Agrarmanagement und -innovationen

Endbericht

"Next Generation Crop Care"

Autor*innen:

Martin Kreuzinger, Michael Reder, Thomas Weigerstorfer
Alexander Piereder, Michael Schmidthaler

Steyr, März 2026

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung 1
1.1 Einleitung 1
1.2 Projektziele 2
1.3 Projektbeschreibung 4
1.4 Projektpartner 5
1.5 Versuchskulturen 6

2 Autonome Hackroboter – Technologieüberblick 7
2.1 Produktbeschreibung des verwendeten Robert-Fabrikats Farming GT 8
2.2 Erhebungsparameter im Forschungsprojekt 10
2.3 Versuchsdesign und Erhebungskriterien 11
2.4 Methodik 12
2.5 Zeitplan und Zielsetzung 14

3 Versuchsreihe 2024 15
3.1 Absprachen und vorbereitende Tätigkeiten 15
3.1.1 Anwendungsplanung am Betrieb Krawinkler am 15.09.2023 15
3.1.1.1 Projektfokus und Vorgehensweise 15
3.1.1.2 Sonderkulturen und deren Eignung 15
3.1.1.3 Technische Überlegungen 16
3.1.1.4 Personaleinsatz 17
3.2 Hackversuch Elmberg 17
3.3 Hackversuch Zuckerrübe, Familie Krawinkler, Hagelsberg 18
3.3.1 Örtlichkeit 18
3.3.2 Saatgut 18
3.3.3 Zeitraum 19
3.3.4 Versuchsfläche 19
3.3.5 Ergebnisse 20
3.4 Fazit Versuchsreihe 2024: 23

4 Versuchsreihe 2025 24
4.1 Feldtage mit dem Maschinenring OÖ 24
4.2 Örtlichkeit 30
4.3 Klimatische Gegebenheiten 30

4.4 Versuchsflächen 30
4.5 Versuchskriterien und -parameter 32
4.5.1 Erhebungsparameter 33
4.6 Ergebnisse 33
4.6.1 Versuchstag 1, 14. Mai 2025, Fam. Schiefermair, Kematen an der Krems, Lauch 34
4.6.2 Hackversuch Sojabohne in Hargelsberg 41
4.6.3 Geräteeinstellungen 45
4.6.4 Bonitur und Ergebnisse 47
4.6.5 Ergebnis 49
4.6.6 Wirkungsgrade 50
4.6.7 Kulturpflanzenschäden und -verluste 52
4.6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse 53
4.6.9 Methodik und Versuchsdurchführung 53
4.6.10 Drohnen – Monitoring (vgl. Huber, 2025) 55
4.6.10.1 Technische Eigenschaften 55
4.6.10.2 Standard-Prozedere (SOP) – Vorbereitung und Vorflugkontrolle 56
4.6.10.3 Befliegungs – Vorgangsweise 57
4.6.10.4 Datenvorbereitung 57
4.6.10.5 Analysemethoden in QGIS 58
4.7 Hackversuch Weißkraut im August 2025 63

5 Conclusio und Erkenntnisse 65
5.1 Conclusio Ackerbaukulturen (Sojabohne und Zuckerrübe) 65
5.2 Conclusio Technik – Hackroboter versus kameragesteuertes Hackgerät 65
5.3 Conclusio Gemüsekulturen 66
5.4 Gesamterkenntnisse und Hybridansatz 66
5.5 Learnings und Ausblick 66

6 Abbildungsverzeichnis 68

7 Tabellenverzeichnis 70

8 Literaturverzeichnis 71

1 EINLEITUNG

1.1 EINLEITUNG

Der vorliegende Endbericht des Projekts „NextGen:CropCare“ fasst das im Rahmen eines Förderantrags im Zukunftsfonds des Landes Oberösterreich 2022 eingereichte Forschungsvorhaben zusammen. Das Projekt beschäftigte sich mit der Analyse autonomer Feldroboter hinsichtlich Arbeitszeitersparnis im Vergleich zu herkömmlichen Hackmethoden und zur konventionellen, chemischen Beikraut-Regulierung mit Schwerpunkt Oberösterreich. Im nachfolgenden Bericht werden daher die theoretischen Grundlagen sowie die Rahmenbedingungen für den Versuchsaufbau zusammengefasst und Ableitungen für den praktischen Einsatz getroffen.

Die Rahmenbedingungen für den landwirtschaftlichen Pflanzenbau in Österreich und der Europäischen Union sind zunehmend von der Zielsetzung geprägt, den Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel (PSM) deutlich zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund hat die Europäische Union einem österreichweiten nationalen Aktionsplan (NAP) 2022–2026 über die nachhaltige Verwendung von Pflanzenschutzmitteln zugestimmt. Der NAP verfolgt das zentrale Ziel, Risiken und Auswirkungen des Pflanzenschutzmitteleinsatzes auf Menschen, Umwelt und Biodiversität zu verringern und gleichzeitig die landwirtschaftliche Produktivität langfristig abzusichern.

Ein wesentlicher Bestandteil dieses Aktionsplans ist die konsequente Umsetzung des Integrierten Pflanzenschutzes, wie er in Artikel 3 Absatz 6 der Richtlinie 2009/128/EG definiert ist. Dieser Ansatz sieht vor, nicht-chemische Maßnahmen – insbesondere mechanische und biologische Verfahren – vorrangig einzusetzen und chemische Pflanzenschutzmittel nur dann anzuwenden, wenn keine gleichwertigen Alternativen zur Verfügung stehen. Ergänzend dazu gelten die Grundsätze der guten fachlichen Praxis im Pflanzenschutz sowie das Vorsorgeprinzip, wonach mögliche Risiken bereits im Vorfeld möglichst gering zu halten sind.

Auf nationaler Ebene wird diese europäische Zielsetzung unter anderem durch die oberösterreichische Pestizidstrategie 2023 konkretisiert. Diese Strategie setzt auf eine freiwillige Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes und fördert gezielt Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität, insbesondere im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP), der GLÖZ-Standards sowie des ÖPUL-Programms („Grundwasser 2030“). In sensiblen Gebieten wie Wasserschutz- und Schongebieten werden zudem verstärkte Kontrollen des PSM-Einsatzes durchgeführt.

Im Zuge dieser Strategie wird in mehreren Ackerkulturen – darunter Mais, Sojabohne, Sorghum, Zuckerrübe und Raps – auf den Einsatz einzelner Wirkstoffe wie Dimethachlor, Metazachlor, S-Metolachlor und Terbuthylazin verzichtet. Dadurch steigt der Bedarf an alternativen Verfahren zur Beikrautregulierung erheblich, insbesondere an praxistauglichen mechanischen Lösungen, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch tragfähig sind.

Vor diesem agrarpolitischen Hintergrund gewinnt die mechanische Beikrautregulierung zunehmend an Bedeutung. Neben konventionellen, traktorgebundenen Hackgeräten rücken dabei vor allem autonome Hackroboter als innovative Technologie in den Fokus. Diese Systeme versprechen eine präzisere Bearbeitung, eine Reduktion des Arbeitskräftebedarfs sowie eine Verringerung der Bodenverdichtung. Gleichzeitig stellen sie neue Anforderungen an Feldvorbereitung, Saatqualität und betriebliche Organisation.

Das Forschungsprojekt „Next Generation Crop Care (NextGen:CropCare)“ setzt genau an dieser Schnittstelle zwischen politischen Vorgaben, technischer Innovation und landwirtschaftlicher Praxis an. Ziel ist es, den Einsatz autonomer Hackroboter unter realen österreichischen Praxisbedingungen zu untersuchen und diesen systematisch mit herkömmlicher Hacktechnik zu vergleichen. Dadurch sollen fundierte Erkenntnisse gewonnen werden, inwieweit autonome Systeme einen Beitrag zur Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes leisten können und unter welchen Voraussetzungen ihr Einsatz in verschiedenen Kulturen sinnvoll und wirtschaftlich tragfähig ist.

1.2 PROJEKTZIELE

Zentrales Ziel des Forschungsprojektes „Next Generation Crop Care (NextGen:CropCare)“ war es, den Einsatz autonomer Hackroboter im Vergleich zur

konventionellen, traktorgebundenen Hacktechnik unter praxisnahen landwirtschaftlichen Bedingungen systematisch zu bewerten. Dabei sollte nicht nur die technische Funktionsfähigkeit der eingesetzten Systeme untersucht werden, sondern insbesondere deren Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit in unterschiedlichen Kulturen.

Ein wesentlicher Schwerpunkt lag auf dem Vergleich der beiden Bearbeitungssysteme hinsichtlich ihrer arbeitswirtschaftlichen Kennzahlen. Dazu zählten insbesondere der Arbeitszeitbedarf, die erzielte Flächenleistung sowie der organisatorische Aufwand im praktischen Betrieb. Durch diese Betrachtung sollte aufgezeigt werden, in welchen betrieblichen Situationen autonome Systeme eine sinnvolle Ergänzung oder Alternative zur bestehenden Hacktechnik darstellen können.

Darüber hinaus wurde die Wirkung der mechanischen Beikrautregulierung detailliert untersucht. Hierbei standen sowohl der erzielte Wirkungsgrad gegenüber dem vorhandenen Beikraut als auch mögliche Kulturpflanzenschäden und -verluste im Fokus der Erhebungen. Die Beurteilung erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen Entwicklungsstadien der Kulturpflanzen sowie der Bearbeitungsbedingungen während der Einsätze.

Ein weiteres zentrales Projektziel war die Ableitung optimaler Einsatzbedingungen für autonome Hackroboter und kameragesteuerte Hackgeräte. Dabei sollte geklärt werden, unter welchen Voraussetzungen – etwa in Bezug auf Reihenabstände, Feldvorbereitung, Kulturarten und Entwicklungsstadien – die jeweiligen Systeme ihre Stärken bestmöglich ausspielen können. Ziel war es, eine fundierte Entscheidungsgrundlage für landwirtschaftliche Betriebe zu schaffen, die den Einsatz mechanischer Beikrautregulierung im Kontext einer reduzierten Pflanzenschutzmittelanwendung in Erwägung ziehen.

Zusammenfassend zielte das Projekt darauf ab, einen Beitrag zur Weiterentwicklung nachhaltiger, zukunftsfähiger Acker- und Gemüsebausysteme zu leisten und aufzuzeigen, welchen Stellenwert autonome Feldrobotik im Zusammenspiel mit etablierten mechanischen Verfahren künftig einnehmen kann.

1.3 PROJEKTBESCHREIBUNG

Das Forschungsprojekt „Next Generation Crop Care (NextGen:CropCare)“ verfolgt das Ziel, innovative Verfahren der mechanischen Beikrautregulierung unter praxisnahen landwirtschaftlichen Bedingungen zu untersuchen und deren Potenzial zur Reduktion des chemischen Pflanzenschutzmitteleinsatzes zu bewerten. Im Fokus steht dabei der Vergleich zwischen autonomen Hackrobotern und herkömmlicher, traktorgebundener Hacktechnik.

Ausgehend von den politischen Zielvorgaben auf europäischer und nationaler Ebene sowie den zunehmend strengeren Anforderungen an den Pflanzenschutz ergibt sich für landwirtschaftliche Betriebe ein steigender Anpassungsdruck. Insbesondere der freiwillige oder verpflichtende Verzicht auf einzelne Wirkstoffe im Rahmen von Wasser- und Bodenschutzprogrammen erfordert alternative Strategien zur effektiven Beikrautregulierung. Mechanische Verfahren nehmen hierbei eine Schlüsselrolle ein, stoßen jedoch in ihrer klassischen Ausführung teilweise an arbeitswirtschaftliche und technische Grenzen.

Autonome Hackroboter stellen in diesem Zusammenhang eine vergleichsweise neue technologische Entwicklung dar. Sie ermöglichen eine kamerabasierte Pflanzenerkennung bereits ab frühen Entwicklungsstadien und können nach einmaligem Einlernen einer Fläche selbstständig über das Feld navigieren. Durch ihren vergleichsweisen geringen Bodendruck und den autonomen Betrieb versprechen diese Systeme Vorteile im Hinblick auf Bodenschonung, Präzision und Arbeitsorganisation. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die derzeit verfügbaren Systeme noch nicht in allen Anwendungsbereichen vollständig ausgereift sind.

Dem gegenüber steht die klassische kameragesteuerte Hacktechnik, die sich in der landwirtschaftlichen Praxis bereits seit mehreren Jahren bewährt hat. Diese Systeme zeichnen sich durch eine hohe Flächenleistung, ausgereifte Technik und eine große Flexibilität im Einsatz in unterschiedlichen Kulturen aus, erfordern jedoch stets den Einsatz einer Zugmaschine und führen in der Regel zu einer höheren Bodenbelastung.

Ziel des Projektes war es daher nicht, einzelne Systeme isoliert zu bewerten, sondern deren Leistungsfähigkeit, Effizienz und Praxistauglichkeit systematisch zu vergleichen.

Die Versuchsreihen wurden in den Jahren 2024 und 2025 durchgeführt und umfassten sowohl klassische Ackerbaukulturen als auch ausgewählte Gemüsekulturen. Durch diese breite Auswahl an Kulturen sollte eine möglichst realitätsnahe Einschätzung der Einsatzmöglichkeiten beider Systeme ermöglicht werden. Ergänzend zu den mechanischen Bearbeitungsgängen wurden verschiedene Bonitur- und Monitoringverfahren angewandt, um neben der Beikrautregulierung auch potenzielle Kulturpflanzenschäden, Arbeitszeitbedarf und Wirkungsgrade zu erfassen.

1.4 PROJEKTPARTNER

Die Umsetzung des Forschungsprojektes „Next Generation Crop Care (NextGen:CropCare)“ erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, landwirtschaftlicher Praxis und Technikpartnern. Diese interdisziplinäre Ausrichtung ermöglichte es, die untersuchten Systeme unter realistischen Praxisbedingungen zu evaluieren und die gewonnenen Erkenntnisse praxisnah aufzubereiten.

Die wissenschaftliche Projektkoordination und -durchführung erfolgte durch die FH Oberösterreich, insbesondere durch die Standorte Wels und Steyr. Dabei war der Masterstudiengang *Agrarmanagement und -innovationen* maßgeblich in die Planung, Durchführung und Auswertung der Versuchsreihen eingebunden.

Als landwirtschaftliche Praxispartner standen mehrere Ackerbaubetriebe mit unterschiedlichen Bewirtschaftungsschwerpunkten zur Verfügung. Dazu zählte der biologisch wirtschaftende Betrieb Familie Krawinkler („Amtmanngut“) in Hargelsberg, der sowohl als Praxis- als auch als Forschungsbetrieb diente. Ergänzend dazu wurden Versuchsflächen am Subbetrieb „Stechergut“ in Hofkirchen, sowie am konventionell wirtschaftenden Partnerbetrieb Familie Zittmayr („Bauer zu Rath“) in Kronstorf genutzt. Durch diese breite betriebliche Aufstellung konnten sowohl biologische als auch konventionelle Bewirtschaftungssysteme berücksichtigt werden.

Auf technischer Seite wurde das Projekt durch mehrere Industrie- und Dienstleistungspartner unterstützt. Die Bereitstellung und Betreuung des autonomen Hackroboters erfolgte durch Farming GT, während mit dem kameragesteuerten Hackgerät „Flexcare V 6200“ der Firma Pöttinger ein etabliertes System in die Versuchsreihen integriert war. Weitere Unterstützung erfolgte durch Partner aus dem

Bereich Landtechnik, Saatgut und Agrarwirtschaft, darunter CNH/Landtechnik, Agrana, Saatbau, der Maschinenring sowie Dienstleister im Bereich Drohnen-Monitoring und Datenaufbereitung.

Die enge Zusammenarbeit aller Projektpartner stellte eine wesentliche Grundlage für die erfolgreiche Durchführung der Versuchsreihen dar und trug maßgeblich dazu bei, sowohl wissenschaftlich fundierte als auch praxisrelevante Ergebnisse zu erzielen.

1.5 VERSUCHSKULTUREN

Zur umfassenden Bewertung der eingesetzten Systeme zur mechanischen Beikrautregulierung wurden im Rahmen des Projektes „Next Generation Crop Care (NextGen:CropCare)“ Versuche in mehreren Kulturarten durchgeführt. Durch die gezielte Auswahl sowohl klassischer Ackerbaukulturen als auch ausgewählter Gemüsekulturen sollte eine möglichst breite Aussagekraft hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten autonomer Hackroboter und herkömmlicher Hacktechnik erzielt werden.

Im Versuchsjahr 2024 umfassten die Versuchsflächen die Kulturen Zuckerrübe, Schwarzkümmel und Sonnenblume. Diese Auswahl ermöglichte es, unterschiedliche Reihenabstände, Entwicklungsdynamiken und Sensitivitäten gegenüber mechanischer Beikrautregulierung abzubilden. Insbesondere die Zuckerrübe stellte aufgrund ihrer weiten Verbreitung und ihrer hohen Anforderungen an eine erfolgreiche Unkrautkontrolle eine zentrale Versuchskultur dar.

Im Versuchsjahr 2025 wurde das Versuchsspektrum gezielt erweitert. Neben der Sojabohne und erneut der Zuckerrübe wurden zusätzlich mehrere Gemüsekulturen, darunter Lauch, Sellerie und Weißkraut, in die Versuchsreihen aufgenommen. Durch diese Erweiterung konnte das Einsatzpotenzial der untersuchten Systeme auch unter den spezifischen Bedingungen des Gemüsebaus bewertet werden, der durch engere Reihenabstände, höhere Kulturpflanzensensibilität und erhöhte Anforderungen an die Bearbeitungspräzision gekennzeichnet ist.

2 AUTONOME HACKROBOTER – TECHNOLOGIEÜBERBLICK

Mit zunehmendem Automatisierungsgrad der Hacktechnologien gewinnen auch autonom arbeitende Feldroboter bzw. Hackroboter an Bedeutung. Zur präzisen Reihenführung dienen unterschiedliche Sensoren sowie die Satellitennavigation. Die Beikrautregulierung erfolgt wie bei sensorgesteuerten, selektiv arbeitenden Hackgeräten. Kameras und aktive Lichtsysteme - z.B. Lichtschranken - identifizieren jede Kulturpflanze und unterscheiden diese von den Unkräutern, die anschließend von den Hackwerkzeugen innerhalb und zwischen den Pflanzenreihen entfernt werden [vgl. DLG, 2019, S. 22ff.; Heuser et al., 2018, S. 101].

Autonom fahrend und arbeitende Feldroboter können insbesondere arbeitsintensive Handarbeit effektiv reduzieren und dadurch die Wirtschaftlichkeit der mechanischen Beikrautregulierung steigern. Abgesehen vom Zeitbedarf für die Initialisierung und Wartung arbeiten diese autonom und ohne menschliche Unterstützung, wodurch auch eine Arbeitskraft – etwa zur Steuerung von Traktor und Hackgerät – eingespart werden kann. Die Unabhängigkeit von einer Bedienperson vor Ort ermöglicht zudem ausgedehnte und unterbrechungsfreie Einsatzzeiten, da Roboter im Gegensatz zu Menschen unabhängig von sozialen und körperlichen Bedürfnissen arbeiten können [vgl. Kopfinger/Vinzent, 2021, S. 175]. „Daraus ergibt sich ebenso eine bessere Skalierbarkeit der Geräte auf die geplante Einsatzfläche, weil diese nicht von der Anzahl an Fahrern abhängt“ [Kopfinger/Vinzent, 2021, S. 175].

Aufgrund ihrer Skalierbarkeit sind Feldrobotersysteme unabhängig von der Betriebsgröße einsetzbar, wodurch sie auch für kleinstrukturierte landwirtschaftliche Betriebe rentabel sein könnten [vgl. Heuser et al., 2018, S. 101].

Dabei ist zu beachten, dass auch autonome Feldroboter auf ein gewisses Maß an menschlicher Betreuung angewiesen sind. Dies gilt beispielsweise für den Transport zum Feld, der Pfadplanung, wie z.B. dem Einmessen der Feldgrenzen, oder bei der Einstellung der Arbeitswerkzeuge [vgl. Kopfinger/Vinzent, 2021, S. 175f.]. Außerdem können viele

autonome Hackroboter aufgrund ihrer spezifischen Abmessungen nur in bestimmten Reihenabständen eingesetzt werden. [vgl. Heuser et al., 2018, S. 101].

Im Gegensatz zu Hackgeräten mit automatischer Reihenführung gibt es im Bereich Hackroboter nur eine überschaubare Anzahl an Anbietern bzw. marktverfügbaren Maschinen [vgl. Heuser et al., 2018, S. 100].

2.1 Produktbeschreibung des verwendeten Robert-Fabrikats Farming GT

Einer dieser Anbieter ist das Unternehmen Farming Revolution, das den autonomen Hackroboter *Farming GT* entwickelt hat (siehe Abb. 1).

Abb. 1 Im Versuch eingesetztes Farming GT Modell [eigene Darstellung]

Der Farming GT kann im Vergleich zu anderen Herstellern Saatunabhängig Beikräuter präzise innerhalb und zwischen der Kulturpflanzenreihe regulieren. Die Spurweite ist von 1,35 bis maximal 2,25 m variierbar, womit dieser in verschiedenen Kulturarten einsetzbar ist. Die Umrüstung kann innerhalb von 15 Minuten erfolgen. Durch die Vierradlenkung und des Zwischenachsanbaus der Hackelemente ist eine präzise Reihenführung auch in Kurven und in leichten Hanglagen möglich. Die Tiefenführung erfolgt mittels Lasermessungen, die Reihenweite kann in wenigen Minuten angepasst werden. Darüber hinaus ist der Farming GT mit Section Control ausgestattet, was eine ein selektives Aussetzen der Hackelemente an Feldkeilen ermöglicht [vgl. Farming Revolution, 2025a].

Der Farming GT hackt vorwiegend autonom auf dem Feld, der Transport zum Schlag, und wichtige Einstellungen – wie die zu Hackende Kultur, die Reihen- und Sicherheitsabstände – erfolgen über die mobile Applikation von Farming Revolution. Ebenso ist mit der App eine Überwachung des Roboters und der Import von Sähdaten möglich. Aufgrund seines geringen Gewichts (2000 kg) und seiner kompakten Bauweise auf einem PKW-Anhänger transportiert werden [vgl. Farming Revolution, 2025a].
Der Feldroboter wird über einem elektrischen Allradantrieb angetrieben, wobei die Batterien von einem Notstromaggregat geladen werden. Der Motor weist einen Verbrauch von 1,5 kWh pro Stunde, die Maximalleistung liegt bei 18kW. Die vom Motor gelieferte Energie reicht laut Herstellerangaben von mindestens 24 bis maximal 30 Stunden [vgl. Farming Revolution, 2025a].

Obwohl der Hackroboter mit GPS ausgestattet ist, orientiert sich dieser bei der Fortbewegung nach dem Einmessen der Fläche an den Kulturpflanzenreihen, die über Multispektralkameras identifiziert werden. Dabei ist zu beachten, dass im Zeitraum des „Einlernens“ des Feldes der Roboter auf menschliche Hilfe bzw. Betreuung angewiesen ist [vgl. Rohringer et al., 2023; Farming Revolution, 2025] . Durch Kollisionserkennung und selbstständiger Einhaltung der Feldgrenzen ist der Hackroboter auch sicher im Einsatz (Konform Maschinenrichtlinie 2006/42/EG). Zudem erkennt der Roboter selbstständig Fehler sowie Regen mittels spezifischen Sensors, stoppt die Arbeit und informiert den Betreiber bzw. die Betreiberin über die mobile App.

Funktionsweise

Der Hackroboter erkennt über eine Bilddatenbank (Basis: 18 Millionen Aufnahmen) mehr als 60 Kulturen und unterscheidet über Künstliche Intelligenz zwischen Kulturpflanze und Unkraut. Ab einer Pflanzengröße von 1 cm wird der Kulturpflanzenmittelpunkt über eine Multispektralkamera erkannt und mit den Hackelementen die umgebenden Beikräuter unter Berücksichtigung der definierten Sicherheitsabstände reguliert (siehe Abb. 3 und Abb. 2). Die Pflanzenerkennung bzw. Stammerkennung ist bis zum Reihenschluss bei allen Lichtverhältnissen (Tag und Nacht) sowie hohem Unkrautdruck und Überlappungen möglich. Zum Schutz der Kulturpflanze

können Sicherheitsabstände festgelegt werden, die von den Hackwerkzeugen unbearbeitet bleiben. Dadurch können Kulturpflanzenverluste eingeschränkt werden, es bleibt jedoch eine gewisse Restverunkrautung innerhalb des Schutzbereiches bestehen.

Mit einer optimalen Messerauswahl und speziellen Schwenkantrieben kann der Roboter neben kleinen auch größere Unkrautern gut entfernen und 5 mm an die Pflanze heranarbeiten [vgl. Farming Revolution, 2025a].

Abb. 3 Farming GT – Kulturpflanzenerkennung [Farming Revolution, 2025]

Abb. 2 Farming GT – Beikrautregulierung durch Hackwerkzeuge [Farming Revolution, 2025]

Der Farming GT erreicht dabei eine maximale Arbeitsgeschwindigkeit von 0,65 m/s. Daraus ergibt sich laut Herstellerangaben eine Flächenleistung von 10 ha pro Tag [vgl. Farming Revolution, 2025a, 2025b]. Das geringe Gesamtgewicht des Roboters führt zudem zu weniger Bodenverdichtungen und einer gewissen Einsatzbarkeit auf feuchten Böden [vgl. Farming Revolution, 2025a].

2.2 Erhebungsparameter im Forschungsprojekt

Zur objektiven Bewertung der untersuchten Bearbeitungsvarianten werden die nachfolgenden Parameter systematisch erfasst und ausgewertet:

- **Zeitaufwand und Flächenleistung**
  Für die Durchführung einer betriebswirtschaftlichen Bewertung, insbesondere zur Berechnung des Deckungsbeitrags, werden die jeweiligen Zeitaufwände detailliert erfasst. Dazu zählen die Einsatzzeiten der Technik einschließlich der Vor- und Nachbereitungszeiten sowie der Arbeitszeitaufwand für händisches Jäten (in Arbeitskraftstunden, AKh). Zusätzlich werden die Flächenleistungen mit und ohne Berücksichtigung von Wendemanövern dokumentiert.

- **Unkrautdruck**
  Der Beikrautbesatz wird vor der mechanischen Bearbeitung quantifiziert, um den Bearbeitungserfolg durch Vergleich mit dem Zustand nach dem Hackdurchgang beurteilen zu können. Als ergänzendes Kriterium zur Bewertung der Unkrautregulierung dient der zeitliche Aufwand (in AKh) für eventuell notwendige händische Nacharbeiten.

- **Kulturverluste**
  Zur Erfassung möglicher negativer Auswirkungen der Bearbeitung auf den Pflanzenbestand erfolgt eine Zählung der Kulturpflanzen vor und nach der Maßnahme. Aus diesen Stichproben werden etwaige Verluste in der Kultur durch die jeweilige Bearbeitungsmethodik ermittelt.

- **Entwicklung der Kultur**
  Die Auswirkungen der Bearbeitung auf die Entwicklung des Rübenbestandes werden unter besonderer Berücksichtigung der Nährstofffreisetzung (Mineralisation) sowie potenzieller Bodenverdichtungen analysiert. Dabei werden verschiedene Befahrungsstrategien und Einsatzgewichte in die Bewertung einbezogen.

2.3 Versuchsdesign und Erhebungskriterien

Die Versuche wurden als Parzellen- bzw. Streifenversuche unter praxisnahen Bedingungen angelegt. Ziel war es, reale Arbeitsabläufe im landwirtschaftlichen Betrieb möglichst genau abzubilden und gleichzeitig vergleichbare Versuchsergebnisse zu erzielen. In allen Kulturen wurden die Bearbeitungsgänge der unterschiedlichen Systeme unter möglichst identischen Bedingungen durchgeführt.

Zur Bewertung der eingesetzten Hackverfahren wurden mehrere Erhebungskriterien definiert. Dazu zählten in erster Linie der Arbeitszeitbedarf und die erzielte Flächenleistung, um die arbeitswirtschaftliche Effizienz der Systeme zu vergleichen. Ergänzend dazu wurden der Unkrautdruck vor und nach den Bearbeitungsgängen, der resultierende Wirkungsgrad der Beikrautregulierung sowie mögliche Kulturpflanzenverluste und -schäden erfasst.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Nutzung von Drohnenmonitoring zur objektivierten Bestandsanalyse. Hierbei kamen multispektrale Aufnahmen und der sogenannte Excess-Green-Index (ExG) zum Einsatz, um Vegetationsanteile und Kulturpflanzenbeeinträchtigungen quantitativ zu erfassen. Diese Methoden ermöglichten eine ergänzende Bewertung der mechanischen Bearbeitung über größere Flächen und trugen dazu bei, subjektive Einflüsse klassischer visueller Bonituren zu reduzieren.

Die Erhebungen erfolgten unter Berücksichtigung des jeweiligen Entwicklungsstadiums der Kulturen sowie der Bearbeitungsbedingungen. Insbesondere Faktoren wie mögliche Verschüttung junger Pflanzen, Schäden an Feinwurzeln sowie Auswirkungen unterschiedlicher Maschinengewichte auf die Bodenstruktur wurden in die Bewertung einbezogen.

Durch die Kombination aus arbeitswirtschaftlichen Kennzahlen, visuellen Bonituren und drohnengestützten Analysen konnte eine umfassende Beurteilung der eingesetzten Systeme vorgenommen werden, die sowohl technische als auch pflanzenbauliche Aspekte berücksichtigt.

2.4 METHODIK

In Bio-Zuckerrüben wird ein Parzellenversuch mit 4-facher Wiederholung angelegt. Die Aussaat erfolgt kulturtypisch in einem Reihenabstand von 45 cm. Um idente Bedingungen für alle drei Varianten zu schaffen, erfolgt die Pflanzung mithilfe eines traktorseitig installierten RTK-Korrektursignals und Section-Control-Abschaltung. Vor und nach den Bearbeitungsgängen werden die definierten Parameter erhoben, um diese sowohl nach jedem Durchgang, wie auch im gesamten Zeitraum vergleichen zu können. Um ein relevantes Ergebnis zu erzielen, werden die Versuchsparzellen anschließend

händisch gejätet, um das Arbeitsergebnis weiters durch den zusätzlichen Aufwand an Akh bewerten zu können. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt.

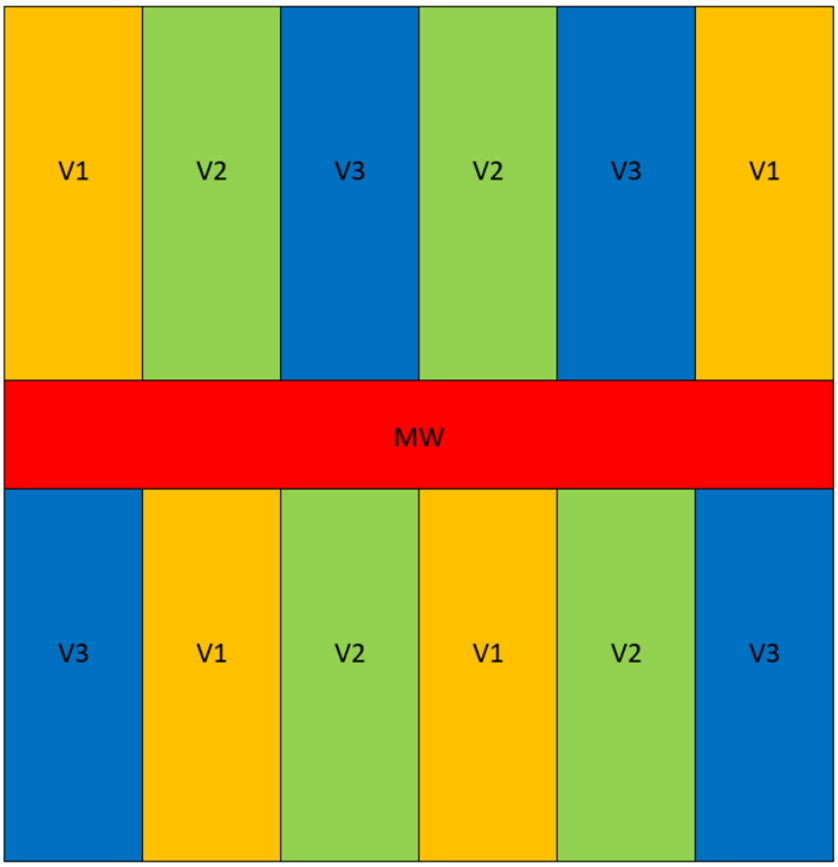

Abbildung 1: Parzellierungsschema Versuch

Erläuterung der Parzellierung

V1: Einsatz des autonomen Hackroboters V2: Kameragesteuertes Anbauhackgerät V3: Ungesteuertes Hackgerät mit RTK-gelenkter Zugmaschine MW: zum Rangieren und Ausfahren der jeweiligen Arbeitsgeräte, wird im Versuch nicht berücksichtigt

Alle 3 Varianten werden anschließend manuell nachbearbeitet.

2.5 ZEITPLAN UND ZIELSETZUNG

Der Versuchsplan wurde aufgrund der Entwicklungsstadien der Kulturpflanze und der Beikräuter festgelegt und bei allen Varianten zeitgleich durchgeführt, um die Versuchsbedingungen der Fläche und der Umwelt ident zu halten.

Ziel war es, die Praktikabilität der verschiedenen Systeme aufzuzeigen und eine Abgrenzung der optimalen Einsatzbedingungen darzustellen mit dem Ziel Landwirte maßgeblich in der Entscheidungsfindung zu unterstützen.

3 VERSUCHSREIHE 2024

Die Versuchsreihe 2024 wurde vom wissenschaftlichen Mitarbeiter Michel Reder, Student von Agrarmanagement- und Innovationen des Jahrgangs 2023, ausgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse werden in diesem Kapitel durch das Team des Studiengangs Agrarmanagement und -innovationen wiedergegeben.

3.1 ABSPRACHEN UND VORBEREITENDE TÄTIGKEITEN

Nach Sichtung des vorhandenen Materials werden die Inhalte der ausgeführten Maßnahmen zum besseren Verständnis der Lage und der zu klärenden Umstände und Rahmenbedingungen in diesem Kapitel zusammengefasst.

3.1.1 ANWENDUNGSPLANUNG AM BETRIEB KRAWINKLER AM 15.09.2023

Beim landwirtschaftlichen Betrieb der Familie Krawinkler wird rund 90 % der Fläche mittels des Turiel-Damm-Systems bewirtschaftet. Ein benachbarter Betrieb des Cousins kultiviert zusätzlich ca. 10 ha Zuckerrüben im konventionellen Flachanbau auf sehr ebenem Gelände. Diese Flächen bieten durch ihre Topografie günstige Voraussetzungen für automatisierte Bearbeitung, insbesondere für den Einsatz eines Feldroboters.

3.1.1.1 PROJEKTFOKUS UND VORGEHENSWEISE

Für das geplante Projekt wird bei dieser Besprechung empfohlen, den Fokus auf eine etablierte Kultur mit bewährter Anbautechnik – beispielsweise die Zuckerrübe – zu legen. Diese Kultur ist mit den derzeitigen Fähigkeiten des eingesetzten Roboters gut bearbeitbar. Ergänzend sollen ein bis zwei Sonderkulturen aufgenommen werden. Im ersten Projektjahr erfolgt dabei zunächst die Erfassung der Kulturen ins System des Roboters, im zweiten Jahr soll dann die selbstständige Bearbeitung durch den Roboter erfolgen.

3.1.1.2 SONDERKULTUREN UND DEREN EIGNUNG

Ringelblume:

Diese Kultur ist äußerst arbeitsintensiv, insbesondere aufgrund des hohen Unkrautdrucks. Bisher wurde sie aus arbeitswirtschaftlichen Gründen aus der Fruchtfolge am Betrieb Krawinkler genommen. Durch den Einsatz eines Roboters könnte der Arbeitskräftebedarf

(AKh) für die Jätearbeit deutlich gesenkt und die wirtschaftliche Attraktivität der Ringelblumenproduktion wiederhergestellt werden. Eine Herausforderung stellt der enge Abstand in der Reihe (fortan: Reihenabstand) von 3–5 cm dar, der durch die bisher verwendete Turiel-Drillmaschine bedingt ist. Eine Einzelkornsaat könnte hier Abhilfe schaffen, jedoch ist der unregelmäßig geformte Samen schwer maschinell zu vereinzeln. Auf dem Zweitbetrieb in Hargelsberg wäre ein Anbau im flachen Gelände denkbar.

Fenchel:
Fenchel bietet gute Voraussetzungen für den Robotereinsatz. Die Pflanze wird gesät, weist eine rasche Jugendentwicklung auf und erreicht eine stattliche Wuchshöhe. Der Reihenabstand lag bei 17–18 cm, was die mechanische Bearbeitung erleichtert.

Weitere potenzielle Kulturen:

- **Dill:** Sehr empfindlich gegenüber intensiver Bearbeitung. Risiko von Pflanzenschäden durch mechanische Eingriffe.
- **Koriander:** Gut für Robotereinsatz geeignet. Jedoch besteht das Risiko einer Verunkrautung durch Koriandersamen in Folgejahren.
- **Braunhirse:** Wird als Getreide in enger Drillsaat angebaut, was ein Hacken in der Reihe nahezu unmöglich macht.
- **Porridge-Komponenten (z. B. Hafer):** Keine konkreten Angaben zur Eignung im Robotereinsatz.

3.1.1.3 TECHNISCHE ÜBERLEGUNGEN

- Die vorhandene **Spurweite der Pflegespuren beträgt 180 cm**.
- Für Kulturen mit empfindlicher Jugendentwicklung wie Fenchel und Dill könnte eine **Begleitsaat mit Senf** sinnvoll sein. Der Senf dient vor dem Auflaufen der Hauptkultur als visuelle Leitlinie für den Roboter und wird anschließend entfernt.
- Es soll geprüft werden, **ob RTK-Spuren aus der Aussaat aufgezeichnet und verwendet werden können**, um eine präzise Orientierung des Roboters zu ermöglichen.

- Eine **A-B-Linienführung** als Navigationsgrundlage für den Roboter wäre ebenfalls wünschenswert.

3.1.1.4 PERSONALEINSATZ

- Händische Jätearbeiten könnten über den **Maschinenring abgerechnet** oder durch **Schüler:innen landwirtschaftlicher Schulen im Rahmen des Praxisunterrichts** durchgeführt werden.

3.2 HACKVERSUCH ELMBERG

In Zusammenarbeit mit der HBLA Elmberg wurde der Roboter in Sonnenblumen getestet. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt.

Es kam zu einem unerwünschten Ergebnis, da das Erkennen der Sonnenblumenpflanzen eine Schwierigkeit für den Roboter dargestellt hat. Hierzu muss erwähnt werden, dass Missverständnisse in der Kommunikation unter den Versuchsteilnehmern dazu geführt hat, dass sich der Start des Experiments verzögert hat und somit der Unkrautdruck zu hoch wurde.

Um diesem Problem beizukommen, wurde ein gezogenes Hackgerät über die Versuchsleiter angemietet, was zu einer gewissen Erleichterung führte, aber sicher nicht dem Standard im landwirtschaftlichen Pflanzenbau entsprach.

Schlussendlich wurde mit händischer Beikrautbeseitigung dafür gesorgt, dass die Kulturpflanzen Großteils erhalten blieben und der entstandene Schaden minimal blieb. (Reder, 2024)

Abbildung 2: Areal der HBLA Elmberg mit Versuchsfeld

3.3 Hackversuch Zuckerrübe, Familie Krawinkler, Hagelsberg

Im Forschungszeitraum 2024 wurden mehrere Feldversuche mit dem Farming GT durchgeführt. Die Versuche wurden an den Kulturen von Zuckerrüben und Schwarzkümmel angewandt. Vorrangig galt es, den Vergleich der Ergebnisse von Hackroboter zu Hack-Anbaugeräten und händischer Beikrautbeseitigung darzustellen.

3.3.1 Örtlichkeit

Der Hackversuch bei Zuckerrüben wurde am Schartner-Hof der Familie Zittmayr in Enns durchgeführt. Das „Hausfeld West“ diente als bevorzugter Schlag für den Versuch, und wurde gemäß der eingereichten Methodik durchgeführt.

3.3.2 Saatgut

Als Saatgut diente die Zuckerrübensorte „Fiammetta“ der KWS Austria Saat GmbH, weil dies die vom Landwirt bevorzuge Sorte ist.

3.3.3 ZEITRAUM

Die Aussaat erfolgte am 3.April 2024. Geerntet wurde am 31.Oktober 2024.

3.3.4 VERSUCHSFLÄCHE

Die Versuchsfläche wurde in fünf verschiedene Parzellen eingeteilt, von welchen die ausschlaggebenden Rahmenbedingungen bekannt waren und so in die Ergebnisse miteinfließen konnten.

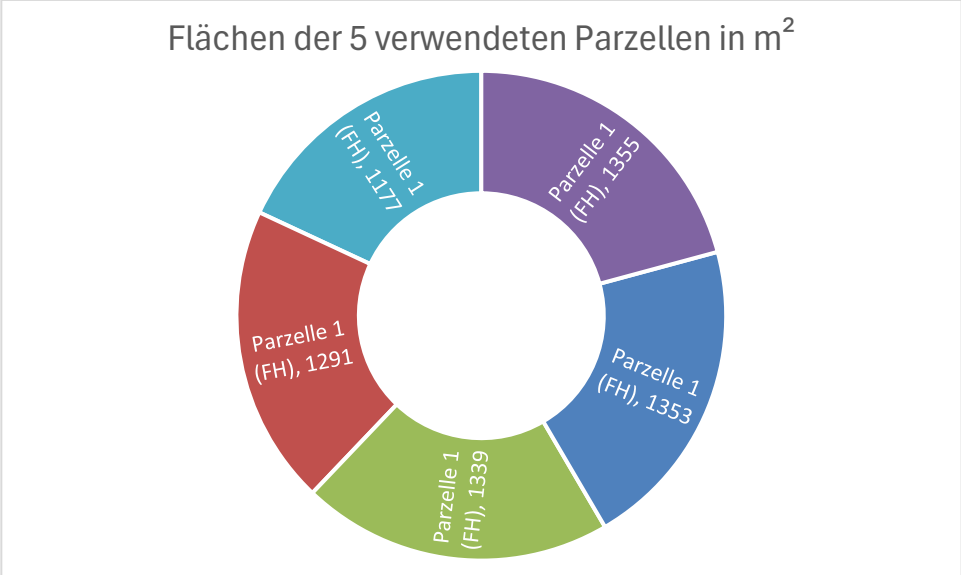

Abbildung 3: Flächenvergleich der verwendeten Parzellen

Abbildung 3 zeigt, dass die Flächen der einzelnen Parzellen ähnliche Fläche aufweisen, um möglichst regelmäßige Versuchsbedingungen herzustellen.

3.3.5 ERGEBNISSE

Folgende Auswertungen erfolgten nach Durchführung des Hackversuchs in der Zuckerrübenkultur.

In Tabelle 1 befinden sich die Ausgangsdaten zum Feldversuch.

Tabelle 1: Ausgangsdaten Versuch Zuckerrübe

Betrieb	Zittmayr
Feld	Hausfeld West
Frucht	Zuckerrübe
Sorte	KWS Fiammetta
Aussaatzeitpunkt	03.04.2024
Erntezeitpunkt	31.10.2024

In Tabelle 1 und Tabelle 2 befinden sich die gesammelten, erfassten Ergebnisparameter der Zuckerrübenkultur.

Tabelle 2:Gesammelte Ergebnisse Hackversuch Zuckerrüben Hargelsberg

	Parzelle 1 (FH)			Parzelle 2 (FH)	
Merkmal	betriebsübliche Kulturführung		Merkmal	Pöttinger Hackversuch	
Vorfrucht	Winterweichweizen		Vorfrucht	Winterweichweizen	
Länge (m)	501		Länge (m)	478	
Breite (m)	2,7		Breite (m)	2,7	
Fläche (m^2)	1353		Fläche (m^2)	1291	
Schmutzrübe (t)	15,02		Schmutzrübe (t)	14,36	
Schmutzanteil (%)	10		Schmutzanteil (%)	11	
reine Rübe (t)	13,52		reine Rübe (t)	12,78	
Qualitätmessung	Zuckergehalt	BZG	Qualitätmessung	Zuckergehalt	BZG
Probe 1 (%)	16,14	13,92	Probe 1 (%)	17,38	15,20
Probe 2 (%)	17,48	15,2	Probe 2 (%)	12,94	10,71
Probe 3 (%)	16,72	14,51	Probe 3 (%)	17,38	14,91
Probe 4 (%)	16,06	13,67	Probe 4 (%)	16,68	14,60
Durchschnitt (%)	16,60	14,33	Durchschnitt (%)	16,10	13,86
Schmutzrübe (t/ha)	111,01		Schmutzrübe (t/ha)	111,23	
Schmutztransport (t/ha)	11,10		Schmutztransport (t/ha)	11,12	
reine Rübe (t/ha)	99,93		reine Rübe (t/ha)	98,99	
Zuckerertrag (t/ha)	16,59	14,31	Zuckerertrag (t/ha)	15,93	13,72

	Parzelle 3 (FH)			Parzelle 4 (Privat)	
Merkmal	Roboter Hackversuch		Merkmal	einmaliges Hacken (EC Stadium 18)	
Vorfrucht	Winterweichweizen		Vorfrucht	Winterweichweizen	
Länge (m)	496		Länge (m)	502	
Breite (m)	2,7		Breite (m)	2,7	
Fläche (m^2)	1339		Fläche (m^2)	1355	
Schmutzrübe (t)	14,74		Schmutzrübe (t)	15,72	
Schmutzanteil (%)	12		Schmutzanteil (%)	10	
reine Rübe (t)	12,97		reine Rübe (t)	14,15	
Qualitätmessung	Zuckergehalt	BZG	Qualitätmessung	Zuckergehalt	BZG
Probe 1 (%)	16,98	14,94	Probe 1 (%)	16,62	14,63
Probe 2 (%)	15,48	13,34	Probe 2 (%)	17,57	15,63
Probe 3 (%)	16,28	14,07	Probe 3 (%)	18,08	14,82
Probe 4 (%)			Probe 4 (%)	16,64	14,54
Durchschnitt (%)	16,25	14,12	Durchschnitt (%)	17,23	14,91
Schmutzrübe (t/ha)	110,08		Schmutzrübe (t/ha)	116,01	
Schmutztransport (t/ha)	11,01		Schmutztransport (t/ha)	11,60	
reine Rübe (t/ha)	96,86		reine Rübe (t/ha)	104,43	
Zuckerertrag (t/ha)	15,74	13,67	Zuckerertrag (t/ha)	17,99	15,57

	Parzelle 5 (Privat)	
Merkmal	einmaliges Hacken (EC Stadium 18)	
Vorfrucht	Knaulgras	
Länge (m)	436	
Breite (m)	2,7	
Fläche (m^2)	1177	
Schmutzrübe (t)	14,44	
Schmutzanteil (%)	9	
reine Rübe (t)	13,14	
Qualitätmessung	Zuckergehalt	BZG
Probe 1 (%)	17,38	14,93
Probe 2 (%)	16,52	14,36
Probe 3 (%)	16,44	14,31
Probe 4 (%)	18,08	15,82
Durchschnitt (%)	17,11	14,86
Schmutzrübe (t/ha)	122,68	
Schmutztransport (t/ha)	12,27	
reine Rübe (t/ha)	111,64	
Zuckerertrag (t/ha)	19,10	16,58

Der Vergleich erfasste vier unterschiedliche Arten der Unkrautbekämpfung, nämlich die betriebsübliche Kulturführung, den Hackversuch mit dem Flexcare-Hackgerät der Firma Pöttinger, den Hackversuch mit dem autonom fahrenden Roboter der Firma Farming GT und das konventionelle Hacken. Zwischen Parzelle 4 und Parzelle 5 bestand der Unterschied der Vorfrucht. Als Bewertungskriterium wird der Zuckerertrag in Tonnen pro Hektar herangezogen.

Tabelle 3: Ergebniszusammenfassung Hackversuch

	Parzelle 1	Parzelle 2	Parzelle 3	Parzelle 4	Parzelle 5
Hackmethode	betriebsübliche KF	Pöttinger Flexcare	Farming GT	konventionelles Hacken	konventionelles Hacken
Vorfrucht	Winterweichweizen	Winterweichweizen	Winterweichweizen	Winterweichweizen	Knaulgras
Zuckergehalt (%)	16,60	16,10	16,25	17,23	17,11
Zuckerertrag (t/ha)	16,59	15,93	15,74	17,99	19,10

Die Ergebnisse aus Tabelle 3 werden in Abbildung 4 dargestellt.

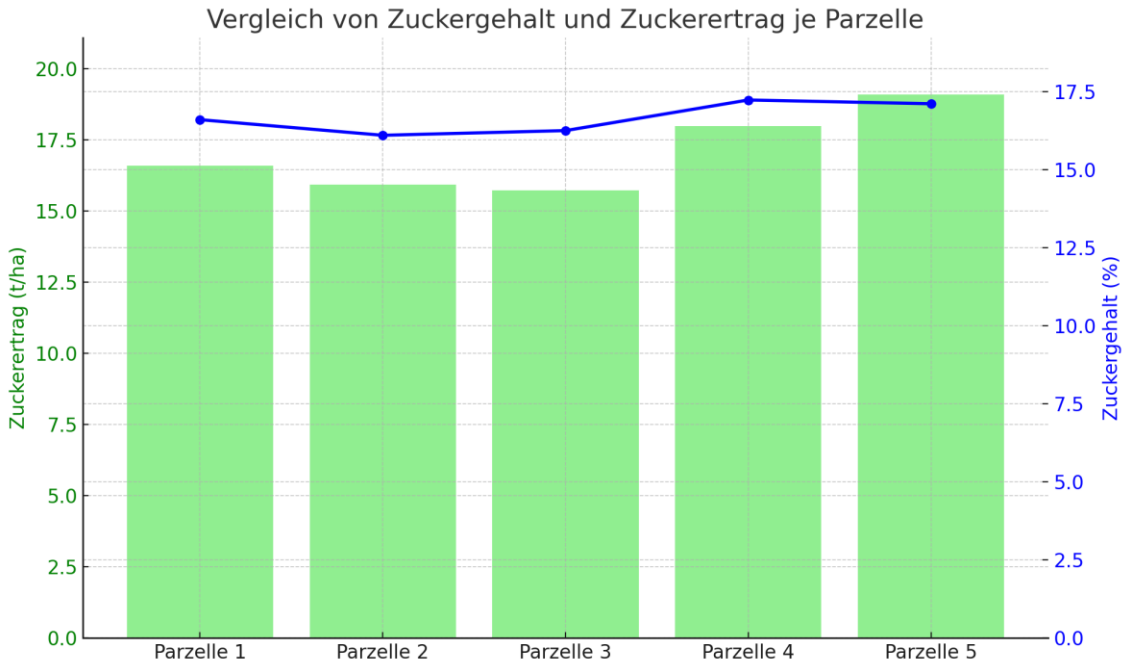

Abbildung 4: Vergleich Hackmethoden nach Ertrag und Zuckergehalt

Es ist erkennbar, dass das konventionelle Hacken die besten Ergebnisse bringt. Kulturen, welche mit dem autonom fahrenden Roboter behandelt wurden, warfen im Vergleich dazu 17,6% weniger Zuckerertrag ab.

3.4 FAZIT VERSUCHSREIHE 2024:

Es wurde seitens der Versuchsleitung darauf Wert gelegt, ein übersichtliches Bild der Lage darzustellen. Da es sich um den ersten Versuch dieser Art an der FH Steyr handelte, wurden gewisse Dinge nicht mit der nötigen Genauigkeit betrachtet beziehungsweise waren zu Versuchsstart noch nicht im Fokus der Versuchsführenden.

Als Learning daraus ist sicher zu sehen, dass eine sorgfältige Datenerfassung und eine genaue Versuchsplanung unerlässlich sind. Gleichzeitig müssen diese Daten so gesammelt und aufbereitet werden, dass sie für nachfolgende Mitarbeiter leicht find- und erfassbar sind. Die gute, interne Kommunikation aller teilnehmenden Parteien ist Basis für einen erfolgreichen Versuchsverlauf, weil der Zeitraum, in dem sich die Hackvorführungen mit externen Betrieben und die Ausführung der eigentlichen Hackversuche ein sehr kurzer ist und es zu vielen terminlichen Überschneidungen kommt.

Der Fokus hätte klar auf der Messung des Beikraut-Ausmaßes liegen müssen. Die Fruchtqualität ist sicher nicht unerheblich, weist aber nur bedingt auf die Effektivität einzelner Hackmethoden hin. Der Bestand an Beikraut unmittelbar vor dem Hackdurchgang muss redundant ermittelt werden, was bedeutet, dass Unkrautgewächse händisch gezählt und möglicherweise für eine Fortführung des Versuchs auch in Arten unterteilt werden müssen, sodass am Ende der Saison ein konkreter Vergleich zwischen den einzelnen Hacktechniken gezogen werden kann. Hierzu wird für die Versuchsreihe 2025 angedacht, mit einem nebenberuflichen Lehrenden der FH Steyr eine Zusammenarbeit hinsichtlich Verwendung von flugdrohnengestützter Unkrauterkennung aufzubauen. Hier könnte eine Symbiose der Forschung beiden Seiten bei der Verbesserung ihrer Ergebnisse helfen.

4 VERSUCHSREIHE 2025

Im Forschungszeitraum 2025 wurden mehrere Feldversuche mit dem Farming GT durchgeführt. Die Versuche fanden in folgenden Kulturen statt: Sojabohne, Sellerie, Lauch und Kraut. Vorrangiges Ziel war es, die Ergebnisse des Hackroboters mit jenen konventioneller Hack-Anbaugeräte zu vergleichen und in den Gemüsekulturen zusätzlich die händische Beikrautregulierung als Referenz heranzuziehen.

Die Kultur Schwarzkümmel war bereits im Jahr 2024 für den Roboter neu eingelernt worden. Im Jahr 2025 wurde der Versuch fortgeführt und durch die Aufnahme weiterer Bilddaten sichergestellt, dass in Zukunft stabile Hackergebnisse im Schwarzkümmel zu erwarten sind. Jedoch ist die Kultur gegenüber mechanischer Beikrautregulierung sehr empfindlich und der Betrieb Krawinkler hat sich dafür entschieden, die Fläche mit einem Anbau-Hackgerät und händischer Beikrautregulierung zu managen. Die Witterungsverhältnisse waren für den Roboter nicht ideal und der Zeitaufwand wäre ein zu hoher gewesen, daher hat man sich dafür entschieden den Fokus am Betrieb Krawinkler bezüglich des Hackroboters auf die Sojabohne zu legen.

4.1 FELDTAGE MIT DEM MASCHINENRING OÖ

Gemeinsam mit dem Maschinenring wurden Feldtage organisiert, um die fortschrittliche Technik in der Beikrautregulierung der örtlichen Landwirtschaft sowie Schulen und Betrieben zugänglich und sichtbar zu machen (Abbildung 5 - Abbildung 12).

Abbildung 5 Flyer für die Ausschreibung der Feldtage

Abbildung 6 Feldtag am 24.06.2025 in Hargelsberg (1)(2025, Schmidthaler)

Abbildung 7 Feldtag am 24.06.2025 in Hargelsberg (2)(2025, Schmidthaler)

Abbildung 8 Erklärung des Roboters für die Teilnehmer:innen des Feldtages am 24.06.2025 in Hargelsberg (2025, Kreuzinger)

Abbildung 9 Erörterung der Vor- und Nachteile des Roboters im Vergleich mit dem Hackgerät (2025, Kreuzinger)

Abbildung 10 Einsatz Hackgerät und Hackroboter im Bio-Soja (2025, Kreuzinger)

Abbildung 11 Feldtag bei Familie Kastenhuber in Bad Wimsbach - Neydharting (2025, Kreuzinger)

Abbildung 12 Feldtag bei Familie Kastenhuber in Bad Wimsbach - Neydharting (2025, Kreuzinger)

4.2 Örtlichkeit

Die Versuche in der Sojabohne fanden in der Gemeinde Kronstorf, Bezirk Linz–Land statt. Die Gemüsekulturen befinden sich ebenfalls im Bezirk Linz–Land, in den Gemeinden Gerersdorf (Kematen an der Krems) und Allhaming und im Bezirk Wels-Land, in der Gemeinde Sipbachzell.

4.3 Klimatische Gegebenheiten

Grundsätzlich sind die klimatischen Bedingungen der Ortschaften durch ihre geografische Nähe sehr ähnlich. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt zwischen 9.5-10°C, der Jahresniederschlag beträgt ca. 950 mm und die Sonnenstunden pro Jahr in etwa 1.600h.[1]

4.4 Versuchsflächen

Abbildung 13 Versuchsfläche Sellerie – Gerersdorf, Kematen an der Krems – OÖ (vgl. DORIS, 2025)

[1] Land Oberösterreich - Klima in Oberösterreich

Die Versuchsfläche für die Kultur Sellerie umfasste rund 2,5 ha (Abbildung 13). Auf dieser Fläche war ausschließlich der Farming GT im Einsatz. Insgesamt betrug die Anbaufläche für den Sellerie auf diesem Schlag 6 ha. Der Vergleich erfolgte zwischen der mechanischen Beikrautregulierung des Farming GT und der konventionellen chemischen Kulturführung. Laut der digitalen Bodenkarte (eBod®) befindet sich die Versuchsfläche auf einer pseudovergleyten Lockersediment-Braunerde aus Decklehm. Die Versuchsflächen in der Kultur Sojabohne sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

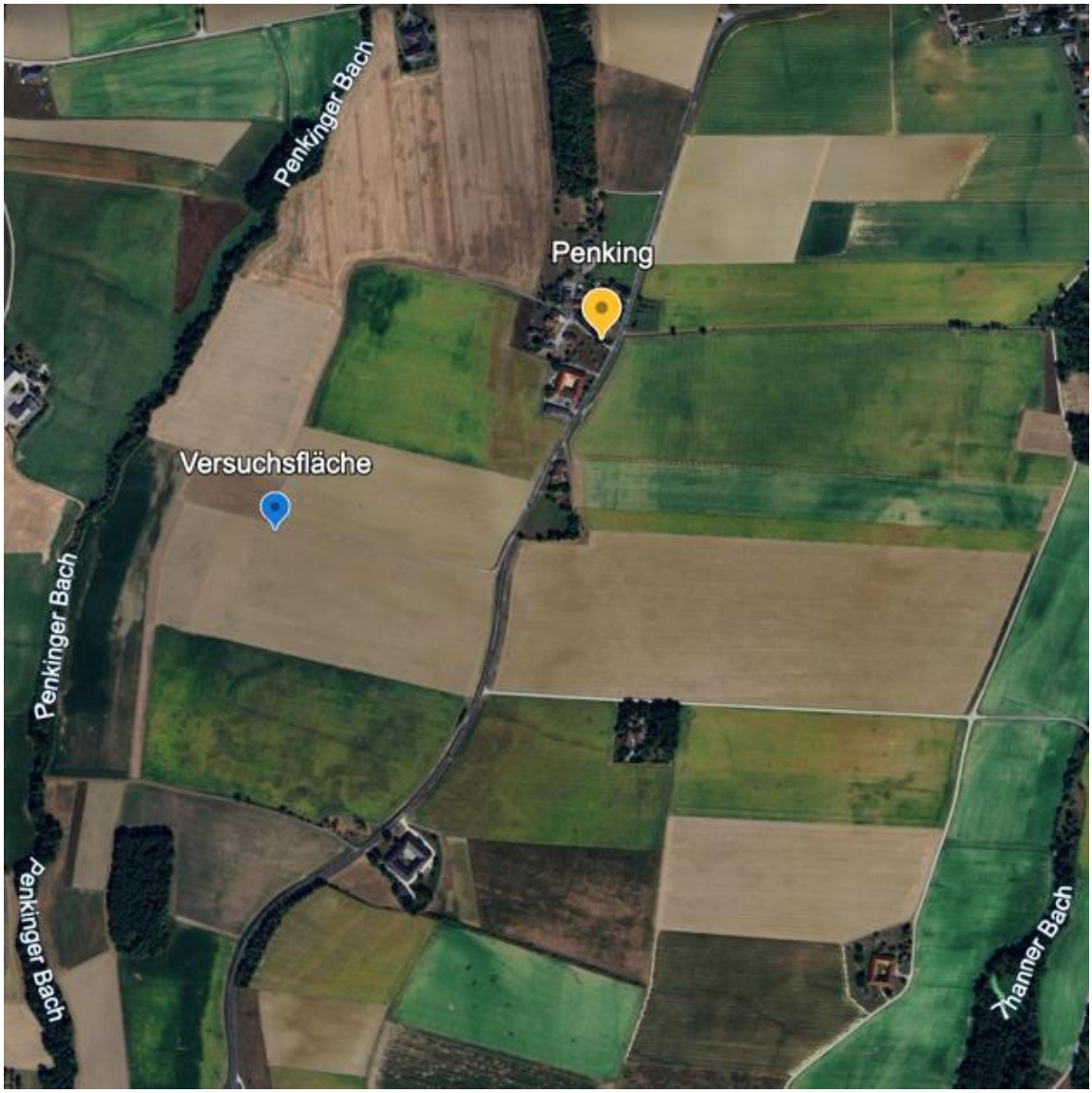

Abbildung 14 Lage der Soja – Versuchsfläche in Penking, Hargelsberg - OÖ (vgl. Google, 2025)

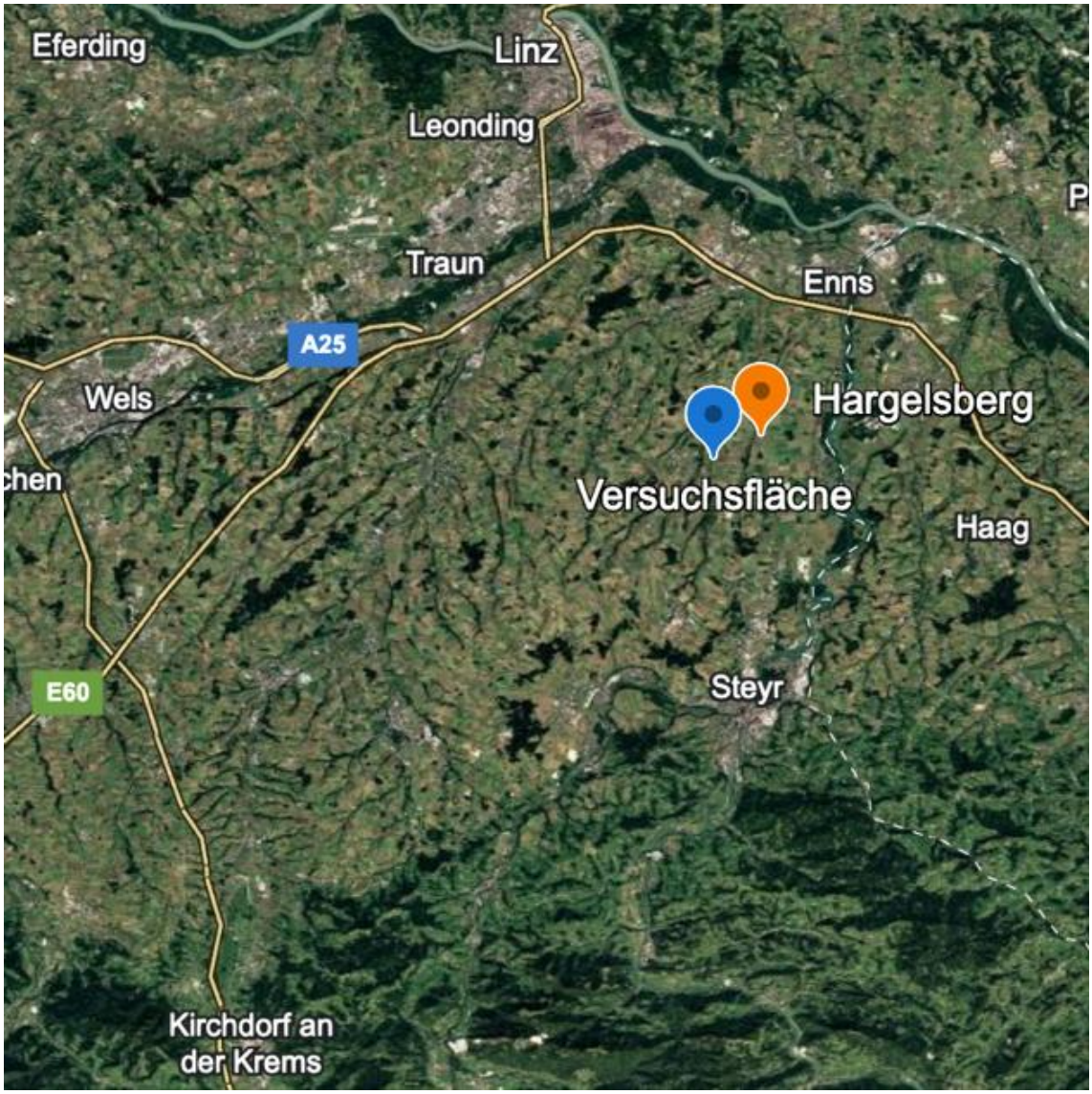

Abbildung 15 Lage der Soja – Versuchsfläche im oberösterreichischen Zentralraum (vgl. Google, 2025)

4.5 VERSUCHSKRITERIEN UND -PARAMETER

Durch einen Feldversuch soll die Praktikabilität von dem autonomen Feldroboter Farming GT im Vergleich zu herkömmlicher Hacktechnik in der Sojabohne und in diversen Gemüsekulturen aufgezeigt werden. Ermittelt werden definierte Parameter, welche eine wesentliche Auswirkung auf den Arbeitsaufwand, die Ertragsfähigkeit sowie den wirtschaftlichen Erfolg haben. Dadurch soll die Einsatztauglichkeit der verschiedenen Systeme und die Vor- und Nachteile evaluiert werden.

4.5.1 ERHEBUNGSPARAMETER

- **Zeitaufwand und Flächenleistung:** Um eine Kostenrechnung und den Deckungsbeitrag der jeweiligen Varianten berechnen und vergleichen zu können, werden die Zeiten (Einsatz- sowie Vor- und Nachbereitungszeiten an der Technik, AKh für das händische Jäten) und Flächenleistungen erhoben.

- **Unkrautdruck:** Das Potential an Beikraut wird vor dem Hackdurchgang erhoben um anschließend mit dem Ergebnis den Bearbeitungserfolg zu ermitteln. Zusätzlich zu dieser Erhebung wird ebenfalls die Zeit [AKh], welche aufgrund der händischen Nacharbeit erfolgt als Beurteilungskriterium für das Arbeitsergebnis herangezogen.

- **Verluste in der Kultur:** Ermittlung der Verluste durch die jeweilige Bearbeitungsmethodik in der Kultur durch Auszählung von Stichproben vor und nach der Bearbeitung.

- **Entwicklung der Kultur:** Entwicklung des Bestandes durch den Einfluss der Bearbeitungsschritte auf die Mineralisation und den Einfluss auf die Bodenverdichtung durch unterschiedliche Befahrungsstrategien und Einsatzgewichte.

4.6 ERGEBNISSE

Ziel des Projekts ist es, eine nachhaltige und effiziente Alternative zur chemischen Unkrautbekämpfung zu entwickeln. Besonders im Gemüsebau – etwa bei Sellerie und Kraut – werden aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der Reduzierung händischer Hackarbeit angestrebt, die derzeit noch sehr arbeitsintensiv ist. Gleichzeitig soll durch den Einsatz des Roboters eine gute Entwicklung der Kulturpflanzen gewährleistet bleiben. Auch in der Sojabohne wird eine Unkrautkontrolle ohne Herbizideinsatz angestrebt. Das Projekt leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung ökologischer und ressourcenschonender Anbauverfahren.

4.6.1 Versuchstag 1, 14. Mai 2025, Fam. Schiefermair, Kematen an der Krems, Lauch

Am 14. Mai wurde auf einer Pachtfläche der Familie Schiefermair in Allhaming ein Versuch mit einem Hackroboter im Lauch durchgeführt. Die Durchführung erfolgte durch M. Kreuzinger und T. Weigerstorfer. Der Versuchsaufbau entsprach nicht der Methodik aus 2.4, da es der erste Versuch im Feld war, nachdem die Mannschaft zur Bedienung des Roboters und somit zur Durchführung des Versuchs gewechselt hat. Das neue Team musste sich erst mit dem System vertraut machen. Im Zuge dieser ersten Tests wurden Herausforderungen und Schwachstellen des Systems deutlich.

Zunächst stellte sich heraus, dass die Internetverbindung vor Ort unzuverlässig war, was zu wiederholten Ausfällen führte. Einen zentralen Kritikpunkt stellt der Umbau, sprich die Anpassung der Hackelemente an den Reihenabstand der Kultur und die Umstellung der Spurweite an der Maschine, dar. Die Umstellung der Spurweite sowie die Justierung der Hackelemente sind insgesamt zu arbeits- und zeitintensiv. Aufgrund des Gewichtes der einzelnen Elemente kann der Umbau nur durch mindestens zwei Personen durchgeführt werden. An diesem Versuchstag dauerte der Umbau inklusive Kalibrierung der Maschine ca. zwei Stunden. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass das Personal diesen Vorgang zum ersten Mal durchführte und regelmäßig mit der Firma Farming Revolution telefoniert wurde.

Nach erfolgtem Umbau wurde der Roboter zum Versuchsfeld gebracht und der nächste Schritt umfasste das Anlegen des Feldes. Dazu müssen die Feldgrenzen durch Abfahren mit dem Roboter eingelernt werden, ähnlich wie bei einem RTK-Lenksystem eines Traktors. Dabei müssen die einzelnen Feldbereiche (Vorgewende, Hauptbereich) sehr genau abgefahren werden, damit es bei einem autonomen Betrieb des Roboters zu keinem ungewollten Befahren von benachbarten Flächen kommt. Bei diesem Versuchsfeld ist beispielsweise der Sipbach angrenzend und stellt somit eine potenzielle Gefahr für ein Wendemanöver dar. Durch eine Fahrgeschwindigkeit von 30cm/s – 50cm/s (1 – 1,8 km/h) dauert dieser Vorgang je nach Feldgröße relativ lange, es findet jedoch schon eine Bearbeitung mit den Hackwerkzeugen statt und es können diverse Einstellungen (Bearbeitungstiefe, Sicherheitsabstand etc.) vorgenommen werden. Das Versuchsfeld hat eine Größe von rund 0,34 ha (siehe Abbildung 16) und durch die bereits erwähnte

schlechte Internetverbindung dauerte das Einlernen ca. eine Stunde, wobei wiederum des Öfteren mit dem verlässlichen Support von Farming Revolution telefoniert wurde.

Abbildung 16 Versuchsfeld Lauch

Einen weiteren wichtigen Aspekt betrifft die Empfindlichkeit der jeweiligen Kultur gegenüber mechanischer Belastung. Hier stellt sich die Frage, ob beispielsweise Zuckerrüben beim Überfahren robuster reagieren als Lauch. In Abbildung 17 ist zu sehen, dass es aufgrund vermuteter Messfehler der Kameras zu einem Stillstand des Gerätes kam. Die Werkzeuge wurden daraufhin automatisch gehoben und das Fahrzeug bewegte sich vor und zurück, um sich neu zu orientieren. Dabei fuhr der Roboter schief in die Spur zurück, was wiederum zu Schäden an den Pflanzen führte.

Abbildung 17 Robotereinsatz im Lauch (2025, Kreuzinger)

Abbildung 18 Robotereinsatz im Lauch (2025, Kreuzinger)

Abbildung 19: Schäden an Kulturpflanzen durch Spurverlust und fehlerhaften Neu-Einreihungsversuch des Roboters

Der Wendebereich muss regelmäßig gemulcht werden, damit das Sicherheitssystem an der Vorder- und Hinterseite des Roboters nicht durch zu hohe Pflanzen auslöst. Der Wendebereich an sich ist aber in den meisten Fällen das Vorgewende des Feldes und somit auch ein kultivierter Bereich. In diesem Fall war der Wendebereich eine gesäte Begrünung und daher soll auf diesen Fall aufmerksam gemacht werden. Die Spurbreite der Hackwerkzeuge war im Versuch auf 65 cm eingestellt. Die Verstell-Einrichtung hierfür ist jedoch in ihrer Funktionalität fraglich, da beim Öffnen und Schließen massive Drehmomente erforderlich sind. Der Lauch wurde in diesem Feld händisch gepflanzt und es wurde kein Lenksystem am Traktor verwendet. Dadurch sind die Reihen unregelmäßig, was eine präzise Spurführung erschwert und zu Pflanzenschäden durch die Hackwerkzeuge führen kann. Somit gelangte das Projektteam zu der Erkenntnis, dass unter diesen Voraussetzungen eine präzise Arbeit des Roboters massiv erschwert wird. Einige der bereits geschilderten Probleme sind darauf zurückzuführen, dass die Vorbereitung des Feldes, wie die Grundbodenbearbeitung, äußerst exakt durchgeführt werden muss und ein ebenes Feld vorhanden sein müsste. Im Gemüseanbau ist zudem ein sehr feines Saatbeet notwendig. Wenn darüber hinaus eventuelle Regenfälle erosive Prozesse auslösen können diese entstehenden Unebenheiten im Acker zu Bearbeitungsschwierigkeiten durch den Roboter führen. Witterungsbedingte Einflüsse

wird man nie zur Gänze in den Griff bekommen, um ein optimales Arbeiten des Farming GT Roboters zu ermöglichen, sollten die diversen Reihenabstände der Kulturen exakt eingehalten werden und im besten Fall ein Lenksystem beim Pflanzen bzw. Säen verwendet werden.

In der Praxis kommt es häufig vor, dass ein Beikraut und die Kulturpflanze sehr knapp nebeneinanderstehen (siehe Abbildung 20). Der Roboter sollte grundsätzlich 100% des Beikrautes entfernen, jedoch müssen dafür die Einstellungen ideal gewählt sein und das Feld einen idealen ebenen Zustand aufweisen. In der Praxis ist dieser Fall sehr oft nicht gegeben und daher kommt es dazu, dass das Hackwerkzeug wirkungslos bleibt, weil die Schadpflanze gewissermaßen im Schutzbereich der Nutzpflanze steht.

Abbildung 20: Schadpflanze im Schutzbereich der Nutzpflanze

Bei diesem Versuch wurde ein Tablet für die Bedienung des Roboters mittels App verwendet. Die Idee dahinter war, dass es auf einem größeren Bildschirm leichter ist das Feld anzulegen und diverse Einstellungen vorzunehmen und nebenbei mit dem Support telefoniert werden kann. Es war jedoch eher problematisch, da es insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung zu Fehlbedienungen kommen kann.

Hinsichtlich der Energieversorgung ist unklar, ob der Akku lediglich als Puffer dient. Das Gerät läuft überwiegend über einen Benzingenerator. Der Einsatz eines elektromechanischen Antriebsstrangs ist nachvollziehbar, insbesondere im Hinblick auf die Genauigkeit der Stellmotoren gegenüber herkömmlichen Antrieben, jedoch bleibt die Energiefrage offen.

Das Gerät verfügt über einen Regensensor und stellt sich bei einsetzendem Regen ab. Dadurch werden Bodenverdichtungen und Schäden vermieden. Grundsätzlich ist nach einem Regen der Einsatz mit dem Roboter, aufgrund des geringeren Gewichtes, schneller möglich als mit einem Traktor inklusive Anbauhackgerät.

Ein kritischer Sicherheitsaspekt wurde ebenfalls festgestellt: Nach dem Abwischen der Lidar-Sensoren (Abstandssensoren) setzte sich das Fahrzeug ohne Vorwarnung in Bewegung, was eine potenzielle Überrollgefahr darstellt. Eine zeitverzögerte Wiederaufnahme der Fahrt in Verbindung mit einem akustischen Warnsignal ist daher unerlässlich.

Ein weiteres Problem in Hanglagen besteht darin, dass die Werkzeuge bergseits weniger tief arbeiten als talseits, was wiederum zu ungleichmäßigen Ergebnissen führt. Es gibt zwar grundsätzlich Einstellmöglichkeiten, wo jedes Hackelement für sich in der Tiefe reguliert werden kann, die Summe der Einstellungsparameter wird jedoch sehr groß und praktisch nicht mehr durchführbar. Zusätzlich soll das System autonom fahren. Dazu müssen sich die Aggregate in Hanglagen auch auf die Gegebenheiten anpassen. Dies wirft auch die Frage auf, ob eine Skalierung des Systems, das ursprünglich für ebene Großflächen – wie in Deutschland – konzipiert wurde, überhaupt sinnvoll auf kleinere, oft schräge Flächen in Österreich übertragbar ist. Falls ja, sollte definiert werden, ab welcher Feldgröße dies wirtschaftlich und technisch sinnvoll wäre. Des Weiteren stellt sich die grundsätzliche Frage, ob die zu bearbeitenden Felder jede Saison neu angelegt

werden müssen oder ob es möglich ist, die Kultur digital zu ändern und dem Roboter zur Verfügung zu stellen.

Abschließend gilt für diesen Versuchstag zu erwähnen, dass der Roboter bei gleichen Reihenabständen ein durchaus ansprechendes Hackergebnis geliefert hat. Die Einstellungen wurden durch die Bediener sehr konservativ gewählt (Sicherheitsabstand: 6 cm, Bearbeitungstiefe: 4 cm), da wie bereits erwähnt ein Kennenlernen und vertraut machen mit der Maschine im Vordergrund stand. Das ansprechende Hackergebnis lässt sich aber dadurch bestätigen, dass selbst bei den erwähnten Schwierigkeiten und den konservativen Einstellungen rund 80 % des Beikrautes erfolgreich entfernt werden konnte. Das System hat Potential, die vielen Herausforderungen muss man in den nächsten Versuchstagen bewerkstelligen. Dazu ist unbedingt eine Einschulung am Feld durch Mitarbeiter der Firma Farming Revolution notwendig.

In weiterer Folge wurde am 20.05. nochmals ein Hackversuch im Lauch auf einem anderen Schlag durchgeführt und konnte durch bereits gesammelte Erfahrungen erfolgreicher durchgeführt werden.

4.6.2 Hackversuch Sojabohne in Hargelsberg

Ein Student des Bachelor-Studienganges Agrartechnologie und -management schrieb seine Abschlussarbeit über mechanische Beikrautregulierung in der Sojabohne. Gemeinsam mit einem wissenschaftlichen Mitarbeiter der FH OÖ – Campus Steyr, wurde ein Versuch durchgeführt, der als Ausgangsbasis für die Abschlussarbeit diente.

Bei diesem Versuch handelte es sich um einen Kleinparzellen – Streifenversuch in randomisierter Blockanlage mit je 2 Wiederholungen. Im Versuch wurden 3 Varianten betrachtet:

- Variante A: autonomer Hackroboter
- Variante B: traktorgebundenes Hackgerät mit kameragesteuertem Verschieberahmen
- Kontrollvariante C: hier wurde nicht gehackt

Die Parzellen wurden mit einer Breite von jeweils 12 Reihen und einer Länge von 50 Metern angelegt. Als Kontrollvariante diente eine 15 Meter lange Parzelle, die nicht gehackt wurde. Der Anlageplan des Versuches ist in Abbildung 12 dargestellt.

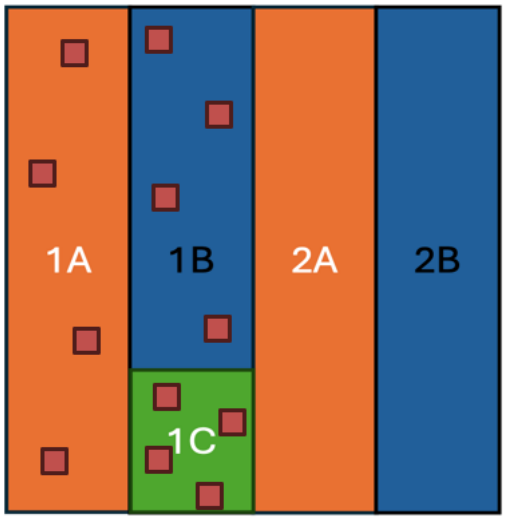

Abbildung 21 Anlageplan – Hackversuch Hargelsberg; Varianten: A, B mit jeweils zweifacher Wiederholung und Kontrollvariante C; Stichprobenflächen als rote Quadrate

Für die manuelle Bonitur wurden pro Parzelle 4 Stichproben-Flächen (1 m^2) pseudorandomisiert festgelegt. Die Bonitur-Parameter wurden über die gesamte Versuchsdauer an denselben Stichproben-Flächen erhoben. Dadurch ergaben sich pro Parzelle 4 Wiederholungen.
Die ungefähren Positionen der Stichproben-Flächen sind in Abbildung 21 mit roten Quadraten gekennzeichnet.

Für den Versuch wurde ein etwa 9,8 ha großer Sojabohnen-Schlag ausgewählt. Die Anlage und die Ausmessung der Parzellen erfolgten am 17.06.2025. Die Parzellen wurden dabei mit gelben Fiberglasstangen abgesteckt. Unmittelbar vor der ersten Bonitur am 24.06.2025 wurden die 4 Stichproben-Stellen pro Parzelle zufällig, jedoch beeinflusst (pseudorandomisiert) mithilfe eines 1 m^2 großen Boniturrahmens ausgewählt. Die Stichproben-Stellen wurden dabei so gewählt, dass sie den Beikraut-Bewuchs der jeweiligen Parzelle repräsentieren. Wie in Abbildung 22**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ersichtlich, umfasste jede Stichprobenfläche 3 Pflanzenreihen und 2 Zwischenreihenräume. Parzellengrenzpunkte und Stichproben-Flächen wurden mit einem pflanzen-, sowie bodenverträglichem, gut sichtbarem, witterungsbeständigem Markierungsspray gekennzeichnet. Durch die Festlegung und Kennzeichnung der Stichproben-Flächen können wiederholte Bonituren jeweils an denselben Stellen

durchgeführt werden. Dies ermöglichte einen Vergleich der festgelegten Parameter an unterschiedlichen Bonitur-Zeitpunkten.

Abbildung 22 Stichprobenauswahl mit Boniturrahmen (Panhuber, 2025)

Tabelle 4 Bearbeitungsschritte zum Unkrautmanagement auf der Versuchsfläche

Zeitraum	**Bearbeitungsschritt**	**Bemerkungen**
01.-05.04.2025	Einarbeitung Wickroggen-Zwischenfrucht	Einarbeitung und gleichzeitige Lockerung des Bodens mit einer Bodenfräse
10.-15.04.2025	Anlegen eines falschen Saatbeetes: - Grubber-Überfahrt: Lockerung des Bodens - Kreiseleggen-Überfahrt: Saatbettbereitung	Vorbereitung des Bodens für eine Saat, ohne tatsächliches Ansäen von Pflanzen; Keimen von Unkräutern bereits vor der Sojabohnen-Aussaat

Zeitraum	Bearbeitungsschritt	Bemerkungen
25.04.2025	Einarbeitung aufgelaufener Unkräuter mit Zinkenstriegel	Regulierung aufgelaufene und gekeimte Unkräuter mit Zinkenstriegel
02.05.2025	Einarbeitung des 2. Unkrautaufwuchses und Saatbettvorbereitung	Regulierung erneut aufgelaufener Unkräuter und gleichzeitige Saatbettvorbereitung mit einem Leichtgrubber
08.05.2025	Aussaat der Sojabohne	Einzelkornsaat, Sorte: Adelfia
13.05.2025	Blindstriegeln	In Anbaurichtung / zur Reihe
20.-25.05.2025	1. Hackdurchgang - Pöttinger Flexcare (Traktorgebundenes Hackgerät mit kameragesteuertem Verschieberahmen + Fingerhackelemente)	Mit Kulturschutzscheiben (Schützen Kultur vor Verschüttung), geringer Fingerhackeneinsatz; geringere Arbeitstiefe der Gänsefußschare
05.-10.06.2025	Querstriegeln	90°zur Saatreihe; Entfernung der Unkräuter in der Reihe; Erde der von Hackgerät zugeschütteten Sojabohnen abstriegeln.
13.06.2025	2. Hackdurchgang – Pöttinger Flexcare	Ohne Kulturschutzscheiben; stärkerer Fingerhackeneinsatz – Regulierung von Unkraut in der Reihe; höhere Arbeitstiefe der Gänsefußschare; Leichtes Anhäufeln der Sojabohnen-Reihen, um Keimen von Unkräutern in der Reihe zu hemmen

Zeitraum	Bearbeitungsschritt	Bemerkungen
25.06.2025	Hackversuch/ 3. und letzter Hackdurchgang	Kurz vor/zu Beginn der Blüte und vor Reihenschluss; Ohne Kulturschutzscheiben – Regulierung Unkraut in Kulturpflanzenreihe; starker Fingerhackeneinsatz; Arbeitstiefe ähnlich zu 2. Hackdurchgang; Anhäufeln der Sojabohnen-Reihen
Nach Hackversuch (kein Datum)	Händisches entfernen von Ampferpflanzen	Nach dem Hackversuch händisches Ampferstechen von Fremdarbeitskräften

Da auf dieser Fläche bis zur Versuchsanlage bereits mehrere Bearbeitungsschritte zur Beikrautregulierung erfolgten, ist der Beikrautdruck zum Zeitpunkt des Hackversuches überschaubar. Dieser Zustand ermöglicht es aber, genau zu beobachten, wie sich das Arbeitsergebnis beider Varianten kurz nach den Hackdurchgängen entwickeln.

4.6.3 GERÄTEEINSTELLUNGEN

Tabelle 5 Einstellungen der Hackgeräte

Einstellung	Hackroboter (Farming GT)	Hackgerät (Pöttinger Flexcare)
Arbeitsbreite	1,35 m; 4 Reihen (3 Zwischenreihenräume); 4 Überfahrten/Parzelle	5,4 m; 12 Reihen; 1 Überfahrt/Parzelle
Hacktiefe	3 cm	3-4 cm
Geschwindigkeit	2 km/h	5 km/h
Bearbeitungswerkzeuge	Winkelmesser 2 Gänsefußmesser/Reihe	3 Gänsefußschare / Reihe 2 Fingerhackelemente / Reihe

	2 Lelievre-Messer /Reihe	Keine Kulturschutzschalen
Sicherheitsabstände zur Kulturpflanze & Einstellungen	davor & dahinter: 5cm Seitlich: 3cm → Hackband: 6 cm → Hackbreite: 39 cm Überlappung: -3cm	Seitlich: 4cm → Hackband: 8cm → Hackbreite: 37 cm Fingerhackelemente: 1-2 cm aggressive Einstellung, Winkel relativ flach
Steuerung	Smartphone Applikation und autonome Fortbewegung durch automatische Reihenerkennung	Manuelle Steuerung des Traktors
Reihenführung	Kamera und Sensor gesteuerte Hackelemente	Kameragesteuerter Verschieberahmen

Der Hackroboter weist im Vergleich zum Hackgerät mit 1,35 m (3 Reihen) eine geringere Arbeitsbreite auf. Daher waren im Gegensatz zum Hackgerät 4 Überfahrten pro Parzelle nötig. Um durch Wendemanöver keine Kulturpflanzen zu beschädigen, wurde jeweils eine Bahn gehackt und der Hackroboter anschließend in derselben Spur rückwärts zurückgeführt. Mit dem Hackgerät wurde jeweils eine Parzellenbreite von 12 Reihen gehackt. Die Hacktiefe lag beim Hackgerät bei 3-4 cm, beim Hackroboter bei 3 cm. Die Arbeitsgeschwindigkeit des Hackroboter war mit rund 2 km/h geringer als die des Hackgerätes (5 km/h).

Der Hackroboter arbeitete über automatische Pflanzen- und Reihenerkennung überwiegend autonom auf der Versuchsfläche (siehe Tabelle 5). Für die Zurückführung in den Parzellen, Wendemanöver und den Transport zur Versuchsfläche wurde dieser mit der zugehörigen Smartphone Applikation von Farming Revolution manuell gesteuert. Während der gesamten Versuchsdauer wurde der Roboter von einer zuständigen Person überwacht. Die Beikrautregulierung erfolgte beim Hackroboter selektiv, indem die

Kulturpflanzen über RGB-Kameras und Sensoren erkannt und die umgebenden, regulierbaren Unkräuter von den Hackelementen entfernt wurden.

Der Hackroboter war für die Unkrautregulierung des Zwischenreihenbereichs mit jeweils zwei Gänsefußscharen und Lelievre-Messer ausgerüstet, für die Beikrautregulierung innerhalb der Kulturpflanzenreihe dienten überlappende In-Row-Messer.

Zum Schutz der Sojapflanzen wurden für die Bearbeitungswerkzeuge des Hackroboters Sicherheitsabstände zur Kulturpflanze definiert. Die Abstände beziehen sich auf den vom Pflanzendetektionssystem des Roboters erkannten Mittelpunkt jeder Kulturpflanze. Vor und hinter dem Kulturpflanzenmittelpunkt wurde jeweils ein Abstand von 5 cm festgelegt, neben der Kulturpflanze waren es 3cm. Zudem lag die Überlappung der Hackwerkzeuge für die Bearbeitung in der Pflanzenreihe bei 3cm (-3cm). Diese Einstellung wird erst wirksam, wenn der Abstand der Sojapflanzen in der Reihe 5cm überschreitet. Da der Setzabstand der Sojapflanzen in der Reihe nur 3,4 cm betrug, war mit dem Hackroboter (Versuchsvariante A) keine Beikrautregulierung innerhalb der Pflanzenreihe möglich.

4.6.4 Bonitur und Ergebnisse

Die Auswertung der manuellen Boniturparameter erfolgte vorrangig über deskriptive Statistik. Dabei wurden die Mittelwerte der Varianten unter Beachtung der Standardabweichungen miteinander verglichen und grafisch dargestellt.
Leitunkrautarten und Beikräuterentwicklung wurden anhand der jeweiligen absoluten Häufigkeiten auf den Stichprobenflächen an den Boniturzeitpunkten für die Varianten analysiert.

Um die Effektivität der Bearbeitungsmethoden zu bewerten, wurden zusätzlich deren Wirkungsgrade jeweils direkt (WG1) und fünf Tage (WG2) nach dem Hackdurchgang berechnet. Die Berechnung erfolgte anhand der folgenden Formeln:

$$\text{Wirkungsgrad 1 (\%)} = \text{WG1} = \frac{100}{\text{w1}} \times (w1 - w2)$$

$$\text{Wirkungsgrad 2 (\%)} = \text{WG2} = \frac{100}{\text{w1}} \times (w1 - w3)$$

Die Variablen wurden wie folgt definiert:

- w1 bezeichnet mittlere Anzahl der Unkräuter einen Tag vor dem Maschineneinsatz
- w2 beschreibt die mittlere Anzahl der Beikräuter direkt nach dem Maschineneinsatz
- w3 gibt die mittlere Anzahl der Beikräuter 4 bis 5 Tage nach dem Maschineneinsatz an

Um den Einfluss der Ausgangsverunkrautung zu reduzieren, wurde zudem der Wirkungsgrad der Bearbeitungsmethoden auf Basis der Unkrautanzahl der Kontrollvariante ermittelt (WG3).

Die Berechnung von Wirkungsgrad 3 für den 3. Boniturzeitpunkt (T3) erfolgte mit folgender Formel:

$$\text{Wirkungsgrad 3 (\%)} = \text{WG3} = \frac{\text{u1}-\text{u2}}{\text{u1}} \times 100$$

Die Variablen wurden folgend definiert:

- u1: mittlere Anzahl der Unkräuter der Kontrollvariante
- u2: mittlere Anzahl der Unkräuter - Variante A oder B

Beide Wirkungsgrade wurden im Ergebnisteil grafisch dargestellt und interpretiert.

4.6.5 ERGEBNIS

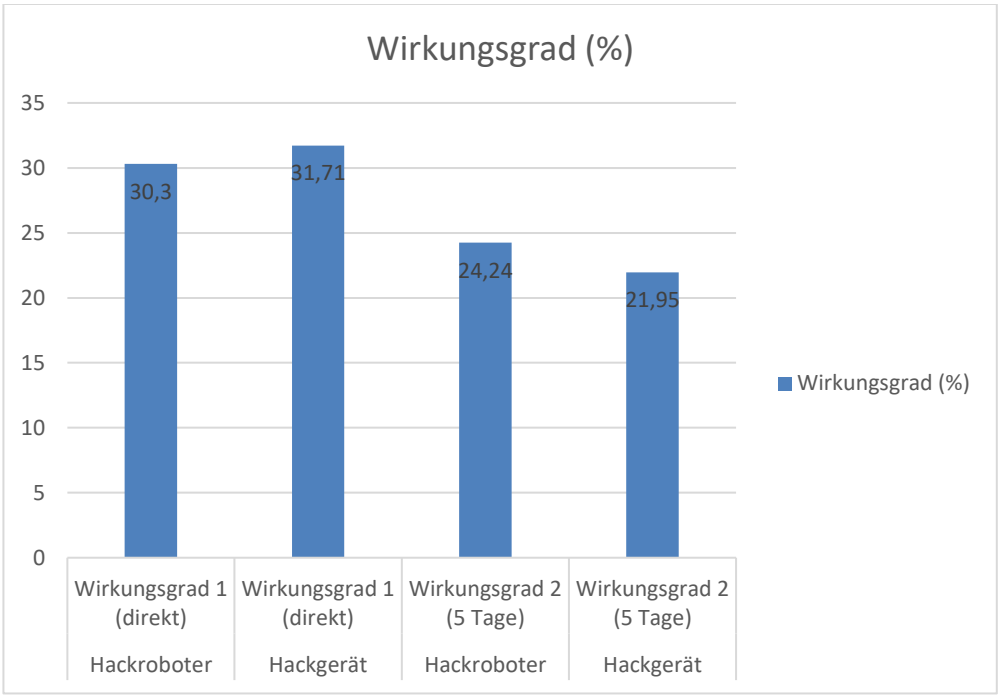

Abbildung 23 Wirkungsgrad Hackroboter und Hackgerät

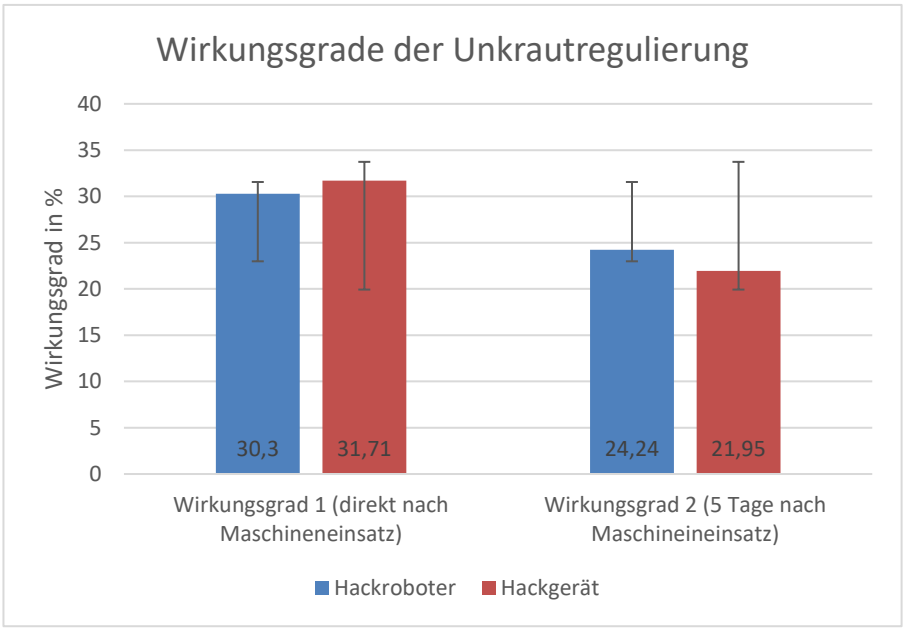

Abbildung 24 Wirkungsgrad Hackroboter und Hackgerät (2.0)

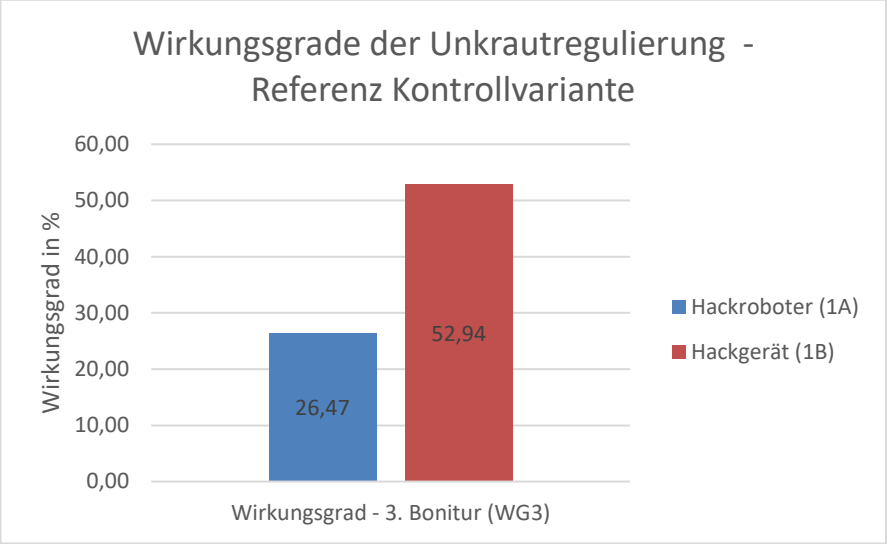

Abbildung 25 Wirkungsgrad 3 Hackroboter und Hackgerät

4.6.6 WIRKUNGSGRADE

Zur Bewertung der Effektivität der Beikrautregulierungsmethoden wurden deren Wirkungsgrade basierend auf der Ausgangsverunkrautung (WG1, WG2) und der Unkrautanzahl der Kontrollvariante am dritten Boniturzeitpunkt (WG3) berechnet. Insgesamt verzeichneten beide Varianten vergleichsweise geringe Wirkungsgrade. Zurückzuführen ist dies auf den durch die vorherigen Regulierungsschritte bedingten, überschaubaren Unkrautdruck beim Hackdurchgang.

Auf Grundlage der Kontrollvariante zeigte Variante B mit 52,94 % einen rund doppelt so hohen Wirkungsgrad (WG3) wie Variante A mit 26,47 %. Dies ergibt sich aus der geringeren Restverunkrautung von Variante B, welche auf die ergänzende Beikräutregulierung innerhalb der Kulturpflanzenreihe durch die Fingerhackelemente zurückzuführen ist.

Im Gegensatz dazu fielen die auf der Ausgangsverunkrautung basierenden Wirkungsgrade jeweils unmittelbar (WG1) und 6 Tage nach dem Hackdurchgang (WG2) bei beiden Varianten annähernd gleich aus. Variante B erzielte mit 31,71 % einen etwas höheren unmittelbaren Wirkungsgrad als Variante A (30,3 %). Dagegen wies die Hackroboter-Variante mit 24,24 % 6 Tage nach dem Hackdurchgang sogar einen minimal höheren Wirkungsgrad auf als die Hackgerät-Variante (21,95 %). Die im Vergleich zu WG3 nahezu deckungsgleichen Wirkungsgrade 1 und 2 lassen sich mit der höheren

Ausgangsverunkrautung der vom Hackroboter bearbeiteten Stichprobenflächen begründen. Folglich konnte bei Variante A eine höhere Anzahl an Beikräutern entfernt werden als bei Variante B. Dadurch spiegeln Wirkungsgrad 1 und 2 zwar die Reduktion der Unkräuter/m^2, den tatsächlichen Regulierungserfolg beider Varianten jedoch nur begrenzt wider. Daher wurden die auf Grundlage der Kontrollvariante berechneten Wirkungsgrade als aussagekräftiger für die Bewertung des Beikrautregulierungserfolges eingestuft.

Tabelle 6 Mittelwerte und -differenzen der Verunkrautung der Varianten pro Boniturzeitpunkt (Panhuber, 2025)

	Variante Hackroboter (A)			**Variante Hackgerät (B)**			**Kontroll-variante (C)**	
Boniturzeitpunkte	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T3
Unkräuter/m^2 (MW)	16,50	11,50	12,50	10,25	7,00	8,00	11,75	17,00
Unkräuter/m^2 (SD)	2,38	3,11	3,42	6,13	3,56	4,97	3,10	4,24
Mittelwert-differenzen Boniturzeitpunkte	T2-T1	T3-T2	T3-T1	T2-T1	T3-T2	T3-T1	T3-T1	
Zu-/Abnahme: Unkräuter/m^2	-5,00	1,00	-4,00	-3,25	1,00	-2,25	5,25	
Wirkungsgrad 1 (WG1) [%]	30,30			31,71				
Wirkungsgrad 2 (WG2) [%]	24,24			21,95			-44,68	
Wirkungsgrad 3 (WG3) [%]			26,47			52,94		

Wie bereits erwähnt, war der Schlag durch eine präzise Unkrautregulierung sehr rein. Die Wirkungsgrade unterscheiden sich nur im geringen Prozentbereich, wobei in der Praxis ein gewisser Vorteil durch die Fingerhackelemente des Anbau-Hackgerätes zu beobachten war. Der Hackroboter hat seine Stärke klar in der In-Row-Regulierung von Unkräutern, wenn die Kulturpflanze mindestens mit einem Abstand von 9 cm in der Reihe gesät oder gepflanzt wurden. Somit kann der Roboter bei der Sojabohne sein ganzes Potential nicht ausschöpfen.

4.6.7 KULTURPFLANZENSCHÄDEN UND -VERLUSTE

Die Erhebung der Kulturpflanzenschäden erfolgte bei der 2. und 3. Bonitur (T2 und T3), während die Kulturpflanzen an allen Boniturzeitpunkten ausgezählt wurden. Die aus den Boniturdaten berechneten Mittelwerte und deren Standardabweichung sind in Tabelle 6 ersichtlich. Darin ist dargestellt, dass während des ersten und zweiten Boniturzeitpunkts durchschnittlich weniger Kulturpflanzen gezählt wurden als bei der dritten Bonitur. Aufgrund wahrgenommener Abweichungen der ermittelten Pflanzenbestände bei der Hackgerät-Variante zwischen T1 und T2 lag bei der dritten Bonitur besonderes Augenmerk auf einer präzisen Zählung der Kulturpflanzen. In der Folge lagen die berechneten Mittelwerte des dritten Boniturzeitpunktes nahezu auf dem Niveau der Aussaatdichte von 65 Körnern/m^2. Daher werden für die Bewertung und Darstellung der Kulturpflanzenschäden die Mittelwerte der gezählten Kulturpflanzen und Kulturpflanzenschäden des 3. Boniturzeitpunktes herangezogen; als Referenz dient die Kontrollvariante. Zudem erfolgt eine Gegenüberstellung der an zweiter (T2) und dritter Bonitur (T3) durchschnittlich gezählten Schäden. Zunächst werden jedoch die beobachteten Kulturpflanzenschäden erläutert und mögliche Ursachen aufgezeigt.

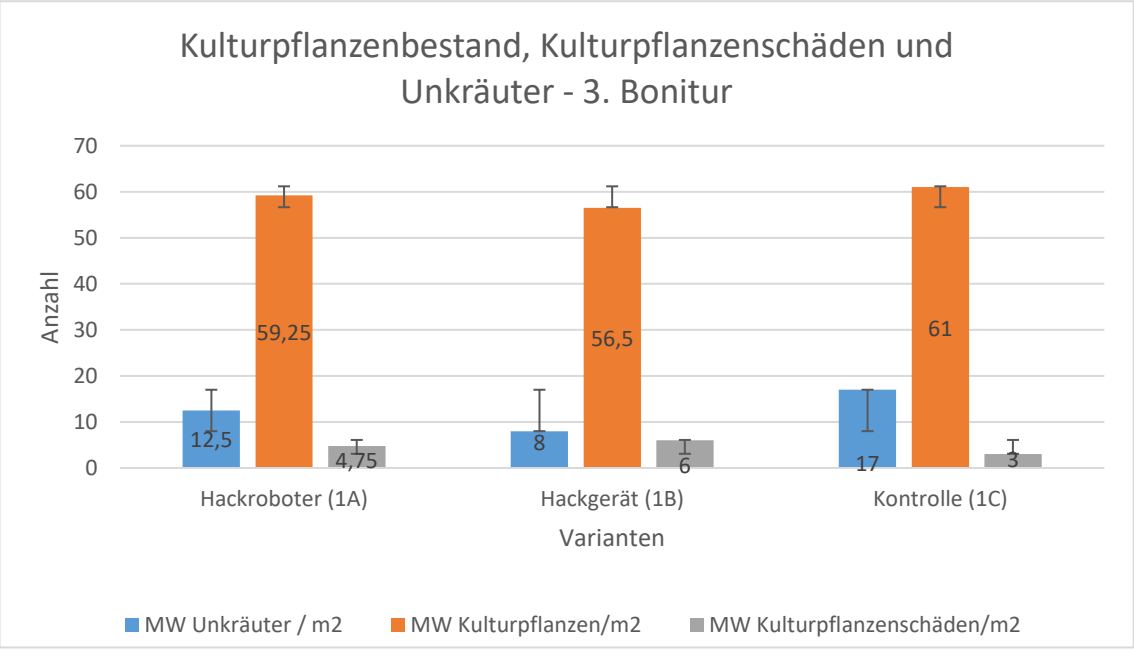

Abbildung 26 Kulturpflanzenschäden und -verluste

4.6.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei den mit dem Hackgerät bearbeiteten Flächen konnten im Vergleich zu Variante A sowohl eine höhere Anzahl an Kulturpflanzenschäden als auch mehr Kulturpflanzenverluste festgestellt werden. Dies bestätigt die Annahme, dass durch die Beikrautregulierung in der Kulturpflanzenreihe mit den Fingerhackelementen des Hackgeräts zwar mehr Kulturpflanzenschäden verursacht werden, jedoch ein höherer Regulierungserfolg erzielbar ist.

Im Gegensatz zu Variante B wurden durch die Sicherheitsabstände der Bearbeitungswerkzeugte zu den Kulturpflanzen bei Variante Hackroboter weniger Kulturpflanzenschäden und -verluste erzielt. Folgend blieb aber eine Beikrautregulierung innerhalb der Pflanzenreihe aus, was in einer höheren Restverunkrautung resultierte.

Bei Variante A traten mehr Kulturpflanzenschäden und -verluste gleichzeitig auf.

4.6.9 Methodik und Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde grundsätzlich auf allen Parzellen durchgeführt. Aufgrund der praktischen, logistischen und zeitlichen Rahmenbedingungen – insbesondere der für die Bonituren verfügbaren Arbeitszeit – erfolgte die manuelle Bonitur ausschließlich auf den Parzellen 1A, 1B und 1C. Die Parzellen 2A und 2B wurden folglich nur zur ganzheitlichen Beobachtung der Versuchsfläche herangezogen, wie z.B.:

- zur Einschätzung des Auftretens der Unkräuter in oder zwischen den Reihen,
- zur Beobachtung von Kulturpflanzenschäden und -verlusten,
- zur Betrachtung der Entwicklung von Unkraut- und Kulturpflanzen
- oder zur Beurteilung des Einflusses der Witterung.

Aufgrund der ausgebliebenen Bonituren wurden die Stichprobenflächen auch nicht in den Anlageplan des Versuches eingezeichnet. Die Kontrollvariante (1C) war als unbehandeltes Fenster in Parzelle 1B integriert, wodurch sowohl die praktische Umsetzung erleichtert als auch Ertragsverluste vermindert werden konnten. Durch die Auszählung und Beurteilung derselben 4 Stichprobenflächen an allen Boniturzeitpunkten ergaben sich für jede Variante dennoch 4 Wiederholungen, wodurch eine deskriptive statistische Auswertung möglich war. Eine Bonitur aller Parzellen sowie die Anlage von zwei eigenständigen Kontrollparzellen würde die Ergebnisse jedoch noch

aussagekräftiger darstellen. Daher werden für weitere Versuche mit ähnlichem Aufbau auch 2 flächige Wiederholungen pro Variante und ein für die Bonituren eingeplanter Zeitraum von mindestens 6 Stunden nahegelegt.

Aufgrund der späten Versuchsanlage wurde nur der letzte Hackdurchgang beobachtet, wodurch der Beikrautdruck durch bereits erfolgte Regulierungsmaßnahmen überschaubar war, insbesondere zwischen den Kulturpflanzenreihen. Es konnte dadurch zwar die Beikrautentwicklung nach dem Hackdurchgang und der Regulierungserfolg der beiden Varianten im Vergleich zur Kontrollvariante analysiert werden, aber keine Bobachtung über einen längeren Zeitraum erfolgen. Weiters ergaben sich dadurch keine hohen Wirkungsgrade der Regulierungsmaßnahmen. Es wird demnach für künftige Feldversuche die Beobachtung von Regulierungserfolg und Kulturpflanzenschädigung der Varianten über die gesamte Vegetationsdauer der Sojapflanze empfohlen. Dadurch könnten Hackgerät und Hackroboter über mehrere Hackdurchgänge gegenübergestellt werden. In der Folge ergeben sich mindestens zwei zeitliche Versuchswiederholungen, was eine statistisch validiertere Aussage über den Beikrautregulierungserfolg und die Kulturpflanzenschädigung beider Varianten zulassen würde.

Im Zuge dieses Feldversuches wurden alle Unkrautpflanzen unabhängig von ihrem Auftreten in oder zwischen der Kulturpflanzenreihe erhoben. Eine räumliche Differenzierung des Auftretens innerhalb und zwischen der Kulturpflanzenreihe erfolgte anhand von Beobachtungen auf der Versuchsfläche und fotografischer Dokumentation der Stichprobenflächen. Durch den geringen Unkrautdruck im Zwischenreihenraum und die Zählung der Beikräuter konnte eine grundlegende Aussage über das vorrangige Auftreten der Unkrautpflanzen (in oder zwischen der Reihe) getroffen werden, die allerdings noch nicht datengestützt war. Deshalb wäre es für weitere Forschungsvorhaben sinnvoll – sofern der zeitliche Aufwand dies zulässt – die Unkräuter innerhalb und zwischen der Kulturpflanzenreihe separat zu erheben. Dies würde zusätzlich ermöglichen, sowohl das Auftreten der Leitunkrautarten als auch die Unkrautpflanzenentwicklung (kurz, mittel, lang) jeweils differenziert in der Kulturpflanzenreihe und im Zwischenreihenraum datengestützt zu analysieren.

4.6.10 Drohnen – Monitoring (vgl. Huber, 2025)

Im Rahmen des Hackversuchs in Hargelsberg 2025 wurden die Versuchsparzellen zu drei Zeitpunkten mit einer DJI Mavic 3 Multispektral beflogen. Ziel war die Erfassung der Unkrautanzahl pro Parzelle, deren Position sowie die Bestimmung des relativen Bedeckungsgrads. Die Drohne lieferte sowohl Multispektral- als auch RGB-Aufnahmen, die in DJI Terra zu Orthophotos verarbeitet und anschließend in QGIS ausgewertet wurden.

Zur Analyse wurde der Excess-Green-Index (ExG) berechnet und über eine IF-Bedingung in Vegetations- und Bodenpixel getrennt. Nach der Vektorisierung konnten Flächen und damit der relative Bedeckungsgrad je Parzelle berechnet werden. Zusätzlich wurden die Beikräuter manuell erfasst und je Parzelle gezählt. Die Kombination dieser Methoden erlaubt eine präzise Einschätzung der Unkrautverteilung und der Entwicklung des Bedeckungsgrads über die Zeit.

Die Befliegungen erfolgten nach standardisierten Abläufen, wodurch eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den Messzeitpunkten gewährleistet wurde. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass Drohnenmonitoring mit multispektralen Indizes wie dem ExG und ergänzender manueller Kartierung eine effektive Grundlage für die Analyse von Hackversuchen bietet (vgl. Huber, 2025).

4.6.10.1 Technische Eigenschaften

Im folgenden Kapitel werden die technischen Daten von Drohne und Verarbeitungsgerät näher definiert (vgl. Huber, 2025).

Drohne DJI Mavic 3 Multispektral

Plattform: DJI Mavic 3 Multispectral

Sensoren: Multispektral-Array (Mehrere Bänder: Grün, Rot, RedEdge und NIR) und RGB-Zentralkamera (für hohe Auflösung und visuelle Referenz).

GNSS / Positionsdaten: Integriertes GNSS zur Georeferenzierung; Fluglog-Daten und Zeitstempel in den Bildmetadaten enthalten.

Radiometrie: Kameras liefern bei normaler Konfiguration digitale DN-Werte; für vergleichbare Indizes (z. B. NDVI) ist idealerweise eine radiometrische Kalibrierung mit Kalibrierungs-Panel (Reflektanztafel) vor/nach Flug empfehlenswert.

Typische Einsatzparameter

· Überlappung (Overlap): Vorwärtsüberlappung ~ 80 %, Seitenüberlappung ~ 70 %.

· Flughöhe: ~ 12-40m.

· Flugmodus: autonome Missionsplanung (waypoint-grid) mit gleichbleibender Fluggeschwindigkeit.

Verarbeitungsserver

CPU: Intel i7-6700

GPU: Nvidia GTX 1080

RAM: 64GB DDR4 3200Mhz

4.6.10.2 Standard-Prozedere (SOP) – Vorbereitung und Vorflugkontrolle

· **Versuchsplan & Ziele definieren:** Parzellengrenzen, Messzeitpunkte, gewünschte GSD, Indices (z. B. NDVI) und Zählmethodik festlegen.

· **Batterie & Sicherheit:** Akkustand, Propeller, Sensoren, Fernsteuerung prüfen; NOTAM/Luftraum, lokale Vorschriften bestätigen.

· **GPS & RTK (falls vorhanden):** GNSS-Konnektivität prüfen; wenn RTK/PPK verfügbar, aktivieren bzw. PPK-Workflow planen.

· **Kameraparameter:** Belichtung, Weißabgleich, Multispektralaufnahme-Modus prüfen; Zeitstempel synchronisieren.

· **Missionsplanung:** Festlegen Grid (Höhe, Speed, Overlap), Start/Endpunkte, Emergency-Routen.

· **Wettercheck:** Wind < erlaubten Grenzwert, keine Niederschläge, gleichmäßige Bewölkung bevorzugt.

· **GCPs (optional, empfohlen):** Falls möglich, Ground Control Points verteilen und in Foto dokumentieren.

· **Fluglog:** Operator, Flugnummer, Datum/Zeit, Wetter, besondere Vorkommnisse protokollieren.

4.6.10.3 Befliegungs – Vorgangsweise

· **Mission laden:** Grid mit eingestellten Überlappungen in die Steuerungs-App laden (z. B. DJI Pilot / DJI FlightHub / andere).

· **Vorstartcheck:** Propeller, GPS-Fix, Sensoren, Kamera, SD-Karte prüfen

· **Start & Aufzeichnung:** Mission autonom ausführen; Bildaufnahme und Telemetrie aktivieren; besondere Ereignisse (z. B. Windböen) im Fluglog notieren.

· **Landung & Sicherung:** Bilder von SD-Karte sichern (zweifach Kopie), Fluglogs exportieren.

· **Wiederholbarkeit:** Für alle drei Zeitpunkte gleiche Flugparameter verwenden (Höhe, Überlappung, Tageszeit), um Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

4.6.10.4 Datenvorbereitung

· **Datenorganisation:** Bilder/Reihen für jeden Flug zeitlich und thematisch in Ordnern ablegen (z. B. Flight_T1, Flight_T2, Flight_T3). Fluglog zuordnen.

· **Orthomosaik / Geo-Referenz:** Aus den Einzelbildern ein Orthomosaik erzeugen (DJI Terra). Ergebnis: GeoTIFFs der multispektralen Bänder und eines RGB-Orthomosaiks.

· **Ebenen in QGIS laden:** GeoTIFFs (bzw. einzelne Bänder), Vektoren der Parzellengrenzen (Plot-Polygone)

4.6.10.5 ANALYSEMETHODEN IN QGIS

Die Analyse der Orthomosaiks erfolgte in einzelnen Stufen und wurde für jeden der drei Überflüge wiederholt.

Im ersten Schritt wurden die manuellen Zählstellen und die Parzellen markiert und beschriftet (Abbildung 27).

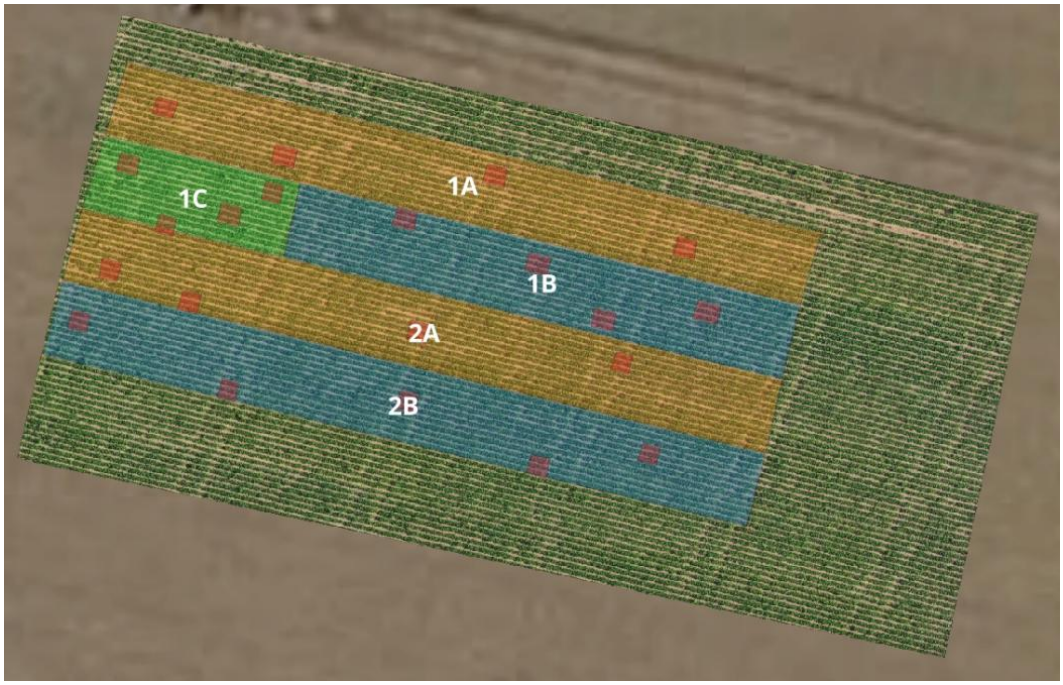

Abbildung 27: Manuelle Zählstellen und Parzellen

Anschließend wurde für die gesamte Fläche der „Excess-Green-Index“ (kurz ExG-Index) mit der Formel **2*Green-Red-Blue** berechnet. Dieser trifft verdoppelt die Grün-Werte eines RGB Bildes und subtrahiert die Rot und Blau Werte (Abbildung 28).

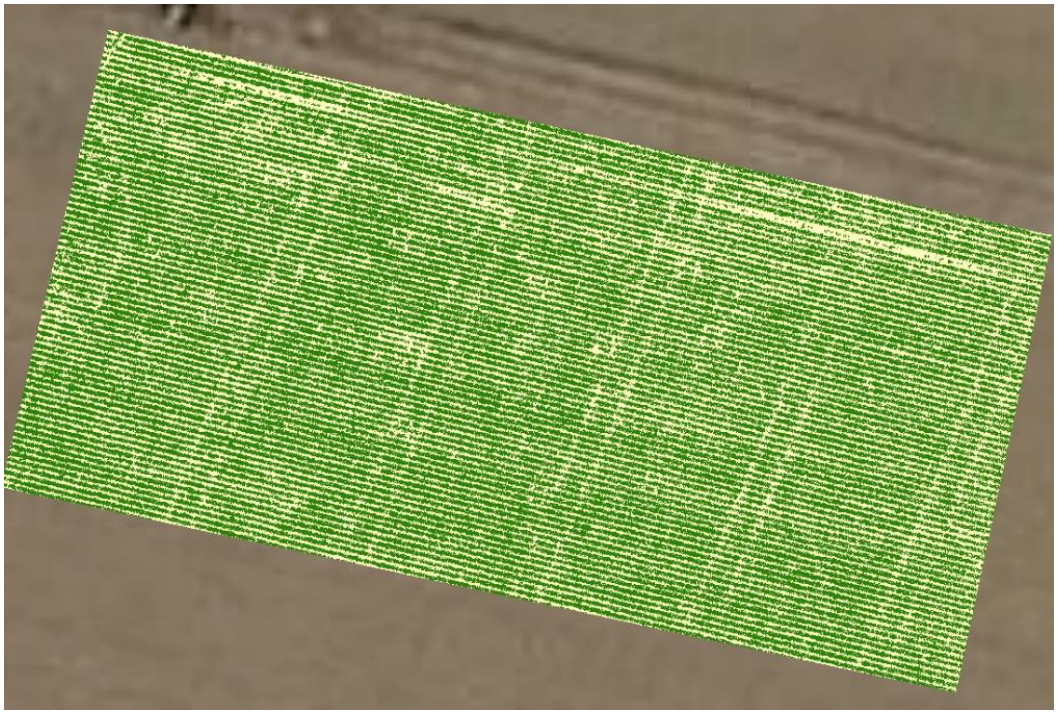

Abbildung 28: Excess-Green-Index

Anschließend wurde mithilfe der Formel **if(„EXG“) > x , 1 , 0)** und dem Wert x bestimmt, welche Pixel des ExG Vegetation und welche Boden sind. Vegetation wurde mit 1 bewertet, Boden mit 0.

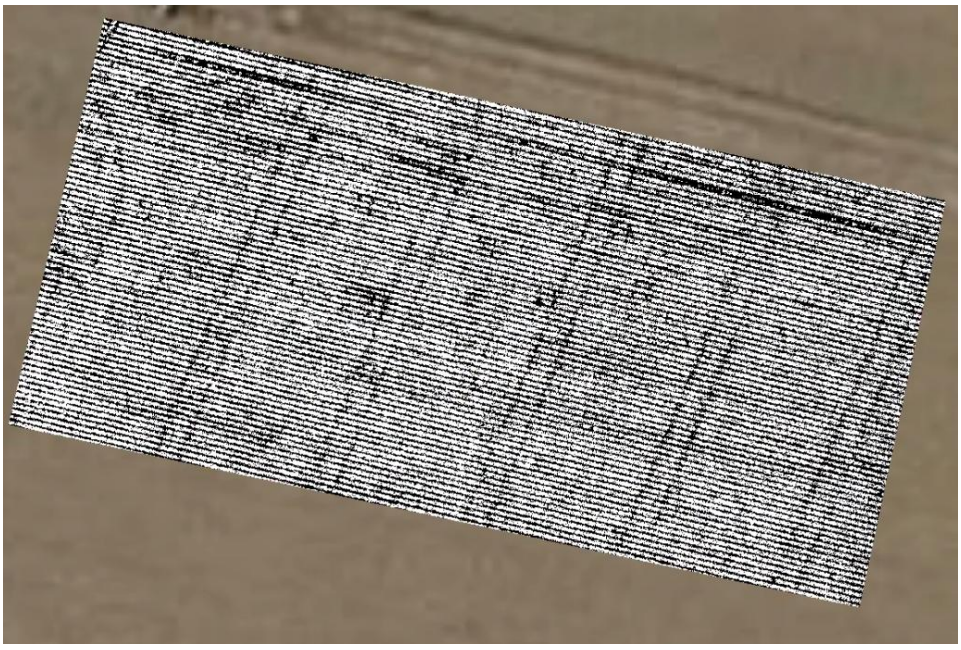

Abbildung 29: ExG Vegetationserhebung

Im nächsten Schritt wurde das bearbeitete ExG vektorisiert. Dadurch ergeben sich Polygone, deren Flächen bestimmbar sind (Abbildung 29 und Abbildung 30).

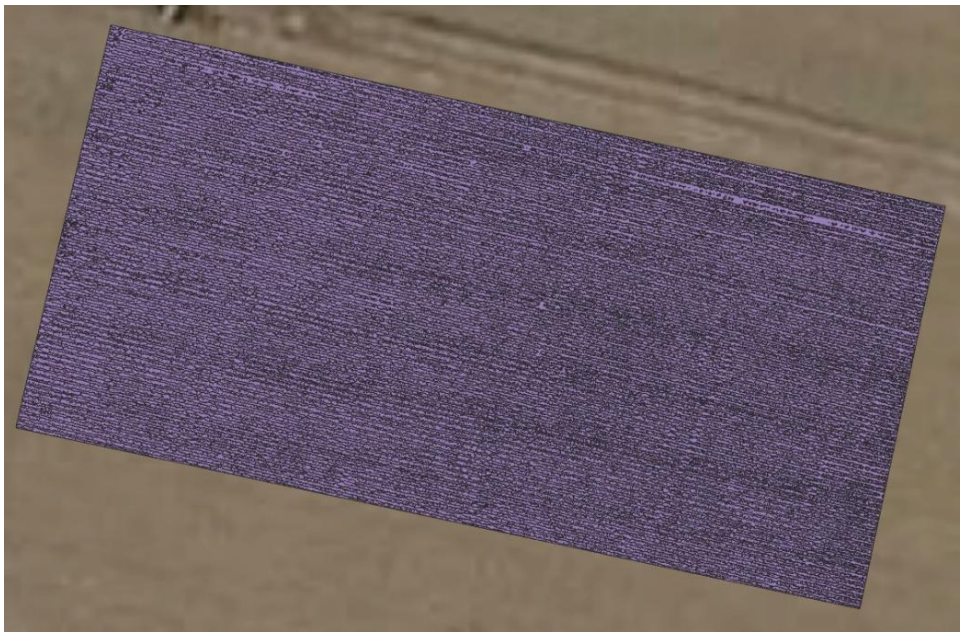

Abbildung 30: Polygon-Bestimmung auf Vektorbasis

Diese wurden anschließend auf die Parzellen zugeschnitten.

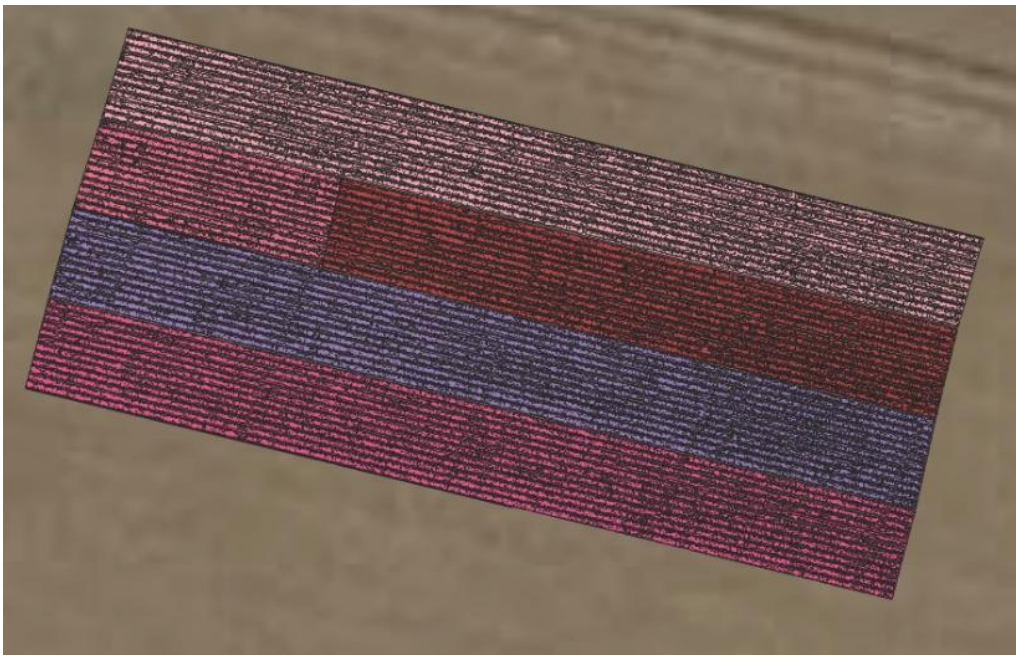

Abbildung 31: QGIS - Implementierung

Und mithilfe des Feldrechners in QGIS wurde die Fläche der einzelnen Polygone berechnet. Diese diente im Anschluss als einfache Vergleichsmöglichkeit der Werte (Abbildung 31).

Mithilfe dieser Zahlen wurde anschließend der Bedeckungsgrad „Leaf-Area-Index“ (kurz LAI, Abbildung 32) berechnet. Diese Werte wurden anschließend in Relativ-Werte je Flug umgerechnet, um eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen.

	Flug 1	Flug 2	Flug 3
Fläche leer 1A	157503	165,668658	2152,77415
Fläche bedeckt 1A	87480	80,7250116	489,759758
LAI (Blattflächenindex)	35,71%	32,76%	18,53%
LAI rel %	**105,12%**	**119,64%**	**113,05%**
Fläche leer 1B	116756	76,2118064	1879,2513
Fläche bedeckt 1B	58973	24,8622374	305,576784
LAI (Blattflächenindex)	33,56%	24,60%	13,99%
LAI rel %	**98,79%**	**89,84%**	**85,35%**
Fläche leer 1C	46175	40,5368622	546,240969
Fläche bedeckt 1C	23890	22,8379729	121,272411
LAI (Blattflächenindex)	34,10%	36,04%	18,17%
LAI rel %	**100,38%**	**131,61%**	**110,86%**
Fläche leer 2A	165003	128,610609	2343,33671
Fläche bedeckt 2A	81394	39,0468761	492,338695
LAI (Blattflächenindex)	33,03%	23,29%	17,36%
LAI rel %	**97,23%**	**85,06%**	**105,91%**
Fläche leer 2B	165546	106,004722	2594,94689
Fläche bedeckt 2B	83200	26,8822041	419,034589
LAI (Blattflächenindex)	33,45%	20,23%	13,90%
LAI rel %	**98,46%**	**73,88%**	**84,80%**

Abbildung 32: Leaf-Area-Index

Im nächsten Schritt wurden alle Beikräuter auf der Versuchsfläche gesucht und markiert. Anschließend wurde die Gesamtanzahl je Parzelle und Flug berechnet und aufgelistet (Abbildung 33).

	Flug 1	Flug 2	Flug 3
Anzahl Beikräuter 1A	**32**	**12**	**41**
Anzahl Beikräuter 1B	**10**	**9**	**8**
Anzahl Beikräuter 1C	**16**	**16**	**24**
Anzahl Beikräuter 2A	**22**	**22**	**12**
Anzahl Beikräuter 2B	**24**	**27**	**18**

Abbildung 33: Berechnung der Versuchsflächenanzahl je Parzelle und Flug

Die Drohnenbonitur stellt ein zukunftsweisendes Instrument im Bereich der Pflanzenbestandsanalyse und Beikrautdetektion dar. Durch den Einsatz hochauflösender Multispektral- und RGB-Kameras können Pflanzenbestände aus der Luft präzise erfasst und ausgewertet werden. In Zukunft wird diese Technologie mit hoher Wahrscheinlichkeit eine deutlich breitere Anwendung finden, da sie eine gezieltere und effizientere Erkennung von Beikräutern ermöglicht.

Insbesondere im biologischen Anbau eröffnet die Drohnenbonitur neue Perspektiven. So können Beikräuter, die potenziell toxische Inhaltsstoffe aufweisen oder die Qualität der Ernte negativ beeinflussen könnten, frühzeitig identifiziert und gezielt reguliert werden. Auf diese Weise lässt sich das Risiko verringern, dass unerwünschte oder giftige Pflanzenbestandteile in das Erntegut gelangen.

Darüber hinaus bietet die automatisierte Datenauswertung der Drohnenbilder die Möglichkeit, großflächige Kulturen zeit- und ressourcenschonend zu überwachen. Langfristig könnte die Drohnenbonitur somit zu einem festen Bestandteil moderner, digital unterstützter Pflanzenbaustrategien werden – sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Landbau.

4.7 HACKVERSUCH WEIßKRAUT IM AUGUST 2025

Abbildung 34 Weißkraut-Schlag

Im August 2025 wurde ein abschließender Versuch in der Kultur Weißkraut durchgeführt. Ziel war es, die Praktikabilität des Hackroboters in dieser Gemüsekultur nochmals umfassend zu überprüfen und dessen Leistungsfähigkeit unter praxisnahen Bedingungen zu bewerten. Die Kultur wurde grundsätzlich konventionell geführt. Auf einem Teil des Schlages wurde jedoch bewusst auf den Einsatz von Herbiziden verzichtet, sodass ausschließlich der Roboter zur Beikrautregulierung eingesetzt wurde.

Der Versuch diente als abschließende Validierung der bisherigen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Feldversuchen und sollte die Ergebnisse der mechanischen Unkrautbekämpfung in einer weiteren Gemüsekultur bestätigen. Die Resultate wurden im Endbericht des Forschungsprojektes zusammengefasst und analysiert.

Aufgrund massiver Niederschläge im August 2025 konnte mit der Unkrautregulierung erst gegen Ende des Monats begonnen werden. Diese witterungsbedingte Verzögerung hatte Einfluss auf den Versuchsverlauf und wurde bei der Auswertung der Ergebnisse entsprechend berücksichtigt.

Im Rahmen des abschließenden Weißkrautversuchs wurden ergänzend detaillierte Parameter zur Leistungsbewertung des Hackroboters erhoben. Das Einteachen der Versuchsfläche, also das initiale Einlernen des Feldes für den Roboter, nahm etwa zwei

Stunden in Anspruch. Anschließend wurde ein Streifenversuch mit einer Länge von rund 50 Metern angelegt, um die Funktionsfähigkeit und Präzision des Roboters unter praxisnahen Bedingungen zu überprüfen.

Vor der ersten Überfahrt des Roboters wurde in diesem 50-Meter-Streifen eine Beikrautdichte von etwa 50 Pflanzen festgestellt. Die Zählung umfasste sämtliche Beikräuter sowohl in als auch zwischen den Reihen.

Während des Versuches arbeitete der Roboter mit einer eingestellten Hacktiefe von 5 cm und einem Sicherheitsabstand von ebenfalls 5 cm rund um den Mittelpunkt der Kultur. Die Werkzeugüberlappung betrug –3 cm, und die Arbeitsgeschwindigkeit lag bei 30 cm/s.

Nach der Überfahrt wurde eine verbleibende Beikrautdichte von rund 15 Pflanzen ermittelt. Diese Ergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion des Beikrautaufkommens und bestätigen die Wirksamkeit der mechanischen Beikrautregulierung durch den Roboter auch in der Kultur Weißkraut.

In der Bewertung der Ergebnisse lässt sich festhalten, dass der Hackroboter unter den gegebenen Bedingungen eine hohe Arbeitsgenauigkeit erreichte. Die verbleibenden Beikräuter befanden sich überwiegend in unmittelbarer Nähe der Pflanzenreihe, wo eine vollständige Bearbeitung aufgrund des definierten Sicherheitsbereichs technisch bedingt eingeschränkt war. Der Sicherheitsabstand kann bei optimalen Bedingungen sicher weniger konservativ gewählt werden, somit wäre ein noch besseres Hackergebnis zu erreichen.

Insgesamt konnte durch die Einstellungen eine Beikrautreduktion von rund 70 % erzielt werden. Damit zeigt sich, dass der Roboter auch in der Kultur Weißkraut ein hohes Potenzial für eine effiziente mechanische Beikrautregulierung aufweist. Eine weitere Optimierung könnte künftig durch die Anpassung der Werkzeuggeometrie, die Verringerung des Sicherheitsabstands oder den Einsatz zusätzlicher kamerabasierter Steuerungsalgorithmen erzielt werden, um die Bearbeitungsqualität im Reihenbereich weiter zu verbessern.

5 CONCLUSIO UND ERKENNTNISSE

5.1 CONCLUSIO ACKERBAUKULTUREN (SOJABOHNE UND ZUCKERRÜBE)

Die Auswertung der Versuche in den Ackerbaukulturen Sojabohne und Zuckerrübe zeigt, dass der zusätzliche Einsatz mechanischer Hacktechnik gegenüber einer reinen Standardbewirtschaftung grundsätzlich positive Effekte auf die Bestandsentwicklung und die Beikrautregulierung haben kann. Insbesondere der ergänzende Hackgeräteeinsatz stellte sich in beiden Kulturen als wirtschaftlich sinnvoll dar, da er zur Stabilisierung der Erträge beitrug.

Eine vollständige Reduktion bzw. ein Ersatz chemischer Pflanzenschutzmittel allein durch mechanische Verfahren erwies sich unter den gegebenen Rahmenbedingungen jedoch als wirtschaftlich nicht eindeutig vorteilhaft. Sowohl beim Einsatz des autonomen Hackroboters als auch bei der kameragesteuerten Hacktechnik konnten Einschränkungen hinsichtlich Wirkungsgrades, Flächenleistung und Arbeitszeit festgestellt werden, die insbesondere in Jahren mit hohem Beikrautdruck relevant sind.

5.2 CONCLUSIO TECHNIK – HACKROBOTER VERSUS KAMERAGESTEUERTES HACKGERÄT

Der Vergleich zwischen autonomem Hackroboter und kameragesteuertem Hackgerät zeigt, dass beide Systeme spezifische Stärken und Schwächen aufweisen.

Das kameragesteuerte Hackgerät zeichnet sich durch eine hohe Flächenleistung, eine ausgereifte Technik sowie eine große Flexibilität in unterschiedlichen Kulturen aus. Nachteilig wirken sich der notwendige Einsatz einer Zugmaschine, der höhere Bodendruck sowie die eingeschränkten Möglichkeiten im In-Row-Bereich aus.

Der autonome Hackroboter bietet demgegenüber Vorteile hinsichtlich der autonomen Arbeitsweise, des geringen Bodendrucks sowie des Potenzials für eine präzisere Bearbeitung nahe der Pflanzenreihe. Einschränkungen bestehen aktuell vor allem in der geringen Flächenleistung, den hohen Investitionskosten sowie im noch begrenzten Entwicklungsstand der Technik.

5.3 Conclusio Gemüsekulturen

In den untersuchten Gemüsekulturen zeigte der autonome Hackroboter ein insgesamt hohes Potenzial. Besonders bei Kulturen mit größeren Reihenabständen ab etwa 9 cm, wie Sellerie und Weißkraut, konnten gute Hackergebnisse bei gleichzeitig geringer Kulturpflanzenbeeinträchtigung erzielt werden.

In empfindlicheren Kulturen, wie Lauch oder Schwarzkümmel, erwies sich der Einsatz des Roboters hingegen als eingeschränkt. Unebenheiten der Bodenoberfläche sowie enge Reihenabstände stellen hier hohe Anforderungen an die Sensortechnik und die mechanische Ausführung der Hackwerkzeuge.

5.4 Gesamterkenntnisse und Hybridansatz

Über alle Versuchsreihen hinweg zeigt sich, dass weder autonome Hackroboter noch klassische Hacktechnik als alleinige Lösung betrachtet werden sollte. Vielmehr deutet sich ein Hybridansatz als praxisnahes Zukunftsmodell an, bei dem mechanische Verfahren gezielt zur Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes eingesetzt werden, ohne vollständig auf chemische Maßnahmen zu verzichten.

Dieser Ansatz ermöglicht sowohl im biologischen als auch im konventionellen Landbau eine Kombination aus Ertragsabsicherung, Effizienzsteigerung und Risikominimierung, angepasst an Kultur, Standort und Witterungsverlauf.

5.5 Learnings und Ausblick

Aus den Versuchen lassen sich mehrere zentrale Learnings ableiten. Eine genaue Feldvorbereitung, eine einheitliche Aussaat sowie eine frühzeitige und strukturierte Erfassung des Beikrautaufkommens sind entscheidende Faktoren für den erfolgreichen Einsatz mechanischer Beikrautregulierung. Zudem hat sich gezeigt, dass eine klare Kommunikation zwischen allen Projektbeteiligten wesentlich zum Gelingen der Versuche beiträgt.

Für zukünftige Versuchsreihen wird empfohlen, die Datenerhebung weiter zu standardisieren, die Drohnenbonitur verstärkt einzusetzen und die Versuchsdesigns

weiter auszubauen. Insbesondere im Gemüsebau bietet der Einsatz autonomer Hackroboter ein erhebliches Entwicklungspotenzial.

6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Parzellierungsschema Versuch 13
Abbildung 2: Areal der HBLA Elmberg mit Versuchsfeld 18
Abbildung 3: Flächenvergleich der verwendeten Parzellen 19
Abbildung 4: Vergleich Hackmethoden nach Ertrag und Zuckergehalt 22
Abbildung 5 Flyer für die Ausschreibung der Feldtage 25
Abbildung 6 Feldtag am 24.06.2025 in Hargelsberg (1)(2025, Schmidthaler) 26
Abbildung 7 Feldtag am 24.06.2025 in Hargelsberg (2)(2025, Schmidthaler) 26
Abbildung 8 Erklärung des Roboters für die Teilnehmer:innen des Feldtages am 24.06.2025 in Hargelsberg (2025, Kreuzinger) 27
Abbildung 9 Erörterung der Vor- und Nachteile des Roboters im Vergleich mit dem Hackgerät (2025, Kreuzinger) 27
Abbildung 10 Einsatz Hackgerät und Hackroboter im Bio-Soja (2025, Kreuzinger) 28
Abbildung 11 Feldtag bei Familie Kastenhuber in Bad Wimsbach - Neydharting (2025, Kreuzinger) 29
Abbildung 12 Feldtag bei Familie Kastenhuber in Bad Wimsbach - Neydharting (2025, Kreuzinger) 29
Abbildung 13 Versuchsfläche Sellerie – Gerersdorf, Kematen an der Krems – OÖ (vgl. DORIS, 2025) 30
Abbildung 14 Lage der Soja – Versuchsfläche in Penking, Hargelsberg - OÖ (vgl. Google, 2025) 31
Abbildung 15 Lage der Soja – Versuchsfläche im oberösterreichischen Zentralraum (vgl. Google, 2025) 32
Abbildung 16 Versuchsfeld Lauch 35
Abbildung 17 Robotereinsatz im Lauch (2025, Kreuzinger) 36
Abbildung 18 Robotereinsatz im Lauch (2025, Kreuzinger) 37
Abbildung 19: Schäden an Kulturpflanzen durch Spurverlust und fehlerhaften Neu-Einreihungsversuch des Roboters 38
Abbildung 20: Schadpflanze im Schutzbereich der Nutzpflanze 39
Abbildung 21 Anlageplan – Hackversuch Hargelsberg; Varianten: A, B mit jeweils zweifacher Wiederholung und Kontrollvariante C; Stichprobenflächen als rote Quadrate 42

Abbildung 22 Stichprobenauswahl mit Boniturrahmen (Panhuber, 2025) 43
Abbildung 23 Wirkungsgrad Hackroboter und Hackgerät 49
Abbildung 24 Wirkungsgrad Hackroboter und Hackgerät (2.0) 49
Abbildung 25 Wirkungsgrad 3 Hackroboter und Hackgerät 50
Abbildung 26 Kulturpflanzenschäden und -verluste 52
Abbildung 27: Manuelle Zählstellen und Parzellen 58
Abbildung 28: Excess-Green-Index 59
Abbildung 29: ExG Vegetationserhebung 59
Abbildung 30: Polygon-Bestimmung auf Vektorbasis 60
Abbildung 31: QGIS - Implementierung 60
Abbildung 32: Leaf-Area-Index 61
Abbildung 33: Berechnung der Versuchsflächenanzahl je Parzelle und Flug 62
Abbildung 34 Weißkraut-Schlag 63

7 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Ausgangsdaten Versuch Zuckerrübe 20
Tabelle 2:Gesammelte Ergebnisse Hackversuch Zuckerrüben Hargelsberg 21
Tabelle 3: Ergebniszusammenfassung Hackversuch 22
Tabelle 4 Bearbeitungsschritte zum Unkrautmanagement auf der Versuchsfläche..... 43
Tabelle 5 Einstellungen der Hackgeräte 45
Tabelle 6 Mittelwerte und -differenzen der Verunkrautung der Varianten pro Boniturzeitpunkt (Panhuber, 2025) 51

8 LITERATURVERZEICHNIS

EMVG. (kein Datum). Abgerufen am 24. Mai 2010 von Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/EMVG.

Heuer, J.-U. (2001). „Rechtliche Aspekte von Informations- und Wissensmanagement“. In J. Hennig, & M. Tjarks-Sobhani (Hrsg.), *Informations- und Wissensmanagement für die technische Dokumentation* (Bd. Schriften zur Technischen Kommunikation, S. 33 – 49). Lübeck: Schmidt-Römhild.

Heuer, J.-U. (2008). „Anforderungen an Anleitungen konkretisiert. EMV neu geregelt“. *technische kommunikation*(3), S. 50 – 53.

Huber, J. (20. 5 2025). *Drohnenscan Huber OG*. Von https://www.drohnenscan.at/ abgerufen

Karmasin, M., & Ribing, R. (2010). *Die Gestaltung wissenschaftlicher Arbeiten* (5. Ausg.). Wien: facultas wuv.

Meier, J. (2011). *Globalisierung.* Wiesbaden: Pons.

Reder, M. (2024). *Versuchsbeschreibung "Next Generation Crop Care" als Förderansuchen beim Land Oberöstrerreich.* Steyr.

Weigerstorfer, T. (2025). *Flyer Feldtage Maschinenring FH OÖ.* FH Steyr, Steyr.

Wetzchewald, M. (kein Datum). *Textverstehen und Textverständlichkeit: Theorie und Praxis.* Abgerufen am 12. Oktober 2009 von http://projekte.linse.uni-due.de/verstaendlichkeit/index.htm.