂ O	100
	Natriumalginat	2
	NaCl	0,25
B	H ₂ O	100
	κ -Carrageen	2
	Ca-Citrat	1,5

Um die beikrautunterdrückende Wirkung der Rezeptur 226f abschätzen zu können, wurde die Rezeptur mit einer Schichtdicke von 5 mm in Aussaatkisten appliziert, in denen Beikräuter vorkultiviert worden waren. Während das Beikraut anfänglich am Aufwachsen gehindert war, zeigte sich allerdings bis zum 08.07.2024 eine Erholung der Pflanzen. Nichtsdestotrotz war der Mulchstreifen der Rezeptur 226f am 08.07.2024 noch deutlich zu

erkennen und bildete eine feste Schicht auf dem Substrat. Ein Grund, warum sich das Beikraut erholt hat, könnte an der Lichtdurchlässigkeit des Materials liegen. Durch das transparente Gel kann Sonnenlicht hindurch dringen, weshalb die Photosynthese der darunter liegenden Pflanzen nur bedingt eingeschränkt ist. Durch das Integrieren von Füllmaterialien oder das Anfärben des Materials könnte möglicherweise ein besserer beikrautunterdrückender Effekt erzielt werden.



Abbildung 13: Untersuchung der Beikrautunterdrückung der Rezeptur 226f im praxisnahen Test von 19.06. - 08.07.2024

Füllstoffe

Dementsprechend wurde nach Inhaltsstoffen gesucht, die die Transparenz des Gels reduzieren, ohne einen negativen Effekt auf die Gelbildung zu entwickeln. Ausgehend von der Rezeptur 226f wurde nach einem geeigneten Füllstoff gesucht, der dem Mulchmaterial Stabilität geben sollte und gleichzeitig in der Lage ist, die Transparenz des Mulchmaterials zu reduzieren. Dafür wurden unterschiedliche Materialien eingesetzt, wie beispielsweise Stärke, Cellulosefasern, Semmelbrösel aus Altbackwaren, Kaffeesatz, Sägespäne oder Aktivkohle (Abbildung 14).

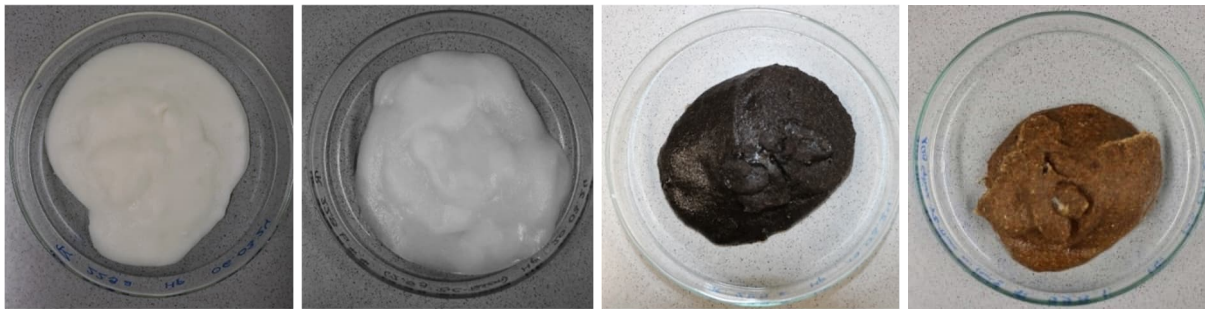


Abbildung 14: Prüfkörper mit unterschiedlichen Füllstoffen (von links nach rechts: Stärke (R 229a), Cellulosefasern (R 229b*), Kaffeesatz (R 229d), Sägespäne (R229f))

Bei der Wahl eines geeigneten Füllstoffs war vor allem seine Auswirkung auf die Viskosität der Komponente ausschlaggebend. Während die Komponente durch die Zugabe von 10 g BC-Cellulosefasern nicht mehr fließfähig war, war die Verwendung von 2,5 g Cellulosefasern besser geeignet. Eine zu viskose Suspension wäre nicht mehr pumpfähig und dementsprechend für eine Applikation unbrauchbar. Grundsätzlich ließen sich alle Füllstoffe gut in das Gel integrieren und störten den Gelierprozess der beiden Gelbildner nicht.

Bei Kaffeesatz und Semmelbrösel aus Altbackwaren handelt es sich beispielsweise um typische Abfallstoffe der Industrie. Kaffeesatz fällt in großen Mengen bei der Herstellung von beispielsweise Instant Coffee an. Kaffeesatz kann entweder zur Energiegewinnung genutzt werden, oder wird als Abfallstoff entsorgt. Auch Semmelbrösel von Altbackwaren fallen täglich als Abfallstoff an und werden nicht selten in Biogasanlagen zur Weiternutzung und Energiegewinnung genutzt. Dementsprechend können für die Wahl eines geeigneten Füllstoffs vor allem Aspekte der Wirtschaftlichkeit und der Nachhaltigkeit in Betracht gezogen werden.

Farbstoffe

Neben der Verwendung von Füllstoffen ist ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der Transparenz die Anfärbung des Gels mit unterschiedlichen natürlichen Farbstoffen. Als kostengünstige Farbstoffe wurde hierfür unter anderem Rotebeeteextrakt und Spirulina eingesetzt. Außerdem wurde Natriumbenzoat als Konservierungsmittel hinzugefügt. Neben einer effektiven Färbung ist wichtig, dass die Gelbildung der beiden Geliermittel durch den Farbstoff nicht beeinträchtigt wird. Wie in Abbildung 15 zu erkennen, sind beide Farbstoffe in der Lage das Gel bei gleichzeitig effektiver Gelbildung einzufärben.

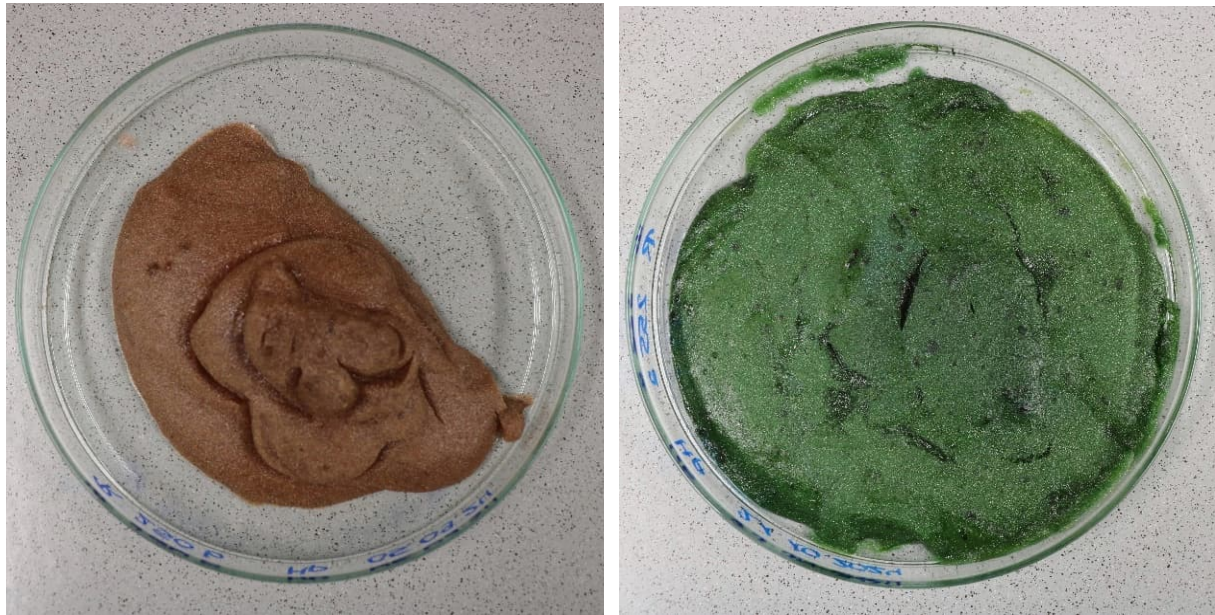


Abbildung 15: Angefärbte Prüfkörper der Rezepturen 250b (links), angefärbt mit Rotebeeteextrakt und 250d (rechts), angefärbt mit Spirulina

Im Hinblick auf die Kosten des Mulchmaterials ist der Einsatz von Farbstoffen dem Einsatz von Füllstoffen vorzuziehen, da Farbstoffe aufgrund ihrer starken Färbeeigenschaften in deutlich geringeren Mengen eingesetzt werden müssen als beispielsweise Füllstoffe. Außerdem verändern sie die Viskosität der beiden Komponenten nicht und sind daher auch für die Förderung im Applikationsgerät unproblematischer. Dementsprechend wurde die mit Spirulina angefärbte Rezeptur für einen Tastversuch im Freiland am Standort Straubing auf seine beikrautunterdrückende Wirkung näher untersucht (Kapitel 5.1.2.2).

5.1.2.1.3 Rezepturentwicklung mit Carboxymethylcellulose

Aufgrund seines Vorkommens in den Zellwänden von Pflanzen, insbesondere in Nadel- und Laubhölzer, gilt Cellulose als eines der häufigst vorkommenden Biopolymere weltweit [69]. Dementsprechend ist es auch für die Anwendung im Mulchmaterial sehr interessant. In der Literatur wird beschrieben, dass Carboxymethylcellulose (CMC) effektiv mit dem Gelierhilfsmittel Eisen-III-chlorid (FeCl_3) geliert [69]. Dementsprechend wurden diese beiden Substanzen auch für die Entwicklung eines ölfreien Mulchmaterials näher untersucht.

Dabei konnte beobachtet werden, dass sich die Gelbildung effektiv und mit einer hohen Geschwindigkeit einstellt, weshalb sich allerdings kein homogenes Gel ausbildet (Abbildung 16). Dementsprechend muss für die Herstellung eines homogenen Gels ein Gelierverzögerer in die Rezeptur integriert werden.

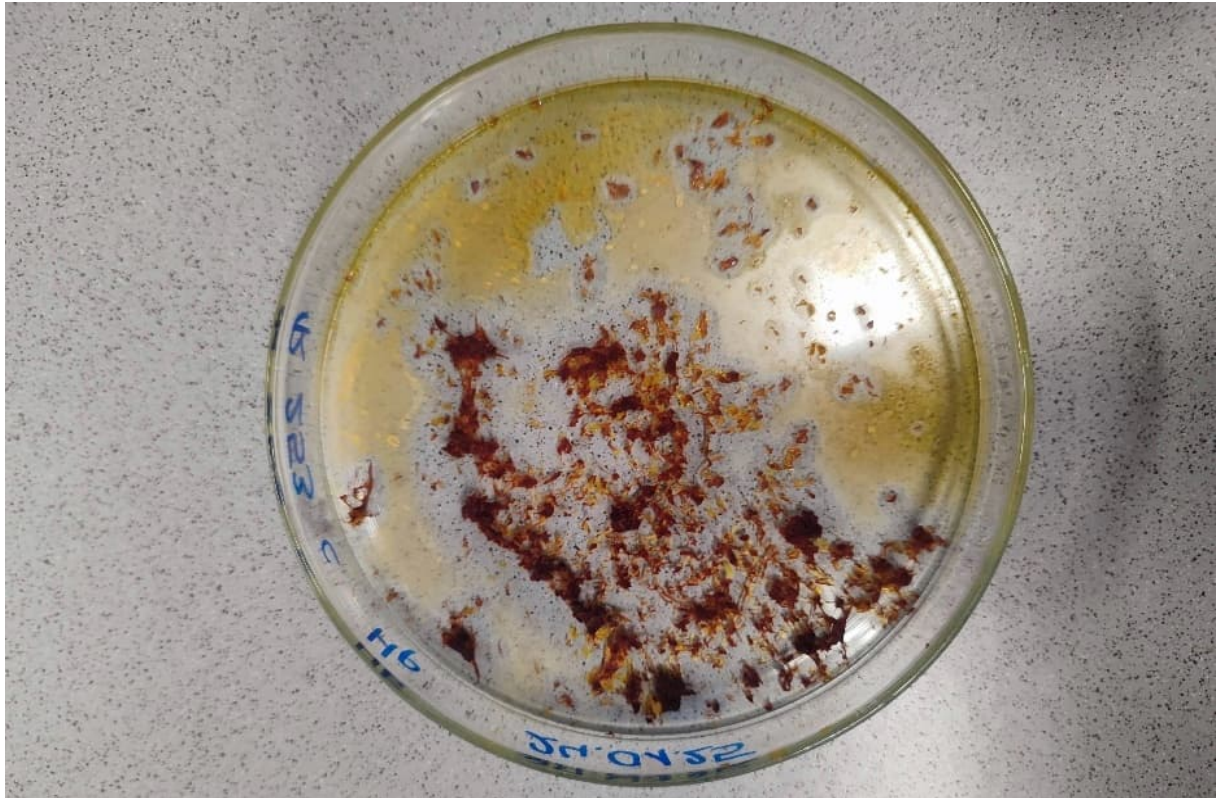


Abbildung 16: Extrem schnelle Gelierung bei Gelierversuch mit Carboxymethylcellulose und Eisen-III-chlorid (FeCl_3) in Wasser verursacht Gel-Mikrobeads

Gelierverzögerer

Für die Verzögerung der Gelierung wurden Natriumphosphat und Glucono- δ -lacton (GDL) auf ihre Eignung untersucht. Durch Zugabe von GDL konnte konzentrationsabhängig die Geliergeschwindigkeit verzögert werden. Bei einem Konzentrationsverhältnis von CMC zu GDL von ca. 1:3 konnte ein homogenes und vollständig polymerisiertes Gel gewonnen werden (Abbildung 17). Auch durch Zugabe von Natriumphosphat (Na_3PO_4) konnte konzentrationsabhängig eine Verzögerung der Gelierung des Gels beobachtet werden. Hier war eine effektive Gelierverzögerung bei einem Konzentrationsverhältnis von CMC zu Na_3PO_4 bereits bei einem Verhältnis von 1:0,67 erkennbar (Abbildung 17).



Abbildung 17: Prüfkörper der ölfreien Rezepturen mit Carboxymethylcellulose und Gelierverzögerer R 264g (links) mit Glucono- δ -lacton und R 263n (rechts) mit Natriumphosphat

Zusammenfassend zeigten beide Gelierverzögerer eine effektive Wirkung, allerdings wurde aufgrund der deutlich geringen Aufwandsmenge Na_3PO_4 für die weitere Entwicklung des Hydrogels basierend auf CMC bevorzugt. Außerdem wurde über die Zugabe von Glycerin die Elastizität des Gels angepasst. Tabelle 31 fasst die Inhaltsstoffe der vielversprechendsten Rezeptur auf Basis von CMC und FeCl_3 zusammen. Aufgrund der Anwesenheit von Fe^{3+} Ionen zeigten die hergestellten Gele eine intensive orange Farbe. Das Gel verfügte über eine sehr hohe Flexibilität, die auch nach drei Tagen erhalten bleibt.

Tabelle 31: Rezeptur 263n auf Basis des Geliermittels Carboxymethylcellulose und dem Gelierhilfsmittel FeCl_3

Komponente	Inhaltsstoffe	Einwaage in g
A	H_2O	150
	Na_3PO_4	3
	Glycerin	30
	CMC	4,5
B	FeCl_3	2
	H_2O	75

Für die weiteren Analysen erwies sich die ölfreie Rezeptur 263n als vielversprechend und wurde dementsprechend weiter auf ihre Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung in weiteren Versuchen analysiert (Kapitel 5.1.2.4).

5.1.2.1.4 Zusammenfassung - Ölfreie Rezeptur

Im Rahmen der Entwicklung einer ölfreien Rezeptur wurden über 200 Rezepturen hergestellt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften analysiert. Zu den beiden vielversprechendsten Rezepturen zählt zum einen die Rezeptur 263n (Tabelle 31), welche auf dem Geliermittel Carboxymethylcellulose und dem Gelierhilfsmittel Eisen-III-Chlorid basiert. Daneben zeigte aber auch die Rezeptur 226f (Tabelle 30) eine effektive Gelbildung. Das Zwei-Komponenten Gel, basierte zum einen auf der Verwendung von Natriumalginat und κ -Carrageen, sowie auf den beiden Gelierhilfsmitteln Calciumcitrat und Natriumchlorid.

5.1.2.2 Rezepturen mit Reststoffen

Eine weitere Möglichkeit zum Ersatz teuer Rohstoffe, ist die Verwendung von Rest- und Abfallstoffen. Dies trägt zur Reduzierung von Abfallmengen bei und fördert eine nachhaltige Wirtschaftsweise, indem Ressourcen effizient genutzt werden. Mögliche Reststoffe aus der Industrie, die als Füllstoffe im Mulchmaterial potenziell geeignet sein könnten sind Kaffeesatz, Semmelbrösel aus Altbackwaren oder Obsttrester, der beim Pressen von Obstsaften anfällt.

Die Untersuchungen auf die Eignung der Reststoffe für die Verwendung im Mulchmaterial werden im Zuge des Abschlussberichts des Projekts ABOWPrax [45] im Detail beschrieben.

Als vielversprechender Reststoffe erwies sich hierbei vor allem der Einsatz von Apfeltrester. Bei der Herstellung von Apfelsaft oder Apfelwein, bleibt nach dem Auspressen der Äpfel ein Presskuchen, bestehend aus Fruchtfleisch, Schalen, Kerne und weiteren festen Bestandteilen übrig. Dieser sogenannte Apfeltrester kann entweder an Nutztiere verfüttert werden, oder wird als Abfallstoff entsorgt. Bei der Untersuchung seiner Eignung konnte zu Beginn sehr schnell festgestellt werden, dass die verwendeten Füllstoffmengen neu angepasst werden müssen und Cellulose und Stärke nicht eins zu eins ersetzt werden kann, ohne dass die beiden Phasen zu viskos beziehungsweise zu fest werden. Nach Anpassung konnten sowohl Stärke als auch Cellulose durch Apfeltrester ausgetauscht werden. Das dabei resultierende Gel zeigt eine gute Polymerisation und bildet ein homogenes Gel aus (Abbildung 18). Aufgrund der Verwendung von Apfeltrester hat das Gel eine erd-braune Farbe, aber ansonsten die gleichen Eigenschaften wie die ursprüngliche Rezeptur 114k.



Abbildung 18: Prüfkörper der modifizierten Rezeptur R 114k mit Apfeltrester als Füllstoffersatz (R 255c+)

5.1.2.3 Rezepturen für geschäumtes Material

Die Untersuchungen zum Aufschäumen des Mulchmaterial werden im Zuge des Abschlussberichts des Projekts ABOWPrax [45] im Detail beschrieben.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist die Reduktion der Aufwandsmenge. Da die beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchmaterials von seiner Schichtdicke abhängt, solle die Reduktion der Aufwandsmenge am besten bei gleichbleibender Schichtdicke erfolgen. Dementsprechend könnte hier das Aufschäumen des Materials eine Lösung sein. Bei Aufschäummittel handelt es sich meist um Substanzen, die bei chemischer Reaktion zur Gasbildung führen. Dabei entstehen Luftporen im Material, es entsteht ein Schaum. Zu den Aufschäummitteln zählen beispielsweise Natron, Natriumcarbonat, aber auch Aluminium (-pulver), Eisen (-pulver), Magnesium, Ammoniumchlorid oder Ammoniumhydrogencarbonat. Ein Teil dieser Aufschäummittel reagiert bei basischem oder saurem pH, dementsprechend war die Integration eines Aufschäummittel in die Rezeptur des Mulchmaterials herausfordernd, da pH Änderungen auch oft mit verändertem Gelierverhalten der Geliermittel einhergehen. Dementsprechend wurden im Zuge der Entwicklung eines aufgeschäumten Mulchmaterials über 100 verschiedene Rezepturen getestet und auf ihre Eignung untersucht.

Für das Aufschäumen der Rezeptur 114k wurde unter anderem die B Phase durch einen Trishydroxymethylaminomethan (TRIS)-Puffer alkalisiert, während zur A Phase Magnesium hinzugefügt wurde. In alkalischen Lösungen kann Magnesium mit Wasser und der anwesenden Säure reagieren, wodurch Wasserstoffgas freigesetzt werden kann. Das Freisetzen des Gases führt wiederum zum Aufschäumen der Lösung. Allerdings konnte nach Vermischen der beiden Phasen nur ein geringes Aufschäumen beobachtet werden.

Eine weitere Möglichkeit zum Aufschäumen von Lösungen ist die Zugabe von Ammoniumhydrogencarbonat. Hierfür wurde erneut als Basis die Rezeptur 114k verwendet, wobei unterschiedliche Geliermittel getestet wurden. Unter anderem wurde für das Aufschäumen der Rezeptur 114k mit Ammoniumhydrogencarbonat die Geliermittel Chitosan, Xanthan, Guarkernmehl, Konjak, Johannisbrotkernmehl und Carboxymethylcellulose (CMC) getestet. Bei allen Gelen konnte kurzfristig ein starkes Aufschäumen beobachtet werden, dennoch waren die Schäume nicht stabil und fielen nach kurzer Zeit wieder zusammen. Durch Steigerung des Gehalts an Geliermittel konnte das Zusammenfallen der Schäume etwas hinausgezögert, allerdings nicht verhindert werden. Zum Beispiel zeigte der aufgeschäumte Prüfkörper mit einem erhöhten Anteil des Geliermittels Konjak eine anfängliche Schaumhöhe von 1,7 cm, die nach dem Zusammenfallen noch bei 1,2 cm lag (Abbildung 19). Dadurch konnte die Schaumstabilität im Vergleich zum ursprünglichen Zustand, bei dem die Differenz zwischen Anfangs- und Endhöhe 0,3 cm betrug, durch die Erhöhung des Geliermittelgehalts auf eine Differenz von 0,5 cm verbessert werden. Alle aufgeschäumten Gele zeigten im Vergleich zum nicht aufgeschäumten Prüfkörper der Original Rezeptur 114k eine porige Oberfläche, die aufgrund der Gasentwicklung durch das Aufschäumen zu erklären ist (Abbildung 19).



Abbildung 19: Prüfkörper der aufgeschäumten Rezeptur 114k durch Zugabe von Ammoniumhydrogencarbonat und der Verwendung des Geliermittels Konjak (R 207e)

5.1.2.4 Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung der Vorzugsrezepturen

Die vielversprechendsten Rezepturen wurden auf ihre Witterungsbeständigkeit und beikrautunterdrückende Wirkung im Rahmen einer Applikation im Freiland am Standort Straubing näher analysiert. Die in Tabelle 32 aufgeführten Rezepturen wurden getestet. Als Referenzmaterial wurde außerdem auch die bewährte Rezeptur 114k appliziert.

Tabelle 32: Übersicht über die im Freilandversuch am Standort Straubing getesteten Vorzugsvarianten

Rezeptur	Beschreibung
R208b	Apfeltrester als Füllstoff, ölbasiert
R250b	Wasserbasierte Rezeptur
R263n	Wasserbasierte Rezeptur

Die Applikation der unterschiedlichen Rezepturen erfolgte mit der Trichterspritze, wobei jede Rezeptur insgesamt dreifach wiederholt in Streifen von jeweils 3 m Länge appliziert wurden. Die Applikation der Streifen erfolgte am 17.04.2025. Abbildung 20 zeigt das fertige Sprühbild der drei Vorzugsvarianten.



Abbildung 20: Sprühbild der drei Vorzugsvarianten R 208b, 250b und 263n am Tag der Applikation am 17.04.2025 im Freiland am Standort Straubing

R 208b

Die Rezeptur 208b zeigte über die Zeit von April bis Juli eine geringe Haltbarkeit. Das Material war bereits nach vier Monaten kaum noch auf der Erdoberfläche zu erkennen (Abbildung 21). Auch die beikrautunterdrückende Wirkung des Materials war nur mäßig. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass es sich bei dem hauptsächlich in der Parzelle auftretenden Beikraut vor allem um Löwenzahn und Disteln handelt. Diese Pflanzen sind den Problemunkräutern zuzuordnen.

Zusammenfassend war sowohl die Witterungsbeständigkeit des Materials als auch die beikrautunterdrückende Wirkung im Vergleich zur Rezeptur 114k deutlich schlechter (Abbildung 21, Abbildung 24). Eine mögliche Erklärung hierfür könnte das Fehlen von Stärke in der Rezeptur sein. Stärke ist ein Polysaccharid und wird in der Lebensmittelchemie häufig als Verdickungsmittel eingesetzt. Dementsprechend könnte die Anwesenheit von Stärke die Gelbildung unterstützen und zu einer erhöhten Gelstabilität führen. Da durch den Ersatz durch Apfeltrester allerdings keine Stärke mehr in der Rezeptur enthalten ist, könnte dies eine mögliche Erklärung für die geringere Wirkung dieser Rezeptur sein.



Abbildung 21: Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials Rezeptur 208b mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025

R 250b

Auch die Rezeptur 250b zeigte im Vergleich zur Rezeptur 114k sowohl eine deutlich schlechtere Witterungsbeständigkeit als auch eine schlechtere Beikrautunterdrückung. Wie in Abbildung 22 zu erkennen ist, hatte sich das Material bis Anfang Juni fast vollständig zersetzt. Auch die beikrautunterdrückende Wirkung war im Juli kaum noch vorhanden. Die schlechtere Witterungsbeständigkeit des Materials beruht wahrscheinlich auf der hohen Wasserlöslichkeit des Gels. Diese macht das Gel deutlich anfälliger für Niederschläge als beispielsweise die ölhaltige Rezeptur 114k. Eventuell könnte die Zugabe von Füllstoffen wie Cellulose hier die Witterungsbeständigkeit des Materials verbessern.

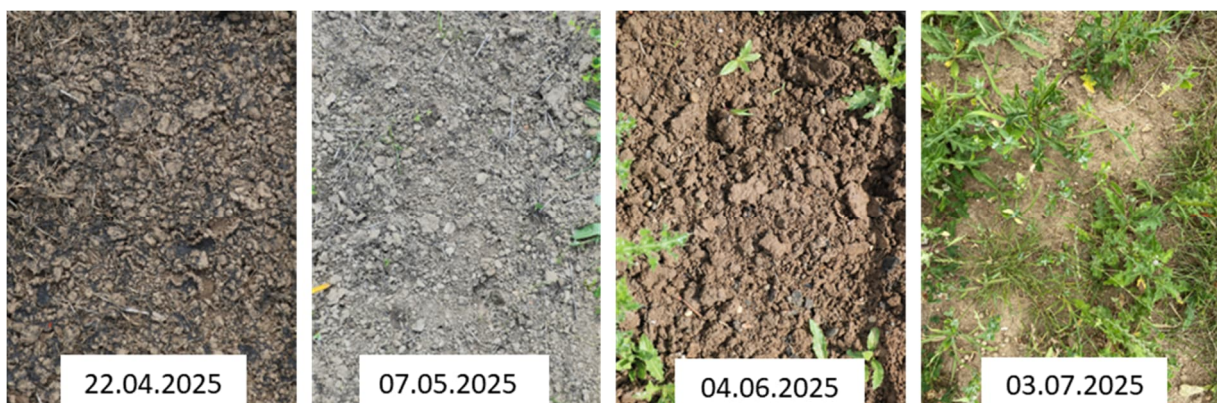


Abbildung 22: Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials Rezeptur 250b mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025

R 263n

Bei der Rezeptur 263n konnte im Freiland eine geringe Witterungsbeständigkeit des Materials beobachtet werden (Abbildung 23). Dennoch war die Beikrautunterdrückung im Vergleich zu den beiden anderen neuartigen Rezepturen etwas wirkungsvoller (Abbildung 23). Gegenüber der Rezeptur 114k zeigte sie jedoch eine geringere beikrautunterdrückende Wirkung. Eine mögliche Erklärung für die schlechte Witterungsbeständigkeit des Materials könnte erneut die hohe Wasserlöslichkeit der beiden Komponenten sein, die sich negativ auf die Stabilität gegenüber Niederschlägen auswirkt. Die leicht erhöhte beikrautunterdrückende Wirkung könnte auf den niedrigen pH-Wert des Gels zurückzuführen sein. Dies lässt sich dadurch erklären, dass eine der beiden Komponenten aus FeCl_3 besteht, welches in Wasser zu HCl hydrolysiert werden kann, wodurch die saure Umgebung im Gel entsteht. Damit zeigt die Lösung einen pH-Wert von circa 1 und senkt nach Vermischen auch den pH-Wert des polymerisierten Hydrogels. Eine saure Umgebung unter dem Mulchmaterial könnte die Keimung der an der Oberfläche liegenden Beikrautsamen gehemmt haben und damit den Aufgang dieser Unkräuter verhindert haben. In diesem Fall lässt sich der Wirkmechanismus jedoch nicht auf eine physikalische Barrierewirkung zurückführen. Darüber hinaus stellt der äußerst niedrige pH-Wert eine erhebliche Herausforderung für die Applikationstechnik dar, da alle Bauteile des Geräts wie beispielsweise Trichterspitze oder „Mulchsprayer Vegi“ eine hohe Säurebeständigkeit aufweisen müssen, um eine Beschädigung oder Funktionsstörung zu vermeiden.

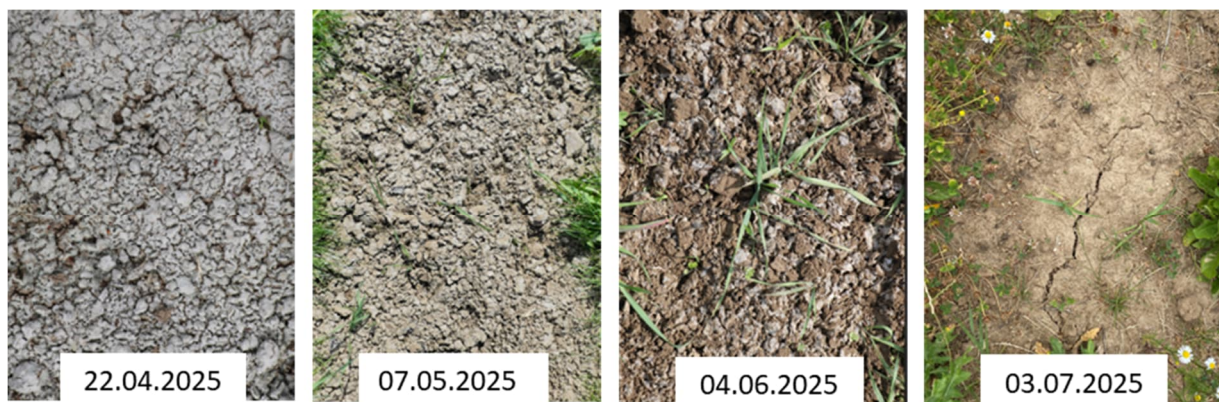


Abbildung 23: Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials Rezeptur 263n mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025

Vergleichsvariante – R 114k

Die herkömmliche LiquiMulch Rezeptur zeigte über den getesteten Versuchszeitraum von April bis Juli eine sehr gute Witterungsbeständigkeit und auch eine effektive Beikrautunterdrückung (Abbildung 24). Diese Ergebnisse sind allerdings kaum überraschend, da die beikrautunterdrückende Wirkung des Materials schon zahlreich gezeigt werden konnte (Kapitel 5.5.3 ff.).

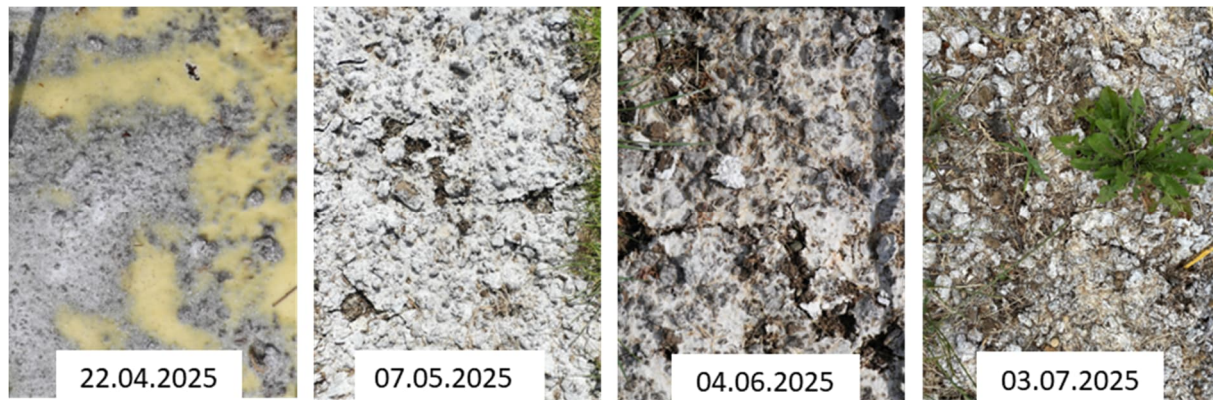


Abbildung 24: Witterungsbeständigkeit und Beikrautunterdrückung des Materials nach der Rezeptur 114k mit einer Schichtdicke von 5 mm über die Zeit von April bis Juli 2025

Zusammenfassend konnten drei vielversprechende neuartige Rezepturen entwickelt werden, deren grundsätzliche Eignung als Mulchmaterial allerdings noch weiterer Optimierung bedarf. Dies betrifft vor allem die Witterungsbeständigkeit und den beikrautunterdrückenden Effekt.

5.2 Ergebnisse der untersuchten Wechselwirkungen des Mulchmaterials mit der Umwelt

5.2.1 Abbaubarkeit des aufspritzbaren Mulchmaterials

Da das Mulchmaterial zukünftig als umweltfreundliche Alternative für Plastikmulchfolien im Gemüsebau zum Einsatz kommen soll und sich neben seinem beikrautunterdrückendem Effekt besonders durch seine biologische Abbaubarkeit auszeichnen soll, wurde auf diese Eigenschaft ein besonderes Augenmerk gelegt. Faktoren, die den Abbau des organischen Materials beeinflussen, sind vor allem Sauerstoff, Feuchtigkeit, Wärme und die Anwesenheit von Mikroorganismen. Dementsprechend macht es im Abbauverhalten einen Unterschied, ob sich das organische Material auf der Feldoberfläche befindet, oder ob das organische Material nach Bodeneinarbeitung unter der Erde weiter zersetzt wird. Bezüglich des Abbaus des Mulchmaterial wurden deshalb beide Szenarien analysiert.

5.2.1.1 Beständigkeit des Mulchmaterials auf der Feldoberfläche

Die Rückstandsanalyse des Mulchmaterials auf der Feldoberfläche erfolgte im Zuge der fotografischen Beikrautbonitur. Dabei konnte sowohl im Jahr 2023 als auch 2024 über die Zeit von vier Monaten eine Verfärbung des Materials von eierschalengelb hin zu einer Schwarzfärbung beobachtet werden. Wie in Abbildung 25 zu erkennen ist, wurde die Mulchschicht mit zunehmendem Alter spröder, wobei sich im Laufe der Zeit immer mehr Risse bildeten.

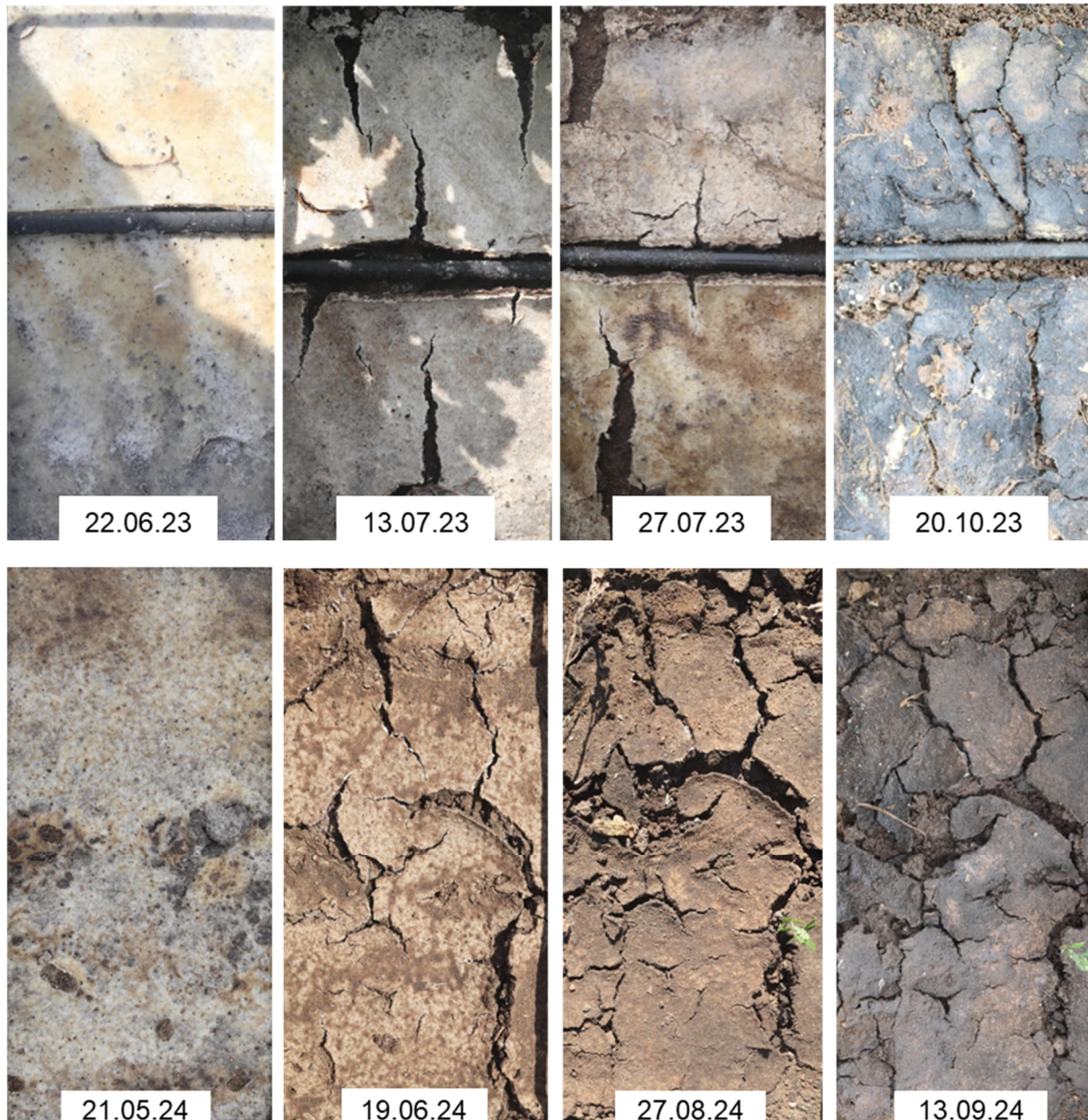


Abbildung 25: Boniturbilder eines Streifens der LiquiMulch 5 mm Variante der Parzelle 433 (oben), Versuch Zucchini im Zeitraum von Juni bis Ende Oktober im Jahr 202 und der LiquiMulch 4 mm Variante der Parzelle 521 (unten), Versuch Zucchini im Zeitraum von Mai bis Mitte September im Jahr 2024

Die Verfärbung und Veränderung der Beschaffenheit des Mulchmaterials ist höchstwahrscheinlich Teil des biologischen Abbaus, indem verschiedene Bodenmikroorganismen das organische Material überwiegend zur Energiegewinnung umsetzen. Auch die Witterung während der Vegetationsperiode hat einen Einfluss auf den Abbau des Mulchmaterials auf der Bodenoberfläche. Da das Mulchmaterial nur an der Unterseite großflächig mit Erde in Kontakt ist, ist davon auszugehen, dass der biologische Abbau durch Mikroorganismen auf der Bodenoberfläche langsamer einhergeht als bei vollständigem Erdeinschluss. Durch ihre Exposition an der Feldoberfläche spielen hier wahrscheinlich die Faktoren

Niederschlag und UV-Strahlung durch Sonneneinstrahlung eine große Rolle bei der Alterung und dem Abbau des Materials. Ein Vergleich der beiden Jahre 2023 und 2024 zeigt trotz deutlicher Witterungsunterschiede kaum Unterschiede bezüglich des Verfärbens und der Veränderung der Konsistenz (Abbildung 25).

5.2.1.2 Rückstände des Mulchmaterials nach Einarbeitung

Über einen Großteil der Versuchsperiode fand der Abbau des Mulchmaterials hauptsächlich auf der Feldoberfläche statt. Anschließend wurde das LiquiMulch nach seiner Funktionszeit mit dem Abschluss der Ernte in den Boden eingepflügt. Da davon auszugehen ist, dass nach Bodeneinschluss der biologische Abbau des Materials beschleunigt abläuft, wurden 48 Tage nach Bodenbearbeitung (22.10.2024) jeweils zwei Mischerdproben der Parzellen der drei verschiedenen Mulchvarianten 2 mm, 3 mm und 4 mm in den Parzellen des Kürbisversuchs auf Mulchrückstände untersucht. In allen Erdproben konnten Rückstände des LiquiMulchs gefunden werden. Dabei handelte es sich meist um 0,5 - 2 cm große Fragmente. Die gravimetrische Auswertung der gefundenen Mulchreste aus einer Erdprobe mit ursprünglich 2 kg Gesamtmasse resultierte in Rückstandsmengen von 1,64 g bis max. 9,44 g. Ein Zusammenhang zwischen Mulchschichtdicke und Menge an Rückständen in den Erdproben konnte nicht festgestellt werden. Das liegt wahrscheinlich daran, dass es aufgrund der Feldbearbeitung durch den Pflug zum Versatz der Mulchstreifen kam, was die Entnahme repräsentativer Erdproben erschwerte. Außerdem ist die gravimetrische Auswertung der Mulchreste aufgrund der hohen Verunreinigung der Fragmente mit Erdresten mit einem hohen Fehler behaftet. Nichtsdestotrotz gibt die Analyse der Mulchrückstände im Feld einen Einblick in die biologische Abbaubarkeit des Mulchmaterials, da die gefundenen Rückstände mengenmäßig sehr gering sind.

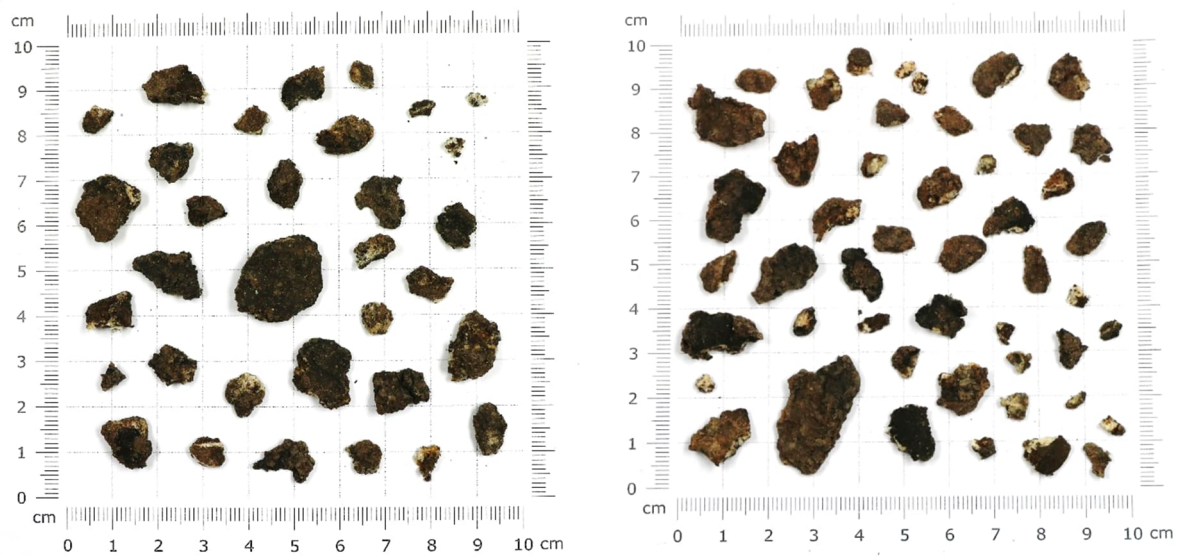


Abbildung 26: Rückstände des Mulchmaterials der Bodenprobe der LiquiMulch 2 mm Variante (links) und LiquiMulch 4 mm Variante (rechts) im Jahr 2024, 48 Tage nach Einarbeitung in den Boden

5.2.1.3 Biologischer Abbau des Mulchmaterials nach DIN EN ISO 17556

Neben der Erfassung des Abbaus des LiquiMulchs im Freiland, wurde der aerobe Abbau des Mulchmaterials auch mit einer Labormethode untersucht. In den letzten Jahren sind eine Vielzahl an unterschiedlichen Testverfahren für die biologische Abbaubarkeit entwickelt worden, wie beispielsweise die DIN EN ISO 17556 [21]. Da der aerobe Abbau des Mulchmaterials wie anfangs bereits beschrieben von vielen Faktoren beeinflusst wird, muss der im Labor ermittelte Abbauezeitraum nicht genau der Zeit des Abbaus in der Natur entsprechen. Nichtsdestotrotz können dadurch wichtige Erkenntnisse über die Fähigkeit des biologischen Abbaus des aufspritzbaren Mulchmaterials gewonnen werden. Für die Analyse des Abbaus des Mulchmaterials wurde eine, an die DIN EN ISO 17556 (Stand September 2019) angelehnte Untersuchungsmethode verwendet, die über die Messung der freigesetzten Menge an Kohlenstoffdioxid, den Abbau von kohlenstoffhaltigen Kunststoffen im Boden bestimmen lässt. Dabei wird das durch den Abbau freigesetzte CO_2 durch eine CO_2 -Falle, in diesem Fall einer Kaliumhydroxid-Lösung, aufgefangen und anschließend durch Titration mit Salzsäure quantifiziert. Dieses Verfahren ist für die Analyse CO_2 in Lösung weitverbreitet, wobei auch der Einsatz anderer Laugen wie Bariumhydroxid, oder Natronlauge in der Literatur zu finden ist [21]. Die dabei maximale Menge an CO_2 , die während des aeroben biologischen Abbaus im Versuchsaufbau aus 2,5 g Probemenge freigesetzt werden kann beträgt 3,06 g. Dabei handelt es sich um einen theoretischen Wert, denn die darin enthaltenen Kohlenstoffe werden nicht nur in CO_2 abgebaut, sondern können auch durch die Vermehrung von Bodenmikroorganismen und der damit verbundenen Entstehung von organischer Biomasse verbraucht werden. Für die Validierung der Analyse des biologischen Abbaus werden in der Literatur häufig Stärke oder

Cellulose als Referenzmaterialien eingesetzt, denn deren gute Abbaubarkeit ist bereits vielfach demonstriert worden [21].

Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, konnte über den zeitlichen Verlauf von 70 Tagen sowohl für das verwendete Referenzmaterial Stärke als auch Cellulose ein Abbau der Materialien beobachtet werden. Der prozentuale Abbau der beiden Materialien war in der Anfangsphase deutlich schneller im Vergleich zu den späteren Tagen. Dabei wurden innerhalb der ersten 30 Tage etwa 50 % der maximalen Menge an CO₂ der Stärke freigesetzt. Im Gegensatz dazu zeigte die mikrokristalline Cellulose einen etwas geringeren Abbau und erreichte erst nach 50 Tagen das gleiche Niveau. Der prozentuale Abbau beider Referenzmaterialien erreicht sein Plateau bei circa 50 %.

Dass es sich bei den beiden Referenzmaterialien Stärke und Cellulose um Materialien mit guter Abbaubarkeit handelt, wurden diese in der Literatur bereits mehrfach beschrieben. Dementsprechend werden sie auch in der DIN EN ISO 17556 Norm als Referenzmaterialien für die Überprüfung des Messaufbaus empfohlen [21].

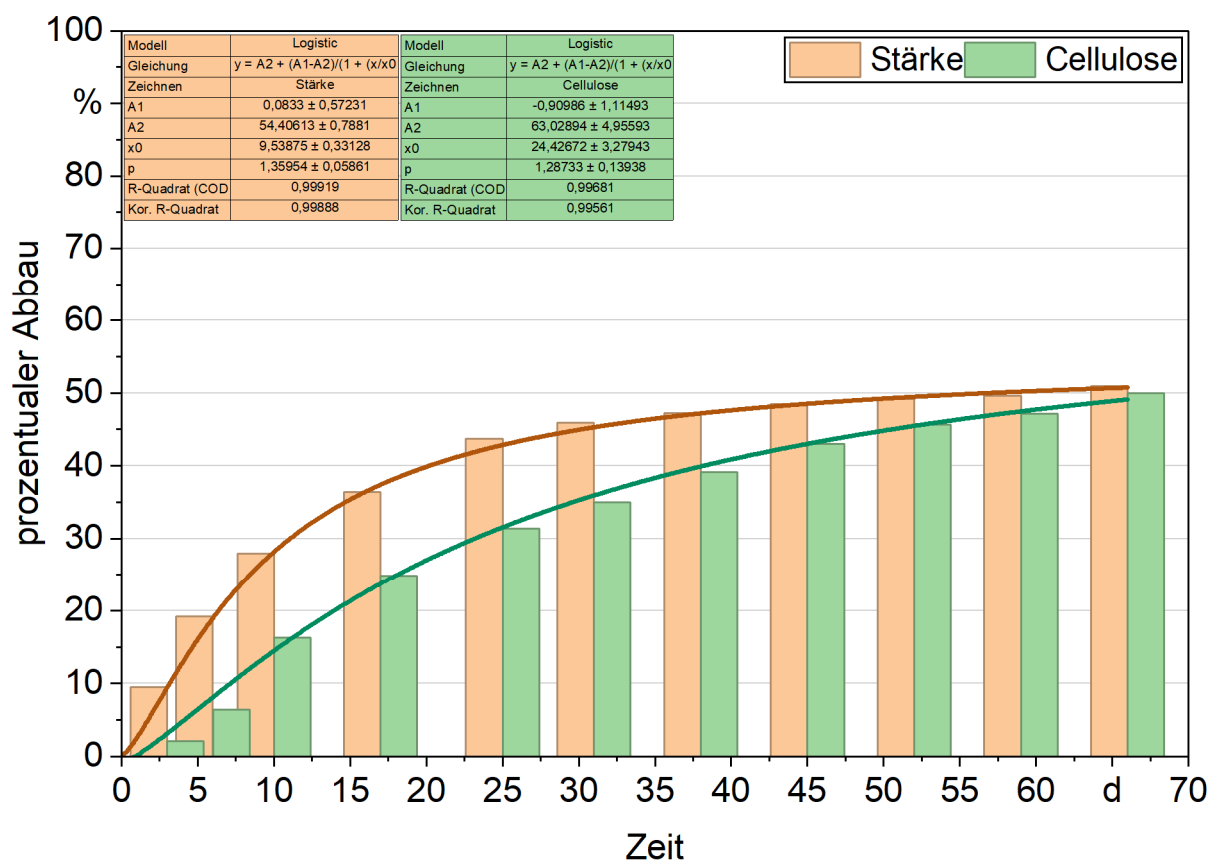


Abbildung 27: Prozentualer Abbau von jeweils 2,5 g der beiden Referenzmaterialien Stärke und mikrokristalliner Cellulose über die Zeit

Über den biologischen Abbau von Stärke ist bereits bekannt, dass es sich hierbei um einen asymptotischen Abbau der Polymere handelt. Das heißt, dass sich die Geschwindigkeit der Zersetzung im Verlauf der Zeit reduziert und sich einem minimalen Wert annähert,

sodass nach einer bestimmten Zeit kaum noch eine Zersetzung des Materials stattfindet [37]. Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, konnte auch beim Abbauersuch nach DIN EN ISO 17556 ein asymptotischer Kurvenverlauf für den Abbau von Stärke beobachtet werden. Außerdem konnte festgestellt werden, dass der Abbau des organischen Materials vor allem in der Anfangsphase verstärkt stattgefunden hat. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in der Literatur beschrieben, wobei sich der Abbau des Restmaterials nach der Anfangsphase über einen Zeitraum von Wochen bis hin zu Jahren erstrecken kann [56]. Nichtsdestotrotz konnten in der Literatur bereits deutlich höhere Abbauraten von Stärke erzielt werden. CHESHIRE ET AL. (1969) konnte einen fast vollständigen Abbau von Stärke nach bereits 35 Tagen beobachten [12]. Und auch die Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit von DEGLI-INNOCENTI ET AL. (1998) unter Verwendung einer Methode nach ASTM D5338-92, zeigte einen Abbau von 100 % nach 44 Tagen [14]. Mit einem relativen Anteil von 50 % der maximalen Menge an freisetzbaren CO₂ innerhalb 70 Tagen, liegen die Ergebnisse dieser Tests darunter. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnte die eingesetzte Stärke-Konzentration sein, die in den Untersuchungen der biologischen Abbaubarkeit nach DIN EN ISO 17556 eingesetzt wurden. Nach dieser Prüfmethode wird empfohlen, zwischen 100 und 300 mg Prüfmateriel auf 100 bis 300 g Referenzerde aufzutragen, was einem relativen Anteil von 0,1 % Prüfmateriel entspricht. Wird die Bestimmung des Abbaus, wie in den durchgeführten Tests, über die Bestimmung des sich entwickelten CO₂ durchgeführt, wird in der Norm ein Probenanteil von 1,25 % empfohlen, um den Unterschied zwischen der CO₂-Produktion durch den Abbau von Prüfmateriel und Blindwert zu erhöhen [21]. Laut GERMAN ET AL. (2011) ist der prozentuale Abbau von Stärke jedoch stark abhängig von der Konzentration, unabhängig davon, ob die Messung im Labor oder *in situ* erfolgt. Bei einem relativen Stärkegehalt von weniger als 10 % in der bodenorganischen Substanz kann der Abbau von Stärke demzufolge um bis zu 50 % abnehmen [33]. Mit einem Anteil von 1,25 % an eingesetzter Stärke zur bodenorganischen Substanz, liegt die verwendete Menge an Stärke damit deutlich unter dem von GERMAN ET AL. (2011) empfohlenen Wert von 10 %. Dies könnte den über die Origin®-Software berechnete geringen prozentualen Abbau von nur etwa maximal $54,41 \pm 0,79$ % erklären. Nach GERMAN ET AL. (2011) könnte der verminderte Abbau der Stärke auf die enzymatische Aktivität zurückzuführen sein. Im Vergleich zum metabolischen Energieertrag der Mikroorganismen erscheint die energetische Kosten-Nutzen-Bilanz für die Synthese extrazellulärer Enzyme ungünstig, da die für die Enzymproduktion aufgewendete Energie potenziell höher sein könnte als der daraus resultierende energetische Nutzen. Folglich ist die ökonomische Rentabilität der extrazellulären Enzymproduktion unter diesen Bedingungen fraglich [33].

Neben Stärke wurde auch die Abbaubarkeit von Cellulose bereits umfangreich in (Meeres-) Wasser oder im Erdboden untersucht. Auch Cellulose gilt als sich schnell abbauendes Biopolymer und wird dementsprechend in zahlreichen ISO-Normen als Referenzmaterial empfohlen. Dabei gilt als Kriterium zur Validierung der jeweiligen Abbau-Methode ein Mindestabbau von Cellulose von bis 60 % oder größer innerhalb von 6 Monaten [37]. Wie in Abbildung 27 zu erkennen ist, wurde innerhalb von 70 Tagen bereits ein prozentualer Abbau von circa 50 % erreicht. Die rechnerische Anpassung mittels Origin®-Software

prognostiziert einen maximalen prozentualen Abbau von $63,03 \pm 4,95$ % womit die Messmethode des biologischen Abbaus über 60 % liegt und damit als validiert gilt.

Zusammenfassend konnte über den Nachweis des Abbaus der beiden Referenzmaterialien Stärke und vor allem mikrokristalliner Cellulose innerhalb von 70 Tagen die Funktionalität des Versuchsaufbaus validiert werden.

Auch das Mulchmaterial zeigte über den Versuchszeitraum einen stetigen asymptotischen Abbau und war nach 100 Tagen bis zu $75 \pm 22,59$ % abgebaut (Abbildung 28). Der prozentuale Abbau des Mulchmaterials erreichte nach circa 75 Tagen ein Plateau. Damit konnte mit der Analyse der aeroben Abbaubarkeit das Potenzial des LiquiMulchs zum biologischen Abbau gezeigt werden. Da die Versuche unter standardisierten Bedingungen, wie der Verwendung einer Referenzerde und dem Ausschluss von Witterungseinflüssen, wie UV-Strahlung, Regenereignissen oder Temperaturschwankungen durchgeführt werden, kann der im Labormaßstab ermittelte prozentuale Abbau, von dem im Freilandversuch abweichen.

Die im LiquiMulch enthaltenen Inhaltsstoffe bestehen grundsätzlich aus biogenen organischen Materialien. Wie bereits beschrieben ist die Abbaubarkeit von Stärke und Cellulose in der Literatur bekannt und bei der Validierung des Versuchsaufbaus durch eigene Tests bestätigt worden. Aber auch für die übrigen Inhaltsstoffe des LiquiMulchs ist das Potenzial zum biologischen Abbau bereits erforscht worden. Beispielsweise konnte die biologische Abbaubarkeit von Natriumbenzoat durch MARTIN UND HAIDER ET AL. (1986) gezeigt werden. In einem lehmigen Sandboden betrug die Mineralisierungsrate von Natriumbenzoat nach 28 Wochen 84 % [50]. Auch die biologische Abbaubarkeit von Rapsöl ist im Zuge der Entwicklung von umweltfreundlichen Rapsölschmierstoffen bereits umfassend untersucht worden, wobei sich gezeigt hat, dass es sich um ein Pflanzenöl mit schneller Abbaubarkeit und geringer Ökotoxizität handelt [58]. Neben Rapsöl verfügt auch das Geliermittel Natriumalginat über das Potenzial zum biologischen Abbau und wird häufig als umweltfreundliche Alternative in der Kunststoffforschung diskutiert [46]. Auch für Sorbitol und Glycerin wurde die biologische Abbaubarkeit bereits untersucht. Beide Substanzen zeigten einen biologischen Abbau. Allerdings ist der Abbau beispielsweise im Vergleich zu reiner Stärke etwas geringer [52][43]. Bei den beiden Inhaltsstoffen Natriumphosphat und Calciumsulfat handelt es sich um Salze, welche im Boden natürlicherweise vorkommen. Salze und deren entsprechenden Ionen werden häufig von den im Boden vorkommenden Mikroorganismen verstoffwechselt. Allerdings entsprechen diese Prozesse nicht der biologischen Abbaubarkeit im klassischen Sinne. Zusammenfassend ist deshalb die Beobachtung des biologischen Abbaus der unterschiedlichen Materialien im Verbund kaum überraschend.

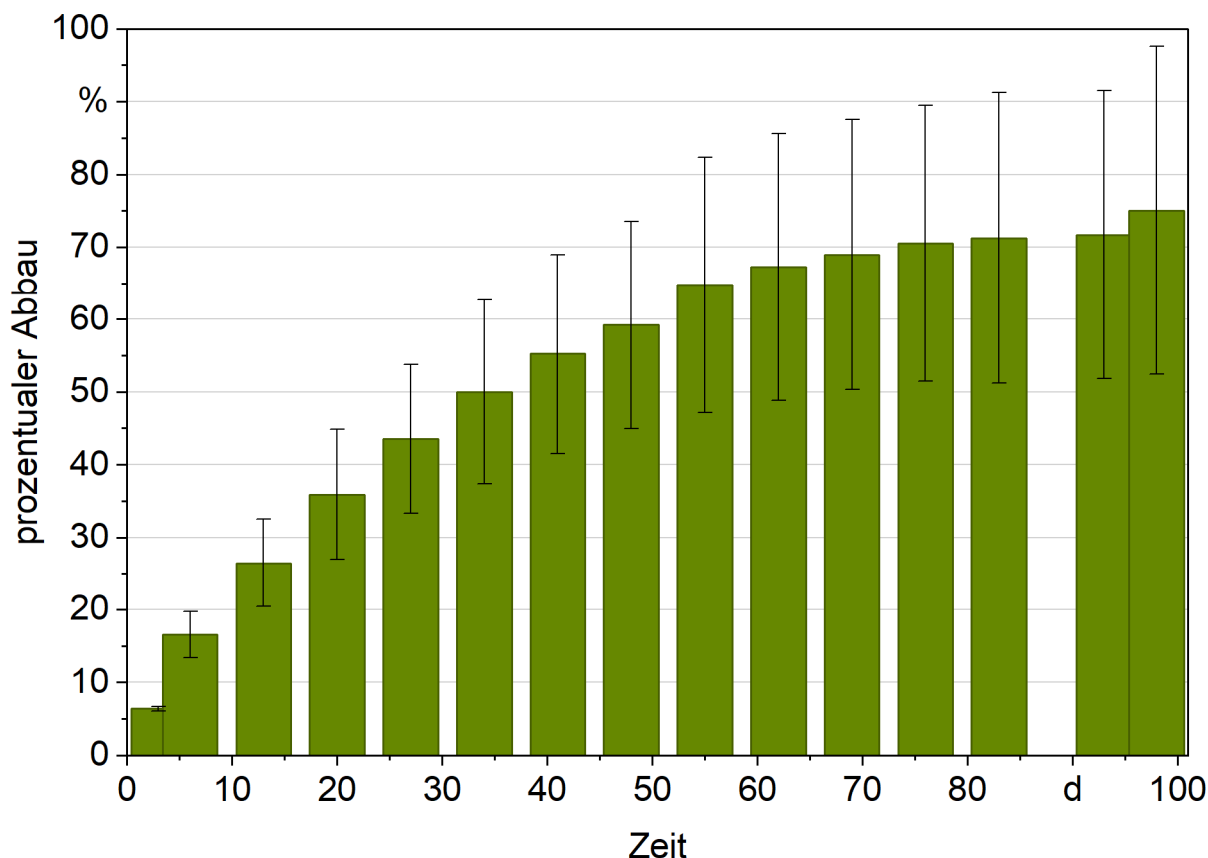


Abbildung 28: Prozentualer Abbau von 2,5 g Mulchmaterial über die Zeit (MW $\pm$ SEM; $n=2$)

Dass der prozentuale Abbau des Mulchmaterials höher ist als die der beiden getesteten Reinstoffe, könnte eventuell durch synergistische Effekte der Inhaltsstoffe verursacht werden, wodurch der Abbau des Mulchmaterials eventuell begünstigt wird. Eine erhöhte Vielfalt an unterschiedlichen organischen Substraten kann die enzymatische Aktivität der Mikroorganismen fördern, wodurch der metabolische Energieertrag im Vergleich zu den Produktionskosten für extrazelluläre Enzyme attraktiver wird. Dies steht im Gegensatz zu Situationen, in denen beispielsweise nur Stärke als Substrat vorhanden ist, was die Effizienz der Enzymproduktion und den daraus resultierenden Energiegewinn möglicherweise einschränkt [33]. Zusammenfassend wurde der biologische Abbau des LiquiMulchs nach der Methode DIN EN ISO 17556 nachgewiesen.

5.2.1.4 Einfluss des Mulchmaterials auf die bodenchemischen und bodenbiologischen Eigenschaften

5.2.1.4.1 Einfluss des Mulchmaterials auf den Gehalt von mineralisiertem Stickstoff

Wie im Kapitel 3.4 beschrieben spielt der Gehalt an mineralisiertem Stickstoff für die Bodenbiologie eine zentrale Rolle. Deshalb wurde die Stickstoffmineralisierung auch in den durchgeführten Feldversuchen über das Ziehen von Bodenproben in 30 cm oder 60 cm Tiefe regelmäßig analysiert. Die Analyse des mineralischen Stickstoffs in den

Versuchspartzellen der Zucchini über die beiden Jahre 2023 und 2024 zeigte, dass es in im Laufe der Vegetationsperiode zu einer Abnahme des mineralischen Stickstoffs aufgrund des Verbrauchs durch die Kulturpflanze, z.B. wegen Wachstum kam. In beiden Jahren konnte man allerdings zu jeweils beiden Zeitpunkten erkennen, dass der Stickstoffgehalt unter dem Mulchmaterial geringer war als in den beiden Vergleichsvarianten (Abbildung 29). Es ist zu beachten, dass die Stickstoffwerte im Jahr 2024 aufgrund der mehrmaligen Starkregenereignisse kulturunabhängig sehr niedrig waren. Auch wenn dieser Unterschied zwischen den Messwerten der unterschiedlichen Varianten nur minimal ist, könnte dennoch die Anwesenheit des Mulchmaterials dafür verantwortlich sein.

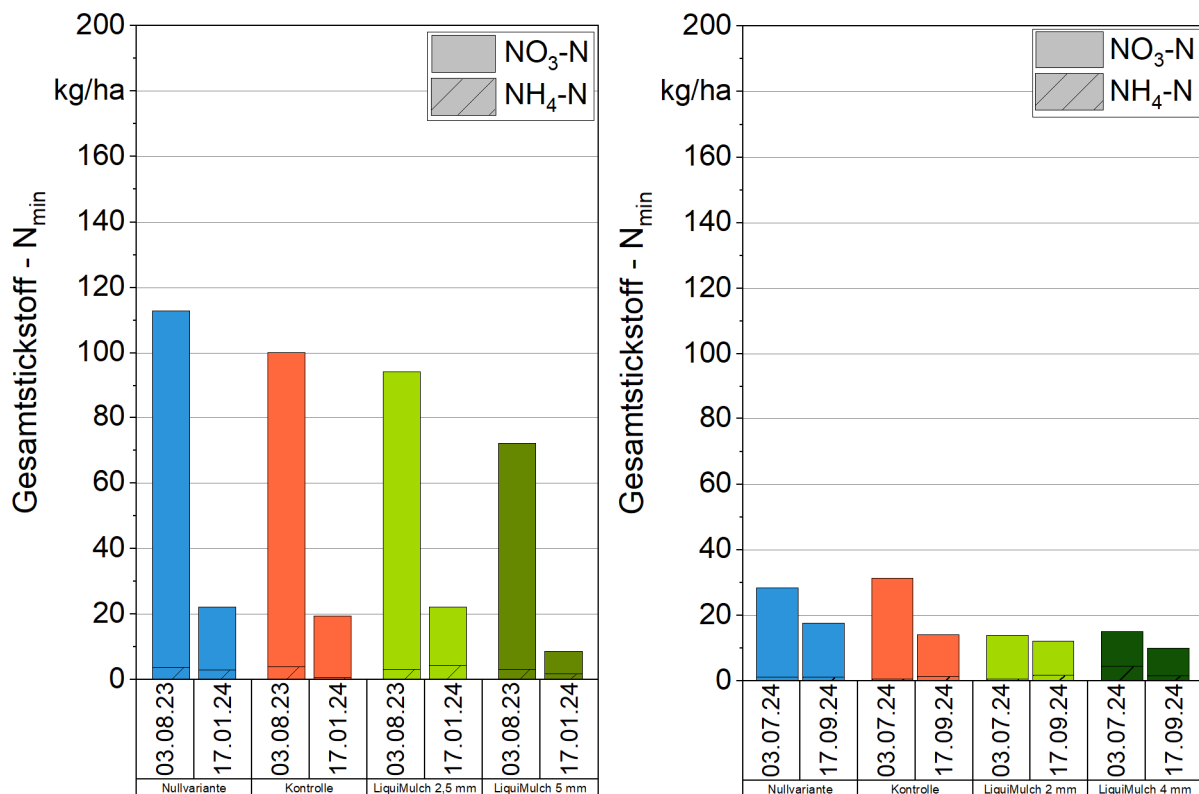


Abbildung 29: Gesamtstickstoff zusammengesetzt aus Ammonium und Nitrat in den Parzellen des Zucchini-Versuchs zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in der Vegetationsperiode 2023 (links) und 2024 (rechts), Erdprobentiefe 30 cm

Ein ähnliches Bild zeichnete sich auch in den Parzellen des Einlegegurkenversuchs ab. Hier war der Unterschied zwischen den Varianten Kontrolle, Nullvariante und den beiden LiquiMulch-Schichten deutlicher ausgeprägter (Abbildung 30). Basierend auf den Daten der Gurke, vor allem im Hinblick auf die Messwerte des Jahres 2023, deuten die Ergebnisse auch hier an, dass das Mulchmaterial einen Einfluss auf die Stickstoffmineralisierung haben könnte.

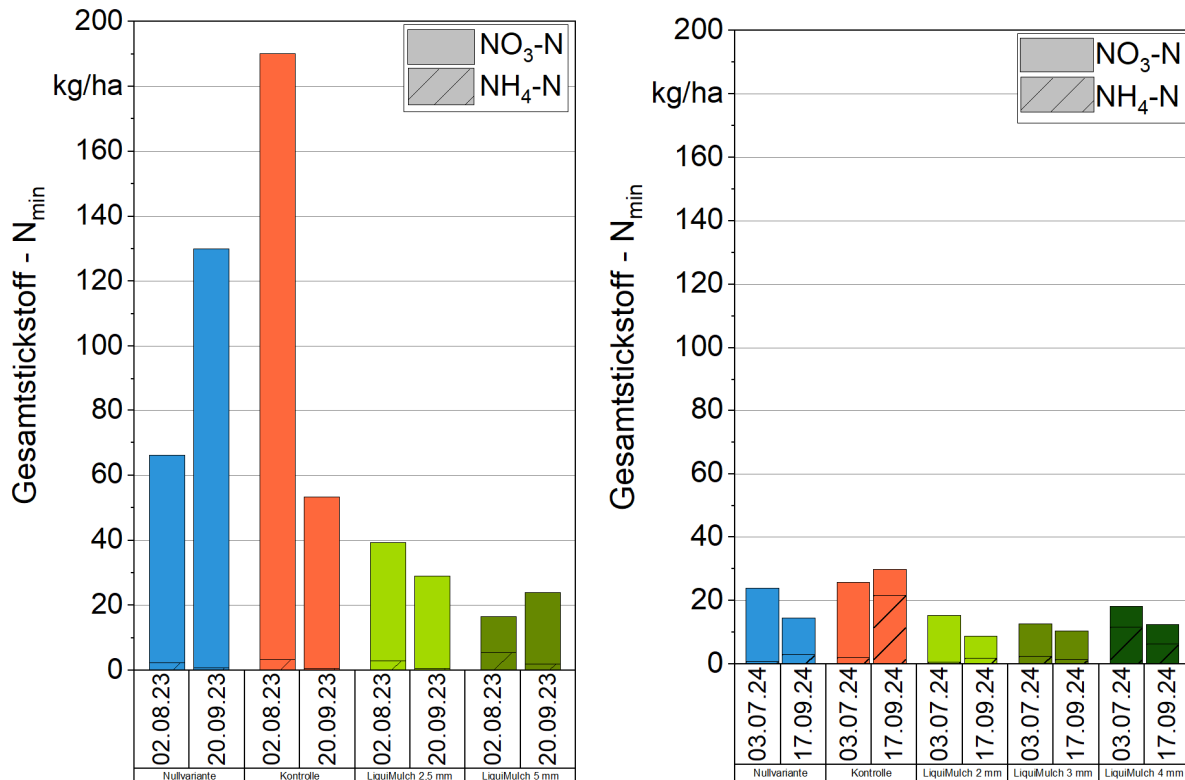


Abbildung 30: Gesamtstickstoff zusammengesetzt aus Ammonium und Nitrat in den Parzellen der Einlegegurke zu zwei verschiedenen Zeitpunkten in der Vegetationsperiode 2023 (links) und 2024 (rechts), Erdprobentiefe 30 cm

Als physikalische Barriere greift das Mulchmaterial in den Bodenwasserhaushalt ein und führt dazu, dass der Boden langsamer abtrocknet. Während dieser Effekt für die Bewässerung von Vorteil ist, könnte sich die erhöhte Feuchtigkeit negativ auf die Stickstoffmineralisierung auswirken.

Ein weiterer Grund für die verminderten Stickstoffgehalte im Boden könnte zudem damit zusammenhängen, dass das Mulchmaterial in den Stickstoffkreislauf im Boden eingreift, indem es als physikalische Barriere den Gasaustausch stört, sodass eine Verstoffwechslung des organischen Stickstoffdüngers und NH₄⁺ durch die Bodenbakterien Nitrobacter und Nitrosomonas nicht mehr ungehindert stattfinden kann. Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens ABOWPrax [45] haben allerdings gezeigt, dass das Mulchmaterial den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Boden nicht beeinträchtigt und somit kein gasdichter Abschluss entsteht. Dementsprechend kann eine Interaktion des Mulchmaterials im Gasaustausch des Bodens als Ursache ausgeschlossen werden.

Da das Mulchmaterial chemisch betrachtet aus circa 33,5 % Kohlenstoff-Atomen besteht, könnte der erhöhte Eintrag von Kohlenstoff einen Einfluss auf die Stickstoffmineralisierung bewirken. Durch einen gesteigerten Gehalt von Kohlenstoff könnte das Verhältnis zwischen Kohlenstoff und Stickstoff im Boden, dass bei gesunden Böden bei < 25 liegen sollte, (C:N - Verhältnis) negativ beeinflusst sein. Gemäß JANSSEN ET AL. (1996) führt ein erhöhtes C:N - Verhältnis im Ausgangssubstrat, im Vergleich zum Verhältnis der Mikroben

dazu, dass die Stickstoffmineralisierung eingeschränkt wird. Unter diesen Umständen wird von den Mikroben vor allem Kohlenstoff verstoffwechselt und zwar solange, bis das C:N - Verhältnis im Substrat an das Verhältnis der Mikroben angepasst ist. Erst wenn das C:N - Verhältnis ausgeglichen ist, findet wieder eine stärkere Mineralisierung von Stickstoff statt [42]. Daraus könnte abgeleitet werden, dass die beobachteten niedrigen Stickstoffwerte auf einer verminderten Stickstoffaufnahme und -freisetzung durch die Bakterien basieren könnten, was durch das hohe C:N - Verhältnis begünstigt werden würde. Dass organischer Mulch einen Einfluss auf die Stickstoffmineralisierung haben kann, ist bereits in der Literatur bekannt. Beispielsweise konnte NIGGLI ET AL. (1990) nach dem Einsatz eines Strohmulchs verminderte $N_{\min}$ -Werte beobachten [53]. Dennoch hatten die verminderten Stickstoffgehalte im Boden keine Einflüsse auf die Nährstoffversorgung der Pflanzen.

Bei der Bewertung des mineralischen Stickstoff-Gehalts für die Vegetationsperiode 2024 müssen aber zwangsweise die hohen Niederschlagsmengen beachtet werden, die zu einer Auswaschung des NO_3^- geführt haben könnten. Dies würde auch erklären, warum die Werte im Vergleich zum Vorjahr erheblich geringer sind. Aufgrund der Datenlage ist es nicht möglich, ein abschließendes Fazit im Hinblick auf die Beeinflussung der Stickstoffmineralisierung durch das Mulchmaterial zu ziehen. Außerdem müssten die Feldversuche über mehrere Jahre immer auf derselben Fläche durchgeführt werden um abschätzen zu können, ob es sich hierbei nur um ein kurzfristiges Phänomen handelt, oder ob die geringen Stickstoffgehalte langfristig im Boden vorzufinden sind.

5.2.1.4.2 Auswirkung des Mulchmaterials auf den pH-Wert des Bodens

Durch den biologischen Abbau und die Zersetzung des Mulchmaterials im Verlauf der Zeit können sich potenziell Veränderungen des Boden-pH-Werts ergeben. Daher wurde die Entwicklung des pH-Werts im Boden in den Versuchsvarianten Nullvariante, Kontrolle sowie drei verschiedene LiquiMulch-Varianten (2, 4 und 6 mm) über die Zeit untersucht. Die Untersuchung erfolgte in Anlehnung an die DIN EN ISO 10390 [22]. Wie in Abbildung 31 dargestellt ist, zeigte sich zu den beiden Zeitpunkten kein Unterschied im Boden-pH-Wert zwischen den Varianten. Die Schwankungen des pH-Werts über die Zeit unterscheiden sich unter den verschiedenen Varianten nicht. Dies deutet darauf hin, dass der Abbau des Mulchmaterials mit hoher Wahrscheinlichkeit keinen negativen Einfluss auf den pH-Wert des Bodens hat.

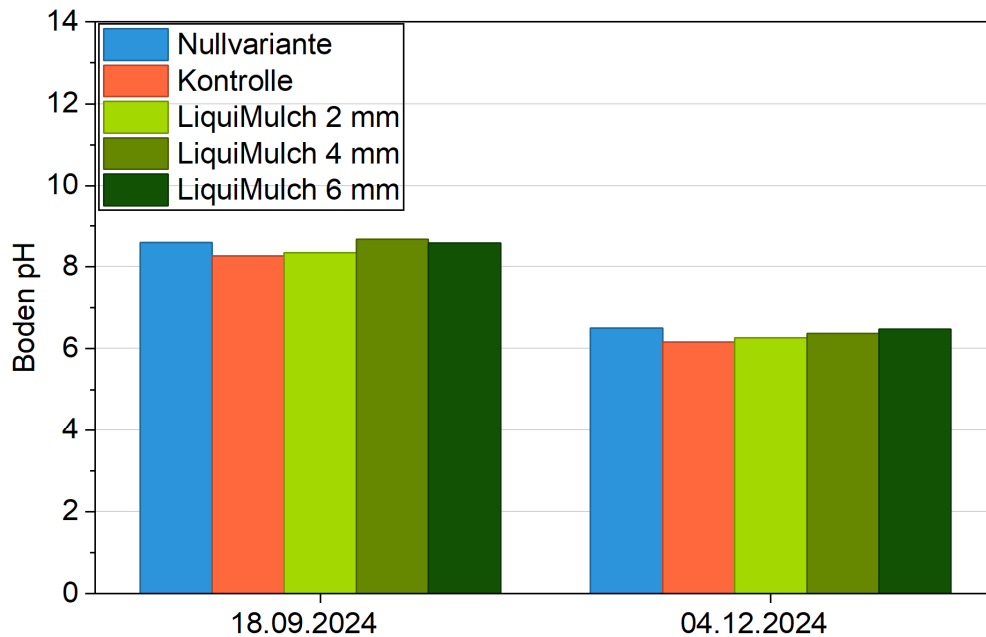


Abbildung 31: pH-Werte verschiedener Bodenproben zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Applikation des Mulchmaterials (MW; n=3)

5.2.2 Einfluss des Mulchmaterials auf die Regenwurmpopulation

Regenwürmer im Boden gelten als Indikator für einen gesunden Ackerboden. Sie mischen verrottendes organisches Material in den Boden und können auf der Feldoberfläche Erntestereste, Gülle, Mist oder Mulch in den Boden eintragen. Dieses Verhalten könnte sich auch positiv auf den Abbau des Mulchmaterials auswirken, der sich wie unter Kapitel 5.2.1 beschrieben unterirdisch deutlich schneller ereignet als auf der Feldoberfläche. Wie in Abbildung 32 zu erkennen ist, weisen Kothäufchen auf dem Mulchmaterial auf die Anwesenheit von Regenwürmern in den LiquiMulch Parzellen hin.



Abbildung 32: Regenwürmer (markiert durch rote Pfeile) auf bzw. unter dem Mulchmaterial und von Regenwürmern stammende Kothäufchen (markiert durch weiße Pfeile)

Die Regenwurmbonitur wurde im Versuchsjahr 2023 als auch 2024 in verschiedenen Parzellen unterschiedlicher Kulturpflanzen durchgeführt. In beiden Versuchsjahren konnten trotz unterschiedlicher Witterungsbedingungen (vgl. Kapitel 5.5.1) Regenwürmer in den Versuchsparzellen gefunden werden. Dabei war die Anzahl an Individuen pro Quadratmeter im Vergleich zur Nullvariante und Kontrolle gleich groß oder sogar größer (Abbildung 33). Dementsprechend kann eine negative Wechselwirkung zwischen der Regenwurmpopulation und dem Mulchmaterial ausgeschlossen werden. Dieses Phänomen war unabhängig von der applizierten Schichtdicke. Auch bei der Analyse der Masse der Regenwürmer pro Quadratmeter konnte dieses Ergebnis reproduziert werden. Auffällig ist, dass im Jahr 2023 die Regenwurmpopulation unter dem Mulchmaterial signifikant höher war als im Boden der Parzellen der Kontrolle und der Nullvariante. Gründe für die erhöhte Anzahl an Regenwürmern in den Parzellen der LiquiMulch Varianten könnte möglicherweise die höhere Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial sein. Obwohl die Witterungsbedingungen im Jahr 2023 eher trocken waren, war die Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial aufgrund intensiver Bewässerung über eine Tröpfchenbewässerung in einer Sättigung und damit wahrscheinlich attraktiv für Regenwürmer.

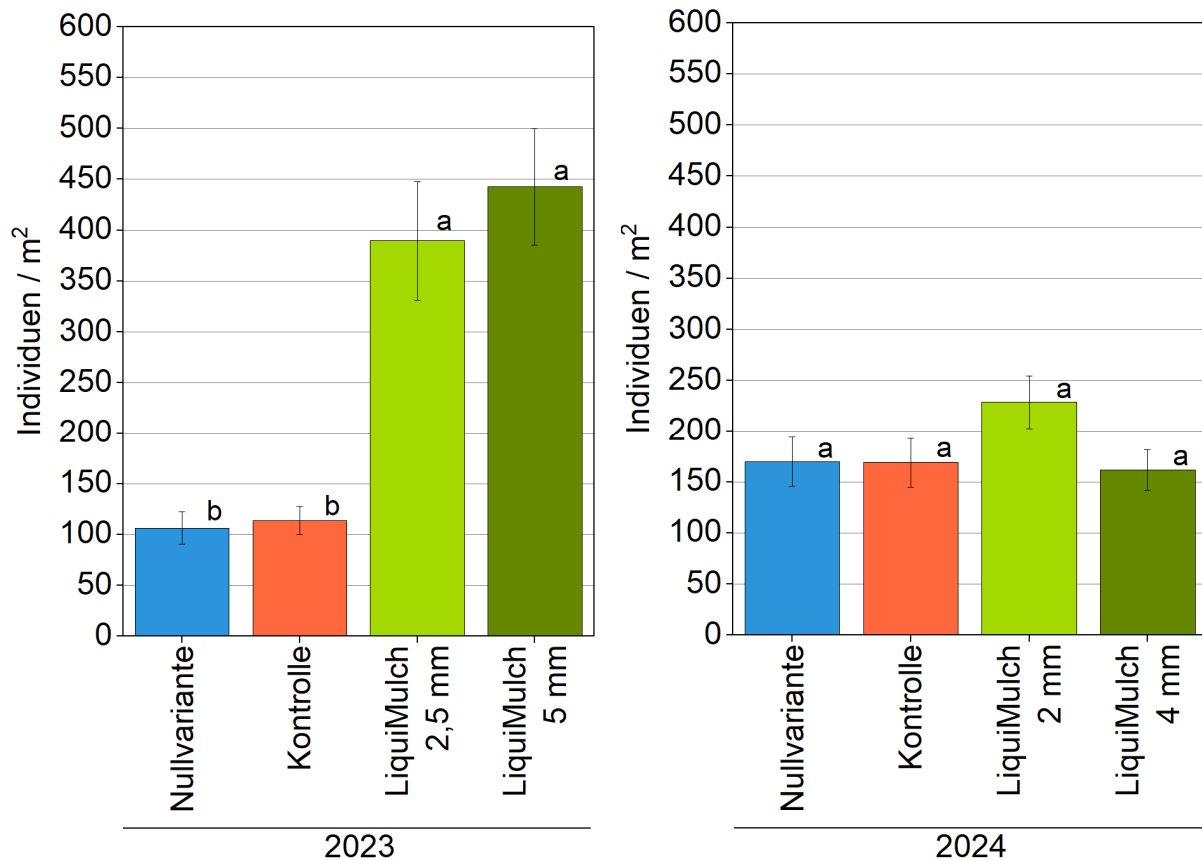


Abbildung 33: Individuen pro m² der Regenwurmbonitur in den unterschiedlichen Versuchspartzen der Versuchsjahre 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n=8$)

5.2.3 Einfluss des Mulchmaterials auf den Wasserhaushalt

Im Hinblick auf den Klimawandel gewinnt die Verfügbarkeit von Wasser zunehmend an Bedeutung. Daher wird der effiziente Einsatz und die Einsparung von Wasser für die Landwirtschaft in Zukunft eine zentrale Rolle spielen. Herkömmliche Mulchfolien wirken neben der Beikrautunterdrückung auch als Verdunstungsschutz, die den Wasserverlust des Bodens reduziert und somit dazu beiträgt, dass die Wasserhaltefähigkeit des Bodens verbessert wird [57]. Da es sich bei LiquiMulch, wie bei der herkömmlichen Mulchfolie um eine physikalische Barriere für das Beikrautmanagement handelt, wurde das neuartige Mulchmaterial auch auf seine Auswirkungen auf den Wasserhaushalt im Boden überprüft.

Für die Evaluierung des Einflusses des Mulchmaterials auf den Wasserhaushalt werden beispielhaft Daten aus dem Versuchsjahr 2025 herangezogen. Die in den Versuchsjahren 2023 und 2024 erhobenen Daten zum Wasserhaushalt des Bodens unter dem Mulchmaterial, werden im Folgenden nicht näher beleuchtet.

Im Versuchsjahr 2025 zeigten die beiden LiquiMulch-Varianten mit einer Schichtdicke von 3 mm und 5 mm einen vergleichbaren Effekt auf den Wasserhaushalt wie in der Kontrolle, bei der eine Folie ausgelegt worden war. Wie in Abbildung 34 zu erkennen, war die relative

Bodenfeuchte unter der Mulchfolie sowie unter dem LiquiMulch im Mai und im Juni im idealen Bereich zwischen 25 und 35 %. Die eingesetzte Bewässerungsmenge für diese Varianten war sowohl im Mai während der Keimphase als auch im Juni während des Pflanzenwachstums annähernd gleich. Im Vergleich dazu zeigte die Nullvariante, bei der keine Bodenabdeckung verwendet wurde, eine geringere Bodenfeuchte. Im Mai lag die Bodenfeuchte der Nullvariante zwar nahe am idealen Feuchtigkeitsbereich, jedoch war hierfür eine erhöhte Bewässerungsmenge erforderlich (Abbildung 34). Im Juni wurden alle vier Varianten mit einem ähnlichen Bewässerungsvolumen bewässert, was sich jedoch nachteilig auf die Bodenfeuchte der Nullvariante auswirkte und zu einer reduzierten Bodenfeuchte führte.

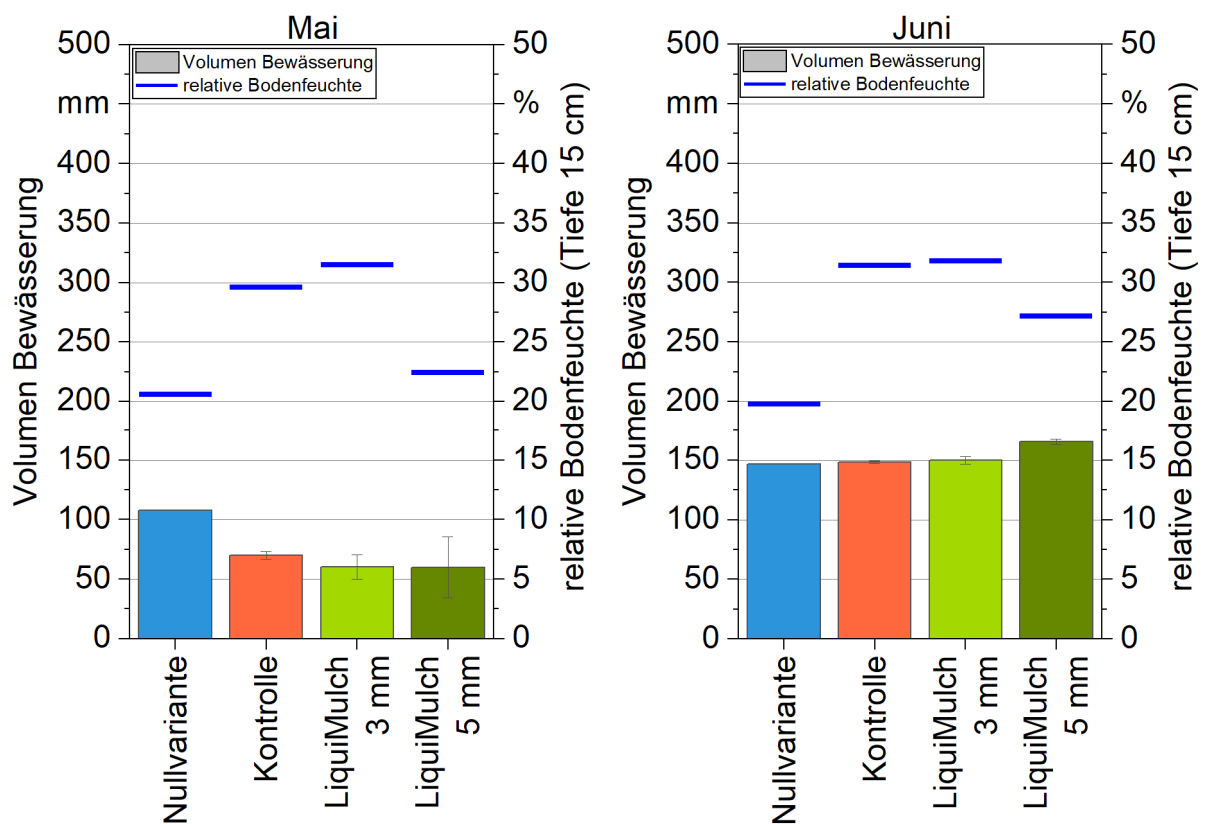


Abbildung 34: Vergleich des Bewässerungsvolumens in mm und der relativen Bodenfeuchte in % in 15 cm Tiefe für die vier unterschiedlichen Versuchsvarianten für den Monat Mai (links) und Juni (rechts) (MW $\pm$ SEM, n=3)

Eine geringere Bodenfeuchte in den Parzellen der Nullvariante im Vergleich zu den Mulch-Varianten Folie und LiquiMulch könnte mit dem zusätzlichen Wasserbedarf des aufwachsenden Beikrauts zusammenhängen. Je mehr störende Beikräuter, umso mehr Feuchtigkeit wird dem Boden entzogen. Die Beikräuter stehen in direkter Konkurrenz mit der Kulturpflanze um Wasser [48]. Aufgrund der Beikrautunterdrückung durch die beiden Mulch-Varianten Folie und LiquiMulch kann dieser Wettbewerb unterbunden und eine bessere Versorgung der Kulturpflanze mit Wasser sichergestellt werden.

Wie oben bereits erwähnt könnte sich aber auch die physikalische Barrierewirkung durch die beiden Mulchmaterialien positiv auf den Bodenwasserhaushalt auswirken. Dabei könnte die erhöhte Bodenfeuchte des LiquiMulchs bei einer Schichtdicke von 3 mm und 5 mm auf seine Wirkung als Verdunstungsschutz zurückzuführen sein. Indem die Evaporation des Wassers durch die Mulchauflage herabgesetzt ist, bleibt mehr Wasser im Boden zurück und somit der Pflanze zur Verfügung. Folglich könnte sich auch eine Reduzierung des Bewässerungsaufwands während der Vegetationsperiode ergeben, ohne dass es zu einer Abnahme der Bodenfeuchte kommt. Die Effekte auf den Wasserhaushalt der beiden LiquiMulch-Varianten ähnelten denen herkömmlicher Plastikmulchfolien. Diese wurden in der Literatur bereits vielfach als evaporationshemmend beschrieben und können daher als Referenz herangezogen werden [57][54].

Ein Verdunstungsschutz des Mulchmaterials ist allerdings nur von Vorteil, wenn die Feldoberfläche durch Ausbringung des LiquiMulchs nicht versiegelt wird. Dementsprechend wurde über das Monitoring der Bodenfeuchte auch analysiert, inwiefern Niederschläge wieder in den Boden eindringen können. Wie in Abbildung 35 zu erkennen ist, kam es nach größeren Niederschlägen (rot hinterlegt) zum Anstieg der relativen Bodenfeuchte in allen Varianten. Am meisten Wasser wurde dabei in der Variante LiquiMulch 3 mm vom Boden aufgenommen. Die Wasseraufnahmefähigkeit des Mulchmaterials mit einer Schichtdicke von 5 mm war vergleichbar zur Kontrolle.

Die größere Wasseraufnahmefähigkeit der dünneren Mulchschicht steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit der Schichtdicke. Umso dicker das Mulchmaterial auf der Erdoberfläche ausliegt, umso stärker wird der Niederschlag am Versickern in den Boden gehindert. Da das Mulchmaterial allerdings nur in Streifen appliziert wird, sollte jederzeit gewährleistet sein, dass genügend Wasser in das Erdreich eindringen kann, damit die Wasserversorgung der Kulturpflanzen sichergestellt ist. Dementsprechend kann ein versiegelnder Effekt durch die Applikation des Mulchmaterials als gering eingestuft werden.

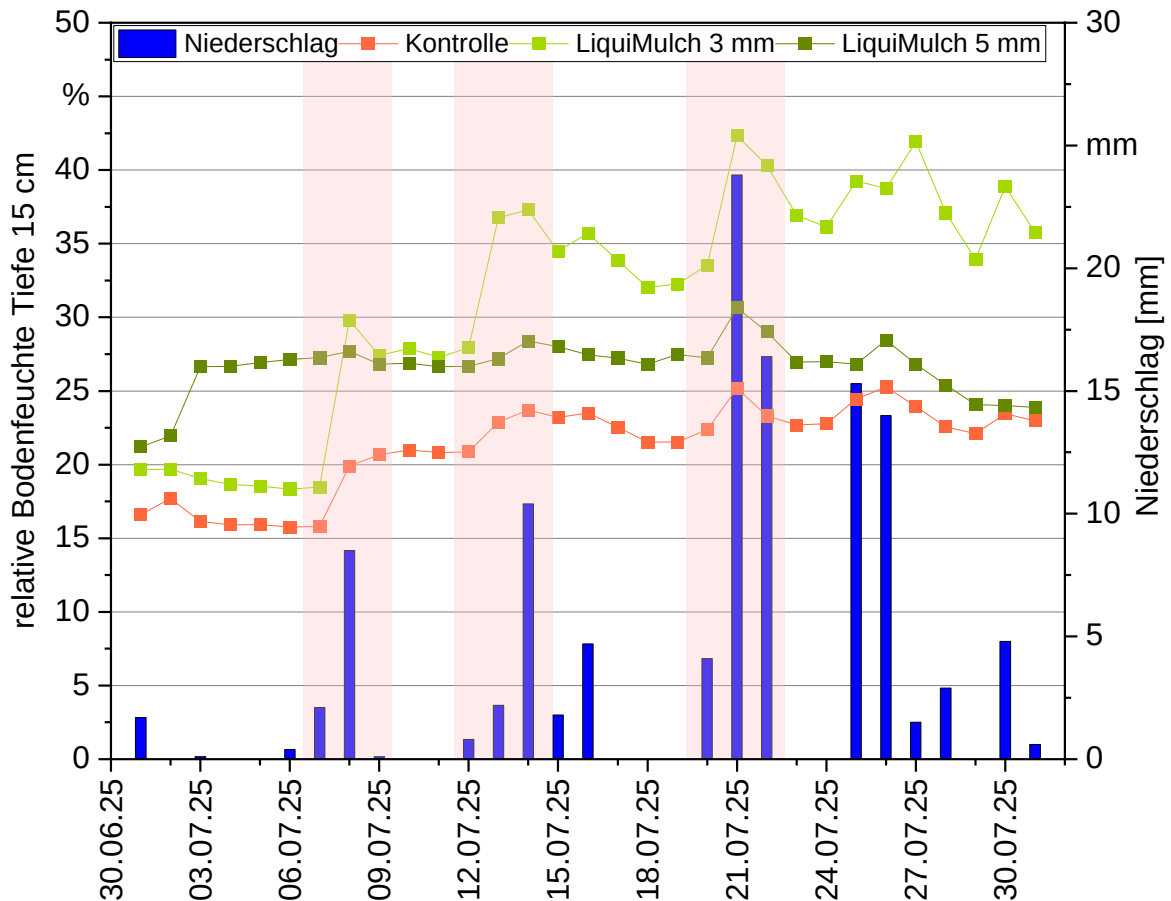


Abbildung 35: Relative Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe über die Zeit von 01.07.-31.07.2025 und Niederschlagsmengen in mm

5.2.4 Einfluss des Mulchmaterials auf Wildtiere

Während der Feldversuche konnten auf den Versuchsflächen in Bamberg hauptsächlich Vögel beobachtet werden. Andere Wildtiere wurden nicht gesichtet, da die Versuchsflächen eingezäunt waren. Wie in Abbildung 36 zu erkennen handelte es sich bei den beobachteten Vögeln hauptsächlich um Krähen.

Auf den Freilandversuchsflächen in Straubing zeigten die applizierten Mulchmaterialstreifen teilweise Fraßspuren von Wildtieren. Nach Auswertung der Aufnahmen einer Wildtierkamera konnten hier vor allem Elstern und Fasane nachgewiesen werden.

Um künftig Fraßschäden zu verhindern, könnten ggf. Bitterstoffe zum Material beigefügt werden, die die Vögel vergrämen. Solange allerdings durch die LiquiMulchsicht eine ausreichende beikrautunterdrückende Wirkung gegeben ist, ist dies nicht zwingend notwendig und dementsprechend wurde im Vorhaben davon abgesehen.



Abbildung 36: Fotos der Wildtierkameras von Vögeln am Mulchmaterial auf der Versuchsfläche in Bamberg (links) und auf der Versuchsfläche in Straubing (rechts)

5.3 Applikationstechnik

5.3.1 Applikationstechnik für den Feldversuch 2023

Da das Applikationsgerät des Maschinenherstellers Amazone für die Applikation des Feldversuchs 2023 noch nicht einsatzbereit war, kam für die Applikation des aufspritzbaren Mulchmaterials das System für die Applikation des Mulchmaterials (SAM) zum Einsatz, welches während des Projekts ABOW entwickelt und gebaut wurde [44]. Während das Gerät SAM in Dauerkulturen, wie in Wein- und Obstplantagen, im Zwischenachsbereich eingesetzt wird, wurde die Applikationstechnik für den Einsatz in Reihenkulturen auf ein Heckgerät umgerüstet.

5.3.1.1 System für die Applikation des Mulchmaterials für die Reihenkultur - SAM

Für die Anlage des Feldversuchs 2023 erwies sich das Applikationsgerät SAM als funktional, aber erfüllte nicht alle Anforderungen. Aufgrund der sich ändernden Bodenverhältnisse musste die Höhenführung regelmäßig neu justiert werden, um eine gleichmäßige Streifenbreite zu gewährleisten. Vor allem bei der Applikation der schmäleren Mulchstreifen von 20 cm war eine Pulsation bei der Flüssigkeitsförderung feststellbar, welche durch die im Applikationsgerät verbauten robusten Schlauchpumpen hervorgerufen wurde, woraus eine ungleichmäßige Schichtdicke resultierte (Abbildung 37). In wenigen Fällen traten bei der Applikation Düsenverstopfungen auf.



Abbildung 37: Ungleichmäßiges Spritzbild bei der Applikation der 20 cm Mulchstreifen

Zudem variierte das Mischungsverhältnis der Komponenten, wenn die Pumpen nicht synchron liefen. Auch die hohen Temperaturen am Tag der Applikation waren für die Applikationstechnik eine große Herausforderung. Aufgrund von Überhitzung des Steuergeräts oder der Pumpen musste die Applikation der Mulchstreifen vereinzelt unterbrochen werden. Der Heckanbau des Applikationsgeräts stellt sich für Transportfahrten als ideal dar; die erforderliche Hubkraft ist unkritisch.

5.3.2 Applikationstechnik für die Feldversuche 2024 und 2025

In den beiden Versuchsjahren 2024 und 2025 wurde der von den Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG und der Maschinenfabrik Schmotzer GmbH für die Applikation des aufspritzbaren Mulchmaterials entwickelte Prototyp nach Umbau durch das TFZ zum „Mulchsprayer Vegi“ eingesetzt. Bevor er allerdings einsatzbereit war, wurde das Gerät umfassend optimiert (Prototyp II).

5.3.2.1 Optimierung des Prototyp I Applikationsgeräts

Nach der Inbetriebnahme des Applikationsgeräts Prototyp I im Vorhaben MuNaRo [66] traten Schwierigkeiten auf, die langfristig Funktionalität des Geräts gefährdeten. Ziel war die Optimierung des Prototyps I eines Applikationsgeräts (Abbildung 38) der Unternehmen Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG und der Maschinenfabrik Schmotzer GmbH hin zu einem praxistauglichen Applikationsgerät für den Gemüsefreilandanbau. Basierend auf den Ergebnissen des Vorhabens MuNaRo, wurden durch den Umbau des Applikationsgeräts zum Prototyp II vor allem die Fördertechnik, die Mischstrategie, die Bedienerfreundlichkeit, der Reinigungs- und der Wartungsaufwand optimiert. Dadurch wurde die Applikation in der Verwendung insgesamt praxisfreundlicher.

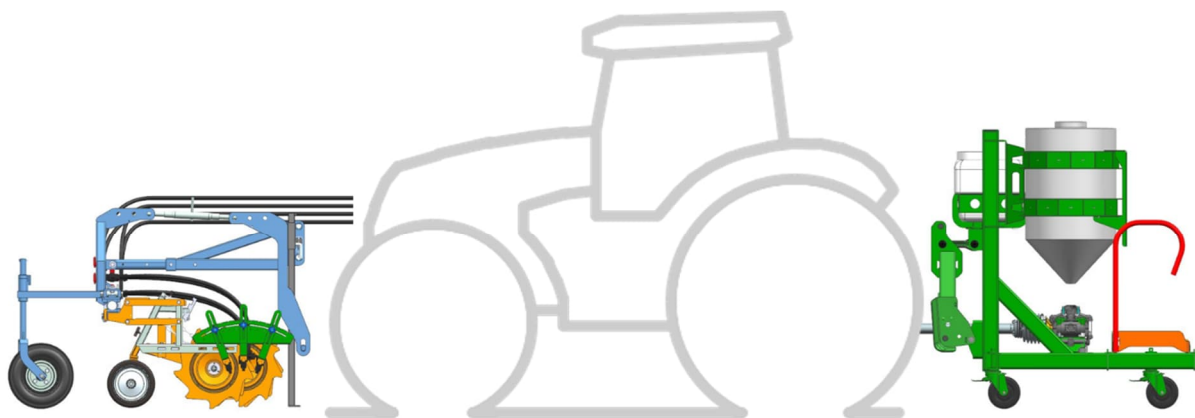


Abbildung 38: 2-D-Grafik des Prototyps I der Front-Heck-Gerätekombination für die Ausbringung des Mulchmaterials

5.3.2.1.1 Fehler- und Ursachendiagnose

Für die Identifizierung der Optimierungserfordernisse, wurde zu Beginn des Umbaus eine intensive Fehlerdiagnose durchgeführt.

Pumpen

Als Hauptursache für den Funktionsverlust wurden die defekten Zahnradpumpen der Firma Scherzinger identifiziert. Durch Verschleiß der Pumpen hatte das Applikationsgerät Probleme beim Ansaugen und Fördern des Mulchmaterials. Außerdem war die Förderleistung der verschlissenen Zahnradpumpen zu gering. Eine Ursache hierfür könnte das Trockenlaufen der Pumpe gewesen sein, was oft mit einer starken Hitzeentwicklung einhergeht. Bei einem Temperaturanstieg über 60° C kann es zu einer nachhaltigen Schädigung der Lagerbuchse durch Schmelzen des Kunststoffes kommen. Dadurch laufen die Zahnräder nicht mehr sauber ineinander und werden schneller abgenutzt, was zu einer weiteren Erhöhung der Temperatur führt. Dementsprechend war ein Ziel der Optimierung geeignete Pumpen für die Förderung des Mulchmaterials zu identifizieren und im Gerät zu installieren.

Zapfwellenantrieb

Der Antrieb der Pumpen über die Zapfwelle erwies sich als suboptimal, da viele Traktoren die Drehzahl der Zapfwelle nicht unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit regulieren können. Dies schränkt eine erforderliche feinabgestufte Steuerung der Pumpendrehzahl ein. Zudem stellte sich als problematisch heraus, dass die Pumpen, wenn sie über die Zapfwelle betrieben werden, sich synchron drehen und nicht an das ideale Mischungsverhältnis der beiden Flüssigkomponenten angepasst werden können. Die Regelung des Mischungsverhältnisses durch einen Durchflussregler zeigte sich als wenig vielversprechend, da vermehrt Ablagerungen des Materials beobachtet werden konnten und sich das Risiko einer Verstopfung erhöhte. Außerdem sind solche Bauteile in der Praxis nur sehr aufwendig zu reinigen. Deshalb wurde nach alternativen Antriebsmöglichkeiten gesucht, die den zuverlässigen Betrieb des Applikationsgeräts sicherstellen können.

Leitungsführung

Aufgrund der Front-/Heck-Konstruktion wurde im Prototyp I eine aufwendige und lange Leitungsführung für das Gerät verbaut, um das Mulchmaterial von den Tanks im Heck nach vorne zu den Düsen zu befördern und wieder über den Rücklauf zurück. Diese aufwendige Leitungsführung führte zu einem erhöhten Risiko von Verstopfungen und Ablagerungen in den Leitungen. Dies wurde vor allem beim Auseinanderbauen des Applikationsgeräts deutlich, wobei vor allem Durchflusssensoren, Druckminderer, oder Bauteile wie zahlreiche 90°-Winkel viele Ablagerungen des Mulchmaterials zeigten. Auch bei den Magnetventilen kam es durch Ablagerungen der im Mulchmaterial enthaltenen Feststoffe wie Stärke und Cellulose zum technischen Ausfall. Ein Nachteil der langen und komplexen Leitungsführung war außerdem ein Druckverlust während der Förderung des Mulchmaterials, was die Gleichmäßigkeit der Applikation des Mulchmaterials beeinträchtigte. Bei der Wasserkomponente kam es zu einem Druckverlust von ca. 4 - 3,5 bar (Anfangsdruck nach Pumpe 6 bar, Düsendruck ca. 2 - 2,5 bar) und bei der Ölkomponente zu einem Druckverlust von bis zu 4,5 bar (Anfangsdruck nach Pumpe ca. 5,5 bar; Düsendruck ca. 1 bar).

Aufgrund des Verschleißes der Pumpen, nahmen die Flüssigkeitsdrücke während des Betriebs mit der Zeit ab. Für ein optimales Sprühbild sind an der Düse mindestens 2 bar notwendig, was aufgrund des hohen Druckverlusts, vor allem bei der Ölkomponente, nicht mehr sichergestellt werden konnte. Um die Leitungsführung zu vereinfachen und die Förderstrecke weniger verstopfungsanfällig zu gestalten, war das Ziel das bisherige Front/Heck Applikationsgerät in ein reines Heckgerät umzugestalten. Dazu wurden größere Umbaumaßnahmen am Geräterahmen vorgenommen.

5.3.2.1.2 Pumpen- und Leitungstests

Aufgrund der unterschiedlichen Viskositäten ist die kontinuierliche Förderung der beiden Komponenten mit geeigneten Pumpen maßgeblich für die Funktionalität des Applikationsgeräts. Für die Identifizierung geeigneter Pumpen wurden verschiedene Pumpentypen mithilfe eines Testaufbaus auf ihre Eignung untersucht (Kapitel 4.3.3.2). Vier Pumpen, die sich in ihren Funktionsprinzipien deutlich unterscheiden, wurden getestet: eine Drehkolbenpumpe, eine Schraubenspindelpumpe, eine Sinuspumpe sowie eine Zahnradpumpe (Abbildung 39).



Abbildung 39: Bauformen der vier getesteten Pumpen - Drehkolbenpumpe (oben links), Sinuspumpe (oben rechts), Schraubenspindelpumpe (Bildquelle: Fristam Pumpen KG) (unten links), Zahnradpumpe (unten rechts)

Für die Evaluierung der Eignung der Pumpen wurde in Anlehnung an das zukünftige Applikationsgerät eine Teststrecke gebaut (Abbildung 6). Der Fokus der Prüfung liegt dabei unter anderem auf der Pulsation des Sprühstrahls, der geringen Scherung des Materials sowie auf einer geringen Erhitzung der Pumpe während des Förderbetriebs. Außerdem wird bei der Auswahl der Pumpen darauf geachtet, dass die Pumpe während der Förderung einen Leitungsdruck von mindestens 4 bar erzeugen kann. Die Pumpentests erfolgten immer nach dem vorab festgelegten Testprotokoll (Kapitel 4.3.3.2), außer es traten technische Probleme auf. Als Messgrößen wurden für die Pumpentests folgende Parameter festgelegt: Temperatur und Druck des Vorlaufs (T Vorlauf, p Vorlauf), welcher dem Leitungsabschnitt bis circa 2 m nach der Pumpe entspricht, Temperatur der jeweiligen Testpumpe (T Pumpe), Temperatur des Mediums (T Medium), sowie dem Druck an den Düsen (p Düsen).

Drehkolbenpumpe

Die Untersuchungen der Drehkolbenpumpe ergaben eine grundsätzliche Eignung des Pumpentyps für das Applikationsgerät und die Förderung der beiden Komponenten. Das wässrige Medium konnte ohne Probleme von der Drehkolbenpumpe angesaugt und gefördert werden. Innerhalb der ersten 3 h Förderung der wässrigen Komponenten kam es zu einem Temperaturanstieg sowohl bei der Pumpe als auch bei den Flüssigmedien (Abbildung 40, links). Dabei betrug die maximale Temperatur 40 °C, welche zum Ende der 3 h erreicht wurde. Der gemessene Druck des Vorlaufs und der Düsen oszillierte während der Förderperiode in hohen als auch in niedrigeren Druckbereichen, dennoch konnte optisch keine Pulsation im Sprühstrahl erkannt werden (Abbildung 40, links).

Nach einer einstündigen Pause wurde mit dem zweiten Testlauf begonnen. Dabei kam es erneut zu einem Anstieg der Temperatur, allerdings geringer als beim ersten Durchlauf. Das liegt vor allem daran, dass die Temperatur der Pumpe bereits zu Beginn des Testlaufs ca. 30 °C betrug (Abbildung 40, rechts). Erneut wurde eine maximale Temperatur von 40 °C am Ende der 3 h erreicht. Erneut konnte beim Druck eine Oszillation in niedrigen und hohen Druckbereichen beobachtet werden, dennoch konnte optisch keine Pulsation im Sprühstrahl erkannt werden (Abbildung 40, rechts).

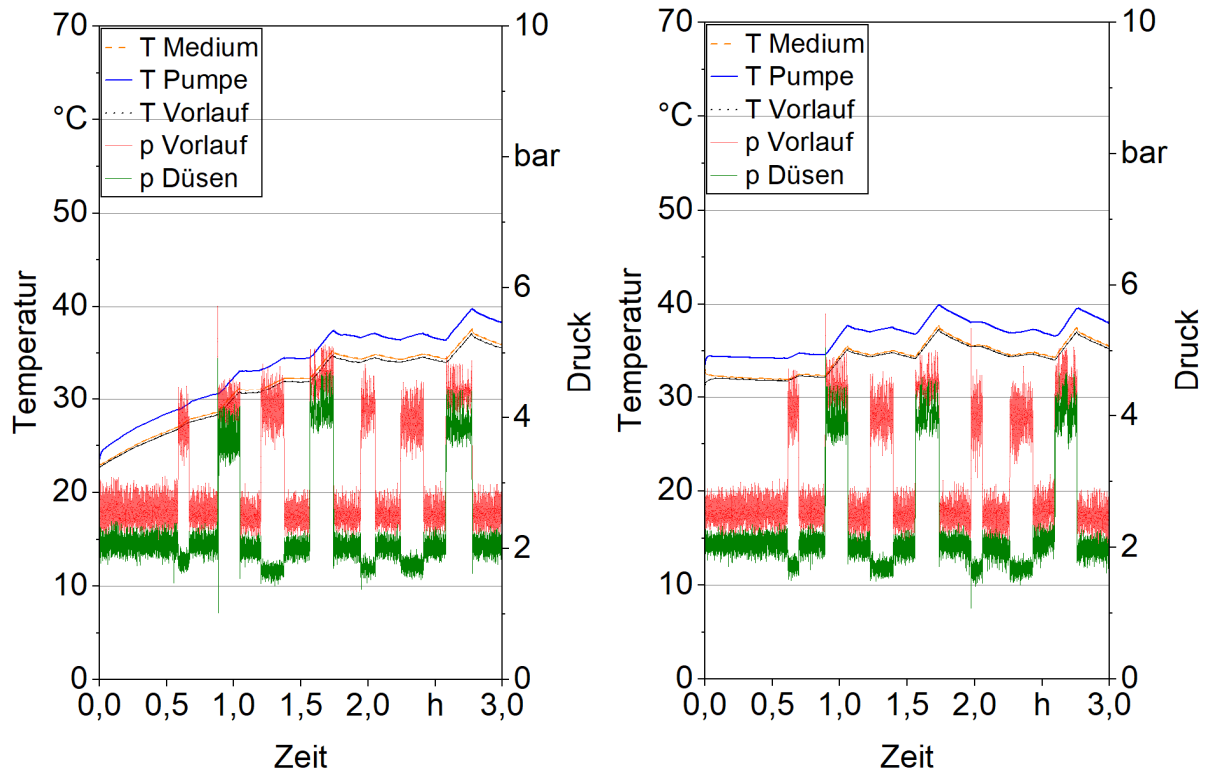


Abbildung 40: Temperatur (T)- und Druck (p)-Verlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Drehkolbenpumpe

Bei der ersten Förderperiode des Pumpentests mit der öligen Komponente war ein deutlicher Anstieg der Temperatur bis 60 °C zu beobachten (Abbildung 41). Um eine Schädigung der Pumpe und des Leitungssystems zu verhindern, wurde bei dieser Temperatur der Pumpentest frühzeitig, nach einer Laufzeit von ca. 2 h, abgebrochen. Außerdem kam es kurz nach Beginn des Pumpentests zum Ausfall des Drucksensors an den Düsen, vermutlich aufgrund von hohen Spannungsspitzen durch statische Aufladung des Systems (Abbildung 41). Diese entstanden bei der statischen Aufladung der Teststrecke durch die Reibung der öligen Komponente an den Schläuchen und einer fehlenden Erdung. Die Druckanzeige des Vorlaufs zeigte einen Leitungsdruck von ca. 4 bar. Der Abfall des Drucks über die Zeit ist wahrscheinlich mit der Viskositätsabnahme des Mediums aufgrund steigender Temperaturen erklärbar. Ein Druckverlauf an den Düsen konnte leider nicht aufgezeichnet werden, da der dazugehörige Drucksensor defekt war. Die Förderung der öligen Komponente mit einer Drehzahl von 250 rpm war erst bei einer Temperatur von 23 °C möglich, da die Viskosität der öligen Komponente zuvor zu hoch war. Dies führte dazu, dass der Schlauch aufgrund der hohen Ansaugleistung zusammengezogen wurde. Bei einer Temperatur über 23 °C war die Förderung der öligen Komponente möglich. Bei Betrachtung des Sprühstrahls konnte optisch eine Pulsation festgestellt werden.

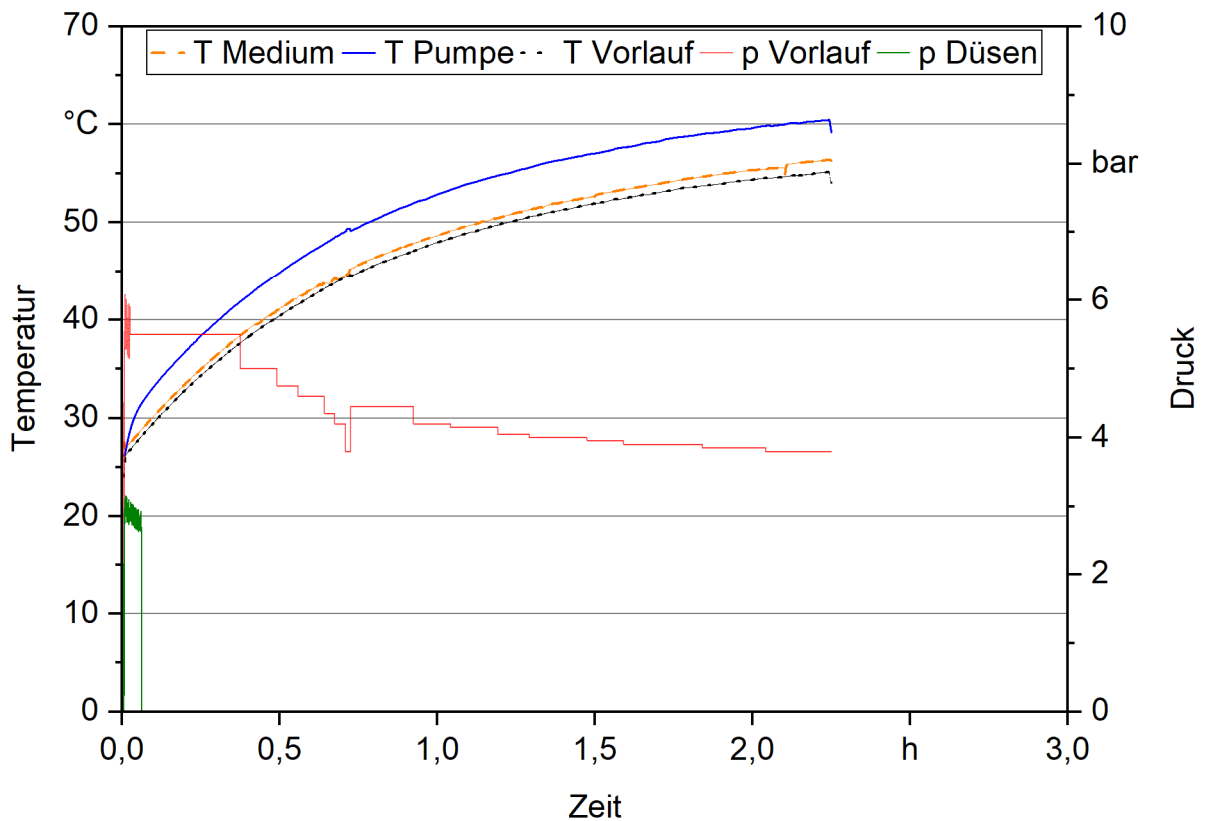


Abbildung 41: Temperatur- und Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden des Pumpentests mit der Drehkolbenpumpe

Nach der einstündigen Pause betrug die Temperatur der Pumpe ca. 45 °C. Da es auch bei der zweiten Testphase zu einem Anstieg der Temperatur kam, wurde bereits nach circa 1,5 h die kritische Temperatur von 60 °C überschritten und der Testlauf abgebrochen. In ähnlichem Maße stieg auch die Temperatur des Mediums an.

Zusammenfassend ist die Drehkolbenpumpe in der Lage die beiden Komponenten trotz hohem Feststoffanteil zu fördern. Die Temperaturanstiege in beiden Flüssig-Komponenten, die während der Pumpentests zu allen Zeitpunkten beobachtbar waren, sind damit erklärbar, dass beide Medien während der Pumpentests im Kreis gefördert wurden. Dies wirkt sich auf die Temperaturentwicklung aus, da sich das gesamte Leitungssystem aufheizt und sich das Medium nicht mehr in gleichem Maße abkühlen kann. Während der Tests zeigten sich Probleme bei der Förderung der öligen Komponente unter einer Temperatur von 23 °C aufgrund der erhöhten Viskosität des Öls. Diese Probleme sind höchstwahrscheinlich auf die sehr hohe Förderleistung der Pumpe zurückzuführen. Mit einer Fördermenge von 27,0 m³/h weist die Pumpe eine sehr hohe Ansaugleistung auf, was zu einem Unterdruck im Leitungssystem führte und damit zur Verengung des Schlauchs. Außerdem sind die Leitungsquerschnitte für die hohe Pumpleistung der Pumpe nicht ausreichend groß. Für den Einsatz im Applikationsgerät würde eine kleiner-dimensionierte Pumpe mit geringerer Fördermenge ausreichen, da die Fördermenge durch das

Leitungssystem, die Statikmischer und den optimalen Druckbereich ohnehin begrenzt ist. Kleiner-dimensionierte Drehkolbenpumpen sind jedoch kaum am Markt verfügbar. Dementsprechend wurde für den Einbau im Applikationsgerät von einer Drehkolbenpumpe abgesehen.

Sinuspumpe

Die Untersuchungen der Sinuspumpe zeigte eine grundsätzliche Eignung des Pumpentyps für beide Flüssigmedien. Über die Pumpdauer von 3 h konnte bei der wässrigen Komponente ein Temperaturanstieg beobachtet werden, wobei eine maximale Temperatur von knapp 27 °C erreicht wurde (Abbildung 42, links). Der Druckverlauf des Vorlaufs zeigte eine leichte Oszillation, wobei diese vor allem in den hohen Druckbereichen an der Düse deutlicher ausgeprägt war.

Beim zweiten Testlauf im Anschluss an eine einstündige Unterbrechung war ein ähnlicher Temperaturanstieg wie schon im ersten Teil des Testlaufs zu verzeichnen. Die maximal erreichte Temperatur lag bei circa 30 °C am Ende des Testlaufs. Der Verlauf des Drucks in hohen als auch in niedrigen Druckbereichen war im Vergleich zum ersten Testlauf vergleichbar (Abbildung 42, rechts). Erneut war eine leichte Oszillation der gemessenen Druckwerte erkennbar.

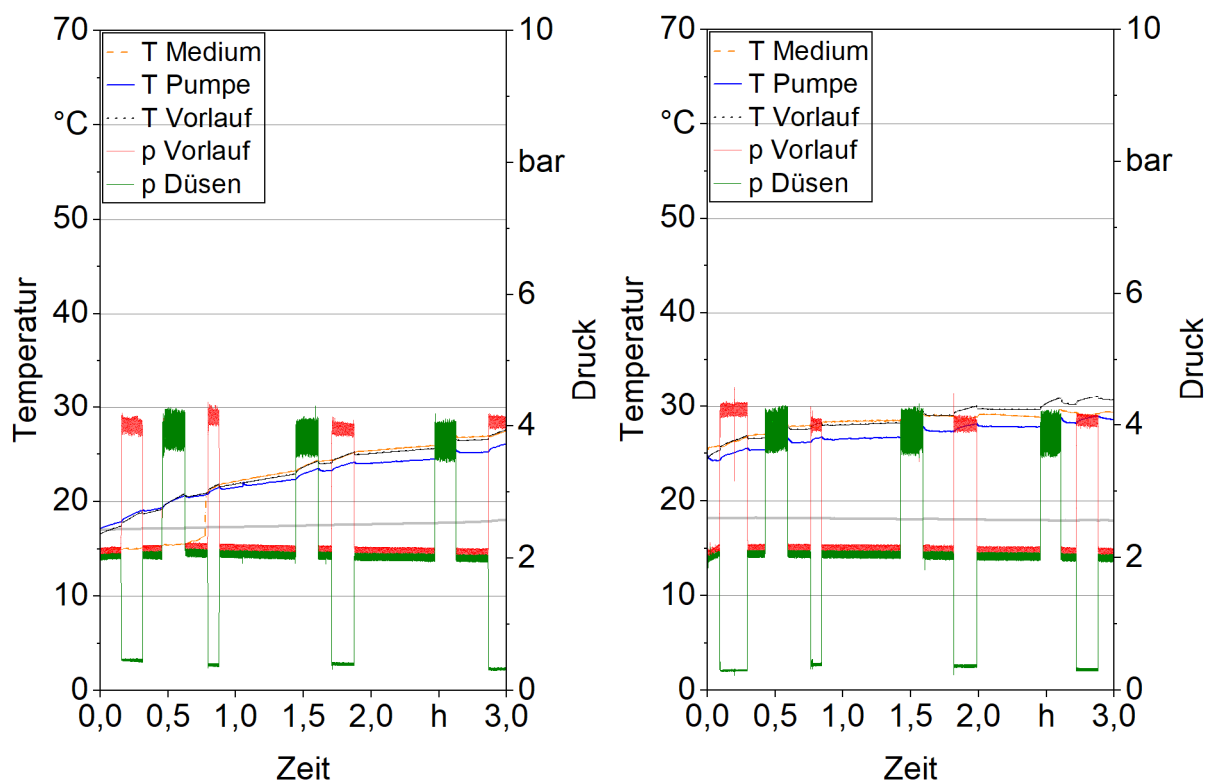


Abbildung 42: Temperatur- und Druckverlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Sinuspumpe

Ähnliche Beobachtungen konnten für die ölige Komponente gemacht werden. Auch hier kam es während des dreistündigen Förderbetriebs zu einem Temperaturanstieg an der Pumpe und des Mediums um circa 10 K (Abbildung 43, links). Der Druckverlauf des Vorlaufs und an den Düsen zeigte in hohen als auch in niedrigen Druckbereichen eine leichte Oszillation. Nach einer einstündigen Pause wurde mit der zweiten Förderperiode begonnen.

Auch beim zweiten dreistündigen Testlauf mit der öligen Komponente zeichneten sich vergleichbare Ergebnisse im Vergleich zum ersten Testlauf ab. Es kam erneut zu einem leichten Anstieg der Temperatur um circa 10 K, wobei sich die maximal erreichte Temperatur des Mediums und auch der Pumpe auf circa 30 °C einpendelte. Die Temperatur der Pumpe blieb unterhalb der Temperatur des Mediums (Abbildung 43, rechts). Auch im Hinblick auf den Verlauf der Drücke konnten im Vergleich zum ersten Testlauf kaum Unterschiede beobachtet werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Bei der Förderung der öligen Komponente konnte erneut eine leichte Oszillation der Drücke des Vorlaufs und an der Düse beobachtet werden.

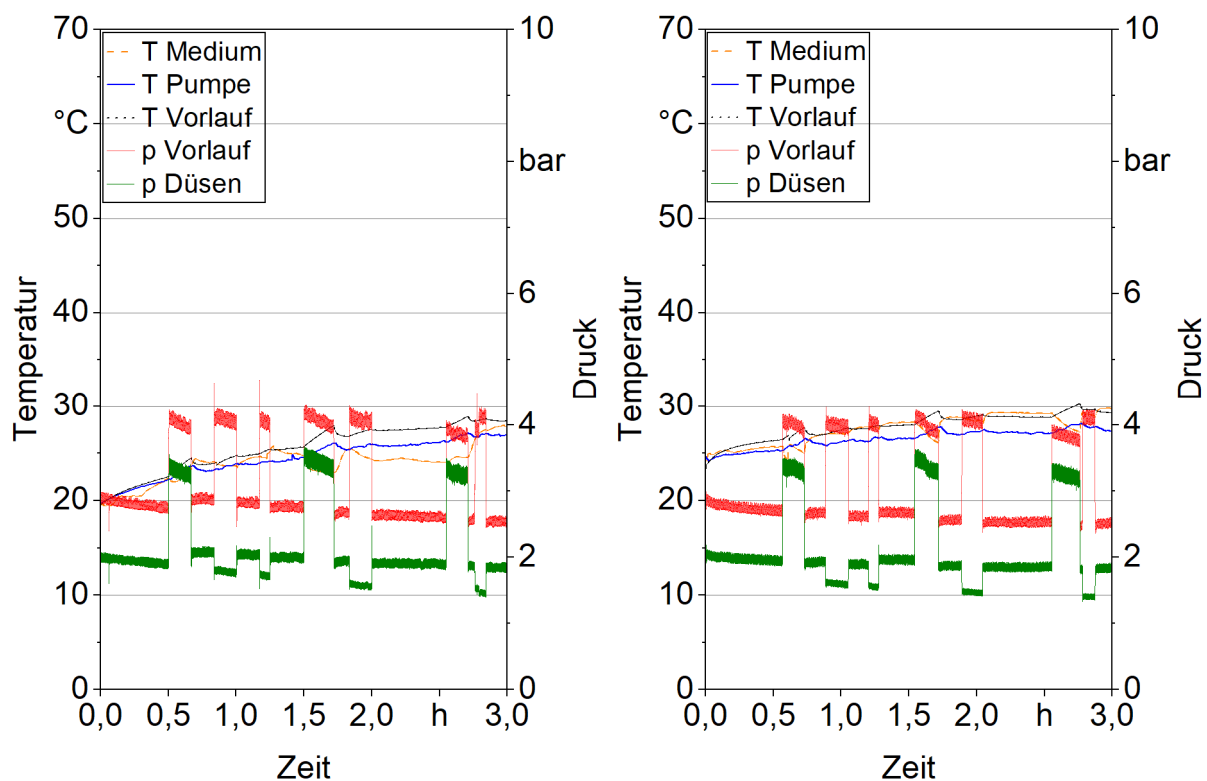


Abbildung 43: Temperatur- und des Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Sinuspumpe

Zusammenfassend deuten die Pumpentests eine grundsätzliche Eignung des Pumpentyps an. Wegen der hohen Kosten von etwa 8.000 € pro Pumpe wurde jedoch von einer Anschaffung für das Applikationsgerät abgesehen. Zudem stellt die komplexere Bauweise

im Vergleich zur Zahnrad- oder Drehkolbenpumpe einen weiteren Nachteil dar, da sie die Wartung für den Landwirt erschwert.

Schraubenspindelpumpe

Bei der Untersuchung der Schraubenspindelpumpe mit der wässrigen Komponente über 3 h konnte ein Temperaturanstieg über die Zeit sowohl bei der Pumpe als auch beim Vorlauf und beim Medium festgestellt werden. Mit einem Delta von ca. 13 K war der beobachtete Anstieg der Temperatur beim Vorlauf (Leitungsbereich ca. 2 m nach Pumpe) und beim Medium etwas höher als der der Pumpe (Δ -Temperatur: 10 K) (Abbildung 44, links). Wie in Abbildung 44, links zu erkennen ist, zeigte der Verlauf des Drucks sowohl im Vorlauf als auch an den Düsen wenig Oszillation, weder in niedrigen noch in hohen Druckbereichen. Dementsprechend war auch beim Sprühbild keine Pulsation zu erkennen.

Nach einer einstündigen Pause wurde ein zweiter Testlauf mit einer Laufzeit von 3 h durchgeführt. Erneut konnte ein Temperaturanstieg des Vorlaufs und des wässrigen Mediums beobachtet werden. Allerdings war dieser Anstieg nur moderat, was vermutlich an der erhöhten Ausgangstemperatur des Systems lag, bevor der zweite Testlauf gestartet wurde. Die Temperatur der Pumpe über die Zeit veränderte sich hingegen kaum. Wie schon im ersten Testlauf war bei den Druckverläufen des Vorlaufs und der Düse erneut kaum Schwankungen zu erkennen. Die Ergebnisse des Pumpentests zeigt Abbildung 44, rechts.

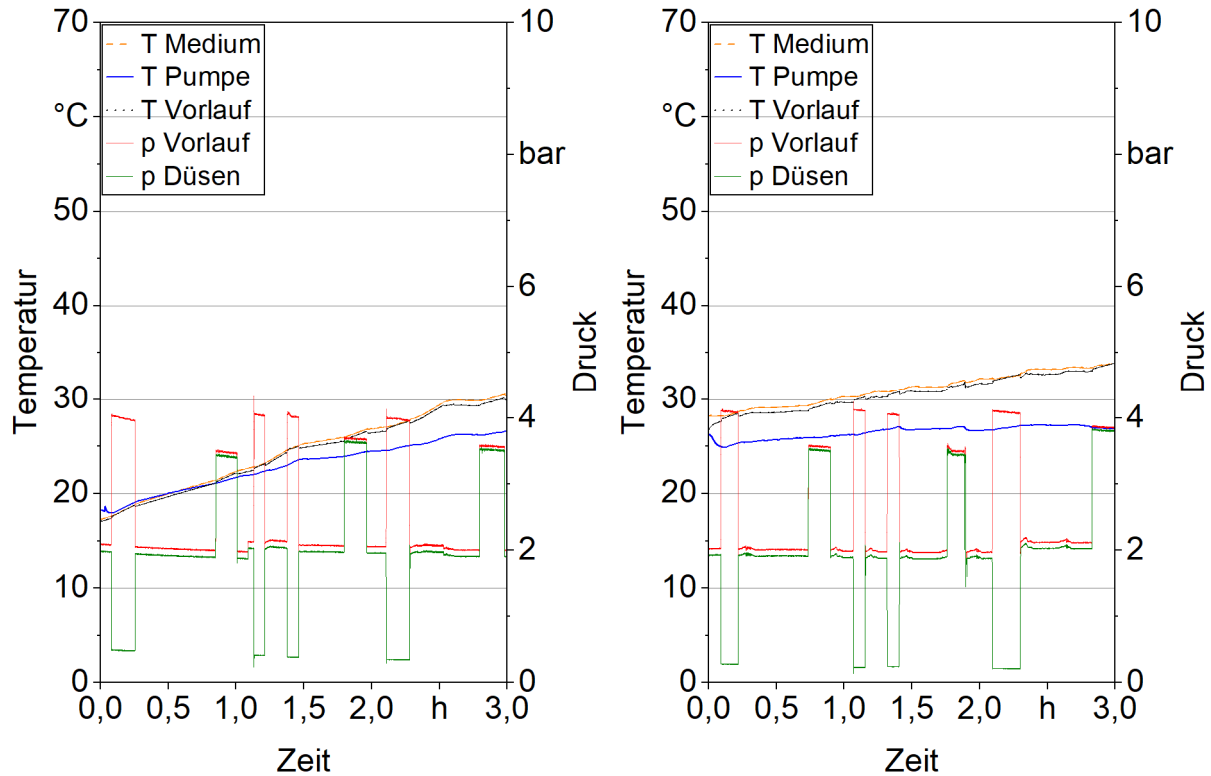


Abbildung 44: Temperatur- und Druckverlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Schraubenspindelpumpe

Auch bei der Förderung der öligen Komponente durch den Testaufbau war ein Temperaturanstieg bei der Pumpe als auch bei der Vorlauftemperatur und den Düsen erkennbar. Während der Anstieg der Pumpentemperatur bei ca. 10 K lag, erhitzte sich das Medium und der Vorlauf des Systems mit einem Temperaturdelta von 17 K stärker (Abbildung 45). Eine mögliche Ursache dafür könnte sein, dass sich das Medium aufgrund mangelnder Konvektion beim Pumpen im Kreis kaum abkühlen konnte. Wie schon bei der wässrigen Komponente war auch bei der Ölkomponente kaum eine Schwankung der Druckverläufe des Vorlaufs und der Düse zu erkennen (Abbildung 45, links). Folglich zeigte auch hier das Sprühbild der Ölkomponente keine Pulsation.

Nach einer einstündigen Pause folgte eine zweite Testperiode mit der öligen Komponente über drei Stunden. Die Förderung der Ölkomponente durch den Testaufbau mittels der Schraubenspindelpumpe zeigte für das Medium, den Vorlauf und der Pumpe einen moderaten Anstieg der Temperatur über die Zeit. Diese Beobachtung konnte bereits auch bei der Förderung der wässrigen Komponente gemacht werden. Dabei betrug das Temperaturdelta bei allen lediglich circa 5 K und lag deutlich unter der kritischen Temperatur über 60 °C (Abbildung 45, rechts). Der im Vergleich zur ersten Testphase geringere Temperaturanstieg lässt sich mit der bereits erhöhten Ausgangstemperatur erklären. Außerdem können die Temperaturanstiege in beiden Flüssig-Komponenten, die während der Pumpentests zu allen Zeitpunkten beobachtbar waren, auch damit erklärt werden, dass beide

Medien während der Pumpentests im Kreis gefördert wurden. Dies wirkt sich auf die Temperaturentwicklung aus, da sich das gesamte Leitungssystem aufheizt und sich das Medium nicht mehr in gleichem Maße abkühlen kann. Anscheinend reichte weder bei der Wasserkomponente noch bei der Ölkomponente eine einstündige Pause aus, dass sich die Pumpe auf ihre Ausgangstemperatur abkühlen konnte. Die Auswertung des Druckverlaufs zeigte erneut keine Oszillation in niedrigen als auch in hohen Druckbereichen (Abbildung 45, rechts).

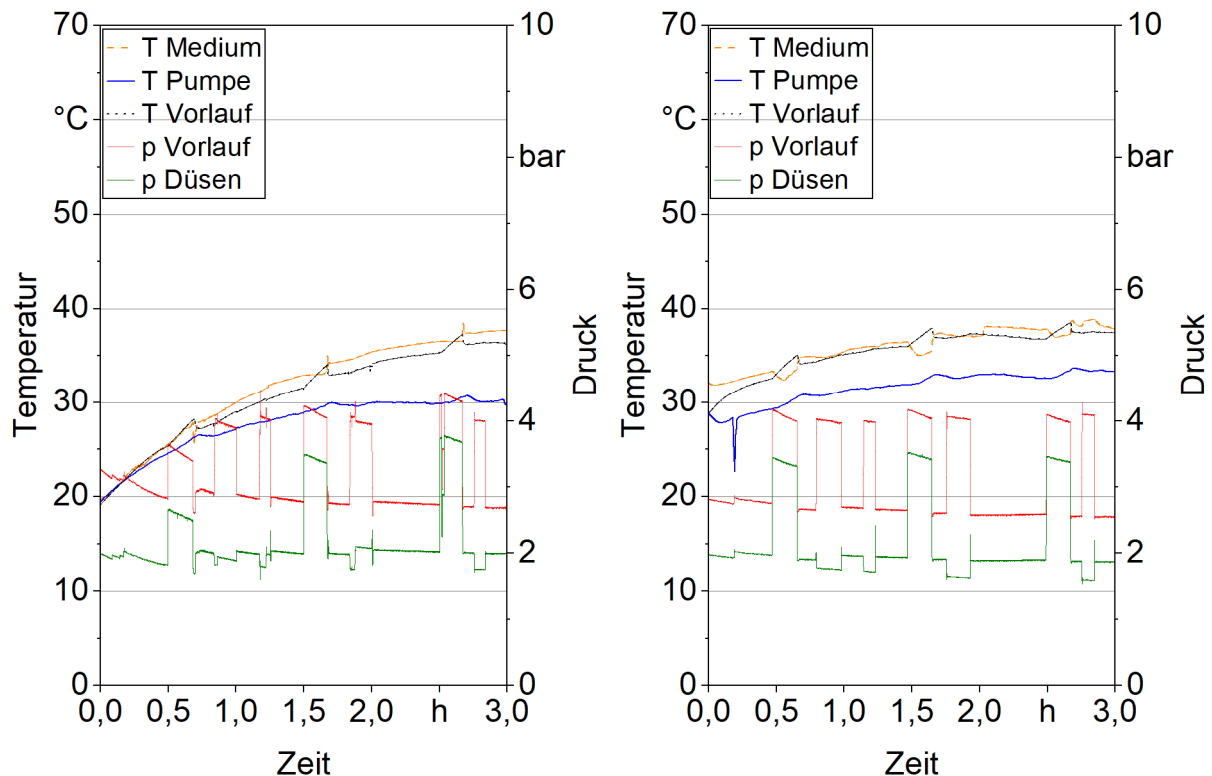


Abbildung 45: Temperatur- und Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden(links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Schraubenspindelpumpe

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Pumpentests der Schraubenspindelpumpe eine grundsätzliche Eignung der Pumpe für die Förderung beider Komponenten. Dennoch wurde von der Anschaffung einer Schraubenspindelpumpe für das Applikationsgerät abgesehen. Zum einen wurde diese Entscheidung aufgrund des komplexen Innenlebens der Schraubenspindelpumpe getroffen, was Nachteile bei der Wartung und der Reinigung für den Landwirt mit sich bringt. Zum anderen waren die im Vergleich zu anderen geeigneten Pumpen sehr hohen Anschaffungskosten von etwa 8.000 € pro Pumpe ein weiterer Grund.

Zahnradpumpe

Die Untersuchungen mit der Zahnradpumpe bestätigen die grundsätzliche Eignung dieses Pumpentyps für das Applikationsgerät. In Abbildung 46, links ist die Förderung der

wässrigen Komponente über die ersten 3 h, der insgesamt 7-stündigen Pumpentestung dargestellt. Während dieses Zeitraums wurde lediglich ein geringer Anstieg der gemessenen Temperatur um etwa 5 K festgestellt. Der an den Düsen und im Vorlauf gemessene Druck zeigte sich sowohl in niedrigen als auch in höheren Druckbereichen äußerst stabil und wies nur minimale Schwankungen auf. Entsprechend war keine Pulsation des Sprühstrahls zu beobachten.

Nach einer 1-stündigen Pause mit einem anschließenden Betrieb von 3 h ergab sich ein ähnliches Bild bei der Förderung der wässrigen Komponente wie beim ersten Testlauf (Abbildung 46, rechts). Die aufgezeichnete Temperatur der Pumpe über 3 h zeigte einen Anstieg mit einem Delta von circa 10 K. Ein ähnlich starker Anstieg war auch bei der Temperatur der Flüssigkeit zu beobachten. Wie schon in den ersten 3 h waren beim Druck an der Düse und im Vorlauf kaum Schwankungen zu erkennen, weshalb auch hier keine Pulsation zu beobachten war.

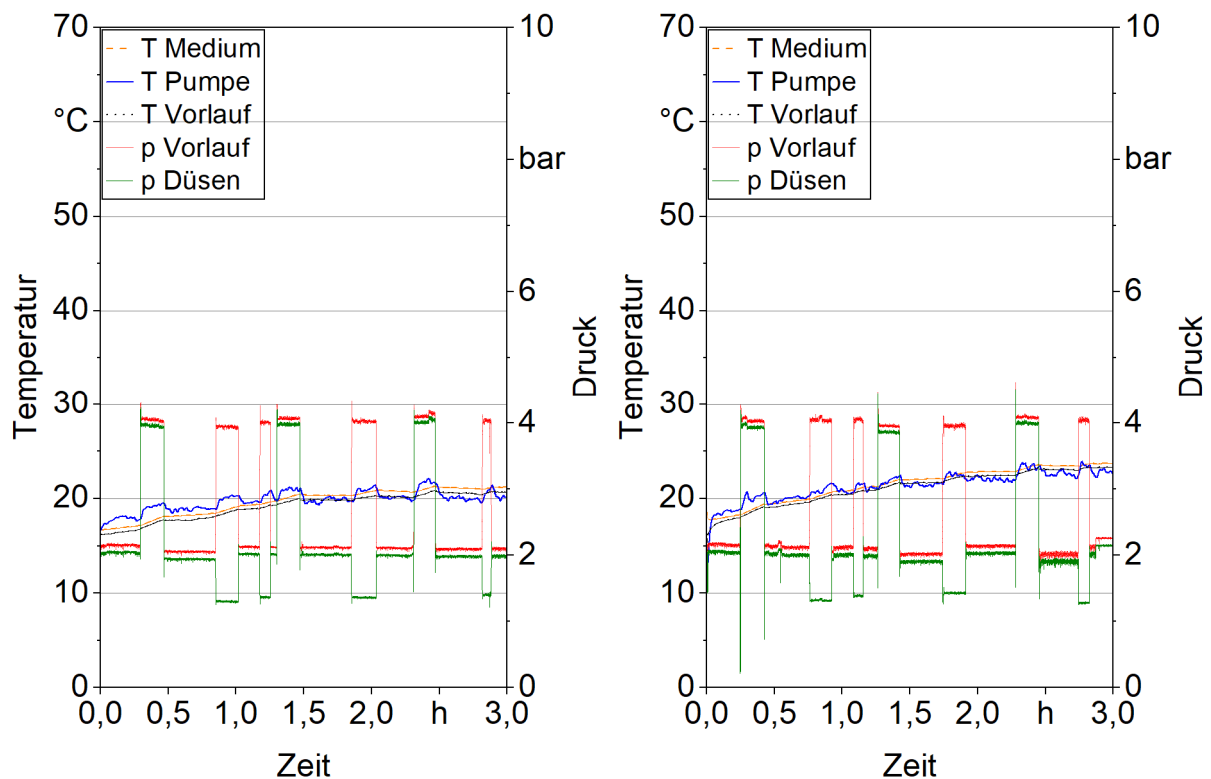


Abbildung 46: Temperatur- und Druckverlauf der wässrigen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Zahnradpumpe

Bei der Förderung der Öl-Phase war ein ähnliches Temperatur-Delta wie bei der Förderung der wässrigen Komponente zu beobachten. Auch hier war kaum ein Anstieg der Temperatur zu erkennen (Abbildung 47, links). Der gemessene Druck an der Düse und im Vorlauf war in hohen als auch in niedrigen Druckbereichen über die Zeit konstant, weshalb auch im Sprühstrahl der Öl-Komponente keine Pulsation zu beobachten war.

Auch bei der Förderung der Öl-Komponente war ein Anstieg der Temperatur der Pumpe sowie des Mediums innerhalb der zweiten Testphase zu verzeichnen (Abbildung 47, rechts). Der Anstieg der Temperatur lag hier etwa bei 15 K und war ausgeprägter als in der wässrigen Komponente. Der deutlich schnellere und stärkere Temperaturanstieg lässt sich höchstwahrscheinlich auf die in niedrigeren Temperaturbereichen üblicherweise höhere Viskosität des Mediums zurückführen. Mit der gesteigerten Reibung und dem größeren Widerstand im gesamten System erwärmt sich folglich das ölhaltige Medium stärker als die wässrige Komponente. Auch bei dem zweiten Testlauf konnte keine Pulsation der Förderung beobachtet werden, da der aufgezeichnete Druck an Vorlauf und ab der Düse stets konstant war und wenig schwankte.

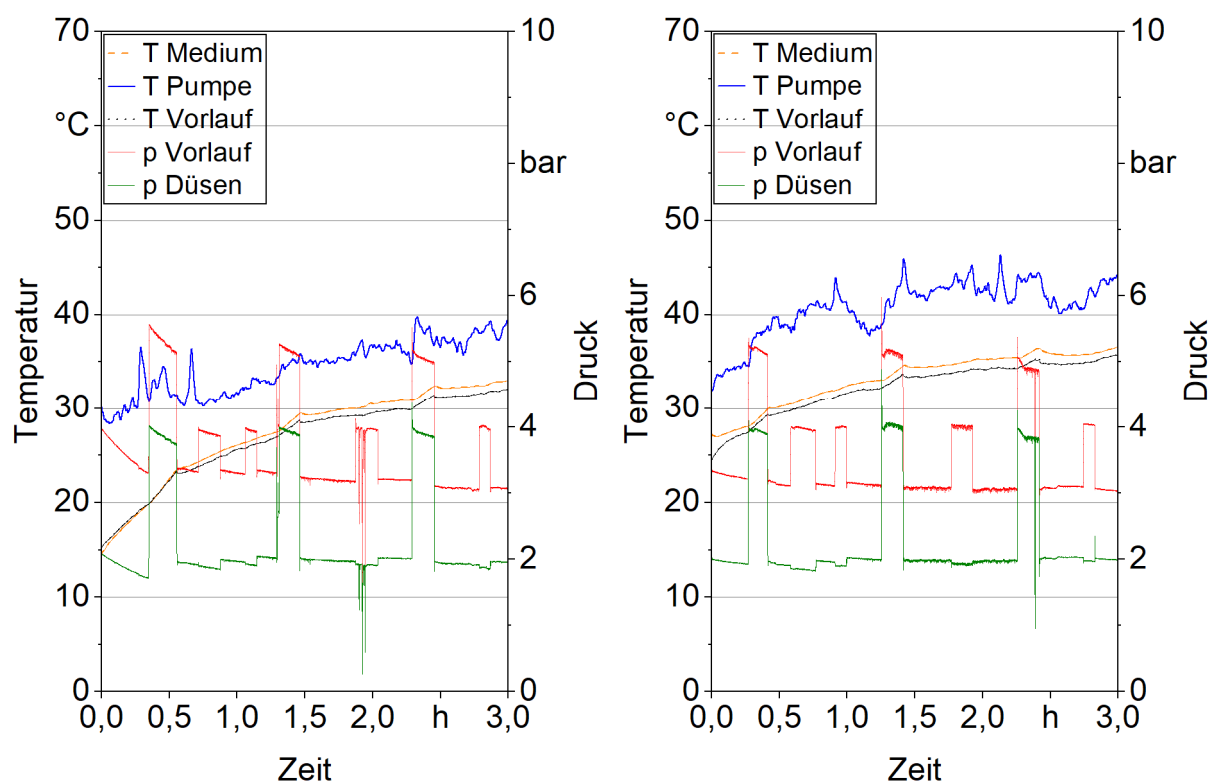


Abbildung 47: Temperatur- und Druckverlauf der öligen Komponente während der ersten 3 Stunden (links) und der zweiten 3 Stunden (rechts) des Pumpentests mit der Zahnradpumpe

Im Hinblick auf die Temperaturanstiege in beiden Flüssig-Komponenten, die während der Pumpentests zu allen Zeitpunkten beobachtbar waren, muss beachtet werden, dass beide Medien während der Pumpentests im Kreis gefördert wurden. Dies wirkt sich auf die Temperaturentwicklung aus, da sich das gesamte Leitungssystem aufheizt und sich das Medium nicht mehr in gleichem Maße abkühlen kann.

Zusammenfassend hat die Evaluierung der Zahnradpumpe ihre Eignung für den Einsatz im Applikationsgerät bestätigt. Dies liegt vor allem an der geringen Pulsation und dem gleichzeitig geringen Temperaturanstieg der Pumpe selbst und der geförderten Medien

über die Zeit. Außerdem erzeugte die Pumpe während der Förderung beider Materialien ausreichende Leitungsdrücke und war von dem hohen Feststoffanteil der beiden Medien in ihrer Funktionalität nicht beeinträchtigt. Dementsprechend wurden zwei Zahnradpumpen des Herstellers Scherzinger Pumpen GmbH & Co.KG für den Einbau in das Applikationsgerät beschafft.

Bevor die Zahnradpumpen allerdings in das Applikationsgerät eingebaut werden konnten, mussten die Primärbuchsen ausgetauscht werden. In der Originalpumpe sind Kunststoffbuchsen verbaut, welche bei Temperaturanstiegen empfindlich reagieren und sich verformen können. Daher wurden die Kunststoffbuchsen durch Primärbuchsen aus Aluminium ersetzt, welche sich als funktional erwiesen und die Pumpen vor Schäden durch Hitzeentwicklung schützen können.

5.3.2.1.3 Rahmenumbau

Für den Umbau des Geräts von einem Front/Heck-Anbau (Abbildung 38) in einen reinen Heckanbau wurde als Basis der Rahmen des bereits bestehenden Heckteils verwendet. Wie in Abbildung 48 dargestellt, wurde der Heckanbau für einen Anbau eines Verschieberahmens der Maschinenfabrik Schmotzer GmbH mit einer Halterung aus Stahlprofilen sowie einem Oberlenker erweitert.

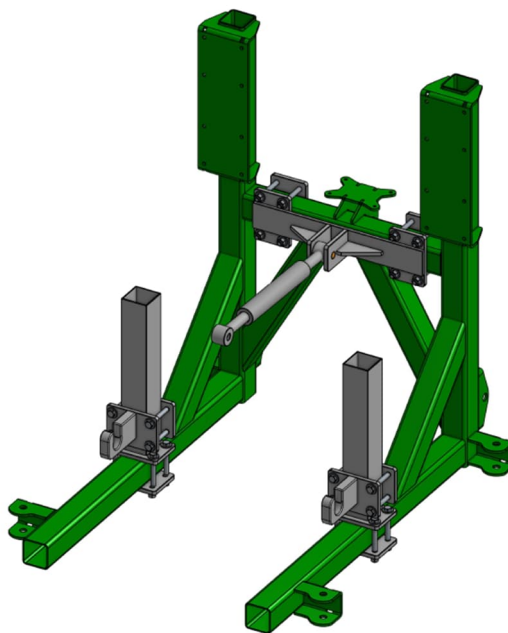


Abbildung 48: CAD-Zeichnung des Heckrahmens mit angebauter Halterung aus Stahlprofilen und einem zusätzlichen Oberlenker zur Befestigung des Verschieberahmens (graue Bauteile)

Anschließend wurde an dem modifizierten Heckanbau der Verschieberahmen angebaut, welcher zukünftig zur Befestigung der Statikmischer dienen soll (Abbildung 49). Durch die Installation eines Verschieberahmens soll die Spurführung während der Applikation für

den Landwirt erleichtert werden. Für die einfache Steuerung des Verschieberahmens wurde dieser in das Hydrauliksystem des Geräts integriert und angeschlossen, sodass die Justierung der richtigen Düsenposition von der Fahrerkabine des Traktors aus sicher und einfach durch den Landwirt vorgenommen werden kann.

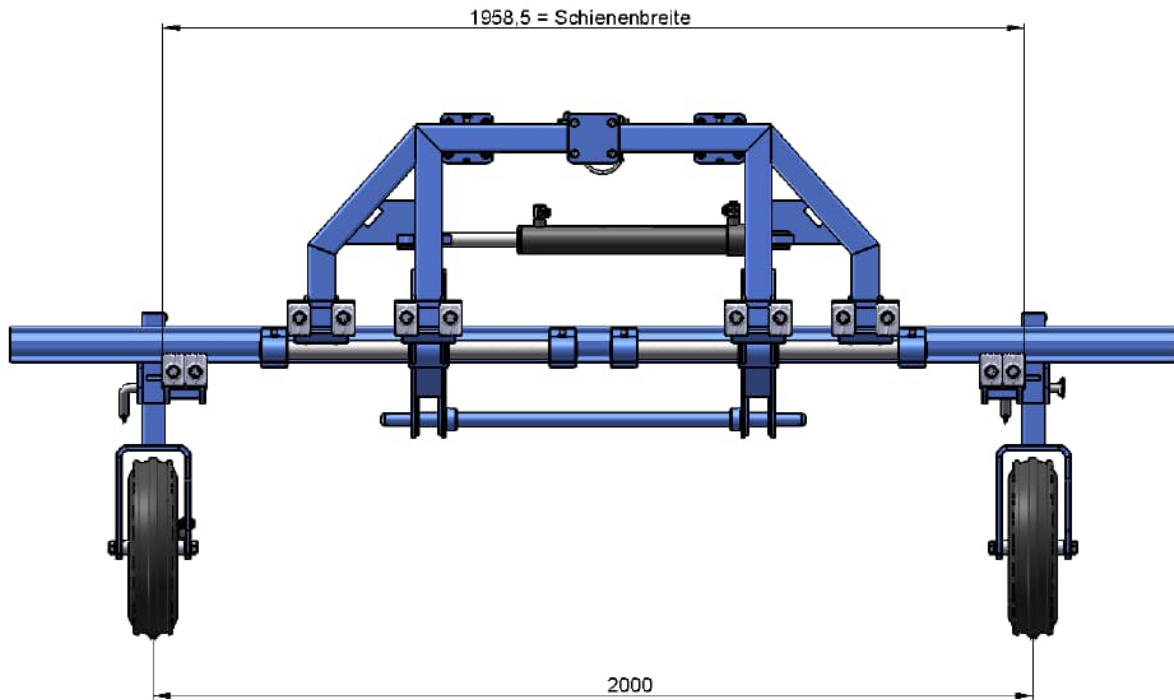


Abbildung 49: Verschieberahmen AV4 der Maschinenfabrik Schmotzer GmbH, (Bildquelle: Maschinenfabrik Schmotzer GmbH)

5.3.2.1.4 Leitungsbau

Ziel des Umbaus der Leitungsführung war vor allem eine Vereinfachung des Leitungssystems. Dazu wurde in erster Linie die Schlauchlänge des Leitungssystems drastisch reduziert, was durch den Umbau in ein reines Heckanbaugerät ermöglicht wurde. Darüber hinaus wurden kritische Bauteile, wie 90°-Winkelrohre, vermieden, da dort das Risiko für Verstopfungen und Ablagerungen des Materials erhöht ist.

Abbildung 50 zeigt den Hydraulikplan der Komponente A oder B nach der Optimierung des Prototyps II. Wie schon im ursprünglichen Heckgeräteteil, ist das Applikationsgerät mit zwei PE-Behältern mit jeweils einem Fassungsvermögen von 200 l für die Komponenten A und B ausgestattet (1). In den beiden Tanks wurde jeweils ein hydraulisches Rührwerk integriert, um die Feststoffe der beiden Komponenten während des gesamten Einsatzes des Geräts in Schwebelage zu halten. Ausgehend vom Tank wird die jeweilige Komponente über die Vorlaufleitung (10) und zwei Quetschventile (11) zu den Statikmischern (13) transportiert. Die Förderung erfolgt mithilfe einer Zahnradpumpe. Im Statikmischer findet die Vermischung der zwei Komponenten statt, die im Anschluss über eine

Flachstrahldüse ausgebracht werden. Über einen Kugelhahn (hier Dreivegehahn) (2), der direkt nach dem Tank installiert ist, kann die Fließrichtung der Komponente eingestellt werden. Zum einen können die Tanks über den Ansaugstutzen (4) befüllt oder entleert werden, oder die Komponente wird zu den Düsen gefördert, wo sie anschließend vermischt und appliziert wird. Die Ventile im Vor- und Rücklauf (11) sind so in das Leitungssystem integriert, dass entweder eine Zirkulation über die Rückleitung (9) zum Befüllen möglich ist, oder die gesamte Fördermenge über die Statikmischer (13) appliziert wird. Mit den Druckluftanschlüssen (12) können die Statikmischer und die Düsen gereinigt werden.

Für die Applikation des Mulchmaterials werden die beiden Komponenten jeweils getrennt voneinander durch das gesamte Leitungssystem transportiert, bevor sie im Mischerblock und Statikmischer miteinander in Kontakt kommen und homogenisiert werden. Ins Leitungssystem integrierte Sensoren ermöglichten die Überwachung des Leitungsdrucks (P) sowie der Temperatur (T) der Pumpen in Echtzeit.

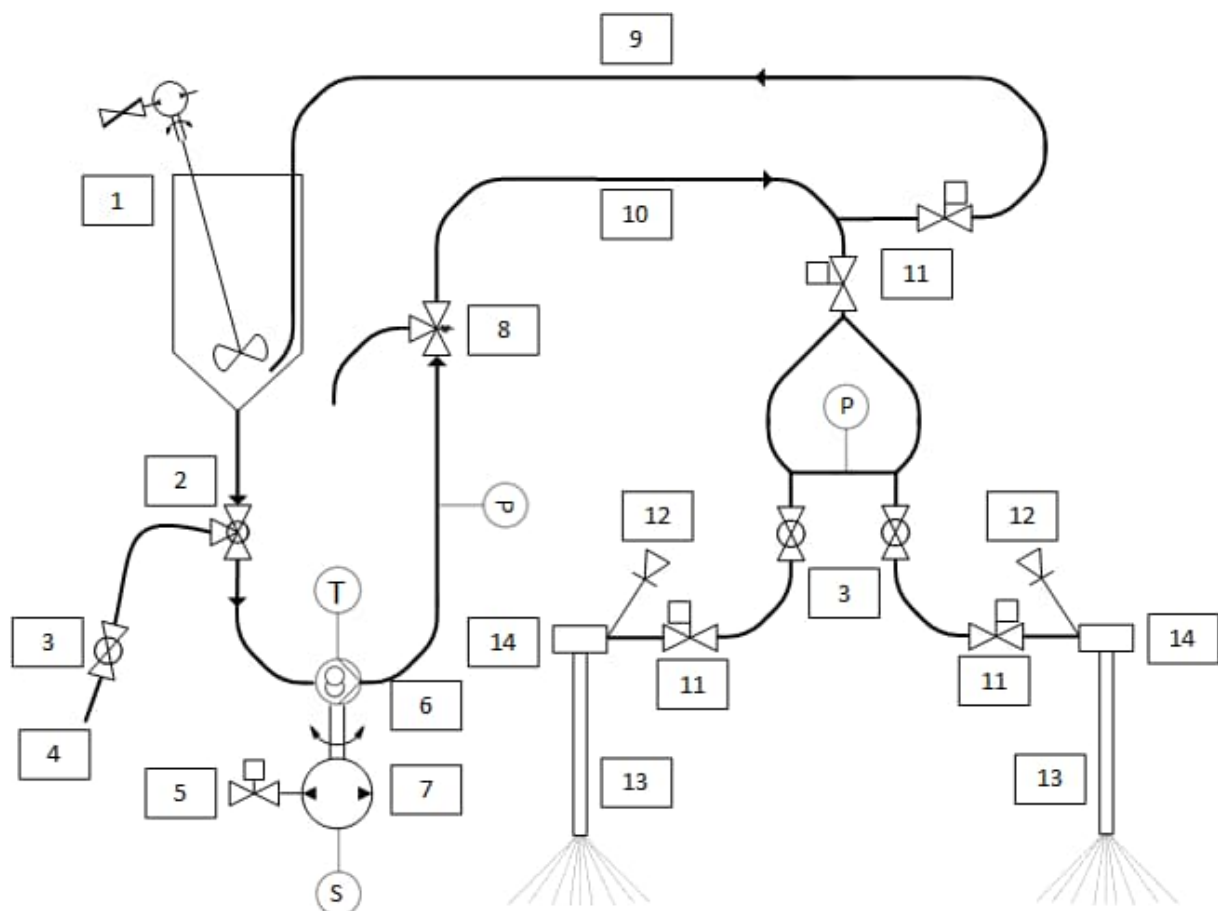


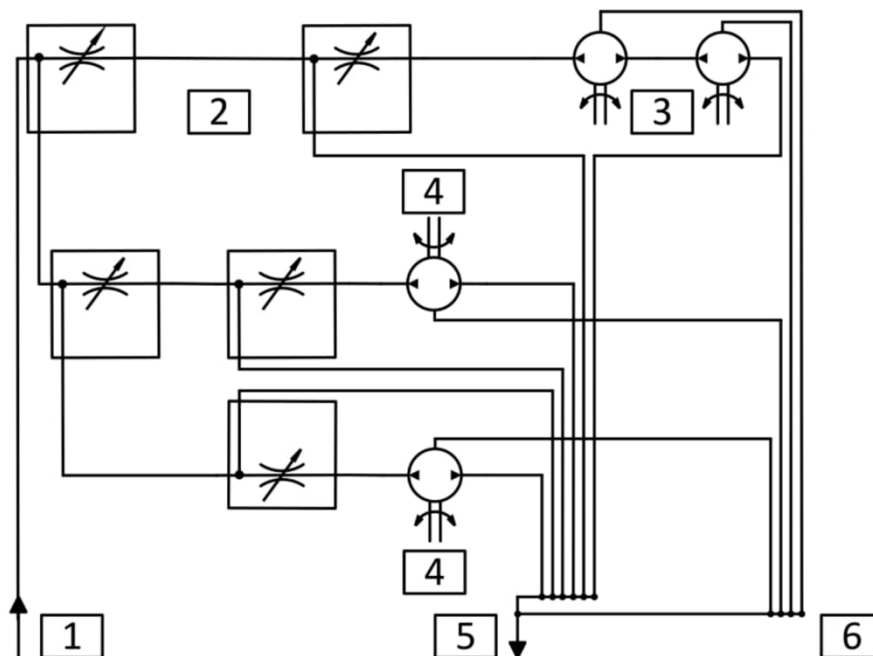
Abbildung 50: Hydraulikschema für eine Flüssigphase des Applikationsgeräts

Außerdem wurde im Leitungssystem ein Überdruckventil (8) eingebaut, dass sich bei einer Verstopfung beziehungsweise einem Druckanstieg bis zu 6 bar öffnet, um das System sowie die Pumpen vor einer Schädigung zu schützen.

Ein kritischer Punkt bei der Entwicklung der Leitungsführung war die Regulierung der Strömungsrichtung mittels der Ventile. Während die zuvor verbauten Magnetventile aufgrund des hohen Feststoffanteils des Mediums durch Ablagerung nicht mehr in der Lage waren dicht zu schließen, war für die Optimierung des Leitungssystems ein Umbau auf pneumatische Quetschventile (11) notwendig. Diese kommen in der Industrie häufig zum Einsatz, wenn stark verschmutzte Medien mit einem hohen Feststoffanteil wie beispielsweise bei Kieswerken oder Kläranlagen gefördert werden. Die Quetschventile zeigten eine effektive Wirkung bei der Fördersteuerung und verhinderten außerdem das Nachlaufen des Mulchmaterials unmittelbar nach Abschalten der Pumpen bei Applikationsstopp.

5.3.2.1.5 Hydraulik

Aufgrund einer unzureichend sensiblen Steuerung der Pumpendrehzahl durch den Zapfwellenantrieb, wurde nach alternativen Antriebsmöglichkeiten für das optimierte Applikationsgerät gesucht. Da die meisten Traktoren über einen Ölhydraulikanschluss verfügen, wurde auf einen rein hydraulischen Antrieb des Applikationsgeräts umgestellt. Ein ausführliches Schema des ölhydraulischen Leitungssystems ist in Abbildung 51 dargestellt. Um ausreichend Hydrauliköl für das Gerät zur Verfügung stellen zu können, braucht der Traktor, an dem das Gerät künftig angeschlossen wird, mindestens ein Ölstrom von 60 l/min.



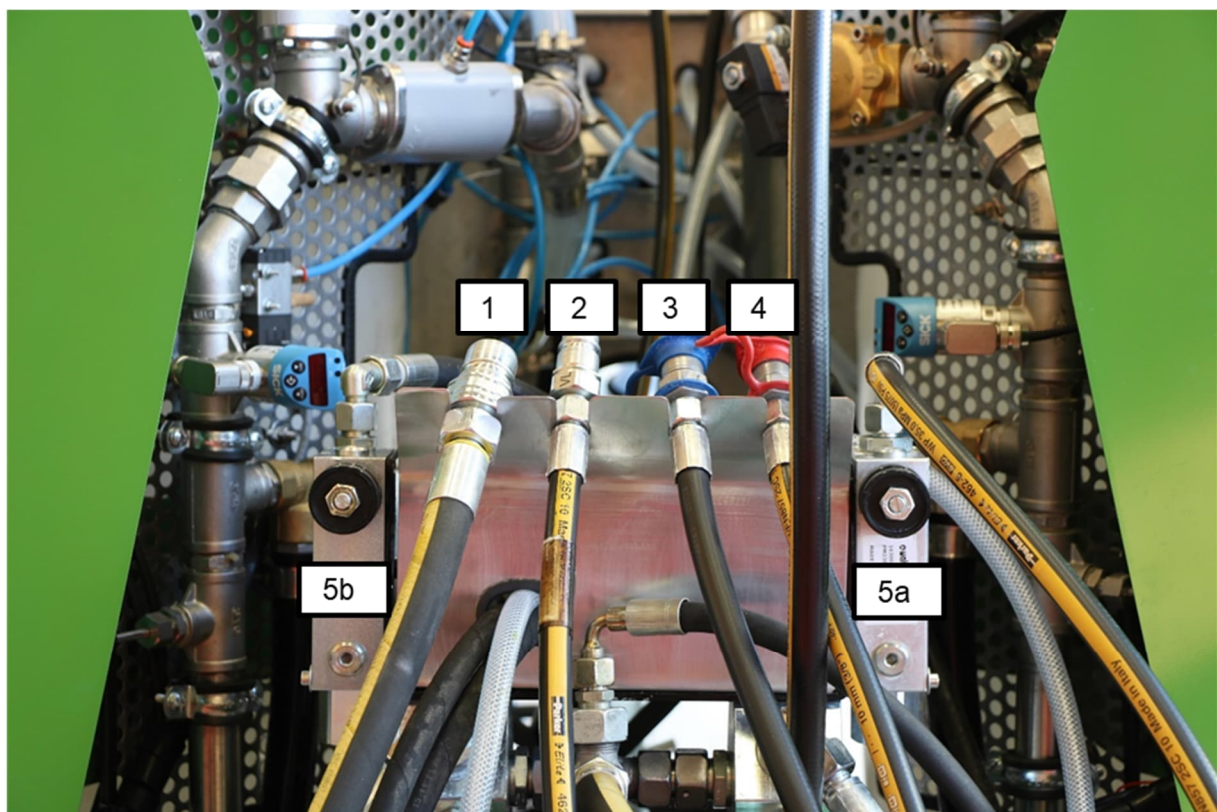
Legende:

- 1: Hydraulik Vorlauf Schlepper
- 2: Stromteiler
- 3: Hydromotoren der Rührer

- 4: Hydromotoren der Pumpe
- 5: Druckloser Hydrauliköl-Rücklauf
- 6: Leckölanschluss, mündet in drucklosen Rücklauf

Abbildung 51: Fließschema des Hydrauliksystems inklusive Vorlauf, Rücklauf und Lecköl

Für den Anschluss des Applikationsgeräts an die Hydraulik des Traktors wird zum einen ein druckloser Rücklauf (1), eine Druckleitung (2) sowie Hydraulikanschlüsse für den Verschieberahmen (3, 4) benötigt (Abbildung 52). Wie in Abbildung 50 dargestellt, können mithilfe von zwei Potentiometern die Proportionalventile (4) und somit die Drehzahl der Hydraulikmotoren (6) gesteuert werden. Die Hydraulikmotoren sind an den Zahnradpumpen angeschlossen und regulieren direkt die Drehzahl. Der rechte Durchflussteiler (5a) bestimmt die Ölmenge, welche den zwei Hydromotoren für den Antrieb der Rührer zugewiesen wird (Abbildung 52). Diese sind in Reihe geschaltet. Die nicht benötigte Ölmenge geht über den linken Durchflussteiler (5b) über jeweils ein Proportionalventil zu den zwei Hydromotoren, welche die Zahnradpumpen antreiben (Abbildung 52).

**Legende:**

1: Anschluss druckloser Rücklauf

2: Anschluss Druckleitung Hydraulik

3: Hydraulikanschlüsse Verschieberahmen

4: Hydraulikanschlüsse Verschieberahmen

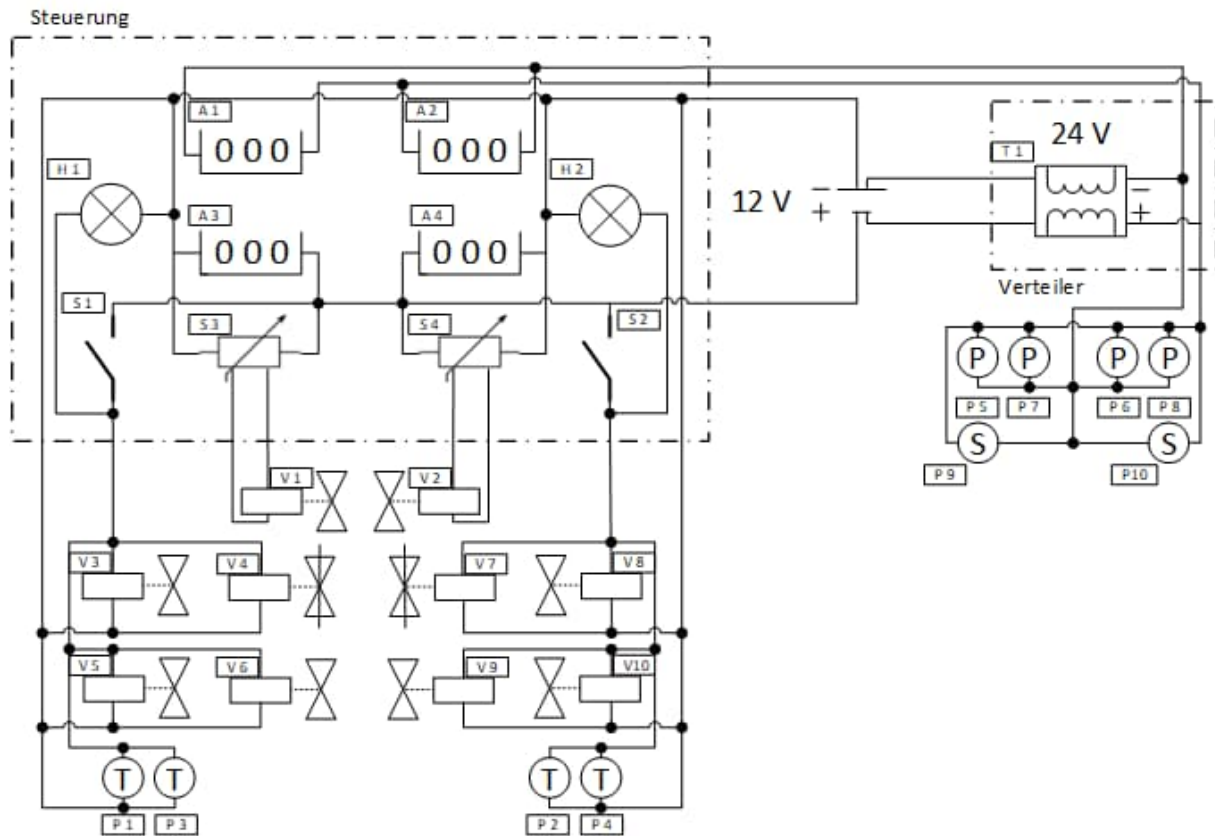
5a: rechter Durchflussteiler

5b: linker Durchflussteiler

Abbildung 52: Hydraulikanschlüsse und Durchflussteiler

5.3.2.1.6 Elektronische Steuerung

Um die Bedienung und Steuerung des Applikationsgeräts zu vereinfachen, wurde eine elektronische Steuerung im Gerät verbaut mithilfe derer das Heckgerät gesteuert werden kann. Ein ausführliches Schema zur elektronischen Steuerung ist in Abbildung 53 dargestellt.

**Legende:**

A1, A2: Temperaturanzeige Wasser-, bzw. Ölphase
 A3, A4: Drehzahlanzeige Wasser-, bzw. Ölphase
 H1, H2: Kontrollleuchte Wasser-, bzw. Ölphase, an beim Applizieren
 S1, S2: Kippschalter Wasser-, bzw. Ölphase, Stellung 0 = pumpt in Vorratstank
 S3, S4: Potentiometer Wasser-, bzw. Ölphase, Drehzahlregelung Pumpe
 V1, V2: Proportionalventile für Hydromotor der Pumpen von Wasser-, bzw. Ölphase
 V3, V8: Ventil zum Vorratstank Wasser-, bzw. Ölphase, schließt wenn S1, S2 auf I
 V4, V7: Ventil zu den Statikmischen Wasser-, bzw. Ölphase, öffnet wenn S1, S2 auf I
 V5, V6: Ventile vor Statikmischer Wasserphase (Tropfstop) öffnet wenn S1 auf I
 V9, V10: Ventile vor Statikmischer Ölphase (Tropfstop) öffnet wenn S2 auf I
 Ventile V5 – V10 sind pneumatisch angesteuert
 P1, P2: Temperatursensoren an Pumpengehäuse von Wasser-, bzw. Ölphase à A1, A2
 P3, P4: Temperatursensoren in Steigleitung zu Vorratstank von Wasser-, bzw. Ölphase, nicht angeschlossen
 T1: DC – DC Wandler
 P9, P10: Impulsgeber an Pumpenwelle Wasser-, bzw. Ölphase à A3, A4
 P5 – P8: Drucksensoren in Steigleitung zu Vorratstank und Leitung zu Statikmischer von Wasser-, bzw. Ölphase. Mit Display zum Ablesen

Abbildung 53: Elektronischer Schaltplan des Applikationsgeräts

Mithilfe eines Bedienterminals in der Fahrerkabine wird sichergestellt, dass die Bedienung des optimierten Applikationsgeräts einfach und vor allem sicher ist (Abbildung 54). Mit dem Bedienterminal kann der Fahrer die Drehzahl der Pumpen, welche über Drehzahlsensoren (S) (Abbildung 50) in Echtzeit gemessen wird, mithilfe von zwei Potentiometern steuern und anpassen, wobei die aktuellen Werte auf zwei kleinen Displays angezeigt werden. Andererseits kann, über die Steuerung der Ventilstellung mithilfe der beiden Kippschalter,

die Fließrichtung des Mediums im Leitungssystem gesteuert werden. In diesem Zusammenhang stehen zwei verschiedene Betriebsmodi zur Verfügung: Ist der Kippschalter auf 0-Stellung wird das Medium zurück in den Tank gepumpt, also im Kreis. Bei Umschalten auf die I-Stellung wird in den Applikationsmodus gewechselt und die jeweilige Komponente wird direkt zu den Statikmischern gefördert, um die finale Applikation zu ermöglichen. Für jede Komponente ist die Steuerung über das Bedienterminal separat möglich (Wasser links, Öl rechts) und kann dementsprechend auf das jeweilige Mischungsverhältnis exakt eingestellt werden. Außerdem zeigt das Bedienterminal auch die Temperatur der Pumpen an und warnt den Fahrer vor Trockenlaufen der Pumpen.



Abbildung 54: Bedienterminal des Applikationsgeräts zum Einbau in der Fahrerkabine

5.3.2.1.7 Testlauf/Auslitern

Für die Einstellung des richtigen Mischungsverhältnisses der beiden Komponenten von 1:1,85 musste ein geeignetes Fördervolumen der beiden Komponenten identifiziert werden. Gleichzeitig ist eine weitere wichtige Anforderung neben dem Fördervolumen auch ein geeigneter Leitungsdruck, um die Vermischung der Komponenten und einen breiten Sprühstrahl sicherzustellen. Hierfür war ein Mindestdruck von 2 bar angestrebt. Anpassungen des Leitungsdrucks wurden mithilfe verschiedener Querschnitte am Mischerblock durchgeführt.

Wie in Tabelle 33 dargestellt wurde ein geeignetes Fördervolumen der wässrigen Komponente bei einer Pumpendrehzahl von 705 rpm und einem Querschnitt von 4,7 mm erreicht. Der dabei gemessene Leitungsdruck lag bei 1,9 bar und die Fördermenge bei 25,7 kg/min.

Tabelle 33: *Fördermenge und Leitungsdruck in Abhängigkeit der Pumpendrehzahl, der Düsenanzahl und des Mischerblocks der wässrigen Komponente im Applikationsgerät*

Umdrehung Pumpe in rpm	Fördermenge in kg/min	Leitungsdruck in bar	Querschnitt Mischerblock in mm	Anzahl angesteuerte Düsen
536	18,0	1,1		1
711	24,5	2,7		1
770	24,3	2,5		1
536	21,5	0,6		2
711	28,8	1,1		2
770	31,4	1,2		2
705	25,7	1,9	4,7	2
750	27,4	2,1	4,7	2

Für die ölige Komponente wurde das geeignete Fördervolumen bei einer Drehzahl von 310 rpm erreicht, wobei der Leitungsdruck bei 2,3 bar lag und die Fördermenge 14,3 kg/min betrug. Der Querschnitt am Mischerblock hatte einen Durchmesser von 3,1 mm. Eine Zusammenfassung der gemessenen Fördermengen ist in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: *Fördermenge und Leitungsdruck in Abhängigkeit der Pumpendrehzahl, der Düsenanzahl und des Mischerblocks der öligen Komponente im Applikationsgerät*

Umdrehung Pumpe in rpm	Fördermenge in kg/min	Leitungsdruck in bar	Querschnitt Mischerblock in mm	Anzahl angesteuerte Düsen
350	16,6	1,9	3,5	2
300	14,1	1,4	3,5	2
310	14,3	2,3	3,1	2

5.3.2.2 Prototyp II Applikationsgerät MulchSprayer Vegi für die Reihenkultur

Nach umfangreichen Optimierungsmaßnahmen konnte der Umbau des Applikationsgeräts Prototyp II „MulchSprayer Vegi“ im Frühjahr 2024 fertig gestellt werden. Das optimierte Heckapplikationsgerät nach Umbau ist in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellt. Einen Überblick über die technischen Daten des umgebauten Applikationsgeräts ist in Tabelle 35 zusammengefasst.



Abbildung 55: Prototyp II MulchSprayer Vegi nach Umbau- und Optimierungsmaßnahmen in der Frontansicht - Stand 2025



Abbildung 56: Prototyp II MulchSprayer Vegi nach Umbau- und Optimierungsmaßnahmen in der Heckansicht - Stand 2025

Tabelle 35: Übersicht über die technischen Daten des MulchSprayer Vegi

Parameter	Maße
Baulänge	2400 mm
Baubreite	2670 mm
Abstellhöhe	2100 mm
Leergewicht	985 kg
Tankvolumen Phase A	200 l
Tankvolumen Phase B	200 l
Einfüllhöhe von Boden	1840 mm
Einfüllhöhe von Aufstieg	1310 mm

Für die Anlage der Feldversuche 2024 und 2025 erwies sich das optimierte Applikationsgerät „MulchSprayer Vegi“ als gut geeignet für die Applikation in Reihenkulturen. Durch die einfache Bedienung mithilfe eines Terminals in der Fahrerkabine des Traktors ließ sich das Gerät sicher steuern. Darüber hinaus konnte auch das Mischungsverhältnis der beiden Komponenten problemlos eingestellt werden. Durch den Einbau der Zahnradpumpen war die Förderleistung des Geräts und der in der Leitung entstandene Druck für eine

Applikation des Materials gewährleistet. Es wurde keine Pulsation des Sprühstrahls beobachtet, sodass wie in Abbildung 57 zu erkennen, das Sprühbild des Mulchmaterials gleichmäßig war. Mit der einfachen Höhenverstellung der Statikmischer war das Einstellen der Streifenbreite sehr gut möglich. Durch das effiziente Schließen der Quetschventile, vor dem Statikmischer konnte ein Nachlaufen des Mulchmaterials vollständig verhindert werden. Der Heckanbau des Applikationsgeräts stellte sich für die Applikation als auch für Transportfahrten als ideal dar; die erforderliche Hubkraft ist unkritisch.



Abbildung 57: Spritzbild bei der Applikation der 60 cm breiten Mulchstreifen mit dem MulchSprayer Vegi im Versuchsjahr 2024

Bei der Applikation im Jahr 2024 kam es zu einer Komplikation bei der Förderung der Wasserphase, welche schnell behoben werden konnte. Während der Applikation bildete sich im Tank der Wasserphase aufgrund des starken Rührens ein Konus, weshalb kurzzeitig Luft von der Pumpe angesogen wurde. Dementsprechend war das Vermischungsverhältnis der beiden Komponenten kurzzeitig vom Soll abweichend. Dieses Phänomen liegt vor allem daran, dass sich die Masse im Wassertank, die vom Rührer bewegt werden muss, verringert, wenn der Füllstand sinkt. Das bedeutet, dass weniger Flüssigkeit gegen die Rührerwelle wirkt, und somit die notwendige Kraft, um den Rührer in Bewegung zu halten, ebenfalls abnimmt. Wenn der Rührer weiterhin mit der gleichen Kraft wie zuvor rührt, kann er sich aufgrund der geringeren Masse schneller drehen. Durch Verringerung der Rührerdrehzahl konnte der Fehler deshalb schnell behoben werden und wieder ein optimales Mischungsverhältnis der beiden Phasen erreicht werden. Basierend auf den

Erfahrungen, wurde der Tank der Wasserphase mit einem am Boden liegenden Kreuz nachgerüstet wurde, um die Bildung eines Konus zu verhindern. Das Kreuz dient dabei als Brechvorrichtung, um die Entstehung eines konusförmigen Hohlraums zu unterbinden.

Auch bei der Applikation 2025 kam es zu einer kurzzeitigen Komplikation der Förderung der Wasserphase während der Applikation. Durch ein unvorhergesehenes Mitdrehen des oben beschriebenen Kreuzes im Tank der Wasserphase, wurden kleine Plastikteilchen der Tankwand abgeschabt, welche zur Verstopfung der nachgeschalteten Ventile führten. Dementsprechend wurde das Kreuz während der Applikation entfernt und die Drehzahl des Rührers reduziert, womit der Fehler behoben werden konnte. Für zukünftige Applikationen wurden die scharfen Kanten des am Boden des Tanks liegenden Kreuzes zur Brechung des Konus entfernt und das Kreuz wieder im Tank der Wasserphase installiert.

5.4 Gewächshausversuche und Freilandversuche am Standort Straubing

5.4.1 Untersuchung alternativer Gemüsekulturen auf ihre Eignung für das Mulchmaterial im Gewächshaus

5.4.1.1 Grünkohl

Im Vergleich zur Kontrolle war die Entwicklung der kultivierten Grünkohlpflanzen im Mulchmaterial etwas langsamer als die der Nullvarianten (ohne Behandlung). Dafür verantwortlich könnte eine Interaktion der Pflanzen mit dem LiquiMulch, beziehungsweise mit den darin enthaltenen Inhaltsstoffen sein. Der Unterschied war sowohl in der Anzahl der Blätter als auch beim Pflanzendurchmesser zu erkennen (Abbildung 58). Allerdings konnten die Kulturpflanzen im Mulchmaterial den leichten Entwicklungsrückstand bis zum Versuchsende aufholen, weshalb die etwas verzögerte Entwicklung der Kulturpflanzen scheinbar vernachlässigbar ist. Für eine finale Evaluierung der Eignung des Mulchmaterials müssten zukünftig noch weitere Versuche vor allem im Freiland durchgeführt werden.

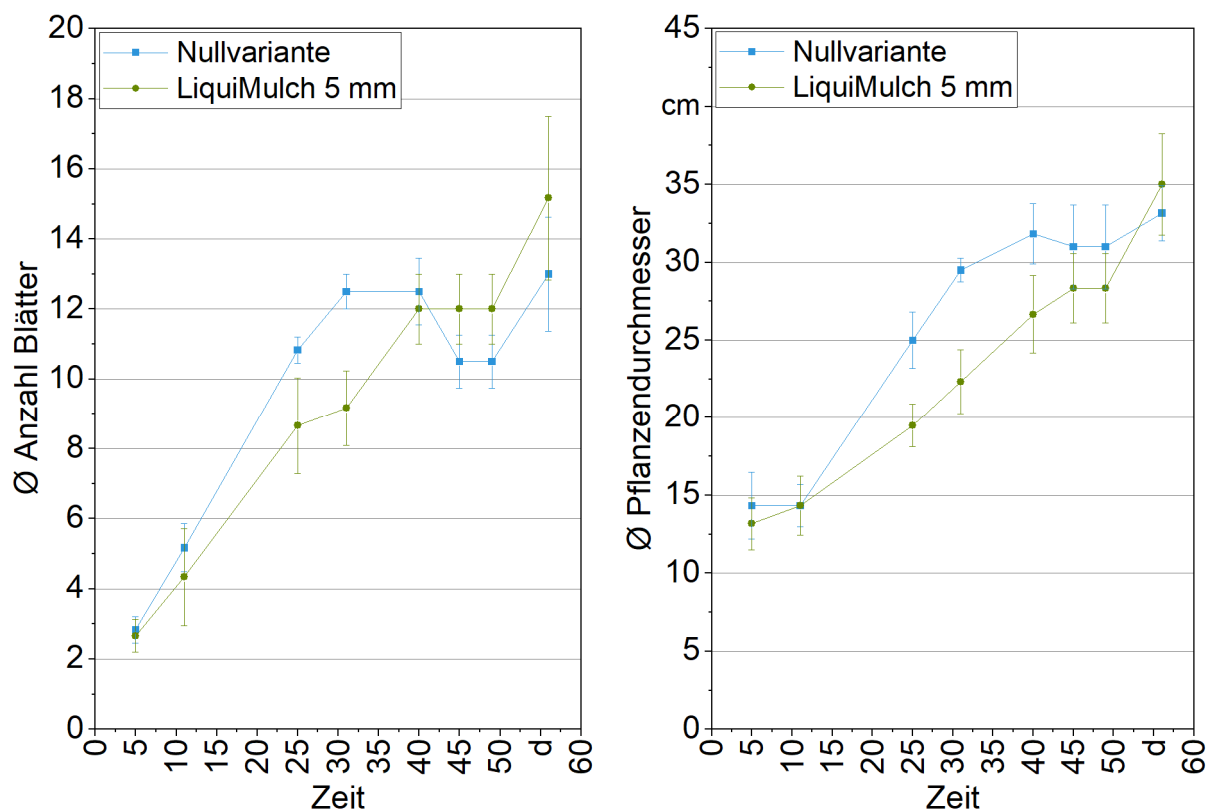


Abbildung 58: Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Pflanzendurchmesser (rechts) des Grünkohls über die Zeit (MW $\pm$ SEM, n = 3)

5.4.1.2 Mangold

Die Mangoldpflanzen zeigten eine zwischen den beiden Varianten der Nullvariante und LiquiMulch 5 mm ähnliche Entwicklung der Anzahl der Blätter und der Wuchshöhe (Abbildung 59). Es konnten keine signifikanten Unterschiede über die Zeit beobachtet werden, weshalb die Verwendung von LiquiMulch bei der Kultivierung von Mangold grundsätzlich geeignet sein könnte. Für eine abschließende Evaluierung der Praxistauglichkeit des Mulchmaterials sind weitere Versuche im Freiland notwendig.

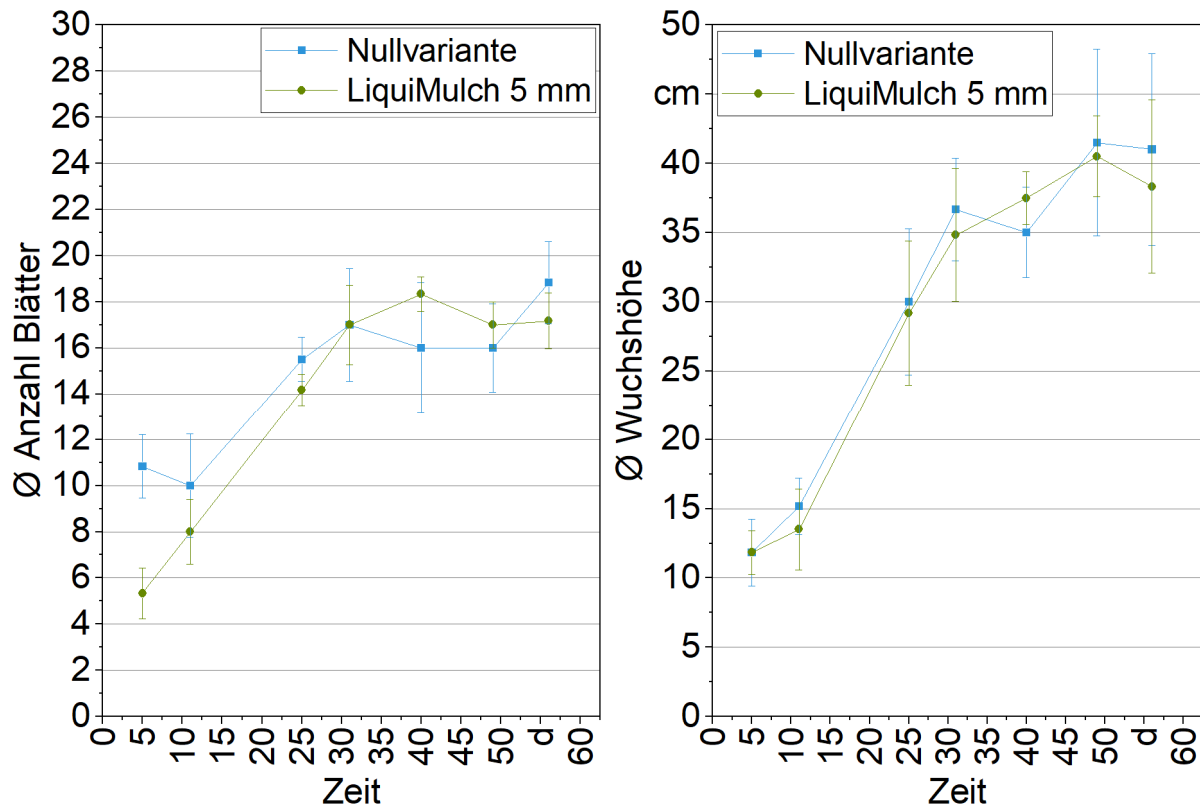


Abbildung 59: Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) und Wuchshöhe (rechts) der Mangoldpflanzen über die Zeit (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

5.4.1.3 Erdbeeren

Die Auswertung der Bonitur der Erdbeersorte 'Korona' zeigte eine stetige Entwicklung der Erdbeerpflanzen über die Zeit, sowohl ohne Behandlung als auch mit Mulchmaterial (Abbildung 60). Es konnte kein Unterschied zwischen der angesetzten Anzahl von Blättern und dem gemessenen Pflanzendurchmesser über die Zeit beobachtet werden. Dementsprechend konnte im Hinblick auf die Kulturpflanzenentwicklung kein negativer Effekt des Mulchmaterials auf Erdbeeren festgestellt werden.

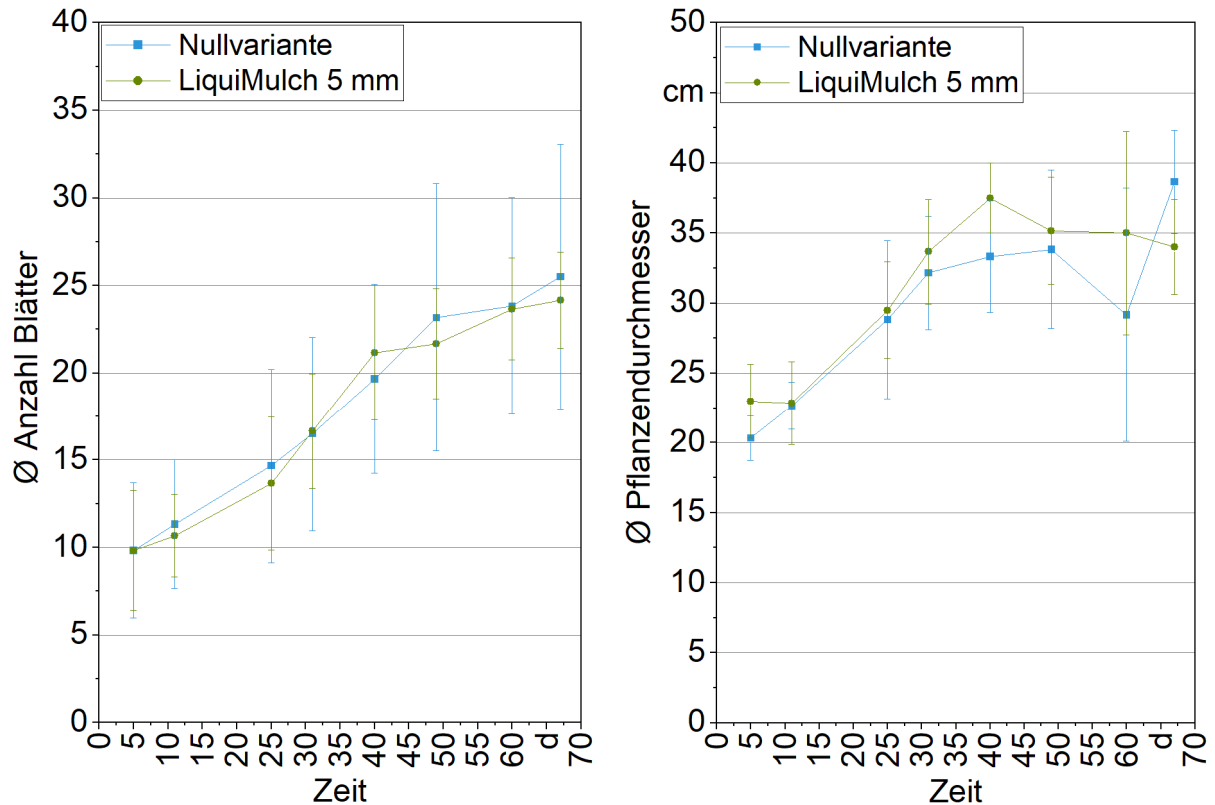


Abbildung 60: Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Pflanzendurchmesser (rechts) der Erdbeeren über die Zeit (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

Allerdings konnte beobachtet werden, dass die Früchte der Erdbeerpflanzen, die über einen längeren Zeitraum in direktem Kontakt mit LiquiMulch waren, faulige Stellen entwickelten (Abbildung 61). Dieser Effekt könnte z. B. mit dem im Mulchmaterial enthaltenen Wasser zusammenhängen, welches teilweise wieder vom Mulchmaterial abgegeben wird und das gegebenenfalls verhindert, dass die Früchte abtrocknen. Außerdem konnte beobachtet werden, dass die Erdbeeren an den Kontaktstellen mit dem LiquiMulch, das Mulchmaterial rot verfärbten (Abbildung 61). Aufgrund der Schädigung des Ernteguts bei Kontakt zwischen Erdbeeren und Mulchmaterial, ist von der Verwendung des Mulchmaterials bei der Erdbeerkultivierung nach derzeitigem Stand abzuraten.



Abbildung 61: Verschimmelte Erdbeere auf dem Mulchmaterial und Verfärbung des Mulchmaterials - Bild vom 22.08.23

5.4.1.4 Pak Choi

Die Pflänzchen des Pak Choi, die im Mulchmaterial kultiviert wurden, zeigten eine vergleichbare Kulturpflanzenentwicklung wie die Nullvariante ohne Behandlung. Vor allem beim Ansetzen neuer Blätter konnte zwischen den Varianten keine Unterschiede festgestellt werden (Abbildung 62). Bei der Entwicklung der Wuchshöhe dagegen konnte bei den letzten drei Bonituren eine leichte Abweichung beobachtet werden, wobei die Entwicklung der Pak Chois der Nullvariante etwas verlangsamt war. Diese Beobachtung könnte w-möglich auf eine bessere Wasserversorgung der LiquiMulch-Variante zurückzuführen sein, denn das Mulchmaterial kann neben seinem beikrautunterdrückenden Effekt auch die Verdunstung von Wasser reduzieren (vgl. 5.2.3). Für eine abschließende Evaluierung der Praxistauglichkeit des Mulchmaterials bei der Kultivierung von Pak Choi müssen weitere Versuche vor allem im Freiland durchgeführt werden.

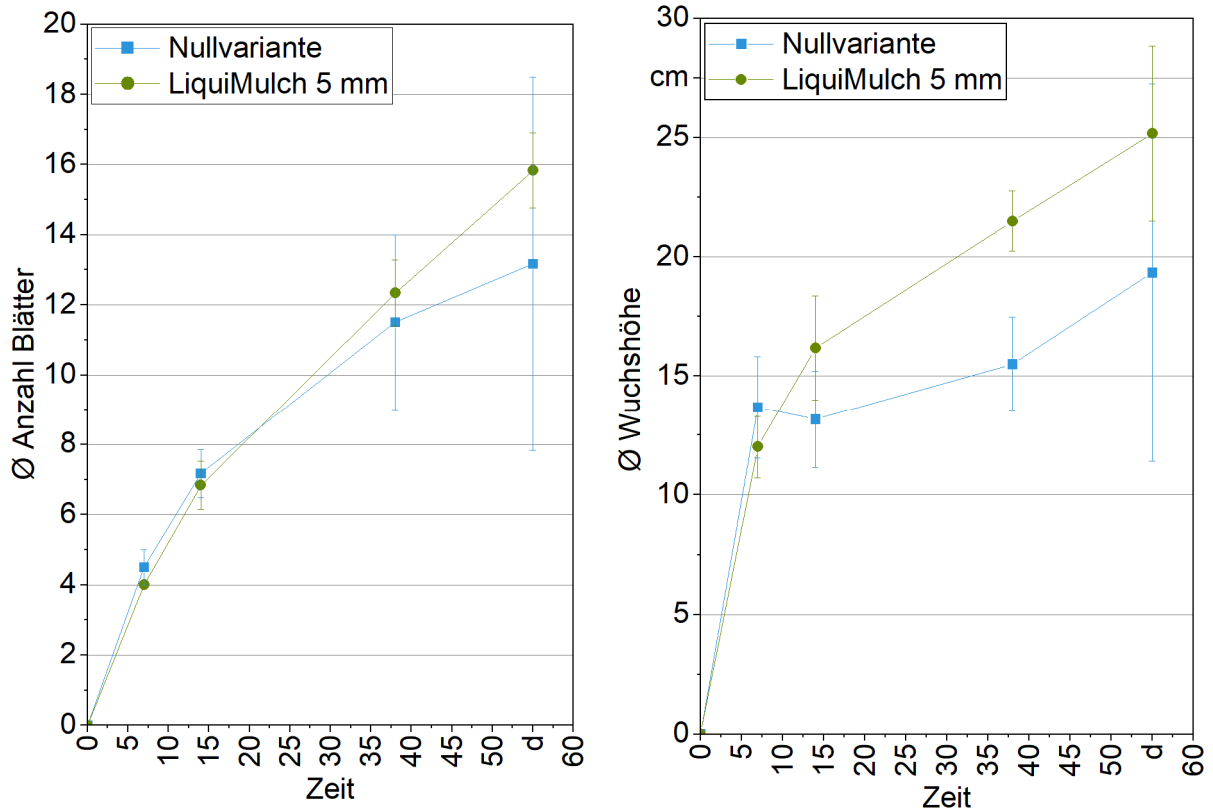


Abbildung 62: Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Wuchshöhe (rechts) der Pak Choi über die Zeit (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

5.4.1.5 Weißkohl

Die Auswertung der Kulturpflanzenbonitur des Weißkohls zeigte ein gleichmäßiges Wachstum der Pflanzen über die Zeit, unabhängig von der An- oder Abwesenheit des LiquiMulchs (Abbildung 63). Sowohl bei der Anzahl der entwickelten Blätter über die Zeit als auch bei der Wuchshöhe konnten keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Dementsprechend hat das Mulchmaterial scheinbar keinen Einfluss auf die Kultivierung von Weißkohl. Für eine abschließende Evaluierung der Eignung müssten im Anschluss zu den Gewächshausversuchen weitere Versuche im Freiland durchgeführt werden.

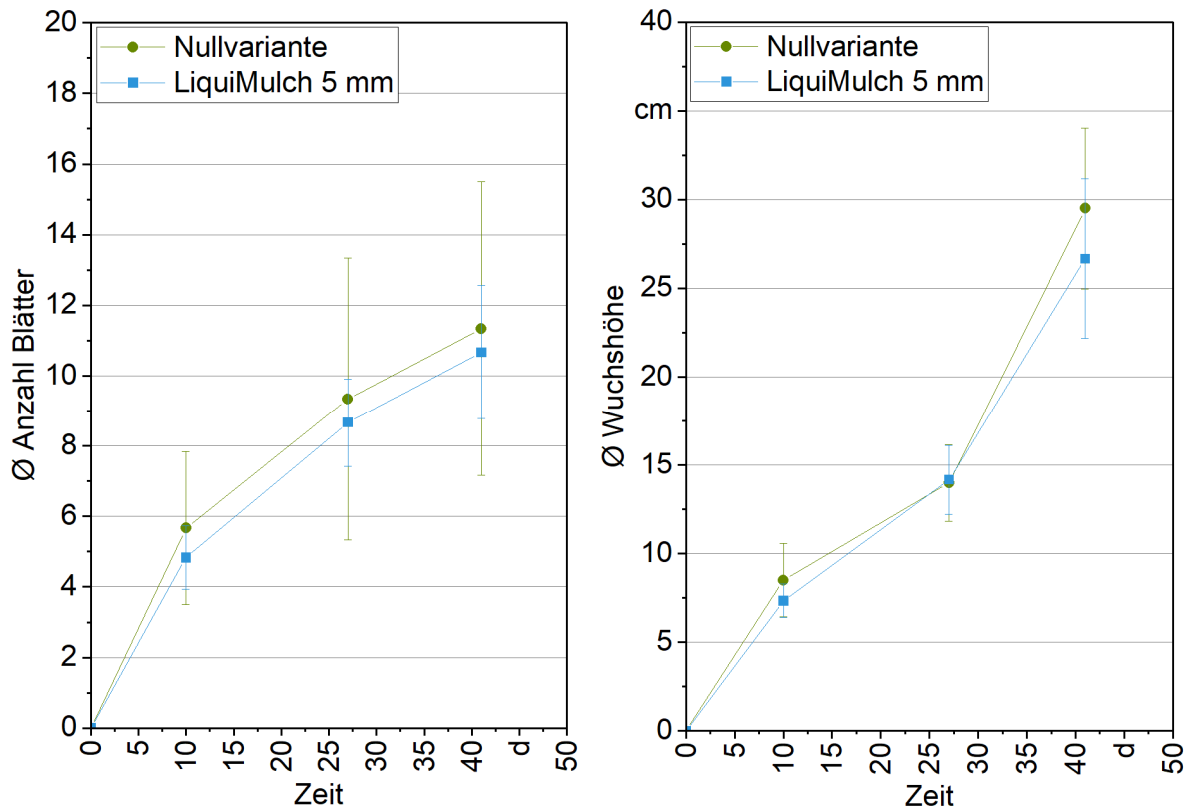


Abbildung 63: Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Wuchshöhe (rechts) des Weißkohls über die Zeit (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

5.4.1.6 Kohlrabi

Die Kohlrabi Pflänzchen zeigten im Laufe des Gewächshausversuchs für beide Varianten, Nullvariante und LiquiMulch, eine vergleichbare stetige Entwicklung im Hinblick auf die Anzahl der Blätter als auch auf die Wuchshöhe (Abbildung 64). Da keine Unterschiede beobachtet wurden, kann daraus gefolgert werden, dass das Mulchmaterial für den Einsatz bei der Kultivierung von Kohlrabi geeignet sein könnte. Für eine abschließende Evaluierung der Praxistauglichkeit müssen allerdings weitere Versuche vor allem im Freiland durchgeführt werden.

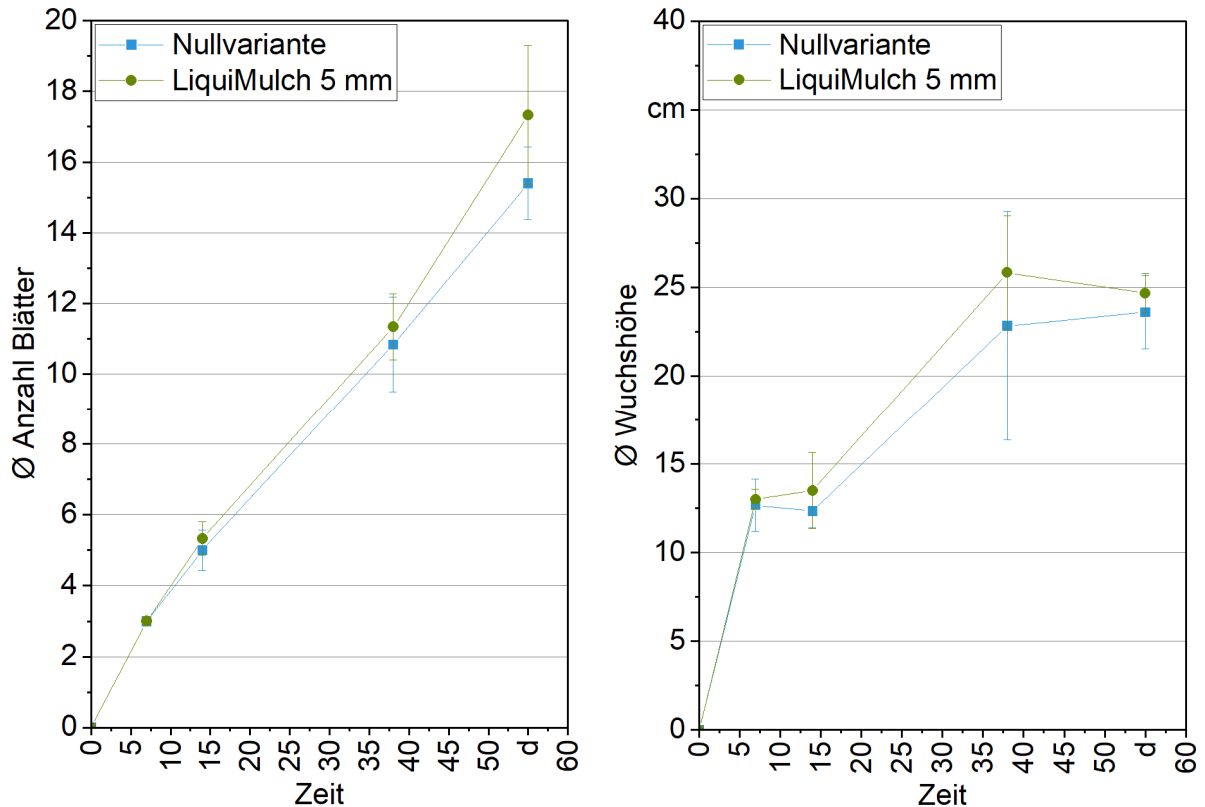


Abbildung 64: Durchschnittliche Anzahl der Blätter (links) sowie Wuchshöhe (rechts) des Kohlrabis über die Zeit (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

5.4.1.7 Tomaten

Außerdem wurde auch ein Tastversuch zur Kulturverträglichkeit zwischen Tomaten und dem LiquiMulch im Gewächshaus durchgeführt. Die untersuchten Boniturparameter wie die Anzahl der Frucht- und Blütenstände, Internodienlänge, Pflanzenfärbung, Pflanzenwachstum sowie die Anzahl geernteter Tomaten zeigten keine Unterschiede zwischen der Mulchvariante und der Kontrolle (Daten nicht gezeigt). Dementsprechend könnte das Mulchverfahren bei der Kultivierung von Tomaten geeignet sein. Besonders für Tomaten, die sehr wasserbedürftig sind, ist LiquiMulch interessant, da es neben seiner beikrautunterdrückenden Wirkung vor allem positive Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt hat.

5.4.2 Vorversuche im Gewächshaus für die geplanten Feldversuche

5.4.2.1 Vorversuche für das Versuchsjahr 2023

Für den geplanten Feldversuch 2023 wurden Vorversuche zur Identifizierung des optimalen Aussaatzeitpunkt durchgeführt. In Gewächshausversuchen wurden die Kulturpflanzen Kürbis, Zucchini, Melone, Gurke und Zuckermais untersucht.

Kürbis

Für die Untersuchung des optimalen Aussaatzeitpunkts der Kürbissamen, wurden unter anderem die Keimung der Kürbissamen sowie die anschließende Entwicklung der Kürbis-pflänzchen nach dem Durchwachsen durch das Mulchmaterial analysiert. Die Keimung der beiden Versuchsvarianten Nullvariante (ohne Behandlung) und LiquiMulch 5 mm zeigte keine signifikanten Unterschiede und lag bei 100 % (Abbildung 65). Auch die Kulturpflanzenentwicklung der beiden Varianten unterschied sich nicht, weshalb eine Beeinträchtigung der Pflänzchen aufgrund des Durchwachsens ausgeschlossen werden konnte (Abbildung 65).

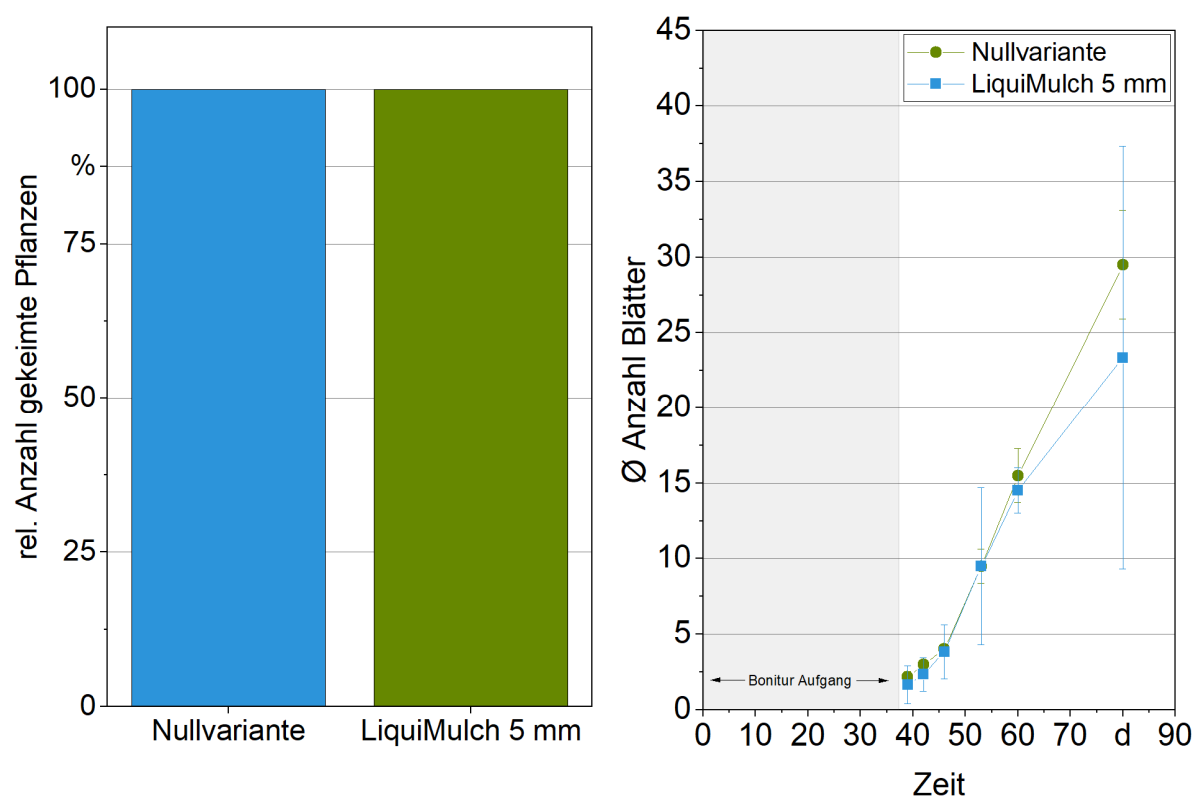


Abbildung 65: Relative Anzahl gekeimter Kürbissamen (links) und durchschnittliche Anzahl an angesetzten Blättern im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) beim Kürbis - Variante Saat vor Applikation, (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

Durch die Aussaat der Kürbissamen vor der Applikation kann eine Beschädigung des Mulchmaterials bei der Überfahrt mit dem Sägerät vermieden werden. Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche wurde folglich festgelegt, dass eine Aussaat im geplanten Feldversuche 2023 vor der Applikation durchgeführt werden soll.

Zucchini

Die Untersuchungen des optimalen Aussaatzeitpunkts für Zucchini-samen vor oder nach Applikation des Mulchmaterials deuten an, dass die Kulturpflanze Zucchini aufgrund ihrer starken Wüchsigkeit in der Lage ist, das Mulchmaterial zu durchstoßen. Wie in Abbildung 66 zu erkennen ist, lag der Durchwuchserfolg bei 100 %. Auch die anschließende

Entwicklung der Pflanzen über die Zeit zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Varianten, weshalb eine Beeinträchtigung der Pflanze beim Durchwachsen durch das LiquiMulch ausgeschlossen werden kann (Abbildung 66).

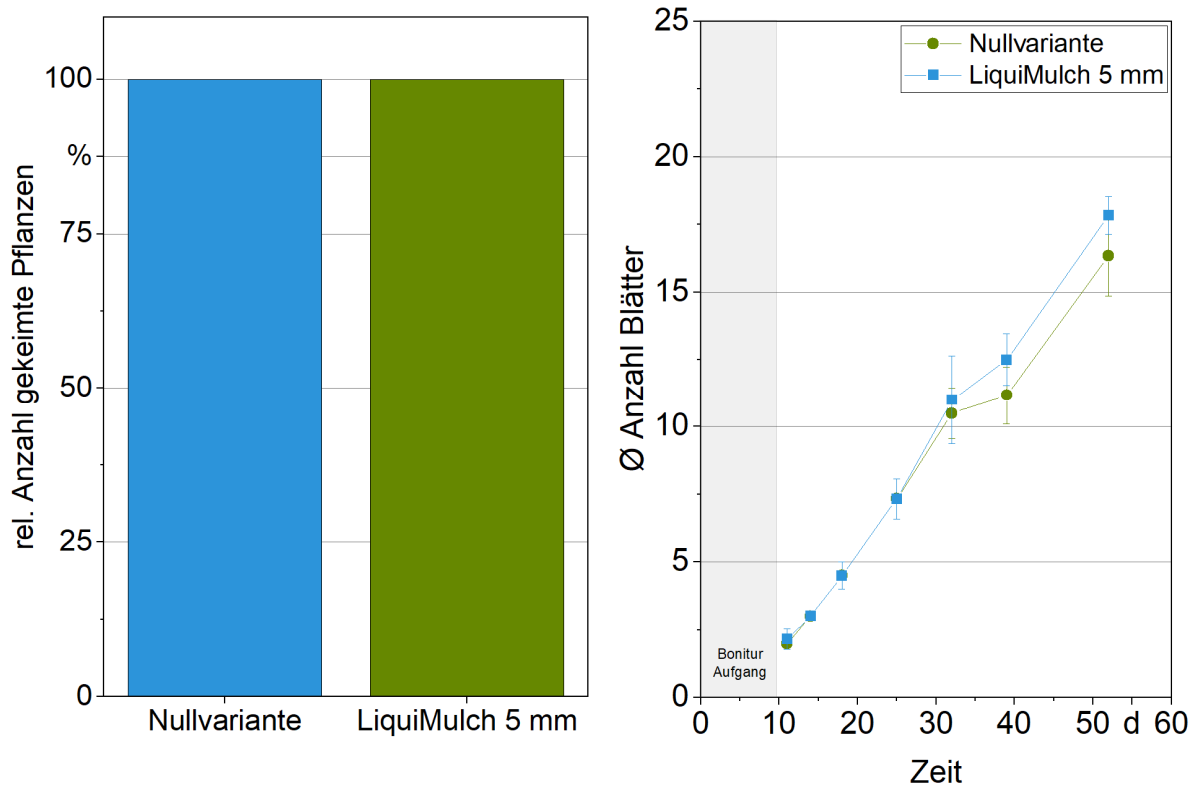


Abbildung 66: Relative Anzahl gekeimter Zucchiniisamen (links) und durchschnittliche Anzahl an angesetzten Blättern im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) bei der Zucchini - Variante Saat vor Applikation, ($MW \pm SEM$, $n = 3$)

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde für das Versuchsdesign des Feldversuchs 2023 festgelegt, dass die Zucchini zuerst ausgesät wird und die Applikation des LiquiMulchs einen Tag später erfolgt.

Melone

Für die Untersuchung der optimalen Aussaat beziehungsweise optimalen Applikationszeitpunkt des LiquiMulchs bei der Kultivierung der Melone, wurden die Melonensamen 24 h nach Applikation in das ausgehärtete Mulchmaterial gesät. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Samen der Melonensorte 'Etchabi' durch die Anwesenheit des Mulchmaterials erheblich bei der Keimung gestört wurden. Eine schlechte Keimungsfähigkeit des Saatguts kann ausgeschlossen werden, denn die Keimung der Nullvariante lag bei über 90 % und entspricht damit genau den Angaben des Herstellers (Abbildung 67). Dagegen zeigte die anschließende Kulturpflanzenentwicklung der gekeimten Samen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Versuchsvarianten, weshalb hier die

Anwesenheit des Mulchmaterials scheinbar keinen negativen Einfluss auf die Kulturpflanze hatte (Abbildung 67).

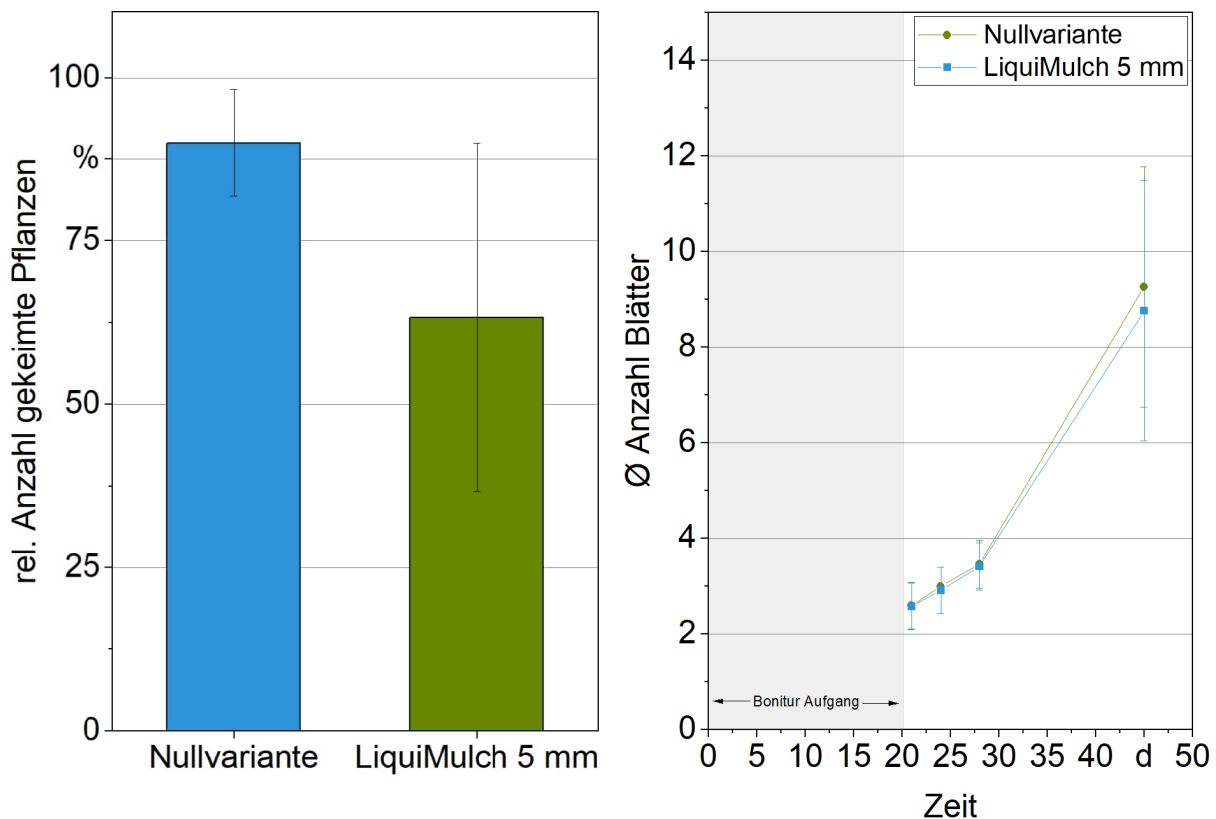


Abbildung 67: Relative Anzahl gekeimter Melonensamen (links) und durchschnittliche Anzahl an angesetzten Blättern im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) bei den Melonen - Variante Saat vor Applikation, (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

Daraufhin wurde entschieden, dass eine Pflanzung vorgezogener Melonenpflänzchen in das Material die besten Erfolgsaussichten für den Feldversuch 2023 zeigt. Die Melonenpflänzchen wurden 24 h nach Applikation in das ausgehärtete Mulchmaterial gepflanzt.

Einlegegurke

Für die Festlegung des optimalen Aussaat- und Applikationszeitpunkts im Rahmen der Kultivierung der Einlegegurke wurde auf die umfangreichen Erkenntnisse des Vorgängerprojekts "MuNaRo" zurückgegriffen. Dementsprechend wurde die Einlegegurke 24 h nach Applikation in das Mulchmaterial gesät.

Zuckermais

Die Untersuchung des optimalen Applikationszeitpunktes bei der Kultivierung von Zuckermais ergab, dass eine Aussaat des Zuckermais vor Applikation des Mulchmaterials erfolgen kann. Die Keimung des Saatguts unter der Mulchschicht war mit einem relativen Keimungserfolg von ca. 85 % vergleichbar zum relativen Keimungserfolg der Nullvariante

(Abbildung 68). Auch die anschließende Entwicklung des Zuckermaises zeigte keine signifikanten Unterschiede (Abbildung 68).

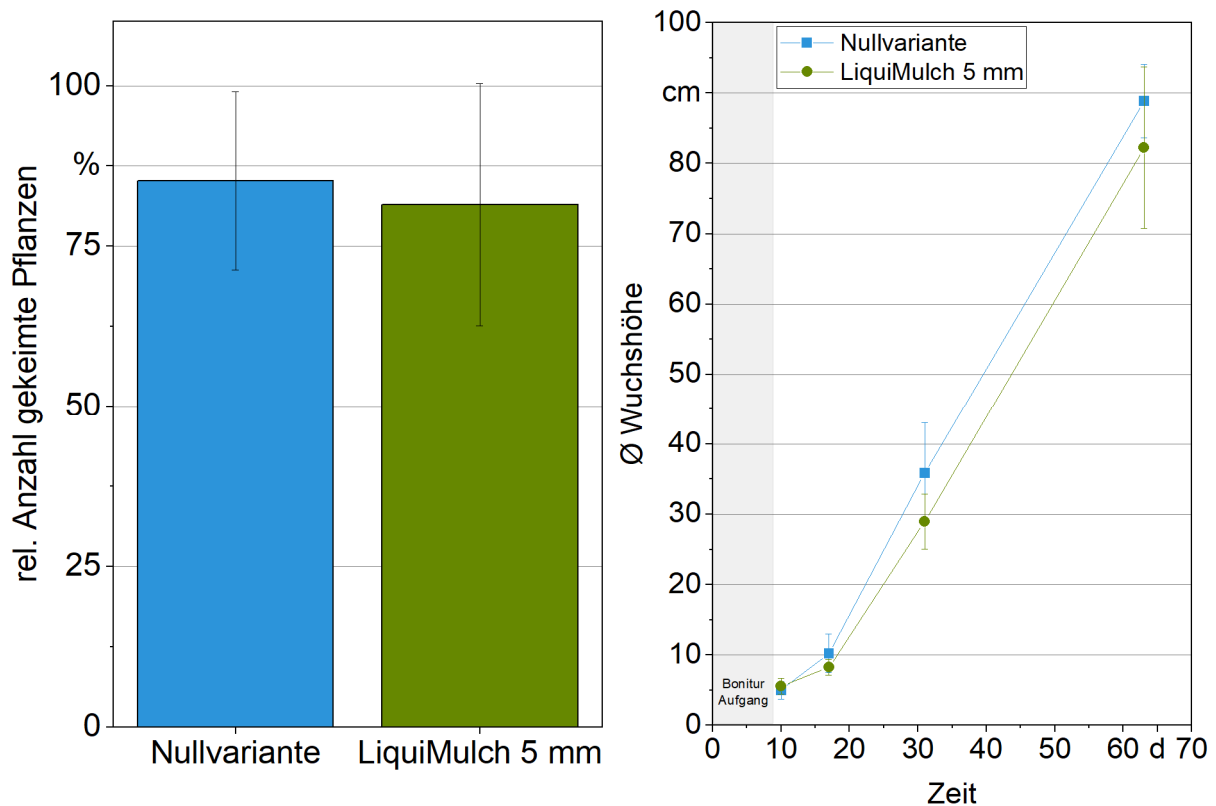


Abbildung 68: Relative Anzahl gekeimter Zuckermassamen (links) und durchschnittliche Wuchshöhe im zeitlichen Verlauf als Maß für die Pflanzenentwicklung (rechts) beim Zuckermais - Variante Saat vor Applikation, (MW $\pm$ SEM, $n = 3$)

Basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche wurde deshalb beschlossen, dass die Aussaat des Zuckermaises im Feldversuchs 2023 vor der Applikation des LiquiMulchs stattfinden soll.

5.4.2.2 Vorversuche für das Versuchsjahr 2024

Aufgrund eines mangelhaften Bestandsschluss der Einlegegurke im Versuchsjahr 2023 wurde im September 2023 ein Tastversuch zur Einlegegurke angelegt. Das Ziel bestand darin, die Gründe für die Unterschiede bezüglich der Entwicklung der Kulturpflanzen im Gewächshaus und auf dem Versuchsfeld zu identifizieren. Hierfür wurden unterschiedliche Aussaatzeitpunkte (vor / nach Applikation) sowie zwei verschiedene Bewässerungsstrategien (trocken / nass) näher untersucht.

Bei der Variante, bei der weniger bewässert wurde (Wassersaugspannung 500 hPa), kam es vor allem bei der LiquiMulch 2,5 mm und 5 mm Variante zu erheblichen Ausfällen.

Diese Beobachtung war unabhängig vom Zeitpunkt der Applikation (vor / nach) (Abbildung 69). Die Keimung der Samen in der Mulchvariante mit 1,5 mm war vergleichbar zur Kontrollvariante. Dies lässt vermuten, dass in dieser Versuchsanstellung die Schichtdicke einen deutlichen Einfluss auf die Keimung der Einlegegurkensamen nimmt. Eine Schichtdicke von 2,5 mm und vor allem noch dicker könnte für die optimale Kultivierung der Einlegegurken problematisch sein.

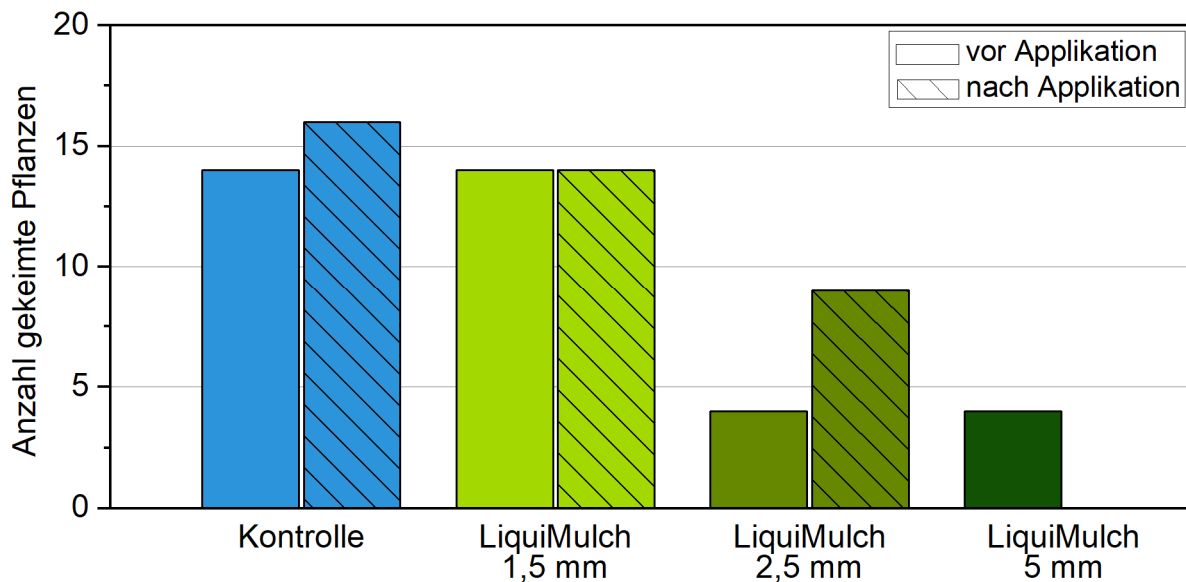


Abbildung 69: Anzahl gekeimter Gurkensamen bei einer Aussaat vor und nach Applikation und einer Wassersaugspannung von 500 hPa (MW)

Bei der Variante, bei der mehr bewässert wurde (Wassersaugspannung 200 hPa), zeigten sich im Vergleich zur trockeneren Variante etwas andere Ergebnisse (Abbildung 70). Hier war ebenfalls zu erkennen, dass die Schichtdicke des Materials von 2,5 mm und 5 mm zum Durchwachsen der Gurkenkeimlinge zu dick war, weshalb es hier zu großen Ausfällen kam. Wurden die Samen allerdings nach Applikation ins Material gesät, wurden bei einer Schichtdicke von 2,5 mm ähnlich gute Ergebnisse wie in der Kontrolle beziehungsweise in der 1,5 mm-Variante erzielt. In der LiquiMulch 5 mm Variante kam es wiederum zu großen Ausfällen.

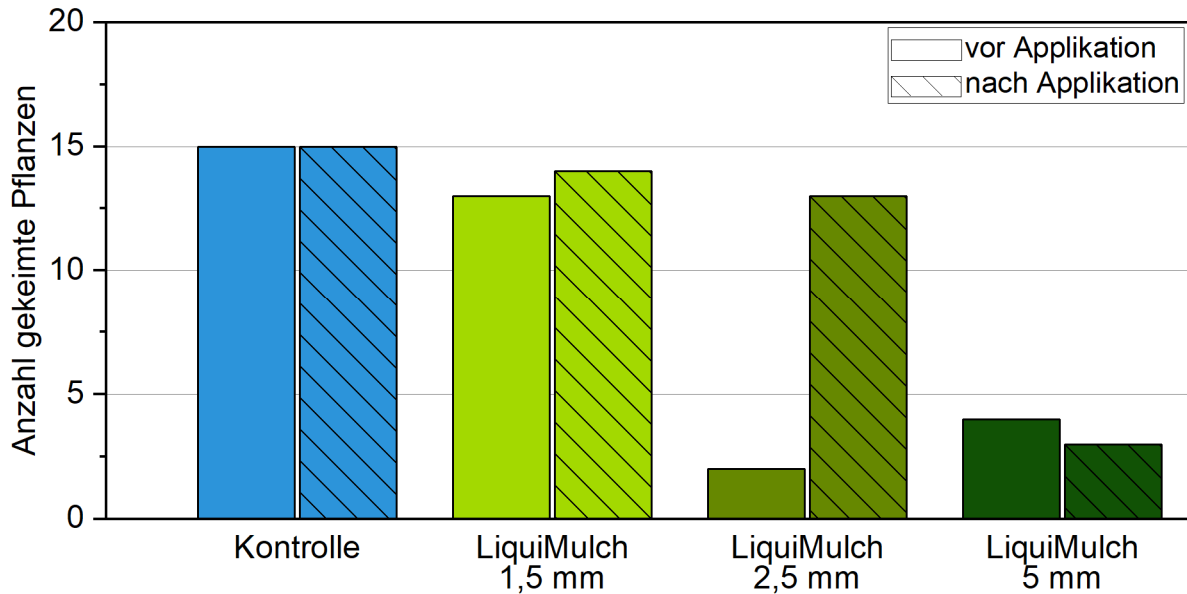


Abbildung 70: Anzahl gekeimter Gurkensamen bei einer Aussaat vor und nach Applikation und einer Wassersaugspannung von 200 hPa (MW)

Zusammenfassend zeigen die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Bewässerungsvarianten, dass neben der Schichtdicke auch eine optimale Bewässerung und der richtige Applikationszeitpunkt maßgeblich für den Erfolg der Kultivierung der Einlegegurken unter Verwendung des Mulchmaterials verantwortlich sind. Gleichzeitig muss aber beachtet werden, dass im zweiten Tastversuch der Aussaatzeitpunkt der Gurkensamen vom 13.-14.09.2023 erheblich vom üblichen Aussaatzeitpunkt abwich, was ebenfalls einen negativen Einfluss auf das Keimverhalten der Gurkensamen haben könnte.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen des Tastversuchs, wurde der Aussaatzeitpunkt für den Feldversuch 2024 für die Einlegegurke, wie auch in der Praxis üblich, deutlich früher angesetzt. Außerdem wurde im Jahr 2024 über die Firma GWE ein Bewässerungssystem im Feldversuch installiert, die eine genaue Steuerung der Bewässerung der Parzellen ermöglichen soll. Im Hinblick auf die maximale Mulchschichtdicke wurden 4 mm als dickste Variante festgelegt.

5.4.2.3 Vorversuche für das Versuchsjahr 2025

Aufgrund erneut mangelhafter Keimung der Einlegegurkensamen im Versuchsjahr 2024 wurden im Winter 2024 und Frühjahr 2025 in Bamberg und in Straubing mehrere Gewächshausversuche zur Untersuchung der optimalen Keimungsbedingungen der Einlegegurke durchgeführt. Außerdem wurde untersucht, inwiefern sich die konventionelle Aussaattechnik, die beim Landwirt in der Praxis Anwendung findet, möglicherweise positive auf die Keimungsfähigkeit der Samen auswirkt. Die Aussaat fand bei allen Varianten nach der Applikation des Mulchmaterials statt.

Dabei konnte festgestellt werden, dass eine Aussaat in ein ausgestanztes Saatloch mit der Größe von 3 cm im Durchmesser deutlich negative Auswirkungen auf die Keimungsfähigkeit des Saatguts hatte. Währenddessen erzielten die anderen Varianten "Gießwasser" und die beiden Sätechnikvarianten mit einem Keimungserfolg von am Ende 80 - 90 % eine sehr gute Keimungsfähigkeit. Der Keimungserfolg war sogar besser als die Keimung der Kontrolle (ohne Behandlung) (Abbildung 71). Gründe für die bessere Keimungsfähigkeit der Samen könnten zum einen die höhere Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial sein, welche sich positiv auf die Keimung der Einlegegurken-Samen auswirkt. Zum anderen könnte aber auch eine maschinelle Aussaat verhindert haben, dass das Saatgut direkt mit dem Mulchmaterial in Kontakt gekommen ist, was sich zusätzlich positiv auf die Keimung der Samen auswirkt. Warum die Keimung der Samen in ein zuvor ausgestanztes Loch deutlich schlechter war im Vergleich zu den anderen Varianten bleibt allerdings unklar.

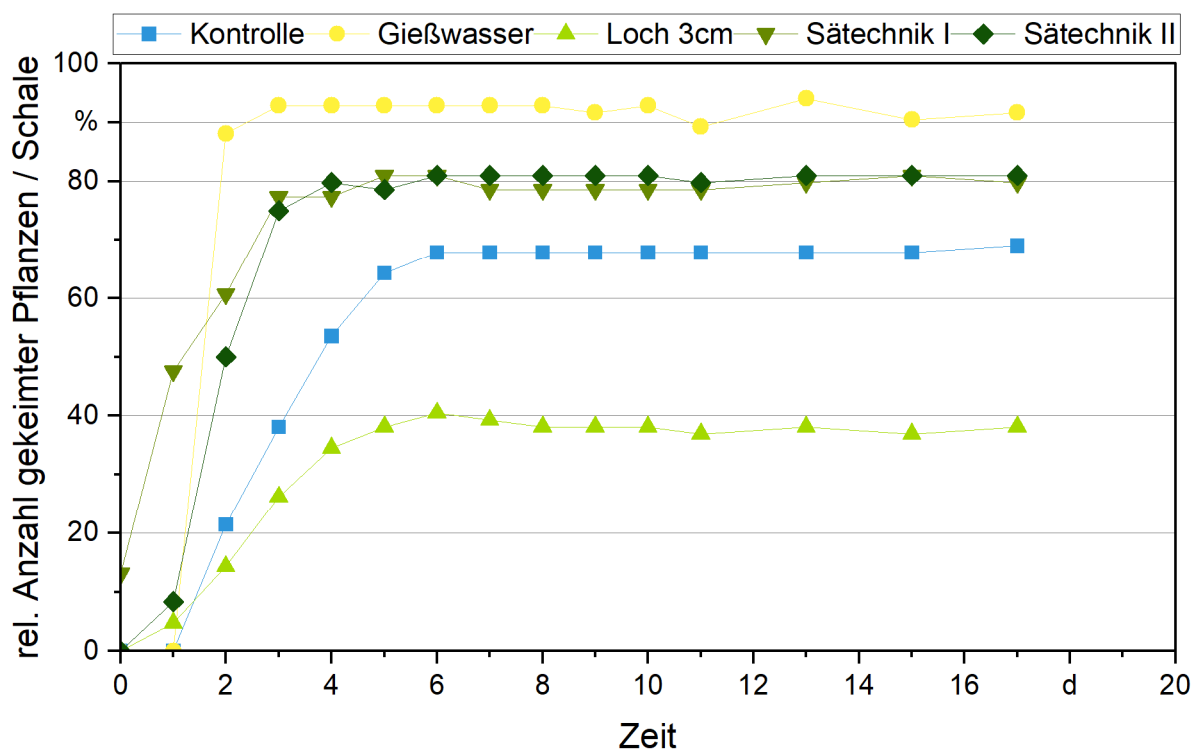


Abbildung 71: Keimungsverhalten der Einlegegurken dargestellt als relative Anzahl gekeimter Samen pro Topf über die Zeit für die getesteten Varianten Kontrolle, mit Mulchmaterial kontaminiertes Gießwasser, Aussaat in Saatloch mit einem Durchmesser von 3 cm, Sätechnik I herkömmliches Aussäen mit Sägerät und Abdecken mit Erde, Sätechnik II herkömmliches Säverfahren ohne Abdecken (MW, n=3)

Basierend auf den Ergebnissen der Keimungsversuche wurde für die Feldversuche 2025 eine maschinelle Aussaat der Einlegegurkensamen mit einer konventionellen Aussaattechnik der Firma Fleischmann gewählt.

5.5 Feldversuche am Standort in Bamberg

5.5.1 Versuchsflächen

5.5.1.1 Versuchsflächenvorbereitung im Versuchsjahr 2023

Für die Feldvorbereitung im Jahr 2023 wurde die Versuchsfläche am 04.04.2023 mit dem Flügelschargrubber bearbeitet und anschließend am 21.04.2023 gepflügt. Kurz vor der Applikation wurden die Beete am 01.06.2023 gegrubbert. Am 05.06.2024 erfolgte gemäß Düngeverordnung eine bedarfsgerechte Düngung der Beete 1 - 18. Die Bodenvorbereitung wurde am 07.06.2023 mit dem Einsatz eines Geohobels abgeschlossen (Abbildung 72). Die Applikation des Mulchmaterials erfolgt am 15.06.2023.



Abbildung 72: Vorbereitete Versuchsfläche am 12.06.2023, drei Tage vor der Applikation des Mulchmaterials

5.5.1.2 Versuchsflächenvorbereitung im Versuchsjahr 2024

Im Jahr 2024 begann die Feldvorbereitung am 26.04.2024 mit dem Einsatz einer Scheibenegge. Anschließend wurden die Beete am 27.04.2024 gewalzt. Am 30.04.2024 wurden die Tropfschläuche für eine Unterflurbewässerung verlegt, welche am 02.05.2024 durch die Firma GWE über den Aufbau der Kopfstationen und der Einstellung und Installation verschiedener Sender und Empfänger sowie Sensoren fertiggestellt wurde. Wie in Abbildung 73 zu erkennen ist kam es allerdings am selben Tag zu einem Starkregenereignis

mit einem Niederschlag von 50 mm innerhalb 45 Minuten, wodurch die Versuchsfläche komplett unter Wasser stand.



Abbildung 73: Zustand der Versuchsfläche am 02.05.2024 nach starkem Niederschlag von 50 mm in 45 Minuten

Erst am 13.05.2024 war die Fläche wieder befahrbar und wurde vormittags gestriegelt und nachmittags noch einmal gewalzt. Am 14.05.2024 erfolgte die Applikation des Mulchmaterials. Bereits sieben Tage später, am 21.05.2024 kam es erneut zu einem Starkregenereignis mit 61 mm Niederschlag, was der Versuchsfläche wiederum sehr zusetzte. Die dadurch eingetragene Feuchtigkeit konnte in der zweifach gewalzten Versuchsfläche nur langsam versickern. Dementsprechend konnte die mittlerweile ausgesäte Versuchsfläche, wie in Abbildung 74 zu erkennen ist, über einen langen Zeitraum nicht richtig abtrocknen.



Abbildung 74: Zustand der Versuchsfläche am 02.06.2024 nach Starkregenereignis mit 61 mm Niederschlag am 21.05.2024

5.5.1.3 Versuchsflächenvorbereitung im Versuchsjahr 2025

Die Feldvorbereitung für das Versuchsjahr 2025 startete im Januar mit dem Umbruch der Vorfrucht Luzerne. Anfang April wurde der Boden mittels Tiefenlockerung auf eine Arbeitstiefe von 20 cm bearbeitet. Am 28.04.2025 wurde die für die Bewässerung notwendige Kopfstation aufgebaut und die Tropfschläuche in einer Tiefe von 20 cm verlegt. Eine Grunddüngung des Versuchsfeldes wurde am 30.04.2025 vorgenommen. Am 05.05.2025 wurde die Bewässerung einschließlich der Bewässerungssensoren in Betrieb genommen sowie die Folien in der Kontrollvariante verlegt (Abbildung 75). Die Applikation des Mulchmaterials erfolgte am 06.05.2025. Nach Aushärtung des Mulchmaterials wurde das Feld angesät und 24 h später mit einem Vlies abgedeckt.



Abbildung 75: Vorbereitete Beete der Versuchsfläche am 05.05.2025 kurz vor der Applikation des Mulchmaterials und Beete der Kontrollvariante mit verlegter Mulchfolie

5.5.2 Analyse der Witterungsbedingungen

Das Klima in Oberfranken ist geprägt durch eine subkontinentale Klimazone, die sich durch gemäßigt warme Sommer und milde Winter auszeichnet. Der Jahresmittelwert der Lufttemperatur liegt bei etwa 9,6 °C (1991-2020) und die durchschnittliche Niederschlagssumme (1981-2010) beträgt 745 mm pro Jahr.

Die Monatsmitteltemperaturen und die Niederschlagssummen der Versuchsjahre 2023, 2024 und 2025 in Bamberg im Vergleich zum jeweiligen langjährigen Niederschlags- (1981-2010) und Temperaturmittel (1991-2020) sind in Abbildung 76 dargestellt.

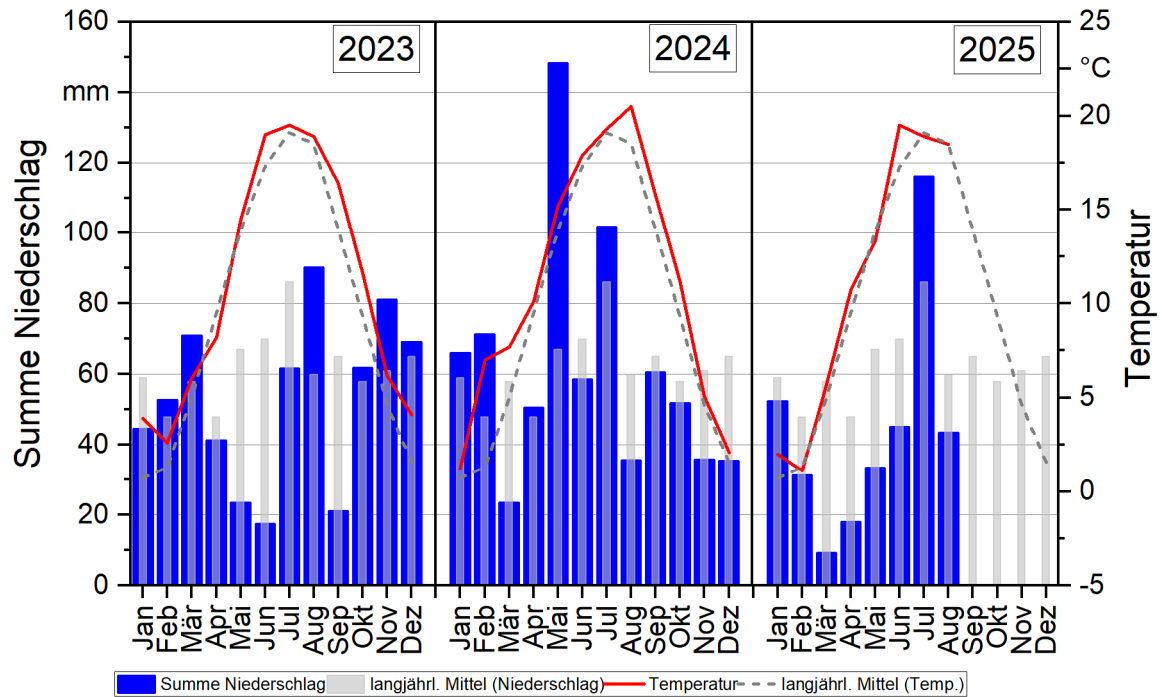


Abbildung 76: Monatliche Niederschlagsmengen und Monatsmitteltemperaturen in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025 im Versuchsfeld Bamberg im Vergleich zum jeweiligen langjährigen Mittel (langjährl. Mittel Niederschlag 1981-2010, Stations-ID 6195, Schesslitz-Koettensdorf; langjährl. Mittel Temperatur 1991-2020, Stations-ID 282, Bamberg-West, Deutscher Wetterdienst)

Witterungsbedingungen 2023

Der Vegetationszeitraum im Versuch von Aussaat bis zur Ernte erstreckte sich im Jahr 2023 aufgrund des Projektstarts Mitte 2023 über die Monate Juni bis Oktober. In dieser Zeit kam es im Vergleich zum langjährigen Mittel vor allem in den Monaten April bis Juli und im September zu unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen, mit einem Unterschied von -9,15 mm. Die Temperaturen lagen im Zeitraum von April bis Oktober leicht über dem langjährigen Mittel. Der gemessene Temperaturunterschied lag im Schnitt bei +1,35 K.

Witterungsbedingungen 2024

Im Jahr 2024 erstreckte sich der Vegetationszeitraum des Versuchs von Mitte Mai bis September. In dieser Zeit kam es in den Monaten Mai und Juli zu überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen. Dabei betrug das Delta der Niederschlagsmengen im Mai +81,4 mm im Vergleich zum langjährigen Mittel. Ein Großteil des Niederschlags ergoss sich ein paar Tage nach Applikation des Mulchmaterials und der Aussaat. Die Temperaturen lagen mit einem Temperaturunterschied von +1,5 K über dem langjährigen Mittel.

Witterungsbedingungen 2025

Die Vegetationsperiode im Versuchsjahr 2025 erstreckte sich von Mai bis Anfang September. Im Mai und Juni gab es im Vergleich zum langjährigen Niederschlagsmittel wenig Niederschlag. Dafür war der Niederschlag im Juli überdurchschnittlich hoch. Die Temperaturen lagen mit Ausnahme von Juni im langjährigen Mittel. Im Juni lag die Temperatur mit einem Temperaturdelta von $+2,2^{\circ}\text{K}$ über dem Durchschnitt.

5.5.3 Ergebnisse der untersuchten Wechselwirkungen des Mulchmaterials mit verschiedenen Gemüsekulturen

Im Folgenden werden repräsentative Ergebnisse der Feldversuche 2023 und 2024 zu den Folienkulturen Kürbis, Zucchini und Melone behandelt sowie die Ergebnisse des Feldversuchs 2023 mit Zuckermais. Außerdem werden die Ergebnisse der Feldversuche der Einlegegurke im Jahr 2023 (Tastversuch) sowie 2024 und 2025 (Exaktversuche) vorgestellt.

5.5.3.1 Zuckermais**5.5.3.1.1 Beikrautunterdrückung**

Zu einem der wichtigsten Boniturparameter zählt die beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchmaterials, weshalb diese in regelmäßigen Abständen über die Vegetationsperiode untersucht wurde. Die Auswertung des Bodenbedeckungsgrads im Zuckermaisversuch zeigten eine effektive Beikrautunterdrückung durch LiquiMulch 2,5 mm und 5 mm (Abbildung 77). Besonders zu beachten ist hierbei, dass in diesen Beeten eine Streifenbreite von 20 cm pro Pflanzreihe appliziert wurde. Bei der Analyse des Bodenbedeckungsgrads fällt auf, dass der Bodenbedeckungsgrad in der 2,5 mm LiquiMulch Variante höher ist als in den Beeten der Kulturen Zucchini, Kürbis und Melone (Abbildung 77).

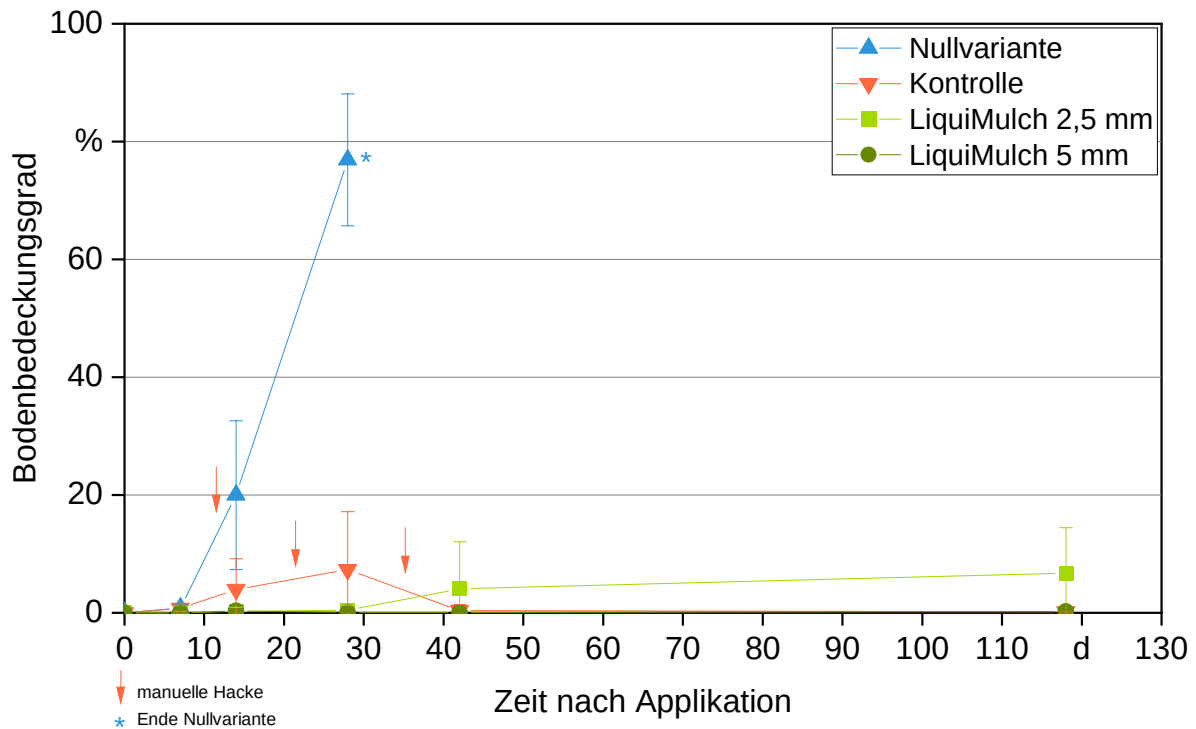


Abbildung 77: Bodenbedeckungsgrad (MW + SEM, $n = 4$) in den Parzellen des Zuckermais auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg im Jahr 2023

Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die Parzellen des Zuckermaisversuchs am Rand der Parzelle 17 lokalisiert und dementsprechend einem sehr hohen Beikrautdruck ausgesetzt waren. Dies bestätigt auch der hohe Bodenbedeckungsgrad der Nullvariante. Nichtsdestotrotz ist der Bodenbedeckungsgrad mit dem der Kontrolle vergleichbar, weshalb eine beikrautunterdrückende Wirkung gegeben war.

Zu den am stärksten mit dem Zuckermais konkurrierenden Beikräutern zählten der Amaranth sowie Portulak. In kleiner Anzahl wurde in den Parzellen der Nullvariante auch Melde und Flughafer während der Versuchsphase beobachtet (Abbildung 78).

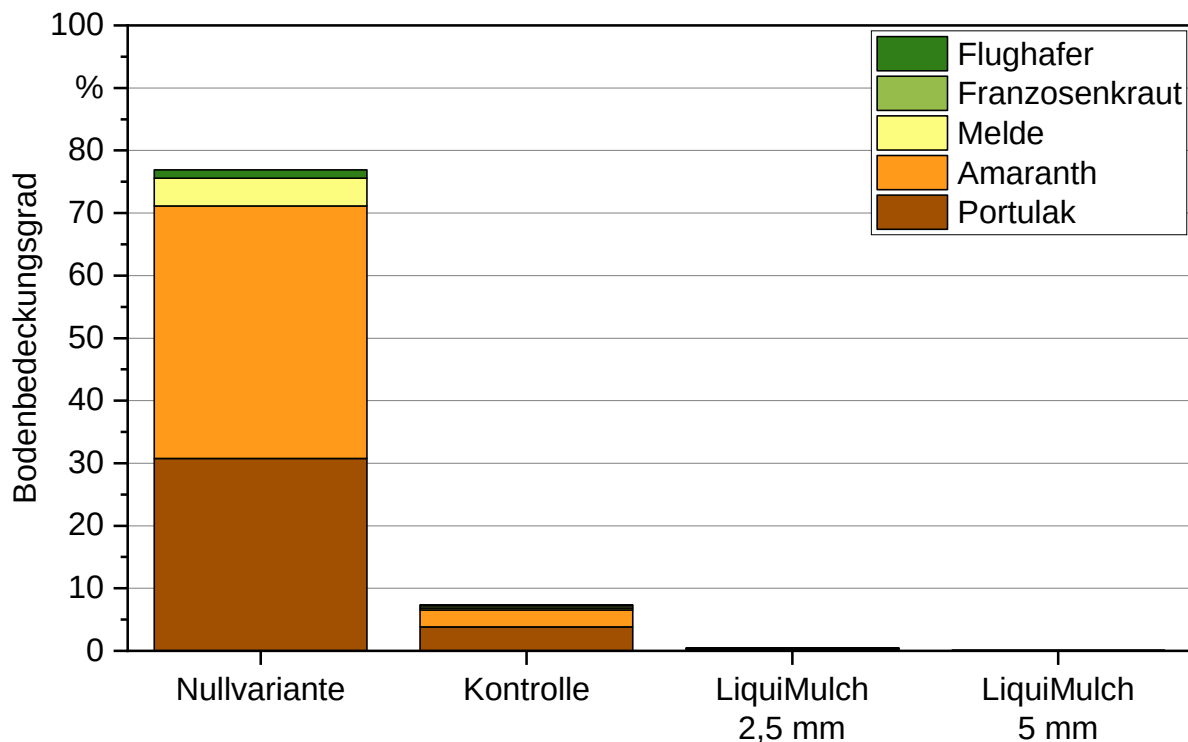


Abbildung 78: Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Zuckermais im Jahr 2023 (MW, n=4)

5.5.3.1.2 Kulturverträglichkeit

Aufgangsbonitur

Der Zuckermais wurde vor der Applikation des Mulchmaterials in der Reihe ausgesät. Entlang dieser Saatreihe wurde einen Tag später das LiquiMulch appliziert. Es wurde untersucht, inwiefern der Zuckermais in der Lage ist, durch die ausgehärtete Mulchschicht nach seiner Keimung durchzuwachsen. Die Ergebnisse der Aufwuchsbonitur des Zuckermais sind in Abbildung 79, links dargestellt. Beide LiquiMulch Varianten führten zu einer signifikant schlechteren Keimung der Zuckermaissamen im Vergleich zur Kontrolle. Dieser Effekt war vor allem bei der LiquiMulch 5 mm Variante stark ausgeprägt. Aufgrund der Pulsation während der Applikation des Mulchmaterials könnte die Schichtdicke nicht homogen verteilt und stellenweise dicker als die Soll-Schichtdicke gewesen sein. Diese dickeren Schichten könnten sich negativ ausgewirkt haben. Durch Nachsaat konnten die Fehlstellen ausgeglichen werden, siehe Abbildung 79, rechts.

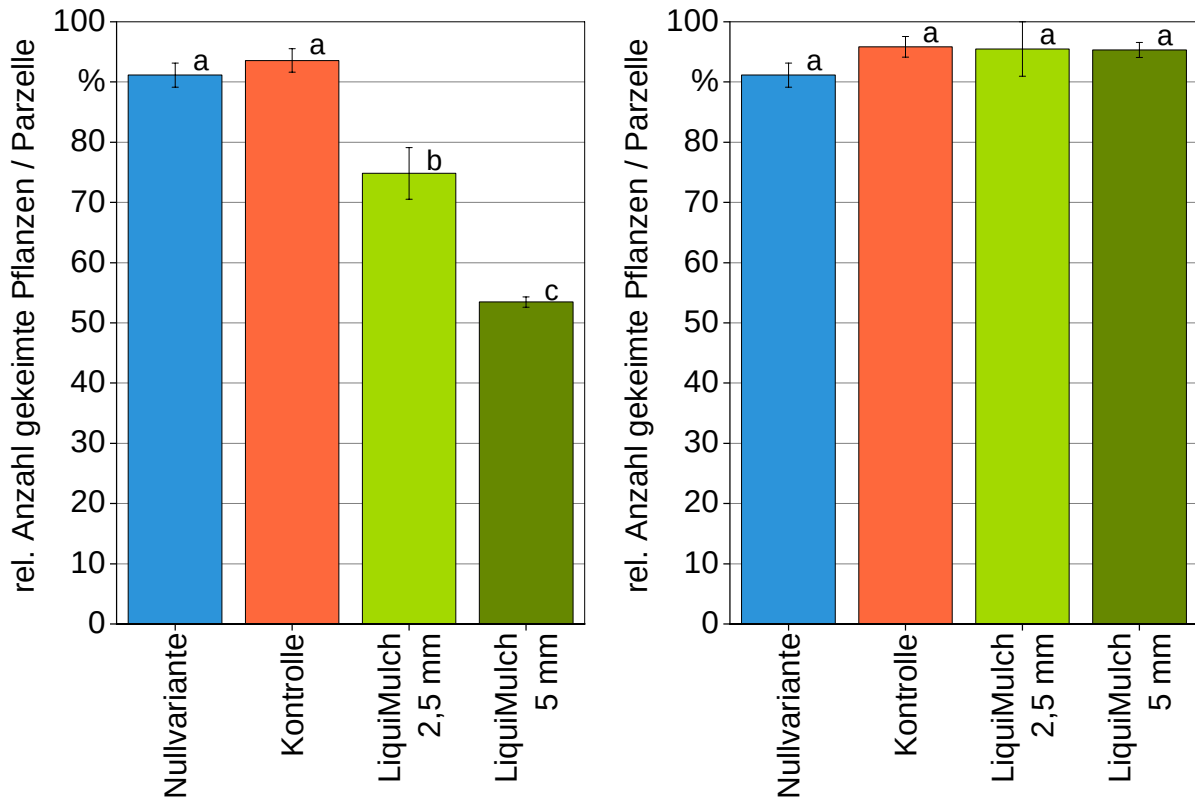


Abbildung 79: Relative Anzahl gekeimter Zuckermassamen nach der Aussaat (links) und nach (rechts) Nachsaat (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$) im Jahr 2023

Erntebonitur

Die Ernte mit anschließender Erntebonitur im Versuch Zuckermass wurde am 18.09.2023 als Einmalernte durchgeführt. Die Ergebnisse der Erntebonitur zeigten zwischen den unterschiedlichen Varianten keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf den Ernteertrag der marktfähigen Kolben in dt/ha (Abbildung 80). Dass der Ertrag der LiquiMulch 5 mm Variante einen niedrigeren Ernteertrag zeigte, liegt möglicherweise an einer Interaktion zwischen dem Material oder einzelnen Inhaltsstoffen des Mulchmaterials mit der Kulturpflanze. Andererseits könnte auch die verminderte Keimung der Zuckermasspflanzen in der LiquiMulch 5 mm Variante eine mögliche Ursache dafür sein. Die Entwicklung der nachgesäten Pflanzen war zeitlich verzögert und könnte sich dementsprechend negativ auf den Ernteertrag ausgewirkt haben. Nichtsdestotrotz war der Unterschied beim Ernteertrag nicht signifikant. Um die Ursachen eindeutig identifizieren zu können, müssten weitere Versuche durchgeführt werden. Das durchschnittliche Kolbengewicht war in den Mulchvarianten höher (Abbildung 80). Die Variante LiquiMulch 5 mm zeigte signifikant höhere Kolbengewichte. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Zuckermasspflanzen in dieser Variante eine geringere Anzahl an Kolben bildeten. Durch die reduzierte Kolbenzahl konnten die einzelnen Kolben größer wachsen, was möglicherweise auf eine verbesserte Nährstoff- und Wasserversorgung zurückzuführen ist.

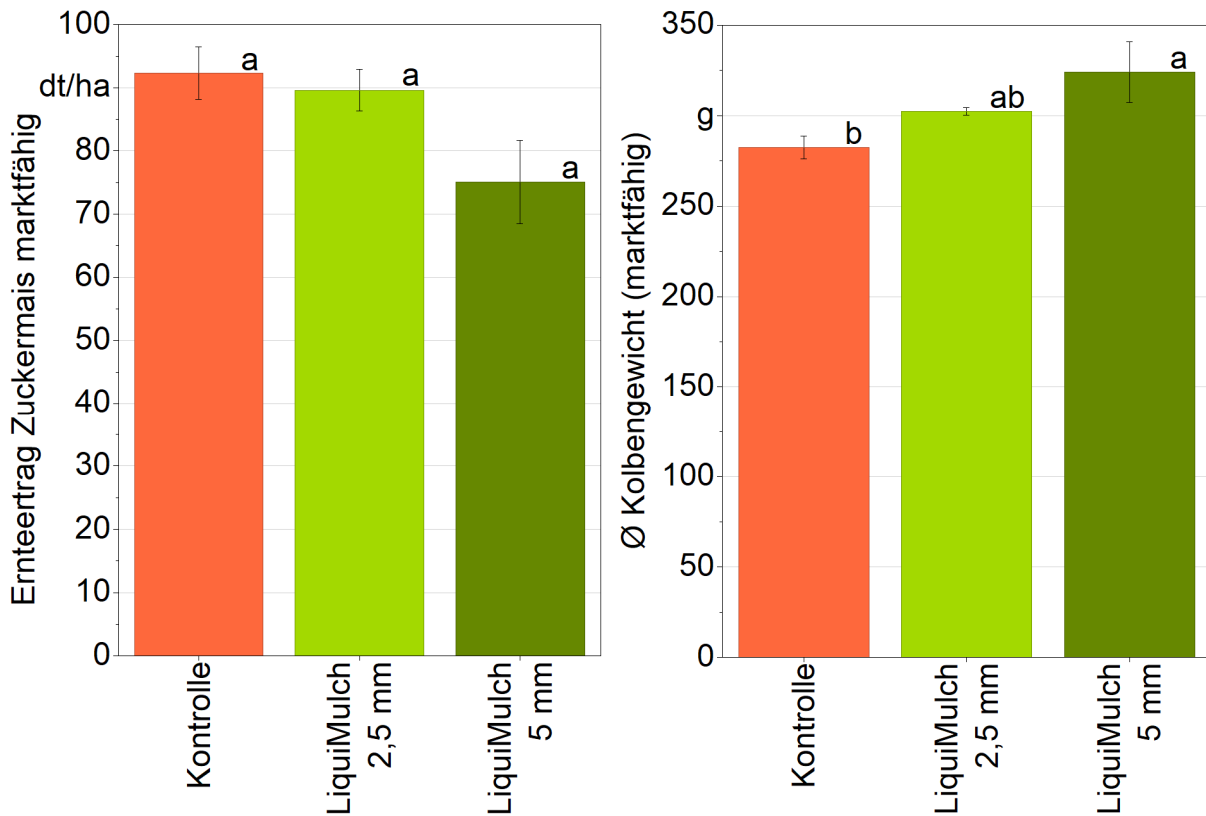


Abbildung 80: Ernteertrag Zuckermais in dt/ha und durchschnittliches Kolbengewicht der marktfähigen Sortierung (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$)

Die Qualitätsbonitur an zehn zufällig ausgewählten Zuckermaiskolben zeigte weder bei der durchschnittlichen Kolbenlänge, Kolbengewicht noch Kolbendurchmesser signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten (Abbildung 81). Damit kann ein Einfluss des Mulchmaterials auf die Entwicklung der einzelnen Kolben mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

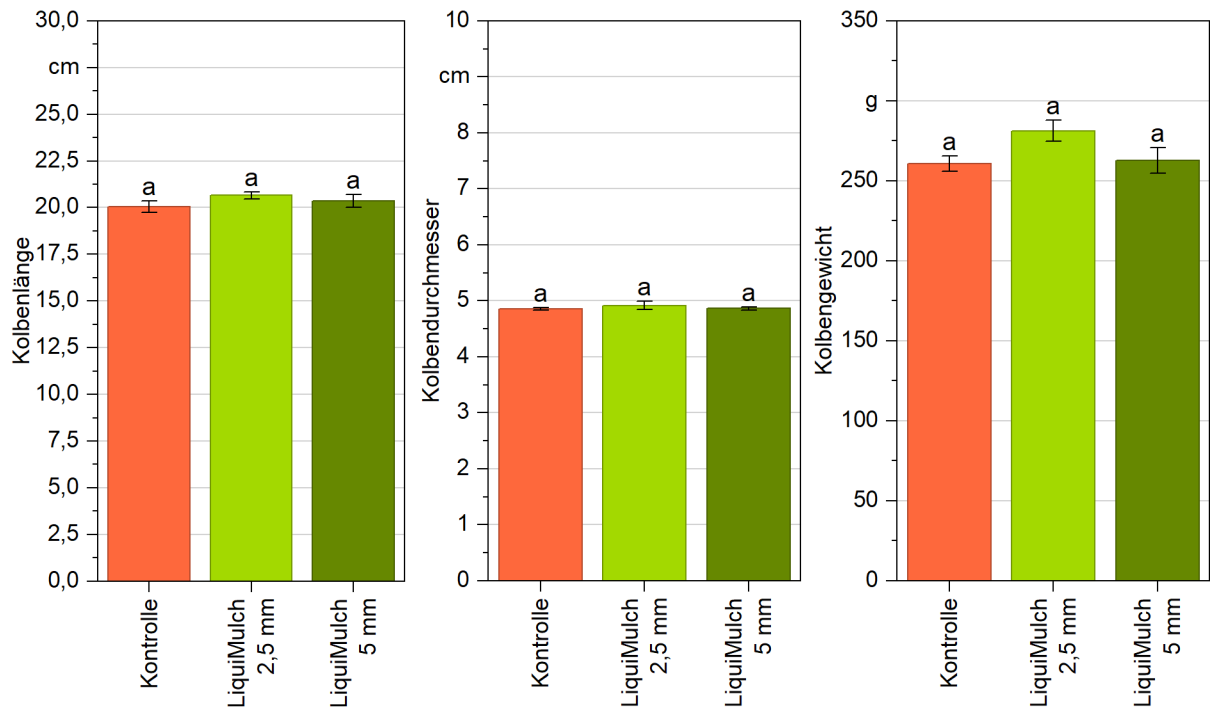


Abbildung 81: Zuckermais - Durchschnittliche Kolbenlänge (links), -durchmesser (mitte) und -gewicht (rechts) von 10 zufällig ausgewählten Zuckermaiskolben pro Parzelle ($MW \pm SEM$, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey, $p < 0,05$; $n = 4$)

5.5.3.1.3 Fazit: Zuckermais

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse die Eignung des Verfahrens für die Kultivierung von Zuckermais an. Das Mulchmaterial zeigt eine effektive Beikrautunterdrückung bei einer Streifenbreite von nur 20 cm. Im Hinblick auf die Keimung der Zuckermaissaat zeigt sich, dass diese mit steigender Schichtdicke negativ beeinflusst ist. Um die Keimungsrate der Zuckermaissamen zu verbessern, könnte, wie sich in den Versuchen mit der Einlegegurke andeutet, eine maschinelle Aussaat nach der Applikation eventuell besser geeignet sein. Die Kulturpflanzen entwickeln sich nach erfolgreicher Keimung in Anwesenheit des Mulchmaterials normal. Die Ernteerträge der verschiedenen Varianten weisen keine signifikanten Unterschiede auf, was darauf hindeutet, dass das Mulchmaterial keinen nennenswerten Einfluss auf die Ernte hat.

5.5.3.2 Kürbis

5.5.3.2.1 Beikrautunterdrückung

Wie in Abbildung 82 zu erkennen ist, zeigte das Mulchmaterial sowohl im Versuchsjahr 2023 als auch im Jahr 2024 eine effektive beikrautunterdrückende Wirkung, vergleichbar zum beikrautunterdrückenden Effekt der mechanischen Hacke der Kontrollvariante. Der Ausreißer der Kontrolle im Jahr 2024 ist mit einem Ausfall eines Hackgangs aufgrund Personalmangels zu erklären.

Auch wenn die Nullvariante bereits nach circa vier Wochen beendet wurde, ist gut nachvollziehbar, dass das Mulchmaterial über die beiden Versuchszeiträume einem hohem Beikrautdruck ausgesetzt war, was wiederum die hemmende Wirkung gegenüber Beikräutern beweist. Auch wenn in Abbildung 82 kein direkter Unterschied der beiden Nullvarianten erkennbar ist, so war der Beikrautdruck über die Vegetationsperiode 2024 aufgrund der größeren Niederschlagsmengen (vgl. Kapitel 5.5.1) deutlich höher. Dementsprechend ist der durchschnittliche Bodenbedeckungsgrad im Jahr 2024 etwas höher. Nichtsdestotrotz war der beikrautunterdrückende Effekt des Mulchmaterials trotzdem feststellbar.

Gleichzeitig konnte in beiden Versuchsjahren beobachtet werden, dass der Bodenbedeckungsgrad in den Parzellen mit den dickeren Mulchschichten geringer war als der der dünneren Varianten. Daher kann gefolgert werden, dass der beikrautunterdrückende Effekt mit zunehmender Material-Schichtdicke zusammenhängt.

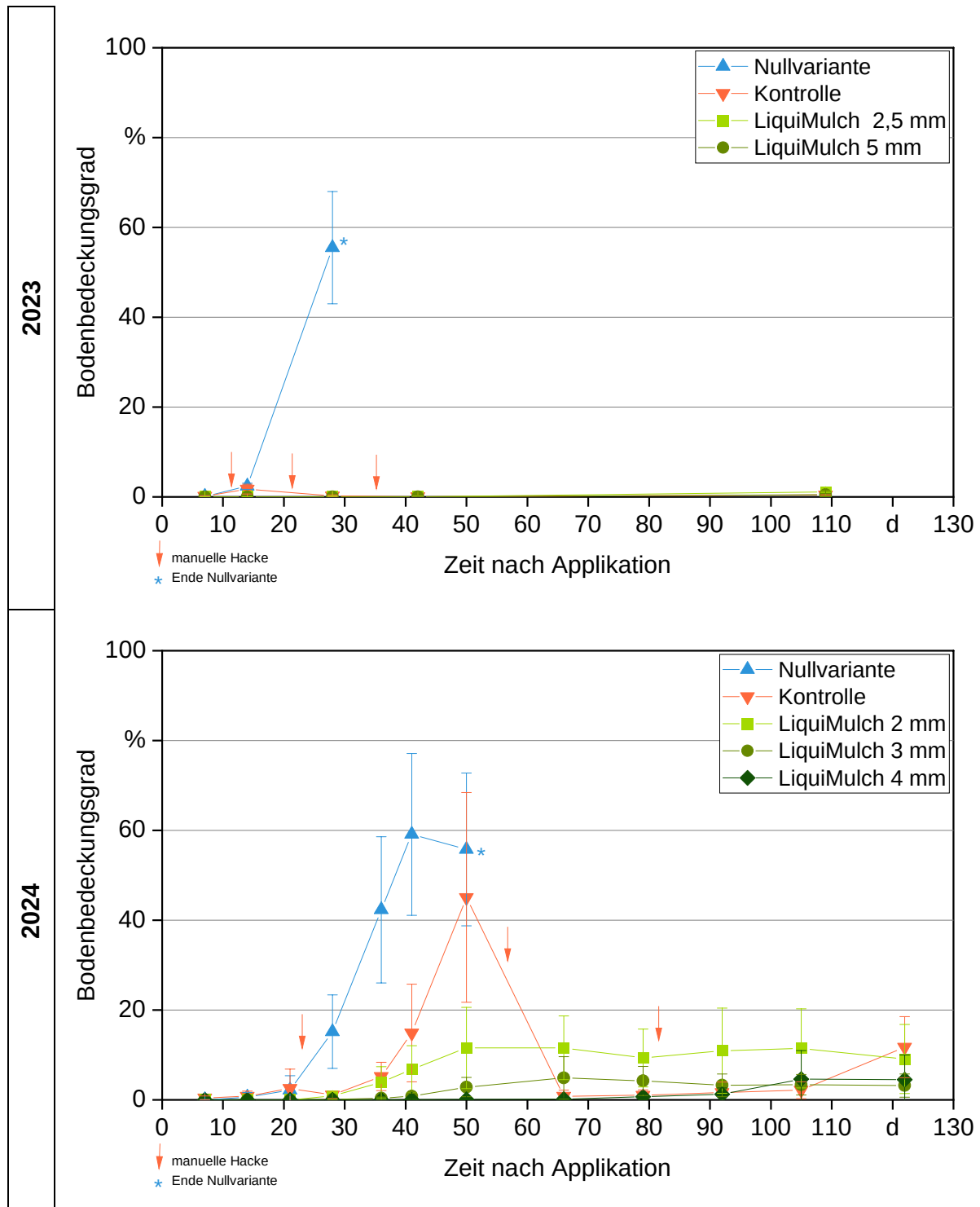


Abbildung 82: Bodenbedeckungsgrad in den Kürbis-Parzellen auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten), (MW + SEM, $n = 4$)

Um zu untersuchen, ob das Mulchmaterial den Selektionsdruck der aufkommenden Beikrautarten beeinflusst, wurden neben dem Bodenbedeckungsgrad auch die Art und Anzahl der konkurrierenden Beikräuter in den Versuchspartzellen einmalig bestimmt. Im Jahr 2023 machten Melde und Amaranth den größten Anteil am Bodenbedeckungsgrad aus

(Abbildung 83). Während im Jahr 2023 Portulak nur vereinzelt zu finden war, war er im Jahr 2024 das am stärksten aufzufindende Beikraut (Abbildung 83). Der in den beiden Jahren variierende Aufgang verschiedener Beikrautarten sowie deren unterschiedliche Ausprägung am Feld hängt wahrscheinlich mit der unterschiedlichen Witterung der beiden Versuchsjahre zusammen. Ansonsten konnte mit dem Mulchmaterial kein Zusammenhang festgestellt werden.

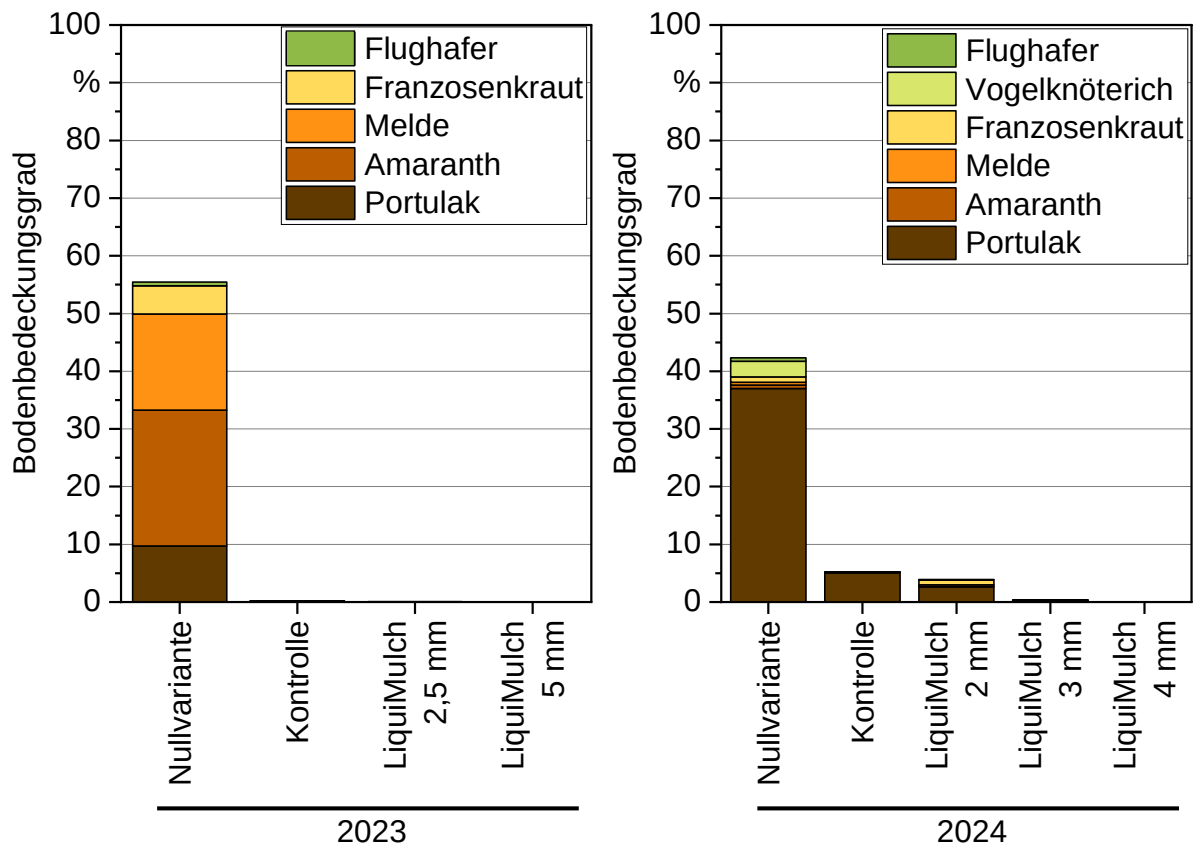


Abbildung 83: Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Kürbis im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts) (MW, n=4)

5.5.3.2.2 Kulturverträglichkeit

Aufgangsbonitur

In beiden Versuchsjahren erfolgte die Aussaat der Kürbissamen vor der Applikation des Mulchmaterials, weshalb die Pflanzen durch das Mulchmaterial hindurchwachsen mussten. Repräsentative Ergebnisse der Durchwuchsfähigkeit des Kürbisses sind in Abbildung 84 dargestellt.

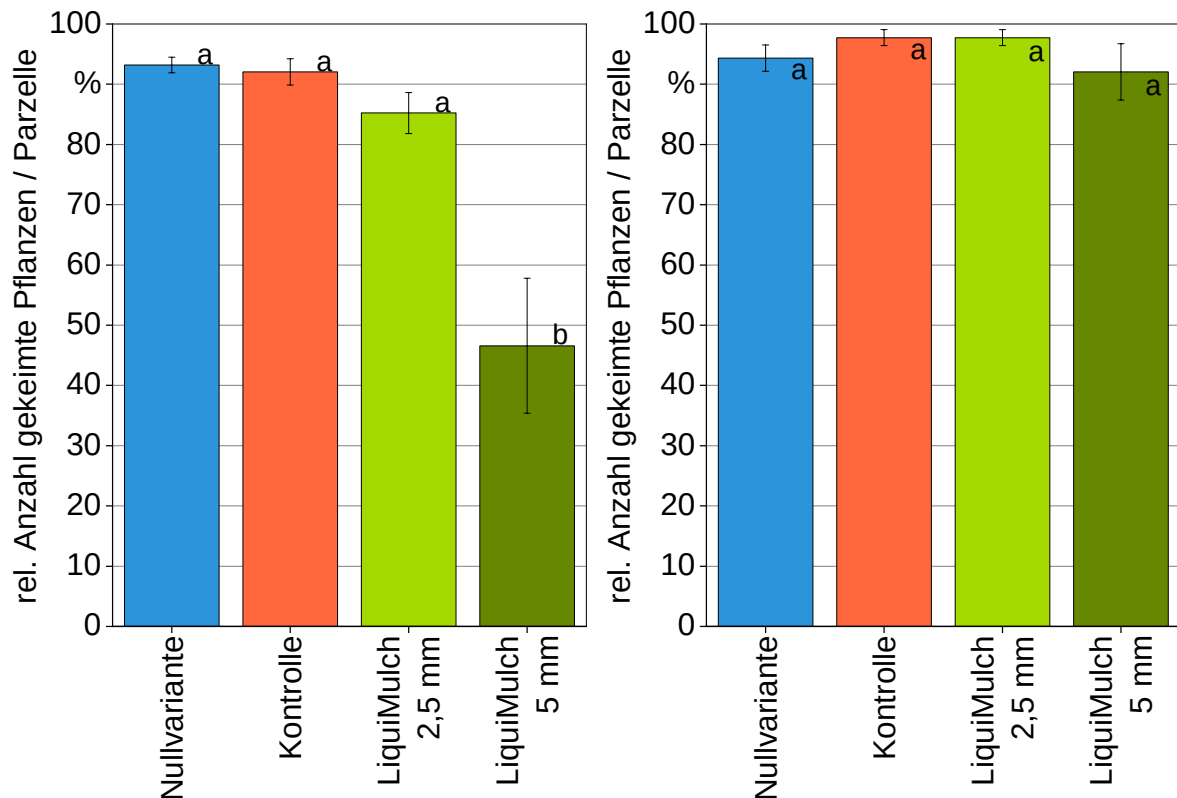


Abbildung 84: Relative Anzahl gekeimter Kürbissamen nach der Aussaat (links) und nach (rechts) der Nachsaat (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$), Jahr 2023

Während zwischen den Varianten der Nullvariante, Kontrolle und LiquiMulch 2,5 mm kein signifikanter Unterschied festgestellt werden konnte, war der Durchwuchserfolg der Kürbissamen in der Variante LiquiMulch 5 mm stark reduziert und signifikant schlechter als die anderen Varianten (Abbildung 84). Auch im Versuchsjahr 2024, wurde für die dickste Mulchvariante mit einer Schichtdicke von 4 mm eine ähnliche schlechte Keimung beobachtet. Eine Ursache dafür könnte die größere Schichtdicke des Mulchmaterials sein, durch welche ein Durchwachsen der Kürbispflänzchen nur eingeschränkt möglich ist. Allerdings könnten auch Inhaltsstoffe des Mulchmaterials, wie beispielsweise das Rapsöl für eine schlechtere Keimung der Kürbissamen verantwortlich sein. Ein weiterer Grund für die schlechtere Keimung könnte auch mit der höheren Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial zusammenhängen. Während sich feuchte Bedingungen grundsätzlich positiv auf die

Keimung auswirken, können zu nasse Böden zur Fäulnis des Saatguts führen. Eine Verbesserung der Keimung könnte eventuell durch die Anpassung des Aussaatzeitpunktes erreicht werden, indem die Samen erst nach Applikation ausgesät werden. Damit könnten sich die Keimlinge wertvolle Energie sparen, die sie ansonsten für das Durchwachsen investieren müssten. Wie bei der Einlegegurke (Kapitel 4.5.5.5) gezeigt wurde, könnte der Einsatz herkömmlicher Sätechnik im Vergleich zur manuellen Aussaat zu einer verbesserten Keimung führen. Aber auch eine ideale Bewässerung ist maßgeblich am Keimungserfolg der Kürbissamen beteiligt. In beiden Versuchsjahren wurde eine Fehlstellenbonitur durchgeführt, um sicherzustellen, dass für die Ernte eine einheitliche Anzahl an Kulturpflanzen zur Verfügung steht. Die relative Anzahl gekeimter Kürbispflänzchen nach Nachsaat des Versuchsjahres 2023 ist in Abbildung 84 gezeigt. Im Jahr 2024 war die Keimung der Zucchini samen bei allen Versuchsvarianten schlecht, was wahrscheinlich mit den extremen Witterungsbedingungen zusammenhängt (Kapitel 5.5.2.).

Erntebonitur

Für die Untersuchung der Kulturverträglichkeit wurde eine Erntebonitur durchgeführt. Die Ernte der Kürbisse wurde in beiden Jahren als Einmalernte durchgeführt. Während die Erträge im Jahr 2023 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten zeigten, waren die Erträge im Jahr 2024 signifikant unterschiedlich. In allen drei Mulchvarianten war die durchschnittliche Anzahl der geernteten Kürbisse erheblich geringer als im Vergleich zur Kontrollvariante (Abbildung 85). Bei der Interpretation der Daten ist zu berücksichtigen, dass die Kontrollparzellen in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem Düngerversuch mit Zwiebeln lagen. Angesichts der hohen Niederschlagsmengen ist es wahrscheinlich, dass Düngeauswaschungen in Richtung der Kontrollparzellen des Kürbisversuchs stattgefunden haben, da der Abstand zwischen den Versuchsfeldern minimal war. Diese könnten die Entwicklung und das Wachstum der Kürbispflanzen in der Kontrollparzelle begünstigt haben und würden die Unterschiede im Ertrag erklären. Da im Jahr 2023 kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsvarianten festgestellt werden konnte, ist es schwierig abzuschätzen, ob die Anwesenheit des Mulchmaterials tatsächlich für den signifikant schlechteren Ernteertrag im Jahr 2024 verantwortlich ist. Insgesamt fällt bei dem Vergleich der Erträge der beiden Versuchsjahre auf, dass sich die durchschnittlichen Ernteerträge deutlich voneinander unterscheiden und im Jahr 2023 deutlich geringer ausfielen. Dies könnte zum einen auf die extremen Witterungsunterschiede der beiden Jahre zurückzuführen sein. Eine weitere Ursache dafür könnte auch der sehr späte Aussaatzeitpunkt der Kürbissamen im Jahr 2023 sein. Während Kürbisse in der Praxis normalerweise je nach Region zwischen Ende April bis Anfang Mai ausgesät werden, erfolgte die Aussaat für den Feldversuch 2023 erst am 12.06.2023 [48]. Dies könnte dazu geführt haben, dass die Wachstumszeit der Kürbispflanzen verkürzt wurde, was sich wiederum nachteilig auf die Ernteerträge an marktfähiger Ware im Jahr 2023 ausgewirkt haben könnte. Dies würde auch erklären, warum der Ertrag an nicht marktfähiger Ware im Jahr 2023 sogar höher lag als der der marktfähigen Ware (Abbildung 85, Abbildung 86).

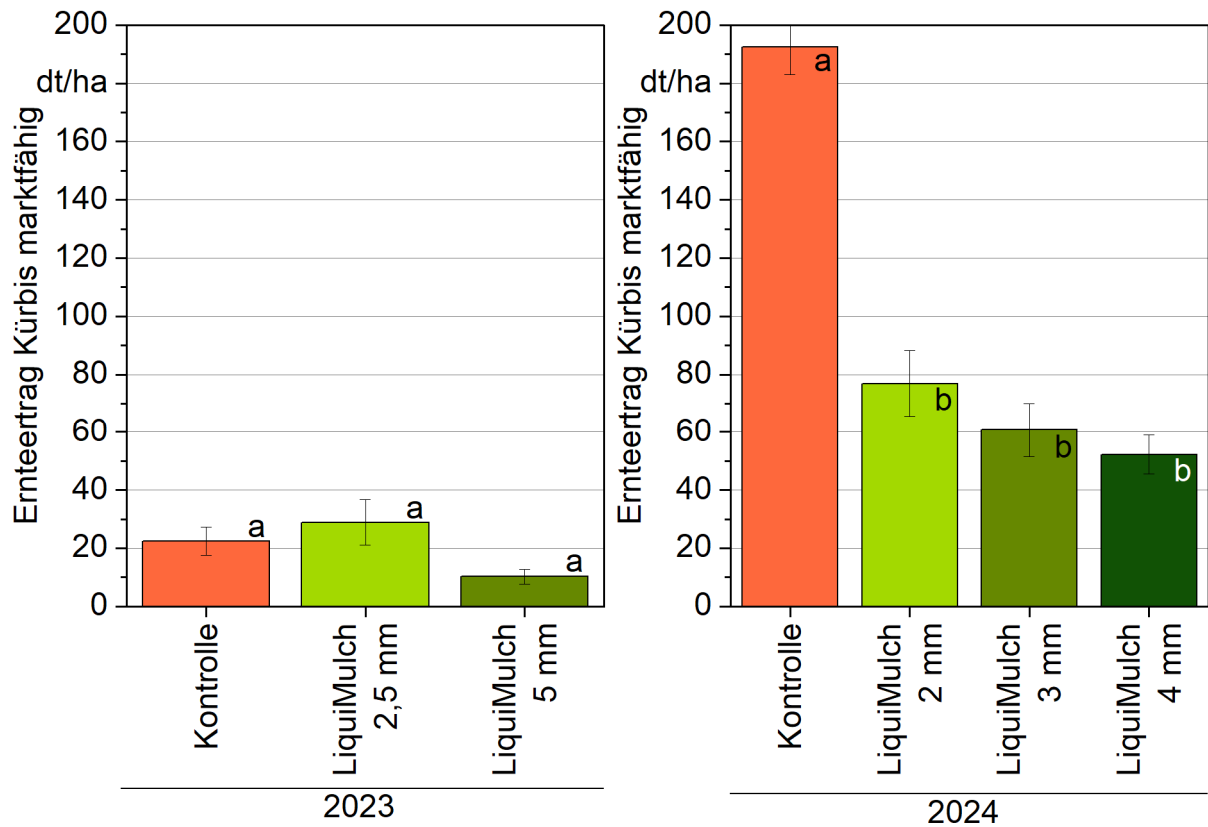


Abbildung 85: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Kürbisse des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$)

Neben den marktfähigen Kürbissen, wurde deshalb auch der Ertrag nicht marktfähiger Kürbisse untersucht. Als nicht marktfähige Kürbisse zählen vor allem zu kleine oder grüne Kürbisse. Vereinzelt kam es auch zu deformierten Kürbissen. Wie in Abbildung 86 zu erkennen ist, war im Jahr 2023 die Anzahl an zu kleinen Kürbissen in den Mulchvarianten etwas höher. Im Jahr 2024 war die Anzahl nicht marktfähiger Ware sogar signifikant höher als im Vergleich zur Kontrolle. Eine mögliche Ursache dafür könnte vor allem der durch das Mulchmaterial schlechtere Ablauf der Kürbispflanzen sein. Durch die Nachsaat der Kürbissamen entstand ein zeitlicher Versatz in der Pflanzenentwicklung, der eventuell dazu führte, dass die Kürbisse in den Mulchvarianten später reifen als die in der Kontrollgruppe. Grundsätzlich kann eine solche Beobachtung aber auch auf Interaktionen zwischen Kulturpflanze und Mulchmaterial zurückzuführen sein. Verschiedene Inhaltsstoffe des Mulchmaterials könnten die Entwicklung der Kulturpflanzen oder der Kürbisse negativ beeinflussen, weshalb die durchschnittliche Größe der Kürbisse unterhalb der marktfähigen Größe bleibt.

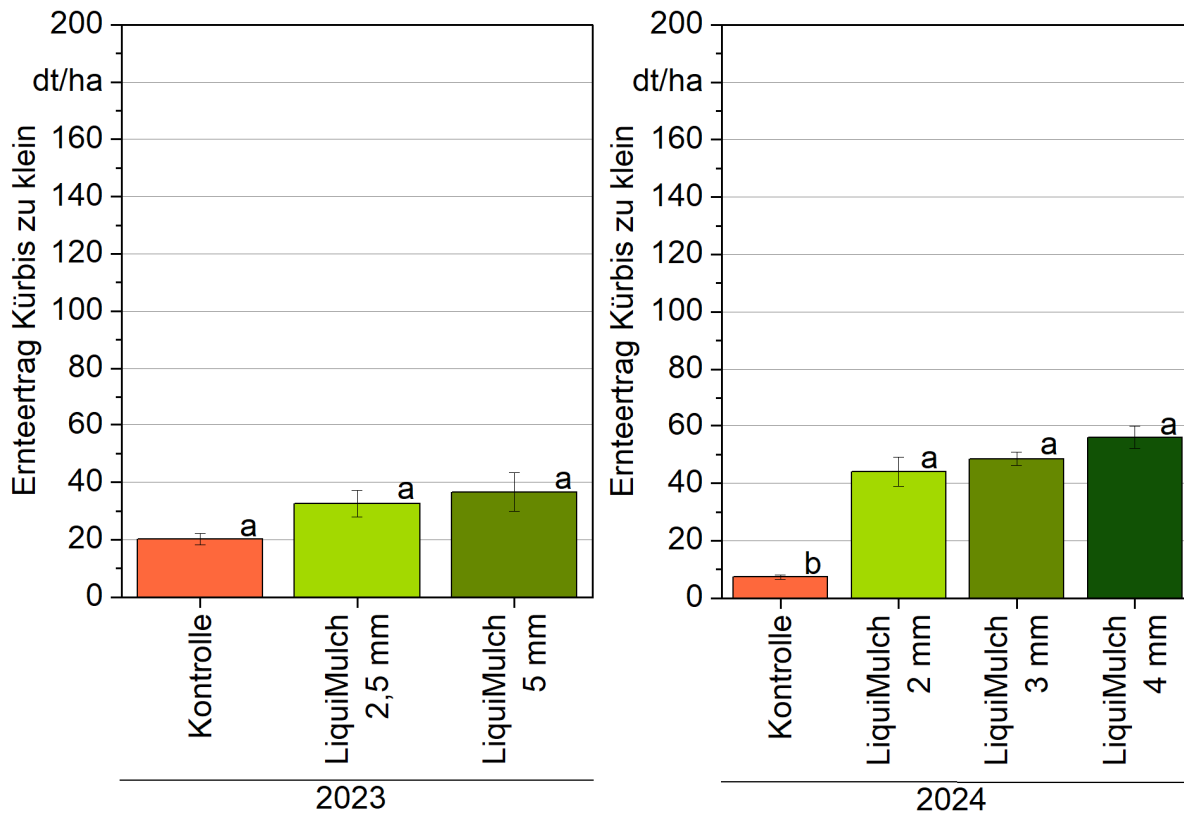


Abbildung 86: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger, zu kleiner Kürbisse pro Parzelle des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$)

5.5.3.2.3 Fazit: Kürbis

Zusammenfassend deutet sich die Eignung des Verfahrens für die Kultivierung von Speisekürbissen an. Das Mulchmaterial zeigt eine effektive Beikrautunterdrückung. Im Hinblick auf die Keimung der Kürbissamen zeigt sich, dass diese durch die Anwesenheit einer 5 mm dicken Mulchschicht negativ beeinflusst ist. Die Keimung der Kürbissamen könnte, wie sich auch bei der Einlegegurke gezeigt hat, durch eine maschinelle Aussaat nach der Applikation möglicherweise verbessert werden. Die Kulturpflanzen entwickeln sich nach erfolgreicher Keimung in Anwesenheit des Mulchmaterials normal. Da die Belastbarkeit der Ertragsergebnisse im Jahr 2024 anzuzweifeln ist und im Jahr 2023 keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten, hat das Mulchmaterial keine bis geringe Auswirkungen auf die Ernte.

5.5.3.3 Zucchini

5.5.3.3.1 Beikrautunterdrückung

Für die Untersuchung des beikrautunterdrückenden Effekts wurde in den Parzellen der Zucchini in beiden Versuchsjahren der Bodenbedeckungsgrad untersucht. Dabei zeigte das Mulchmaterial 2023 als auch 2024 eine effektive beikrautunterdrückende Wirkung.



Abbildung 87: Starkbefallene Parzelle der Nullvariante Nr. 421 (links) und sehr geringer Beikrautaufwuchs der LiquiMulch Variante 4 mm Nr. 521 (rechts) in der Reihe der Versuchspartzellen der Zucchini am 01.07. im Versuchsjahr 2024

Ähnlich wie beim Kürbis war bei den Zucchini eine Nullvariante als Anzeiger des Beikrautdrucks im Versuchsdesign 2023 und 2024 enthalten. Auch hier zeigte sich ein hoher Beikrautdruck (Abbildung 87). Nichtsdestotrotz konnten die störenden Beikräuter mit Hilfe des Mulchmaterials in den LiquiMulch-Parzellen gut in Schach gehalten werden (Abbildung 88). Dieser Effekt war vergleichbar mit dem beikrautregulierenden Effekt der mechanischen Hacke. Wie in Abbildung 88 zu erkennen ist, nahm der beikrautunterdrückende Effekt mit steigender Mulchsichtdicke zu. Dieser Trend ist vor allem für das Jahr 2024 sehr gut zu erkennen. Außerdem konnte die Zucchini aufgrund ihrer hohen Blattmasse ab einer bestimmten Größe eine eigenständige Bodenbedeckung herstellen und dadurch selbst Beikraut verdrängen. Der synergistische Effekt, der sich aus dem anfänglichen Schutz durch das Mulchmaterial und dem späteren Schutz durch die Kulturpflanze ergibt, könnte den Einsatz des aufspritzbaren Mulchmaterials im Rahmen des Unkrautmanagements für die Praxis interessant machen.

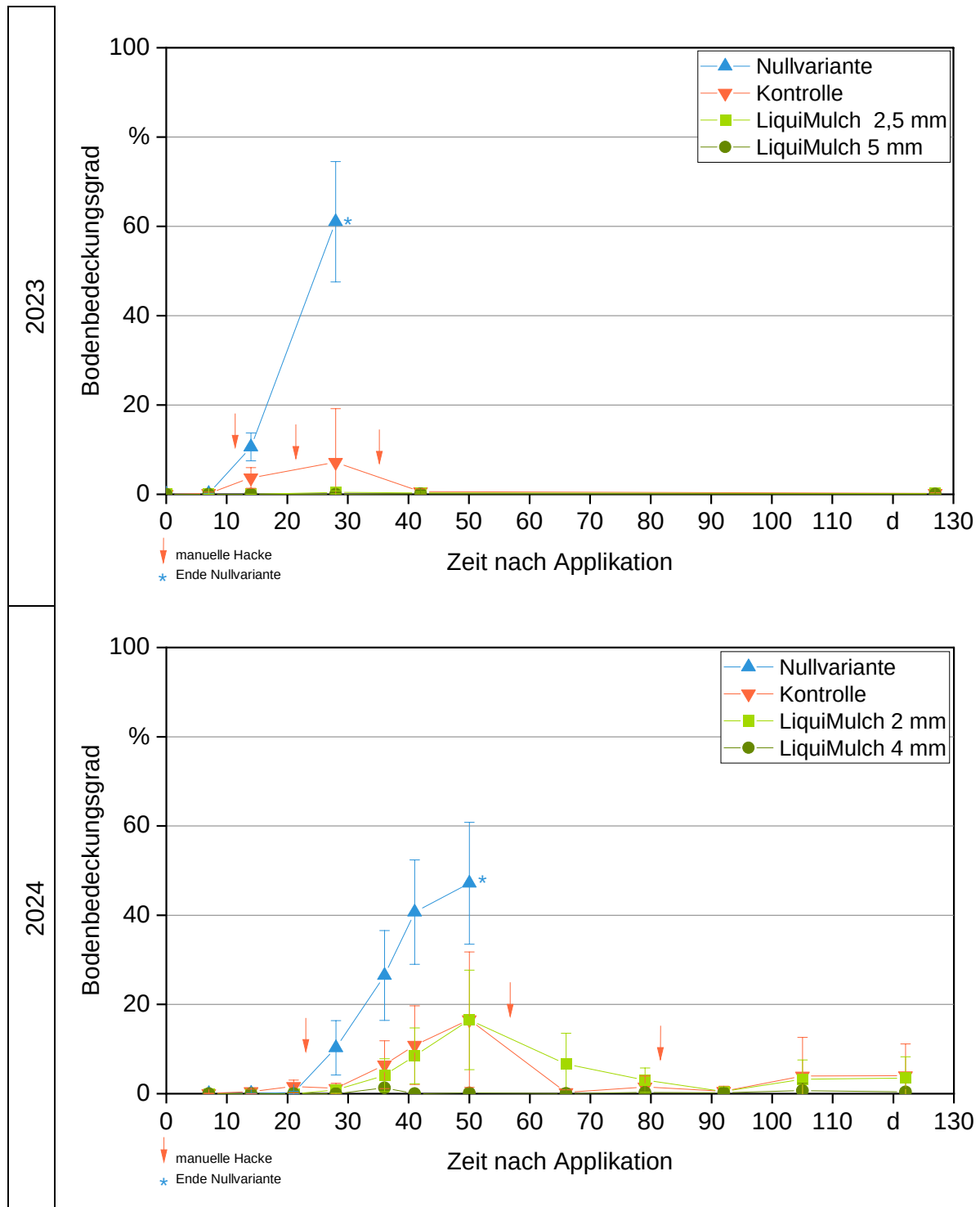


Abbildung 88: Bodenbedeckungsgrad in den Parzellen der Zucchini auf den Versuchsfeldern der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten) (MW + SEM, $n = 4$)

Im Hinblick auf die Auswertung der aufkommenden Beikrautarten und deren Häufigkeit ist zu erkennen, dass im Jahr 2023 vor allem Amaranth das dominierende Beikraut in den Versuchspartellen der Zucchini war. Im Jahr 2024 wurde hauptsächlich Portulak beobachtet (Abbildung 89).

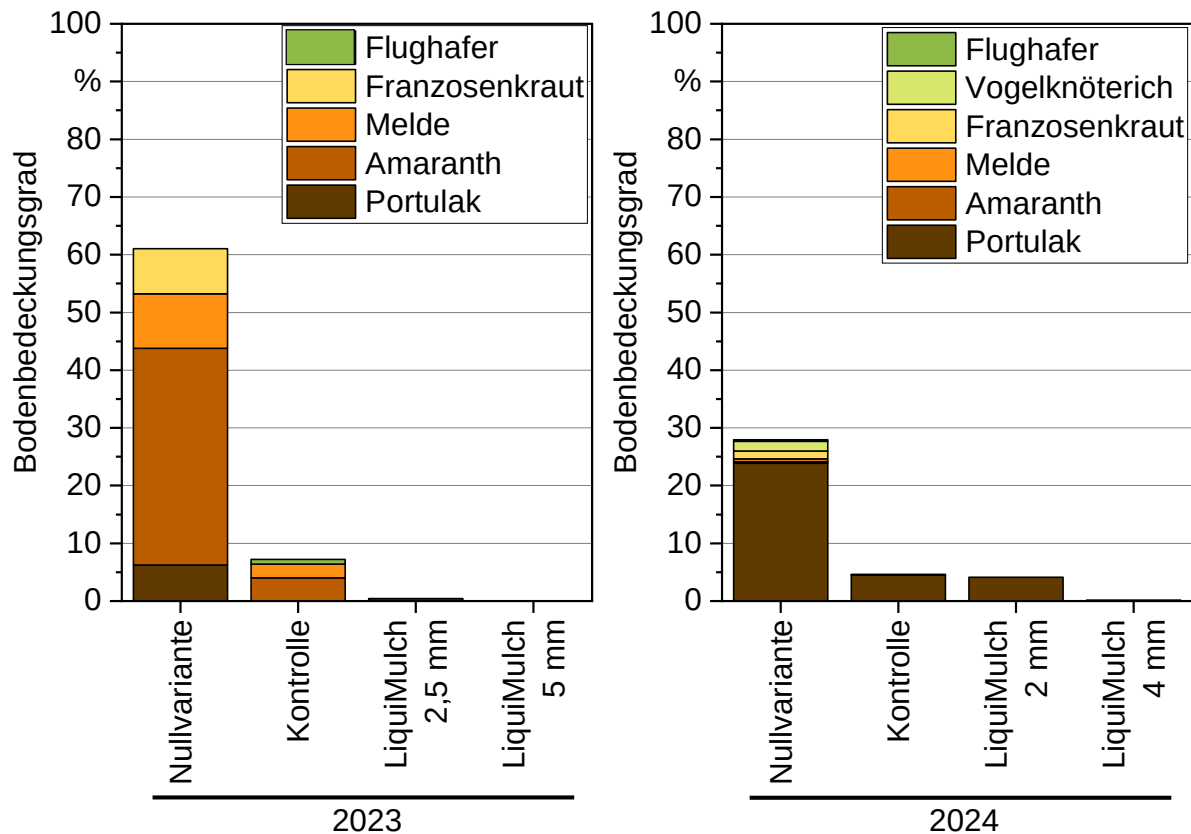


Abbildung 89: Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Zucchini im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW, n=4)

5.5.3.3.2 Kulturverträglichkeit

Aufgangsbonitur

Die Ergebnisse der Aufgangsbonitur der Kulturpflanze Zucchini sind in Abbildung 90 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass zwischen den Varianten der Nullvariante, Kontrolle und LiquiMulch 2,5 mm mit einer relativen Keimfähigkeit von circa 85 % pro Variante kein signifikanter Unterschied zu beobachten war. Infolgedessen kann eine negative Auswirkung auf die Keimung der Zuccinisamen durch die 2,5 mm dicke Mulchschicht ausgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu war der Keimungserfolg der Zuccinisamen in der Variante LiquiMulch 5 mm auf 48 % reduziert und damit signifikant schlechter als die Vergleichsvarianten (Abbildung 90). Auch im Folgejahr 2024 war die Keimungsfähigkeit der Samen unter der dickeren 4 mm Variante mit einem Keimungserfolg von 48 % gleich stark reduziert.

Die Beobachtungen hängen wahrscheinlich eng mit der größeren Schichtdicke zusammen, die für ein Durchwachsen der Zucchini eine zu große Barriere darstellte. Allerdings könnten sich auch verschiedene Inhaltsstoffe negativ auf die Keimung der Zuccinisamen auswirken und so einen reduzierten Aufgang herbeiführen. Eine Steigerung der Keimungsrate lässt sich möglicherweise durch eine zeitliche Anpassung der Aussaat

erreichen, indem die Samen erst nach der Applikation ausgesät werden. Dies würde den Keimlingen ermöglichen, Energie für das Keimwachstum zu sparen. Zudem hat sich gezeigt, dass der Einsatz konventioneller Sätechnik im Vergleich zur manuellen Aussaat, wie bei der Einlegegurke (Kapitel 4.5.5.5), die Keimung verbessern könnte. Um für die Ernte eine einheitliche Anzahl an Kulturpflanzen sicherzustellen, wurden in beiden Versuchsjahren eine Fehlstellenbonitur durchgeführt. Die Ergebnisse der relativen Keimung der Zucchini nach Nachsaat des Versuchsjahres 2023 sind ebenfalls in Abbildung 90 gezeigt. Die Ergebnisse der Aufgangsbonitur im Versuchsjahr 2024 waren vergleichbar zum Versuchsjahr 2023 (Daten nicht gezeigt).

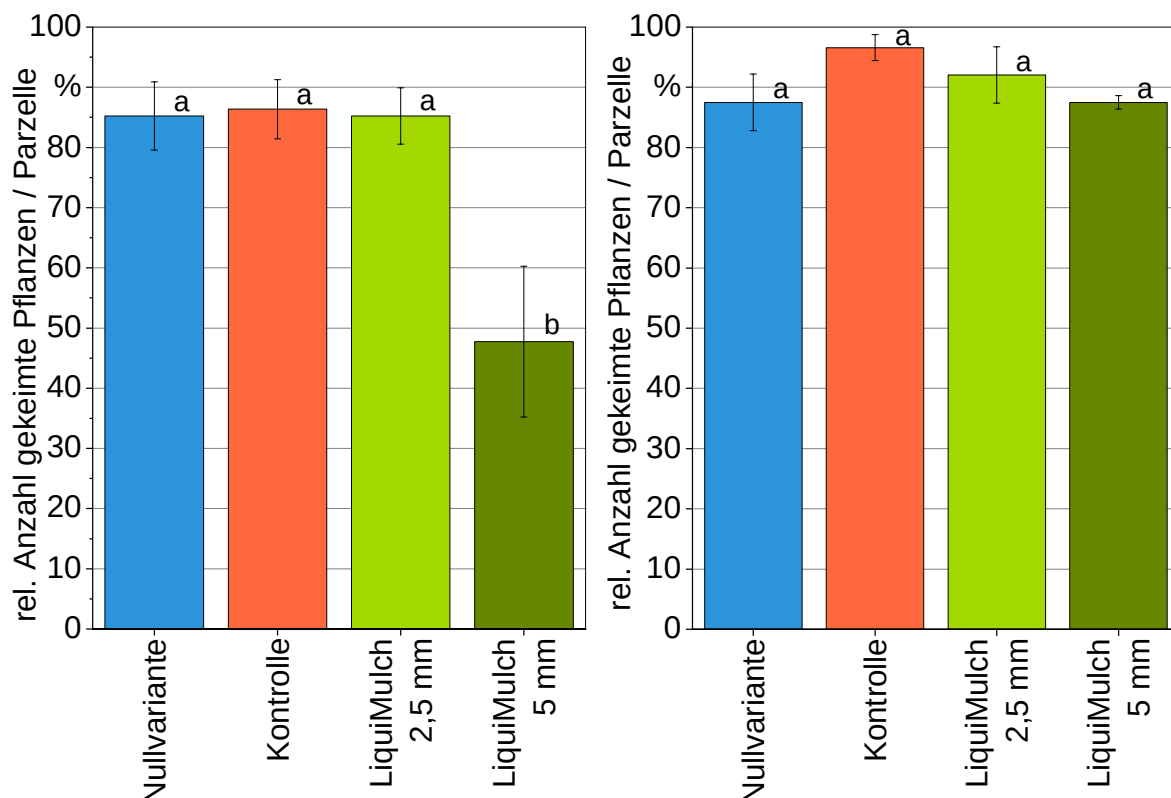


Abbildung 90: Relative Anzahl gekeimter Zuchinisamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat, Versuchsjahr 2023 (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$)

Erntebonitur

Die Auswertung der Erntebonitur der Zuchnipflanzen ergab im Jahr 2023 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten. Wie in Abbildung 91 dargestellt lagen die durchschnittlichen Erträge im Versuchsjahr 2023 zwischen 390 - 490 dt/ha Zucchini. Im Jahr 2024 wurden in beiden Mulchvarianten erneut ca. 400 dt/ha marktfähige Zucchini pro Parzelle geerntet, allerdings war der Ertrag in den Parzellen der Kontrolle signifikant höher (Abbildung 91). Der signifikante Unterschied zwischen den Mulchvarianten und der Kontrolle könnte mit der applizierten Mulchschicht zusammenhängen. Da es im Jahr 2024 zahlreiche Niederschläge gab, könnte sich aber auch eine erhöhte

Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial negativ auf die Entwicklung der Kulturpflanzen ausgewirkt haben. Zu nasse Böden können das Wurzelwachstum der Kulturpflanze beeinträchtigen und steigern die Gefahr von Krankheiten wie Wurzelfäule, was wiederum zur Ertragsminderung beitragen kann. Außerdem könnten auch die niedrigeren Stickstoffwerte unter dem Mulchmaterial für die verminderten Erträge verantwortlich sein. Auch der Gehalt an Stickstoff in den Ackerböden ist eng mit der Witterung verknüpft, denn bei hohen Niederschlägen kann es zur Auswaschung von Nitrat aus den Ackerböden kommen. Da im Vorjahr keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt wurden und das Jahr 2024 durch extreme Witterungsbedingungen geprägt war, könnten daher die äußerst feuchten Wetterverhältnisse für die geringeren Erträge verantwortlich gewesen sein.

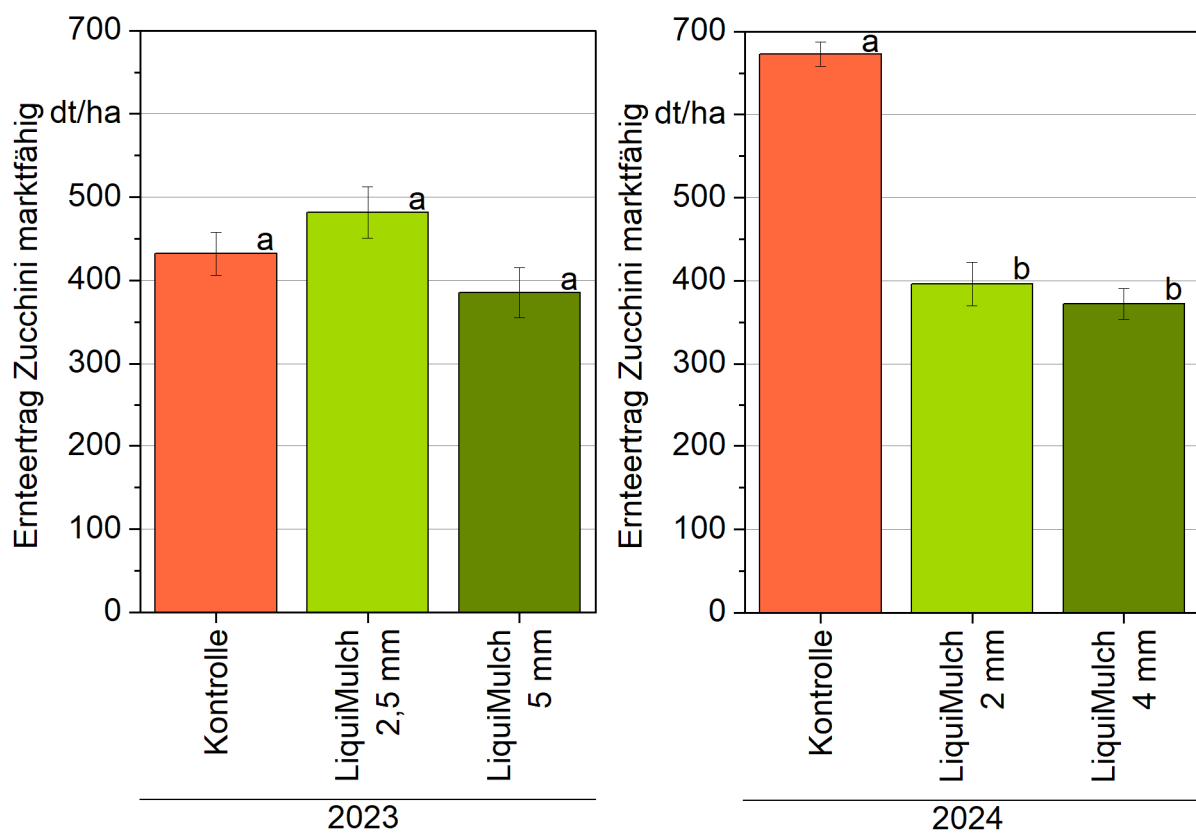


Abbildung 91: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Zucchini des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$)

Die Untersuchung nicht marktfähiger Zucchini zeigte in beiden Jahren keine Unterschiede innerhalb der verschiedenen Versuchsvarianten. Dementsprechend konnte kein Effekt des Mulchmaterials festgestellt werden, der die Deformation oder das Faulen des Ernteguts begünstigt hätte.

5.5.3.3 Fazit: Zucchini

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse die Eignung des Verfahrens für die Kultivierung von Zucchini an. Eine effektive Beikrautunterdrückung des LiquiMulchs konnte gezeigt werden, wobei diese durch den Bodenschluss der Zucchinipflanzen sogar noch weiter verbessert werden konnte. Im Hinblick auf die Keimung der Zucchini Samen zeigt sich wie bereits beim Kürbis, dass eine Mulchschicht von 5 mm Dicke die Keimung der Samen negativ beeinflusst. Allerdings könnte sich die Keimung der Zucchini Samen durch eine maschinelle Aussaat nach der Applikation möglicherweise verbessern, wie in Versuchen mit der Einlegegurke gezeigt. Die Kulturpflanzen entwickeln sich nach erfolgreicher Keimung in Anwesenheit des Mulchmaterials über den zeitlichen Verlauf normal. Angesichts der äußerst feuchten Witterungsbedingungen im Jahr 2024 ist unklar, ob das Mulchmaterial allein für die geringeren Ernteerträge verantwortlich ist. Da die Erträge im Jahr 2023 jedoch keine signifikanten Unterschiede aufwiesen, ist davon auszugehen, dass das Mulchmaterial nur geringe, bis keine Auswirkungen auf die Ernte hat.

5.5.3.4 Melone

5.5.3.4.1 Beikrautunterdrückung

Wie in Abbildung 93 zu erkennen ist, war der Bodenbedeckungsgrad im Jahr 2023 in den Parzellen der Melone sehr gering. Diese Beobachtung war unabhängig von der Versuchsvariante und konnte dementsprechend keine eindeutige Beikrautunterdrückung belegen. Im Versuchsjahr 2024 dagegen war der Beikrautdruck am Feld sehr hoch, wie in Abbildung 92 gut zu erkennen ist.



Abbildung 92: Starker Beikrautaufwuchs und verkümmerte Melonenpflanzen der LiquiMulch Varianten 2 mm Nr.231 (links) und geringer Beikrautaufwuchs in der LiquiMulch Variante 4 mm Nr. 531 in der Reihe der Versuchspartzen der Melone am 21.08. im Versuchsjahr 2024

Die Analyse des Bodenbedeckungsgrads im Versuchsjahr 2024 zeigte für eine Schichtdicke von 4 mm eine effektive Beikrautunterdrückung, die ähnlich hoch war, wie die der Kontrollvariante mit mechanischer Hacke (Abbildung 93). Gleichzeitig war der beikrautunterdrückende Effekt der 2 mm Variante nicht stark genug, um das Aufwachsen von störendem Beikraut zu verhindern (Abbildung 93). Wie schon im Jahr 2023, als ein überdurchschnittlich nasser August eine Noternte erzwang, waren die durchwegs hohen Niederschlagsmengen im Mai und Juni 2024 nicht förderlich für die Entwicklung der Melone. Dementsprechend war die Kulturpflanze nicht in der Lage durch Bodenbedeckung das Beikraut selbst zu verdrängen. Aufgrund des hohen Beikrautdrucks in den Parzellen der Melone, war dementsprechend ein starker Aufwuchs von Beikraut erkennbar. Die beobachtete beikrautunterdrückende Wirkung war abhängig von der Schichtdicke.

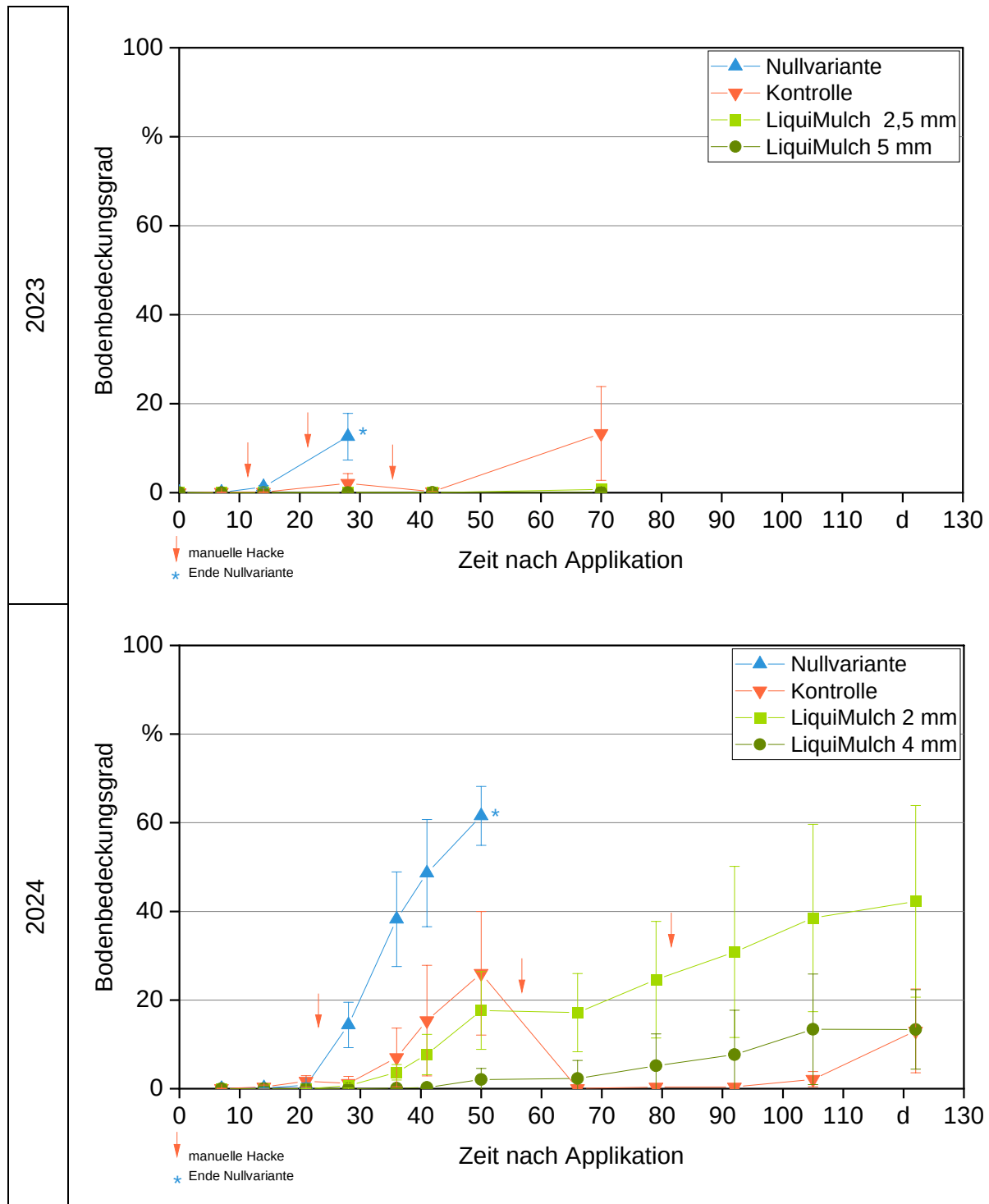


Abbildung 93: Bodenbedeckungsgrad in den Parzellen der Melone auf den Versuchsflächen der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten), (MW + SEM, $n = 4$)

Zu den im Jahr 2023 auftretenden Beikrautarten zählten Portulak, Amaranth, Melde, Franzosenkraut und in geringeren Anteilen Flughafer (Abbildung 94). Insgesamt war der Aufgang dieser Beikräuter aber gering, wie oben bereits beschrieben. Für das Jahr 2024 zeigte, wie schon in den Parzellen der Kürbisse und Zucchini, der Portulak die größte

Häufigkeit auf dem Feld. Wie in Abbildung 94 zu erkennen, war dieser auch in den Parzellen der Kontrolle und LiquiMulch 2 mm dominierend.

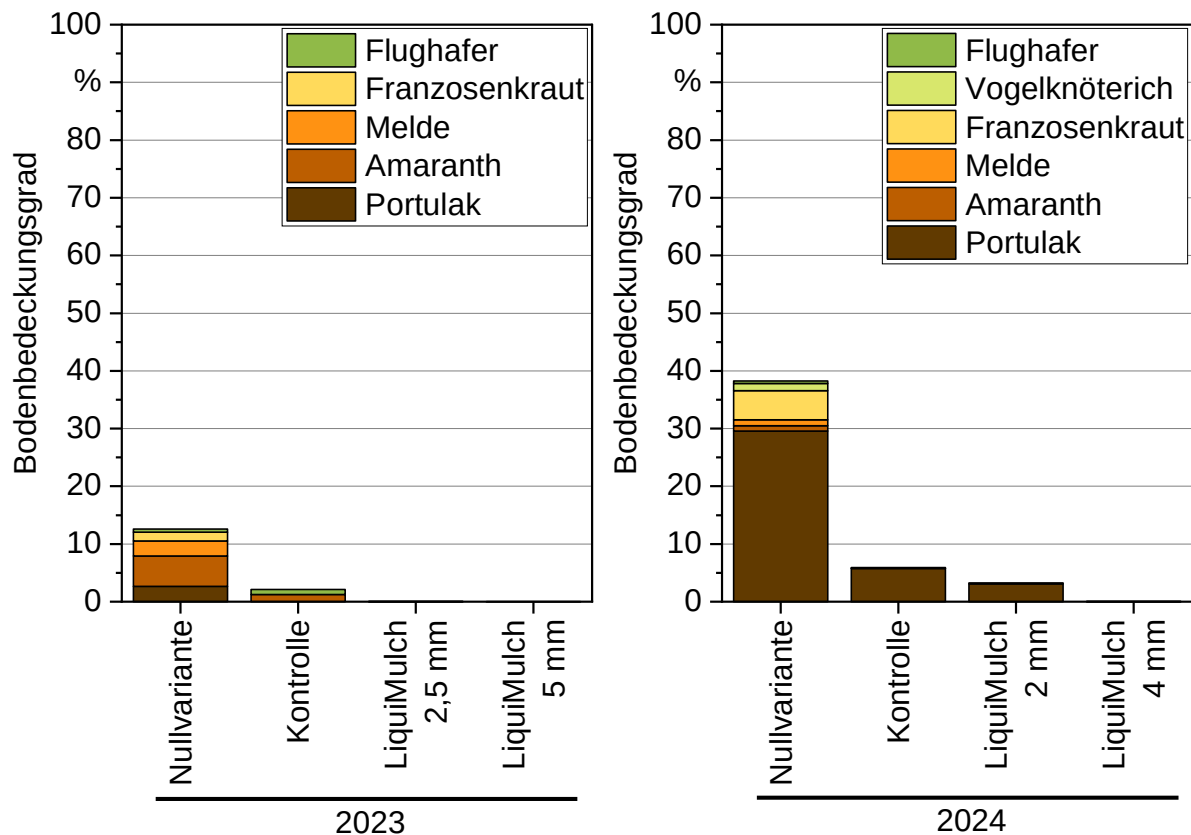


Abbildung 94: Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Melone im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW, n=4)

5.5.3.4.2 Kulturverträglichkeit

Aufgangsbonitur

Basierend auf den Erkenntnissen der Gewächshausversuche (Kapitel 5.4.2.1), wurden die Melonensamen in beiden Versuchsjahren im Gewächshaus vorgezogen und als Pflänzchen 24 h nach der Applikation in das Mulchmaterial gesetzt. Dementsprechend wurde von einer Aufgangsbonitur abgesehen.

Erntebonitur

Die Auswertung der Ernteerträge in den beiden Versuchsjahren 2023 und 2024 ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten Kontrolle (mechanische Hacke) und den beiden LiquiMulch Varianten (Abbildung 95). Dementsprechend kann ein negativer Effekt des Mulchmaterials auf die Ernteerträge der Melone ausgeschlossen werden. Die enormen Ertragsunterschiede zwischen den beiden Jahren könnten auf den extremen Witterungsunterschieden der beiden Jahre beruhen. Während die Vegetationsperiode 2023 sehr trocken war, zeichnete sich das Jahr 2024 mit überdurchschnittlich hohen Niederschlägen aus.

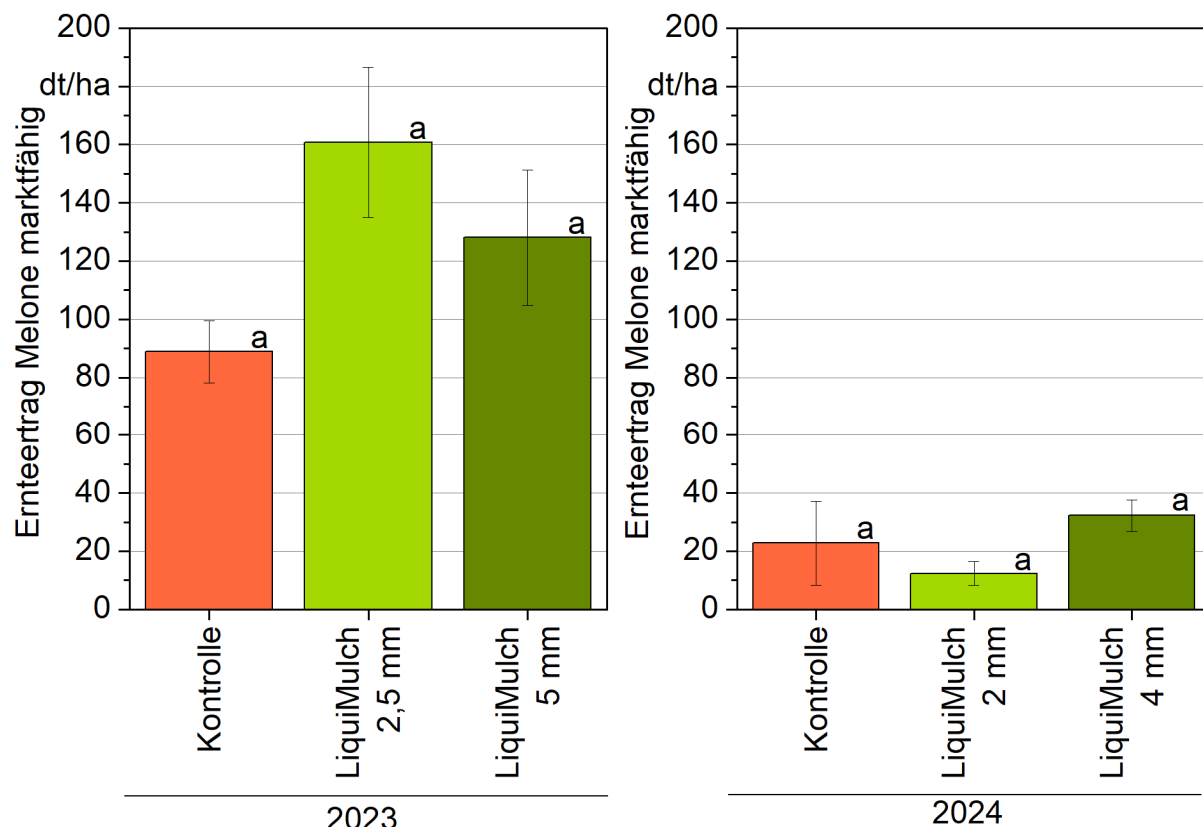


Abbildung 95: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Melonen des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$)

In beiden Versuchsjahren mussten aufgrund verschiedener Niederschlagsereignisse im Erntezeitraum Noternten durchgeführt werden, um ein Verfaulen der Früchte zu vermeiden. Nichtsdestotrotz nahmen die Melonen großen Schaden und der Anteil an nicht-marktfähigen Melonen beim Ernteertrag war in beiden Jahren hoch (Abbildung 96). Im Versuchsjahr 2024 wurden sogar mehr nichtmarktfähige faulige Melonen geerntet als marktfähige.

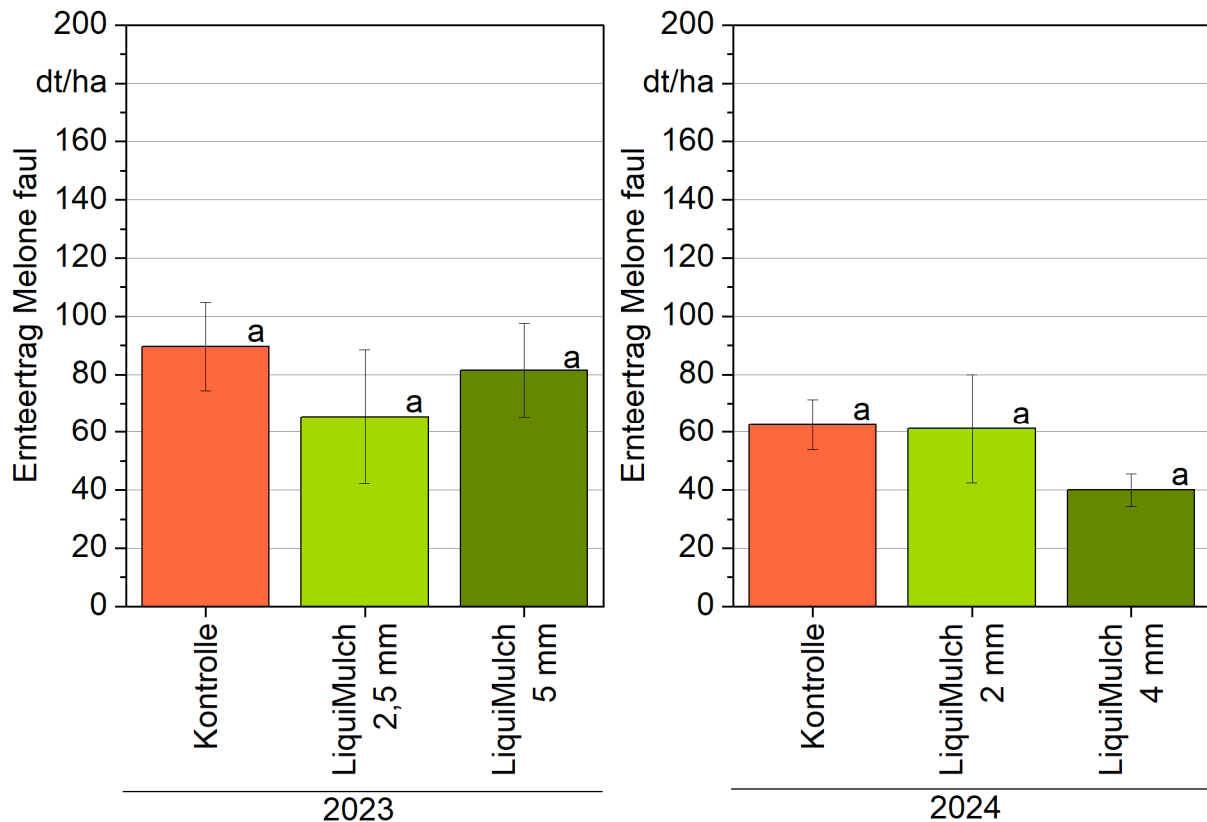


Abbildung 96: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger fauler Melonen des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$)

Aufgrund der hohen Feuchtigkeit kam es auch zum Aufplatzen der Früchte, was den Anteil an nicht marktfähigen Melonen im gesamten Ernteertrag steigerte (Abbildung 97). Fäulnis und Aufplatzen der Früchte sind beides Indizien, dass die Witterungsbedingungen im Versuchsjahr 2024 für die Kultivierung der Melone deutlich zu nass waren.

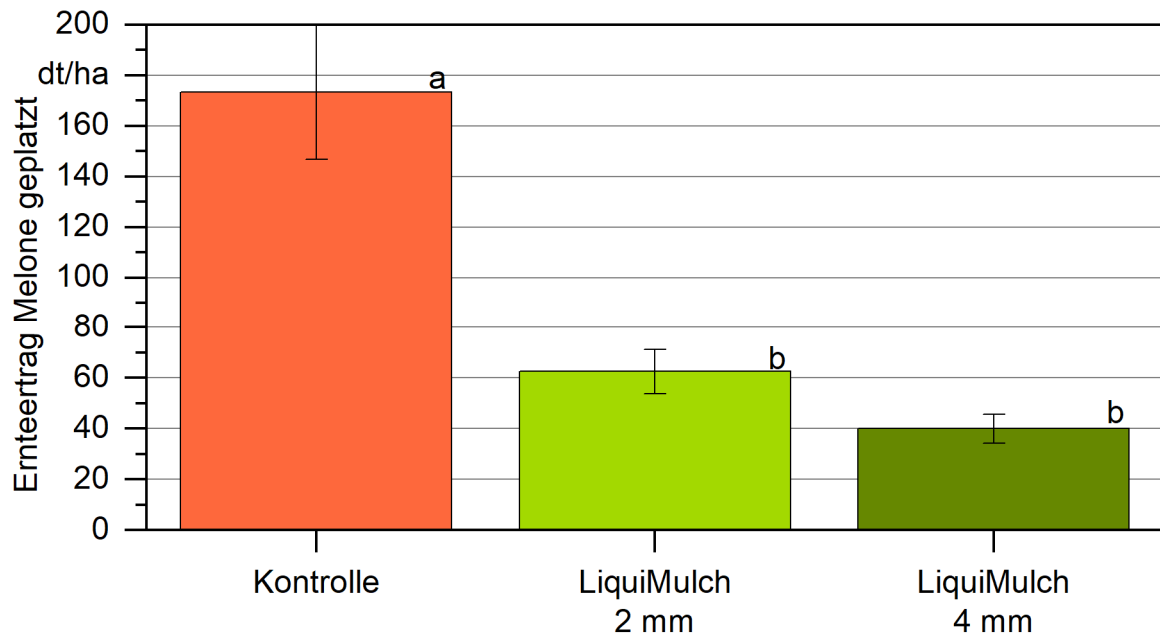


Abbildung 97: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger aufgeplatzter Melonen pro Parzelle des Jahres 2024, (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$)

5.5.3.4.3 Fazit: Melone

Die Umsetzung einer erfolgreichen Kulturführung bei Melonen gestaltete sich in den beiden Versuchsjahren als herausfordernd und konnte bislang nicht zufriedenstellend realisiert werden. Dabei ist die Ursache wahrscheinlich nicht auf das verwendete Mulchmaterial zurückzuführen, sondern auf die spezifischen Anforderungen der Melonenkultur selbst. Aufgrund dieser Schwierigkeiten ist es nach Abschluss des Vorhabens nicht möglich, Empfehlungen für die Kulturführung in Kombination mit dem Mulchverfahren bei Melonen abzuleiten. Zudem bestehen zahlreiche offene Fragestellungen im Melonenanbau allgemein, weshalb die Eignung neuartiger Verfahren im Rahmen der Melonenkultivierung derzeit wahrscheinlich nicht weiter sinnvoll ist.

5.5.3.5 Einlegegurke

5.5.3.5.1 Beikrautunterdrückung

Über die Analyse des Bodenbedeckungsgrads wurde der beikrautunterdrückende Effekt des Mulchmaterials bei der Kultivierung der Einlegegurke untersucht. Wie die beiden Graphen der Nullvariante in Abbildung 98 anzeigen, war sowohl im Jahr 2023 als auch 2024 ein erheblicher Unkrautdruck auf den Testparzellen vorhanden. Dennoch war der errechnete Bodenbedeckungsgrad der Mulchvarianten in beiden Versuchsjahren erheblich geringer als der der Nullvarianten. Damit konnte die Wirksamkeit gegen störende Unkräuter gezeigt werden. Im Jahr 2023 zeigten beide Mulchvarianten 2,5 mm und 5 mm eine vergleichbare Beikrautunterdrückung, welche sogar effektiver war als die mechanische Beikrautbekämpfung (Kontrolle) (Abbildung 98). Im Jahr 2024 dagegen, konnten zwischen den getesteten Mulchschichtdicken 2 mm, 3 mm und 4 mm Unterschiede in der beikrautunterdrückenden Wirkung beobachtet werden. Hier zeigte die 2 mm dicke Mulchvariante den schlechtesten beikrautunterdrückenden Effekt, während die beiden Mulchschichten mit 3 mm und 4 mm erneut ähnlich gute Effekt wie die mechanische Hacke zeigten (Abbildung 98). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchmaterials in Abhängigkeit der Schichtdicke steht. Dabei gilt, umso dicker das Mulchmaterial auf die Bodenoberfläche aufgetragen wird, umso höher ist die Hemmung des Aufwuchses konkurrierender Beikräuter.

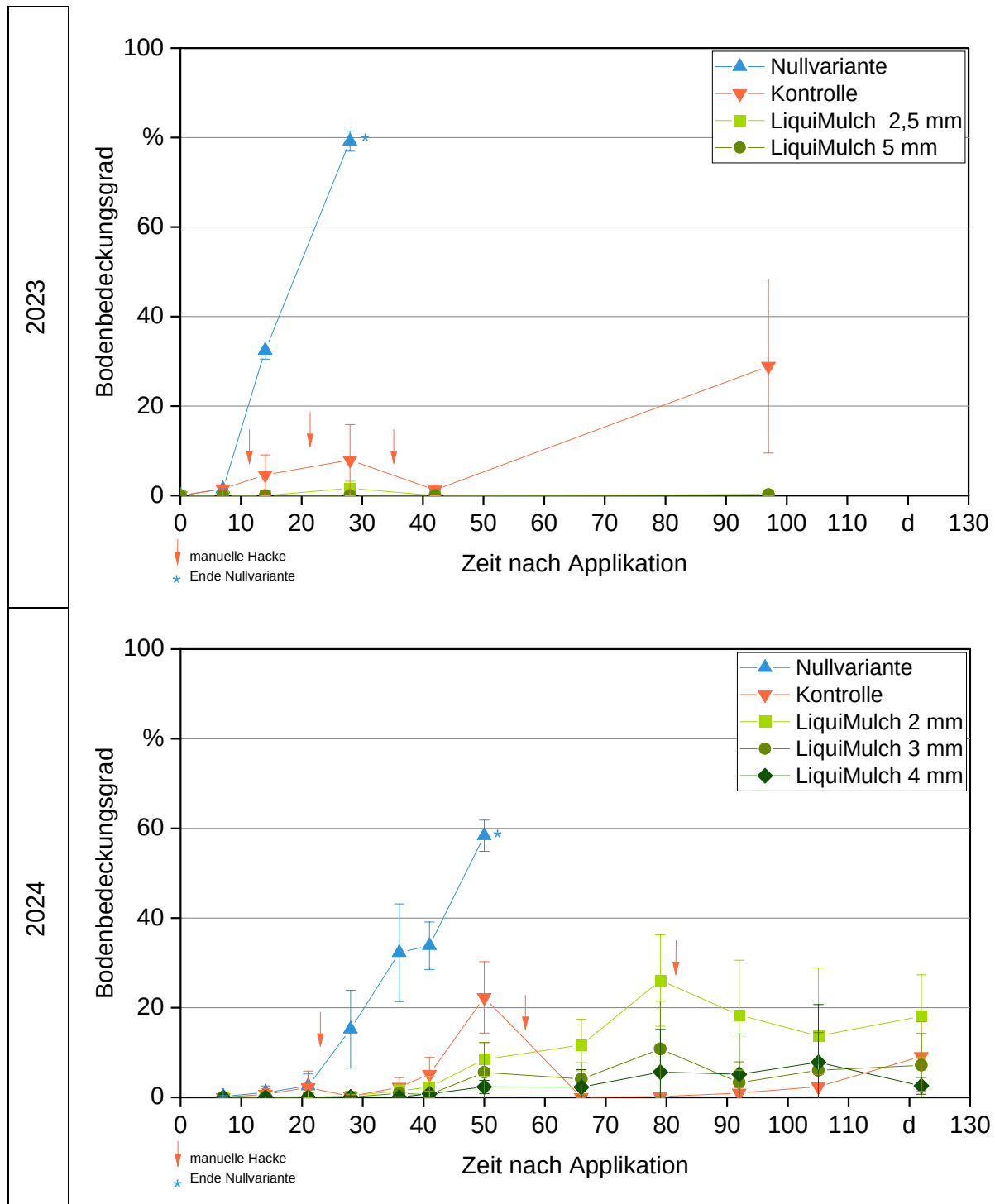


Abbildung 98: Bodenbedeckungsgrad in den Parzellen der Einlegegurke auf den Versuchsfeldern der LWG in Bamberg in den Jahren 2023 (oben) und 2024 (unten), (MW + SEM, $n = 4$)

Im Hinblick auf die verschiedenen Beikrautarten, die sich im Laufe der beiden Vegetationsperioden auf dem Feld entwickelten, konnten je nach Versuchsjahr unterschiedliche Beikräuter auf dem Feld beobachtet werden. Während im Jahr 2023 vor allem Amaranth das dominierende Beikraut war, konnte im Jahr 2024 ein vermehrter Aufgang von Portulak festgestellt werden (Abbildung 99).

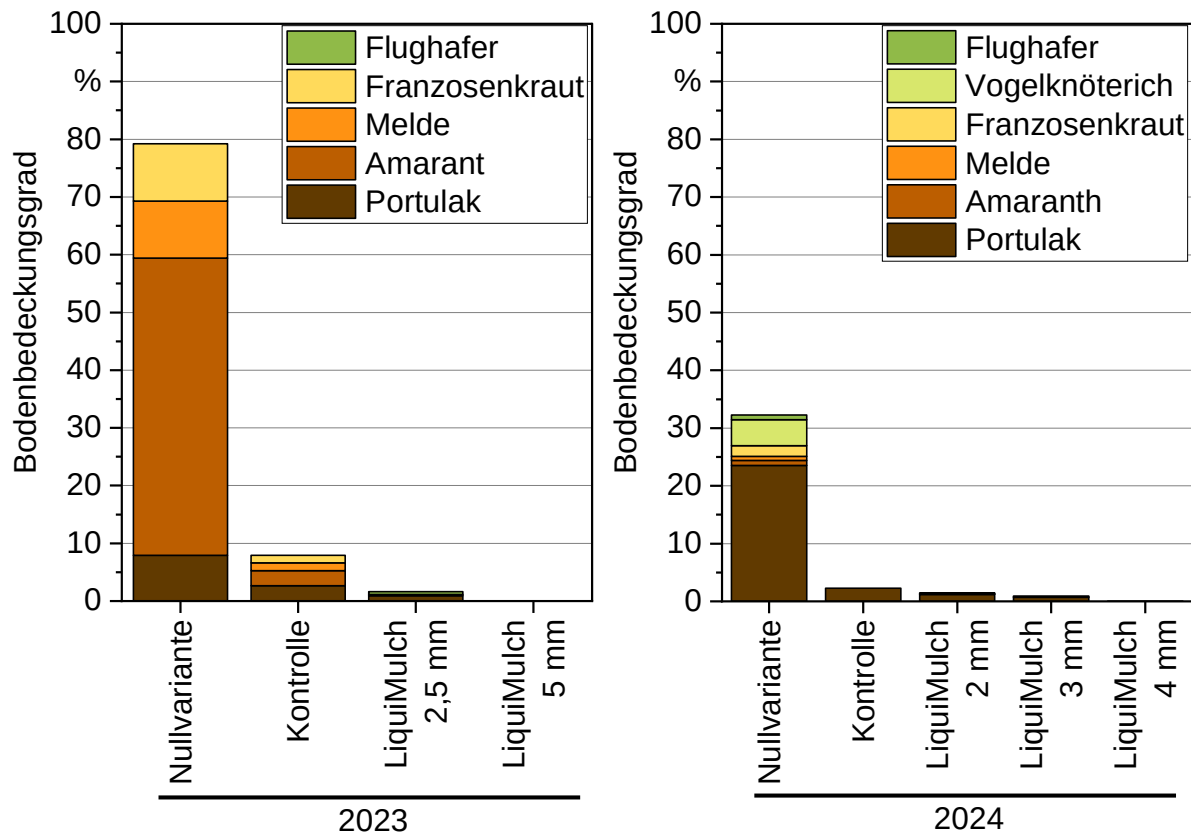


Abbildung 99: Anteil der unterschiedlichen Beikrautarten am Bodenbedeckungsgrad im Versuch Einlegegurke im Jahr 2023 (links) und 2024 (rechts), (MW, n=4)

5.5.3.5.2 Kulturverträglichkeit

Aufgangsbonitur

Die Aussaat der Gurkensamen erfolgte im Versuchsjahr 2023 ca. 24 h nach der Mulch-Applikation und wurde von Hand durchgeführt. Wie in der Abbildung 100 zu erkennen ist, war im Versuchsjahr 2023 die Keimung der Samen der Einlegegurke in den Versuchsvarianten des LiquiMulchs signifikant schlechter als in der Kontrolle. Mit einer relativen Keimungswahrscheinlichkeit von circa 55 % bei der LiquiMulch Variante 2,5 mm und 25 % bei der LiquiMulch Variante 5 mm kam es beim Aufgang der Einlegegurke zu erheblichen Ausfällen im Vergleich zur Kontrolle. Um für die Ernte eine einheitliche Anzahl an Kulturpflanzen sicherzustellen, wurde eine Fehlstellenbonitur durchgeführt, welche, wie in Abbildung 100 zu erkennen ist, die Unterschiede im Aufgang allerdings nicht vollständig ausgleichen konnte. Eine Ursache für die schlechte Keimung der Einlegegurkensamen könnte der späte Aussaatzeitpunkt am 16.06.2023 sein, wobei sich dieser auf alle Varianten negativ ausgewirkt hätte. Dennoch weicht der Aussaatzeitpunkt Mitte Juni erheblich vom herkömmlichen Aussaatzeitpunkt ab, der normalerweise Mitte April liegt. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass auch mit zunehmender Schichtdicke des Mulchmaterials die Keimung der Einlegegurkensamen negativ beeinflusst wurde (Abbildung 100). Ein Grund dafür könnten einzelne Inhaltsstoffe des Mulchmaterials sein, die die Keimung der

Gurkensamen hemmen. Zum anderen könnte aber auch eine größere Schichtdicke eine undurchdringbare Barriere für die Gurkenkeimlinge dargestellt haben. Auch die Bewässerung unter den Mulchschichten verlief über das Versuchsjahr 2023 problematisch, da sich vor allem die Bodenfeuchte unter der LiquiMulch 5 mm Variante in einer ständigen Sättigung befand. Da Einlegegurken empfindlich auf eine zu hohe Bodenfeuchte und Staunässe reagieren, könnte auch die erhöhte Bodenfeuchte in den Versuchspartzenellen problematisch für die Keimung und Entwicklung der Einlegegurken gewesen sein [48]. Aufgrund zahlreicher Unsicherheiten wurde für das Versuchsjahr 2024 im Laufe der Vegetationsperiode 2023 ein Vorversuch durchgeführt (Kapitel 5.4.2.2).

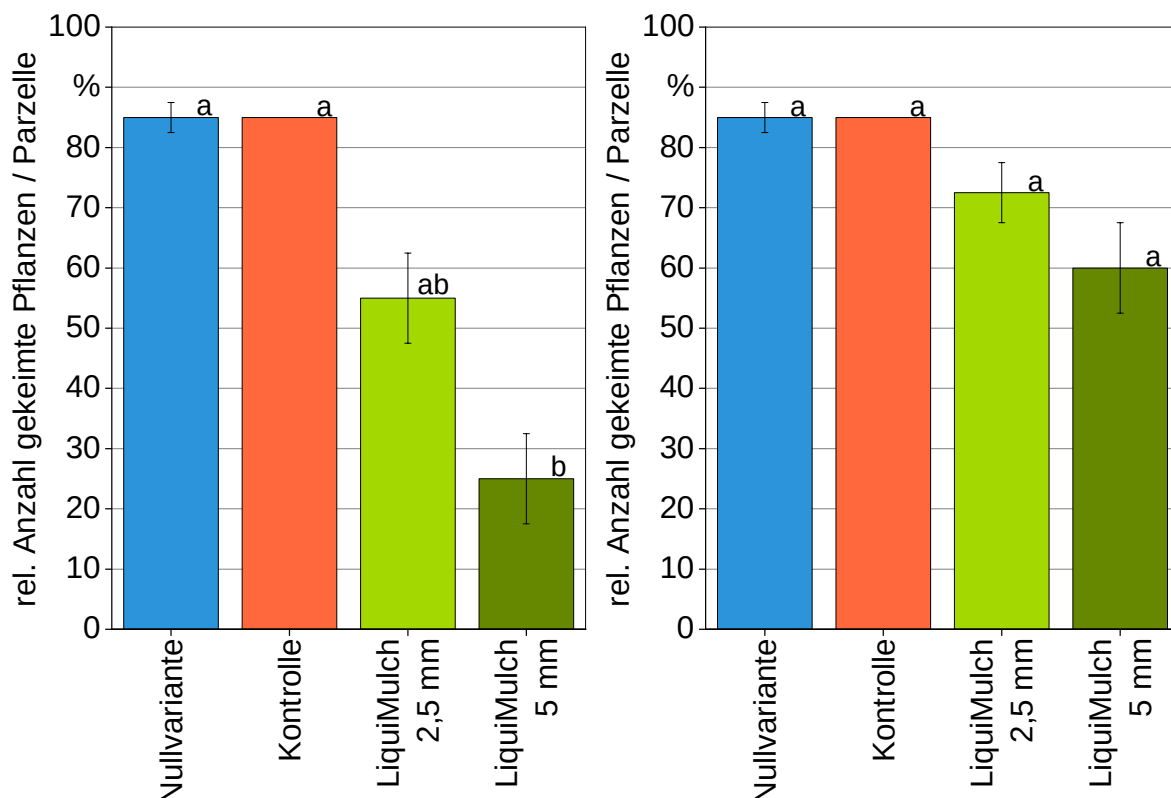


Abbildung 100: Relative Anzahl gekeimter Gurkensamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$), Versuchsjahr 2023

Im Versuchsjahr 2024 wurden die Gurkensamen erneut manuell nach Applikation des Mulchmaterials eingesät. Dieses Mal erfolgte die Aussaat der Gurkensamen allerdings bereits am 15.05.2024, also vier Wochen früher als im Jahr zuvor. Dennoch war die Keimungsfähigkeit der beiden Mulchvarianten signifikant schlechter als im Vergleich zur Kontrolle (Abbildung 101). Auch die Nachsaat der Fehlstellen konnte den Bestand nicht vollständig ergänzen, dennoch war der Unterschied zwischen der Anzahl gekeimter Pflanzen pro Parzelle innerhalb der Versuchsvarianten nicht mehr signifikant. Eine mögliche Ursache für die schlechte Keimung des Saatguts könnte erneut eine hohe Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial gewesen sein. Auch im Jahr 2024 war die Bodenfeuchtigkeit unter den

Mulchvarianten für die Keimung nicht optimal, da es insbesondere Mitte Mai zu erheblichen Niederschlägen kam, die zu einer ständigen Sättigung des Bodens führten. Aber auch ein negativer Effekt des Mulchmaterials auf die Keimung kann erneut nicht ausgeschlossen werden, dessen Inhaltstoffe wie beispielsweise Rapsöl oder Natriumbenzoat eine negative Auswirkung auf die Keimungsfähigkeit des Saatguts haben könnten [66]. Die manuelle Aussaat des Saatguts könnte außerdem zu einer Kontamination des Saatguts mit dem Mulchmaterial geführt haben, da Reste des LiquiMulchs an den Händen zu einer Verschleppung des Mulchmaterials führen können. Um zu untersuchen, ob die Keimungsfähigkeit in einem Zusammenhang mit dem Mulchmaterial steht, wurden im Vorfeld des Versuchsjahres 2025 Keimungsversuche im Gewächshaus durchgeführt (Kapitel 5.4.2.3).

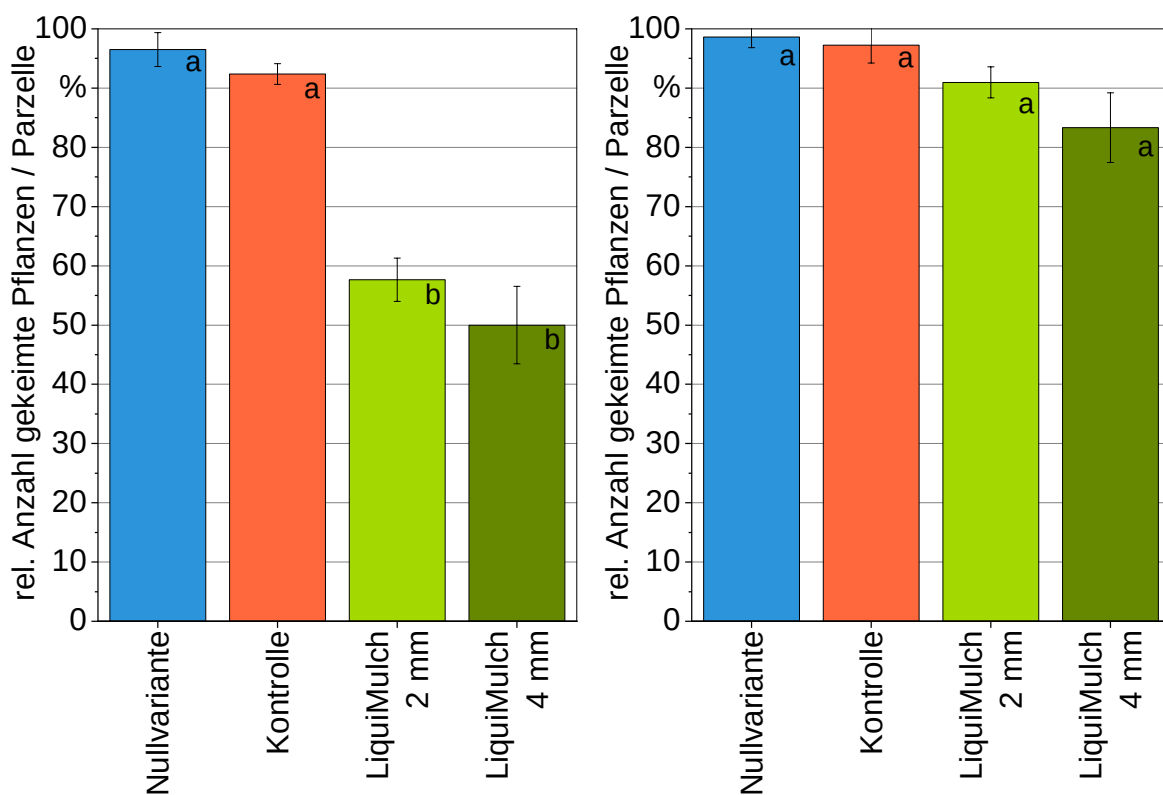


Abbildung 101: Relative Anzahl gekeimter Gurkensamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$), Versuchsjahr 2024

Im Versuchsjahr 2025 wurden die Samen der Einlegegurke maschinell mit Hilfe eines Sägeräts der Firma Fleischmann ausgesät. Dabei erfolgte die Aussaat der Samen am 07.05.2025 und eine Nachsaat am 22.05.2025. Wie in Abbildung 102 zu erkennen ist konnten bei der ersten Aufgangsbonitur am 22.05.2025 signifikante Unterschiede zwischen den drei Versuchsvarianten festgestellt werden. Dabei zeigten die beiden Mulchvarianten eine signifikant schlechtere Keimung als in der Kontrollvariante. Nichtsdestotrotz konnte dennoch durch die maschinelle Aussaat eine deutlich bessere Keimung der Samen im LiquiMulch erzielt werden als im Vergleich zu den beiden Versuchsjahren 2023 und

2024. Die Daten zeigen deutlich, dass die Keimung nach der maschinellen Aussaat besser ist als nach manueller Aussaat. Dies könnte unter anderem an einer Kontamination der Samen mit Mulchmaterial bei der händischen Aussaat liegen, die sich negativ auf die weitere Keimung der Samen auswirkt. Allerdings könnte sich auch die Durchmischung der Erde durch das Einstechen und Öffnen des Sästempels bei der Samenablage positiv auf die Keimungsbedingungen der Einlegegurkensamen ausgewirkt. Es wurde am 22.05.2025 eine Nachsaat durchgeführt, wodurch, wie eine zweite Aufgangsbonitur am 12.06.2025 zeigte, die relative Anzahl gekeimter Pflanzen auf annähernd 100 % in allen Varianten erhöht werden konnte.

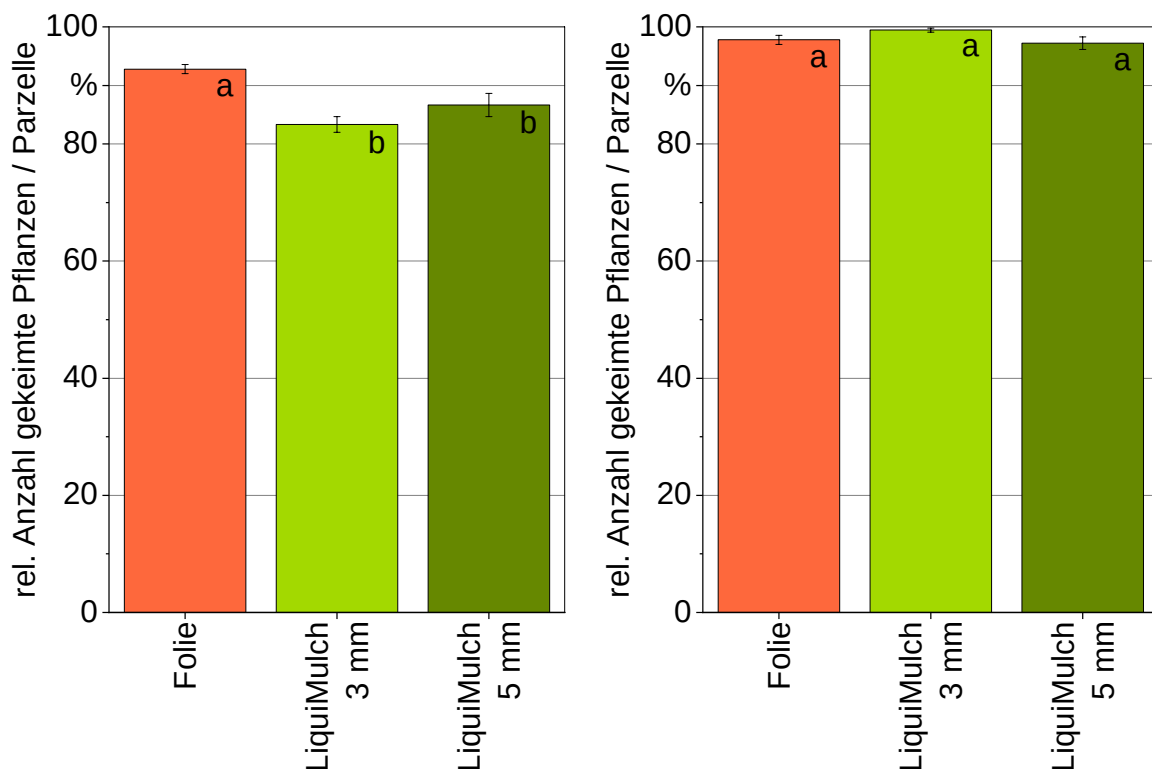


Abbildung 102: Relative Anzahl gekeimter Gurkensamen nach der Aussaat (links) und nach der (rechts) Nachsaat (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 4$), Versuchsjahr 2025

Erntebonitur

Die Ernteerträge der Einlegegurken waren im Jahr 2023 zwischen den Versuchsvarianten Kontrolle und den beiden LiquiMulch-Varianten vergleichbar (Abbildung 103). Allerdings war im Jahr 2024 ein signifikanter Unterschied zwischen den LiquiMulch-Varianten und der Kontrolle zu erkennen. Die im Vergleich zur Praxis insgesamt niedrigen Erträge sind auf die gewählte niedrige Pflanzendichte, das Vereinzeln auf eine Pflanze pro Saatloch sowie im Jahr 2023 auf den späten Saatzeitpunkt im Juni zurückzuführen. Dabei war der Ernteertrag der Kontrolle erheblich höher als die Erträge der LiquiMulch-Parzellen. Eine mögliche Ursache dafür könnte der höhere Beikrautdruck gewesen sein, welcher dazu führt, dass die Kulturpflanzen mit den Beikräutern um Nährstoffe konkurrieren mussten.

Da sich die Ernteerträge mit zunehmender Schichtdicke des Mulchmaterials verringern, könnte aber auch eine schlechtere Keimung der Samen unter den Mulchvarianten eine Ursache für die geringeren Erträge sein. Die verspätete Keimung beziehungsweise die dadurch verzögerte Entwicklung der Gurkensamen kann sich negativ auf den Ertrag ausgewirkt haben. Eine weitere Ursache für die verminderten Ernteerträge könnte auch mit der Witterung im Jahr 2024 zusammenhängen. Aufgrund der zahlreichen Niederschläge war die Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial sehr hoch, weshalb die Keimung und die Pflanzenentwicklung der Einlegegurkensamen eventuell negativ beeinträchtigt war. Während sich bei trockener Vegetation das Mulchmaterial als Verdunstungsschutz auszeichnet, kann es bei starken Niederschlägen auch dazu führen, dass die Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial sehr hoch ist. Eine erhöhte Bodenfeuchte könnte zu Wurzelfäule führen, beziehungsweise das Wachstum der Pflanzen beeinträchtigen, wodurch Ertragsminderungen entstehen können. Dementsprechend ist es sehr wichtig, die Bewässerungsgaben auf das Mulchmaterial und die aktuellen Witterungsbedingungen optimal abzustimmen.

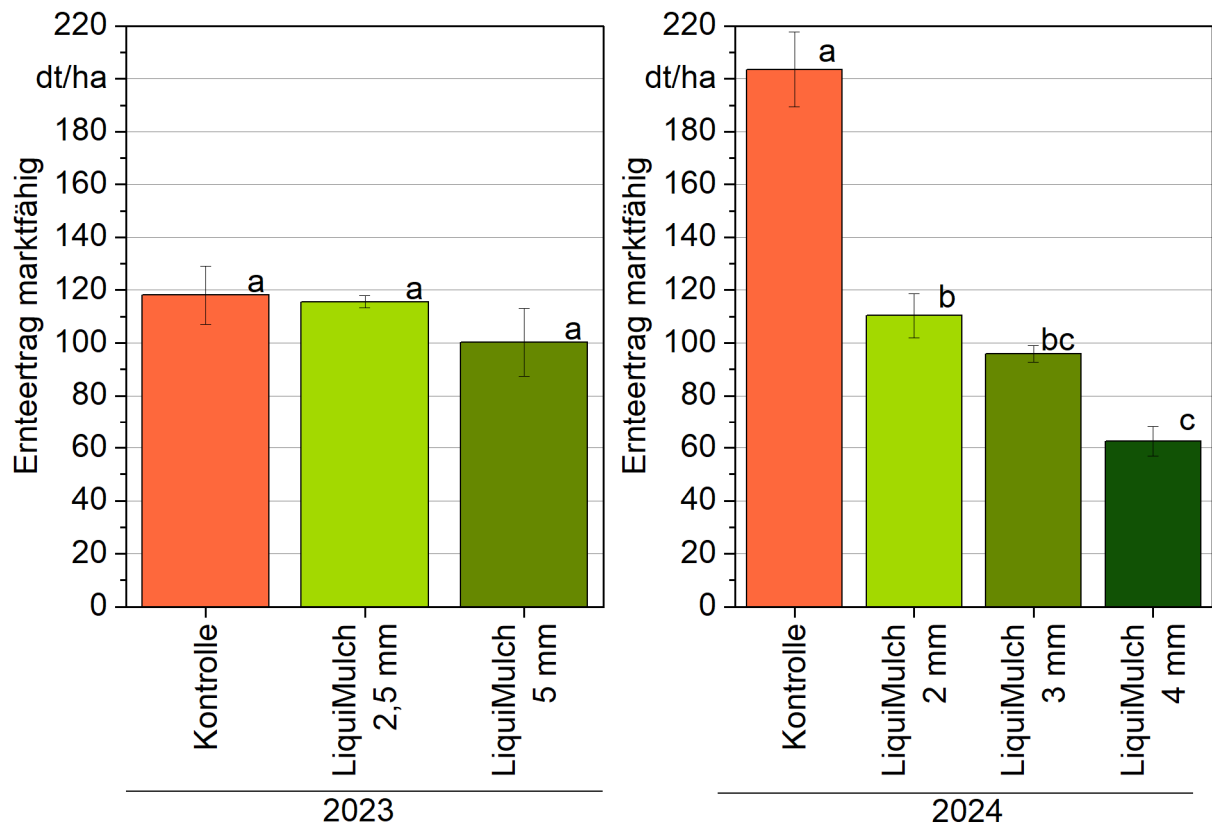


Abbildung 103: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Einlegegurken des Jahres 2023 (links) und des Jahres 2024 (rechts), (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 3$, $n = 4$)

Im Versuchsjahr 2025 lagen die Ernteerträge der Einlegegurke mit 500 -700 dt/ha deutlich über den Ernteerträgen der Vorjahre. Die Ursachen hierfür sind in der Sortenwahl, in der angewandten Horstsaat mit dem Vereinzeln auf maximal drei Pflanzen sowie in der organischen Stickstoff-Flüssigdüngung über Tropfschläuche begründet. Der Ernteertrag der

gesamten marktfähigen Ware der LiquiMulch-Variante 3 mm war signifikant schlechter, während die Erträge der 5 mm Variante im Vergleich zur Kontrolle ähnlich hoch waren (Abbildung 104). Eine mögliche Ursache für die niedrigeren Erträge der LiquiMulch-Variante mit 3 mm Dicke könnte in der dünneren Schichtdicke liegen, die möglicherweise zu einem erhöhten Beikrautdruck geführt hat. Zudem könnte die geringere Schichtdicke eine stärkere Verdunstung verursacht haben, was zu einer Unterversorgung der Pflanzen mit Wasser geführt haben könnte. Auch niedrigere Bodentemperaturen könnten sich negativ auf die Erträge ausgewirkt haben. Die Kontrollvariant war im Versuchsjahr 2025 nicht die Beikrautbekämpfung mit einem Hackgerät, sondern bestand in der Verwendung von konventionellen Mulchfolien. Eine mögliche Ursache für die höheren Ernteerträge im Jahr 2025 im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Jahren könnte die optimale Bewässerung des Versuchs sein und die für die Einlegegurke sehr guten Witterungsbedingungen im Jahr 2025. Zur Unterstützung der Bestandsetablierung kam im Jahr 2025 außerdem eine Vliesabdeckung zum Einsatz, die in der Praxis üblicherweise bis zur ersten Ernte erfolgt und sich förderlich auf Keimung und Pflanzenentwicklung auswirkt [48]. Begünstigend für die hohen Ernteerträge wirkte sich möglicherweise auch die verwendete Sätechnik aus, vor allem im Hinblick auf die Mulchvarianten. Anstatt die Aussaat der Einlegegurkensamen manuell zu erledigen, wurde sie im Jahr 2025 mit einem Sägerät des Maschinenherstellers Fleischmann durchgeführt. Durch die Verwendung dieses Sägeräts konnte sichergestellt werden, dass das Saatgut nicht mit dem Mulchmaterial in Kontakt kam. Außerdem wurde durch das Einstechen und Öffnen des Sästempels auch das unter dem Mulchmaterial liegende Erdreich erneut durchmischt. Dies könnte sich vor allem im Hinblick auf die Keimung, positiv ausgewirkt haben, was die Ergebnisse der Vortests bereits angedeutet haben. Bei einer manuellen Aussaat konnte die Kontaminierung des Saatguts kaum verhindert werden. Durch das Graben eines Saatlochs mithilfe des im Sägerät integrierten Sästempels kam das Saatgut mit dem Mulchmaterial nicht in Kontakt. Die exakte Höheneinstellung und Höhenführung des Sägeräts trug außerdem dazu bei, dass das Mulchmaterial durch den Sävorgang kaum beschädigt wurde. Die richtigen Geräteeinstellungen bei der herkömmlichen Sätechnik sind entscheidend für den Erfolg des Verfahrens, da nur dadurch gewährleistet werden kann, dass die Beschädigung des Mulchmaterials durch Komponenten wie den Sästempel, das Särad oder das Anpressrad auf ein Minimum reduziert wird. Umso unversehrter das Mulchmaterial die Aussaat mit der herkömmlichen Sätechnik übersteht, umso größer ist nachfolgend die beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchmaterials.

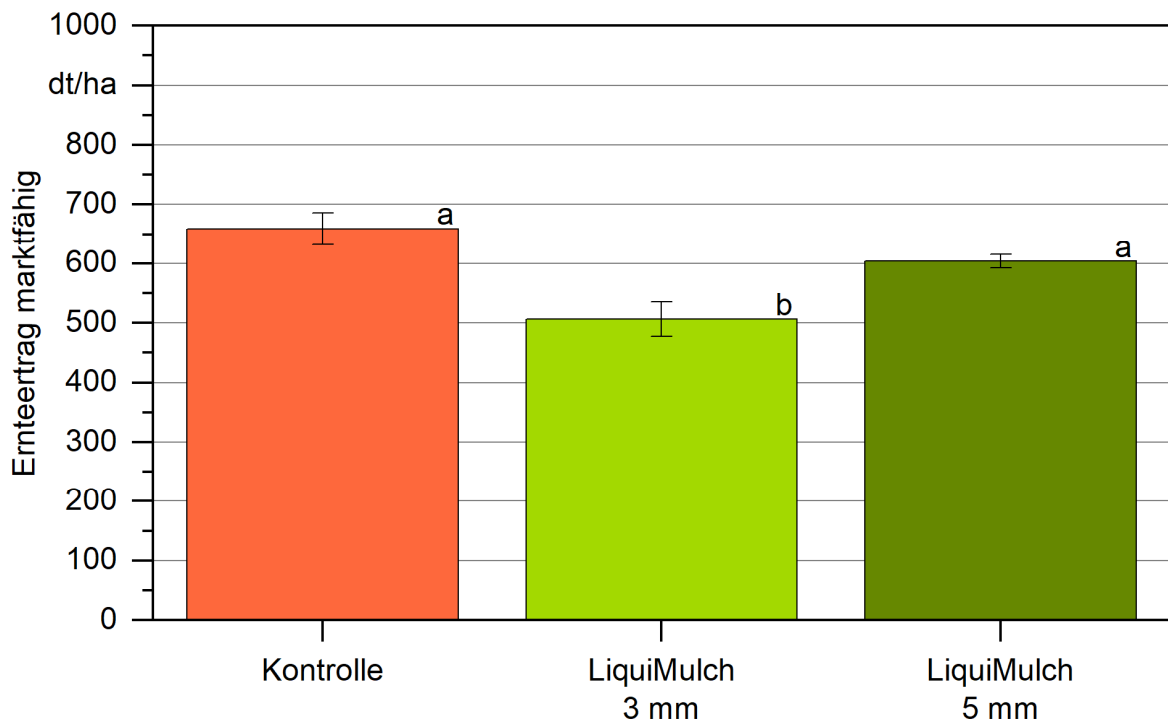


Abbildung 104: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Einlegegurken des Jahres 2025, (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 9$)

Bei genauerer Betrachtung der Ernteerträge im Hinblick auf die beiden marktfähigen Sortierungen konnten bei der kleineren Sortierung von 3 - 9 cm keine Unterschiede innerhalb der getesteten Varianten festgestellt werden (Abbildung 105, links). Bei der Sortierung 10 - 15 cm waren die Erträge der Variante LiquiMulch 3 mm signifikant geringer als die anderen beiden Varianten (Abbildung 105, rechts). Ursachen dafür könnten wieder die bereits diskutierten Faktoren sein: höherer Beikrautdruck, geringere Temperatur oder eine stärkere Verdunstung im Vergleich zu den anderen beiden Varianten.

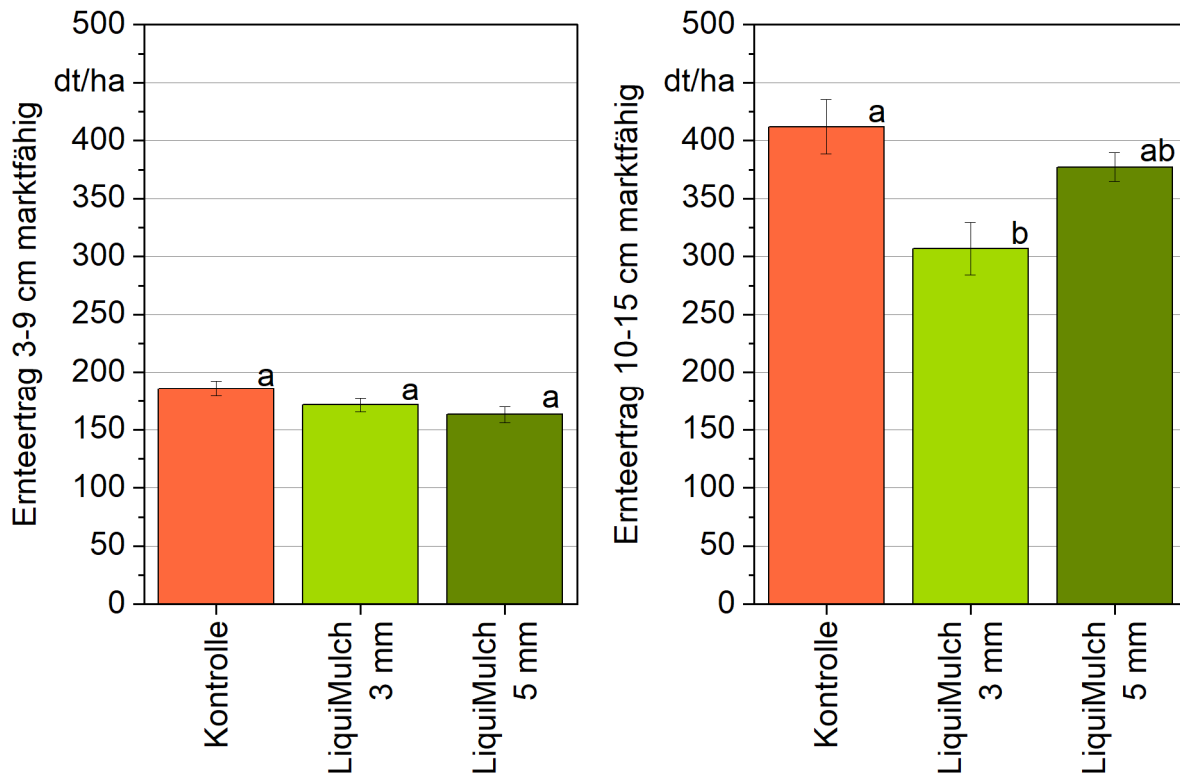


Abbildung 105: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter marktfähiger Einlegegurken des Jahres 2025 der Sortierung 3-9 cm (links) und 10-15 cm (rechts) (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 9$)

Bei den nicht marktfähigen Einlegegurken wurde unterschieden zwischen unförmigen und faulen, gelben Einlegegurken. Wie in Abbildung 106, links dargestellt, war das Auftreten unförmig gewachsener Einlegegurken bei der LiquiMulch-Variante 3 mm am geringsten. Die Ernteerträge der gelben oder faulen Einlegegurken innerhalb der drei Vergleichsvarianten zeigte keine Unterschiede. Insgesamt waren die Ernteerträge in dt/ha im Vergleich zu den marktfähigen Erträgen im Jahr 2025 deutlich geringer. Dementsprechend deuten die Ergebnisse an, dass das Mulchmaterial die Entstehung von nicht marktfähiger Ware bei der Kultur Einlegegurken nicht begünstigt.

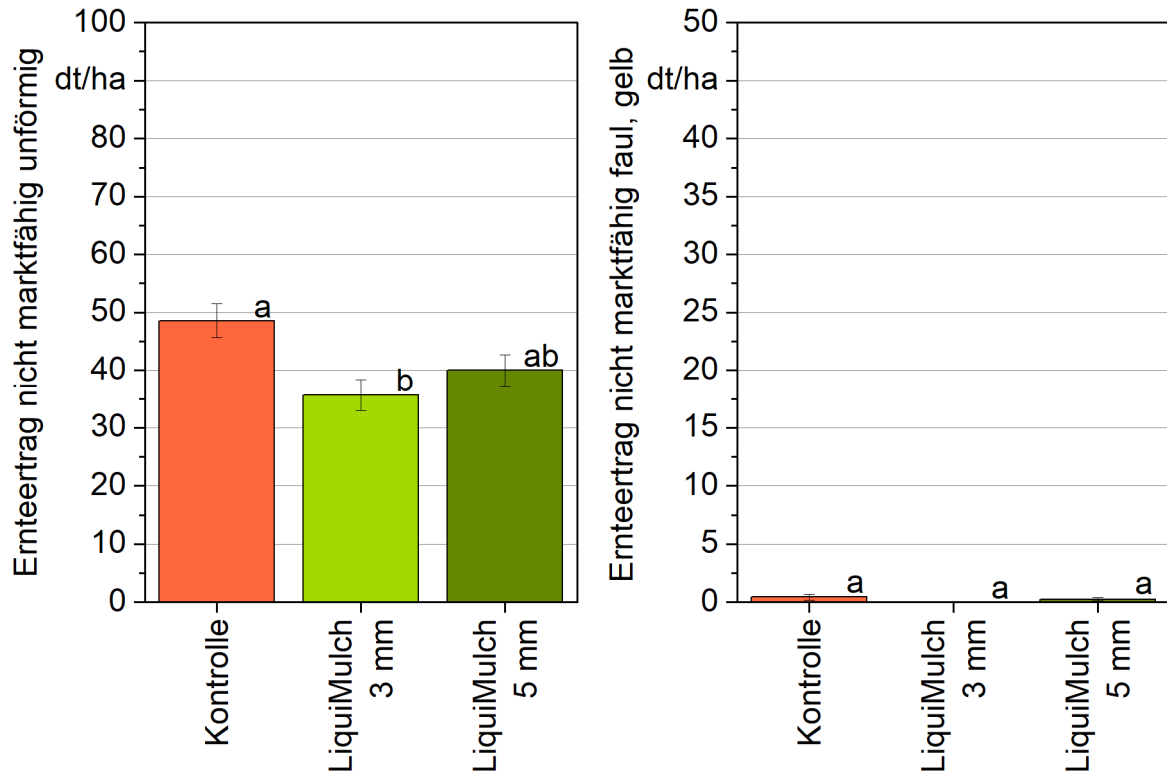


Abbildung 106: Durchschnittlicher Ernteertrag in dt/ha geernteter nicht marktfähiger Einlegegurken: unförmig (links); gelb oder faul (rechts) des Jahres 2025 (MW $\pm$ SEM, paarweiser Mittelwertsvergleich nach Tukey; $p < 0,05$, $n = 9$)

5.5.3.5.3 Fazit: Einlegegurke

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Verwendung des LiquiMulchs im Zuge der Kultivierung von Einlegegurken für das Beikrautmanagement erfolgreich eingesetzt werden kann, sofern die Kulturführung entsprechend auf das Mulchverfahren abgestimmt wird. Dazu zählen unter anderem eine optimale Bewässerung und Düngung der Einlegegurken. Die im Versuchsjahr nachgewiesene Kompatibilität des Mulchmaterials mit der herkömmlichen Sätechnik bei der Einlegegurke deutet zudem darauf hin, dass das neuartige Mulchverfahren ohne größere betriebliche Anpassungen, abgesehen von der Anschaffung der Applikationstechnik, in den Praxisbetrieb eingebunden werden kann. Beim Einsatz der herkömmlichen Sätechnik sind allerdings eine exakte Höheneinstellung und Höhenführung der Sämaschine unerlässlich. Das LiquiMulchverfahren bietet möglicherweise die Voraussetzung, dass künftig die Ernte in Einlegegurken maschinell erfolgen kann. Vollernter können nach gegenwärtigem Erkenntnisstand in mit Mulchfolie abgedeckten Beeten nicht eingesetzt werden.

5.6 Ökonomische Einordnung

5.6.1 Ökonomische Einordnung des Verfahrens

Für die ökonomische Einordnung des Verfahrens werden die in den Feldversuchen kultivierten Gemüsekulturen Kürbis, Zucchini und Einlegegurke näher betrachtet. Dabei wird ein Vergleich der Kosten des LiquiMulch Verfahrens mit unterschiedlichen Varianten durchgeführt (konventionell, ökologisch, Mulchfolie abbaubar, Mulchfolie nicht abbaubar). Die getroffenen Annahmen zur Kalkulation der Verfahrenskosten sind in Kapitel 4.6 zusammengefasst.

Tabelle 36 gibt eine Übersicht über die Gesamtkosten der unterschiedlichen Verfahren für die im Vorhaben untersuchten Kulturen Kürbis, Zucchini und Einlegegurke. Bei den Kulturen Zucchini und Einlegegurke sind die Gesamtkosten der ökologischen Verfahren niedriger als die konventionellen Vergleichsvarianten.

Tabelle 36: Gesamtkosten in €/ha der unterschiedlichen Kultivierungsverfahren für die Kulturen Kürbis, Zucchini und Einlegegurke

Verfahren	Gesamtkosten Kürbis in €/ha	Gesamtkosten Zucchini in €/ha	Gesamtkosten Einlegegurke in €/ha
Konventionell und Folie	7.719	22.459	70.104
Konventionell und Folie abbaubar	8.003	22.749	70.394
Konventionell und LiquiMulch	16.728	31.510	79.155
Ökologisch und Folie	7.221	14.435	43.811
Ökologisch und Folie abbaubar	7.505	14.725	44.102
Ökologisch und LiquiMulch	16.229	23.486	52.862

Neben den Gesamtkosten wurden außerdem die absoluten und relativen Mehrkosten je Hektar durch den Einsatz des LiquiMulch-Verfahrens für die unterschiedlichen Kulturen analysiert. Dabei wurden die Gesamtkosten der unterschiedlichen Verfahren miteinander verglichen und daraus die Mehrkosten errechnet. Einen Überblick über die absoluten und relativen Mehrkosten durch den Einsatz von LiquiMulch im Vergleich zu den herkömmlichen Kultivierungsverfahren liefert Tabelle 37. Die durch das LiquiMulch-Verfahren bei der Kultivierung von Speisekürbissen entstehenden Mehrkosten belaufen sich bei den Varianten „Konventionell (Folie)“ und „Ökologisch (Folie)“ auf jeweils 9.008 €/ha, während sie bei

den Varianten „Konventionell (Folie abbaubar)“ und „Ökologisch (Folie abbaubar)“ 8.724 €/ha betragen. Im Vergleich zu den ursprünglichen Verfahrenskosten der jeweiligen Vergleichsvarianten würden die Gesamtkosten bei der Anwendung von LiquiMulch um mehr als 100 % steigen. Damit ist die Anwendung des LiquiMulch-Verfahrens bei der Kultivierung mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Am kostengünstigsten schneidet die Herbizid-Variante unter Verwendung einer nicht abbaubaren Folie ab.

Tabelle 37: Absolute und relative Mehrkosten durch das LiquiMulch-Verfahren im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahrensvariante für die Kultur Kürbis (Hokkaido)

Verfahrens- Vergleich	Konventionell (Folie) vs. LiquiMulch	Konventionell (Folie Abbaubar) vs. LiquiMulch	Ökologisch (Folie) vs. LiquiMulch	Ökologisch (Folie Abbaubar) vs. LiquiMulch
Absolute Mehrkosten durch LiquiMulch- Verfahren in €/ha	9.008	8.724	9.008	8.724
Relative Mehrkosten durch LiquiMulch- Verfahren in %	117	109	125	116

Die Ergebnisse der Analyse der absoluten und relativen Mehrkosten durch das Verfahren LiquiMulch sind in Tabelle 38 zusammengefasst. Als kostengünstigeres Anbauverfahren in Bezug auf die Fläche erweisen sich die beiden ökologischen Varianten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Ernteerträge bei den ökologischen Methoden niedriger ausfallen als bei der konventionellen Bewirtschaftung. So lag beispielsweise der im Jahr 2024 im konventionellen Landbau erzielte Ertrag von Zucchini bei 40.270 kg/ha, während im ökologischen Landbau lediglich 33.786 kg/ha Zucchini geerntet werden konnten [17][16]. Dementsprechend würden sich die Verkaufspreise pro Kilogramm durch das Mulchverfahren bei den beiden Ökologischen Verfahren stärker erhöhen. Auch für diese Kultur entstehen durch die Anwendung des LiquiMulch-Verfahrens deutliche Mehrkosten. Dabei liegen die Differenzkosten für „Konventionell (Folie)“ und „Ökologisch (Folie)“ bei jeweils 9.051 €/ha und für „Konventionell (Folie abbaubar)“ und „Ökologisch (Folie abbaubar)“ bei jeweils 8.761 €/ha. Relativ zu den ursprünglichen Gesamtkosten der Varianten ergibt sich daraus eine Preissteigerung um 40 % für die konventionellen Varianten „Konventionell (Folie)“ und „Konventionell (Folie abbaubar)“ und ca. 60 % für die ökologischen Varianten „Ökologisch (Folie)“ und „Ökologisch (Folie abbaubar)“. Auch wenn die relativen Mehrkosten im Vergleich zum Kürbis deutlich geringer ausfallen, sind sie dennoch erheblich und müssen mit einer umfassenden Kosten-Nutzen-Analyse beurteilt werden, inwiefern die potenziellen Vorteile des Mulchmaterials, wie beispielsweise die umweltfreundliche

Regulierung des Beikrauts und plastikfreie Lebensmittelproduktion die hohen Mehrkosten rechtfertigen.

Tabelle 38: Absolut und relative Mehrkosten des LiquiMulch-Verfahrens im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahrensvariante für die Zucchini

Verfahrens- Vergleich	Konventionell (Folie) vs. LiquiMulch	Konventionell (Folie Abbaubar) vs. LiquiMulch	Ökologisch (Folie) vs. LiquiMulch	Ökologisch (Folie Abbaubar) vs. LiquiMulch
Absolute Mehrkosten durch LiquiMulch- Verfahren in €/ha	9.050	8.760	9.050	8.760
Relative Mehrkosten durch LiquiMulch- Verfahren in %	40	39	63	59

Auch für die Kultivierung von Einlegegurken wurde eine Analyse der absoluten und relativen Mehrkosten durch das Verfahren LiquiMulch durchgeführt (Tabelle 39). Für die Varianten „Konventionell (Folie)“ und „Ökologisch (Folie)“ ergab der Vergleich zum LiquiMulch-Verfahren absolute Mehrkosten von jeweils 9.051 €/ha und für die Varianten „Konventionell (Folie abbaubar)“ und „Ökologisch (Folie abbaubar)“ von jeweils 8.761 €/ha. Damit kommt es im Hinblick auf die Gesamtverfahrenskosten zu einem relativen Anstieg der Kosten von circa 13 % bei den konventionellen Verfahren und bei den ökologischen Verfahren von circa 20 %. Im Hinblick auf die Gesamtkosten sind die ökologischen Verfahrensvarianten deutlich kostengünstiger als die konventionellen Varianten. Nichtsdestotrotz muss beachtet werden, dass den günstigeren Verfahrenskosten auch eine geringere Erntemenge entgegensteht. Im Jahr 2024 wurden beim konventionellen Anbau 113.520 kg/ha Einlegegurken geerntet und im ökologischen Anbau lediglich 50.000 kg/ha [16][61]. Dies liegt vor allem an der kürzeren Kulturführung, die sich im konventionellen Landbau über zehn bis zwölf Wochen erstreckt und im ökologischen Landbau auf nur vier bis maximal acht Wochen [61]. Durch niedrigere Erträge würden sich die Verkaufspreise pro Kilogramm durch das Mulchverfahren bei den beiden Ökologischen Verfahren stärker erhöhen.

Tabelle 39: Absolute und relative Mehrkosten des LiquiMulch-Verfahrens im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahrensvariante für die Einlegegurke

Verfahrens- Vergleich	Konventionell (Folie) vs. LiquiMulch	Konventionell (Folie Abbaubar) vs. LiquiMulch	Ökologisch (Folie) vs. LiquiMulch	Ökologisch (Folie Abbaubar) vs. LiquiMulch
Absolute Mehrkosten durch LiquiMulch- Verfahren in €/ha	9.051	8.761	9.051	8.761
Relative Mehrkosten durch LiquiMulch- Verfahren in %	13	12	21	20

Trotz der entstehenden Mehrkosten durch das LiquiMulch-Verfahren könnte der Einsatz des umweltfreundlichen Verfahrens für die Kultivierung von Einlegegurken dennoch sehr interessant sein. Da die Einlegegurke stabile Erträge liefert und einen positiven Deckungsbeitrag aufweist, gilt sie als eine marktwirtschaftlich besonders interessante Kultur. Zudem ist ihre hauptsächliche Verwendung als Konserve weniger anfällig für inflationsbedingte Preissteigerungen im Vergleich zu frischem Gemüse, was ihre wirtschaftliche Attraktivität zusätzlich erhöht [32]. Zudem steigt die Nachfrage bei immer mehr Gemüseverarbeitungsbetrieben, den Einsatz von Kunststoff während der Produktion zu reduzieren, um das Risiko von Plastikrückständen in den hergestellten Lebensmitteln zu minimieren. Dies gilt insbesondere, falls künftig die maschinelle Einlegegurkenernte Verbreitung findet. Dementsprechend könnte hier der Einsatz von LiquiMulch eine interessante und vor allem plastikfreie Alternative für die Landwirte bieten, ohne dass sie befürchten müssen, dass der Absatzmarkt für das erzeugte Gemüse kleiner wird.

Die größten Auswirkungen auf die Kosten des LiquiMulch-Verfahrens haben die hohen Materialkosten von 0,8 €/kg. Durch den Austausch kostenintensiver Inhaltsstoffe durch beispielsweise Reststoffe oder der Formulierung einer ölfreien Rezeptur deutlich reduziert werden. Auch die Verminderung der Aufwandsmenge, könnte die Kosten des Verfahrens reduzieren. Hierfür sind weitere Untersuchungen erforderlich.

5.6.2 Ökonomische Einordnung des Mulchmaterials

Wie in Kapitel 5.6.1 verfolgten die Rezepturoptimierungen (5.1.2) das Ziel der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens, denn mit einem Preis von 0,80 € pro Kilogramm, sind die Materialkosten der Rezeptur 114k erheblich. Bei einer Applikation eines Hektars mit einer Schichtdicke von 5 mm und einer Streifenbreite von 0,6 m, so wie es im Vorhaben OptiMulch zum Einsatz kam, entstehen knapp 16.000 € pro Hektar Materialkosten, exklusive Maschinenanschaffungskosten. Wie in Abbildung 107 zu erkennen ist, ist vor allem das Rapsöl, sowie das verwendete Biopolymer Natriumalginat für die hohen Materialkosten verantwortlich. Rapsöl macht einen Anteil von circa 30,7 % der derzeitigen Kosten aus, und Natriumalginat 22,9 %. Für die Berechnungen der Materialkosten wurden die Einkaufspreise der einzelnen Rohstoffe verwendet, die im Rahmen der Beschaffung während der Entwicklung des Materials anfielen. Eine Beschaffung der Rohstoffe in Großgebäude könnte diese Einkaufspreise deutlich reduzieren. Nichtsdestotrotz ist aufgrund der derzeitigen weltpolitischen Situation eher von einer Steigerung der Materialkosten auszugehen, weshalb eine Kostenreduktion über die Entwicklung neuartiger Rezepturen angestrebt wird.

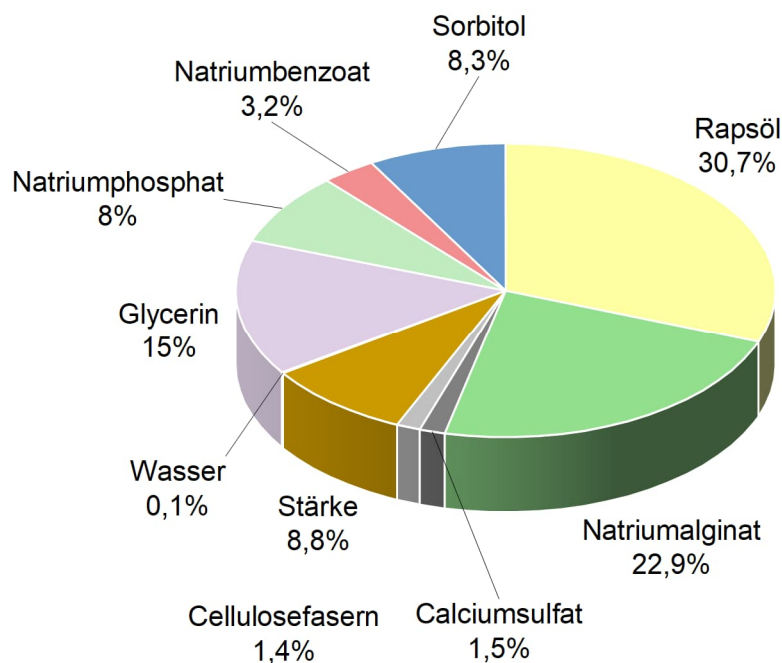


Abbildung 107: Prozentuale Kosten der einzelnen Inhaltsstoffe des Mulchmaterials anteilig an den Gesamtkosten

Es gibt zwei unterschiedliche Strategien, um die Kosten des Verfahrens zu reduzieren. Zum einen ist es möglich, die bewährte Rezeptur 114k kostenseitig zu optimieren, indem etablierte Inhaltsstoffe mit hohem Reinheitsgrad, beziehungsweise mit hohen Anschaffungskosten, durch Reststoffe oder günstigere Inhaltsstoffe ersetzt werden. Zum anderen besteht aber auch die Möglichkeit die Aufwandsmenge des Mulchmaterials zu reduzieren,

indem man das Hydrogel beispielsweise aufschäumt um das Volumen zu vergrößern. Damit kann mit gleichbleibender Schichtdicke eine Reduktion der Aufwandsmenge erreicht werden.

Mit der Rezepturoptimierungen im Hinblick auf den Ersatz teurer Inhaltsstoffe wie Rapsöl konnte eine Reduzierung der Materialkosten erreicht werden (Kapitel 5.1.2). Exemplarisch wurde die Hochrechnung der Anschaffungskosten pro Kilogramm für die ölfreie Rezeptur R 226f durchgeführt. Die Anschaffungskosten des neuartigen Materials würden sich auf 0,37 €/kg belaufen und wären damit um knapp 50 % günstiger als die Materialkosten der Rezeptur 114k. Bei einer Applikation eines Hektars mit einer Schichtdicke von 5 mm und einer Streifenbreite von 0,6 m, so wie es im Vorhaben OptiMulch zum Einsatz kam, würden Materialkosten von 7.400 € pro Hektar entstehen (Kosten exklusive Maschinenanschaffungskosten). In Abbildung 108 sind die einzelnen Inhaltsstoffe anteilig an ihrem Einfluss auf die Gesamtkosten dargestellt.

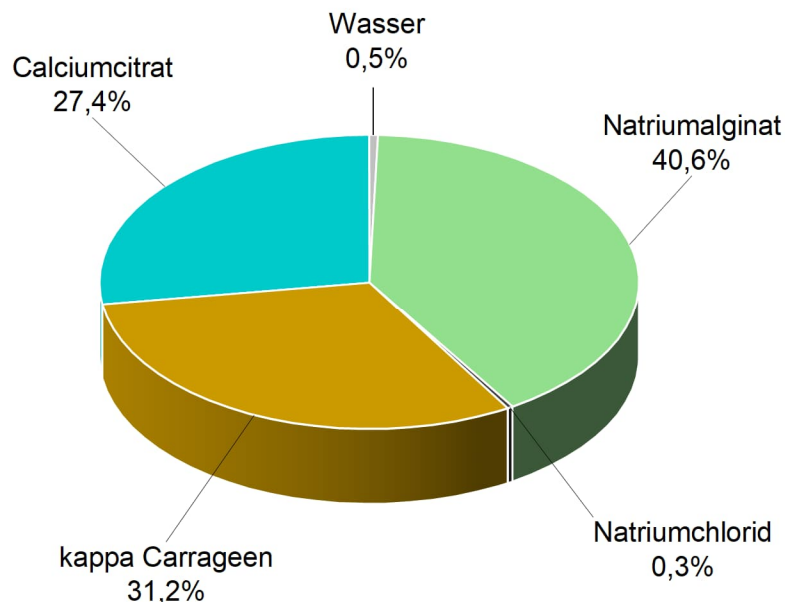


Abbildung 108: Prozentuale Kosten der einzelnen Inhaltsstoffe des ölfreien Mulchmaterials nach R 226f anteilig am Gesamtpreis

Da die ölfreie Rezeptur bislang nur im Rahmen eines ersten Tastversuchs auf ihre Eignung geprüft wurde (Kapitel 5.1.2.4), sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Eignung der neuartigen Rezeptur abschließend zu bewerten. Dazu zählen Untersuchung zur Beikrautunterdrückung, zur Kulturverträglichkeit, zur Auswirkung auf den Wasserhaushalt, etc. Dennoch lässt der Ausschluss von Rapsöl in der Rezeptur vermuten, dass durch diese Maßnahme potenziell signifikante Kosteneinsparungen realisiert werden können.

5.7 Treibhausgas- und Energiebilanz

Nachfolgend werden die Ergebnisse der THG- und Energiebilanz der ölasierten und waserasierten Rezeptur des aufspritzbaren Mulchmaterials dargestellt und miteinander verglichen. Der Fokus liegt auf den THG-Emissionen der verschiedenen Rezepturen und Einsatzstoffe je Rezeptur. Während die THG-Bilanz der ölasierten Rezeptur aufgrund einer verbesserten Datenbasis aktualisiert wird, wird für die waserbasierte Rezeptur eine erste Abschätzung vorgenommen. Bei beiden Materialien wird auf den Einfluss der verwendeten Einsatzstoffe (nachwachsende Rohstoffe versus biogene Rest- und Abfallstoffe) eingegangen. So wird bei dem ölasierten Material der Einsatz von Rapsöl mit einem Altspeseöl (z. B. Frittieröl) verglichen. Bei dem waserbasierten Material wird Carrageen aus kultivierten Algen, Carrageen aus Algen als Rest- und Abfallstoff gegenübergestellt. Aussagen zur Energiebilanz erfolgen verbal-argumentativ, da die Datengrundlage des waserbasierten Materials für einen direkten Vergleich der Materialien unzureichend ist.

Eine Einordnung des Umweltprofils des ölasierten Materials im Vergleich zu herkömmlichen Varianten der Beikrautregulierung wurde im Vorhaben MuNaRo [66] durchgeführt. Hier wurde deutlich, dass das MuNaRo-Verfahren zu deutlich höheren THG-Emissionen je Hektar führt als die betrachteten herkömmlichen Varianten der Beikrautregulierung. Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass sowohl die höheren THG-Emissionen als auch der höhere nicht-erneuerbare Energieaufwand zu 90 % auf den Materialeinsatz zurückzuführen ist. Da den Feldversuchen im vorliegenden Vorhaben die gleiche Rezeptur und Aufwandmenge zugrunde liegt, wie in dem Vorhaben MuNaRo wurde an dieser Stelle auf einen Variantenvergleich der Feldversuche verzichtet. Stattdessen erfolgt eine verbal argumentative Einordnung der betrachteten Materialien.

Treibhausgasbilanz der verschiedenen Rezepturen

Den Vergleich der THG-Emissionen der verschiedenen Rezepturen zeigt Abbildung 109. Hier wird deutlich, dass die waserbasierte Rezeptur des Mulchmaterials deutlich geringere Emissionen je Kilogramm aufweist als die ölasierte Rezeptur. Die Bereitstellung des waserbasierten Mulchmaterials führt zu 0,065 bis 0,12 kg CO₂-Äq/kg, je nach Bereitstellungsart des Carrageens. Das ölasierte Mulchmaterial zeigt dagegen drei- bis zehnmal höhere THG-Emissionen mit 0,36 kg CO₂-Äq/kg unter Verwendung von Altspeseöl bzw. 0,71 kg CO₂-Äq/kg bei der Verwendung von Rapsöl. Folglich zeigt das Material auf der Basis von Altspeseöl im Vergleich zu dem Material auf der Basis von kultivierten Algen eine dreifach höhere THG-Bilanz.

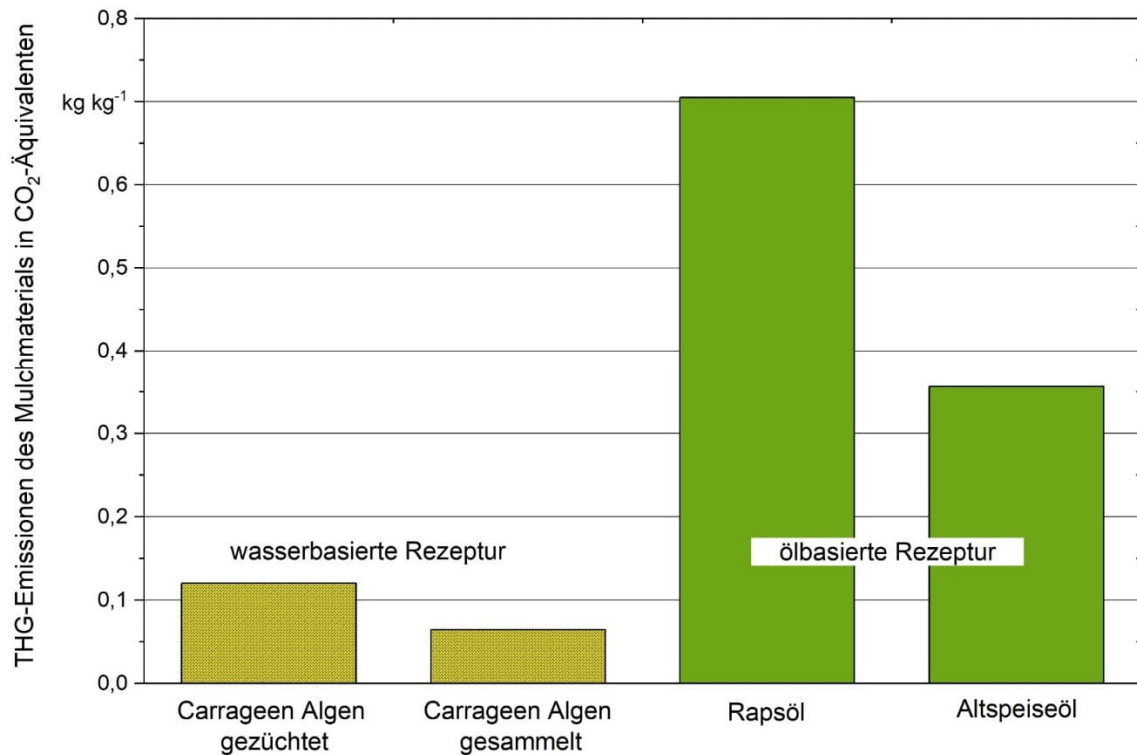


Abbildung 109: Gegenüberstellung der THG-Emissionen von 1 kg Mulchmaterial; linke Säulen wasserbasierte Rezeptur, rechte Säulen ölbasierte Rezeptur

Die höheren Emissionen bei der ölbasierten Rezeptur mit Altspeiseöl sind vor allem auf die verwendeten Bestandteile Glycerin und Stärke zurückzuführen. Beide Materialien haben in Summe einen Anteil von 70 % an den THG-Emissionen, wohingegen das Altspeiseöl nur einen Anteil von 7 % an den THG-Emissionen hat (Abbildung 110 rechts). Beim rapsölbasierten Material sieht die prozentuale Verteilung der THG-Emissionen anders aus, da die Bereitstellung des Rapsöls mit 53 % die dominierende Größe ist (Abbildung 110 links). Allerdings führen auch hier die Materialkomponenten Stärke und Glycerin mit einem Gesamtanteil von 36 % zu höheren THG-Emissionen im Vergleich zum wasserbasierten Material. Die THG-Emissionen des ölbasierten Materials lassen sich bei Verwendung von Altspeiseöl im Vergleich zur Verwendung von Pflanzenöl um 50 % senken, haben aber weiterhin deutlich höhere THG-Emissionen als das wasserbasierte Material.

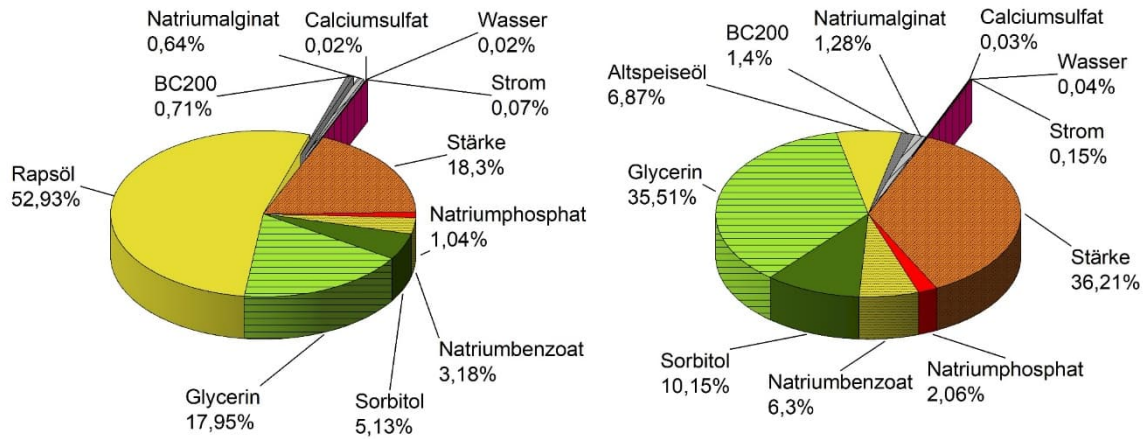


Abbildung 110: Prozentuale Verteilung der THG-Emissionen des ölasierten Materials mit Rapsöl (links) und Altspeiseöl (rechts)

Beim wasserbasierten Material haben die Bereitstellung des Carrageens sowie des Calciumcitrats den größten Einfluss auf die Höhe der THG-Emissionen, obwohl der Massenanteil dieser beiden Komponenten bei jeweils ca. 1 % liegt (Abbildung 111, Abbildung 112). Beim Carrageen mit kultivierten Algen liegt der Anteil an den THG-Emissionen bei 65 % und bei Carrageen mit Algen, die als biogener Rest- und Abfallstoff aus der Umwelt entnommen werden, liegt der Anteil bei 44 %. Die Bereitstellung des Calciumcitrats trägt mit einem Anteil von 29 % bzw. 46 % zu den THG-Emissionen des Mulchmaterials bei. Die hohen THG-Emissionen im Vergleich zum geringen Massenanteil sind vor allem auf den Energiebedarf für die Aufbereitung (Trocknung und Fällung) der Algen und auf den Energiebedarf für die Bereitstellung der Basischemikalien des Calciumcitrats zurückzuführen. Die Bereitstellung von Wasser hat trotz des hohen Massenanteils von 97 % keinen Einfluss auf die THG-Emissionen des Materials. Gleiches gilt für den direkten Energiebedarf für die Mischung der beiden Komponenten (Abbildung 111, Abbildung 112).

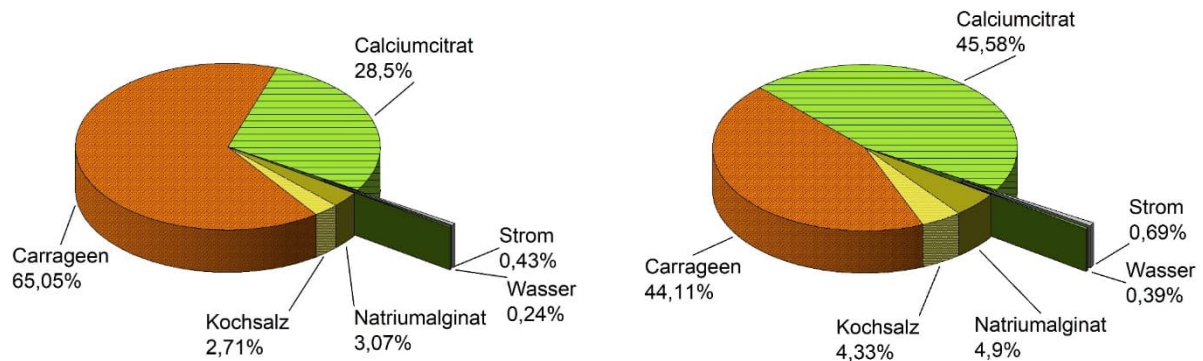


Abbildung 111: Prozentuale Verteilung der THG-Emissionen des wasserbasierten Mulchmaterials OptiMulch mit Carrageen aus gezüchteten Algen (links) und aus in der Umwelt gesammelten Algen (rechts)

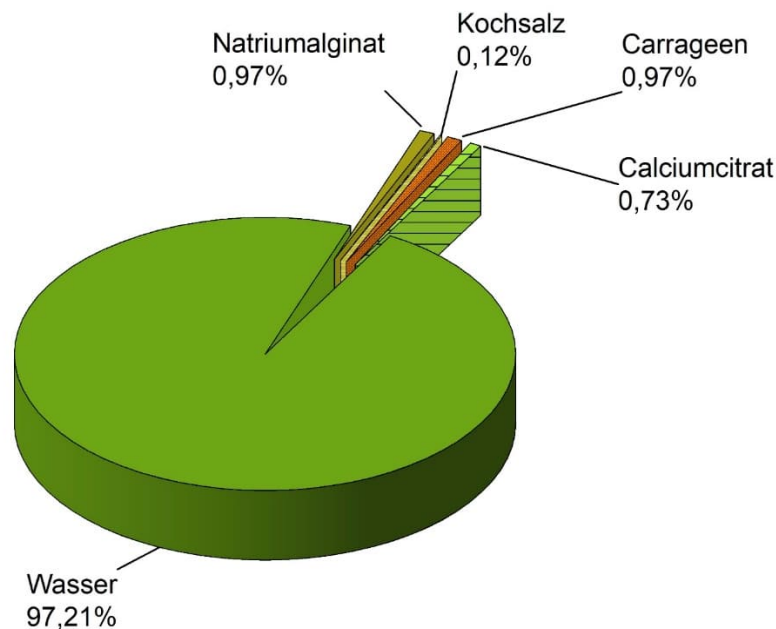


Abbildung 112: Massenzusammensetzung des wasserbasierten Mulchmaterials

Verbal argumentative Einordnung des nicht-erneuerbaren Energieaufwands

Die Umwandlung und Nutzung nicht-erneuerbarer Energien ist eine der Hauptquellen der THG-Emissionen von Produkten und/oder Prozessen. Aus diesem Grund steht eine THG-Bilanz sehr eng in Verbindung mit dem nicht-erneuerbaren Energieaufwand eines Prozesses oder Produktes. Lediglich beim Anbau nachwachsender Rohstoffe wie Rapssaat entsteht aufgrund von mikrobiellen Prozessen im Boden Lachgas, das ebenfalls einen großen Einfluss auf die Höhe der THG-Emissionen hat. Das konnte im Vorhaben MuNaRo anhand der prozentualen Verteilung des rapsölbasierten Materials aufgezeigt werden [66].

Daher ist davon auszugehen, dass die Energiebilanz der verschiedenen Rezepturen im vorliegenden Vorhaben zu einem ähnlichen Ergebnis führt wie das der THG-Bilanz. Eine

mögliche Abweichung zu den getroffenen Erkenntnissen der THG-Bilanz kann durch die fehlende Datengrundlage zur Bewertung des Carrageen entstehen. Bei Betrachtung des Herstellungsprozesses von Carrageen aus Rotalgen wird allerdings deutlich, dass die Verfahrensschritte zum Teil sehr energieintensiv sind. Dies betrifft vor allem die Extraktion und mehrfache Trocknung und Mahlung des Materials. THG-Emissionen, die aufgrund mikrobieller Prozesse entstehen, z. B. Lachgas, sind bei diesem Prozess nicht zu erwarten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der kumulierte nicht-erneuerbare Energieaufwand zu den gleichen Erkenntnissen führt wie die oben dargestellte Auswertung der THG-Emissionen.

Einordnung der Materialzusammensetzung in Bezug auf seine Anwendung

Im Vorhaben MuNaRo konnte aufgezeigt werden, dass das verwendete Material Hauptursache für die höheren THG-Emissionen und den höheren nicht-erneuerbaren Energieaufwand im Vergleich zu herkömmlichen Varianten der Beikrautunterdrückung sind. Mit dem neuen wasserbasierten Material lassen sich THG-Emissionen um das 10-fache reduzieren. Falls das wasserbasierte Material in Feldversuchen bei gleicher Aufwandmenge die gleichen Beikraut-unterdrückenden Eigenschaften zeigt, würden die THG-Emissionen des OptiMulch-Verfahrens in der gleichen Größenordnung liegen, wie die konventionellen Varianten. Sollte das wasserbasierte Material zweimal ausgebracht werden müssen, lägen die THG-Emissionen weiterhin deutlich unter denen des MuNaRo-Verfahrens mit ölbasierendem Material, allerdings über denen der herkömmlichen Varianten der Beikrautunterdrückung. Eine genaue Bewertung ist allerdings nur bei einer Betrachtung von Feldversuchen mit dem wasserbasierten Material möglich.

5.8 Anmeldung des Mulchverfahrens zum Patent

Am 02.08.2021 wurde das Mulchmaterial und das Verfahren unter dem Aktenzeichen zum Patent angemeldet. Das Patent [EP000004189034B1](#) "Mulchmaterial zur Unterdrückung von Unkraut, Mehrkomponentensystem sowie Vorrichtung und Verfahren zum Aufbringen eines flüssigen Mulchmaterials" wurde am 08.10.2025 erteilt.

6 Zusammenfassung

Im Gemüsebau ist ein effektives Beikrautmanagement unerlässlich, da Kulturpflanzen mit Beikräutern um Nährstoffe und Wasser konkurrieren und Beikräuter die Entwicklung der Kulturpflanzen beeinträchtigen können. Im konventionellen Freilandgemüsebau werden hierfür meist Herbizide eingesetzt. Alternativ kommen mechanische Verfahren wie Hacken, Striegeln und Bürsten oder physikalische Maßnahmen wie die Verwendung von Mulchfolien oder Abflammen zum Einsatz, um das Wachstum der Beikräuter zu unterdrücken. Aufgrund gesellschaftlicher Erwartungen, Anforderungen des Lebensmitteleinzelhandels und europäischer Regelungen, wie der „Vom Hof auf den Tisch“-Strategie der Europäischen Kommission, wächst jedoch der Druck, den Herbizideinsatz zu reduzieren. Viele Herbizide verlieren zudem ihre Zulassung oder dürfen in bestimmten Kulturen nicht mehr verwendet werden. Physikalische und mechanische Beikrautbekämpfung sind jedoch zeit- und kostenintensiv. Mulchfolien bestehen meist aus fossilen Rohstoffen, hinterlassen große Mengen Plastikmüll, der oft nicht recycelt werden kann, sind windanfällig und müssen beschwert oder eingegraben werden. Zudem besteht die Gefahr, dass Folienreste in der Umwelt verbleiben und so zum Eintrag von Mikroplastik beitragen. Der Ersatz herkömmlicher Mulchfolien durch biologisch abbaubare Alternativen auf Basis mineralölfreier, biogener Rohstoffe ist bisher nur bedingt zufriedenstellend.

Um künftig ein umweltfreundliches Beikrautmanagement betreiben zu können, wurde ein spritzbares, biologisch abbaubares Mulchmaterial "LiquiMulch" auf Basis nachwachsender Rohstoffe entwickelt und bereits im Vorhaben MuNaRo im Freilandgemüseanbau sowie in Dauerkulturen, im Wein- und Obstbau, getestet [66][44][45].

Ziel dieses Vorhabens ist es, das neuartige Mulchverfahren für den Einsatz im Freilandgemüsebau zu optimieren und die Praxistauglichkeit des Verfahrens zu erreichen. Dabei stehen die beikrautunterdrückende Wirkung sowie mögliche Umweltwirkungen im Fokus. Zudem soll ein praxisgerechtes Applikationsgerät entwickelt werden, das sich durch seine einfache und sichere Bedienung auszeichnet.

Das Verfahren basiert auf der Ausbringung einer Zwei-Komponenten-Mischung, welche im Zuge des Projekts ABOW ("Alternative Beikrautmanagement im Obst- und Weinbau", gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, G2/N/18/09) entwickelt wurde. Durch Vermischen der beiden flüssigen Materialkomponenten wird eine Gelierung des Materials in Gang gesetzt, welche nach Aufbringung auf dem Feldboden eine physikalische Barriere gegen störende Beikräuter ausbildet. LiquiMulch besteht hauptsächlich aus Wasser und Rapsöl, wobei diese beiden Komponenten vor allem als Lösungsmittel dienen. Komponente A besteht zu 30,8 % aus Rapsöl, 1,3 % Natriumalginat, 1,5 % Calciumsulfat und 2,4 % Cellulosefasern. Komponente B ist zu 45,6 % wasserbasiert und enthält zusätzlich 12,5 % Stärke als Füllstoff, 4,6 % Glycerin als Weichmacher, 0,3 % Natriumphosphat, 1,1 % Natriumbenzoat als Konservierungsmittel sowie 2,3 % Sorbitol als Feuchthaltemittel. Natriumalginat dient als Geliermittel und trägt zusammen mit Calciumsulfat zur Gelbildung des Materials bei. Durch die Zugabe von Natriumphosphat kann die Geliergeschwindigkeit nach Bedarf angepasst werden. Das als Lebensmittelzusatzstoff E211 bekannte Natriumbenzoat wird eingesetzt, um Schimmelbildung zu

verhindern. Insgesamt besteht ein Großteil der Inhaltsstoffe des Mulchmaterials aus nachwachsenden Rohstoffen.

Eine beikrautunterdrückende Wirkung des Mulchmaterials konnte in den meisten Versuchsvarianten nachgewiesen werden. Der Erfolg ist jedoch von verschiedenen Faktoren, wie Bodenart, -feuchte und -vorbereitung sowie dem Beikrautdruck und der Präzision der Applikation abhängig. Daher muss das Mulchverfahren in das betriebliche Produktionssystem integriert und mit dem Anbauverfahren abgestimmt werden. Nach Applikation des Mulchmaterials spielen auch eine geeignete Sä- oder Pflanztechnik eine große Rolle, denn eine Beschädigung des Mulchmaterials sollte dabei vermieden werden. Bei Gemüsekulturen wie Zucchini oder Kürbis konnte beobachtet werden, dass die beikrautunterdrückende Wirkung durch den raschen Bodenschluss der Kulturpflanze zusätzlich gesteigert wird. Dieser synergistische Effekt wirkt sich vor allem bei einem hohen Beikrautdruck und geringen Schichtdicken positiv aus. Eine besonders effektive Beikrautunterdrückung wurde mit einer Schichtdicke von 5 mm bei einer üblichen Bandbreite, analog zu Mulchfolien, von 60 cm erreicht. In den Versuchen konnte beobachtet werden, dass die beikrautunterdrückende Wirkung mit steigender Schichtdicke zunimmt. Die Bestimmung der effizienten Schichtdicke ist von den Kulturanforderungen der jeweiligen Gemüseart abhängig.

Für die Weiterentwicklung zu einem praxisnahen Gerät zur Mulchabbringung, wurden im Vorhaben OptiMulch verschiedene Optimierungsarbeiten am von den Firmen Amazonen Werke und Schmotzer im Projekt MuNaRo entwickelten Prototypen I durchgeführt. Dazu wurde das Applikationsgerät zu einem reinen Heckanbaugerät umgebaut. Außerdem wurden verschiedene Bauteile wie Zahnrادpumpen, Ventile oder zahlreiche Leitungselemente durch neue oder funktionalere Bauteile ersetzt. Durch die Integration eines Bedien terminals ist die Steuerung des Applikationsgeräts gefahrlos und bequem von der Fahrerkabine des Traktors aus möglich. Die erforderliche Mulchschichtdicke wurde über die Fahrgeschwindigkeit eingestellt. Das optimierte Applikationsgerät „MulchSprayer Vegi“ erwies sich für die Applikation des Mulchmaterials als hoch funktional, wodurch die Praxistauglichkeit des Konzepts demonstriert werden konnte.

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen die Eignung des Mulchverfahrens für die Kultivierung von Zuckermais, Kürbis, Zucchini und Einlegegurke. Es konnte beobachtet werden, dass die Keimung der Samen aller getesteten Gemüsearten mit zunehmender Schichtdicke negativ beeinflusst wird, wenn vor der Applikation gesät wird und die Keimlinge durch das Mulchmaterial hindurch wachsen müssen. Zusätzlich zeigten die Keimungsergebnisse der Einlegegurke, die in das tags zuvor applizierte Mulchmaterial gesät wurde, dass auch die Aussaattechnik eine große Rolle bei der Keimung des Saatguts spielt. Eine maschinelle Aussaat mit einer exakt eingestellten Sämaschine zeigte hohe Keimungsraten. Eine Kontamination des Saatguts mit dem Mulchmaterial konnte dadurch verhindert werden. Im Hinblick auf die weitere Entwicklung der Kulturpflanzen zeigten die Keimlinge ein unauffälliges und typisches Wachstumsverhalten. Die Ernteerträge beim Zuckermais zwischen den getesteten Varianten unterschieden sich nicht, was auf keinen Einfluss des Mulchmaterials auf den Ertrag hindeutet. Bei den Zucchini und Kürbissen deuten die Ertragsdaten aus den Jahren 2023 und 2024 auf geringe Auswirkungen des Mulchmaterials auf die Ernteerträge hin. Die Ernteerträge der getesteten Varianten waren im Jahr 2023

vergleichbar, was auf keinen nennenswerten Einfluss des Mulchmaterials hindeutet. Obwohl sich im Jahr 2024 signifikante Unterschiede zwischen der Kontrolle und den getesteten Mulchschichten zeigten, sind diese wahrscheinlich auf die sehr nassen Witterungsbedingungen zurückzuführen, und weniger oder nicht auf den Einfluss des Mulchmaterials. Zusammenfassend lässt sich empfehlen, das Mulchverfahren bei der Kultivierung von Zuckermais, Zucchini, Kürbis und Einlegegurke mit einer Mulchschicht von mindestens 3 bis maximal 5 mm Schichtdicke anzuwenden. Die Ergebnisse legen nahe, dass eine Aussaat nach der Mulchapplikation unter Verwendung gut eingestellter herkömmlicher Sätechnik, die Keimungsrate kaum beeinflusst und die LiquiMulch-Schicht wenig zerstört.

Bei Melonen hingegen sind die Herausforderungen in der Kulturführung insgesamt sehr anspruchsvoll, so dass mit den vorliegenden Ergebnissen keine Empfehlungen für den Einsatz des Mulchverfahrens abgeleitet werden können. Der durchgeführte Anbauversuch lieferte keine allgemeingültigen Ergebnisse. Weitere Untersuchungen sind gegebenenfalls erforderlich.

Da von dem Mulchverfahren eine hohe Umweltfreundlichkeit erwartet wird, wurden unterschiedliche Umwelteinflüsse des Mulchmaterials untersucht. Es konnte für das Mulchmaterial eine aerobe Abbaubarkeit festgestellt werden. Diese ist von verschiedenen Umweltfaktoren wie Witterung oder der Anwesenheit von Mikroorganismen abhängig. Der Abbau des Mulchmaterials konnte sowohl im Feldversuch als auch im Laborexperiment in Anlehnung an die Methode DIN EN ISO 17556 nachgewiesen werden. Eine Anreicherung des Mulchmaterials in der Umwelt ist somit nicht zu erwarten.

Allerdings konnten negative Einflüsse des Mulchmaterials auf den Gehalt von mineralisiertem Stickstoff im Boden beobachtet werden. Dies hängt vermutlich mit dem gesteigerten Kohlenstoffeintrag in den Boden zusammen, welcher durch den Abbau oder die Einarbeitung des Materials in den Boden geschieht. Eine verminderte Stickstoffmineralisierung kann sich negativ auf die Kulturpflanzenentwicklung auswirken. Bei merklichen Auswirkungen geringer Stickstoffgehalte im Boden auf die Kulturpflanze müsste dementsprechend mit einer Düngung reagiert werden.

Durch die Barrierewirkung des Mulchmaterials konnten auch Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt beobachtet werden. Basierend auf den Messungen des volumetrischen Wassergehalts des Bodens unter den Mulchschichten im Vergleich zum unbedeckten Boden, zeigte sich eine evaporationshemmende Wirkung des Mulchmaterials. Dementsprechend scheint das Mulchmaterial in der Lage zu sein, die Bodenfeuchte unter dem Mulchmaterial zu beeinflussen. Während sich dieser Effekt bei trockener Vegetation als vorteilhaft erweist, muss die Bewässerung unter dem Mulchmaterial bei nasser Witterung angepasst und gegebenenfalls verringert werden. Eine optimale Steuerung der Bewässerung unter den Mulchschichten ist deshalb maßgeblich für den Erfolg des Verfahrens. Aufgrund der streifenförmigen Ausbringung oder der Kombination mit Unterflurbewässerung, z. B. mit Tropfschlauchsystemen, konnte bisher keine eingeschränkte Wasserversorgung der Kulturpflanzen durch das ausgebrachte LiquiMulch beobachtet werden.

Vögel und größere Wirbeltiere werden nach derzeitigem Kenntnisstand vom Mulchmaterial nicht negativ beeinflusst. Dokumentationen mit Wildtierkameras ergaben keine Anhaltspunkte. Bisher sind keine negativen Einflüsse auf Insekten und andere tierische Organismen bekannt geworden. Auch die Untersuchung der Regenwurmpopulation in den Böden unter dem Mulchmaterial ergab keine negative Auswirkung des LiquiMulchs auf das Vorkommen der Regenwürmer im Vergleich zu den anderen Versuchsvarianten.

Die wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens zeigt, dass das Mulchverfahren derzeit im Vergleich zum Einsatz von Herbiziden oder herkömmlichen Plastikmulchfolien nicht konkurrenzfähig ist. Allerdings könnte die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens durch eine Reduzierung der Materialkosten und des Materialaufwands deutlich gesteigert werden. Um die Material- bzw. Verfahrenskosten zu senken, wurden deshalb zwei Strategien verfolgt: der Ersatz teurer Inhaltsstoffe durch günstigere Alternativen oder Reststoffe sowie die Reduktion der Aufwandsmenge, beispielsweise durch Aufschäumen des Hydrogels zur Volumenvergrößerung. Durch die Entwicklung einer ölfreien Rezeptur konnten die Materialkosten auf 0,37 € pro Kilogramm und damit um etwa 50 % gesenkt werden. Durch Aufschäumen der Rezeptur konnte die Materialaufwandsmenge um 50 % reduziert und damit auch die Kosten des Verfahrens fast 50 % reduziert werden. In zukünftigen Arbeiten sollten die neuartigen Rezepturen auf ihre Wirksamkeit, Witterungsbeständigkeit und Kulturverträglichkeit im Feldversuch getestet werden.

Wie bereits im Vorhaben MuNaRo festgestellt wurde, ist das verwendete Material maßgeblich für die Treibhausgasemissionen und den erhöhten nicht-erneuerbaren Energieaufwand des Verfahrens verantwortlich. Mit dem neuen wasserbasierten Material könnten die THG-Emissionen um das Zehnfache gesenkt werden. Bei vergleichbarer Wirksamkeit im Feldversuch würden die Emissionen des OptiMulch-Verfahrens auf dem Niveau konventioneller Methoden liegen. Selbst bei doppelter Ausbringung wären die Emissionen noch deutlich niedriger als beim ölbasierten Material, aber höher als bei herkömmlichen Verfahren. Zwar kann eine abschließende Bewertung erst nach der Durchführung verschiedener Feldversuche erfolgen, allerdings deuten die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass die gewählten Ansätze bei der Materialentwicklung zukunftsweisend und vielversprechend sind.

Für das "Mulchmaterial zur Unterdrückung von Unkraut, Mehrkomponentensystem sowie Vorrichtung und Verfahren zum Aufbringen eines flüssigen Mulchmaterials" wurde am 08.10.2025 das Patent EP000004189034B1 erteilt.

Quellenverzeichnis

- [1] ADHIKARI, RAJU; BRISTOW, KEITH L.; CASEY, PHILIP S.; FREISCHMIDT, GEORGE; HORN-
BUCKLE, JOHN W.; ADHIKARI, BENU (2016): Preformed and sprayable polymeric mulch
film to improve agricultural water use efficiency. In: Agricultural Water Management
169 (2), S. 1–13. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.02.006.
- [2] AHMADI, SARINA; KHAZAEI, SALMAN; MEHRI, FERESHTEH (2024): The concentration of
pesticide residues in vegetables. A systematic review and meta-analyses. In: Journal
of Agriculture and Food Research 15 (2), S. 101027. DOI:
10.1016/j.jafr.2024.101027
- [3] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2019): Regenwürmer in bay-
erischen Ackerböden. Vielfalt und Leistungen nutzen. Institut für Ökologischen Land-
bau, Bodenkultur und Ressourcenschutz, R. Walter, J. Burmeister, Stand: November
2019, 8. Auflage. Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
- [4] BAYRISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2021): Düngerecht - was gilt
ab 2021?, URL: <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/266028/index.php>, Stand:
02.09.2025
- [5] BERGMANN WERNER (1988): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen: Entstehung, vi-
suelle u. analyt. Diagnose. Hrsg. von Werner Bergmann. Unter Mitw. zahlr. Bildau-
toren. 2. Aufl. Stuttgart, New York: Fischer, 762 Seiten, ISBN 978-3-437-30562-7
- [6] BILLMANN B.; BLUM, H.; BRUNS, C. ECHIM, T.; GEORG, E.; HOMMES, M.; ET AL. (2006):
Planung, Anlage und Auswertung von Versuchen im ökologischen Gemüsebau,
Handbuch für die Versuchsanstellung, Forschungsinstitut für biologischen Landbau
(FiBL), Frick, Schweiz, Frankfurt am Main, Deutschland, ISBN: 978-3-906081-97-7
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMEL) (2024): Gemüse-
ernte auf dem Freiland - Endgültiges Ergebnis. Landwirtschaft - Statistik und Berichte
des BMEL - Ernten. Stand: 01.09.2025. Online verfügbar unter [https://www.bmel-
statistik.de/landwirtschaft/gartenbau/gemueseaneanbau](https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/gartenbau/gemueseaneanbau)
- [8] CAMPANALE, CLAUDIA; GALAFASSI, SILVIA; DI PIPPO, FRANCESCA; POJAR, IULIAN; MAS-
SARELLI, CARMINE; URICCHIO, VITO FELICE (2024): A critical review of biodegradable
plastic mulch films in agriculture. Definitions, scientific background and potential im-
pacts. In: TrAC Trends in Analytical Chemistry 170 (1), S. 117391. DOI:
10.1016/j.trac.2023.117391.
- [9] CARBONCLOUD (2025): Carbon footprint data for Carragenan. E407 in India. Abgeru-
fen am 14.10.2025 von [https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-re-
ports/id/13429666740](https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-reports/id/13429666740)
- [10] CARBONCLOUD (2025): Carbon footprint data for Carragenan. E407 in Denmark. Ab-
gerufen am 14.10.2025 von [https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-re-
ports/id/317387790622](https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-reports/id/317387790622)
- [11] CÄSAR H., KILLER A., PROF. DR. KITTEMANN D., ZIMMERMANN A. (2023): Entwicklung
präventiver Maßnahmen für einen nachhaltigen Umgang mit der endlichen Res-
source Wasser im Obstbau, Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG), End-
bericht zum Interreg-Projekt ABH101

- [12] CHESHIRE, M.V., MUNDIE, C.M., & SHEPHERD, H.J. (1969): Transformation of ¹⁴C glucose and starch in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1, 117-130.
- [13] DE SOUZA MACHADO, A. A., LAU, C. W., KLOAS, W., BERGMANN, J., BACHELIER, J. B., FALTIN, E., BECKER, R., GÖRLICH, A. S., & RILLIG, M. C. (2019). Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environmental science & technology*, 53(10), 6044–6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- [14] DEGLI-INNOCENTI, F., TOSIN, M., & BASTIOLI, C. (1998): Evaluation of the Biodegradation of Starch and Cellulose Under Controlled Composting Conditions. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 6, 197-202.
- [15] DESTATIS - STATISTISCHES BUNDESAMT (2025): Betriebe mit Gemüseanbau im Freiland (vollständig ökologisch), Anbaufläche, Erntemenge: Deutschland, Jahre, Gemüsearten; URL: <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/41215/table/41215-0005>, Stand: 10.09.2025
- [16] DESTATIS - STATISTISCHES BUNDESAMT (2025): Betriebe, Anbauflächen, Erträge und Erntemengen von Gemüse und Erdbeeren 2024; URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/betriebe-anbau-erntemenge-gemuese.html>, Stand: 30.09.2025
- [17] DESTATIS - STATISTISCHES BUNDESAMT (2025): Ökologischer Landbau in Deutschland 2023 und 2024: Vollständig ökologisch bewirtschaftete Anbauflächen; URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Tabellen/oekologisches-gemuese.html>, Stand: 30.09.2025
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2006): DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Oktober 2006. Berlin: Beuth-Verlag, 84 Seiten
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2009): DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. November 2009. Berlin: Beuth-Verlag, 40 Seiten
- [20] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17827-1:2026-10: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe - Teil 1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15 mm und darüber (ISO 17827-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17827-1:2016, Oktober 2016
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2019): DIN EN ISO 17556: Kunststoffe – Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoffmaterialien im Boden durch Messung des Sauerstoffbedarfs in einem Respirometer oder der Menge des entstandenen Kohlendioxids (ISO 17556:2019); Deutsche Fassung EN ISO 17556:2019; September 2019.
- [22] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN) (2021): DIN EN ISO 10390: Boden, behandelter Bioabfall und Schlamm - Bestimmung des pH-Werts (ISO 10390:2021); Deutsche Fassung EN ISO 10390:2022; Juli 2024.
- [23] DREIER, T. (2000): GANZHEITLICHE SYSTEMANALYSE UND POTENZIALE BIOGENER KRAFTSTOFFE. LEHRSTUHL FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND ANWENDUNGSTECHNIK DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

- [24] DRESSLER, D.; ENGELMANN, K.; SERDJUK, M.; REMMELE, E. (2018): Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern. Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode. Berichte aus dem TFZ 50. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 163 Seiten, ISSN 1614-1008
- [25] Dressler, D.; Haas, R.; Remmele, E. (2018): Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Raps- und Rapserzeugung in Bayern. Berichte aus dem TFZ 59. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 140 Seiten, ISSN 1614-1008
- [26] EMO CHIELLINIA, PATRIZIA CINELLIA, ANDREA CORTIA, EL REFAYE KENAWY, (2000): Composite films based on waste gelatin: thermal–mechanical properties and biodegradation testing. In: Polymer Degradation and Stability 73, S. 549–555
- [27] EUROPÄISCHES PARLAMENT & RAT. (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 über die Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Anhang V). Amtsblatt der Europäischen Union. Abgerufen von https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32018L2001#annex_V
- [28] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (2019): Richtlinie (EU) 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt, Amtsblatt der Europäischen Union, L 155, ISSN 1977-0642
- [29] EUROPÄISCHES PATENTAMT (2025): [EP000004189034B1](#) Mulchmaterial zur Unterdrückung von Unkraut, Mehrkomponentensystem sowie Vorrichtung und Verfahren zum Aufbringen eines flüssigen Mulchmaterials
- [30] EUROPÄISCHES PATENTAMT (2008): [EP000001998955B1](#) Abdeckmaterial für Biomasse und Verfahren zu dessen Herstellung
- [31] FORSTER, P.; STORELMVO, T.; ARMOUR, K.; COLLINS, W.; DUFRESNE, J.-L.; FRAME, D.; LUNT, D. J.; MAURITSEN, T.; PALMER, M. D.; WATANABE, M.; WILD, M.; & ZHANG, H. (2023): The earth's energy budget, climate feedbacks and climate sensitivity. In I. P. on C. Change (Hrsg.), Climate change 2021 – the physical science basis (S. 923–1054). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- [32] GEBENDORFER H. (2023): 40 Hektar für die Essiggurke: Warum Landwirte auf das Gemüse setzen, Hrsg. Bayrisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, URL: <https://www.wochenblatt-dlv.de/feld-stall/pflanzenbau/40-hektar-fuer-essiggurke-landwirte-gemuese-setzen-573999>, Stand: 16.08.2023
- [33] GERMAN, D. P., CHACON, S. S., & ALLISON, S. D. (2011): Substrate concentration and enzyme allocation can affect rates of microbial decomposition. Ecology, 92(7), 1471–1480, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.08.021>
- [34] GOLDHOFER H., DUNST A. (2005): Feldgemüseanbau in Bayern - Ökonomik wichtiger Kulturen, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Agrarökonomie, LfL-Information,
- [35] GREENDELTA (2025): openLCA2.5: open Source Software for Life Cycle Assessment. Green Delta GmbH

- [36] GUYTON, KATHRYN Z.; LOOMIS, DANA; GROSSE, YANN; EL GHISSASSI, FATIHA; BENBRAHIM-TALLAA, LAMIA; GUHA, NEELA ET AL. (2015): Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate. In: *The Lancet. Oncology* 16 (5), S. 490–491. DOI: 10.1016/S1470-2045(15)70134-8
- [37] HAHN S., DR. HENNECKE D. (2022): Final Report WP4 - Comparison between natural and synthetic polymers, Hannover: Fraunhofer ITEM, Schmallenberg: Fraunhofer IME, 36 Seiten
- [38] HAIDER, T. P., VÖLKER, C., KRAMM, J., LANDFESTER, K., & WURM, F. R. (2019): Plastics of the Future? The Impact of Biodegradable Polymers on the Environment and on Society. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 58(1), 50–62. <https://doi.org/10.1002/anie.201805766>
- [39] INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF POLYMERS (ICTP) (2016): Mulch spray support sustainable agriculture, URL: <http://www.ictmp.ct.cnr.it> (Stand: 01.05.2016)
- [40] IQBAL, R., RAZA, M.A.S., VALIPOUR, M. ET AL. (2020): Potential agricultural and environmental benefits of mulches—a review. In: *Bull Natl Res Cent* 44 (1), S. 154. DOI: 10.1186/s42269-020-00290-3
- [41] IQBAL, RASHID; RAZA, MUHAMMAD AOWN SAMMAR; VALIPOUR, MOHAMMAD; SALEEM, MUHAMMAD FARRUKH; ZAHEER, MUHAMMAD SAQLAIN; AHMAD, SALMAN ET AL. (2020): Potential agricultural and environmental benefits of mulches—a review. In: *Bull Natl Res Cent* 44 (1), S. 154. DOI: 10.1186/s42269-020-00290-3
- [42] JANSSEN, B.H. (1996): Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. *Plant Soil* 181, 39–45. <https://doi.org/10.1007/BF00011290>
- [43] KHOTSAENG, N., SIMCHUER, W., IMSOMBUT, T., SRIHANAM, P. (2023): Effect of Glycerol Concentrations on the Characteristics of Cellulose Films from Cattail (*Typha angustifolia* L.) Flowers. *Polymers*, 15(23), 4535. <https://doi.org/10.3390/polym15234535>
- [44] KIRCHINGER, M.; MENDER A.; HEßDÖRFER D.; REMMELE E. (2023): Alternatives Beikrautmanagement im Obst- und Weinbau mit ökologisch unbedenklichen Substanzen und einem alternativen Mulchverfahren auf Basis Nachwachsender Rohstoffe. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, Nr. 83, Seiten 186, ISSN: 1614-1008
- [45] KIRCHINGER, M.; MENDER A.; HEßDÖRFER D.; REMMELE E. (2026): Alternatives Beikrautmanagement im Obst- und Weinbau mit einem spritzbaren Mulchmaterial Liqui-Mulch. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Berichte aus dem TFZ, ISSN: 1614-1008 (*in Vorbereitung*)
- [46] KÖHN, C., DA ROSA FAGUNDES, L., FLÔRES, S. AND DE OLIVEIRA RIOS, A. (2025): Biodegradable Sodium Alginate Films Enriched With Oils—A Review. *Packag Technol Sci*, 38: 587-609. <https://doi.org/10.1002/pts.2905>
- [47] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) (2017): Gemüsebau. Freiland und Gewächshaus. KTBL-Datensammlung. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 652 Seiten, ISBN: 978-3-945088-41-8

- [48] LABER H., LATTAUSCHKE, G. (HRSG.), (2020): Gemüsebau, Fachbibliothek Produktionsgartenbau, 3., erw. Auflage, Stuttgart (Hohenheim): Ulmer, ISBN-13: 9783818608378
- [49] LILI TIAN, CHENG JINJIN, RONG JI, YINI MA, XIANGYANG YU (2022): Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, Volume 25, ISSN 2468-5844, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100311>.
- [50] MARTIN, J.P. AND HAIDER, K. (1986): Influence of Mineral Colloids on Turnover Rates of Soil Organic Carbon. In *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes* (eds P.M. Huang and M. Schnitzer). <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub17.c9>
- [51] MONTULL, J. M., & TORRA, J. (2023). Herbicide Resistance Is Increasing in Spain: Concomitant Management and Prevention. *Plants*, 12(3), 469. <https://doi.org/10.3390/plants12030469>
- [52] NG, J.S., KIEW, P.L., LAM, M.K. (2022): Preliminary evaluation of the properties and biodegradability of glycerol- and sorbitol-plasticized potato-based bioplastics. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 1545–1554 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03213-5>
- [53] NIGGLI, U., WEIBEL, F.P. AND GUT, W. (1990): Weed Control with Organic Mulch Materials in Orchards. Results from 8 Year Field Experiments. *Acta Horticulturae*, 285, 97-102.
- [54] PEI WANG, YUJING DENG, XIAO-YAN LI, ZHONGWANG WEI, XIA HU, FEI TIAN, XIUCHEN WU, YONGMEI HUANG, YU-JUN MA, CICHENG ZHANG, YANG WANG, ENGUI LI, JIAQI WANG. (2019): Dynamical effects of plastic mulch on evapotranspiration partitioning in a mulched agriculture ecosystem: Measurement with numerical modeling, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 268, Pages 98-108, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.014>.
- [55] PEILLEX, C., & PELLETIER, M. (2020). The impact and toxicity of glyphosate and glyphosate-based herbicides on health and immunity. *Journal of Immunotoxicology*, 17(1), 163–174. <https://doi.org/10.1080/1547691X.2020.1804492>
- [56] POLMAN, E. M. N., GRUTER, G.-J. M., PARSONS, J. R., & TIETEMA, A. (2021): Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review. *Science of The Total Environment*, 753(141953), 141953. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141953>
- [57] RAMOS, T.B., DAROUICH, H. & PEREIRA, L.S. (2024): Mulching effects on soil evaporation, crop evapotranspiration and crop coefficients: a review aimed at improved irrigation management. *Irrig Sci* 42, 525–539. <https://doi.org/10.1007/s00271-024-00924-8>
- [58] REMMELE E., WIDMANN B. (1998): Hydrauliköle auf Rapsölbasis - Umweltverträglichkeit beim Gebrauch in landwirtschaftlichen Maschinen, Freising: Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, TU München-Weihenstephan, Agrartechnische Forschung 4, H. 2, S. 148-15

- [59] ROEDER, O.; REMMELE, E.; KIRCHHOFF, V.; BARTEL, R.; SCHWARZ, W. (2007): Abdeckmaterial für Biomasse und Verfahren zu dessen Herstellung. Angemeldet durch Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.; Technologie- und Förderzentrum Straubing am 25.01.2007. Anmeldenr.: 07764515.8. Veröffentlichungsnr.: EP 1 998 955 B1. B32B 27 / 00 (2006.01). Prioritätsdaten: PRC: DE; PRN: 2007000610; PRD: 20070125, 10 Seiten
- [60] ROßBERG, D.; HOMMES, M. (2018): NEPTUN-Gemüsebau 2017. Hg. v. Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Braunschweig, Deutschland. Institut für Strategien und Folgenabschätzung. Kleinmachnow (Berichte aus dem Julius-Kühn-Institut, 199)
- [61] RUPP J., MARX P., GRÄBER U. (2011): Anbauleitfaden Gurken im Ökologischen Landbau Produktion von Einlegegurken im Freiland, Hrsg. Julius-Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Quedlinburg, Deutschland, ISBN 978-3-930037-81-0
- [62] SAMSEL, ANTHONY; SENEFF, STEPHANIE (2013): Glyphosate, pathways to modern diseases II. Celiac sprue and gluten intolerance. In: *Interdisciplinary toxicology* 6 (4), S. 159–184. DOI: 10.2478/intox-2013-0026
- [63] SCHINDELIN, JOHANNES; ARGANDA-CARRERAS, IGNACIO; FRISE, ERWIN; KAYNIG, VERENA; LONGAIR, MARK; PIETZSCH, TOBIAS ET AL. (2012): Fiji. An open-source platform for biological-image analysis. In: *Nature methods* 9 (7), S. 676–682. DOI: 10.1038/nmeth.2019
- [64] SCHÖPFER L., MENZEL R., SCHNEPF U., RUESS L., MARHAN S., BRÜMMER F., PAGEL H., KANDELER E. (2020): Microplastics Effects on Reproduction and Body Length of the Soil-Dwelling Nematode *Caenorhabditis elegans*; *Frontiers in Environmental Science*; Volume 8; ISSN=2296-665X; DOI=10.3389/fenvs.2020.00041
- [65] SCHREIEDER, V., EMBERGER, P., ANDRADE, D., REMMELE, E., (2018): Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 58, Seiten 232, ISSN: 1614-1008
- [66] STEINHUBER, L., KIRCHINGER, M., RÜGER, J., VOGL, T., EMBERGER, P., THUNEKE, K., DRESSLER, D., STEIN, F., BECKER, A., TAEGER, C., KIEFER, S., REMMELE, E., (2024): Spritzbares Mulchmaterial im Gemüsebau. Straubing Technologie und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). *Berichte aus dem TFZ*, Nr. 84, Seiten 180, ISSN: 1614-1008
- [67] STORCK, VERONIKA; KARPOUZAS, DIMITRIOS G.; MARTIN-LAURENT, FABRICE (2017): Towards a better pesticide policy for the European Union. In: *The Science of the total environment* 575, S. 1027–1033. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.167
- [68] WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I). Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Bd. 21, Nr. 9, S. 1218–1230
- [69] ZHANG, W., LIU, Y., XUAN, Y., ZHANG, S. (2022): Synthesis and Applications of Carboxymethyl Cellulose Hydrogels. *Gels*, 8(9), 529. <https://doi.org/10.3390/gels8090529>

- [70] ZUO, WEI; ZHAO, YANG; QI, PEIPEI; ZHANG, CHUNRONG; ZHAO, XUEPING; WU, SHENGGAN ET AL. (2024): Current-use pesticides monitoring and ecological risk assessment in vegetable soils at the provincial scale. In: Environmental research 246, S. 118023. DOI: 10.1016/j.envres.2023.118023.

Anhang

Anhang 1: Randomisierung der Parzellen für die Versuche 2023 Einlegegurke, Zucchini, Melone, Kürbis und Zuckermais mit den jeweiligen Versuchsvarianten: blaue Parzellen: Nullvarianten; orange Parzellen: Kontrolle (mechanische praxisübliche Handhacke); hellgrüne Parzellen: Mulchvariante 2,5 mm; grüne Parzellen: Mulchvariante 5 mm

Gurke		Zucchini				Melone				Kürbis				Zuckermais			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V0	111	VK	231	V0	133	VK	241	M2	443	VK	251	M2	453	V0	121	VK	223
VK	211	M2	431	VK	233	V0	141	M1	343	V0	151	M1	353	VK	221	M2	423
M1	311	V0	131	M1	333	M2	441	VK	243	M2	451	VK	253	M1	321	V0	123
M2	411	M1	331	M2	433	M1	341	V0	143	M1	351	V0	153	M2	421	M1	323
V0	112	M2	432	VK	234	V0	142	M1	344	M2	452	M1	354	V0	122	VK	224
VK	212	V0	132	M2	434	M1	342	V0	144	VK	252	V0	154	M2	422	M1	324
M1	312	VK	232	M1	334	VK	242	M2	444	V0	152	M2	454	VK	222	M2	424
M2	412	M1	332	V0	134	M2	442	VK	244	M1	352	VK	254	M1	322	V0	124

Anhang 2: Randomisierung der Parzellen für die Versuche 2024 Einlegegurke, Zucchini, Melone, und Kürbis mit den jeweiligen Versuchsvarianten: blaue Parzellen: Nullvarianten; orange Parzellen: Kontrolle (mechanische praxisübliche Handhacke); hellgrüne Parzellen: Mulchvariante 2 mm; grüne Parzellen: Mulchvariante 3 mm, dunkelgrüne Parzellen: Mulchvariante 4 mm

K	G	K	Z/M	Z/M	Z/M	Z/M	K	G	K	G	Z/M	Z/M	G	Z/M	Z/M	G	K
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
441 VK	411 VK	241 M1	221 M1	M1	431 VK		341 M2	311 M3	541 M3	211 M1	121 VK	VK	511 M2	531 M3	M3	111 VK	141 VK
			231 M1	M1	421 VK						131 VK	VK		521 M3	M3		
442 VK	412 VK	242 M1	222 M1	M1	432 VK		342 M2	312 M3	542 M3	212 M1	122 VK	VK	512 M2	532 M3	M3	112 VK	142 VK
			232 M1	M1	422 VK						132 VK	VK		522 M3	M3		
443 VK	413 VK	243 M1	223 M1	M1	433 VK		343 M2	313 M3	543 M3	213 M1	123 VK	VK	513 M2	533 M3	M3	113 VK	143 VK
			233 M1	M1	423 VK						133 VK	VK		523 M3	M3		
444 VK	414 VK	244 M1	224 M1	M1	434 VK		344 M2	314 M3	544 M3	214 M1	124 VK	VK	514 M2	534 M3	M3	114 VK	144 VK
			234 M1	M1	424 VK						134 VK	VK		524 M3	M3		

Anhang 3: Randomisierung der Parzellen für die Versuche 2025 mit der Einlegegurke, mit den jeweiligen Versuchsvarianten: blaue Parzellen: Nullvarianten; orange Parzellen: Kontrolle (herkömmliche Mulchfolie); hellgrüne Parzellen: Mulchvariante 3 mm; grüne Parzellen: Mulchvariante 5 mm

V0	VK	M2	M1	VK	M1	M2	VK	M2	M1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m
	37	27	17	34	14	24	31	21	11
	38	28	18	35	15	25	32	22	12
	39	29	19	36	16	26	33	23	13
5 m	5 m	5 m	5 m	5 m	5 m	5 m	5 m	5 m	5 m

Anhang 4: Daten zur Kulturführung des Zuckermais im Versuchsjahr 2023

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aus- saat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbei- tung 1	04.04.2023	-69	-	-
Bodenbearbei- tung 2	21.04.2023	-52	-	-
Bodenproben N _{min}	15.05.2023	-28	-	-
Bodenbearbei- tung 3	01.06.2023	-11	-	-
Düngung	05.06.2023	-7	Hornspäne Haarmehl	39,10 45,00
Beetvorbereitung 1	07.06.2023	-5	-	-
Beetvorbereitung 2	12.06.2023	0	-	-
Aussaat	12.06.2023	0	-	-
Applikation	15.06.2023	3	-	-
Manuelle Hacke	27.06.2023	15	-	-
Nachsaat	27.06.2023	15	-	-
Manuelle Hacke	06.07.2023	24	-	-
Maschinelle Ha- cke	19.07.2023	37	-	-
Ende Nullvari- ante	20.07.2023	38	-	-
Bodenproben N _{min}	03.08.2023	52	-	-
Beikrautentfer- nung in Mulch- varianten	08.08.2023	57	-	-
Ernte	18.09.2023	98	-	-
Bodenprobe N _{min}	20.09.2023	130	-	-

Anhang 5: Daten zur Kulturführung der Zucchini im Versuchsjahr 2023

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	04.04.2023	-69	-	-
Bodenbearbeitung 2	21.04.2023	-52	-	-
Bodenproben N _{min}	15.05.2023	-28	-	-
Bodenbearbeitung 3	01.06.2023	-11	-	-
Düngung	05.06.2023	-7	Hornspäne Haarmehl	83,10 76,97
Beetvorbereitung 1	07.06.2023	-5	-	-
Beetvorbereitung 2	12.06.2023	0	-	-
Aussaat	12.06.2023	0	-	-
Applikation	15.06.2023	3	-	-
Manuelle Hacke	27.06.2023	15	-	-
Nachsaat	27.06.2023	15	-	-
Manuelle Hacke	06.07.2023	24	-	-
Nachsaat	06.07.2023	24	-	-
Ende Nullvariante	20.07.2023	38	-	-
Maschinelle Hacke	21.07.2023	39	-	-
Ernte Beginn	24.07.2023	42	-	-
Bodenproben N _{min}	03.08.2023	52	-	-
Beikrautentfernung in Mulchvarianten	08.08.2023	57	-	-
Ernte Ende	16.10.2023	126	-	-
Bodenprobe N _{min}	20.10.2023	130	-	-

Anhang 6: Daten zur Kulturführung der Zucchini im Versuchsjahr 2024

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	10.04.2024	-33	-	-
Bodenproben N _{min}	15.04.2024	-28	-	-
Düngung	26.04.2024	-17	Hornspäne Haarmehl	95,00 106,00
Bodenbearbeitung 2	26.04.2024	-17	-	-
Beetvorbereitung 1	27.04.2024	-16	-	-
Beetvorbereitung 2	13.05.2024	0	-	-
Aussaat	13.05.2024	0	-	-
Applikation	14.05.2024	1	-	-
Nachsaat	27.05.2024	14	-	-
Nachsaat	04.06.2024	22	-	-
Manuelle Hacke	06.06.2024	24	-	-
Maschinelle Hacke	12.06.2024	30	-	-
Ernte Beginn	01.07.2024	49	-	-
Bodenproben N _{min}	03.07.2024	51	-	-
Manuelle Hacke	10.07.2024	58	-	-
Blattdüngung 1	17.07.2024	65	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 2	22.07.2024	70	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 3	25.07.2024	73	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 4	02.08.2024	81	Diaglutin N	0,27
Manuelle Hacke	06.08.2024	85	-	-
Blattdüngung 5	08.08.2024	87	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 6	12.08.2024	91	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 7	16.08.2024	95	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 8	19.08.2024	98	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 9	22.08.2024	101	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 10	26.08.2024	105	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 11	29.08.2024	108	Diaglutin N	0,27
Ernte Ende	16.09.2024	126	-	-
Bodenproben N _{min}	17.09.2024	127	-	-

Anhang 7: Daten zur Kulturführung des Kürbisses im Versuchsjahr 2023

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	04.04.2023	-69	-	-
Bodenbearbeitung 2	21.04.2023	-52	-	-
Bodenproben N _{min}	15.05.2023	-28	-	-
Bodenbearbeitung 3	01.06.2023	-11	-	-
Düngung	05.06.2023	-7	Hornspäne Haarmehl	39,10 45,00
Beetvorbereitung 1	07.06.2023	-5	-	-
Beetvorbereitung 2	12.06.2023	0	-	-
Aussaat	12.06.2023	0	-	-
Applikation	15.06.2023	3	-	-
Manuelle Hacke	27.06.2023	15	-	-
Nachsaat	27.06.2023	15	-	-
Manuelle Hacke	06.07.2023	24	-	-
Ende Nullvariante	20.07.2023	38	-	-
Maschinelle Hacke	21.07.2023	39	-	-
Ranken legen	24.07.2023	42	-	-
Ranken legen	28.07.2023	46	-	-
Ranken legen	31.07.2023	49	-	-
Bodenproben N _{min}	03.08.2023	52	-	-
Beikrautentfernung in Mulchvarianten	08.08.2023	57	-	-
Ernte	02.10.2023	112	-	-
Bodenprobe N _{min}	02.10.2023	112	-	-

Anhang 8: Daten zur Kulturführung des Kürbisses im Versuchsjahr 2024

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	10.04.2024	-33	-	-
Bodenproben N _{min}	15.04.2024	-28	-	-
Düngung	26.04.2024	-17	Hornspäne Haarmehl	95,00 106,00
Bodenbearbeitung 2	26.04.2024	-17	-	-
Beetvorbereitung 1	27.04.2024	-16	-	-
Beetvorbereitung 2	13.05.2024	0	-	-
Aussaat	13.05.2024	0	-	-
Applikation	14.05.2024	1	-	-
Nachsaat	27.05.2024	14	-	-
Nachsaat	04.06.2024	22	-	-
Manuelle Hacke	06.06.2024	24	-	-
Maschinelle Hacke	12.06.2024	30	-	-
Bodenproben N _{min}	03.07.2024	51	-	-
Manuelle Hacke	10.07.2024	58	-	-
Blattdüngung 1	17.07.2024	65	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 2	22.07.2024	70	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 3	25.07.2024	73	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 4	02.08.2024	81	Diaglutin N	0,27
Manuelle Hacke	06.08.2024	85	-	-
Blattdüngung 5	08.08.2024	87	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 6	12.08.2024	91	Diaglutin N	0,27
Ranken legen	14.08.2024	93	-	-
Blattdüngung 7	16.08.2024	95	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 8	19.08.2024	98	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 9	22.08.2024	101	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 10	26.08.2024	105	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 11	29.08.2024	108	Diaglutin N	0,27
Ernte Beginn	05.09.2024	115	-	-
Ernte Ende	12.09.2024	122	-	-
Bodenproben N _{min}	17.09.2024	127	-	-

Anhang 9: Daten zur Kulturführung der Melone im Versuchsjahr 2023

Maßnahmen	Datum	Tage nach Pflanzung	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	04.04.2023	-73	-	-
Bodenbearbeitung 2	21.04.2023	-56	-	-
Bodenproben N _{min}	15.05.2023	-32	-	-
Bodenbearbeitung 3	01.06.2023	-15	-	-
Düngung	05.06.2023	-11	Hornspäne Haarmehl	39,10 45,00
Beetvorbereitung 1	07.06.2023	-9	-	-
Beetvorbereitung 2	12.06.2023	-4	-	-
Applikation	15.06.2023	-1	-	-
Pflanzung	16.06.2023	0	-	-
Manuelle Hacke	27.06.2023	11	-	-
Manuelle Hacke	06.07.2023	20	-	-
Ende Nullvariante	20.07.2023	34	-	-
Maschinelle Hacke	21.07.2023	35	-	-
Ranken legen	24.07.2023	38	-	-
Ranken legen	28.07.2023	42	-	-
Ranken legen	31.07.2023	45	-	-
Bodenproben N _{min}	03.08.2023	48	-	-
Beikrautentfernung in Mulchvarianten	08.08.2023	53	-	-
Ernte	14.08.2023	59	-	-
Bodenprobe N _{min}	30.08.2023	75	-	-

Anhang 10: Daten zur Kulturführung der Melone im Versuchsjahr 2024

Maßnahmen	Datum	Tage nach Pflanzung	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	10.04.2024	-35	-	-
Bodenproben N _{min}	15.04.2024	-30	-	-
Düngung	26.04.2024	-19	Hornspäne Haarmehl	95,00 106,00
Bodenbearbeitung 2	26.04.2024	-19	-	-
Beetvorbereitung 1	27.04.2024	-18	-	-
Beetvorbereitung 2	13.05.2024	-2	-	-
Applikation	14.05.2024	-1	-	-
Pflanzung	15.05.2024	0	-	-
Nachpflanzung	27.05.2024	12	-	-
Manuelle Hacke	06.06.2024	22	-	-
Maschinelle Hacke	12.06.2024	28	-	-
Ranken legen	27.06.2024	43	-	-
Ranken legen	03.07.2024	49	-	-
Bodenproben N _{min}	03.07.2024	49	-	-
Manuelle Hacke	10.07.2024	56	-	-
Blattdüngung 1	17.07.2024	63	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 2	22.07.2024	68	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 3	25.07.2024	71	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 4	02.08.2024	79	Diaglutin N	0,27
Manuelle Hacke	06.08.2024	83	-	-
Blattdüngung 5	08.08.2024	85	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 6	12.08.2024	89	Diaglutin N	0,27
Ranken legen	14.08.2024	91	-	-
Blattdüngung 7	16.08.2024	93	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 8	19.08.2024	96	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 9	22.08.2024	99	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 10	26.08.2024	103	Diaglutin N	0,27
Ernte	28.08.2024	105	-	-
Blattdüngung 11	29.08.2024	106	Diaglutin N	0,27
Bodenproben N _{min}	17.09.2024	125	-	-

Anhang 11: Daten zur Kulturführung der Einlegegurke im Versuchsjahr 2023

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	04.04.2023	-73	-	-
Bodenbearbeitung 2	21.04.2023	-56	-	-
Bodenproben N _{min}	15.05.2023	-32	-	-
Bodenbearbeitung 3	01.06.2023	-15	-	-
Düngung	05.06.2023	-11	Hornspäne Haarmehl	83,10 76,97
Beetvorbereitung 1	07.06.2023	-9	-	-
Beetvorbereitung 2	12.06.2023	-4	-	-
Applikation	15.06.2023	-1	-	-
Aussaat	16.06.2023	0	-	-
Manuelle Hacke	27.06.2023	11	-	-
Nachsaat	27.06.2023	11	-	-
Manuelle Hacke	06.07.2023	20	-	-
Nachsaat	06.07.2023	20	-	-
Ende Nullvariante	20.07.2023	34	-	-
Maschinelle Hacke	21.07.2023	35	-	-
Ernte Beginn	31.07.2023	45	-	-
Bodenproben N _{min}	02.08.2023	47	-	-
Beikrautentfernung in der Reihe	08.08.2023	53	-	-
Ernte Ende	15.09.2023	91	-	-
Bodenprobe N _{min}	20.09.2023	96	-	-

Anhang 12: Daten zur Kultur Einlegegurke (Versuchsjahr 2023, 2. Tastversuch)

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat
Aussaat	13.09.2023	0
Applikation	13.09.2023	0
Aussaat	14.09.2023	1
Aufwuchsbonitur 1	19.09.2023	6
Aufwuchsbonitur 2	20.09.2023	7
Aufwuchsbonitur 3	21.09.2023	8
Aufwuchsbonitur 4	22.09.2023	9
Aufwuchsbonitur 5	23.09.2023	10
Aufwuchsbonitur 6	24.09.2023	11
Aufwuchsbonitur 7	25.09.2023	12
Aufwuchsbonitur 8	26.09.2023	13
Aufwuchsbonitur 9	27.09.2023	14
Aufwuchsbonitur 10	28.09.2023	15
Aufwuchsbonitur 11	29.09.2023	16
Aufwuchsbonitur 12	30.09.2023	17
Aufwuchsbonitur 13	01.10.2023	18
Aufwuchsbonitur 14	02.10.2023	19
Aufwuchsbonitur 15	03.10.2023	20
Aufwuchsbonitur 16	04.10.2023	21
Aufwuchsbonitur 17	05.10.2023	22
Aufwuchsbonitur 18	06.10.2023	23

Anhang 13: Daten zur Kulturführung der Einlegegurke im Versuchsjahr 2024

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	10.04.2024	-34	-	-
Bodenproben N _{min}	15.04.2024	-29	-	-
Düngung	26.04.2024	-18	Hornspäne Haarmehl	95,00 106,00
Bodenbearbeitung 2	26.04.2024	-18	-	-
Beetvorbereitung 1	27.04.2024	-17	-	-
Beetvorbereitung 2	13.05.2024	-1	-	-
Applikation	14.05.2024	0	-	-
Aussaat	14.05.2024	0	-	-
Nachsaat	27.05.2024	13	-	-
Nachsaat	04.06.2024	21	-	-
Manuelle Hacke	06.06.2024	23	-	-
Maschinelle Hacke	12.06.2024	29	-	-
Bodenproben N _{min}	03.07.2024	50	-	-
Ernte Beginn	04.07.2024	51	-	-
Manuelle Hacke	10.07.2024	57	-	-
Blattdüngung 1	17.07.2024	64	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 2	22.07.2024	69	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 3	25.07.2024	72	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 4	02.08.2024	80	Diaglutin N	0,27
Manuelle Hacke	06.08.2024	84	-	-
Blattdüngung 5	08.08.2024	86	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 6	12.08.2024	90	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 7	16.08.2024	94	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 8	19.08.2024	97	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 9	22.08.2024	100	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 10	26.08.2024	104	Diaglutin N	0,27
Blattdüngung 11	29.08.2024	107	Diaglutin N	0,27
Ernte Ende	16.09.2024	125	-	-
Bodenproben N _{min}	17.09.2024	126	-	-

Anhang 14: Daten zur Kulturführung der Einlegegurke im Versuchsjahr 2025

Maßnahmen	Datum	Tage nach Aussaat	Düngemittel	Menge in kg N/ha
Bodenbearbeitung 1	11.01.2025	-116	-	-
Bodenbearbeitung 2	11.04.2025	-26	-	-
Bodenproben N _{min}	29.04.2025	-8	-	-
Düngung	30.04.2025	-7	Hornspäne Haarmehl	36,50 36,40
Beetvorbereitung 1	30.04.2025	-7	-	-
Beetvorbereitung 2	02.05.2025	-5	-	-
Mulchfolie legen	05.05.2025	-2	-	-
Applikation	06.05.2025	-1	-	-
Aussaat	07.05.2025	0	-	-
Vereinzeln	22.05.2025	15	-	-
Nachsaat	22.05.2025	15	-	-
Manuelle Hacke	22.05.2025	15	-	-
Nachsaat vereinzeln	10.06.2025	34	-	-
Manuelle Hacke	10.06.2025	34	-	-
Maschinelle Hacke	11.06.2025	35	-	-
Nullvariante beendet	12.06.2025	36	-	-
Manuelle Hacke	17.06.2025	41	-	-
Ernte Beginn	23.06.2025	47	-	-
Beikrautentfernung in der Reihe	08.07.2025	62	-	-
Flüssigdüngung 1	28.07.2025	82	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung 2	31.07.2025	85	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung 3	05.08.2025	90	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung 4	07.08.2025	92	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung	12.08.2025	97	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung	14.08.2025	99	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung	19.08.2025	104	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung	21.08.2025	106	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung	26.08.2025	111	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung	28.08.2025	113	Hauert Bio NK	4,00
Flüssigdüngung	02.09.2025	118	Hauert Bio NK	4,00
Ernte Ende	08.09.2025	124	-	-
Bodenproben N _{min}	09.09.2025	125	-	-

Anhang 15: Boniturmaßnahmen im Versuchsjahr 2023

Bonitur	Datum	Tage nach Aussaat Kürbis, Zucchini, Zuckermais	Tage nach Aussaat/Pflanzung Einlegegurke, Melone
Aufgangsbonitur	20.06.2023	8	4
Beikrautbonitur 1	22.06.2023	10	6
Aufgangsbonitur	26.06.2023	14	10
Beikrautbonitur 2	29.06.2023	17	13
Beikrautbonitur 3	13.07.2023	31	27
Kulturpflanzenbonitur	21.07.2023	39	35
Beikrautbonitur 4	27.07.2023	45	41
Beikrautbonitur Abschluss Melone	24.08.2023	73	69
Bonitur Seitentriebe Zuckermais	29.08.2023	78	74
Beikrautbonitur Abschluss Gurken	20.09.2023	100	96
Beikrautbonitur Abschluss Kürbis	02.10.2023	112	108
Beikrautbonitur Abschluss Zuckermais	11.10.2023	121	117
Beikrautbonitur Abschluss Zucchini	20.10.2023	130	126

Anhang 16: Boniturmaßnahmen im Versuchsjahr 2024

Bonitur	Datum	Tage nach Aussaat/Pflanzung
Beikrautbonitur 1	21.05.2024	7
Beginn tägliche Aufgangsbonitur	21.05.2024	7
Beikrautbonitur 2	28.05.2024	14
Beikrautbonitur 3	04.06.2024	21
Beikrautbonitur 4	11.06.2024	28
Kulturpflanzenbonitur 1	11.06.2024	28
Beikrautbonitur 5	18.06.2024	35
Kulturpflanzenbonitur 2	19.06.2024	36
Beikrautbonitur 6	24.06.2024	41
Kulturpflanzenbonitur 3	24.06.2024	41
Kulturpflanzenbonitur 4	01.07.2024	48
Ende tägliche Aufgangsbonitur	02.07.2024	49
Beikrautbonitur 7	03.07.2024	50
Kulturpflanzenbonitur 5	11.07.2024	58
Beikrautbonitur 8	19.07.2024	66
Kulturpflanzenbonitur 6	25.07.2024	72
Beikrautbonitur 9	01.08.2024	79
Kulturpflanzenbonitur 7	06.08.2024	84
Beikrautbonitur 10	14.08.2024	92
Kulturpflanzenbonitur 8	21.08.2024	99
Beikrautbonitur 11	27.08.2024	105
Kulturpflanzenbonitur 9	04.09.2024	113
Beikrautbonitur 12	13.09.2024	122

Anhang 17: Boniturmaßnahmen im Versuchsjahr 2025

Bonitur	Datum	Tage nach Aussaat/Pflanzung
Beikrautbonitur 1	07.05.2025	0
Aufgangsbonitur	22.05.2025	15
Beikrautbonitur 2	10.06.2025	34
Aufgangsbonitur	12.06.2025	36
Kulturpflanzenbonitur	21.08.2025	106
Abschlussbonitur	09.09.2025	125