



Nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch Spotspraying- Technik (2021-2023)

Abschlussbericht

Autorinnen und Autoren

J. Witsoe, R. Total, P. Haberey, K. Heitkämper, E. Bravin,
H. Möri, P. Steffen, T. Wyssa, T. Anken, R. Matter, M. Keller



Projektpartner

- Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau (SZG, Projektleitung), vertreten durch Rolf Matter
- Bundesamt für Umwelt (BAFU, Beitragsgeber), vertreten durch Ursula Frei und Alexandre Gurba
- Möri AG Kartoffel- und Gemüsebautechnik (Möri, Partner aus der Wirtschaft), vertreten durch Hans Möri
- Verband Schweizer Gemüseproduzenten (VSGP, Partner aus der Wirtschaft), vertreten durch Simone Meyer
- Agroscope, Wädenswil (AGS, Partner aus der Wissenschaft), vertreten durch Reto Neuweiler, Pascal Haberey, René Total, Esther Bravin, Joshua Witsoe und Martina Keller
- Agroscope, Tänikon (AGS, Partner aus der Wissenschaft), vertreten durch Thomas Anken und Katja Heitkämper
- Landwirtschaftliches Institut, Grangeneuve (IAG, Partner aus der Beratung), vertreten durch Daniela Hodel
- Inforama Seeland (Inforama, Partner aus der Beratung), vertreten durch Stefan Wyss
- Wyssa Gemüse (Wyssa, Partner aus der Wirtschaft), vertreten durch Thomas Wyssa

Impressum

Herausgeber	Agroscope Rte de la Tioleyre 4, Postfach 64 1725 Posieux www.agroscope.ch
Auskünfte	Joshua Witsoe, joshua.witsoe@agroscope.admin.ch Martina Keller, martina.keller@agroscope.admin.ch
Redaktion	Carole Enz
Gestaltung	Joshua Witsoe
Fotos	Agroscope
Titelbild	Joshua Witsoe
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2024
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as186g

Haftungsausschluss :

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhalt

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Summary	6
1 Ausgangslage und Projektziele	7
2 Neuer Pflanzenschutzroboter - Prototyp II	8
2.1 Testfahrten	10
3 Einsparpotenzial von Spotspraying	11
3.1 Design und Parameter.....	11
3.2 Bestimmung der Ausbringmengen und des Einsparpotenzials	13
3.3 Ergebnisse.....	13
4 Wirkung gegen Erdflöhe	14
4.1 Bestimmung der Wirksamkeit.....	16
4.2 Ergebnisse.....	16
5 Praxiserfahrungen	18
6 Dosierschema für Pflanzenschutzmittel	18
7 Wirtschaftliche Aspekte	19
7.1 Kalkulationsgrundlagen	19
7.2 Weitere Annahmen und verwendete Werte	21
7.3 Ergebnisse.....	23
7.4 Sensitivitätsanalyse	24
8 Diskussion und Schlussfolgerungen	27
9 Ausblick	29
Danksagung	29
Literaturverzeichnis	29
Appendix I: Artikel, Konferenz- und Tagungsbeiträge	30
Appendix II: Dosierschema im Detail	31
Appendix III: Projektmeilensteine	38
Appendix IV: Projektverlauf	39

Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde ein neuer Pflanzenschutzroboter (Prototyp II) gebaut, der ausschliesslich für Spotspraying konzipiert ist. Bei Spotspraying wird jede einzelne Kulturpflanze erkannt und gezielt mit Fungiziden und Insektiziden behandelt. Das Gerät wurde in der Schweiz in Betrieb genommen und unter praxisüblichen Bedingungen evaluiert. Testfahrten zur Bestimmung des Einsparpotenzials erfolgten in Salat, Knollensellerie und Chinakohl. In Salat mit einem mittleren Pflanzendurchmesser von 11 cm konnte ein Einsparpotenzial für Fungizide und Insektizide von 87 % bestimmt werden, bei Knollensellerie (Ø 24 cm) betrug das Einsparpotenzial 78 % und bei Chinakohl (Ø 21 cm) 58 %. Im Vergleich dazu hätten mit einer Bandbehandlung 69, 56 und 34 % an Fungiziden und Insektiziden in Salat, Knollensellerie und Chinakohl in den genannten Kulturstadien eingespart werden können. Das Einsparpotenzial hängt von der Pflanzdichte, der Pflanzengrösse, der Uniformität des Bestands und den Geräteeinstellungen ab. Beim Knollensellerie wurde beispielsweise nicht die ganze Pflanze behandelt, da der Zielorganismus sich im Herzen der Selleriepflanze befand, bei Chinakohl war hingegen die Behandlungsbreite 4 cm breiter als die Kulturpflanzen, um die Wirkung gegen den mobilen Schaderreger sicherzustellen.

Der Prototyp II wurde mit Geschwindigkeiten von 3 bis 6 km/h im Feld erfolgreich getestet. Mit diesen höheren Fahrgeschwindigkeiten konnte im Vergleich zum Vorgängergerät, bei dem gleichzeitig gehackt und behandelt wurde, die Wirtschaftlichkeit verbessert werden. Zu beachten ist, dass bedingt durch die Ausrichtung auf Spotspraying die Unkrautkontrolle beim Prototyp II nun separat erfolgt. Anhand einer Teilkostenrechnung für die Produktion von 1 ha Salat konnte gezeigt werden, dass bei einer realisierten Geschwindigkeit von 4.5 km/h der Prototyp II noch 140 Fr./ha teurer ist als der Standard, bei dem alle Applikationen flächig mit der Feldspritze erfolgen. Dies setzt jedoch eine hohe Auslastung voraus. Geht man beim Prototyp II von der gleichen Auslastung wie bei der verwendeten Feldspritze für das Standardverfahren aus (50 ha pro Jahr), entstehen den Gemüseproduzenten Mehrkosten von 111 bis 138 Fr./ha bei frühen Behandlungen, wenn 84 % an Fungiziden und Insektiziden eingespart werden können. Bei später durchgeführten Behandlungen, wenn noch 28 % an Fungiziden und Insektiziden eingespart werden können, entstehen Mehrkosten von 307 bis 334 Fr./ha. Über die gesamte Kulturdauer könnten bei diesem Fallbeispiel 53 % an Insektiziden und Fungiziden eingespart werden. Zu beachten ist, dass das Gerät die Feldspritze nicht ersetzt. Diese kommt zum Einsatz, wenn flächig behandelt werden muss beispielsweise bei späten Behandlungen, wenn die Kultur den Boden nahezu vollständig bedeckt oder wenn aufgrund der Witterung eine hohe Schlagkraft bei Pflanzenschutzmassnahmen erforderlich ist. Da es sich um ein Gerät im Prototyp-Stadium handelt, mussten viele Annahmen getroffen werden, die wiederum die Ergebnisse der Teilkostenrechnung beeinflussten. Es handelt sich daher um eine grobe Abschätzung und weitere Untersuchungen wären notwendig.

Résumé

Dans le cadre du présent projet, un nouveau robot de protection des cultures (prototype II) a été construit, conçu exclusivement pour la pulvérisation ciblée (spotspraying). Le spotspraying consiste à identifier chaque plante cultivée et à la traiter de manière ciblée avec des fongicides et des insecticides. Il a été mis en œuvre en Suisse et évalué dans des conditions pratiques. Des tests ont été effectués sur des salades, des céleri-raves et des choux chinois afin de déterminer le potentiel d'économie. Pour les laitues ayant un diamètre moyen de 11 cm, un potentiel d'économie de fongicides et d'insecticides de 87 % a pu être déterminé. Pour le céleri-rave (Ø 24 cm), 78 % et pour le chou chinois (Ø 21 cm), 58 %. Un traitement en bandes aurait permis d'économiser respectivement 69, 56 et 34 % de fongicides et d'insecticides sur la laitue, le céleri-rave et le chou chinois aux stades de culture mentionnés. Le potentiel d'économie dépend de la densité de plantation, de la taille des plantes, de l'uniformité de la culture et des réglages de l'équipement. Par exemple, dans le cas du céleri-rave, la plante entière de céleri n'a pas été traitée car l'organisme cible se trouvait au cœur de la plante de céleri, alors que dans le cas du chou chinois, la largeur de traitement était de 4 cm plus large que les plantes cultivées afin de garantir l'efficacité contre les ravageurs mobiles.

Le prototype II a été testé avec succès au champ à des vitesses comprises entre 3 et 6 km/h. Ces vitesses de déplacement plus élevées ont permis d'améliorer la rentabilité par rapport à la précédente version du prototype qui binait et pulvérisait en même temps. À noter qu'en raison de la spécialisation du prototype II vers le spotspraying, le contrôle des mauvaises herbes se fait désormais séparément. Un calcul des coûts partiels pour la production d'un hectare de salade a permis de montrer qu'à une vitesse réalisée de 4,5 km/h, le prototype II coûte encore 140 Fr./ha de plus qu'un modèle standard, où les applications sont effectuées sur toute la surface avec le pulvérisateur à rampe. Cela suppose toutefois un taux d'utilisation élevé. Si l'on considère que le taux d'utilisation du Prototype II est le même que celui d'un pulvérisateur à rampe standard (50 ha par an), les producteurs de légumes doivent supporter des coûts supplémentaires de 111 à 138 francs/ha pour les traitements précoces, lorsque 84 % des fongicides et des insecticides peuvent être économisés. Les traitements tardifs, qui permettent d'économiser encore 28 % de fongicides et d'insecticides, entraînent des coûts supplémentaires de 307 à 334 francs/ha. Sur toute la durée de la culture, il serait possible d'économiser 53 % d'insecticides et de fongicides dans ce cas étudié. Il faut savoir que cette machine ne remplace pas le pulvérisateur. Ce dernier est utilisé lorsqu'il faut traiter toute la surface, par exemple lors de traitements tardifs, quand la culture recouvre presque entièrement le sol ou lorsque les conditions météorologiques exigent une force de frappe importante dans les mesures phytosanitaires. Comme il s'agit d'un appareil au stade de prototype, de nombreuses suppositions ont dû être faites, qui ont à leur tour influencé les résultats du calcul des coûts partiels. Il s'agit donc d'une estimation approximative et des recherches supplémentaires seraient nécessaires.

Summary

As part of this project, a new plant protection robot (Prototype II) was built and designed exclusively for spot spraying. In spot spraying, each individual crop plant is identified and selectively targeted with fungicides and insecticides. The new prototype was put into operation in Switzerland and evaluated under standard practical conditions. Test runs to determine the savings potential for fungicides and insecticides were carried out in lettuce, celery and Chinese cabbage. In lettuce, with an average plant diameter of 11 cm, a savings potential of 87% was determined. For celery (Ø 24 cm) 78% and for Chinese cabbage (Ø 21 cm) 58%. With a band treatment, 69, 56 and 34% of fungicides and insecticides could be saved in lettuce, celery and Chinese cabbage at these crop stages. The savings potential depends on the planting density, the plant size, the uniformity of the crop, the target organism and the device settings. In celery, for example, only a part of the plant was treated as the target organism was located in the heart of the plant, whereas in Chinese cabbage, the treatment width was 4 cm wider than the plant to ensure efficacy against a mobile target organism.

The Prototype II was successfully tested in the field at speeds from 3 to 6 km/h. With these higher driving speeds, it was possible to improve its economic efficiency compared to the predecessor machine, which hoed and sprayed simultaneously. As the Prototype II is focused on spot spraying, weed control is to be carried out separately. Based on a partial cost calculation for the production of 1 ha of lettuce, it was shown that at a realized speed of 4.5 km/h, the Prototype II is still 140 CHF/ha more expensive than the standard, in which broadcast applications were carried out with a field sprayer. However, this assumes high-capacity utilization. Assuming the same capacity utilization for the Prototype II as for the field sprayer used for the standard method (50 ha per year), vegetable producers will incur additional costs of 111 to 138 CHF/ha for early treatments, when 84% of fungicides and insecticides can be saved. Later treatments, when 28% of fungicides and insecticides can still be saved, result in additional costs of 307 to 334 CHF/ha. For this case study, 53% of insecticides and fungicides could be saved over the entire cultivation period. It should be noted that this device does not replace the field sprayer. The field sprayer is still required when a large area needs to be treated, as is the case for late treatments for example, when the crop covers most of the soil or when the weather requires a high level of performance for plant protection measures. As this device is still in its prototype stage, many assumptions were made which in turn influenced the results of the partial cost calculation. Therefore, this partial cost calculation is only a rough estimate and further research would be necessary.

1 Ausgangslage und Projektziele

Die Risiken, die mit dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verbunden sind, müssen reduziert werden. Für den Gemüsebau mit seinen zahlreichen Kulturen und den geltenden Qualitätsanforderungen ist das eine grosse Herausforderung. Im vom BLW (AgriQnet) mitfinanzierten Vorprojekt «Ressourcenschonender, nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch kameragesteuerte Pflanzenschutzroboter» wurde ein Pflanzenschutzroboter-Prototyp (nachfolgend als Prototyp I bezeichnet) basierend auf einem bestehenden Hackroboter (Modell IC-Weeder) der Firma Steketee (neu LEMKEN) entwickelt (Keller et al., 2023). Über Bilderfassung und -verarbeitung lokalisiert und analysiert das entwickelte Gerät die Kulturpflanzen und Reihen, so dass seine über den Kulturpflanzen angeordneten Düsen diese zielgerichtet mit Fungiziden und Insektiziden behandeln können (Spotspraying). Der proof of concept wurde erbracht und mehr als 50 % an Pflanzenschutzmittel (PSM) eingespart. Allerdings erwies sich die Kombination von Hacken und Spritzen als störungsanfällig, anspruchsvoll in der Handhabung bzw. in der Bedienung und weniger wirtschaftlich aufgrund der langsamen Fahrgeschwindigkeit bedingt durch das Hacken.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde ein neuer Pflanzenschutzroboter (Prototyp II) gebaut, der nur noch für Spotspraying konzipiert ist. Er ist dadurch leichter und die Ausrichtung auf das Spotspraying ermöglicht eine höhere Fahrgeschwindigkeit. Der Einsatz des neuen Geräts soll so rationeller und wirtschaftlicher werden. Gleichzeitig wird angestrebt, die negativen Auswirkungen auf die Umwelt dank zusätzlicher Verbesserungen weiter zu minimieren. Das Gerät soll in einfachen agronomischen Versuchen getestet werden. Bei Spotspraying hängt die Brühmenge nicht nur von der Fläche und der gewählten Wasseraufwandmenge ab, sondern auch von der Anzahl Kulturpflanzen und deren Grösse. Damit Restmengen möglichst vermieden werden können, soll anhand eines einfachen Schemas die notwendige Brühmenge vor der Applikation berechnet werden können. Ein solches Dosierschema wurde im Vorprojekt bereits erstellt und wird nun auf den Prototyp II angepasst. Ausserdem wird die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einer Standardapplikation und dem Prototyp I berechnet.

2 Neuer Pflanzenschutzroboter - Prototyp II

Anhand der Versuche mit dem Steketee IC Spray und Hackgerät der ersten Serie (Prototyp I) hat sich gezeigt, dass die Kombination von Hacken und Spotspraying nicht ideal ist. Vor allem die Arbeitsgeschwindigkeit von 1.5 km/h bietet eine zu geringe Flächenleistung. Deshalb wurde der Prototyp II (Abbildung 1) nur noch für Spotspraying konzipiert und vom Hersteller Steketee (neu LEMKEN, Werk Dinteloord, Dinteloord, Niederlande) gebaut. Dadurch kann die Fahrgeschwindigkeit deutlich erhöht werden. Bei den Testfahrten wurde eine maximale Geschwindigkeit von 6 km/h realisiert. Der Hersteller schätzt, dass unter optimalen Bedingungen bis 8 km/h möglich sind.

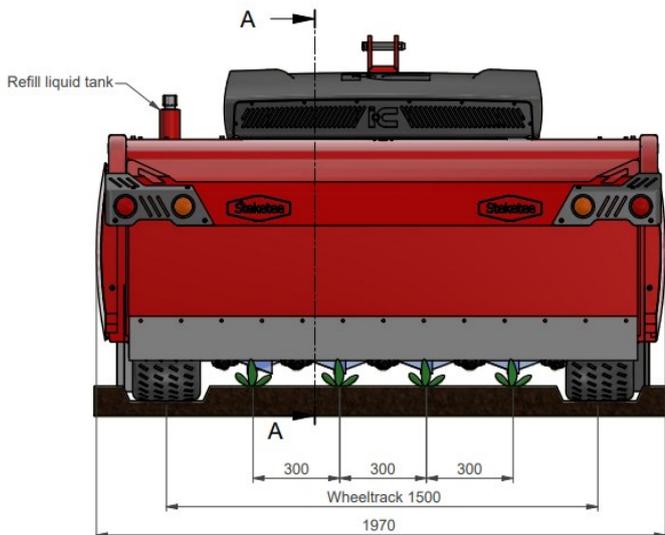


Abbildung 1: Rückansicht des Prototyps II mit geschlossener Haube. (Quelle: technische Zeichnung von Steketee)

Der Prototyp II ist traktorgezogen (Abbildung 2) und für den Beetanbau mit Beetbreiten von 1.5 bis 1.8 m und für drei bis sechs Pflanzreihen konzipiert. Anhand eines hydraulisch gesteuerten, internen Verschieberahmens wird das Gerät immer präzise der Reihe entlanggeführt. Auch die Höhe wird über die zwei tragenden Räder hydraulisch angepasst. Damit wird sichergestellt, dass die Düsen immer die optimale Position über der Reihe haben und die voreingestellte Düsenhöhe über den Pflanzen eingehalten wird.



Abbildung 2: Links: Seiten- und Rückansicht des Prototyps II. Dieser ist traktorgezogen. Rechts: Mit hochgeklappter Haube, während der Behandlung ist diese geschlossen. (Agroscope)

Technisch ist das Gerät gleich aufgebaut wie der IC-Weeder von Steketee (neu LEMKEN) bzw. der Prototyp I. Es fehlen der Kompressor und die pneumatischen Hackwerkzeuge. Durch das Weglassen der Hackkomponenten konnte das Gerät 25 % leichter gebaut werden als der erste Prototyp, was bei nassen Bodenbedingungen ein Vorteil ist.

Die Düsenhalterungen sind manuell höhenverstellbar. Kameras, Hözensensor, LED-Belichtung und hydraulische Seitensteuerung sind gleich wie beim Prototyp I. Die Sensor- und Spotspraying-Komponenten sind unter einer Haube. Dadurch sind Beeinflussungen durch Wind und Licht stark reduziert. Durch die konstante LED-Beleuchtung arbeiten die hochsensiblen Kameras immer unter optimalen Bedingungen. Das ist wichtig für eine sichere Pflanzenerkennung, präzise Regelung und Ansteuerung der Düsen. Ausserdem reduziert die Applikation unter Abschirmung zusätzlich auch die Drift. Da gezielt nur die Kulturpflanzen behandelt werden, sich die Düsen nah am Boden befinden und die Applikation unter Abschirmung erfolgt, wurde auf weitere aufwändigere Massnahmen verzichtet, die die Drift noch weitergehender reduzieren könnten.

Die gezielte Applikation erfolgt mit Banddüsen, die über den Reihen geführt werden. Die Düsen öffnen und schliessen sich kurz vor und nach jeder Kulturpflanze. So entstehen behandelte Rechtecke. Die Breite hängt von der Düsenhöhe und dem Düsenwinkel ab und muss auf die Grösse der Kulturpflanzen abgestimmt werden. Die Länge des behandelten Rechtecks ergibt sich durch das Öffnen und Schliessen der Düsen. Mit den Düsen- und Software-Einstellungen kann der Produzent selber bestimmen, ob er nur die Kulturpflanzen behandeln möchte oder ob die behandelten Rechtecke grösser gewählt werden, um die Wirkung abzusichern.

Die Reihen- und Pflanzenerkennung erfolgt mit drei RGB-Kameras (Kanäle: Rot, Grün, Blau) und klassischer Bildanalyse. Neue Kulturen können vom Produzenten selber hinzugefügt werden über das Festlegen der Kamera- und Pflanzenerkennungseinstellungen.

Die Einstellungen für die Behandlungen werden über ein kabelgebundenes Terminal in der Traktorkabine vorgenommen. Hier lassen sich alle Parameter wie die Kulturart, Pflanzenhöhe und -breite, Farbe, Reihenabstände, Abstände in der Reihe und die Parameter für die Spotspray-Applikation einstellen. Auf dem Terminal sind sämtliche Daten der Sensoren einsehbar, was für eine präzise Applikation wichtig ist.

2.1 Testfahrten

Erste Testfahrten wurden im Winter, Anfang 2022, auf einer asphaltierten Fläche mit Pflanzenattrappen (Stahlscheiben, Farbpunkte), die Gemüsepflanzen darstellen, gemacht (Abbildung 3). Diese Tests haben anfänglich nicht immer funktioniert. Daher musste die Firma Steketee (neu LEMKEN) online einige Parameter anpassen. Es hat sich auch gezeigt, dass bei tiefstehender Sonne in den Wintermonaten Lichtstrahlen, die seitlich unter das Gehäuse scheinen, die Kamerasensoren beeinflussen und dadurch die Genauigkeit gestört wird.

Da das Gerät eine Breite von 180 cm aufweist und im Maximum mit den drei Kameras sechs Reihen behandeln kann, war anfänglich die Zuordnung der Reihen nicht klar. Für die Testfahrten und Versuche arbeiteten wir mit Beetbreiten von 1.5 m und vier Pflanzreihen. Auch da konnte die Firma online die Reihenzuordnung festlegen, bis das Gerät einwandfrei funktionierte. Die Einstellungen für die Behandlungen werden über einen kabelgebundenen Terminal in der Traktorkabine vorgenommen. Die Benutzeroberfläche und die Einstellungsmöglichkeiten sind nahezu identisch mit denjenigen des Prototyps I.

Nachdem die anfänglichen Hürden genommen waren, konnten erste Kulturen erfasst und in diesen Versuchseinsätze durchgeführt (Abbildung 4).

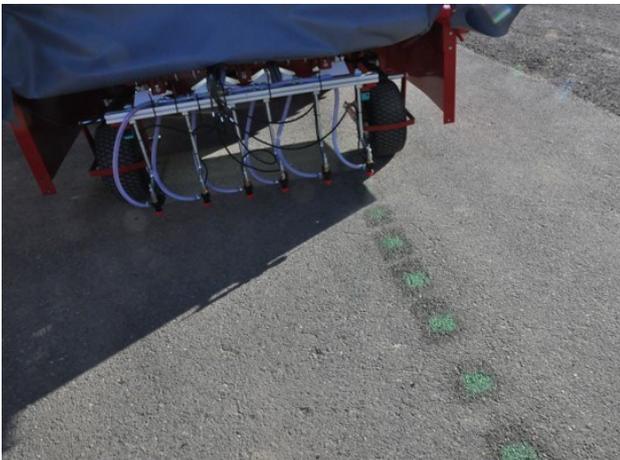


Abbildung 3: Erste Testfahrten auf einer befestigten Straße mit Wasser. (Agroscope)



Abbildung 4: Einsatz im Feld im Seeland 2022 (Video). (Agroscope und Steketee)

3 Einsparpotenzial von Spotspraying

Die Testfahrten wurden bei zwei Gemüseproduzenten in Aarberg (BE) und in Galmiz (FR) in drei verschiedenen Kulturen 2022 und 2023 durchgeführt. Eine erste Testfahrt fand am 19. August 2022 in Salat statt. Weitere Testfahrten folgten am 17. und 18. Juli 2023 in Knollensellerie und am 6. September 2023 in Chinakohl. Bei allen Testfahrten wurden Band-Simulationen und Spotspraying-Überfahrten durchgeführt, wobei Wasser anstelle von Spritzbrühen verwendet wurde. Das Schema in Abbildung 5 stellt die Band- und Spotspray-Applikationen der flächigen Behandlung, wie sie standardmässig üblich ist, gegenüber.

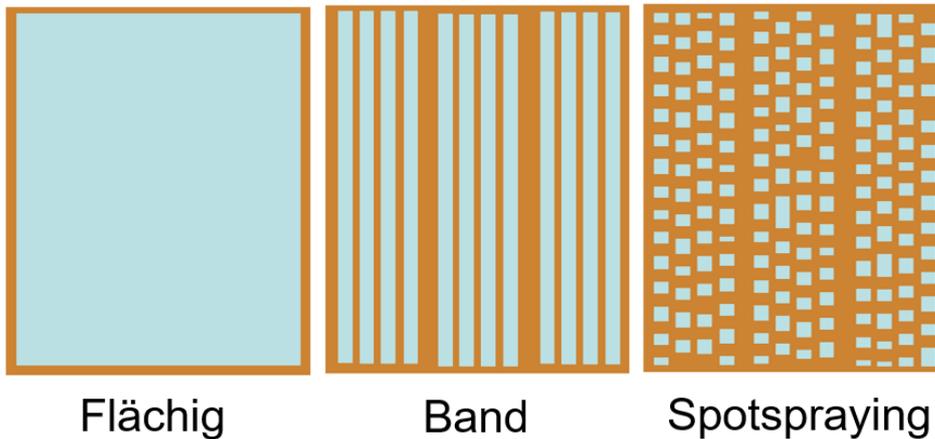


Abbildung 5: Darstellung einer flächigen Applikation (Standard), einer Band-Applikation und einer Spotspraying-Applikation. Es handelt sich hier um den für den Gemüsebau typischen Beetanbau mit vier Pflanzreihen, daraus ergeben sich die Behandlungsmuster.

3.1 Design und Parameter

Für die Spotspraying-Überfahrten wurden zuerst die entsprechenden Kulturen «gelernt» bzw. hinzugefügt über das Festlegen von Kamera- und Pflanzenerkennungseinstellungen. Danach wurde die ausgebrachte Menge anhand einer Überfahrt mit Wasser mit denselben Einstellungen bestimmt. Die ausgebrachte Menge pro Düse wurde in Plastiktüten, die um die Düsen befestigt waren, aufgefangen (siehe Abbildung 6) und danach gemessen.

Für die Band-Simulationen wurde stationär mit denselben Düsen, möglichst homogenen Drücken und der gleichen Zeitdauer wie bei der Spotspraying-Überfahrt ohne Unterbruch gespritzt. Bei den Band-Simulationen wurden ebenfalls Kollektoren an den Düsen befestigt, um die gespritzte Wassermenge zu sammeln. Diese Messungen wurden mit einer theoretischen Flächenbehandlung und den Spotspraying-Ergebnissen verglichen.



Abbildung 6: Sammeln von Wasser, das während einer Spotspraying-Überfahrt direkt aus den Düsen gespritzt wird. (Agroscope)

Die Flächen und behandelten Kulturpflanzen (Abbildung 7) und die getesteten Parameter für das Einsparpotenzial (Tabelle 1) sind nachfolgend dargestellt.



Abbildung 7: Gemüsebeet (oben) und Kulturstadium einer repräsentativen Pflanze (unten) am Tag der Testfahrten. Kulturarten von links nach rechts sind Salat (Lattich), Knollensellerie und Chinakohl. (Agroscope)

Tabelle 1: Parameter der Spotspraying-Überfahrten zur Bestimmung des Einsparpotenzials.

Parameter	Salat	Knollensellerie	Chinakohl
Testdatum	19.08.2022	17.-18.07.2023	06.09.2023
Beetbreite [m]	1.5	1.5	1.5
Beetlänge [m]	100	50	50
Beetgrösse [m ²]	150	75	75
Pflanzdichte [n/m ²]	9.7	7.2	6.7
Düsen	40-01 E	40-02 E	40-02 E
Düsenhöhe [cm]	16	20 - 25	34
Behandlungsbreite [cm]	12	15 - 18	25
Druck [bar]*	3.7 - 4.5	2.4 - 4.2	3.5 - 4
Geschwindigkeit [km/h]	3 - 3.5	3 - 4	3
Pflanzendurchmesser [cm]	11	24	21
Entwicklungsstadium [BBCH]	19	18	17
Kulturdeckungsgrad [%]	10	33	23

* Bei einer Geschwindigkeit von 3 bis 4 km/h müssen die Düsen je nach Pflanzgrösse und Pflanzabstand innerhalb der Reihe, 3- bis 4-mal pro Sekunde öffnen und schliessen. Dieses schnelle Öffnen und Schliessen führte zu Druckschwankungen.

Die Behandlungsbreite für Knollensellerie war am ersten Tag etwa 15 cm und am zweiten Tag 18 cm aufgrund der unterschiedlichen Düsenhöhe. Die Behandlungsbreite war kleiner als der Kulturpflanzendurchmesser (Breite), weil diese Testfahrten in Knollensellerie in Vorbereitung auf eine Insektizidapplikation durchgeführt wurden, bei der nur der innere Teil der Pflanze behandelt werden sollte (Blattlausbehandlung). Die Wirksamkeit dieser Applikation konnte witterungsbedingt nicht ausgewertet werden.

3.2 Bestimmung der Ausbringmengen und des Einsparpotenzials

Mit den Daten aus den Spotspraying-Überfahrten und Band-Simulationen liessen sich die Ausbringmengen der beiden Applikationsverfahren und im Vergleich zu einer Standardflächenbehandlung ermitteln. Die ausgebrachten Mengen der verschiedenen Verfahren wurden auf Grund der erhobenen Ausbringmengen, sowie der gespritzten Fläche (Düsenwinkel und Düsenhöhe über dem Boden) berechnet. Das Einsparpotenzial ist dann die Differenz zwischen einer flächigen Behandlung (100 %) und der bei Spotspraying oder bei Bandapplikation behandelten Fläche in Prozent.

3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die drei Kulturen sind in Abbildung 8 dargestellt. Bei der Testfahrt in Salat konnte mit 87 % das grösste Einsparpotenzial bestimmt werden im Vergleich zu einer flächigen Behandlung, bei Knollensellerie waren es 78 % und beim Chinakohl 58 %. Obwohl der Knollensellerie einen höheren Kulturdeckungsgrad aufwies als der Chinakohl, wurde bei Knollensellerie nur 22 % der Fläche behandelt. Dies ist auf die kleinere Behandlungsbreite, die für die Insektizidbehandlung der Pflanzenherzen vorgesehen war, zurückzuführen. Beim Chinakohl wurden bei Spotspraying 42 % der Fläche behandelt. Bei diesem wurde die Behandlungsbreite bewusst breiter (25 cm) gewählt als die Breite der Kulturpflanzen (21 cm), um die Wirkung der Insektizidbehandlung abzusichern (vgl. Wirksamkeitsversuch). Obwohl sich alle drei Kulturen in ähnlichen Wachstumsstadien befanden (BBCH 17-19), kann sich das Einsparpotenzial je nach Kultur und Geräteeinstellungen deutlich unterscheiden. Auch mit einer Bandbehandlung hätten 69, 56 und 34 % an Pflanzenschutzmitteln in Salat, Knollensellerie und Chinakohl zu den genannten Kulturstadien eingespart werden können.

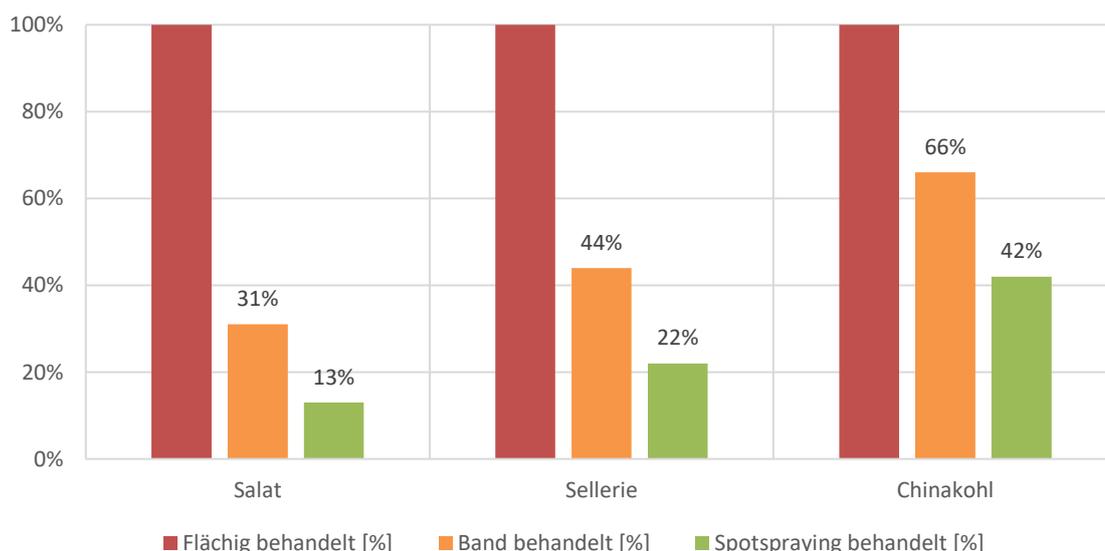


Abbildung 8: Anteil des Gemüsebeetes bzw. der Fläche in %, die pro Kultur und Behandlungsmethode behandelt wurde.

4 Wirkung gegen Erdflöhe

Im Rahmen des Projekts wurde ein Wirksamkeitsversuch auf einem Gemüsebetrieb in Aarberg, BE, durchgeführt. Dabei wurde eine Chinakohl-Kultur gegen Erdflöhe als Schlüsselschädlinge behandelt. Der Chinakohl wurde am 25.08.2023 gepflanzt. Die Applikation erfolgte 12 Tage nach der Pflanzung am 06.09.2023. Für den Versuch stand ein Beet von etwa 65 m Länge zur Verfügung. Damit das Gerät über eine gewisse Strecke fahren konnte, wurde angesichts der begrenzten Feldlänge und Fläche auf echte Wiederholungen verzichtet (Abbildung 9). Der Versuch umfasste zwei Varianten:

- Variante Spotspraying
- Unbehandelte Kontrolle

Die unbehandelten Kontrollflächen waren nur 15 und 7.5 m² gross, um zu verhindern, dass sich die Schädlingspopulationen auf dem ganzen Feld ausbreiten. Die behandelte Parzelle befand sich zwischen den zwei unbehandelten Teilflächen und war 75 m² gross (50 m lang bei 1.5 m Breite).

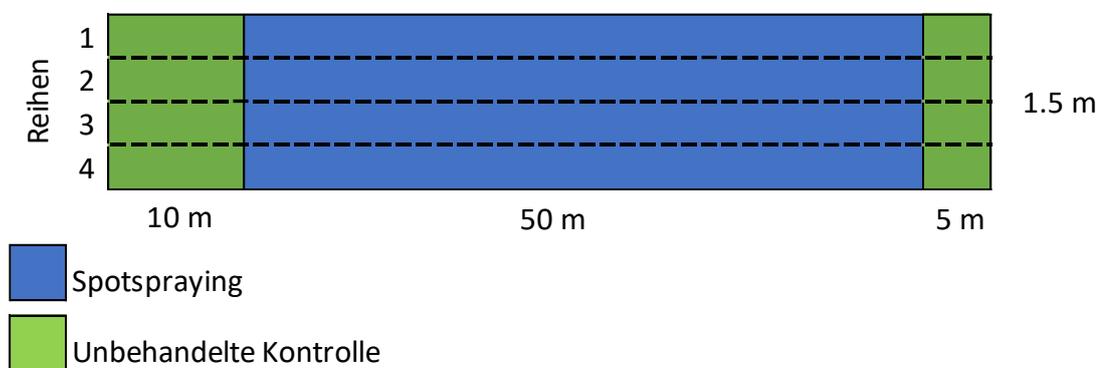


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Testbeets und des Versuchsdesigns.

Gegen die Zielorganismen (Erdflöhe) wurde das Insektizid Audienz (Wirkstoff: Spinosad, 480 g/l, SC, Omya Schweiz AG) eingesetzt. Die Behandlung erfolgte mit dem Prototyp II mit einer Spritzbrühe pro behandelte Fläche von 621 l/ha, was im Gemüseanbau üblich ist und eine gute Benetzung und Durchdringung sicherstellt. Es wurde kein Netzmittel beigemischt. Die Behandlungsparameter sowie die Angaben zur Kultur sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 2: Behandlungsparameter für den Wirksamkeitsversuch.

Behandlungsparameter	Angaben
Datum	06.09.2023
Uhrzeit	15:50:04 bis 15:51:00
Bewölkung	wolkenlos
Temperatur [°C]	30.6
Relative Feuchtigkeit [%]	75
Windstärke [m/s]	1 bis 2
Zu bekämpfender Schaderreger	Erdföhe
Insektizid	Audienz (Spinosad)
Konzentration Spritzbrühe [%]	0.038 (zugelassen 0.03-0.04 %)
Brühemenge angesetzt [l]	25
Abgemessen Audienz [ml]	9.6
Düsen	40-02 E
Düsenhöhe über Boden [cm]	~34 (je nach Bodenunebenheit)
Druck [bar]	3.5 (schwankend, Anzeige im Terminal)
Benetzung Kultur	gut
Geschwindigkeit geplant [km/h]	3
Geschwindigkeit realisiert [km/h]	3.2
Bandbreite [cm]	25
Anteil der behandelten Fläche [%]	42
Brühmenge pro Gesamtfläche [l/ha]	289
Brühmenge ausgebracht pro behandelte Fläche [l/ha]	621

Tabelle 3: Agronomische Angaben zur Kultur am Tag der Behandlung (06.09.2023).

Kulturparameter	Angaben
Beetbreite [m]	1.5
Anzahl Reihen [n]	4
Pflanzdichte [n/ha]	etwa 66'700 (gerechnet anhand der Reihen- und Pflanzabstände)
Effektive Pflanzdichte im behandelten Teil [n/ha]	64'800 (circa 3 % weniger)
Reihenabstände [cm]	30
Pflanzabstände [cm]	40
Kultur	Chinakohl
Pflanzdatum	25.08.2023
BBCH (Behandlungstermin)*	17
Durchmesser (längs Fahrtrichtung) [cm]*	21
Durchmesser (quer Fahrtrichtung) [cm]*	21
Kulturhöhe [cm]*	7
Gewicht (frisch) pro Pflanze [g]**	20
Blattfläche pro Pflanze [cm ²]**	364

* Mittelwerte von 25 Pflanzen

** Mittelwerte von 5 Pflanzen

4.1 Bestimmung der Wirksamkeit

Die Wirksamkeit wurde 9 Tage (15.09.2023) und rund zwei Wochen (21.09.2023) nach der Behandlung bestimmt. Im ersten Erhebungsteil wurden die Chinakohlpflanzen im Feld bonitiert. Die Spotsprayingparzelle wurde in zwei Blöcke aufgeteilt, in denen 10 Pflanzen pro Block untersucht wurden. In den beiden unbehandelten Kontrollparzellen wurden ebenfalls je 10 Pflanzen bonitiert. Die neueren, inneren Blätter der Pflanzen (Neuzuwachs seit der Behandlung) wurden auf Erdflorfrassschäden (Lochfrass) überprüft (Abbildung 10). Wenn Schäden vorhanden waren, wurden diese Pflanzen als «befallen/geschädigt» eingestuft. Konnten bei der Feldbonitur deutliche Frassschäden bzw. auch Unterschiede zwischen den Varianten beobachtet werden, folgte ein zweiter Erhebungsteil im Labor. Für diesen Boniturteil wurden je 10 Pflanzen aus den beiden Spotsprayingblöcken geerntet und je 10 Pflanzen aus den unbehandelten Kontrollparzellen. Die geernteten Pflanzen wurden anschliessend auf einer Skala von 1 bis 6 bewertet. Ein Wert von 1 bedeutet, dass die gesamte Pflanze überhaupt keine Frassschäden aufweist, und ein Wert von 6 bedeutet einen Anteil von mehr als 25 % geschädigter Blattfläche (EPPO, 2002). Die geschädigten Blätter wurden abgerüstet und gewogen. Die restlichen Blätter wurden samt Stiel gewogen. Die Anzahl der Löcher auf einem der inneren Blätter der Pflanze (Abbildung 10) wurde ebenfalls gezählt. Die Auswertung erfolgte deskriptiv.



Abbildung 10: Auswahl eines für die Wirksamkeitsbonituren untersuchten inneren Blattes (links). Rechts: Ausschnitt des Chinakohl-Gemüsebeets vom Versuch. (Agroscope)

4.2 Ergebnisse

Im Feld wurden am ersten Boniturtage (15.09.2023) deutlich weniger neue Frassschäden bei den behandelten Pflanzen beobachtet als bei den unbehandelten (Abbildung 11).

Fast alle Pflanzen beider Varianten, die für den Laborteil geerntet worden waren, hatten bei der Gesamtbonitur eine 2, nur drei der Kontrollpflanzen hatten einen Wert von 3. Ein Wert von 2 entspricht einer Schädigung von bis zu 2 % der Blattfläche. Dies ist plausibel, da die meisten Schäden an den Pflanzen vor der Behandlung entstanden sind und für die Gesamtbeurteilung die neuen Frassschäden nicht ins Gewicht fielen. Aus demselben Grund waren die Unterschiede bezüglich des Gewichts der Blätter mit Lochfrass (abgerüstet) und bezüglich des Gewichts der unbeschädigten Blätter zwischen der Variante Spotspraying und der unbehandelten Kontrolle sehr klein. Bei der Kontrolle betrug das durchschnittliche Gewicht der abgerüsteten Blätter 158 g und das Gewicht der unbeschädigten Blätter betrug 12 g. In der Spotsprayingvariante lagen diese Werte bei 173 g bzw. 27 g. In der Spotsprayingvariante wies das bonitierte, innere Blatt weniger Frasslöcher auf als bei der unbehandelten Kontrolle (siehe Abbildung 12). Die Spotsprayingvariante hatte einen Interquantilbereich (Bereich zwischen 1. und 3. Quantil) von 0 bis 1 Frassloch,

wobei der Median- und Mittelwert bei 0 bzw. 0.85 lagen. Bei der unbehandelten Kontrolle lag der Interquartilbereich zwischen 1 und 4 Frasslöchern, mit einem Median von 2 und einem Mittelwert von 2.6. Bezogen auf den Mittelwert ergibt das 67 % weniger Schäden für die Spotsprayingvariante im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle, was mit den Ergebnissen aus den Felderhebungen übereinstimmt.

Zwei Wochen nach der Behandlung wurde eine weitere Feldbonitur am 21.09.2023 durchgeführt. Bei dieser Bonitur fanden sich wenig bis gar keine Frassschäden auf den neueren, inneren Blättern, weder bei der Kontrolle noch bei der behandelten Parzelle. Daher wurden keine Pflanzen geerntet, und es wurde auf die Erhebung im Labor verzichtet.

Der Befallsdruck mit Erdflöhen war zum Zeitpunkt der Behandlung eher tief und nicht vergleichbar mit dem starken Auftreten in früheren Versuchen 2019 und 2020 (vgl. Keller et al., 2023). Zum Zeitpunkt der Applikation war aber unklar, ob der Schädlingsdruck noch weiter zunehmen würde, da die Temperaturen sehr hoch waren. Als Wirkstoff wurde Spinosad gewählt, da dieser im ÖLN ohne Einschränkungen eingesetzt werden kann und in Kohlarten gegen Erdflöhe bewilligt ist. Gemäss Firmenangaben hat Spinosad sowohl eine Frass- als auch eine Kontaktwirkung. Erfolgt die Wirkstoffaufnahme über Frass, sei der Wirkungsgrad fünf- bis zehnmals höher als bei der Kontaktwirkung (Omya Schweiz AG, 2021). Da nur ein Testbeet zur Verfügung stand, wurde im Versuch auf einen Vergleich mit einer Variante Feldspritze verzichtet. Im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle konnte eine Woche nach Behandlung eine Wirkung beobachtet werden. Die verwendete Spritzbrühenmenge pro behandelte Fläche und die Spritzbrühenkonzentration in der Spotsprayingvariante waren vergleichbar mit denen einer Behandlung mit der Feldspritze. Es ist daher unwahrscheinlich, dass es aufgrund der gezielten Applikation zu Minderwirkungen gekommen ist, insbesondere aufgrund der geschilderten Werkstoffeigenschaften und der Tatsache, dass gut 40 % der Fläche behandelt worden sind.

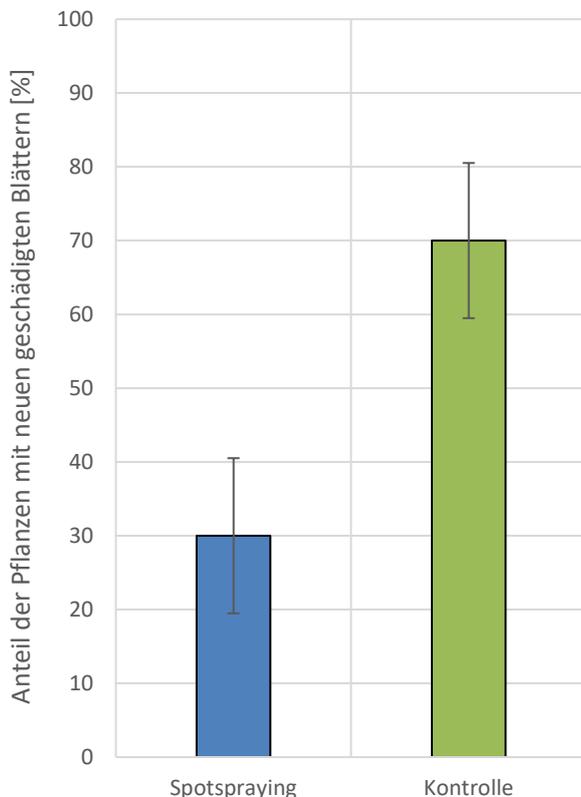


Abbildung 11: Anteil der Chinakohlpflanzen mit neuen, geschädigten Blättern in den beiden Varianten 9 Tage nach Behandlung.

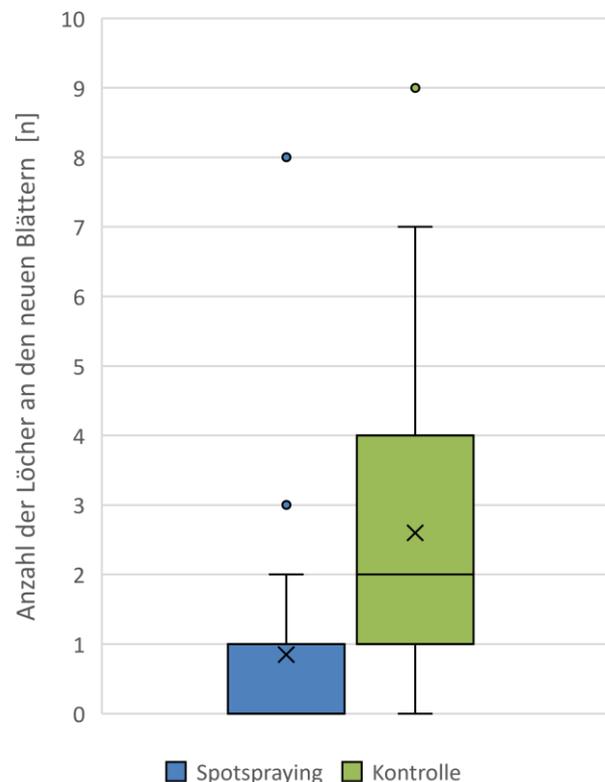


Abbildung 12: Anzahl der gezählten Löcher (Lochfrass) an den neuen inneren Blättern der Chinakohlpflanzen 9 Tage nach Behandlung.

5 Praxiserfahrungen

Bei den Testfahrten und Versuchen hat sich gezeigt, dass kompakte Pflanzen wie Salat oder Chinakohl zum Erkennen und Errechnen der Position einfacher sind als zum Beispiel Knollensellerie, der mehrere einzelne Blätter hat. Diese können sich bei der Überfahrt mit dem Gerät bewegen, was die Berechnung stören kann. Das kann dazu führen, dass die Applikation nicht immer zielgenau auf die Pflanze erfolgt.

Ist das Gerät einmal auf eine Kultur eingestellt und sind die Daten abgespeichert, können diese für weitere Sätze gebraucht werden. Allenfalls muss die Grösse der Pflanze angepasst werden. Das ist aber einfach am Terminal zu erledigen.

Grundsätzlich ist Spotspraying eine komplexe Technologie und erfordert daher vom Anwender einiges an Fachwissen und eine Affinität für Technik. Der Prototyp II ist kein Gerät, das einfach am Traktor angehängt und von nicht versiertem Personal eingesetzt werden kann. Wichtig ist, dass das Gerät optimal eingestellt ist. Das erfordert einiges an Erfahrung und Routine. Auf einem Betrieb sollte daher jemand für ein solches Gerät hauptverantwortlich sein und es auch regelmässig benützen.

Wichtig ist auch, dass die Herstellerfirma Steketee (neu LEMKEN) und der zuständige Landmaschinenhändler online Support geben können. Ist das nicht gewährleistet, wird es im Falle von Störungen unter Umständen für den Anwender schwierig, diese zu beheben und das Gerät konform einzusetzen.

6 Dosierschema für Pflanzenschutzmittel

Für eine Behandlung ist es wichtig, die notwendige Brühmenge möglichst genau vorgängig zu berechnen, um eine Fahrt zurück zum Hofplatz (zu wenig Brühe) bzw. Restmengen im Tank (zu viel Brühe) vermeiden zu können. Bei einer flächigen Behandlung reichen die Angaben zur Grösse der zu behandelnden Fläche, die gewünschte Brühmenge sowie die bewilligte Aufwandmenge vom Pflanzenschutzmittel aus, um die notwendige Brühmenge sowie die einzufüllende Menge Pflanzenschutzmittel zu berechnen. Bei Spotspraying braucht es hingegen weitere Angaben wie beispielsweise die tatsächliche Pflanzdichte im Feld und die Grösse der Kulturpflanze. Um diese zu bestimmen, sind Messungen im Feld und eine Berechnungsmethode erforderlich, damit der Anwender die Brühmenge und benötigte Produktmenge einfach berechnen kann (Dosierschema).

Im Rahmen des ersten Spotspraying-Projekts wurde bereits ein Dosierschema entwickelt. In Appendix II wird detailliert beschrieben, wie dieses konzeptionell an den zweiten Prototyp angepasst wurde.

7 Wirtschaftliche Aspekte

Mit dem neuen Gerät (Prototyp II), das nur noch für Spotspraying konzipiert und im Rahmen dieses Projekts gebaut worden ist, können höhere Fahrgeschwindigkeiten als mit dem Prototyp I realisiert werden. Dies dürfte sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Die höhere Fahrgeschwindigkeit kann dank dem Verzicht auf das Hacken erreicht werden. Dadurch ist das Gerät auch leichter und kostengünstiger. Die Arbeitsbreite beider Prototypen beträgt 1.5 m. Wobei der Prototyp II auch für 1.8 m Beete mit bis zu sechs Pflanzreihen ausgerichtet ist. Im Projekt wurde mit Beetbreiten von 1.5 m und vier Pflanzreihen pro Beet gearbeitet.

Um den Prototyp II zu evaluieren und ihn sowohl mit einem Standard als auch mit dem Prototyp I vergleichen zu können, wurde eine Teilkostenrechnung durchgeführt. Für diese Studie wurde die Produktion von 1 ha Kopfsalat im Freiland gewählt, da anhand dieses Fallbeispiels der Prototyp I bereits evaluiert worden war (Keller et al., 2023).

7.1 Kalkulationsgrundlagen

Für die Teilkostenrechnung im Pflanzenschutz (Bekämpfung von Unkräutern, Krankheiten und Schädlingen) wurde eine Standardstrategie mit den Strategien «Prototyp I» und «Prototyp II» verglichen. Die folgende Tabelle 4 zeigt die verschiedenen Strategien im Detail. Das Einsparpotenzial für beide Prototypen (84 % für die erste Behandlung und 28 % für die zweite Behandlung) wurde anhand von Kulturparameter-Messungen von Kopfsalat während der Saison 2023 bestimmt.

Tabelle 4: Vergleich von Pflanzenschutzstrategien für Kopfsalat¹

Standard (Behandlungen mit der Feldspritze)				
Vor der Pflanzung	Nach der Pflanzung	10 Tage nach Pflanzung	Beginn Kopfbildung	7 Tage vor der Ernte
<i>Herbizide</i>		<i>Fungizide gegen Falschen Mehltau, Botrytis und Sclerotinia</i>		
Stomp Aqua 2.2 l/ha	Kerb Flo 2.5 l/ha	Previcur Energy 1.5 l/ha + Pyrus 400 SC 2 l/ha	Revus 0.6 l/ha	Revus 0.6 l/ha
		<i>Insektizide gegen Blattläuse, Thripse und Raupen</i>		
		Movento SC 0.75 l/ha	Movento SC 0.75 l/ha + Audienz 0.2 l/ha	Dipel DF 0.6 kg/ha
Prototyp I (bei den ersten beiden Behandlungen mit dem Prototyp I wird gleichzeitig gehackt, die dritte Behandlung wird mit der Feldspritze durchgeführt)				
Vor der Pflanzung	Nach der Pflanzung	10 Tage nach Pflanzung*	Beginn Kopfbildung*	7 Tage vor der Ernte
<i>Herbizide</i>		<i>Fungizide gegen Falschen Mehltau, Botrytis und Sclerotinia</i>		
**	**	Previcur Energy 0.24 l/ha + Pyrus 400 SC 0.32 l/ha	Revus 0.43 l/ha	Revus 0.6 l/ha
		<i>Insektizide gegen Blattläuse, Thripse und Raupen</i>		
		Movento SC 0.12 l/ha	Movento SC 0.54 l/ha + Audienz 0.14 l/ha	Dipel DF 0.6 kg/ha
Prototyp II (die ersten beiden Behandlungen erfolgen mit der Feldspritze, da die Herbizide flächig ausgebracht werden müssen, die dritte und vierte Behandlung erfolgt mit dem Prototyp II und die fünfte erfolgt wieder mit der Feldspritze)				
Vor der Pflanzung	Nach der Pflanzung	10 Tage nach Pflanzung*	Beginn Kopfbildung*	7 Tage vor der Ernte
<i>Herbizide</i>		<i>Fungizide gegen Falschen Mehltau, Botrytis und Sclerotinia</i>		
Stomp Aqua 2.2 l/ha	Kerb Flo 2.5 l/ha	Previcur Energy 0.24 l/ha + Pyrus 400 SC 0.32 l/ha	Revus 0.43 l/ha	Revus 0.6 l/ha
		<i>Insektizide gegen Blattläuse, Thripse und Raupen</i>		
		Movento SC 0.12 l/ha	Movento SC 0.54 l/ha + Audienz 0.14 l/ha	Dipel DF 0.6 kg/ha
* 10 Tage nach der Pflanzung können mit dem Prototyp I und Prototyp II 84 % eingespart werden an Pflanzenschutzmitteln, Beginn Kopfbildung (25 Tage nach der Pflanzung) 28 %, kurz vor der Ernte deckt der Salat so viel Boden ab, dass fast kein Pflanzenschutzmittel mehr eingespart werden kann und daher die Behandlung mit der Feldspritze erfolgt.				
** Beim Prototyp I wurden keine Herbizide vor oder nach der Pflanzung eingesetzt, da das Unkraut während der ersten beiden Behandlungen gehackt wurde.				

¹ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an AGROLINE Pflegestrategie für Kopfsalat (AGROLINE, 2023).

Die Kosten für die Produktion von 1 ha Kopfsalat im Freiland mit der Standardstrategie wurden mithilfe des Vollkostenkalkulationstool «ProfiCost» (SZG, 2023) berechnet. In dieser Teilkostenrechnung wurde nur der Pflanzenschutz berücksichtigt (Tabelle 5). Die Kalkulationen und Werte wurden dem ProfiCost-Tool (SZG, 2023) und dem Agroscope-Kostenkatalog (Bütler et al., 2023) entnommen und angepasst. Wenn es eine Diskrepanz zwischen den beiden gab, wurden die Werte von ProfiCost (SZG, 2023) verwendet. Es gilt die Annahme, dass die Änderung der Strategie für die Unkrautbekämpfung und den Pflanzenschutz (von der Standardstrategie zum PS-Roboter) keine Unterschiede in Bezug auf den Düngbedarf, den Ertrag oder die Erlöse verursacht (Keller et al., 2023).

Tabelle 5: Modellannahmen für die wirtschaftlichen Kalkulationen¹ für Pflanzenschutzstrategien in Kopfsalat

Strategie	Standard	Prototyp I	Prototyp II		
			bei 3 km/h	bei 4.5 km/h	bei 6 km/h
Anzahl Durchgänge Spritze [n]	5 Spritzdurchgänge Die Herbizide werden solo mit der Feldspritze vor und nach der Pflanzung flächig ausgebracht (2 ÜF*). Die Insektizide und Fungizide werden in Tankmischung flächig mit der Feldspritze ausgebracht (3 ÜF*).	3 Spritzdurchgänge Keine Behandlung mit Herbiziden nötig, da in und zwischen der Reihe gehackt wird. Die Insektizide und Fungizide werden in Tankmischung mit dem Prototyp I gezielt ausgebracht (2 ÜF*). Die letzte Behandlung (1 ÜF*) erfolgt flächig mit der Feldspritze**.	5 Spritzdurchgänge Die Herbizide werden solo mit der Feldspritze vor und nach der Pflanzung flächig ausgebracht (2 ÜF*). Die Insektizide und Fungizide werden in Tankmischung mit dem Prototyp II gezielt ausgebracht (2 ÜF*). Die letzte Behandlung (1 ÜF*) erfolgt flächig mit der Feldspritze**.		
Variante			bei 3 km/h	bei 4.5 km/h	bei 6 km/h
Flächenleistung [ha/h]	2.53	0.21	0.37	0.51	0.63
Arbeitskosten [Fr./h]	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1
Traktorkosten [Fr./h]	43	43	43	43	43
Maschinenkosten [Fr./ha] (ohne Traktorkosten)	44 (Anbaufeldspritze 12 m Balken, 600 l Fass)	559	233	175	140
Auslastung [ha]***	50	40	75	100	125

¹ Quelle: Eigene Darstellung, die Angaben zu den Arbeitskosten und der Auslastung stammen von ProfiCost (SZG, 2023) und vom Agroscope-Kostenkatalog (Bütler et al., 2023).

* ÜF: Überfahrt

** Zu diesem Zeitpunkt lohnt sich der Einsatz der PS-Roboter nicht mehr, da der Kulturbedeckungsgrad sehr hoch ist und daher das Einsparpotenzial sehr gering ist.

*** mit «Auslastung» ist die behandelte Fläche pro Fahrt multipliziert mit der Anzahl Behandlungen gemeint. Die Auslastung der Feldspritze ist dem Agroscope-Kostenkatalog (Bütler et al., 2023) entnommen. Die Auslastung für die Prototypen wird berechnet, indem man die angenommene jährliche Auslastung von 200 Stunden nimmt und mit der Flächenleistung multipliziert.

7.2 Weitere Annahmen und verwendete Werte

Die Ergebnisse der verschiedenen Strategien und Strategievarianten hängen stark von den getroffenen Annahmen ab. Im Rahmen des ersten Spotspraying-Projekts waren umfassende arbeitswirtschaftliche Studien und Teilkostenrechnungen durchgeführt worden. Für diese Arbeiten und Berechnungen wurden Systemgrenzen definiert und Annahmen getroffen. Für das vorliegende Projekt wurden die meisten dieser Annahmen übernommen und bei Bedarf an die Eigenschaften des Prototyps II angepasst. Die Flächenleistung für den Prototyp I wurde aus den arbeitswirtschaftlichen Studien abgeleitet und basierte auf dem bisher höchsten realisierten Wert von 0.21 Hektar pro Stunde, der mit dem ersten Prototyp erreicht worden war. Ähnliche Berechnungen wurden für den Prototyp II vorgenommen und ergaben eine Leistung von 0.37, 0.51 und 0.63 Hektar pro Stunde bei 3, 4.5 bzw. 6 km/h. Beim Prototyp I wurde davon ausgegangen, dass die Arbeitsleistung auf dem Feld beim Hacken und Spritzen die gleiche ist wie beim reinen Hacken. Für den Prototyp II wurde angenommen, dass für die Vorbereitungszeit sowie für das Wenden gleich viel Zeit gebraucht wird wie beim Prototyp I. Bei einer Flächenleistung von 0.21 ha/h kann der Prototyp I etwa 2 ha pro Tag bearbeiten, während der Prototyp II zwischen 4 und 6 ha pro Tag bearbeiten kann, dank der höheren Flächenleistung bzw. Fahrgeschwindigkeit. Dabei wurde von einem Arbeitstag von etwa zehn Stunden ausgegangen, was der Realität auf Gemüsebetrieben in den Sommermonaten entspricht.

Die Annahme aus dem ersten Spotspraying-Projekt, bei dem der Prototyp I von Mai bis Ende August etwa fünfmal im Monat eingesetzt wird, wurde auch für den Prototyp II übernommen. Wenn der Prototyp I vier Monate lang fünfmal im Monat eingesetzt wird, können mit dem ersten Prototyp insgesamt 40 ha behandelt und gehackt werden, während mit der höheren Leistung und Geschwindigkeit des zweiten Prototyps zwischen 75-125 ha pro Jahr behandelt werden können. Wird der Prototyp I zum Beispiel zweimal pro Salatsatz eingesetzt, könnten mit diesem 20 ha bewirtschaftet (behandelt und gehackt) werden, mit dem Prototyp II hingegen 37-63 ha.

Die Anschaffungspreise der Prototypen I und II wurde in Konsultation mit H. Möri (Möri AG Kartoffel- und Gemüsebautechnik, Aarberg) geschätzt. Die Maschinenkosten für die Anbaufeldspritze und die PS-Roboter (Tabelle 6) sind vom Agroscope-Kostenkatalog (Bütler et al., 2023) übernommen und angepasst worden.

Tabelle 6: Modellannahmen Maschinenkosten Prototyp I und II ¹

	Prototyp I (1.5 km/h)		Prototyp II (3 km/h)		Prototyp II (4.5 km/h)		Prototyp II (6.0 km/h)	
Leistung [ha/h]	0.21		0.37		0.51		0.63	
Anschaffungspreis [Fr.]	135'000		105'000		105'000		105'000	
Einsatzdauer pro Jahr [h]	200		200		200		200	
Auslastung pro Jahr [ha]	40		75		100		125	
Abschreibungszeit [a]	10		10		10		10	
Technische Nutzungsdauer [ha]	500		940		1'250		1'560	
Auslastungsgrad [%]	80		80		80		80	
Restwert [Faktor]	0.1		0.1		0.1		0.1	
Belastungsgrad Motor [%]	0.6		0.3		0.3		0.3	
Reparatur- Unterhaltsfaktor RUF [Faktor]	0.6		0.6		0.6		0.6	
Gebäudebedarf [m ³]	25		25		25		25	
Verwaltungs- und Risikozuschlag [%]	10		10		10		10	
Weitere Zuschläge [%]	-		-		-		-	
Kostenberechnung in Fr.	pro Jahr	pro Hektare	pro Jahr	pro Hektare	pro Jahr	pro Hektare	pro Jahr	pro Hektare
Abschreibungszeit [a]	12'150		9'450		9'450		9'450	
Zinskosten	1'296		1'008		1'008		1'008	
Gebäudekosten	150		150		150		150	
Versicherungen und Gebühren	150		150		150		150	
Total Fixkosten	13'746	344	10'758	143.44	10'758	108	10'758	86
Reparaturen und Unterhalt		165		68.32		51		41
Treibstoff		-		-		-		-
Hilfsstoffe		-		-		-		-
Total Variable Kosten		165		68.32		51		41
Entschädigungsansatz netto (ohne Zuschläge) [Fr./ha]		508		212		159		127
Entschädigungsansatz inkl. Zuschläge [Fr./ha]		559		233		175		140
Entschädigung pro Stunde [Fr./h]		117		86		89		88

¹ Quelle: Agroscope-Kostenkatalog (Bütler et al., 2023); Anschaffungspreis Prototyp: Experteneinschätzungen

7.3 Ergebnisse

Bei den Gesamtkosten für den Pflanzenschutz pro Hektar schneidet der Prototyp II besser als der Prototyp I ab und kommt dem Standardverfahren deutlich näher (Abbildung 13). Die Gesamtkosten für den Pflanzenschutz setzen sich zusammen aus den Kosten für die Pflanzenschutzmittel, den Arbeitskosten für die Applikation sowie den Kosten für den Traktor und für die entsprechende Spritze (inklusive Abschreibung). Die Kosten für den Pflanzenschutz pro Hektar betragen für das Standardverfahren 1'375 Fr./ha. Für den Prototyp I steigen diese Kosten um 986 Fr./ha oder betragen 42 % mehr als beim Standardverfahren. Beim Prototyp II sind es bei 3 km/h 360 Fr./ha oder 21 % mehr als beim Standardverfahren, während es bei 4.5 und 6 km/h, 140 bzw. 17 Fr./ha (9 bzw. 1 %) mehr sind als beim Standardverfahren. D.h. bei einer Geschwindigkeit von 6 km/h ist die Strategie mit dem Prototyp II vergleichbar teuer wie der Standard bei den getroffenen Annahmen, sofern eine hohe Auslastung realisiert werden kann.

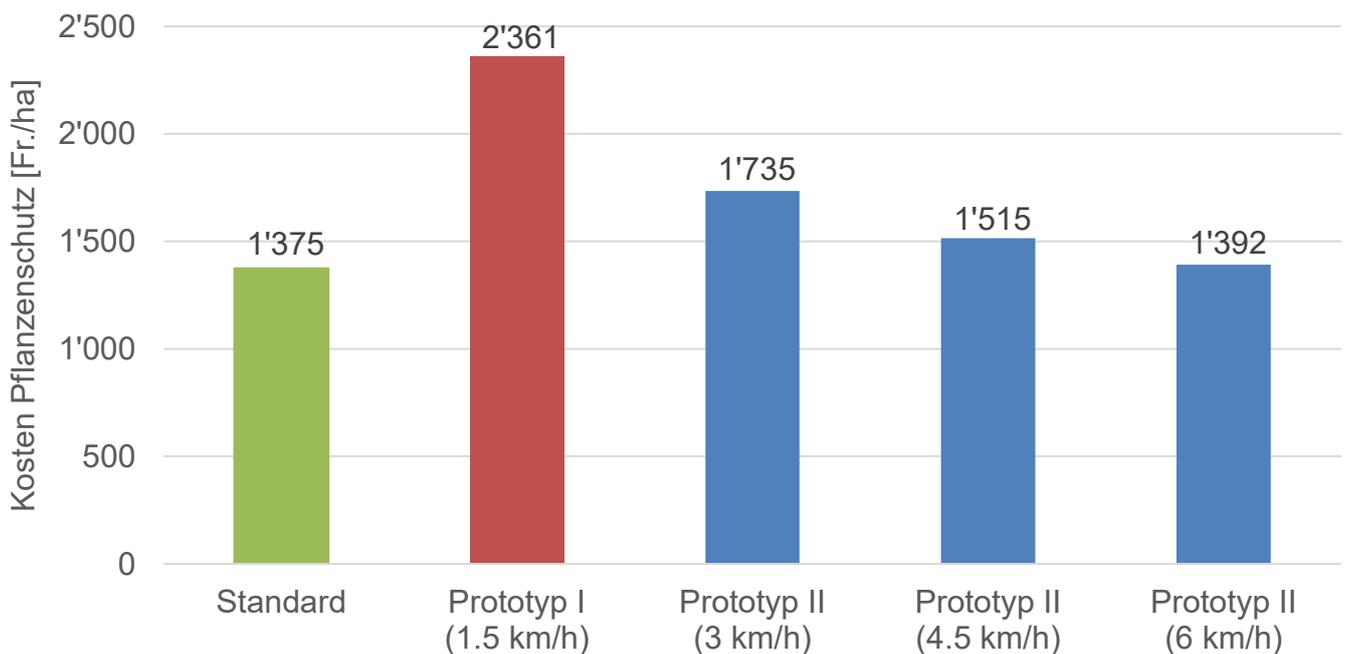


Abbildung 13: Pflanzenschutzkosten pro Verfahren in Kopfsalat.

Werden die Gesamtkosten für den Pflanzenschutz in Pflanzenschutzmittel-, Maschinen- und Arbeitskosten aufgeteilt (Abbildung 14), wird deutlich, dass die Pflanzenschutzmittelkosten im Standardverfahren mit 938 Fr./ha den grössten Teil, nämlich 68 % der Gesamtkosten, ausmachen.

Bei Prototyp I und II dominieren die Maschinenkosten die gesamten Pflanzenschutzkosten. Für den Prototyp I betragen die Maschinenkosten 1'645 Fr./ha. Beim Prototyp II sinken diese Kosten bei einer Geschwindigkeit von 3 km/h auf 937 Fr./ha, bei einer Geschwindigkeit von 4.5 km/h auf 757 Fr./ha und bei einer Geschwindigkeit von 6 km/h auf 655 Fr./ha. Die Maschinenkosten für die PS-Roboter sind zwei- bis viermal so hoch wie die Maschinenkosten für das Standardverfahren.

Da die PS-Roboter deutlich weniger Pflanzenschutzmittel ausbringen, sind auch ihre Kosten für die Mittel deutlich tiefer. Der Prototyp I hat die geringsten Pflanzenschutzmittelkosten, bei 425 Fr./ha, da auch keine Herbizide ausgebracht werden. Die Pflanzenschutzmittelkosten für den Prototyp II betragen 597 Fr./ha, da die Unkrautbekämpfung chemisch mit der Feldspritze erfolgt.

Die Arbeitskosten waren bei den PS-Robotern deutlich höher als beim Standardverfahren. Beim Prototyp I liegen die Kosten 215 Fr./ha höher als beim Standardverfahren, während sie bei Prototyp II 65 bis 125 Fr./ha höher sind als beim Standardverfahren.

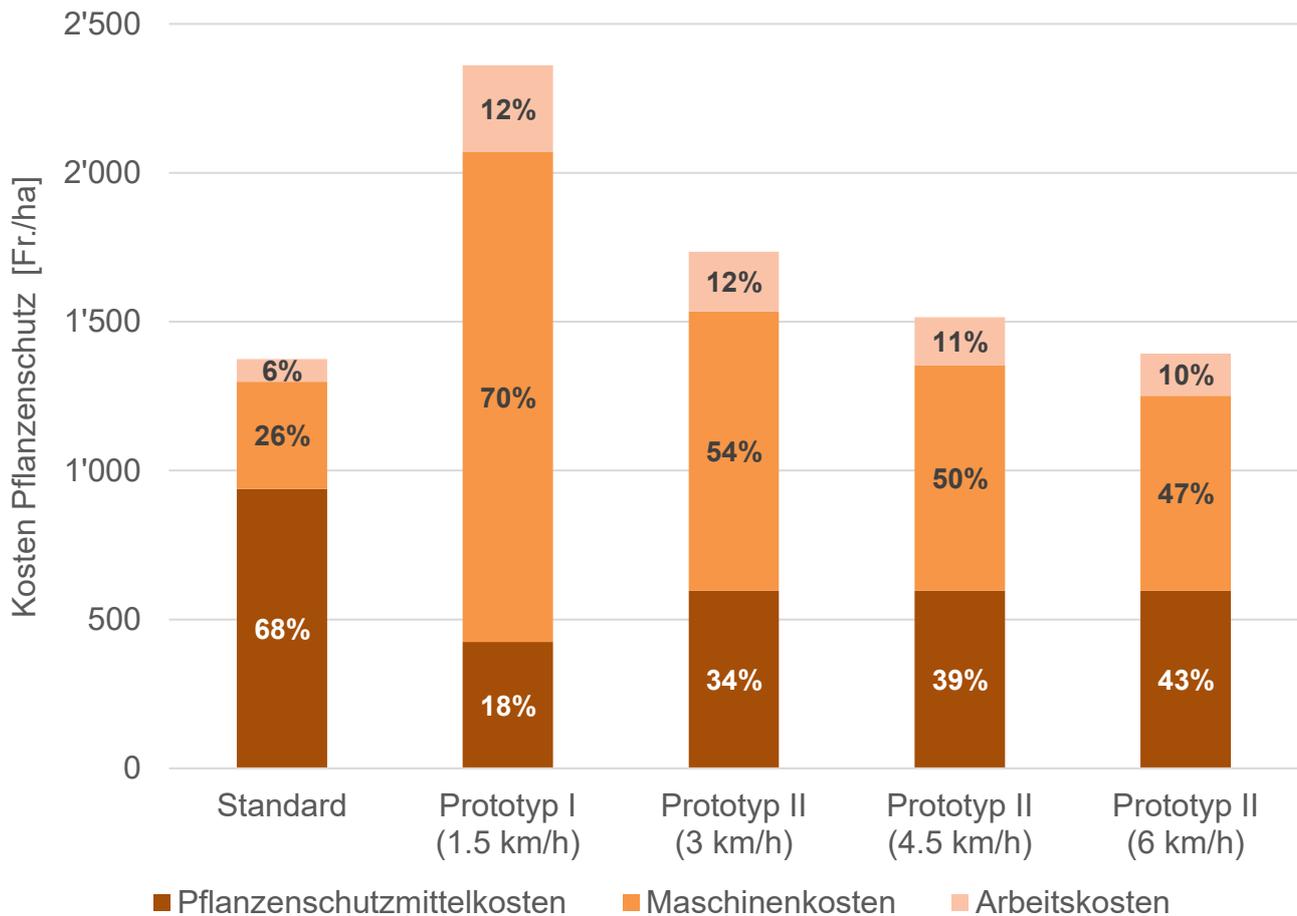


Abbildung 14: Pflanzenschutzkosten der Verfahren in Kopfsalat aufgeteilt nach Maschinen- und Arbeitskosten sowie Kosten für die Pflanzenschutzmittel.

7.4 Sensitivitätsanalyse

Wie bereits erwähnt, hängen die wirtschaftlichen Ergebnisse der verschiedenen untersuchten Varianten stark von den Annahmen ab, die getroffen wurden. Wo immer möglich, wurden die Annahmen aus dem ersten Spotspraying-Projekt übernommen. Einige der Annahmen sowie Anpassungen wurden in einer Sensitivitätsanalyse untersucht, um zu sehen, wie stark die wirtschaftlichen Ergebnisse von diesen abhängen. Die Sensitivitätsanalyse wurde für die Fahrgeschwindigkeiten von 4.5 km/h und 6 km/h beim Prototyp II durchgeführt, da dies die angestrebten Geschwindigkeiten sind. Die Ergebnisse dieser Tests werden im Folgenden beschrieben.

Auslastung pro Jahr: Bereits im vorherigen Projekt wurde angenommen, dass der Prototyp 200 Stunden pro Jahr genutzt werden könnte. Für den Prototyp I ergab dies eine Auslastung pro Jahr von 40 ha, für den Prototyp II eine Auslastung von 100 bzw. 125 ha für die jeweiligen Fahrgeschwindigkeiten von 4.5 bzw. 6 km/h. Wird die Auslastung auf 40 ha statt auf 200 Stunden pro Jahr begrenzt, würden sich die Kosten für den Prototyp II um 25 bis 30 % erhöhen. Daher macht unsere Annahme von 200 Stunden einen grossen Unterschied bezüglich der Kosten.

Mehrkosten pro Behandlung: Für die Feldspritze wurde mit einer Auslastung von 50 ha pro Jahr gerechnet (Agroscope-Kostenkatalog, Bütler et al., 2023). Beim Prototyp I hingegen wurde angenommen, dass ein Betrieb dieses Kombigerät (Hacken und Behandeln) 5 Tage pro Monat während der Hauptsaison einsetzt. Dies entspricht 200 h pro Jahr. Diese Annahme wurde für den Prototyp II mit der Überlegung übernommen, dass ein Betrieb ein relativ teures Gerät möglichst auslasten will. Um eine Hektare zu behandeln, benötigt der Prototyp II bei 4.5 km/h knapp 2 Stunden bzw. 1 h und 35 min bei 6 km/h. Dies ergibt eine Auslastung von 100 ha pro Jahr bei 4.5 km/h und

125 ha pro Jahr bei 6 km/h. Dies ist wesentlich mehr als die Auslastung der Feldspritze. Für die anfallenden Mehrkosten, die einem Gemüseproduzenten entstehen, wenn er statt einer flächigen Behandlung die umweltschonendere Spotspraying-Behandlung wählt, sollte die Auslastung der beiden Applikationstechniken gleich sein bzw. auf 50 ha begrenzt werden. Die erste Spotspraying-Behandlung, bei der 84 % weniger Fungizid und Insektizid ausgebracht werden, ist dann 111 bis 138 Fr./ha teurer als die flächige Behandlung (22-26 %). Bei der zweiten Behandlung, bei der noch 28 % an Fungizid und Insektizid eingespart werden kann, fallen Mehrkosten von 307 bis 334 Fr./ha an (48-50 %). Eine Auslastung von 50 ha pro Jahr für Feldspritzen erscheint gering, ist jedoch realistisch für Gemüsebetriebe. Bei diesen sind die Applikationen zeitkritisch und daher erfolgen sie durch den Betrieb und nicht durch den Lohnunternehmer auch wenn das günstiger wäre.

Feldspritzenbreite: Im Spotspraying-Projekt I wurde angenommen, dass die flächigen Behandlungen mit einer Anbaufeldspritze mit einer Balkenbreite von 12 m und einer Fassgrösse von 600 l erfolgen. Diese Annahme wurde beibehalten. Diese Art von Feldspritzen wird auf eher kleinen Betrieben verwendet und diese ist im ProfiCost-Tool (SZG, 2023) als Standard vorgegeben. Wenn statt mit dieser mit einer Spritze mit breiterem Spritzbalken gerechnet wird, wie sie auf grösseren Betrieben eingesetzt wird, z.B. einer Anbaufeldspritze mit 21 m Balken und 1000 l Fass, ergibt dies einen Rückgang der gesamten Pflanzenschutzkosten um 12 % für das Standardverfahren, 7 % für Prototyp II und 1 % für Prototyp I (Abbildung 15). Dies ist zu erwarten, da die Kostenunterschiede bei den Strategien, die öfters die Feldspritze einsetzen, grösser sind als bei denen, die die Spritze nur wenige Male einsetzen (vgl. Tabelle 5: Anzahl Überfahrten mit Feldspritze: Standardverfahren fünfmal; Verfahren Prototyp I einmal; Verfahren Prototyp II dreimal).

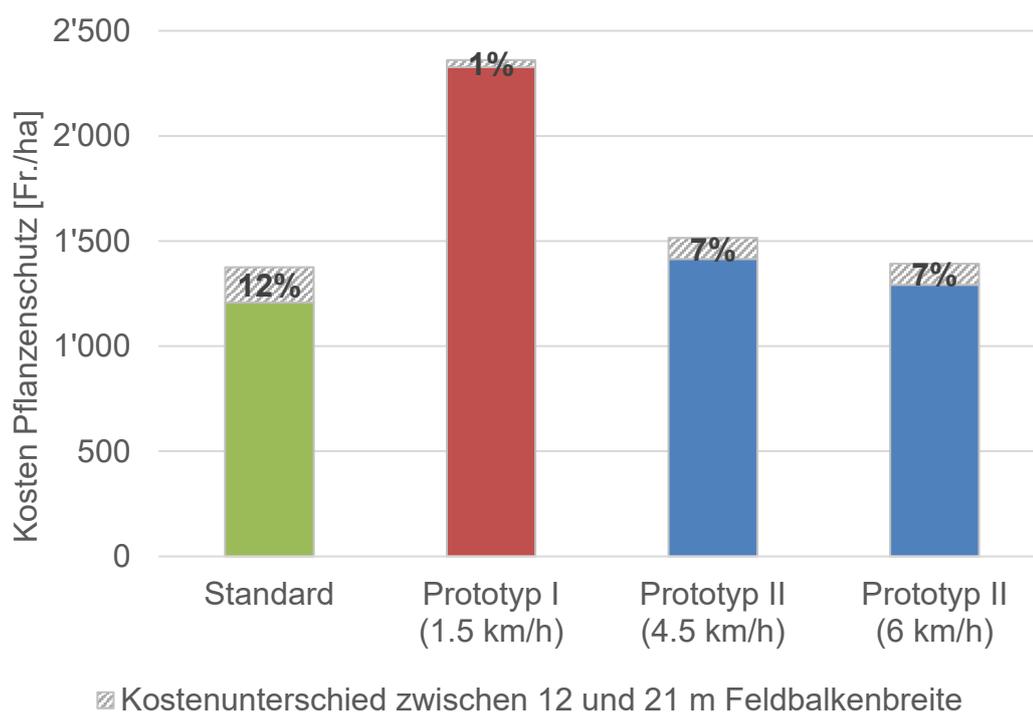


Abbildung 15: Kostenunterschied zwischen 12 und 21 m Feldspritzenbreite für ausgewählte Pflanzenschutz-Verfahren in Kopfsalat.

Arbeitsbreite: Es wurde auch die Idee diskutiert, die Arbeitsbreite auf 4.5 m d.h. auf 3 Beete zu erweitern. Damit könnte die Schlagkraft wesentlich erhöht werden. Eine Verdreifachung der Arbeitsbreite würde jedoch auch den Anschaffungspreis deutlich erhöhen. Um wieviel, ist schwierig abzuschätzen. Wäre der Anschaffungspreis beispielsweise doppelt so hoch wie vom Prototyp II und blieben die anderen Annahmen gleich, wären die Gesamtkosten für den Pflanzenschutz zwischen 190 und 250 Fr./ha resp. 16-18 % tiefer im Vergleich zur Arbeitsbreite von 1.5 m. Ein so breites Gerät würde eine Anpassung des Anbaus bedingen, so müssten auch drei Beete gleichzeitig gesetzt werden oder es müsste ein RTK-GNSS Lenksystem eingesetzt werden.

Jäten von Hand: In ProfiCost (SZG, 2023) werden pro Hektar Kopfsalat 30 Stunden Handjäten veranschlagt. Das entspricht 816 Fr./ha an zusätzlichen Pflanzenschutzkosten. Da nicht alle Kopfsalatparzellen so stark verunkrautet sind, dass von Hand gejätet werden muss, wurde dieser Posten von den PSM-Kostenberechnungen ausgenommen. Muss von Hand gejätet werden, steigen die Kosten beim Standard und beim Prototyp II. Selbst, wenn 30 Stunden Handjäten verrechnet werden, ist die Standardstrategie immer noch 173 Fr. günstiger pro ha als der Prototyp I. Der Prototyp II ist 156 Fr. pro ha resp. 33 Fr. pro ha günstiger bei 6 km/h bzw. bei 4.5 km/h als der Prototyp I.

8 Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit Spotspraying können in Reihenkulturen im Gemüsebau in der ersten Kulturhälfte bedeutende Mengen an Insektiziden und Fungiziden eingespart werden. In Salat mit einem mittleren Pflanzendurchmesser von 11 cm konnte ein Pflanzenschutzmittel-Einsparpotenzial von 87 % bestimmt werden. Bei Knollensellerie (Ø 24 cm) waren es 78 % und bei Chinakohl (Ø 21 cm) 58 %. Das Einsparpotenzial hängt von der Pflanzdichte, der Pflanzengröße, der Uniformität des Bestands und den Geräte-Einstellungen ab. Bei Knollensellerie wurde eine Behandlung gegen Blattläuse simuliert. Diese befanden sich nur auf den innersten Blättern. Dementsprechend wurde das Behandlungsband schmaler eingestellt als die Kulturbreite. Beim Chinakohl hingegen war das behandelte Band 4 cm breiter als die Chinakohlpflanzen. Dies ist zur Wirkungsabsicherung sinnvoll und trägt auch der Variabilität im Feld Rechnung. Spotspraying bietet auch ein Einsparpotenzial, wenn es zu Fehlstellen aufgrund extremer Wetterbedingungen oder beispielsweise durch Vogelfrass im Bestand kommt. Dies bedingt aber, dass die benötigte Brühmenge ausreichend genau berechnet werden kann. Im Wirksamkeitsversuch, bei dem in Chinakohl mit dem Prototyp II eine Behandlung mit Audienz (Spinosad) durchgeführt wurde, konnten Erdflöhschäden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle deutlich reduziert werden. Die Spinosadwirkung ist um ein Vielfaches höher, wenn der Wirkstoff über Frass aufgenommen wird, als über Kontakt. Daher sollte es bei einer gezielten Behandlung auf die Kulturpflanzen zu keinen Minderwirkungen kommen im Vergleich zu einer flächigen Behandlung. Dies konnte aufgrund der begrenzten Testfläche aber nicht geprüft werden. In den Wirksamkeitsversuchen, die im ersten Projekt mit dem ersten Prototyp durchgeführt worden sind, wurden keine Minderwirkungen im Vergleich zur Feldspritze beobachtet. In den Versuchen wurden damals Erdflöhe in Pak Choi und Blattläuse in Salat bekämpft. Minderwirkungen sind jedoch denkbar, je nach Schaderreger-Wirkstoff-Kombination.

Der Prototyp II wurde mit Fahrgeschwindigkeiten von 3 bis 6 km/h erfolgreich im Feld getestet. Es zeigte sich, dass kompakte Pflanzen wie Salat oder Chinakohl zum Erkennen und Errechnen der Position einfacher sind als zum Beispiel Knollensellerie, der mehrere einzelne Blätter hat. Diese bewegten sich bei der Überfahrt, was die Berechnung störte und zur Folge hatte, dass die Applikation nicht immer zielgenau auf die Pflanzen erfolgte. Die Spotspraying-Technologie ist komplex und erfordert daher einen versierten Benutzer. Auf einem Betrieb sollte jeweils eine Person für das Gerät hauptverantwortlich sein und es auch regelmässig benützen. Auch der online-Support durch die Herstellerfirma und durch den zuständigen Landmaschinenhändler ist sehr wichtig. Ist der Support nicht gewährleistet, wird es im Falle von Störungen für den Anwender schwierig, diese zu beheben und das Gerät (richtig) einzusetzen.

Mit Fahrgeschwindigkeiten von 3 bis 6 km/h bei Prototyp II konnte die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem ersten Prototyp, der nur 1.5 km/h erreichte, verbessert werden. Zu beachten ist, dass beim Prototyp II im Gegensatz zum Prototyp I das Unkraut nicht bekämpft wird und dieses chemisch oder mechanisch mit anderen Geräten bekämpft werden muss. Anhand einer Teilkostenrechnung für die Produktion von 1 ha Kopfsalat konnte gezeigt werden, dass die Strategie mit dem Prototyp II bei einer realisierten Geschwindigkeit von 6 km/h und hoher Auslastung beinahe gleich kostengünstig ist wie der Standard, bei dem alle Applikationen flächig mit der Feldspritze erfolgen. Realistisch ist jedoch eher der Einsatz des Geräts bei 4.5 km/h. Hierbei liegen die Kosten für die Produktion von 1 ha Salat beim Prototyp II 140 Fr./ha (oder 9 %) höher als beim Standard. Bei dieser Geschwindigkeit kann auch noch von Auge geprüft werden, ob das Öffnen und Schliessen der Düsen gut funktioniert, was bei Gemüsekulturen wie Salat (cash crops), sehr wichtig ist. Es müsste geprüft werden, ob das Gerät während der Vegetation tatsächlich 200 h effektive Feldzeit leisten kann. Dies insbesondere deshalb, weil die getroffenen Annahmen zur Auslastung der Geräte die Wirtschaftlichkeit sehr stark beeinflussen. Der Prototyp ersetzt die Feldspritze ein Stück weit und würde somit deren Auslastung reduzieren.

Bei den Teilkostenrechnungen wurde eine hohe Auslastung von 200 h pro Jahr vorausgesetzt. Wird davon ausgegangen, dass ein Spotspray-Gerät gleich ausgelastet wird wie die Feldspritze bei der Standard-Strategie, entstehen dem Gemüseproduzenten pro Spotspray-Behandlung 111 bis 138 Fr./ha Mehrkosten bei frühen Behandlungen, wenn 84 % an Fungiziden und Insektiziden eingespart werden können. Bei später durchgeführten

Behandlungen, wenn noch 28 % an Fungiziden und Insektiziden eingespart werden können, entstehen Mehrkosten von 307 bis 334 Fr. pro ha und Behandlung. Über die gesamte Kulturdauer könnten bei diesem Fallbeispiel 53 % an Insektiziden und Fungiziden eingespart werden.

Beim Standardverfahren mit flächiger Behandlung mit der Feldspritze sind die Pflanzenschutzmittelkosten am grössten, bei den Prototypen die Maschinenkosten. Es kommt somit zu einer Kapitalverschiebung von den Hilfsstoffen zu Technologie und Maschinen. Teure Maschinen müssen entweder teure Hilfsstoffe oder teure Handarbeit ersetzen bzw. effizienter als die Standardtechnik sein. Zudem müssen sie entsprechend ausgelastet sein, damit ihr Einsatz wirtschaftlich ist. Letzteres würde die Anwendung auf Lohnunternehmer oder grosse Betriebe beschränken. Selbst dann wäre wahrscheinlich eine gewisse staatliche Förderung notwendig, damit die für den Gemüseproduzenten entstehenden Mehrkosten gedeckt werden und die Technologie rascher eingeführt und breit eingesetzt wird. Dies wäre auch im Sinne der Gesellschaft und der Politik, die deutlich gemacht hat, dass die mit dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verbundenen Risiken markant reduziert werden müssen.

9 Ausblick

Der Bereich Precision Farming und Robotik ist sehr innovativ und stark am Wachsen. Die technische Entwicklung bietet noch viel Potenzial beispielsweise zur Vergrößerung der Arbeitsbreiten oder zur Vereinfachung der Handhabung. Diese Entwicklungen ermöglichen einen immer gezielteren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln.

Im Rahmen des Folgeprojekts «Nachhaltiger Gemüsebau - Bestimmung der Pflanzenschutzmittel-Einträge in die Umwelt mit Spotspraying» wird untersucht, wie stark die Einträge von Pflanzenschutzmitteln in die Umwelt dank Spotspraying reduziert werden können. Der im Rahmen des vorliegenden Projekts entwickelte Prototyp II dient als exemplarisches Spotspraying-Gerät für das Folgeprojekt. Vorgesehen sind Driftversuche mit dem Prototyp II und mit anderen Ansätzen wie Bandbehandlung und nach Möglichkeit mit anderen Spotspraying-Geräten. Geprüft wird auch, ob diese Technik mit weiteren driftreduzierenden Massnahmen kombiniert werden kann. Ausserdem wird ein umfassender Kulturparameter-Datensatz für verschiedene Gemüsekulturen erhoben. Anhand von diesem kann das Einsparpotenzial für verschiedene Techniken modelliert sowie die Reduktion der potenziellen Abschwemmung berechnet werden. Von verlustarmen Technologien profitiert nicht nur die Umwelt, sondern es können auch die Risiken in anderen Bereichen reduziert werden, beispielsweise für Passanten und Anwohner.

Danksagung

Wir danken der Umwelttechnologieförderung des Bundesamtes für Umwelt für die Förderung des Projekts und allen Projektpartnern für die Unterstützung. Danke nochmals an alle Personen und Institutionen, die dieses Projekt möglich gemacht haben.

Literaturverzeichnis

- AGROLINE, fenaco Genossenschaft. 2023. Zielsortiment: Pflanzenbehandlungsmittel im Gemüsebau. 1-71.
- Bütler A., Gazzarin C., Bravin E., Louw-Prevost M. 2023. Kostenkatalog 2023: Richtwerte für die Kosten von Maschinen, Arbeit, Gebäude und Hoftechnik. Gültig bis September 2024. Agroscope Transfer, 499, 1-60.
- Keller M., Haberey P., Hodel D., Total R., Heitkämper K., Bravin E., Glück S., Collet L., Wyss S., Steiner R., Möri H., Wyssa T., Anken T., Duckert F., Matter R. 2023. Ressourcenschonender, nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch kameragesteuerte Pflanzenschutzroboter (2017–2021): Abschlussbericht. Agroscope Science, 151, 1-41, <https://doi.org/10.34776/as151g>.
- Lechler GmbH. 2021. Spritztabelle für Bandspritzdüsen E. Agrar Datenblatt. 1-2.
- OEPP/EPPO. 2002. Guidelines for the efficiency evaluation of insecticides. *Phyllotreta* spp. on rape. OEPP/EPPO Bulletin, 32, 361-365.
- Omya Schweiz AG. 2021. Technische Informationen AUDIENZ®. 1-8.
- Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau und Spezialkulturen (SZG). 2023. ProfiCost Gemüse: Vollkosten und Deckungsbeiträge für den Anbau von Gemüse [Online-Tool].

Appendix I: Artikel, Konferenz- und Tagungsbeiträge

Im Rahmen des Projekts wurden folgende Artikel, Konferenz- und Tagungsbeiträge veröffentlicht:

- Keller M., Haberey P., Witsoe J., Hodel D., Total R., 2023. Auf den Punkt genau. Gemüse 12, 2023, 15-17.
- Vortrag am Rheinischen Gemüsebautag, 26. Januar 2023.
- Vortrag am Westfälisch-Lippischen Gemüsebautag, 7. Februar 2023.
- Vortrag am Forum Forschung Gemüse 2022.
- Vortrag an der Herbstbesprechung 2022 (Treffen aller in der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln involvierten Stellen).
- Vortrag an der 7. Tagung zum Aktionsplan Pflanzenschutzmittel.
- Prämierte Neuheiten an der ÖGA 2022. YouTube. ab 2:46.
<<https://www.youtube.com/watch?v=JyomztlVkJDs>>

Appendix II: Dosierschema im Detail

Im Rahmen des ersten Spotspraying-Projekts wurde bereits ein Dosierschema entwickelt. In diesem Appendix wird beschrieben, wie dieses konzeptionell an den zweiten Prototyp angepasst wurde und welche Vereinfachungen vorgenommen wurden. Ausserdem wird in den Spotspraying-Projekten ein umfassender Kulturparameter-Datensatz für verschiedene Gemüsekulturen erarbeitet. Anhand von diesem können zusätzlich Faustzahlen zur notwendigen Brühmenge für Behandlungen in Abhängigkeit der Kultur und des Kulturstadiums abgeleitet werden. Mit zunehmender Erfahrung und anhand der genannten Faustzahlen wird ein Produzent immer besser abschätzen können, wie viel Brühmenge für die entsprechende Kultur im entsprechenden Kulturstadium bei den entsprechenden Einstellungen notwendig ist.

Feste Bandbreiten: Die Anpassung der Düsenhöhe erfolgt zurzeit noch von Hand und nicht automatisch. Damit die Anwendung einfacher wird, wird mit festen Bandbreiten von 10, 15, 20 und 25 cm gerechnet. Eine Bandbreite von 5 cm wird unter Feldbedingungen nicht als realistisch angesehen, bei einer Bandbreite von 30 cm ist das Einsparpotenzial gering und eine flächige Applikation sinnvoller. Der Landwirt kann im Feld die Pflanzendurchmesser messen, und anhand von seiner Erfahrung und den genannten Faustzahlen dann entscheiden, wie breit das zu behandelnde Band sein soll. In Tabelle 7 ist die jeweilige berechnete einzustellende Düsenhöhe für die entsprechenden Bandbreiten und für die Düsenwinkel von 40° und 80° Grad dargestellt. Die maximal einstellbare Düsenhöhe beim Prototyp II beträgt knapp 35 cm.

Tabelle 7: Einzustellende Düsenhöhe in Abhängigkeit von der zu behandelnden Bandbreite und des verwendeten Düsenwinkels. Hervorgehoben sind realistische Kombinationen.

Düsenwinkel	Bandbreite [cm]	Düsenhöhe über Kultur [cm]*	Zielbrühmenge [l/ha]**
40°	10	13.7	400
	15	20.6	400
	20	27.5	600
	25	34.3	600
80°	10	6.0	400
	15	8.9	400
	20	11.9	600
	25	14.9	600

* Die Düsenhöhe wurde berechnet und muss je nach Druck noch justiert werden. Die tatsächliche Strahlbreite ist vom Druck und der Viskosität der Spritzbrühe abhängig und ist geringer als die theoretische Strahlbreite.

** Zielbrühmenge in Abhängigkeit der zu behandelnden Bandbreite.

Bezugspunkt Bestandeshöhe: Die Behandlungen erfolgen in der ersten Kulturhälfte auf eher kompakte, gedrungene Kulturen wie Salat und Kohllarten. Je nach Kultur sind die Pflanzen unterschiedlich hoch (vgl. Abbildung 16). Für die Bandbreiten 10 und 15 cm und Kulturhöhen von 10 cm bzw. weniger als 10 cm eignen sich Banddüsen mit einem Düsenwinkel von 40°. Für die Behandlungsbreiten 20 und 25 cm eignen sich Banddüsen mit einem Düsenwinkel von 80°. Um Überdosierungen zu vermeiden, wird als Bezugspunkt für die Behandlung die gemessene Höhe der Kulturpflanzen verwendet.

Zielbrühmengen: Im Schweizer Gemüsebau liegen die Brühmengen zwischen 400 und 1'000 l/ha. 1'000 l/ha werden vor allem in Raumkulturen im Gewächshaus wie Tomaten eingesetzt. Im Freilandgemüsebau werden beispielsweise 800 l/ha bei einer vollentwickelten Karottenkultur eingesetzt, wenn das gesamte Laub geschützt werden soll und eine gute Benetzung und gute Bestandesdurchdringung wichtig sind. Bei Kohl- und Salatarten in frühen Kulturstadien sind 400 l/ha und gegen Ende der ersten Kulturhälfte sind 600 l/ha ausreichend. Als Vereinfachung wurde entschieden, die Zielbrühmengen gemäss Tabelle 7 festzulegen.

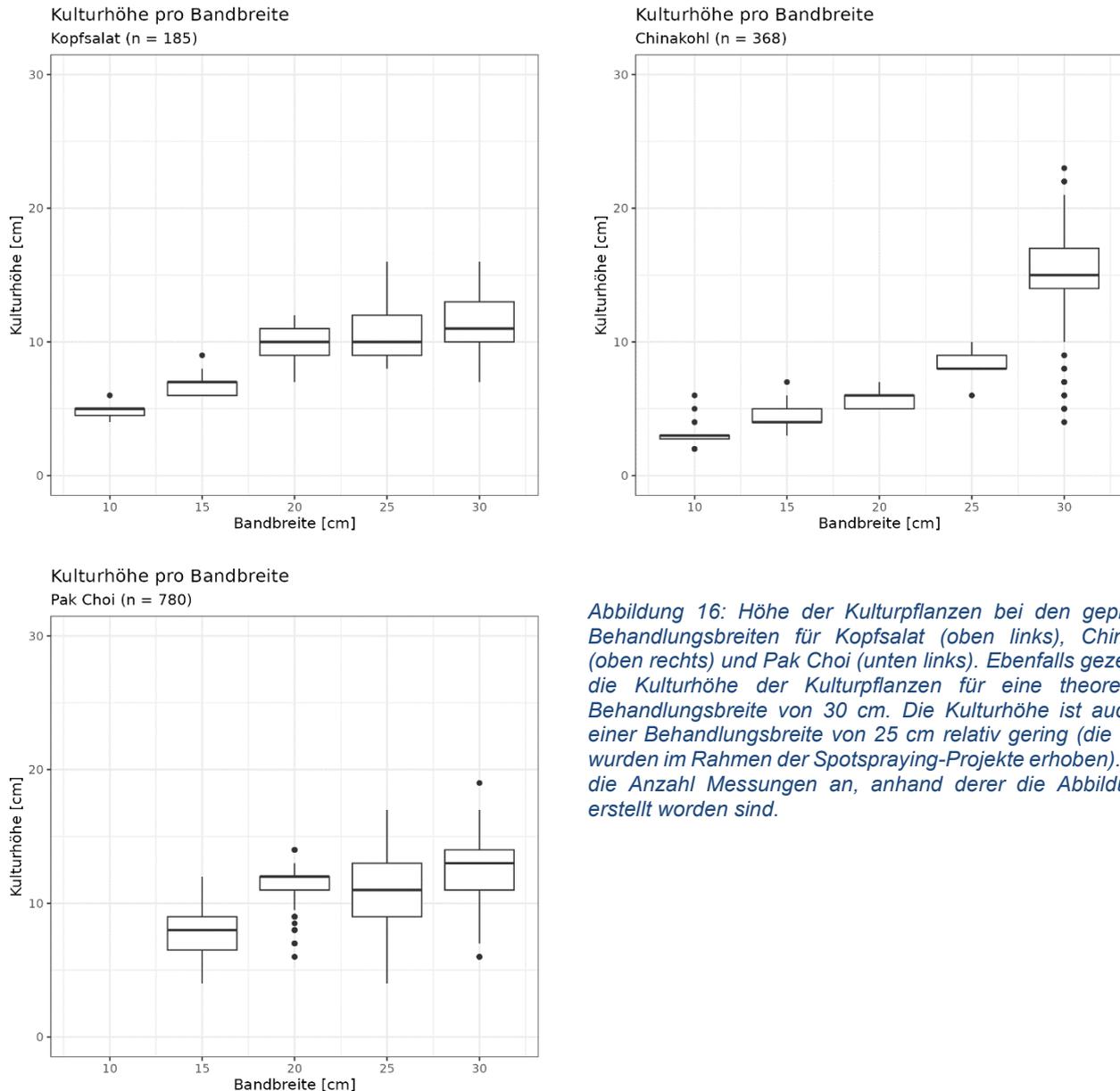


Abbildung 16: Höhe der Kulturpflanzen bei den geplanten Behandlungsbreiten für Kopfsalat (oben links), Chinakohl (oben rechts) und Pak Choi (unten links). Ebenfalls gezeigt ist die Kulturhöhe der Kulturpflanzen für eine theoretische Behandlungsbreite von 30 cm. Die Kulturhöhe ist auch bei einer Behandlungsbreite von 25 cm relativ gering (die Daten wurden im Rahmen der Spotspraying-Projekte erhoben). n gibt die Anzahl Messungen an, anhand derer die Abbildungen erstellt worden sind.

Geschwindigkeit: Die Ausbringmenge wird beim Prototyp II über den eingestellten Druck und die Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Wird schneller gefahren, wird bei gleichem Druck weniger pro Fläche ausgebracht. Zur Vereinfachung soll der Anwender entweder mit 3, 4.5 oder 6 km/h fahren.

Bandbreite, Geschwindigkeit, effektive Brühmenge: In Tabelle 8 sind die benötigten Durchflussmengen pro Düse enthalten, die für die 4 Bandbreiten, die 3 Geschwindigkeiten und die 2 Brühmengen berechnet wurden. Die Pumpeneinstellung beim Prototyp II war nicht einfach und es gab relativ grosse Druckschwankungen bedingt durch das häufige Schalten der Magnetventile. Dem könnte durch eine leistungsfähigere Pumpe entgegengewirkt werden. Der Druck betrug bei der Fahrt meist etwa 3.5 bar. Banddüsen gibt es in den Grössen 01 bis 08 (beispielsweise Lechler Bandspritzdüsen). In der Tabelle 9 sind mögliche Düsengrössen bei diesem relativ hohen Druck von 3.5 bar für die entsprechenden Bandbreiten, Zielbrühmengen und Fahrgeschwindigkeiten aufgeführt. Gleicht man die Durchflussmengen der Düsen mit den errechneten Werten ab, ergeben sich relativ wenige, passende Kombinationen (Tabelle 9). Für die Bandbreite von 10 cm müsste mit 6 km/h gefahren werden, um mit der kleinsten, gängigen Düse die gewünschte Brühmenge von 400 l/ha (bzw. die effektive Brühmenge von 420 l/ha) zu realisieren. Bei einer Bandbreite von 15 cm und 4.5 km/h wäre ebenfalls eine 01-Düse geeignet. Für die Bandbreiten von 20 und 25 cm

und die Brühmenge von 600 l/ha und 4.5 km/h Geschwindigkeit könnte mit 02- oder 03-Düsen gefahren werden, bei 6 km/h müsste dann mit 03- oder 04-Düsen gefahren werden. Der relativ hohe Druck und die kleinen Düsenkaliber führen zu eher kleinen Tropfen. Dieser Aspekt muss im Folgeprojekt noch angegangen werden.

Tabelle 8: Durchflussmenge pro Düse in Abhängigkeit von der gewählten Bandbreite, Brühmenge und Fahrgeschwindigkeit

Bandbreite [cm]	Brühmenge [l/ha]					
	400			600		
	Fahrgeschwindigkeit [km/h]					
	3	4.5	6	3	4.5	6
Benötigte Durchflussmenge [l/min] pro Düse						
10	0.2*	0.3*	0.4*	0.3	0.45	0.6
15	0.3*	0.45*	0.6*	0.45	0.675	0.9
20	0.4	0.6	0.8	0.6*	0.9*	1.2*
25	0.5	0.75	1.0	0.75*	1.125*	1.5*

*Fett gedruckt sind die geplanten Kombinationen der Bandbreiten und Brühmengen pro ha.

Wie beim Dosierschema I werden von 20 Pflanzen der Durchmesser und die Höhe sowie die Anzahl Pflanzen in 2 Reihen über eine Distanz von 5 Laufmetern zur Bestimmung der tatsächliche Pflanzendichte im Feld gemessen. Der Anwender kann entscheiden, ob und welche Sicherheitszuschläge sinnvoll sind. D.h. ob beispielsweise die Düsen bereits 2 cm vor und dann 2 cm nach der Pflanze schliessen sollen. Anhand dieser Messungen und Angaben kann das Behandlungsband und der Anteil des Bandes berechnet werden, der bei Spotspraying behandelt wird. Anhand der Beetzahl und deren Länge, der Anzahl Reihen, der Bandbreite und der Anteil vom Band, der voraussichtlich behandelt wird, kann die notwendige Brühmenge berechnet werden. Die einzustellende Düsenhöhe ergibt sich aus der Pflanzenhöhe plus Düsenhöhe über der Kultur (Tabelle 7).

Die Brühkonzentration kann über die bewilligte Aufwandmenge pro ha und die effektive Brühmenge pro ha (effektive, gemäss Tabelle 9) berechnet werden. Diese wird dann mit der errechneten, benötigten Brühmenge multipliziert und ergibt die einzufüllende Produktmenge.

Tabelle 9: Durchflussmenge praktikabler Düsendrößen und effektive Brühmenge pro ha bei Beetbreiten von 1.5 m und 4 Pflanzreihen und einem Druck von 3.5 bar.

Bandbreite [cm]	Zielbrühmenge					
	400 [l/ha]			600 [l/ha]		
	Fahrgeschwindigkeit [km/h]					
	3	4.5	6	3	4.5	6
Durchflussmenge [l/min] pro Düse	Düsengröße					
Effektive Brühmenge [l/ha]						
10		0.42 01 560	0.42* 01 420			
15		0.42* 01 373	0.63* 015 420			
20			0.86 02 430	0.63* 015 630	0.86* 02 573	1.28* 03 640
25				0.86** 02 688	0.86 02 459	1.28 03 512
25					1.28** 03 683	1.7** 04 680

* Grün eingefärbt sind Kombinationen, bei denen die effektive Brühmenge nahe bei der gewünschten Brühmenge liegt.

** In orange sind Kombinationen mit grösseren Abweichungen bezüglich gewünschter Brühmenge gekennzeichnet.

Berechnungen:

Diese Berechnungen sind für Beetbreiten von 1.5 m und 4 Pflanzreihen ausgelegt. Die «Anzahl Pflanzen» und der «Pflanzendurchmesser» ergibt sich aus den Messungen im Feld.

$$Pflanzdichte = \frac{(2 * \text{Anzahl Pflanzen})}{(5 \text{ m} * 1.5 \text{ m})}$$

$$\text{Anteil zu behandeln} = \frac{(\text{Pflanzendurchmesser} + 2 * \text{Sicherheitszuschlag}) * \text{Behandlungsbreite} * \text{Pflanzdichte}}{100 * 100}$$

Anzahl Pflanzen [Pflanzen/m²]: Anzahl Pflanzen gemessen in zwei Reihen über 5 Laufmeter.

Pflanzendurchmesser [cm]: Ein Mittelwert aus 20 Pflanzen, gemessen im Feld.

Sicherheitszuschlag [cm]: Wie viel vor bzw. nach der Pflanze noch behandelt werden soll.

Behandlungsbreite [cm]: Ergibt sich aus dem Pflanzendurchmesser und dem Entscheid, wie viel von der Pflanze bzw. wie viel rechts und links neben der Pflanze behandelt werden soll.

Pflanzdichte [Pflanzen / m²]: Bestimmt im Feld.

100*100: Umrechnung von cm² auf m².

$$\text{Benötigte Brühmenge} = \frac{\text{Anteil zu behandeln} * \text{Anzahl Beete} * \text{Beetbreite} * \text{Beetlänge} * \text{effektive Brühmenge}}{100 * 100}$$

Benötigte Brühmenge [l]: Totvolumen des Geräts sowie allfällige Reserve sind nicht eingerechnet.

Anzahl Beete: Anzahl Beete, die behandelt werden sollen.

Beetlänge [m]: Länge des zu behandelnden Feldes bzw. der Beete.

Beetbreite [m]: 1.5 m

Effektive Brühmenge [l/ha]: Effektive Brühmenge abzuleiten aus Tabelle 9.

100*100: Umrechnung von m² auf ha.

$$\text{Einzufüllende Produktmenge} = \frac{\text{bewilligte Aufwandmenge}}{\text{effektive Brühmenge}} * \text{benötigte Brühmenge}$$

Bewilligte Aufwandmenge: Gemäss Bewilligungssituation

Effektive Brühmenge [l/ha]: Effektive Brühmenge abzuleiten aus Tabelle 9.

Die bewilligte Aufwandmenge/Effektive Brühmenge entspricht der Spritzbrühenkonzentration.

Benötigte Brühmenge: Wie oben berechnet.

Anzumerken ist, dass bei einer Behandlungsbreite von 25 cm die Kulturpflanzen schon relativ gross sind. Bei Pflanzabständen von 37.5 cm und einem Sicherheitszuschlag von je 2 cm, ist der unbehandelte Abstand zwischen den Pflanzen noch 8.5 cm. Bei diesem Szenario ist eine Bandbehandlung ins Auge zu fassen.

Mit den untenstehenden Formeln kann der Anteil vom Beet, der bei einer Bandbehandlung behandelt wird, sowie der Anteil vom Band, der bei Spotspraying behandelt wird, berechnet werden:

$$\text{Anteil vom Beet behandelt bei Bandapplikation} = \frac{\text{Anzahl Pflanzreihen} * \text{Behandlungsbreite}}{\text{Beetbreite}}$$

$$\text{Anteil vom Band behandelt bei Spotapplikation} = \frac{\text{Anteil zu behandeln}}{\text{Anteil vom Beet behandelt bei Bandapplikation}}$$

Beispiel:

In Tabelle 10 sind die Angaben für eine exemplarische Spotspraying-Behandlung aufgeführt. In 2 Reihen werden auf 5 Laufmetern 25 Pflanzen ausgezählt. Der Durchmesser von 20 ausgemessenen Pflanzen beträgt im Mittel 12 cm. Der Produzent wählt als Behandlungsbreite 15 cm und den Düsenwinkel 40°. Die Kultur ist 7 cm hoch. Die Düsenhöhe muss auf 20.6 cm resp. 21 cm über der Kultur, d.h. 27.6 resp. 28 cm über dem Boden eingestellt werden. Für eine Bandbreite von 15 cm ergibt sich ein Zielbrühmenge von 400 l/ha. Der Produzent will 2 cm vor und 2 cm nach der Pflanze behandeln und mit einer Geschwindigkeit von 4.5 km/h fahren. Anhand der Tabelle 9 sieht er, dass er eine 01-Düse verwenden kann bei 3.5 bar und er effektiv dann 373 l/ha ausbringt (bezogen auf die effektiv behandelte Fläche).

Tabelle 10: Angaben für eine exemplarische Spotspraying-Behandlung

Messungen im Feld	Werte
Anzahl Pflanzen in 2 Reihen auf 5 Laufmetern	25
Pflanzendurchmesser	12 cm
Pflanzenhöhe	7 cm
Applikationsparameter	Werte
Behandlungsbreite	15 cm
Düsenwinkel	40°
Düsenhöhe über der Kultur	20.6 cm (Tabelle 7)
Düsenhöhe über Boden	27.6 cm
Zielbrühmenge	400 l/ha (Tabelle 7)
Sicherheitszuschlag	je 2 cm
Geschwindigkeit	4.5 km/h
Düsengröße	01 (Tabelle 9)
Effektive Brühmenge	373 l/ha (Tabelle 9)
Flächendimensionen	Werte
Anzahl Beete	6
Beetbreite	1.5 m
Beetlänge	200 m
Pflanzenschutzmittel	Werte
Bewilligte Aufwandmenge Produkt A	3 l/ha
Bewilligte Aufwandmenge Produkt B	200 g/ha

Mit den Angaben aus Tabelle 10 wird wie folgt gerechnet:

$$\text{Pflanzendichte} = \frac{(2 * 25)}{(5 \text{ m} * 1.5 \text{ m})} = 6.67 \text{ Pflanzen pro m}^2$$

$$\text{Anteil zu behandeln} = \frac{(12 + 2 * 2) * 15 * 6.67}{100 * 100} = 0.16$$

$$\text{Benötigte Brühmenge} = \frac{0.16 * 6 * 1.5 * 200 * 373}{100 * 100} = 10.74 \text{ l}$$

$$\text{Einzufüllende Menge Produkt A} = \frac{3}{373} * 10.74 = 0.086 \text{ l} = 86 \text{ ml}$$

$$\text{Einzufüllende Menge Produkt B} = \frac{200}{373} * 10.74 = 5.8 \text{ g}$$

$$\text{Anteil vom Beet behandelt bei Bandapplikation} = \frac{4 * 0.15}{1.5} = 0.4$$

$$\text{Anteil vom Band behandelt bei Spotapplikation} = \frac{0.16}{0.4} = 0.4$$

Der Produzent berechnet, dass er 16 % der Fläche behandeln wird, dass er vom «Band» 40 % behandelt bei seiner Spotspraying-Applikation und dass er dafür circa 10.74 l Spritzbrühe, 86 ml vom Produkt A und 5.8 g vom Produkt B benötigt.

Appendix III: Projektmeilensteine

Folgende Meilensteine wurden zu Projektbeginn definiert:

Meilenstein 1

- ✓ Der neue Prototyp ist von Steketee gebaut, und Testfahrten sind auf dem Werkgelände durchgeführt. Das Gerät ist in die Schweiz transferiert.
- ✓ Die Inbetriebnahme beim Schweizer Industriepartner (Möri AG Kartoffel- und Gemüsebautechnik) ist erfolgt.
- ✓ Testfahrten in der Schweiz sind durchgeführt. Der Prototyp behandelt die Pflanzen zuverlässig auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten.
- ✓ Verschiedene Düsensets, auch Injektordüsen, sind für den Feldeinsatz bestellt.
- ✓ Die Behandlung ist unter Abschirmung erfolgt (Düsen unter Haube).
- ✓ Der Entscheid, ob eine Aufrüstung mit Unterdrucktechnologie erfolgen soll oder ob ein Aktivkohlefilter auf der Ablaufseite eingesetzt werden soll, ist getroffen.

Meilenstein 2

- ✓ Testfahrten mit Wasser in exemplarischen Kulturen und Kulturstadien sind durchgeführt, und das PSM-Einsparpotenzial für die jeweiligen Behandlungen ist berechnet.
- ✓ Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt.
- ✓ Das PSM-Dosierschema aus dem Vorprojekt ist für den neuen Prototyp angepasst.
- ✓ Der Prototyp ist weiter optimiert (z.B. Anpassungen in der Konstruktion/Steuerung/Software, Einstellungen der eingesetzten Düsen).
- ✓ Ein Wirksamkeitsversuch ist durchgeführt, die effektive eingesparte Menge ist aufgezeigt.

Appendix IV: Projektverlauf

Im ersten Projektjahr 2021 wurde der Prototyp II gebaut und auf dem Gelände des Steketeewerks in den Niederlanden getestet (Abbildung 17). Im Winter 2022 wurde der Prototyp in Betrieb genommen und es wurden Tests auf der Strasse mit Modellpflanzen durchgeführt. Danach folgten Testfahrten im Feld. Der Prototyp wurde an der ÖGA 22, der Fachmesse der grünen Branche, ausgestellt und erhielt einen Innovationsaward. 2023 erfolgten weitere Testfahrten, ein Wirksamkeitsversuch sowie betriebswirtschaftliche Berechnungen. Das Dosierschema wurde konzeptionell auf den Prototyp II angepasst und vereinfacht.



Abbildung 17: Übersicht über die während des Projekts durchgeführten Aktivitäten. (Schema erstellt von Agroscope unter Verwendung von Fotos von Agroscope. Die Konstruktionsskizze stammt von Steketee.)