



Nachhaltiger Gemüsebau

Bestimmung der Pflanzenschutzmittel-Einträge in die Umwelt mit Spotspraying (2023-2026)

Abschlussbericht

Autorinnen und Autoren

Joshua Witsoe, Franziska Häfner, Martina Keller, Jürgen Krauss, Michael Gugger, Hans Möri, Patrick Steffen, Simon Gasser, Pauline Anne, Rolf Matter, Simone Meyer, Thomas Poiger



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Projektpartner

Projektinitianten

- Schweizerische Zentralstelle für Gemüsebau (SZG, Projektkoordination), vertreten durch Rolf Matter
- Verband Schweizer Gemüseproduzenten (VSGP), vertreten durch Simone Meyer
- Bundesamt für Landwirtschaft (BLW, Beitragsgeber), vertreten durch Numa Courvoisier

Forschungspartner

- Agroscope, Forschungsgruppe Extension Gemüsebau (Haupt-Forschungspartner und Partnerinnen), vertreten durch Reto Neuweiler, Joshua Witsoe, Franziska Häfner, Martina Keller, Jürgen Krauss und René Total
- Agroscope, Forschungsgruppe Pflanzenschutzmittel – Wirkung und Bewertung, vertreten durch Marianne Balmer und Thomas Poiger
- Agroscope, Versuchsstation Gemüsebau Ins, vertreten durch Michael Gugger
- Bundesamt für Umwelt (BAFU), vertreten durch Alexandre Gurba
- Inforama Seeland, vertreten durch Stefan Wyss und Flemming Burri
- Landwirtschaftliches Institut, Grangeneuve (IAG), vertreten durch Daniela Hodel und Tiziana Lottaz

Wirtschaftspartner

- Möri Kartoffel- und Gemüsebautechnik AG (Möri AG), vertreten durch Hans Möri und Patrick Steffen
- Steketee (Teil der Lemken-Gruppe), vertreten durch Arjen van Dueren den Hollander
- Ecorobotix SA (Ecorobotix, Partner aus der Wirtschaft), vertreten durch Simon Gasser und Pauline Anne
- Syngenta Crop Protection (Syngenta, Partner aus der Wirtschaft), vertreten durch Lucas Franca

Impressum

Herausgeber	Agroscope Schwarzenburgstrasse 161 3003 Bern www.agroscope.ch
Auskünfte	Franziska Häfner, franziska.haefner@agroscope.admin.ch Thomas Poiger, thomas.poiger@agroscope.admin.ch
Gestaltung	Joshua Witsoe
Fotos	Agroscope
Titelbild	Thomas Poiger
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2026
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as241g

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
Riassunto	7
1 Problemstellung und Projektziele	8
2 Ausgangslage	9
3 Getestete Pflanzenschutzroboter	10
3.1 Steketee-Prototyp II Pflanzenschutzroboter	10
3.2 Ecorobotix ARA Pflanzenschutzroboter	11
4 Bestimmung des PSM-Einsparpotenzials und der Reduktion des Abschwemmungspotenzials durch gezielte Applikationen	12
4.1 Einleitung	12
4.2 Methoden	13
4.3 Ergebnisse	16
4.3.1 PSM-Einsparpotenzial	16
4.3.2 Reduktion des Abschwemmungspotenzials	17
5 Modellierung - Einsparpotenzial und Reduktion des Abschwemmungspotenzials	18
5.1 Einleitung	18
5.2 Methoden	18
5.2.1 Kulturparameter-Datensatz	18
5.2.2 Einsparpotenzial-Modellierung	19
5.2.3 Abschwemmungspotenzial-Modellierung	20
5.3 Ergebnisse	22
5.3.1 PSM-Einsparpotenzial-Modellierung	22
5.3.2 Abschwemmungspotenzial-Modellierung	23
6 Feldversuche zur Abdrift	25
6.1 Design und Methode	25
6.2 Arbeitsschritte im Labor	28
6.3 Ergebnisse	30
6.3.1 Bestimmung der Mindestbreite der behandelten Fläche basierend auf der kumulativen Drift	30
6.3.2 Übersicht aller Spotspraying Driftversuche	31
6.3.3 Vergleich der Driftdeposition mit Ecorobotix ARA bei flächiger und Spot-Applikation	33
6.3.4 Einfluss des Düsentyps auf die Driftdeposition mit dem Steketee Prototyp II	34
6.3.5 Driftdeposition inklusive vs. exklusive PSM-Einsparpotenzial	35
7 Diskussion	37
8 Schlussfolgerungen und Ausblick	39
Danksagung	39
Literaturverzeichnis	40
Appendix I: Artikel, Konferenz und Tagungsbeiträge	41
Appendix II: Weitere Modellierungsergebnisse zum Abschwemmungspotenzial	43
Appendix III: Auswertung der Windmessungen und ISO 22866-Konformität der Versuchsdurchgänge	50

Zusammenfassung

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) ist ein zentraler Faktor für stabile landwirtschaftliche Erträge, steht jedoch aufgrund nachgewiesener Einträge in Oberflächengewässer und Grundwasser zunehmend in der Kritik. Die derzeit im Gemüsebau übliche flächige Applikation von Fungiziden und Insektiziden führt insbesondere in Reihenkulturen mit grossen Reihen- und Pflanzabständen sowie in frühen Entwicklungsstadien zu ineffizienten Applikationen, da ein erheblicher Anteil der Wirkstoffe ungenutzt auf den Boden gelangt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Applikationsverfahren zu entwickeln und zu bewerten, die eine gezieltere Ausbringung ermöglichen und gleichzeitig Umweltbelastungen wie Abdrift und Abschwemmung reduzieren.

Diese Studie untersuchte das Potenzial gezielter Applikationstechnologien, insbesondere kameragesteuertes Spotspraying von Fungiziden und Insektiziden, durch eine Kombination aus Feldversuchen, Modellierung und Driftversuchen. In den Feldversuchen wurden PSM-Einsparungen und die Reduktion des Abschwemmungspotenzials unter praktischen Bedingungen untersucht, einschliesslich des Einflusses von Puffern um einzelne Pflanzen. Modellierungsansätze wurden genutzt, um das Potenzial zur PSM-Einsparung und zur Reduktion von Abschwemmung für verschiedene Reihenkulturen, Entwicklungsstadien und Kulturdeckungsgrade abzuschätzen. Grundlage dafür bildeten Kulturparameter, die im Rahmen des Projekts erhoben wurden. Zusätzlich wurden standardisierte Driftversuche (gemäss ISO-Norm) durchgeführt, um die Driftdeposition in Windrichtung ausserhalb der behandelten Fläche zu quantifizieren und die Ergebnisse mit etablierten Referenzwerten zu vergleichen.

Die Feldversuche zeigten, dass durch gezielte Applikationen erhebliche PSM-Einsparungen bei Insektizid- und Fungizidanwendungen erzielt werden können. Durch Spotspraying konnte der behandelte Flächenanteil bei Knollensellerie und Petersilie (BBCH 16–17; Ø Pflanzendurchmesser 15–16 cm) auf 15–20 % reduziert werden, was einer PSM-Einsparung von 80–85 % entspricht, während mit Band-Applikation Einsparungen von 58–71 % erreicht wurden. Die Verwendung von Pufferzonen (3–10 cm) verringerte die PSM-Einsparung nur geringfügig, das Einsparpotenzial lag bei 68–82 %. Diese Reduktionen führten zu einer deutlichen Verringerung des Abschwemmungspotenzials, wobei Spotspraying die potenzielle Abschwemmung um bis zu 93 % und Band-Applikation um bis zu 78 % reduzierte.

Die Modellierung bestätigte diese Ergebnisse und zeigte, dass die Einsparungen stark von Kulturart und Entwicklungsstadium abhängig sind. Bei schnell wachsenden Kulturen wie Kopfsalat waren bei einer Applikation kurz nach der Pflanzung PSM-Einsparungen von bis zu 95 % möglich. Mit zunehmendem Kulturdeckungsgrad nahm dieses Potenzial jedoch rasch ab. Bei langsam wachsenden Kulturen wie Sellerie konnten hohe Einsparungen über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden.

Die Driftversuche zeigten eine sehr geringe Abdrift für alle Spot-Applikationen, mit Driftwerten unter 0,01 % der Soll-Aufwandmenge und Driftreduktionen von über 99 % im Vergleich zu Referenzwerten. Diese Reduktionen sind hauptsächlich auf technische Merkmale der Geräte wie Abschirmungen und niedrige Düsenhöhen zurückzuführen. Obwohl mit einer etablierten Tracer-Technologie gearbeitet wurde, lagen die gemessenen Abdriftwerte insbesondere bei grösseren Abständen zum Feldrand unter der Quantifizierungsgrenze der verwendeten analytischen Methoden. Der Verlauf der Driftkurven bei Abständen von mehr als 5 m zum Feldrand ist daher weniger gut charakterisiert. Um die Driftreduktion dieser Spotspraying-Geräte auch in grösseren Abständen zum Feldrand zuverlässig quantifizieren zu können, sind weitere methodische Entwicklungsarbeiten erforderlich. Dazu gehören insbesondere die Identifikation geeigneter Tracersubstanzen sowie die Entwicklung entsprechend empfindlicherer Analysemethoden.

Gezielte Applikationstechniken, insbesondere Spotspraying, sind eine wirksame Massnahme zur Reduktion des PSM-Einsatzes und der Umweltbelastung im Gemüsebau. Die Ergebnisse unterstützen zudem die Integration gezielter Applikationstechniken als anerkannte Risikominderungsmassnahme in regulatorische Rahmenwerke.

Résumé

L'utilisation de produits phytosanitaires (PPh) est un facteur essentiel pour garantir des rendements agricoles stables, mais elle fait l'objet de critiques croissantes en raison de la présence avérée de résidus dans les eaux de surface et la nappe phréatique. L'application sur l'ensemble de la surface de fongicides et d'insecticides, couramment pratiquée aujourd'hui en culture maraîchère, conduit à des applications inefficaces, en particulier dans les cultures en rangs avec de grands espacements entre les rangs et entre les plantes, ainsi qu'aux premiers stades de développement des plantes, car une part considérable des substances actives se retrouve sur le sol sans être utilisée. Il est donc nécessaire de développer et d'évaluer des méthodes d'application permettant une application plus ciblée des PPh tout en réduisant les impacts environnementaux tels que la dérive et le lessivage.

Au cours de cette étude, des chercheuses et des chercheurs ont examiné le potentiel des technologies d'application ciblée, en particulier la pulvérisation ciblée (spot spraying) de fongicides et d'insecticides guidée par caméra, en combinant des essais en plein champ, la modélisation et des essais de dérive. Lors des essais en plein champ, les économies de produits phytosanitaires et la réduction du risque de lessivage ont été étudiés dans les conditions de la pratique, y compris l'influence des zones tampons autour des plantes traitées. Des modélisations ont été utilisées pour estimer le potentiel d'économies de produits phytosanitaires et de réduction du lessivage pour différentes cultures en rangs, différents stades de développement et différents degrés de couverture par la culture. Les paramètres culturels recueillis dans le cadre du projet ont servi de base. De plus, des essais de dérive standardisés (conformément à la norme ISO) ont été menés afin de quantifier le dépôt dû à la dérive dans le sens du vent en dehors de la zone traitée et de comparer les résultats à des valeurs de référence établies.

Les essais en plein champ ont montré que des applications ciblées permettent de réaliser des économies considérables de produits phytosanitaires (insecticides et fongicides). Grâce à la pulvérisation localisée (spot spraying), la surface traitée a pu être réduite à 15-20 % de la surface totale dans les cultures de céleri-rave et de persil (stade BBCH 16-17; Ø moyen des plantes: 15-16 cm), ce qui correspond à une économie de produits phytosanitaires de 80 à 85 %, tandis que le traitement en bandes a permis d'atteindre des économies de 58 à 71 %. Quant aux zones tampons (3 à 10 cm), elles n'ont entraîné qu'une légère réduction des économies en produits phytosanitaires, le potentiel d'économies se situant entre 68 et 82 %. Ces réductions ont entraîné une diminution significative du risque de lessivage, le spot spraying réduisant le lessivage potentiel jusqu'à 93 % et les applications en bandes jusqu'à 78 %.

La modélisation a confirmé ces résultats et montré que les économies réalisées dépendent fortement du type de culture et de son stade de développement. Pour les cultures à croissance rapide comme la laitue pommée, une application peu après la plantation a permis d'économiser jusqu'à 95 % de produits phytosanitaires. Cependant, ce potentiel a rapidement diminué à mesure que le degré de couverture par la culture augmentait. Pour les cultures à croissance lente, comme le céleri, des économies importantes ont pu être obtenues sur une plus longue période.

Les essais de dérive ont montré une dérive très faible pour toutes les applications ciblées, avec des valeurs de dérive inférieures à 0,01 % par rapport au dosage dans le champ traité et des réductions de dérive de plus de 99 % par rapport aux valeurs de référence. Ces réductions sont principalement dues aux caractéristiques techniques des appareils, telles que les capots de protection et la faible hauteur des buses. Bien qu'une technologie de traceurs éprouvée ait été utilisée, les valeurs de dérive mesurées se situaient, en particulier dans le cas de distances plus importantes par rapport au bord du champ, en dessous du seuil de quantification des méthodes analytiques employées. L'évolution des courbes de dérive dans le cas de distances supérieures à 5 m par rapport au bord du champ est donc moins bien caractérisée. Afin de pouvoir quantifier de manière fiable la réduction de la dérive des appareils de spot spraying, même à des distances plus importantes par rapport au bord du champ, des travaux supplémentaires de développement méthodologique sont nécessaires. Il s'agit notamment d'identifier des substances traceuses appropriées et de mettre au point des méthodes d'analyse suffisamment sensibles.

Les techniques d'application ciblée, en particulier la pulvérisation ciblée, constituent une mesure efficace pour réduire l'utilisation de produits phytosanitaires et le risque pour l'environnement en culture maraîchère. Ces résultats plaident en outre en faveur de l'intégration, dans le cadre réglementaire, de techniques d'application ciblées en tant que mesure reconnue de réduction des risques.

Summary

The use of plant protection products (PPPs) is a key factor in maintaining stable agricultural yields but is increasingly associated with environmental concerns, particularly due to their detection in surface and groundwater. The broadcast application of fungicides and insecticides, currently common in vegetable production, is often inefficient, particularly in row crops with wide row and plant spacing and during early growth stages. As a result, a substantial proportion of the active substances reaches the soil unused. Consequently, there is a need for more efficient and targeted application methods that reduce PPP inputs and minimize environmental impacts such as drift and runoff without compromising crop protection efficacy.

This study evaluated the potential of targeted application technologies, particularly camera-guided spot spraying of fungicides and insecticides, through a combination of field experiments, modeling, and drift measurements. Field trials assessed PPP savings and runoff reduction under practical conditions, including the influence of applying a predefined spray buffer around each individual plant ("buffer zone"). PPP savings and runoff reduction across different crops, growth stages, and canopy cover were modeled based on crop parameters collected during the project. In addition, standardized drift trials (in accordance with ISO standards) were conducted to quantify drift deposition downwind of the treated area and to compare the results with established reference values.

Field trials demonstrated substantial PPP savings of insecticides and fungicides through targeted applications. Spot spraying reduced the proportion of treated areas for celery and parsley (BBCH 16–17; Ø plant diameter 15–16 cm) to 15–20%, corresponding to savings of 80–85%, while band spraying achieved savings of 58–71%. The use of sprayed buffer zones (3–10 cm) around individual plants reduced PPP savings only slightly, as the savings potential ranged from 68 to 82%. These substantial PPP savings also led to significantly reduced run-off potential by up to 93% (spot) or 78% (band application), respectively.

Modeling results confirmed these findings and showed that PPP savings strongly depend on crop type and growth stage. In fast-growing crops such as lettuce, savings of up to 95% were possible shortly after planting. However, this potential declined rapidly as crop coverage increased. In slow-growing crops such as celery, high PPP savings could be maintained over a longer period.

Drift experiments showed very low off-target deposition for all spot spraying applications, with drift values below 0.01% of the target broadcast application rate, resulting in drift reductions of more than 99% compared to reference values. These drift reductions are mainly attributed to technical features of the devices, such as shielding and low nozzle height. Although an established tracer technique was used, the measured off-target deposition fell below the limit of quantification of the analytical methods, particularly at greater distances from the field edge. Consequently, the drift curves at greater distances (>5m) from the field edge are less well characterized. To reliably quantify the drift reduction achieved by these spot spraying devices at greater distances from the field edge, further development work would be required, including the search for alternative tracers and more sensitive analytical methods.

Targeted application techniques, particularly spot spraying, are effective measures for reducing PPP use and environmental exposure in vegetable production. These findings also support the integration of targeted application techniques as recognized risk mitigation measures within regulatory frameworks.

Riassunto

L'utilizzo di prodotti fitosanitari (PF) è un fattore fondamentale per garantire rese agricole stabili, ma è sempre più criticato a causa della loro comprovata dispersione nelle acque superficiali e sotterranee. L'applicazione su vasta scala di fungicidi e insetticidi, attualmente diffusa in orticoltura, implica un impiego inefficiente del prodotto, in particolare nelle colture a filari con ampie distanze tra i filari e tra le piante nonché nelle fasi di sviluppo iniziali, poiché una parte considerevole dei principi attivi finisce nel terreno inutilizzata. Ne deriva la necessità di sviluppare e valutare metodi di applicazione che consentano un'erogazione più mirata e, al contempo, riducano gli impatti ambientali quali la deriva e il dilavamento.

Questo studio ha esaminato il potenziale delle tecnologie di applicazione mirata, in particolare l'irrorazione localizzata di fungicidi e insetticidi controllata tramite telecamera, mediante una combinazione di esperimenti in pieno campo, modellizzazione ed esperimenti di deriva. Gli esperimenti in pieno campo hanno esaminato i risparmi di prodotti fitosanitari e la riduzione del potenziale di dilavamento in condizioni pratiche, compresa l'influenza delle zone cuscinetto attorno alle singole piante. Sono state utilizzate soluzioni di modellizzazione per stimare il potenziale di risparmio di prodotti fitosanitari e di riduzione del dilavamento per diverse colture a filari, stadi di sviluppo e gradi di copertura delle colture. La base di riferimento è stata costituita dai parametri colturali raccolti nell'ambito del progetto. Inoltre, sono stati condotti esperimenti di deriva standardizzati (secondo la norma ISO) per quantificare la deposizione da deriva nella direzione del vento all'esterno dell'area trattata e per confrontare i risultati con valori di riferimento consolidati.

Gli esperimenti in pieno campo hanno dimostrato che, grazie ad applicazioni mirate, è possibile contenere notevolmente l'impiego di prodotti fitosanitari quando si impiegano insetticidi e fungicidi. Grazie all'irrorazione localizzata, la percentuale di superficie trattata nel caso del sedano a tubero e del prezzemolo (BBCH 16-17; diametro medio delle piante 15-16 cm) è stata ridotta al 15-20%, il che corrisponde a un risparmio di prodotti fitosanitari dell'80-85%, mentre con l'applicazione a fascia si sono ottenuti risparmi del 58-71%. L'utilizzo di zone cuscinetto (3-10 cm) ha ridotto solo marginalmente il risparmio di prodotti fitosanitari; il potenziale di risparmio è stato del 68-82%. Tali riduzioni hanno portato a una drastica diminuzione del potenziale di dilavamento: l'irrorazione localizzata ha ridotto il dilavamento potenziale fino al 93% e l'applicazione a fascia fino al 78%.

La modellizzazione ha confermato questi risultati e ha dimostrato che i risparmi dipendono massicciamente dal tipo di coltura e dallo stadio di sviluppo. Nel caso di colture a crescita rapida, come la lattuga a cappuccio, un'applicazione effettuata poco dopo la semina ha consentito di ottenere risparmi di prodotti fitosanitari fino al 95%. Tuttavia, con l'aumentare del grado di copertura della coltura, tale potenziale è diminuito rapidamente. Nel caso di colture a crescita lenta come il sedano, è stato possibile mantenere risparmi elevati per un periodo di tempo più lungo.

Gli esperimenti di deriva hanno evidenziato una deriva molto ridotta per tutte le applicazioni puntuali, con valori di deriva inferiori allo 0,01 % rispetto alla quantità di dose applicata in campo e riduzioni della deriva superiori al 99 % rispetto ai valori di riferimento. Tali riduzioni sono imputabili principalmente alle caratteristiche tecniche delle attrezzature, quali le schermature e le basse altezze degli ugelli. Sebbene si sia fatto ricorso a una tecnologia di tracciamento consolidata, i valori di deriva misurati, in particolare a distanze maggiori dal bordo del campo, erano inferiori al limite di quantificazione dei metodi analitici utilizzati. L'andamento delle curve di deriva a distanze superiori a 5 m dal bordo del campo è quindi meno ben caratterizzato. Per poter quantificare in maniera affidabile la riduzione della deriva di queste attrezzature per l'irrorazione localizzata anche a distanze maggiori dal bordo del campo servono altri lavori di sviluppo metodologico, tra cui in particolare l'identificazione di sostanze traccianti adeguate e lo sviluppo di metodi analitici coerentemente più sensibili.

Le tecniche di applicazione mirate, in particolare l'irrorazione localizzata, rappresentano una misura efficace per ridurre l'utilizzo di prodotti fitosanitari e l'impatto ambientale nella coltivazione di ortaggi. I risultati sostengono inoltre l'integrazione delle tecniche di applicazione mirate nei quadri normativi come misura riconosciuta di riduzione del rischio.

1 Problemstellung und Projektziele

Leistungsstarke Sorten, geeignete Düngemittel und Pflanzenschutzmittel (PSM) gehören zu den zentralen Produktionsfaktoren für stabile landwirtschaftliche Erträge. Besonders der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln steht jedoch zunehmend in der öffentlichen Kritik, da Rückstände regelmässig in Oberflächengewässern und im Grundwasser nachgewiesen werden und dabei teilweise auch geltende Qualitätsgrenzwerte überschritten werden.

Vor diesem Hintergrund gewinnt eine möglichst gezielte Anwendung von Pflanzenschutzmitteln an Bedeutung, um Einträge in die Umwelt zu minimieren. Aktuell erfolgt die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln im Gemüsebau noch immer durch flächige Applikation mit einem Standard-Feldbalken. Insbesondere in Reihenkulturen mit grossen Reihen- und Pflanzabständen und in frühen Entwicklungsstadien der Pflanzen gelangt dabei ein erheblicher Anteil der PSM auf den Boden und bleibt weitgehend ungenutzt. Eine vielversprechende Alternative ist der Einsatz von kameragesteuerten Pflanzenschutzrobotern, die Insektizide und Fungizide durch «Spotspraying» gezielt auf die Kulturpflanzen applizieren, ohne den Schutz der Kulturen zu beeinträchtigen. Die verringerte Aufwandmenge führt zu einer potenziellen Minderung negativer Umwelteffekte wie Abdrift und Abschwemmung. Zusätzlich erfolgt die Applikation unter Abschirmung und mit Düsen, die in unmittelbarer Nähe zur Zielpflanze positioniert sind. Ein zusätzlicher Einsatz driftreduzierender Düsentypen ermöglicht eine weitere Verringerung der Abdrift.

Die Umweltauswirkungen von Spotspraying wurden bislang jedoch nur unzureichend quantifiziert. Eine systematische Untersuchung ist erforderlich, um diese Technologie im Rahmen von Zulassungsverfahren sowie als risikomindernde Massnahme fundiert bewerten zu können. Ziel des vorliegenden Projekts ist daher die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen zur Bewertung von Spotspraying-Technologien. Hierzu werden Versuche in unterschiedlichen Kulturen und Entwicklungsstadien durchgeführt, um das Einsparpotenzial an Pflanzenschutzmitteln sowie die damit verbundene Reduktion von Abdrift und Abschwemmung zu bestimmen. Darüber hinaus wird der Einfluss der Technologie auf die Driftdeposition von Pflanzenschutzmitteln untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse werden den zuständigen Behörden zur Verfügung gestellt und können sowohl bei der Weiterentwicklung von Risikominderungsmaßnahmen als auch im regulatorischen Kontext (Zulassung) berücksichtigt werden. Darüber hinaus tragen sie zur Bewertung des Potenzials von Spotspraying-Technologien zur Reduktion pflanzenschutzmittelbedingter Risiken im Gemüsebau bei.

2 Ausgangslage

Im Rahmen zweier Projekte¹ wurden zwei Prototypen für gezielte Pflanzenschutzapplikationen der Firma Steketee entwickelt, eingesetzt und unter Praxisbedingungen getestet. Diese Pflanzenschutzroboter ermöglichen eine gezielte Applikation von Fungiziden und Insektiziden auf die Kulturpflanzen im Sinne des «Spotspraying». Unter Praxisbedingungen konnte so in Gemüse-Reihenkulturen über die gesamte Kulturdauer weit über 50 % an Pflanzenschutzmitteln eingespart werden, bei frühen Anwendungen sogar mehr als 85 % (Keller et al., 2020; Wullschlegler et al., 2020; Witsoe et al., 2024). Die Wirksamkeit der eingesetzten Insektizide war in etwa vergleichbar mit dem Standardverfahren Feldbalken in den 2018–2020 durchgeführten Feldversuchen (Haberey et al., 2021). Neben den im Rahmen der genannten Projekte entwickelten Pflanzenschutzrobotern stehen inzwischen auch weitere Spotspraying-Geräte wie der Ecorobotix ARA zur Verfügung.

Im Rahmen des Zulassungsverfahrens werden Pflanzenschutzmittel einer umfassenden Risikoprüfung unterzogen. Sofern erforderlich, werden für bestimmte Indikationen spezifische Auflagen verfügt, um die mit der Anwendung verbundenen Risiken zu reduzieren. Zum Schutz von Gewässerorganismen sind dies Vorgaben zur Drift- und Abschwemmungsreduktion. Driftauflagen umfassen unbehandelte Pufferstreifen von 6, 20, 50 oder 100 m zu Oberflächengewässern. Diese Abstände können reduziert werden, sofern driftmindernde Massnahmen gemäss den «Weisungen betreffend die Massnahmen zur Reduktion der Risiken bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln» (BLV, 4. Juni 2024) umgesetzt werden. Beispielsweise wird eine Bandspritzung bei Herbiziden mit 1,5 Punkten bewertet. Kombiniert man diese mit driftreduzierenden Düsen, die eine Driftreduktion von mindestens 50 % gewährleisten (0,5 Punkte), werden 2 Punkte erreicht, die einer Driftreduktion von 90 % entsprechen. Die Massnahme «Einzelpflanzenbehandlung mit Kameraerkennung und vollständiger Abschirmung», d.h. Spotspraying, ist zurzeit mit 3 Punkten bewertet, was einer Driftreduktion von 95 % entspricht.

Auch zur Verringerung des Eintrags von Pflanzenschutzmitteln in Gewässer durch Abschwemmung sieht die Weisung verschiedene Massnahmen vor, deren Risikominderungspotenzial ebenfalls mittels eines Punktsystems bewertet wird (ein Punkt entspricht einer Risikominderung von ca. 50 %). Spotspraying wurde als Massnahme zur Verringerung der behandelten Fläche und damit der Abschwemmung in die Weisungen aufgenommen, wobei «Einzelpflanzenbehandlung mit Kameraerkennung mit Behandlung auf weniger als 25 % bzw. 10 % der Fläche» mit 2 bzw. 3 Punkten bewertet wird.

Die Bedeutung dieser Massnahmen hat in den letzten Jahren zugenommen, da für zahlreiche Pflanzenschutzmittel zusätzliche Einschränkungen eingeführt wurden, die zum Teil erhebliche Auswirkungen auf den Gemüsebau haben. Bei der Risikobewertung im Rahmen des Zulassungsverfahrens von Pflanzenschutzmitteln, das sich stark an die EU-Bewertung anlehnt, wird Spotspraying bislang noch nicht berücksichtigt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Neuartigkeit dieser Technologien sowie die im Vergleich zu konventionellen Verfahren begrenzte Datenlage hinsichtlich der Reduktion von Umweltemissionen, insbesondere durch Abdrift und Abschwemmung.

¹ «Ressourcenschonender, nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch kameragesteuerte Pflanzenschutzroboter» (2017-2021), mitfinanziert durch das BLW im Rahmen von AgriQnet, sowie «Nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch Spotspraying-Technik» (2021-2023), dessen Phase II durch die Umwelttechnologieförderung des BAFU unterstützt wurde.

3 Getestete Pflanzenschutzroboter

3.1 Steketee-Prototyp II Pflanzenschutzroboter

Der Prototyp II (Abbildung 1) ist ein traktorgezogener Spotspraying-Roboter, der vom niederländischen Hersteller Steketee entwickelt wurde, welcher heute ein Teil der LEMKEN-Gruppe (Werk in Dinteloord, Niederlande) ist. Das Gerät ist für den Beetanbau mit Beetbreite von 1,2 bis 2 m sowie für drei bis sechs Pflanzreihen ausgelegt. Die Reihen- und Pflanzenerkennung erfolgt mithilfe von drei RGB-Kameras (Kanäle: Rot, Grün, Blau) und einer klassischen Bildanalyse. Neue Kulturen können vom Anwender selbst integriert werden, indem die entsprechenden Kamera- und Pflanzenerkennungsparameter angepasst bzw. festgelegt werden.

Die gezielte Applikation erfolgt mit Banddüsen, die über den Pflanzenreihen geführt werden. Die Düsen öffnen und schliessen sich unmittelbar vor bzw. nach jeder erkannten Kulturpflanze, wodurch rechteckige behandelte Flächen entstehen. Deren Breite wird durch die Düsenhöhe und den Düsenwinkel bestimmt und muss an die Grösse der Kulturpflanzen angepasst werden. Die Länge der behandelten Fläche ergibt sich aus der Öffnungsdauer der einzelnen Düsen. Über die Düsen- und Softwareeinstellungen kann festgelegt werden, ob ausschliesslich die Kulturpflanzen behandelt oder die behandelte Fläche durch einen zusätzlichen Puffer erweitert werden sollen, um die Behandlungswirkung abzusichern.

Die Kameras sowie die Sensor- und Spotspraying-Komponenten sind unter einer Haube angeordnet, die den Einfluss von Wind und variierenden Lichtverhältnissen reduziert. Dies stellt eine wichtige Voraussetzung für eine zuverlässige Pflanzenerkennung sowie eine präzise Regelung und Ansteuerung der Düsen dar. Darüber hinaus trägt diese Abschirmung zusammen mit einer niedrigen Düsenhöhe und dem reduzierten PSM-Einsatz beim Spotspraying zur Driftreduktion bei.



Abbildung 1: Steketee-Prototyp II auf einer Versuchsfläche in Wädenswil (ZH) 2025. (Quelle: Agroscope)

3.2 Ecorobotix ARA Pflanzenschutzroboter

Der ARA (Abbildung 2) ist ein traktorgezogener Spotspraying-Roboter der Schweizer Firma Ecorobotix aus Yverdon-les-Bains im Kanton Waadt. Das Gerät verfügt über drei nebeneinander angeordnete Module mit einer Arbeitsbreite von jeweils 2 m und 52 Düsen pro Modul, was einer Gesamtbreite von 6 m und insgesamt 156 Düsen entspricht. Die Pflanzenerkennung erfolgt mittels kulturspezifischer Algorithmen, die mit Hilfe von künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen entwickelt wurden. Für die wichtigsten Gemüsekulturen in der Schweiz stehen bereits entsprechende Modelle zu Verfügung, und neue Algorithmen werden kontinuierlich entwickelt und getestet.

Die gezielte Applikation erfolgt über kleinwinklige Flachstrahldüsen (25°), die jeweils eine quadratische Fläche von 6 cm x 6 cm behandeln. Das resultierende Spritzmuster entspricht daher eher einem Raster (oder Gitter) als einem klassischen Spotmuster. Über die Geräteeinstellungen können zusätzliche Pufferzonen hinzugefügt werden, um entweder die Behandlungseffektivität zu erhöhen oder bei der Anwendung nicht-selektiver Herbizide Sicherheitsabstände für die Kultur zu berücksichtigen.

Wie beim Steketee Prototyp II sind auch beim ARA die Kameras, Sensoren und Spot-Spray-Komponenten unter einer Abschirmung angeordnet, um die Auswirkungen von Wind und wechselnden Lichtverhältnissen zu reduzieren. In Kombination mit niedrigen Düsenhöhen und reduziertem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln trägt diese Abschirmung erheblich zur Reduzierung der Drift bei.



Abbildung 2: Ecorobotix ARA auf einer Versuchsfläche in Galmiz (FR) 2023 und Mathod (VD) 2025. (Quelle: Agroscope)

4 Bestimmung des PSM-Einsparpotenzials und der Reduktion des Abschwemmungspotenzials durch gezielte Applikationen

4.1 Einleitung

In den zwei vorangegangenen Spotspraying-Projekten wurden Testfahrten durchgeführt, um das PSM-Einsparpotenzial der Steketee-Prototypen I und II zu ermitteln (Witsoe et al., 2024). In diesem Projekt erfolgten weitere Testfahrten mit dem Steketee-Prototyp II, um das Einsparpotenzial in weiteren Kulturen sowie in frühen und mittleren Wachstumsstadien zu bestimmen. Ziel war es, die Datenbasis der Vorgängerprojekte zu erweitern und eine fundierte Grundlage für die Berechnung des Reduktionspotenzials für Drift und Abschwemmung zu schaffen.

Bei allen Testfahrten wurden sowohl Band- als auch Spotspraying-Überfahrten durchgeführt, wobei anstelle von Spritzbrühe Wasser eingesetzt wurde. Das Verhältnis der Band- und Spot-Applikationen im Vergleich zur Standardvariante einer flächigen Behandlung ist qualitativ in Abbildung 3 dargestellt. Die Applikationsmuster orientieren sich am im Gemüsebau üblichen Beetanbau (im dargestellten Beispiel Beete mit jeweils vier Pflanzreihen).

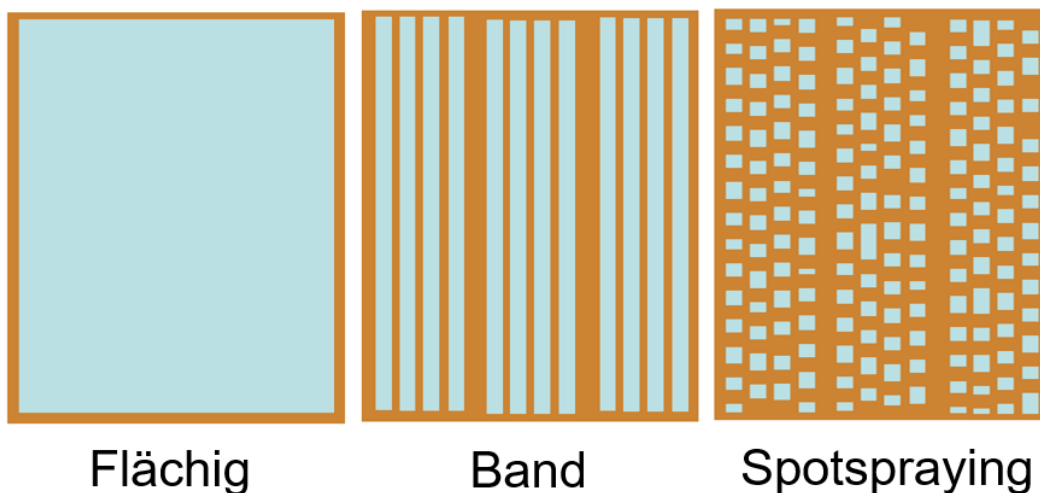


Abbildung 3: Darstellung einer flächigen Applikation [Standard] (links), einer Band-Applikation (Mitte) und einer Spot-Applikation (rechts).

4.2 Methoden

Für die Spotspraying-Überfahrten wurden die jeweiligen Kulturen zunächst im System hinterlegt, indem Kamera- und Pflanzenerkennungseinstellungen definiert und angepasst wurden (Abbildung 4). Anschliessend wurde die ausgebrachte Wassermenge bei einer Überfahrt bestimmt. Die pro Düse ausgebrachte Menge wurde mittels an den Düsen befestigter Kunststoffbeutel aufgefangen und gewogen (siehe Abbildung 5). Die Bandbehandlungen wurden nach demselben Messprinzip durchgeführt, jedoch mit kontinuierlich sprühenden Düsen. Die applizierte Wassermenge wurde ebenfalls pro Düse erfasst und ausgewertet.

Die Messwerte der Band- und Spotspraying-Varianten wurden mit den berechneten Werten einer flächigen Standardbehandlung verglichen. Auf dieser Grundlage erfolgte die Abschätzung des PSM-Einsparpotenzials sowie des Potenzials zur Reduktion von Drift und Abschwemmung.

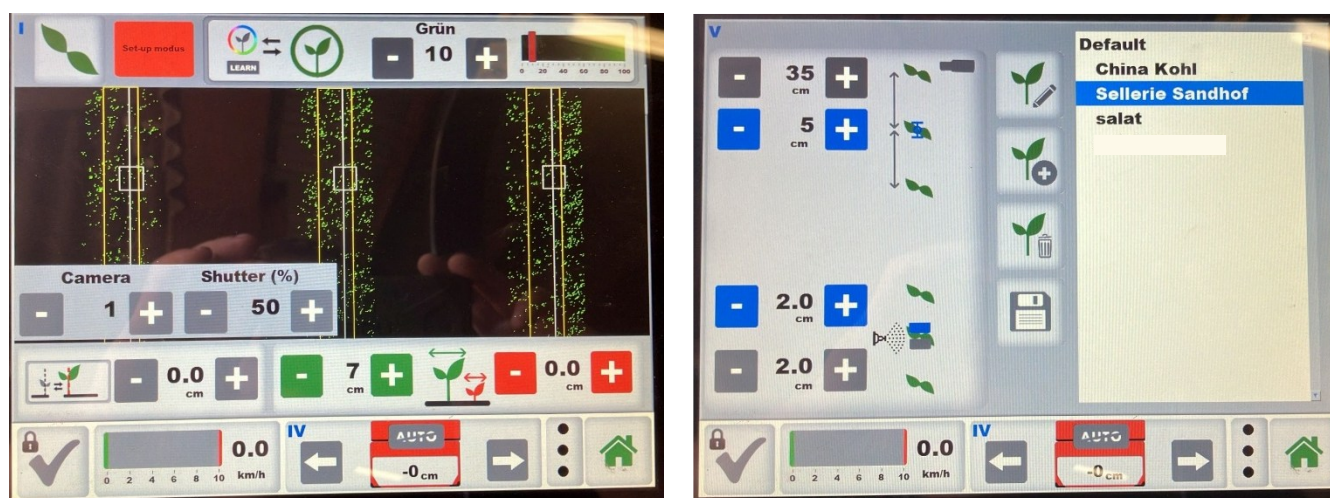


Abbildung 4: Terminalanzeige der Kamera- und Pflanzenerkennungseinstellungen in der Selleriekultur am Versuchsbetrieb Sandhof in Wädenswil (ZH). (Quelle: Agroscope)



Abbildung 5: Auffangen des während einer Spotspraying-Überfahrt aus den Düsen ausgebrachten Wassers. (Quelle: Agroscope)

PSM-Einsparpotenzial

Die Aufwandmenge der verschiedenen Applikationsverfahren wurde auf Basis der gemessenen Wassermengen und der jeweils behandelten Fläche berechnet (Tabelle 1). Die behandelte Fläche bei Band-Applikation wurde aus Düsenwinkel und Düsenhöhe über dem Boden abgeleitet und anschliessend im Verhältnis zur Beetbreite berechnet (Abbildung 6). Die Fläche bei Spot-Applikation wurde dann aus der Fläche der Band-Applikation und dem Verhältnis der applizierten Wassermengen berechnet. Diese Methoden basieren auf der Wirkungsweise des Steketee Prototyp II; andere Spotspraying-Geräte wie der Ecorobotix ARA funktionieren unter Umständen anders.

Tabelle 1: Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Einsparpotenzials

Vergleich	Behandelter Flächenanteil [%]	Mess- und Berechnungsmethode
Band zu flächig	Behandelter Flächenanteil der Bandbehandlung im Verhältnis zur flächigen Behandlung	Die Behandlungsbreite einer Düse wird mit der Anzahl der Düsen multipliziert und anschliessend durch die Beetbreite geteilt.
Spotspraying zu flächig	Behandelte Flächenanteil bei Spotspraying im Verhältnis zu einer flächigen Behandlung	Dieser Wert ergibt sich aus der mathematischen Verknüpfung der oben beschriebenen Methoden und entspricht dem Anteil des Beetes, der bei einer Bandbehandlung behandelt wird, multipliziert mit dem Anteil des Bandes, der beim Spotspraying tatsächlich behandelt wird.

$$b = 2 * h * \tan(\theta/2)$$
$$A_{Band} = \frac{b * n}{B}$$
$$A_{Spot} = A_{Band} * \frac{W_{Spot}}{W_{Band}}$$

Dabei ist:

b: Behandlungsbreite einer Düse [cm]
h: Düsenhöhe [cm]
θ: Düsenwinkel [rad]
n: Anzahl Düsen
B: Beetbreite [cm]
A_{Band}: behandelte Fläche bei Band-Applikation [%]
A_{Spot}: behandelte Fläche bei Spot-Applikation [%]
W_{Spot}: gesammelte Wassermenge (Spot-Applikation) [L]
W_{Band}: gesammelte Wassermenge (Band-Applikation) [L]

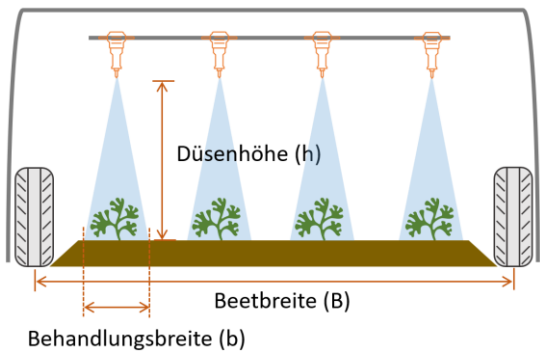


Abbildung 6 Applikation im Beet. Definition der Abstände zur Berechnung der behandelten Fläche.

Das Einsparpotenzial (unbehandelte Fläche) wurde als relative Reduktion der behandelten Fläche gegenüber einer flächigen Standardbehandlung definiert und berechnet:

unbehandelte Fläche = 1 – A_{Band} bzw. A_{Spot}

Dabei ist:

A_{Band}: behandelte Fläche bei Band-Applikation [%]
A_{Spot}: behandelte Fläche bei Spot-Applikation [%]

Reduktion des Abschwemmungspotenzials

Zur Berechnung des Abschwemmungspotenzials wurde der zum Zeitpunkt der Behandlung ermittelte Kulturdeckungsgrad berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass der auf die Kultur applizierte Anteil des Pflanzenschutzmittels (PSM), nicht zur Abschwemmung beiträgt. Daher wurde nur der Anteil des PSM berücksichtigt, der auf den unbedeckten Boden appliziert wurde. Die Reduktion des Abschwemmungspotenzials wurde relativ zur flächigen Behandlung berechnet. Grundlage war der prozentuale Anteil der Fläche des Gemüsebeets, der infolge gezielter Applikationen unbehandelt blieb. Dieser Wert wurde auf den Anteil der unbedeckten Bodenfläche bezogen, wie in der folgenden Formel dargestellt:

$$\text{unbehandelte Fläche} = 1 - A_{\text{Band}} \text{ bzw. } A_{\text{Spot}}$$
$$\text{Reduktion Abschwemmung} = \frac{\text{unbehandelte Fläche}}{1 - \text{Kulturdeckungsgrad}}$$

Dabei ist:

A_{Band} : behandelte Fläche bei Band-Applikation [%]

A_{Spot} : behandelte Fläche bei Spot-Applikation [%]

4.3 Ergebnisse

4.3.1 PSM-Einsparpotenzial

In Abhängigkeit von Gemüsekultur, Wachstumsstadium und Pflanzdichte zeigte sich beim Einsatz von Spotspraying eine Reduktion des behandelten Flächenanteils der Gemüsebeete auf 15 bis 20 % (Abbildung 7). Dies entspricht einer potenziellen Einsparung von 80 bis 85 % bei der Applikation von Fungiziden und Insektiziden im Vergleich zu einer flächigen Behandlung. Bei der Bandbehandlung reduzierte sich der Flächenanteil auf den behandelten Gemüsebeeten auf 29 bis 42 %. Daraus ergibt sich eine potenzielle Einsparung von 58 und 71 % gegenüber der flächigen Standardbehandlung. Es ist anzunehmen, dass sich durch die Verringerung der ausgebrachten PSM-Mengen auch das Driftpotenzial entsprechend reduziert.

Um die Wirksamkeit einer Spot-Applikation abzusichern, kann es erforderlich sein, eine grössere Fläche zu behandeln, als die Pflanzengrösse allein erfordern würde. Das Terminal des Steketee-Prototyps ermöglicht zu diesem Zweck die Definition eines Puffers vor und nach der erkannten Pflanze. Am 16. August 2024 und 16. Mai 2025 wurden Testfahrten mit unterschiedlichen Pufferabständen in Sellerie bzw. Petersilie durchgeführt, um deren Einfluss auf das Einsparpotenzial zu untersuchen. Für jede Testkategorie wurden drei Messwiederholungen durchgeführt, aus denen der Mittelwert berechnet wurde.

Obwohl die Versuche in zwei verschiedenen Kulturen, Wachstumsstadien und Jahreszeiten durchgeführt wurden, waren die Ergebnisse vergleichbar (Abbildung 7). Die Abweichungen innerhalb der jeweiligen Testkategorie lagen zwischen 5 und 13 %. Ohne Puffer konnten in Sellerie und Petersilie durch Spotspraying 80 bis 85 % an PSM eingespart werden. Bei einer Pufferbreite von 1,5 cm vor und nach jeder Pflanze (insgesamt 3 cm pro Pflanze) verringerte sich die PSM-Einsparung um 3 bis 6 %. Beim getesteten Puffer von 5 cm vor und nach jeder Pflanze reduzierte sich das Einsparpotenzial um 5 bis 12 %. Im Vergleich dazu war die PSM-Einsparung bei Band-Applikationen um 14–22 % geringer als beim Spotspraying.

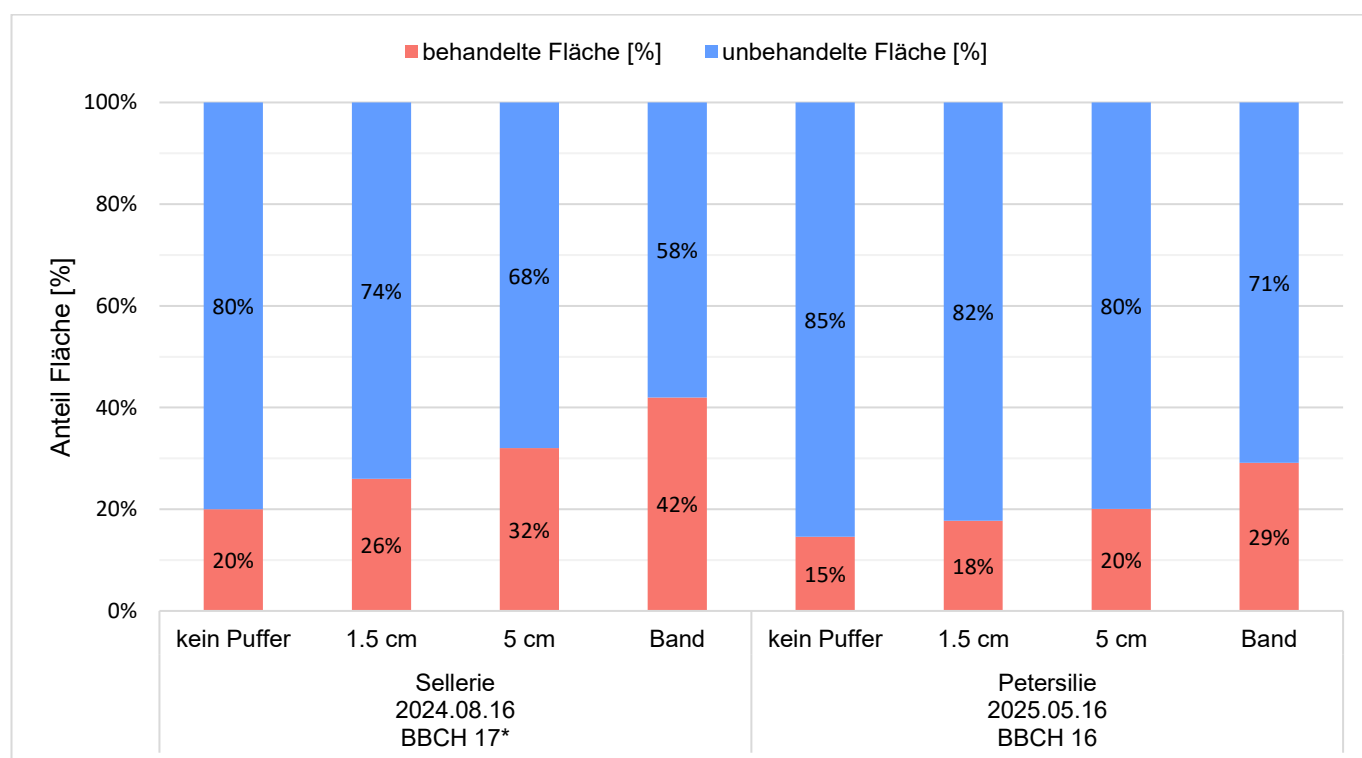


Abbildung 7: Einsparpotenzial [%] von Spot-Applikationen durch Messung der applizierten Wassermengen in Knollensellerie und Petersilie bei Pufferabständen von 0, 1,5 und 5 cm vor und nach jeder Pflanze im Vergleich zur Bandbehandlung. Die dargestellte PSM-Einsparung bezieht sich auf eine flächige Applikation. Für jede Testkategorie wurden die Mittelwerte aus drei Messwiederholungen berechnet. * Da der Sellerie zurückgeschnitten wurde, wurde das BBCH-Stadium anhand früherer Messungen bei ähnlichen Pflanzengrößen geschätzt.

Die Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss der gewählten Pufferabstände auf die Effizienz der Spotspraying-Anwendung. Trotz zusätzlicher Pufferfläche bleibt das Einsparpotenzial erkennbar, wobei das Ausmass von der Kultur, ihrem Wachstumsstadium und den Applikationsparametern abhängt. Der Einfluss der Pufferbreite auf das Einsparpotenzial dürfte beispielsweise in dicht gesäten Kulturen wie Karotten geringer ausfallen als in Kulturen mit grossen Pflanzabständen wie Rosenkohl.

Unter den hier untersuchten Bedingungen verringerte sich die PSM-Einsparung bei zusätzlichen Puffern von 3 bis 10 cm pro Pflanze lediglich um 3 bis 12 %. Dies bietet den Produzenten eine erhöhte Flexibilität, da bei Bedarf eine intensivere Pflanzenschutzbehandlung durchgeführt werden kann, ohne den Vorteil der Aufwandmengenreduktion zu verlieren. Auch bei Verwendung eines Puffers können im Vergleich zu einer flächigen Behandlung noch 68 bis 82 % der eingesetzten PSM-Aufwandmenge eingespart werden (Abbildung 7).

4.3.2 Reduktion des Abschwemmungspotenzials

Im Vergleich zu einer flächigen Behandlung konnte das Abschwemmungspotenzial durch Spotspraying um 93 % reduziert werden (Tabelle 2). Bei der Bandbehandlung wurden Reduktionen von 67 % und 78 % erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein geringerer Anteil der applizierten Menge auf die Bodenoberfläche gelangt und dadurch weniger Wirkstoff potenziell abgeschwemmt werden kann.

Tabelle 2: Kulturdeckungsgrad (%) und behandelte Fläche (%) von Knollensellerie und Petersilie zum Zeitpunkt der Testfahrten sowie die berechnete PSM-Einsparung (%) und Reduktion des Abschwemmungspotenzials (%) bei Spotspraying- und Bandbehandlungen im Vergleich zu einer flächigen Behandlung. * Da der Sellerie zurückgeschnitten wurde, wurde das BBCH-Stadium anhand früherer Messungen bei ähnlichen Pflanzengrössen geschätzt.

	Knollensellerie 16.08.2024 BBCH 17*		Petersilie 16.05.2025 BBCH 16	
Ø Pflanzenlänge [cm]	16.2		15.4	
Ø Pflanzenbreite [cm]	20.0		14.8	
Pflanzen pro m2	5.4		5.0	
Applikationstyp	Band	Spotspraying	Band	Spotspraying
Kulturdeckungsgrad [%]	14	14	9	9
behandelte Fläche [%]	42	20	29	15
unbehandelte Fläche [%]	58	80	71	85
Reduktion des Abschwemmungspotenzials [%]	67	93	78	93

5 Modellierung - Einsparpotenzial und Reduktion des Abschwemmungspotenzials

5.1 Einleitung

Das Einspar- und Abschwemmungspotenzial wurde im Kapitel 4 anhand von Messungen der Applikationsmengen (ausgebrachte Wassermengen) bei Testfahrten mit dem Steketee-Prototyp II bestimmt. Um das Potenzial gezielter Applikationen auch unabhängig von einzelnen Messfahrten und für unterschiedliche Kulturen sowie Wachstumsstadien abschätzen zu können, wurde in diesem Kapitel ergänzend eine Modellierung durchgeführt. Grundlage dafür bildete ein Datensatz mit Kulturparametern, der in früheren Spotspraying-Projekten aufgebaut und im vorliegenden Projekt erweitert wurde. Mithilfe dieses Datensatzes und des Steketee-Prototyps II als Modell wurden das PSM-Einsparpotenzial sowie die Reduktion des Abschwemmungspotenzials für unterschiedliche Kulturen und Entwicklungsstadien rechnerisch abgeschätzt.

Für den ARA gelten hingegen andere Voraussetzungen. Je nach Breite der Kulturpflanzen kommen eine oder mehrere Düsen zum Einsatz, sodass sich die Behandlungsbreite aus einem Vielfachen von 6 cm ergibt. Die behandelte Fläche ist dabei nicht zwingend rechteckig, sondern entspricht vielmehr einem «Raster». Die Modellierungsergebnisse sind daher nur für den Steketee-Prototyp II repräsentativ und lassen sich nicht direkt auf den ARA übertragen.

5.2 Methoden

5.2.1 Kulturparameter-Datensatz

Der für die Modellierung verwendete Kulturparameter-Datensatz umfasst 3'100 Pflanzenmessungen aus 11 verschiedenen Gemüsekulturen. Für jede Kultur und jedes Beprobungsdatum wurden an einer Stichprobe von 20 bis 25 Pflanzen pflanzenspezifische Parameter erfasst, darunter Pflanzenlänge (Durchmesser in Fahrtrichtung), -breite (Durchmesser senkrecht zur Fahrtrichtung) und -höhe, Blattfläche, Blattanzahl, Gewicht sowie das Wachstumsstadium (BBCH). Zusätzlich wurden weitere Kulturparameter dokumentiert wie Sorte, Beetbreite, Anzahl Reihen, Reihenabstand, Pflanzabstand, Pflanzdichte sowie die Anzahl der Tage nach Pflanzung. Der vollständige Datensatz ist öffentlich im Zenodo-Repositorium verfügbar (Witsoe et al., 2026). Die wichtigsten Merkmale des Datensatzes sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Beschreibung des Kulturparameter-Datensatzes von 2018 bis 2025.

Jahr	Anzahl gemessener Pflanzen	Erfasste Kulturen
2018	190	Kopfsalat
2019	250	Eichblattsalat, Kopfsalat, Pak-Choi
2023	1'130	Chinakohl, Eisbergsalat, Federkohl, Knollensellerie, Kohlrabi, Zuckerhut
2024	690	Brokkoli, Eisbergsalat, Kopfsalat, Rettich, Knollensellerie
2025	840	Knollensellerie, Kopfsalat, Petersilie, Rettich
Gesamt	3'100	

5.2.2 Einsparpotenzial-Modellierung

Obwohl bei einer Spot-Applikation von «Spots» gesprochen wird, entspricht die vom Steketee Prototyp II behandelte Fläche, geometrisch Rechtecken und nicht Kreisen (vgl. Abbildung 8). Die Länge des Rechtecks ergibt sich aus dem zeitlich gesteuerten Öffnen und Schliessen der Düsen, das vom Prototyp II für jede einzelne Pflanze präzise geregelt wird. Die Breite des Rechtecks wird hingegen pro Behandlung festgelegt, ist für alle Pflanzen identisch und hängt vom Düsenwinkel sowie von der Düsenhöhe über dem Boden ab. Um sicherzustellen, dass alle Kulturpflanzen vollständig erfasst werden, muss die Behandlungsbreite jeder Düse mindestens dem maximalen Pflanzendurchmesser im Bestand entsprechen.

Für die Modellierung wurde daher für jede Kultur und jedes Beprobungsdatum der maximale Pflanzendurchmesser senkrecht zur Fahrtrichtung bestimmt. Zur Vereinfachung der praktischen Einstellung der Düsenhöhe und damit die Behandlungsbreite für den Gemüseproduzenten, wurden feste Bandbreiten von 10, 15, 20 und 25 cm definiert. Der jeweils gemessene maximale Durchmesser wurde auf die nächsthöhere Bandbreite aufgerundet. Beispielsweise erfordert ein maximaler Durchmesser von 18 cm bei Eisbergsalat acht Tage nach der Pflanzung eine Spritzbreite von 20 cm.

Anschließend wurde diese Bandbreite mit dem medianen Pflanzendurchmesser (in Fahrtrichtung) multipliziert, um die Fläche des Spotspraying-Rechtecks für eine repräsentative Pflanze zu berechnen. Unter Berücksichtigung der Pflanzdichte wurde daraus die behandelte Fläche bestimmt und das Einsparpotenzial im Vergleich zu einer flächigen Behandlung berechnet (unbehandelte Fläche).

$$A_{\text{Spot}} = D_{\text{Länge}} * \text{Bandbreite [cm]}$$

$$\text{behandelte Fläche [\%]} = A_{\text{Spot}} * \frac{\text{Pflanzdichte pro ha}}{100'000'000}$$

$$\text{unbehandelte Fläche [\%]} = 1 - \text{behandelte Fläche [\%]}$$

Dabei ist:

A_{Spot}: Die Spot-Applikationsfläche auf einer einzelnen Pflanze mit einer einzigen Düse [cm²]

D_{Länge}: Pflanzendurchmesser in Fahrtrichtung [cm]

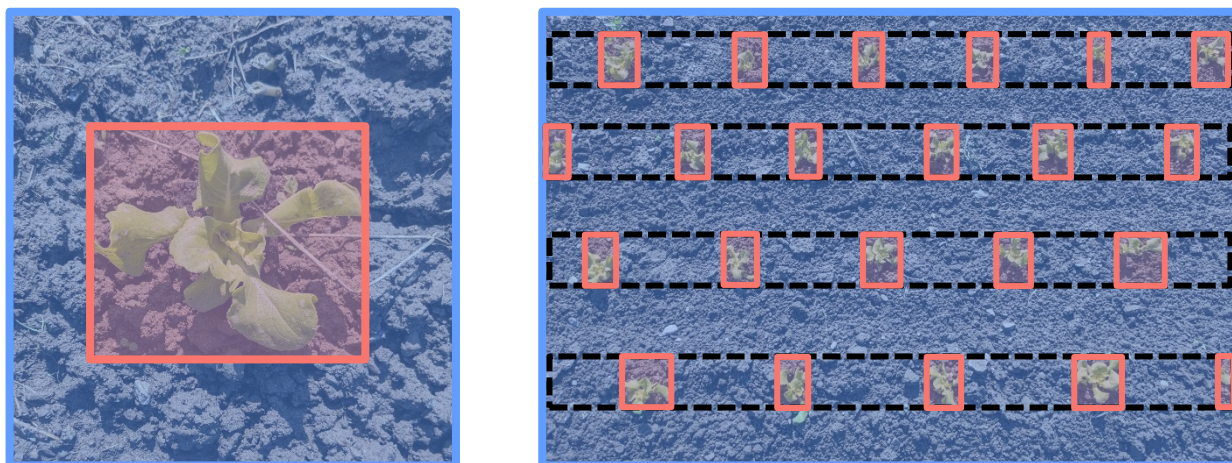


Abbildung 8: Modelliertes Einsparpotenzial bei Spotspraying. Das rote Rechteck zeigt die behandelte Fläche (Spotspraying-Rechteck) bei Kopfsalat acht Tage nach der Pflanzung (BBCH 15). Das blaue Rechteck, abzüglich der roten Rechtecke, stellt die Fläche dar, die bei Spotspraying nicht behandelt wird (eingesparte PSM-Menge). Die gestrichelten schwarzen Linien sind Reihenmarkierungen. (Quelle: Agroscope)

5.2.3 Abschwemmungspotenzial-Modellierung

Zur Bewertung der Reduktion des Abschwemmungspotenzials bei einer Spot-Behandlung mit dem Steketee Prototyp II wurden der Kulturdeckungsgrad sowie der bei der Applikation behandelte Bodenanteil bestimmt und mit einer flächigen Behandlung verglichen (Abbildung 9). Der Kulturdeckungsgrad wurde anhand der Pflanzdichte und der mittleren Pflanzenfläche berechnet. Dabei wurde die Pflanzenform näherungsweise als Ellipse modelliert. Die Berechnung der behandelten Fläche (Spotspraying-Rechteck) erfolgte analog zur Modellierung des Einsparpotenzials. Die Flächenanteile sind in Abbildung 10 schematisch dargestellt.

Das Modell basiert auf der vereinfachenden Annahme einer homogenen Wirkstoffverteilung innerhalb der behandelten Fläche. Zudem wird angenommen, dass der Anteil des Pflanzenschutzmittels (PSM), der direkt auf den Boden appliziert wird, potenziell abgeschwemmt werden kann, während der auf der Kulturpflanze zurückgehaltene PSM-Anteil nicht zur Abschwemmung beiträgt.

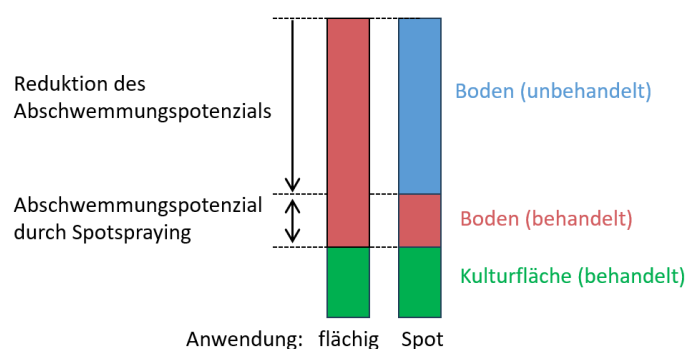


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Reduktion des Abschwemmungspotenzials durch Spot-Applikation im Vergleich zur flächigen Applikation. Während bei der flächigen Anwendung die gesamte nicht von der Kultur bedeckte Bodenfläche behandelt wird, reduziert die Spot-Applikation den behandelten Bodenanteil und damit das potenzielle Abschwemmungsrisiko.

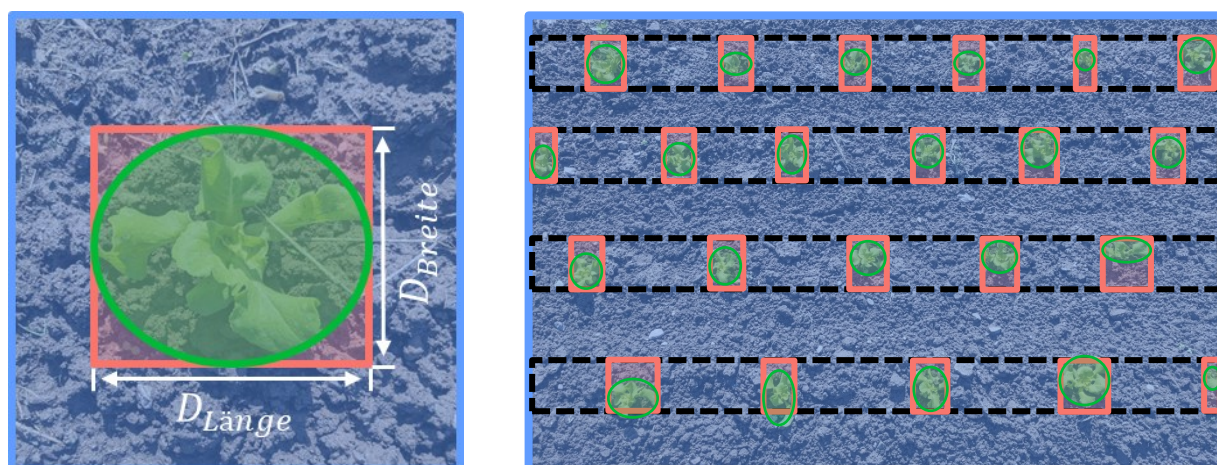


Abbildung 10: Modelliertes Abschwemmungspotenzial bei Spotspraying. Die grün dargestellte Fläche entspricht der modellierten Kulturfläche. Die roten Flächen zeigen den bei Spotspraying behandelten Bodenanteil, auf dem Pflanzenschutzmittel potenziell abgeschwemmt werden können. Die blaue Fläche stellt die Reduktion des Abschwemmungspotenzials im Vergleich zu einer flächigen Behandlung dar. Dargestellt ist ein Kopfsalat acht Tage nach der Pflanzung (BBCH 15). $D_{\text{Länge}}$ = Pflanzendurchmesser in Fahrtrichtung, D_{Breite} = Pflanzendurchmesser senkrecht zur Fahrtrichtung. Die gestrichelten schwarzen Linien sind Reihenmarkierungen. (Quelle: Agroscope)

Die Fläche einer einzelnen Pflanze wurde wie folgt berechnet:

$$A_{Pflanze} = \pi * \frac{D_{L\ddot{a}nge}}{2} * \frac{D_{Breite}}{2}$$

Dabei ist:
 $A_{Pflanze}$: Fläche einer einzelnen Pflanze [cm²]
 $D_{L\ddot{a}nge}$: Pflanzendurchmesser in Fahrtrichtung [cm]
 D_{Breite} : Pflanzendurchmesser senkrecht zur Fahrtrichtung [cm]

Der Kulturdeckungsgrad ergibt sich zu:

$$Kulturdeckungsgrad [\%] = A_{Pflanze} * \frac{Pflanzdichte \text{ pro ha}}{100'000'000}$$

Dabei ist:
 $A_{Pflanze}$: Fläche einer einzelnen Pflanze [cm²]

Für eine flächige Behandlung berechnet sich das Abschwemmungspotenzial wie folgt:

$$AP_{fl\ddot{a}chig} = 1 - Kulturdeckungsgrad [\%]$$

Dabei ist:
 $AP_{fl\ddot{a}chig}$: Abschwemmungspotenzial einer flächigen Behandlung [%]

Das Abschwemmungspotenzial bei Spotspraying entspricht somit der Differenz zwischen der behandelten Fläche und der von der Pflanze bedeckten Fläche:

$$AP_{Spot} = \text{behandelte Fläche} [\%] - Kulturdeckungsgrad [\%]$$

Dabei ist:
 AP_{Spot} : Abschwemmungspotenzial einer Spot-Behandlung [%]

Die Flächenreduktion des Abschwemmungspotenzials ergibt sich aus dem Anteil der Fläche, der weder durch die Spot-Behandlung noch durch die Kulturpflanzen bedeckt ist:

$$\begin{aligned} \text{Flächenreduktion des Abschwemmungspotenzial} [\%] \\ = 1 - (Kulturdeckungsgrad [\%] + AP_{Spot}) \end{aligned}$$

Dabei ist:
 AP_{Spot} : Abschwemmungspotenzial einer Spot-Behandlung [%]

Die Reduktion des Abschwemmungspotenzials mit einer Spot-Behandlung im Vergleich zur flächigen Behandlung wurde wie folgt berechnet:

$$Reduktion \text{ des Abschwemmungspotenzials} [\%] = 1 - \frac{AP_{Spot}}{AP_{fl\ddot{a}chig}}$$

Dabei ist:
 AP_{Spot} : Abschwemmungspotenzial einer Spot-Behandlung [%]
 $AP_{fl\ddot{a}chig}$: Abschwemmungspotenzial einer flächigen Behandlung [%]

5.3 Ergebnisse

5.3.1 PSM-Einsparpotenzial-Modellierung

Das PSM-Einsparpotenzial durch Spot-Applikation hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. der Kultur, der Anbausaison und den Pflanzenparametern. Spot-Applikationen eignen sich für Kulturstadien, bei denen durch die gezielte Behandlung der Kulturpflanzen PSM eingespart werden kann. Kopfsalat beispielsweise ist eine schnell wachsende Kultur (wenige Wochen) während Sellerie eine deutlich längere Kulturdauer hat (mehrere Monate). Entsprechend nimmt der Kulturdeckungsgrad bei Kopfsalat schnell zu, bei Sellerie hingegen deutlich langsamer, wodurch das Zeitfenster für eine Spot-Applikation ebenfalls länger ist. Diese beiden sehr unterschiedlichen Beispiele sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Modellierungsergebnisse für weitere Kulturen sind in Appendix II aufgeführt.

Die Modellierung des PSM-Einsparpotenzials zeigt, dass bei Kopfsalat in der Pflanzwoche bis zu 95 % der Fungizid- oder Insektizidmenge im Vergleich zu einer flächigen Applikation eingespart werden können. Zwei Wochen nach der Pflanzung beträgt das Einsparpotenzial noch 75 % (BBCH 19). Nach vier Wochen (BBCH 43) reduziert sich die Einsparung auf 40 %, da bereits 60 % der Fläche behandelt werden muss. Ab der fünften Woche (BBCH 47) kann kein PSM mehr eingespart gegenüber einer flächigen Behandlung mit der klassischen Feldspritze. In der Praxis sind Pflanzenschutzbehandlungen zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht mehr relevant, da der Kopfsalat bereits erntereif ist.

Bei der langsam wachsenden Kultur Sellerie können in den ersten sechs Wochen nach der Pflanzung (BBCH 15 bis 19) zwischen 70 und 90 % an PSM eingespart werden. Für die siebte Woche lagen keine Messdaten vor. Zwischen der achten und elften Woche nach der Pflanzung (BBCH 41 bis 43) können noch 25 bis 40 % der PSM eingespart werden. Ab der 14. Woche ist der Bestand weitgehend geschlossen, sodass keine relevanten PSM-Einsparungen durch Spot-Applikationen mehr erzielt werden können.

Pro Beprobungsdatum wurden jeweils 20 bis 25 Pflanzen im Bestand gemessen. Selleriepflanzen sind weniger einheitlich im Wachstum als Kopfsalat. Diese Heterogenität könnte erklären, weshalb das modellierte PSM-Einsparpotenzial bei den Wochen 5, 8 und 12 nicht genau dem Trend der vorangehenden und nachfolgenden Wochen folgte.

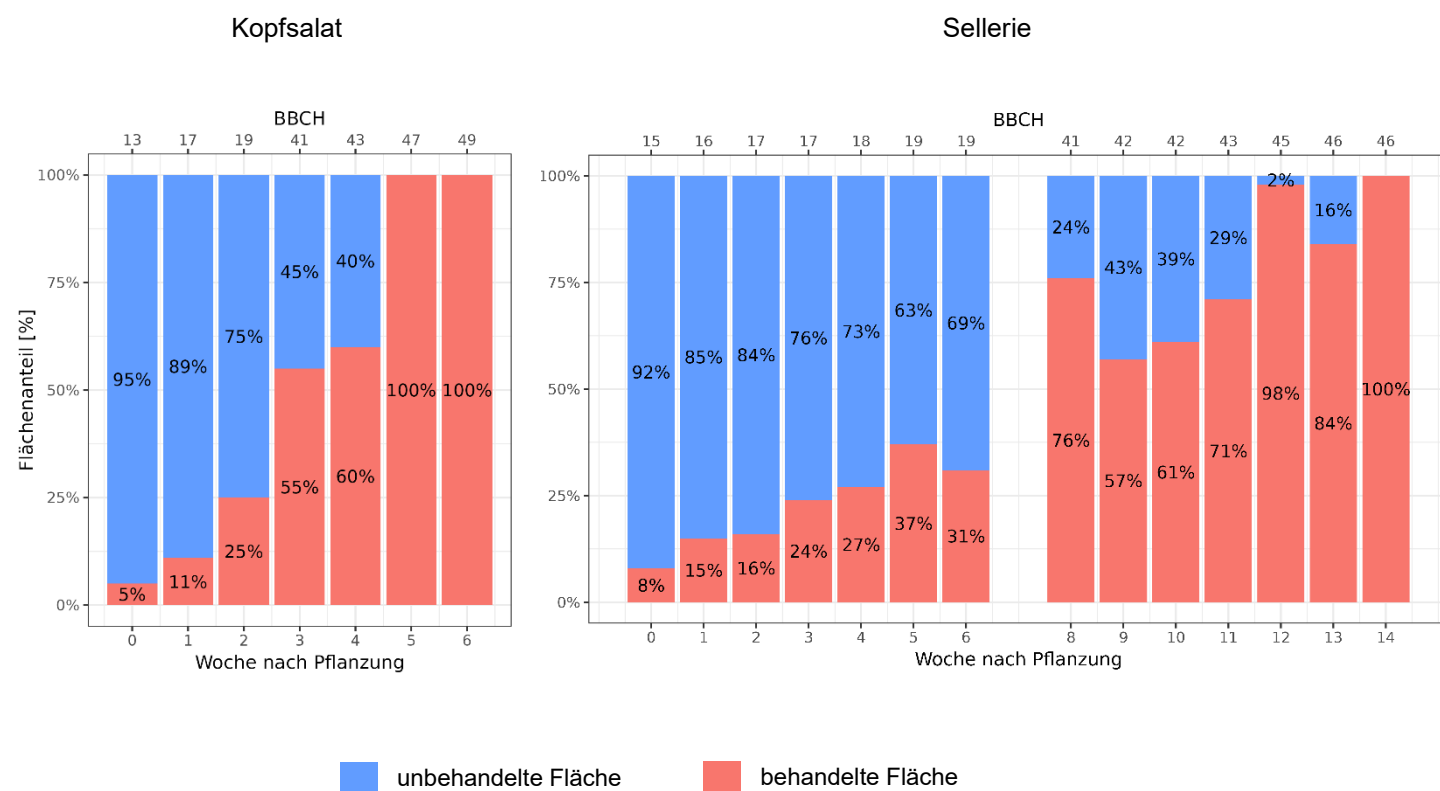


Abbildung 11: Modelliertes PSM-Einsparpotenzial durch Spotspraying in Kopfsalat (links, gepflanzt am 29.04.2025; n = 165 gemessene Pflanzen) und Knollensellerie (rechts, gepflanzt am 14.05.2025; n = 375).

5.3.2 Abschwemmungspotenzial-Modellierung

Die Modellierung des Abschwemmungspotenzials basiert auf der Annahme, dass nur der Anteil an PSM abgeschwemmt wird, der bei der Applikation nicht auf die Kultur, sondern auf den Boden gespritzt wird. Bei flächiger Anwendung ist dieser Anteil insbesondere in frühen Kulturstadien sehr hoch (Abbildung 12, Summe der blauen und roten Flächen). Mit fortschreitendem Wachstum steigt der Kulturdeckungsgrad, wodurch bei einer flächigen Behandlung ein zunehmend grösserer Anteil der applizierten PSM von der Kultur abgefangen wird und entsprechend weniger PSM auf den Boden gelangen. Dadurch sinkt das Abschwemmungspotenzial im Verlauf der Kulturentwicklung nach und nach ab (Abbildung 13, grüne Linien). Bei der Spot-Applikation wird hingegen anfänglich nur ein kleiner Teil der Fläche behandelt. Da ein Teil dieser behandelten Fläche durch die Pflanze bedeckt ist, wird nur ein geringer Teil des Bodens mit PSM behandelt (Abbildung 12, rote Flächen). Mit zunehmender Pflanzengrösse wird ein immer grösserer Flächenanteil behandelt, wodurch das Abschwemmungspotenzial allmählich zunimmt (Abbildung 13, orange Linien). Die beiden Abschwemmungspotenzial-Kurven nähern sich sukzessive an, bis gegen Ende der Kulturdauer kein Unterschied mehr besteht.

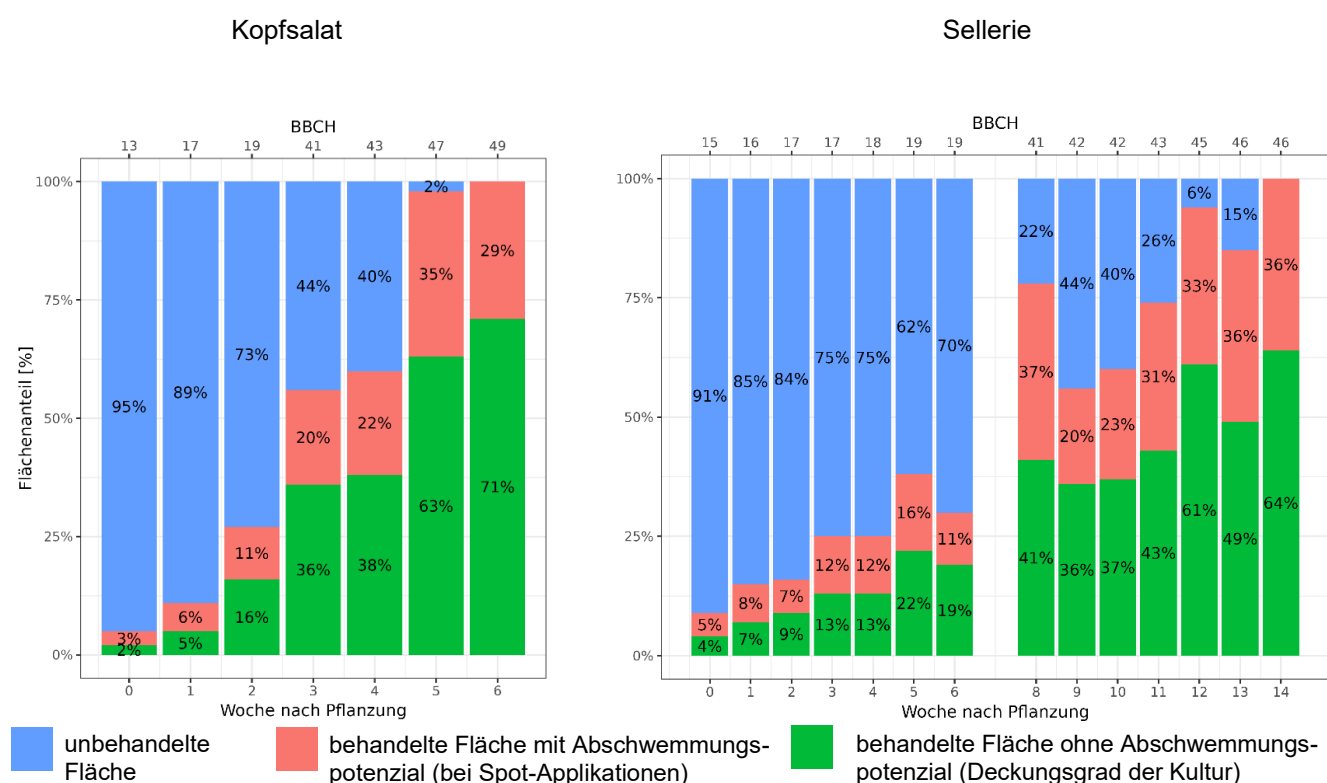


Abbildung 12: Modelliertes Abschwemmungspotenzial bei Spotspraying in Kopfsalat (links, gepflanzt am 29.04.2025; n = 165 gemessene Pflanzen und Knollensellerie (rechts, gepflanzt am 14.05.2025; n = 375).

In Kopfsalat lag die modellierte Reduktion des Abschwemmungspotenzials in den ersten zwei Wochen nach der Pflanzung (BBCH 13 bis 19) zwischen 97 % bis 87 % und nahm danach rasch ab auf 69 % bzw. 65 % nach drei bis vier Wochen nach der Pflanzung (BBCH 41 bzw. 43). Ab einem Kulturdeckungsgrad von rund 63 % (BBCH 47, fünf Wochen nach der Pflanzung) unterschied sich das modellierte Abschwemmungspotenzial von Spot- und Flächenapplikation nur noch geringfügig (Tabelle 4, Abbildung 13).

In Sellerie, aufgrund der langsameren Kulturentwicklung, war die Reduktion des Abschwemmungspotenzials durch Spotapplikation hingegen über einen längeren Zeitraum hoch. Innerhalb der ersten sechs Wochen nach der Pflanzung (BBCH 15–19) lag sie zwischen 95 % und 79 %. Auch zwischen der achten und elften Woche nach der Pflanzung (BBCH 41 bis 43) lag die Reduktion noch zwischen 37 % und 69 %. Erst ab BBCH 45 (12 Wochen nach der Pflanzung) unterschied sich das modellierte Abschwemmungspotenzial von Spot- und Flächenapplikation nur noch geringfügig (Tabelle 4, Abbildung 13).

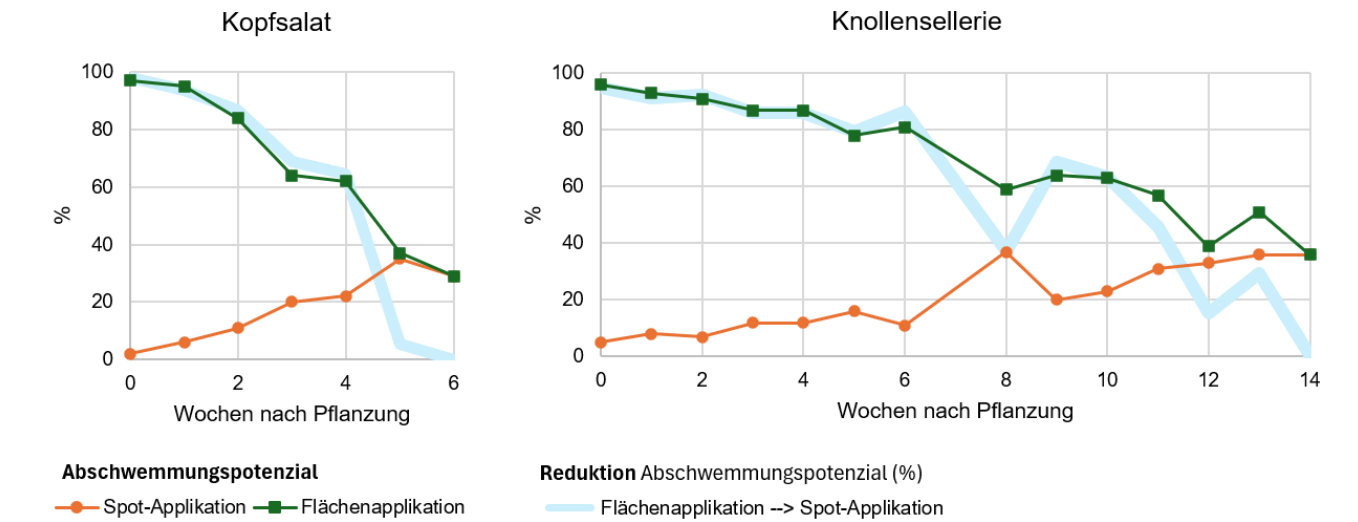


Abbildung 13: Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Abschwemmungspotenzials einer Flächen- (grüne Linien) und einer Spot-Applikation (orange Linien) in Kopfsalat (links, gepflanzt am 29.04.2025; n = 165 gemessene Pflanzen) resp. Knollensellerie (rechts, gepflanzt am 14.05.2025; n = 375). Die hellblaue Linie stellt die Reduktion des Abschwemmungspotenzials durch Spot-Applikation im Vergleich zur Flächenapplikation dar.

Tabelle 4: Anhand von Kulturparametern modellierte Reduktion des Abschwemmungspotenzials in Kopfsalat (gepflanzt am 29.04.2025; n = 165 gemessene Pflanzen) resp. Knollensellerie (gepflanzt am 14.05.2025; n = 375).

Woche nach Pflanzung	BBCH	Reduktion des Abschwemmungspotenzials	BBCH	Reduktion des Abschwemmungspotenzials
Kopfsalat			Sellerie	
0	13	97 %	15	95 %
1	17	94 %	16	91 %
2	19	87 %	17	92 %
3	41	69 %	17	86 %
4	43	65 %	18	86 %
5	47	5 %	19	79 %
6	49	0 %	19	86 %
8			41	37 %
9			42	69 %
10			42	63 %
11			43	46 %
12			45	15 %
13			46	29 %
14			46	0 %

Die Annahme bei den Berechnungen, dass auf der Pflanzenoberfläche applizierte PSM nicht abgeschwemmt werden, ist eine stark vereinfachte Betrachtungsweise. In der Praxis dürfte, je nach Wirkstoffeigenschaften, ein Teil der auf der Pflanze abgelagerten Wirkstoffmenge ebenfalls durch Niederschläge abgewaschen werden und somit zur Abschwemmung beitragen. Die hier berechneten Reduktionen des Abschwemmungspotenzials sind daher als theoretische Maximalwerte zu interpretieren.

6 Feldversuche zur Abdrift

6.1 Design und Methode

Die Driftversuche wurden gemäss der internationalen Norm für die Feldmessung von Abdrift (ISO 22866, 2005) durchgeführt. Gemäss den ISO-Normen muss für einen konformen Durchgang 90 % der gemessenen Windgeschwindigkeit über 1 m s^{-1} liegen, 70 % der gemessenen Windrichtung innerhalb von ± 45 Grad liegen und der Mittelwert innerhalb von 30 Grad der Zielwindrichtung liegen. In der Schweiz dürfen Landwirte bei Windgeschwindigkeiten von 20 km h^{-1} und mehr ($5,5 \text{ m s}^{-1}$) keine PSM applizieren (Kramer et al., 2024). Dieser Wert wurde als Obergrenze für die Windgeschwindigkeit im Versuch übernommen.

Zur Bewertung der Abdrift wurde die Kultur mit einem fluoreszierenden Tracer behandelt und die Deposition auf Kollektoren gesammelt. Als Kollektoren wurden $2,5 \times 200 \text{ cm}$ grosse Filterpapierstreifen (Type 598, Sebio GmbH, Sissach, Schweiz) verwendet, die an Holzplatten befestigt wurden. Die Holzplatten wurden auf Holzrahmen in Abständen von 0,5, 1, 1,5, 3, 4,5, 6 und 9 Metern vom Beetrand positioniert. Für jede Distanz wurden vier Wiederholungen durchgeführt (Abbildung 14). Für den Vergleich mit einer flächigen Applikation wurde die Nullmeter-Marke am Beetrand gesetzt, wobei die Beetbreite anhand der Mitte der Reifenspuren in der Fahrbahn bestimmt wurde (Abbildung 15). Pro Wiederholung wurden zwei Kollektoren innerhalb der behandelten Fläche platziert, um die Tracerdeposition innerhalb des behandelten Kulturbereichs zu bestimmen. Weitere Kollektoren wurden mindestens 20 Meter windaufwärts positioniert. Diese dienten als Kontrollproben (Blanks). Nach jeder Applikation wurden 50 mL-Proben der Spritzbrühe direkt aus den Düsen gesammelt, um die Tracerkonzentration in der ausgebrachten Brühe zu bestimmen (Referenzkonzentrationen).

Die Kollektoren wurden anschliessend nacheinander, beginnend mit dem am weitesten von der Kultur entfernten Kollektor, zu einem am Beetrand aufgestellten Tisch transportiert. Dort wurde das Papier von der Holzplatte gelöst und einzeln in Kunststoffbeutel (Polyethylene [HDPE], $30 \times 45 \text{ cm}$, Tangan Nr. 15, Migros, Zürich, Schweiz) verpackt. Um die Proben nicht zu kontaminieren, wurden zwischen den Wiederholungen die Handschuhe gewechselt und die Arbeitsfläche des Tisches gereinigt. Die Proben wurden anschliessend bei 4°C im Kühlraum gelagert, bis die Analyse im Labor durchgeführt wurde. Die Spritzbrüheproben wurden innerhalb von zwei Tagen nach dem Versuch analysiert, die Drift-Kollektorproben innerhalb von zwei Wochen.

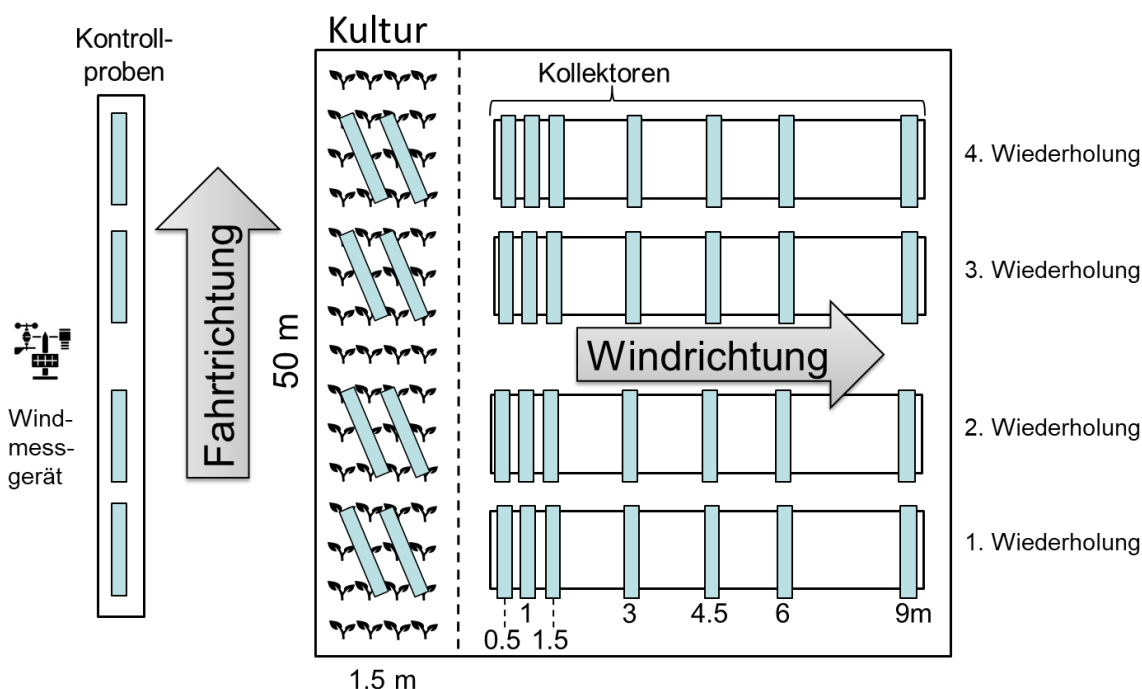


Abbildung 14: Versuchsdesign der Driftversuche.

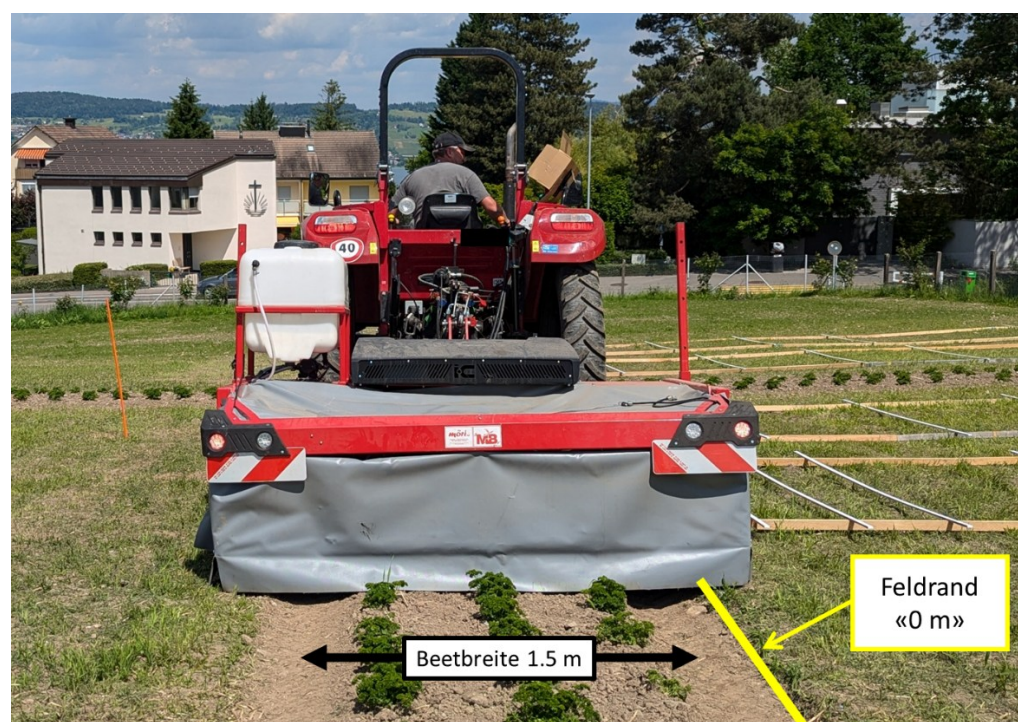


Abbildung 15: Der Steketee Prototyp II bei einem Driftversuch auf dem Sandhof: Eingezeichnet ist der Beetrand als Nullpunkt. Die Beetbreite ist der Abstand von zwischen der Mitte der Reifenspuren innerhalb der Fahrbahn (Quelle: Agroscope).

Beim Vergleich der Driftwerte aus anderen Driftversuchen ist es entscheidend, die Nullpunkte der einzelnen Versuche zu bestimmen, um die richtigen Abstände vergleichen zu können, wie in Abbildung 16 dargestellt.

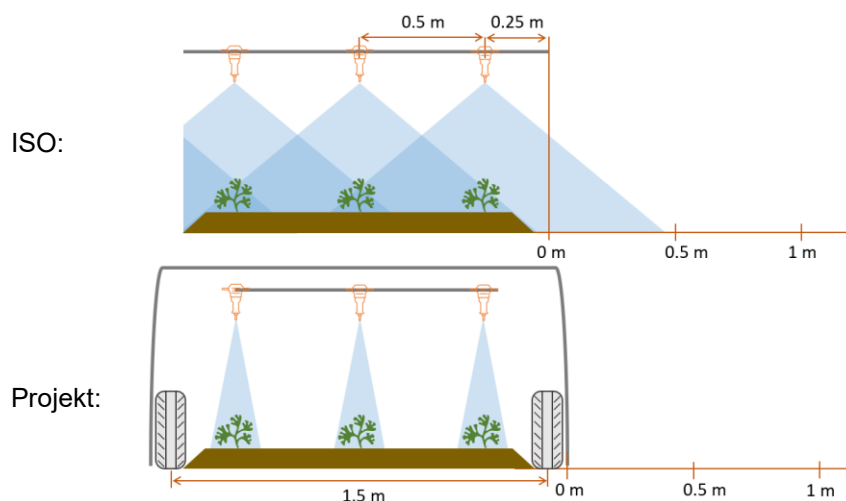


Abbildung 16: Schematische Darstellung der letzten Düsenposition und der definierten Nullpunkte der Driftkurve (die Hälfte des Düsenabstands, nach der letzten Düse dazu) für die Norm ISO 22866 sowie der Driftkurve in diesem Projekt (Beetrand).

Eine Übersicht über die Applikationsdetails sämtlicher in den Jahren 2024 und 2025 durchgeführten Driftversuche findet sich in Tabelle 5. Beim Vergleich zwischen Driftdeposition inklusive und exklusive PSM-Einsparpotenzial (siehe weiter unten in Abschnitt 6.3.5) wird der Anteil des behandelten Beets mit der Anzahl der erfolgreichen Durchgänge pro Versuch gewichtet.

Tabelle 5: Applikationsdetails für alle Driftversuche mit Spotspraying-Geräten in den Jahren 2024 & 2025

Datum	Gerät	Applika- tionstyp	Düse	Düsen- höhe [cm]	Druck [bar]	Fahrge- schwind- igkeit [km/h]	Brüh- menge [l/ha]	Ø Temp. [°C]	Ø Wind- geschwind- igkeit [m/s]	Anteil Beet behand- elt [%]
05.06.2024*	Steketee Prototyp II	Spot	TeeJet TP40-02E	34	2	3,6	400**	23,0	2,7	21
21.08.2024	Ecorobotix ARA	flächig	EUSPRAY IC1X502E	26	3	7,2	260	25,1	2,8	100
15.05.2025	Steketee Prototyp II	Spot	TeeJet TP40-02E	20	3	4,5	500**	22,3	2,5	15
19.06.2025	Steketee Prototyp II	Spot	Agrotop RowFan 40- 02E	33	3	4,5	500**	27,4	2,1	24
06.08.2025	Ecorobotix ARA	Spot	EUSPRAY IC1X502E	26	3	7,2	200**	25,3	2,9	44
02.10.2025	Steketee Prototyp II	Spot	TeeJet TP40-02E	38	3	4,5	500**	14,1	2,6	28

* Aufgrund technischer Probleme konnten die Ergebnisse dieses Versuchs nicht verwendet werden.

** Brühmenge bei einer «theoretischen» flächigen Behandlung

Messung der meteorologischen Bedingungen

Die meteorologischen Bedingungen wurden während jedes Feldversuchs mit mehreren Messgeräten überwacht. Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Lufttemperatur wurden in einer Höhe von 2 m kontinuierlich mit einem Thies Clima Ultraschall-3D-Anemometer (Adolf Thies GmbH & Co. KG, Göttingen, Deutschland) aufgezeichnet. Die Messungen erfolgten mit einer Abtastrate von 10 Hz an einer Stelle, die sich 10 m windabgewandt vom Zentrum der behandelten Fläche befand. Die vom Ultraschall-Anemometer gelieferten Daten dienten als primäre Referenz zur Überprüfung der Einhaltung der erforderlichen meteorologischen Bedingungen während jedes Durchgangs. Da diese Daten intern gespeichert wurden und während der Feldarbeit nicht direkt zugänglich waren, wurden zusätzliche Geräte eingesetzt, um die meteorologischen Bedingungen vor jedem Durchgang in Echtzeit zu beurteilen.

Die Windverhältnisse vor Ort wurden visuell mithilfe eines Windsacks (68 cm × 16,5 cm Durchmesser; Satshop Handels GmbH, Dottikon, Schweiz) beurteilt, um die relative Windrichtung zu bestimmen. Die Windgeschwindigkeit wurde zusätzlich mit einem Handanemometer (C.A 1227, Chauvin Arnoux, Asnières-sur-Seine, Frankreich) überwacht, während die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Handanemometer testo 410-2 (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Deutschland) gemessen wurde. Beide Handgeräte arbeiteten mit einer Abtastfrequenz von 1 Hz und wurden auch 10 m windabgewandt vom Zentrum der behandelten Fläche positioniert.

6.2 Arbeitsschritte im Labor

Im Labor wurden die Kollektor-Proben zunächst unter ultraviolettem Licht visuell begutachtet (Abbildung 17). Dabei wurde nach sichtbaren Anzeichen einer Kontamination gesucht und überprüft, ob die Tracerdepositionen in etwa dem erwarteten Verlauf entsprachen. Nach der visuellen Inspektion wurden die Proben direkt in den Kunststoffbeuteln mit 40 mL Isopropanol ($\geq 99,5$ % ACS reagent, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, Vereinigte Staaten) extrahiert (Abbildung 18). Die Proben wurden mindestens 10 Minuten ausgiebig benetzt und dabei mehrmals geschwenkt, um eine ausreichende Extraktion sicherzustellen. Danach wurden 5 mL des Extrakts über Papier-Faltenfilter (Durchmesser: 70 mm, Macherey-Nagel, Düren, Deutschland) in Einweg-Polypropylen-Trichtern (Durchmesser: 4 cm, Vitilab GmbH, Grossostheim, Deutschland) filtriert und in Reagenzgläser transferiert (100 mm x 12 mm, Glaswarenfabrik Karl Hecht, beschafft über Faust, Schaffhausen, Schweiz).

Die Tracerkonzentration in den Extrakten wurde mittels Fluoreszenz-Messung bestimmt (Fluorimeter 96, Syngenta Crop Protection AG, Stein, Schweiz; Abbildung 19). Proben mit Konzentrationen oberhalb des Messbereichs des Fluorimeters ($1500 \mu\text{g L}^{-1}$) wurden schrittweise mit Isopropanol verdünnt, bis eine Messung innerhalb des gültigen Messbereichs möglich war. Proben mit Konzentrationen unter $10 \mu\text{g L}^{-1}$ wurden in 1,5-mL Autosampler-Vials überführt und bis zur weiteren Analyse mittels Flüssigchromatographie-Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS, Abbildung 20) bei 4°C gelagert.

Die LC-MS/MS- Analysen wurden mit einem Gerät durchgeführt, bestehend aus Autosampler (PAL RTC, CTC Analytics, Zwingen, Schweiz), HPLC-Pumpen (Exion LC, Sciex, Framingham, MA, Vereinigte Staaten), und Triple-Quadrupol-Massenspektrometer (QTRAP 6500+, mit Turbo Ion Spray-Quelle, Sciex, Framingham, MA, Vereinigte Staaten). Die chromatografische Trennung erfolgte an einer Luna C8-Säule ($3 \mu\text{m}$ Partikelgrösse, $50 \times 2 \text{ mm}$, mit $4 \times 2 \text{ mm}$ Vorsäule gefüllt mit dem gleichen Packungsmaterial, Phenomenex, Torrance, CA, Vereinigte Staaten). Eluenten waren wässriges Ammoniumacetat (1 mM , puriss p.a., ACS reagent, ACROS ORGANICS, Bridgewater, NJ, Vereinigte Staaten) und Methanol (HPLC gradient grade, CHEMSOLUTE, Renningen, Deutschland). Gradientenelution mit einer Flussrate von $0,2 \text{ mL min}^{-1}$ erfolgte mit folgenden Bedingungen: Anfangsbedingungen, 80 % Methanol, linearer Anstieg auf 100 % Methanol in 2 Min, gefolgt von 6 Min bei 100% Methanol. Anschliessend wurde die Säule während 2 Min. bei den Anfangsbedingungen äquilibriert.

Das Massenspektrometer wurde im positiven Modus betrieben (Ion spray voltage, $4,5 \text{ kV}$, 250°C , Declustering potential, 240 V) und folgende Massenübergänge wurden aufgezeichnet: Quantifizierung mit $m/z 431,1 \rightarrow 415,1$ (Kollisionsenergie $\text{CE} = 59 \text{ eV}$) und Bestätigung mit $m/z 431,1 \rightarrow 399,1$ ($\text{CE} = 82 \text{ eV}$). Die Quantifizierung wurde aufgrund der Peakflächen und in Referenz zu Kalibrationslösungen in Isopropanol durchgeführt (Konzentrationsbereich $0,05$ bis $50 \mu\text{g L}^{-1}$). Ein Injektionsvolumen von $3 \mu\text{L}$ wurde verwendet.



Abbildung 17: Optische Beurteilung der Driftproben unter Schwarzlicht (Quelle: Agroscope).



Abbildung 18: Tracer-Extraktion der Driftprobe mit Isopropanol (Quelle: Agroscope).



Abbildung 19: Fluorometer zur Bestimmung der Tracerkonzentrationen (Quelle: Agroscope).



Abbildung 20: LC-MS/MS zur weiteren Analyse niedriger Tracerkonzentrationen (Quelle: Agroscope).

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Bestimmung der Mindestbreite der behandelten Fläche basierend auf der kumulativen Drift

Die ISO-Norm 22866 über Methoden zur Messung der Abdrift verlangt, dass für jedes getestete Gerät geprüft wird, wie breit die behandelte Fläche sein muss, damit repräsentative Abdrift-Kurven bestimmt werden können. Dazu wird zuerst ein Versuch durchgeführt, bei dem nur ein Streifen entsprechend der Gerätebreite behandelt wird. Die gemessene Abdrift in Abhängigkeit vom Abstand zum Beetrand wird aufsummiert. Der Abstand, wo die kumulative Abdrift 90 % erreicht, wird als Mindestbehandlungsbreite festgelegt. Die Annahme ist, dass das übrige Feld maximal 10 % zur Abdrift beitragen würde.

Die ersten Driftversuche zeigten, dass bei beiden getesteten Geräten mit einer Fahrt (einer Gerätebreite) eine ausreichend breite Fläche behandelt wird, um repräsentative Abdrift-Kurven messen zu können. In den weiteren Driftversuchen wurde daher jeweils nur ein Streifen behandelt, d.h. es erfolgte pro Versuchsdurchgang eine Fahrt.

Abbildung 21 zeigt die kumulative Abdrift basierend auf den 90. Perzentilen der Messwerte aller gültigen Versuche mit den beiden getesteten Spotspraying-Geräten. Die geforderten 90 % an kumulativer Abdrift wurden bei Abständen zwischen 1,5 und 2 m vom Beetrand erreicht. Da der Steketee Prototyp II eine Behandlungsbreite von 1,2 bis 2 m und der Ecorobotix ARA eine Arbeitsbreite von 6 m hat, bestätigt diese Auswertung, dass die behandelte Fläche in den Versuchen breit genug war, um repräsentative Abdrift-Kurven ableiten zu können.

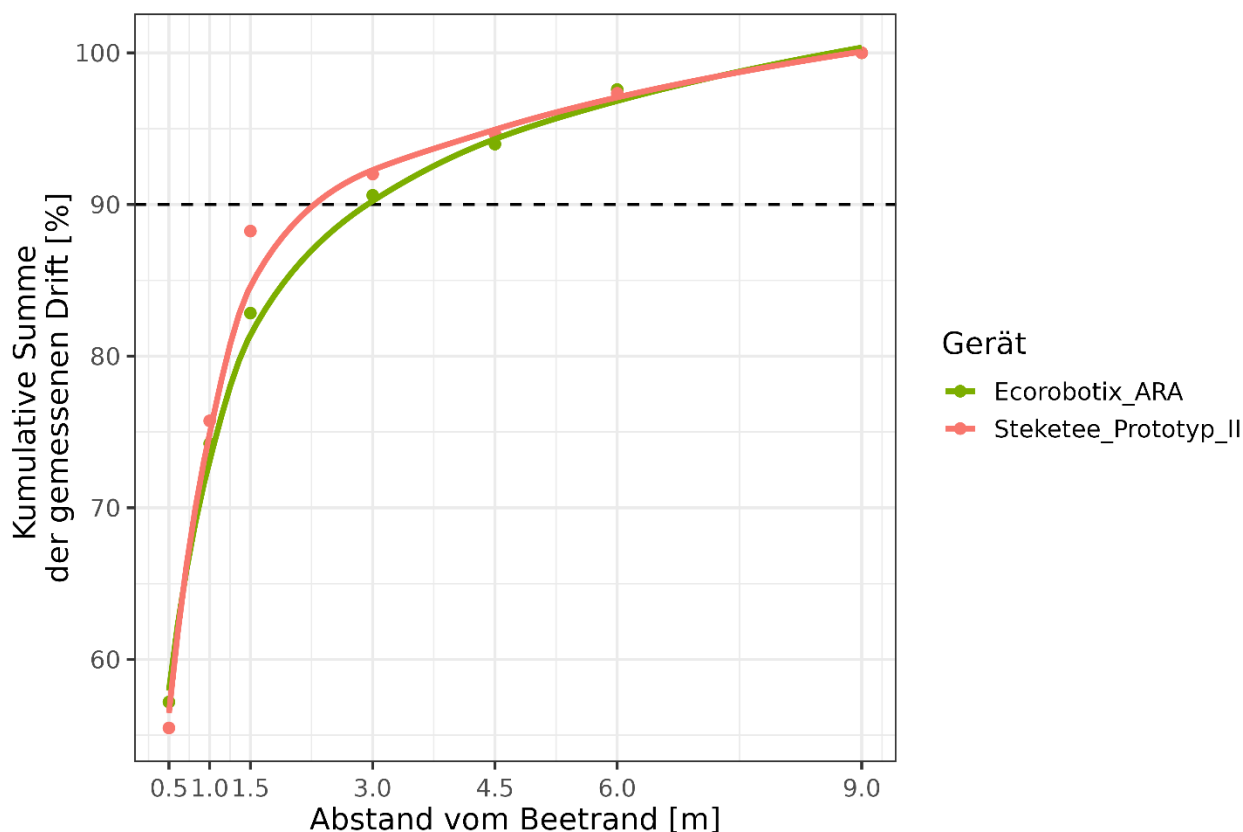


Abbildung 21: Kumulative Drift als Funktion des Abstandes zum Beetrand für die beiden getesteten Spotspraying-Geräte. Der Punkt, bei dem die kumulative Drift 90 % erreicht, bestimmt die Mindestbreite der behandelten Fläche.

6.3.2 Übersicht aller Spotspraying Driftversuche

In den Jahren 2024 und 2025 wurden insgesamt 7 Driftversuche mit insgesamt 27 Versuchsdurchgängen durchgeführt. Davon erfüllten 18 Durchgänge die Anforderungen hinsichtlich Windgeschwindigkeit und Windrichtung und konnten somit als ISO-konform eingestuft werden. Weitere Details zu den Windverhältnissen während der Versuche sind in Appendix III aufgeführt. Von den 18 ISO-konformen Durchgängen wurden drei wegen unzureichendem Pflanzenwachstum als flächige Applikationen durchgeführt und später mit Spot-Applikationen verglichen. Weitere fünf Durchgänge sowie zwei einzelne Wiederholungen wurden aufgrund verschiedener technischer Probleme und Probleme während der Versuchsdurchführung und Probenahme von der Auswertung ausgeschlossen.

Alle verbleibenden gültigen Spotspraying-Driftergebnisse (insgesamt 10 Durchgänge mit 38 Wiederholungen) sind in Abbildung 22 dargestellt. Diese Übersicht dient ausschliesslich der qualitativen Veranschaulichung und ist nicht für eine quantitative Interpretation geeignet, da die Datensätze in Abhängigkeit von Gerätetyp und Applikationseinstellungen differenziert betrachtet werden müssen. Entsprechende Auswertungen sind in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

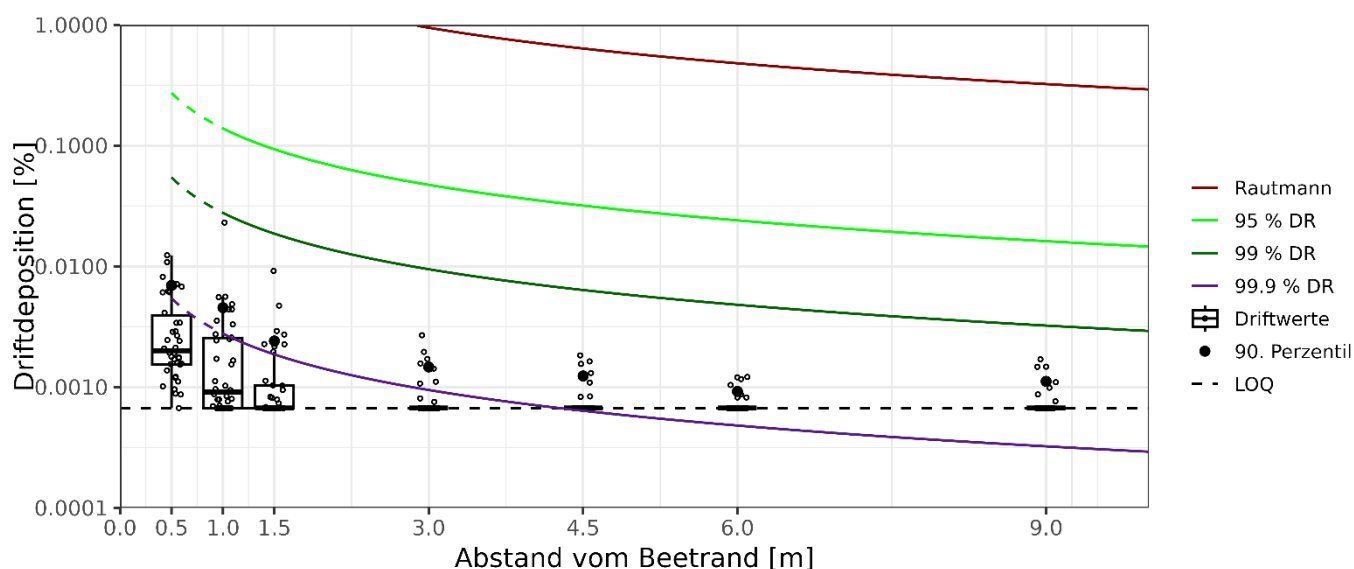


Abbildung 22: Kombiniertes Datensatz der Driftdeposition beider Spotspraying-Geräte im Vergleich zur Rautmann-Referenzkurve (Rautmann et al., 2001). DR = Driftreduktion. Die Driftdeposition ist in Prozent der Soll-Aufwandmenge bei flächiger Applikation angegeben. LOQ = Quantifizierungsgrenze. $n = 10$ Durchgänge und 38 Wiederholungen.

Zur Bewertung der Driftreduktion von Applikationsgeräten im Gemüsebau werden üblicherweise die Standard-Rautmann-Driftwerte für Gemüse (Höhe < 50 cm) herangezogen (Rautmann et al., 2001). Diese Driftwerte basieren auf dem 90. Perzentil der Messungen ab einem Abstand von 1 m zum Beetrand. Die Werte der Rautmann-Kurve im Bereich zwischen 0,5 und 1 m wurden extrapoliert und in den diversen Abbildungen als gestrichelte Kurve dargestellt.

Die Boxplots in Abbildung 22 zeigen die Verteilung der Messwerte über alle Durchgänge und Wiederholungen. Bei sämtlichen Spot-Applikationen wurde eine sehr geringe Driftdeposition gemessen, wobei die 90. Perzentile unter 0,01 % der Soll-Aufwandmenge lagen. Im Vergleich zu den Referenzkurven befanden sich die Driftwerte aller Geräte deutlich unterhalb der Rautmann-Kurve für Gemüse (rote Kurve) sowie unter den Kurven für 95 % und 99 % Driftreduktion (hellgrüne bzw. dunkelgrüne Kurve). Auch das 90. Perzentil aller Driftwerte (schwarze Punkte) blieb unterhalb der 99 %-Driftreduktionskurve (dunkelgrüne Kurve), während die Mediane aller Driftwerte bei 0,5 und 1 m Abstand vom Beetrand unterhalb der Kurve für 99,9 %-Driftreduktion (violette Kurve) lagen. Ab einem Abstand von 1,5 m befanden sich die Mediane bereits unter der Quantifizierungsgrenze und waren nicht mehr bestimmbar, während die 90. Perzentilen noch knapp über der Bestimmungsgrenze lagen.

Spotspraying-Driftversuche nach Gerätetyp

Die Ergebnisse aller Spotspraying-Driftversuche, getrennt nach Gerätetyp, sind in Abbildung 23 dargestellt. Für beide Geräte wurden sehr geringe Driftdepositionen gemessen, wobei die 90. Perzentile jeweils unter 0,01 % der Zielausbringungsmenge lagen. Für den Steketee Prototyp II (6 Durchgänge, 22 Wiederholungen) lagen die 90. Perzentile der Driftdeposition für alle gemessenen Distanzen unterhalb der Referenzkurve für eine Driftreduktion von 99,9 %. Beim Ecorobotix ARA (4 Durchgänge, 16 Wiederholungen) lagen die 90. Perzentile unterhalb der Referenzkurve für eine Driftreduktion von 99 %. Für beide Geräte sind ab etwa 3 m Distanz von der behandelten Fläche die Messwerte so nah an bzw. unter der Quantifizierungsgrenze, dass die tatsächlichen Driftwerte vermutlich noch niedriger sind.

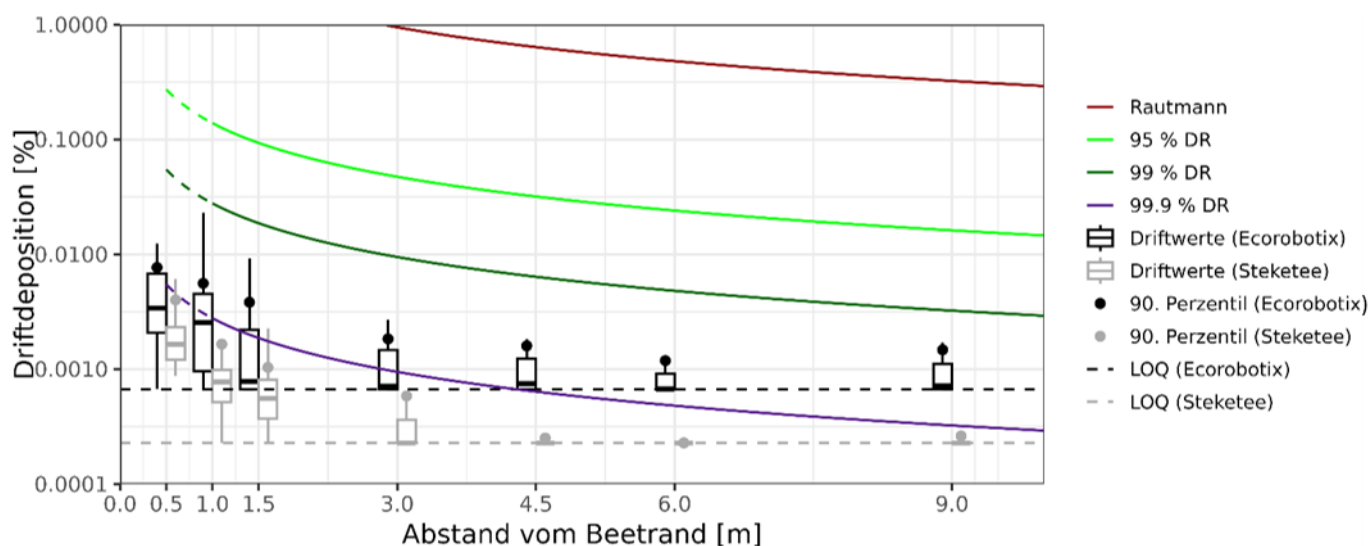


Abbildung 23: Driftdeposition aus allen Driftversuchen unterteilt nach Geräten im Vergleich zur Rautmann-Referenzkurve (Rautmann et al., 2001). DR = Driftreduktion. Die Driftdeposition ist als Prozentsatz der Soll-Aufwandmenge bei flächiger Applikation angegeben. LOQ = Quantifizierungsgrenze. $n = 10$ Durchgänge und 38 Wiederholungen.

6.3.3 Vergleich der Driftdeposition mit Ecorobotix ARA bei flächiger und Spot-Applikation

Aufgrund unzureichenden Pflanzenwachstums sowie einer ungeeigneten Windrichtung relativ zum Gemüsebeet wurde einer der Driftversuche mit dem Ecorobotix ARA als Flächenbehandlung (full spray mode) durchgeführt. Obwohl dies ursprünglich nicht vorgesehen war, ermöglichte dieser Versuch einen direkten Vergleich zwischen Flächenbehandlung und einer Spot-Applikation mit demselben Gerät. Für diesen Vergleich wurden insgesamt 7 Durchgänge und 28 Wiederholungen ausgewertet (davon 16 Wiederholungen mit Spotspraying und 12 mit flächiger Applikation).

Die Driftwerte aller Behandlungen lagen unterhalb der Kurve für 99 % Driftreduktion (Abbildung 24). Für die Flächenapplikationen waren aufgrund der Quantifizierungsgrenzen ab einer Distanz von 3 m keine belastbaren Aussagen mehr möglich. Bei den Spot -Applikationen war die Aussagekraft bereits ab 1,5 m eingeschränkt.

Die Driftwerte waren bei der Spot-Applikation erwartungsgemäss niedriger als bei der Flächenbehandlung. Die 90. Perzentile der Driftwerte waren bei der Spot-Applikation über alle Distanzen hinweg durchschnittlich um 46 % geringer. Bei den Spot-Applikationen wurden lediglich 44 % der Gemüsebeetfläche behandelt, was einer Einsparung von 56 % der applizierten Spritzbrühe entspricht. Die Reduktion der gemessenen Abdrift durch Spot-Applikation fiel somit minimal geringer aus als aufgrund der Einsparung der applizierten Spritzbrühe erwartet, lag aber angesichts der grossen Streuung der Messwerte im Bereich der Messgenauigkeit.

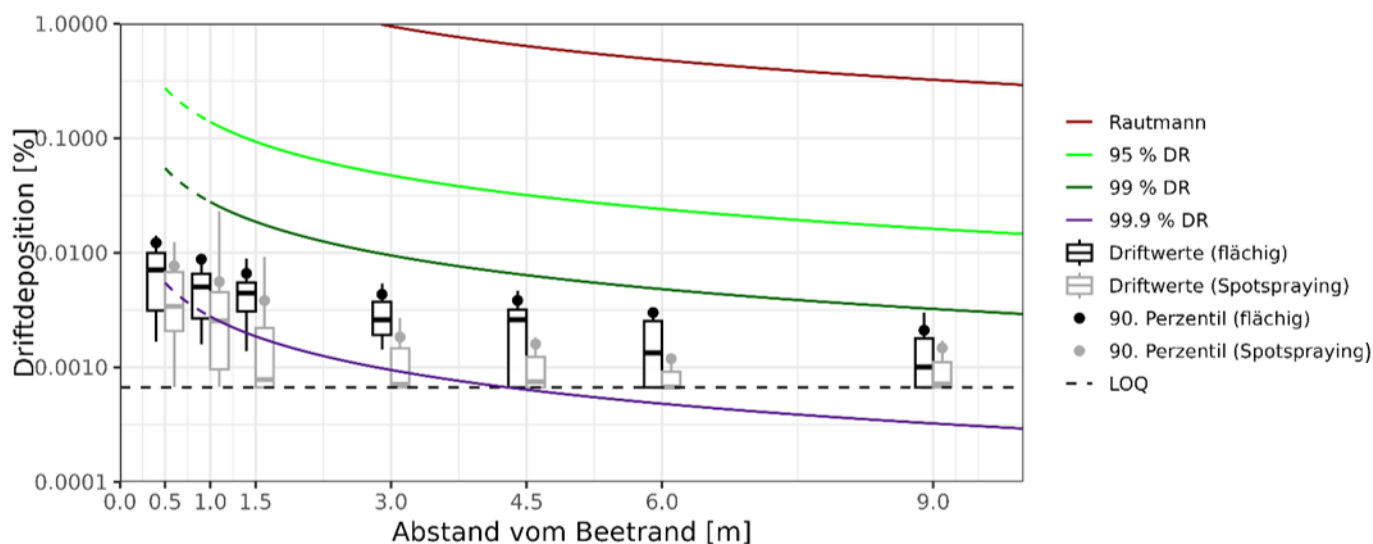


Abbildung 24: Vergleich der Driftdeposition mit dem Ecorobotix ARA bei flächiger und Spot-Applikation. Die Driftdeposition ist in Prozent der Soll-Aufwandmenge (200 l/ha) bei flächiger Applikation angegeben. DR = Driftreduktion, LOQ = Quantifizierungsgrenze. $n = 7$ Durchgänge und 28 Wiederholungen.

6.3.4 Einfluss des Düsentyps auf die Driftdeposition mit dem Steketee Prototyp II

Für Band- und Spot-Applikationen bei Reihenkulturen sind Flachstrahldüsen mit Gleichverteilung (Banddüsen) in der Praxis Standard. Die Driftversuche mit dem Steketee Prototyp II wurden entweder mit Standard-Banddüsen (TeeJet TP40-02E) oder mit driftreduzierenden Banddüsen (Agrotop RowFan40-02E) durchgeführt. Ziel war es zu prüfen, ob durch den Einsatz driftreduzierender Düsen beim Spotspraying eine weitere Verringerung der Abdrift erzielt werden kann. Für diesen Vergleich wurden insgesamt 6 Durchgänge und 22 Wiederholungen ausgewertet (davon 12 Wiederholungen mit Standard-Banddüsen und 10 mit driftreduzierenden Banddüsen). Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs.

Im Bereich bis 3 m wiesen die driftreduzierenden Düsen tendenziell geringere Driftdepositionen auf als die Standarddüsen. Die 90. Perzentile der Driftwerte lagen dabei im Durchschnitt um 60 % niedriger. Die eingesetzten driftreduzierenden Düsen werden bei einem Druck von 3 bar gemäss JKI (2025) der 75 %- Abdriftminderungsklasse zugeordnet. In den vorliegenden Messungen wurde diese Reduktion im Nahbereich (bis 3 m) nicht vollständig erreicht, wobei die Abweichung mit etwa 15 % vergleichsweise gering war.

Ab etwa 3 m Distanz zeigten die driftreduzierenden Düsen tendenziell leicht höhere Driftwerte als die Standarddüsen, wobei dieser Effekt wahrscheinlich durch die Quantifizierungsgrenze beeinflusst wurde. Aufgrund dieser Einschränkung lässt sich auf Basis der vorliegenden Ergebnisse bei Abständen von mehr als 3 m zum Beetrand kein eindeutiger Unterschied in der Driftdeposition zwischen Standard-Banddüsen und driftreduzierenden Banddüsen feststellen. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Abdrift bereits im Bereich einer 99,9 % Driftreduktion oder darunter liegt.

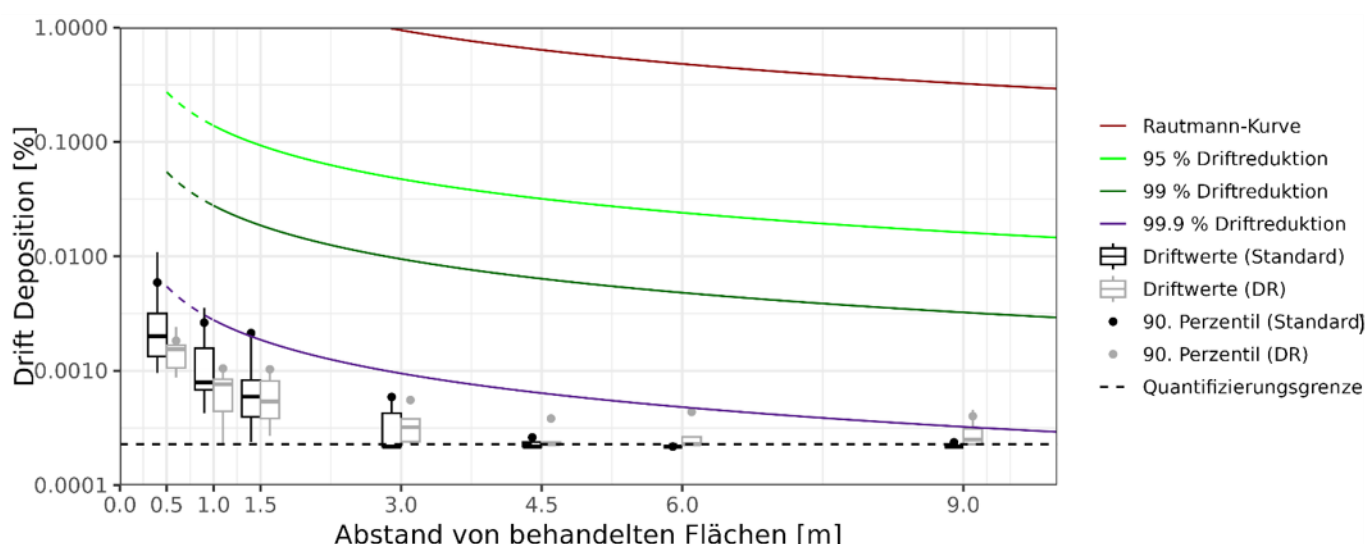


Abbildung 25: Einfluss des Düsentyps auf die Driftdeposition mit dem Steketee Prototyp II im Vergleich zur Rautmann-Referenzkurve (Rautmann et al., 2001). DR = Driftreduktion. Die Driftdeposition ist als Prozentsatz der Soll-Aufwandmenge (500 l/ha) bei flächiger Applikation angegeben. $n = 6$ Durchgänge und 22 Wiederholungen.

6.3.5 Driftdeposition inklusive vs. exklusive PSM-Einsparpotenzial

Die in den bisherigen Kapiteln verwendete Methode zur Berechnung der Driftdeposition basiert auf einem Vergleich mit der Soll-Aufwandmenge einer flächigen Applikation, wie in den Richtlinien der ISO 22866 in Appendix D beschrieben. Diese Methode berücksichtigt sowohl die durch das Gerät verursachte Drift als auch die PSM-Einsparung durch Spotspraying. Alternativ dazu kann die Driftdeposition auch in % der effektiv im Feld applizierten Menge berechnet werden. Zur Messung dieser Menge wurden entsprechende Kollektoren in den Beeten platziert (Abbildung 14). Mit dieser Methode ergeben sich höhere prozentuale Depositionswerte, da die PSM-Einsparung im Vergleich zu einer flächigen Behandlung nicht berücksichtigt wird. Die beiden Methoden zur Berechnung der Abdrift werden in den folgenden Abbildungen als «Methode 2» bzw. «Methode 1» bezeichnet und gegenübergestellt. Der Vergleich dieser Methoden ermöglicht eine Differenzierung zwischen dem Anteil der Abdrift, der auf das Gerät selbst zurückzuführen ist (Methode 1), dem Effekt des PSM-Einsparungspotenzials (Differenz zwischen Methode 1 und Methode 2), sowie dem kombinierten Effekt beider Faktoren (Methode 2).

Die mit den beiden Methoden berechneten Depositionswerte sind in Abbildung 26 für den Steketee-Prototyp II einander gegenübergestellt. In den Versuchen (insgesamt 6 Durchgänge und 22 Wiederholungen), wurde im Durchschnitt 24 % des Beetes behandelt, was einer Einsparung von 76 % gegenüber einer flächigen Anwendung entspricht. Die Depositionswerte (Durchschnitt der 90. Perzentilen über alle Distanzen), berechnet relativ zu einer theoretischen flächigen Applikation, waren 81 % tiefer als die Deposition relativ zur gemessenen Applikation. Angesichts der insgesamt hohen Streuung der Daten ist die Übereinstimmung sehr gut.

Im Spotspray-Versuch mit dem Ecorobotix ARA (4 Durchgänge und 16 Wiederholungen) wurde im Durchschnitt 44 % der Beetfläche behandelt (56 % Einsparung). Die Driftdeposition berechnet relativ zur gemessenen Applikation im Beet war im Durchschnitt 64 % tiefer als relativ zur theoretischen flächigen Applikation (Abbildung 27). Auch diese Übereinstimmung ist angesichts der grossen Streuung der Daten gut.

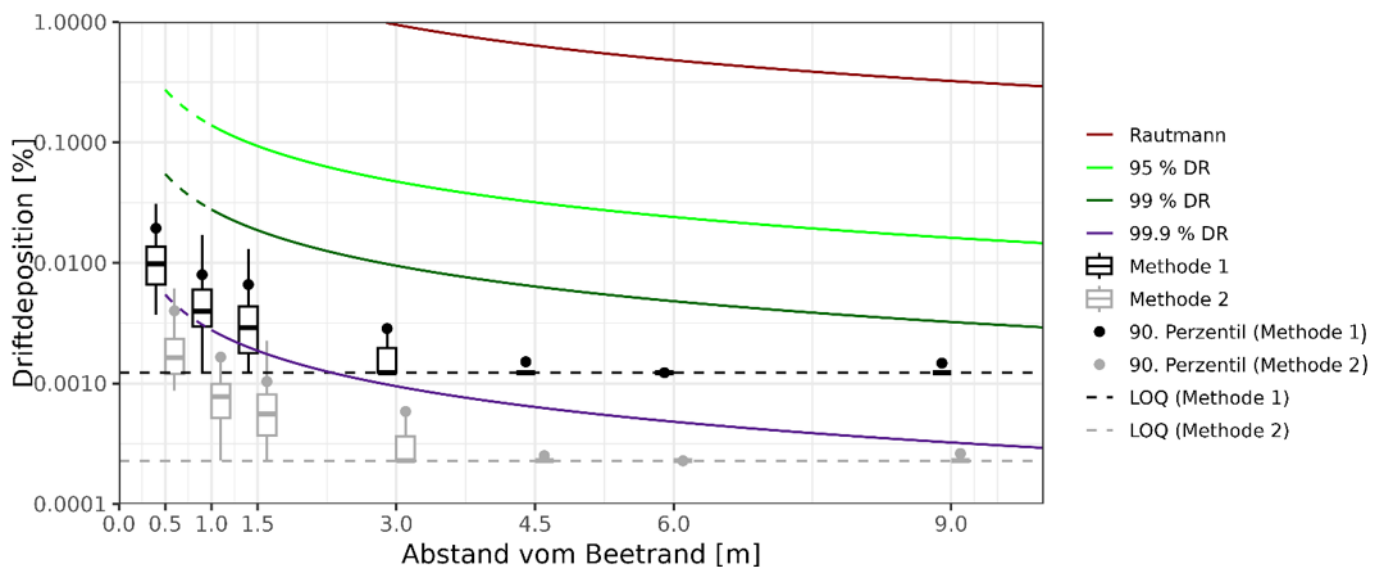


Abbildung 26: Vergleich der Driftdeposition für alle Driftversuche mit dem Steketee Prototyp II, berechnet einerseits relativ zur gemessenen Applikation im Beet (Methode 1) und andererseits relativ zu einer theoretischen flächigen Applikation (Methode 2). DR = Driftreduktion, LOQ = Quantifizierungsgrenze. $n = 6$ Durchgänge und 22 Wiederholungen.

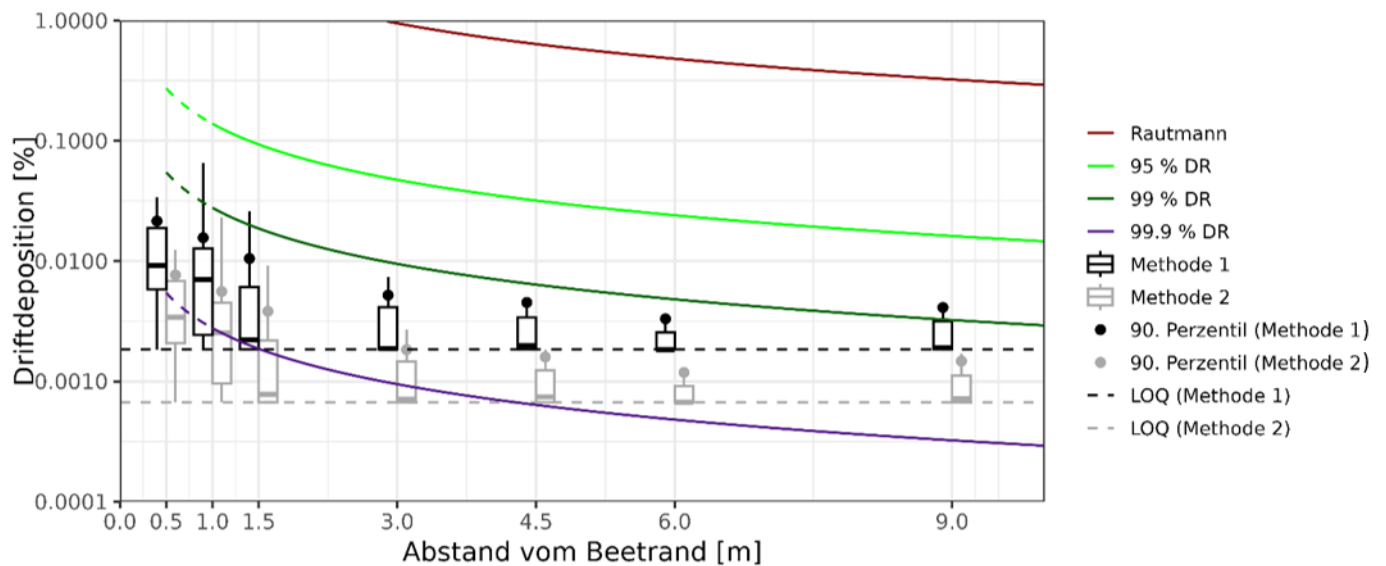


Abbildung 27: Vergleich der Driftdeposition für alle Driftversuche mit dem Ecorobotix ARA, berechnet einerseits relativ zur gemessenen Applikation im Beet (Methode 1) und andererseits relativ zu einer theoretischen flächigen Applikation (Methode 2). DR = Driftreduktion, LOQ = Quantifizierungsgrenze. $n = 4$ Durchgänge und 16 Wiederholungen.

7 Diskussion

Bestimmung der PSM-Einsparung und der Reduktion des Abschwemmungspotenzials

Die Ergebnisse der Testfahrten zeigen, dass gezielte Applikationstechniken in Reihenkulturen sowohl die ausgebrachte Menge an Fungiziden und Insektiziden als auch das Abschwemmungspotenzial deutlich reduzieren können. Durch Spotspraying konnte der behandelte Flächenanteil bei Sellerie und Petersilie (BBCH 16–17; Ø Pflanzendurchmesser 15–16 cm) auf 15–20 % verringert werden, was einer Einsparung von 80–85 % entspricht, während bei Bandbehandlungen 29–42 % der Fläche behandelt wurden, wodurch Einsparungen von 58–71 % erzielt werden konnten.

Die PSM-Menge, die beim Behandeln auf den Boden gelangt (und nicht auf die Kultur), kann bei Regenereignissen abgeschwemmt werden und so in Oberflächengewässer gelangen. Diese potenziell abschwemmbar PSM-Menge konnte mit Spotspraying um 93 % reduziert werden, bei Bandspritzung um 67–78 %, was das Potenzial dieser Verfahren zur Verringerung von PSM-Einträgen in die Umwelt verdeutlicht.

Bei den getesteten Spotspraying-Geräten kann eingestellt werden, ob vor und nach jeder Kulturpflanze noch etwas mehr Fläche behandelt wird. Diese zusätzlich behandelten Pufferzonen um die Kulturpflanzen stellen sicher, dass die gesamte Pflanzenfläche und auch etwas von dem die Kulturpflanzen «umgebenden» Boden behandelt wird und dienen der Wirkungsabsicherung. Die Testfahrten zeigten, dass die Verwendung von Puffern bei Spotspraying die PSM-Einsparungen nur geringfügig (3–12 % mit Puffern von 1,5–5 cm vor und nach jeder Pflanze) verringerte.

Zu beachten ist, dass diese Versuche unter spezifischen Bedingungen durchgeführt wurden und nicht die gesamte Variabilität von Gemüsebetrieben abbilden können. Faktoren wie Pflanzengeometrie, Erkennungsgenauigkeit und Fahrgeschwindigkeit werden die tatsächlich mit Spotspraying realisierten PSM-Einsparungen in der Praxis beeinflussen.

Modellierung des PSM-Einsparpotenzials und der Reduktion des Abschwemmungspotenzials

Die Modellierung zeigte, dass das PSM-Einsparpotenzial sowie die Reduktion des Abschwemmungspotenzials stark von der Kulturart, dem Wachstumsstadium und dem Kulturdeckungsgrad abhängen. In schnell wachsenden Kulturen wie Kopfsalat können in der ersten Woche nach der Pflanzung Einsparungen von bis zu 95 % erzielt werden. Mit zunehmendem Kulturdeckungsgrad verringert sich dieses Einsparpotenzial jedoch rasch, sodass ab etwa fünf Wochen theoretisch keine Einsparungen mehr möglich sind. In langsam wachsenden Kulturen wie Sellerie bleibt das Einsparpotenzial hingegen über einen deutlich längeren Zeitraum hoch. In den ersten sechs Wochen nach Pflanzung können Einsparungen von 70–90 % erzielt werden, wobei auch in späteren Entwicklungsstadien (Woche 8–11) noch moderate Reduktionen von 25–40 % möglich sind.

Die Modellierung des Abschwemmungspotenzials (im Projekt gleichgesetzt mit der Menge PSM, die auf den Boden appliziert wird) zeigt ein ähnliches Muster. In frühen Entwicklungsstadien wird das Abschwemmungspotenzial im Vergleich zur flächigen Applikation deutlich reduziert. Mit zunehmendem Kulturdeckungsgrad nimmt dieser Effekt jedoch ab, und nach Bestandesschluss ergibt sich im Modell keine zusätzliche Reduktion mehr.

Obwohl die Modellierung wertvolle Einblicke in das Einsparpotenzial von PSM sowie die Reduktion des Abschwemmungspotenzials liefert, sind mehrere Einschränkungen zu nennen. Die Ergebnisse stellen theoretische Maximalwerte dar, da das Modell von einem gleichmässigen Kulturdeckungsgrad ausgeht und annimmt, dass auf die Kulturpflanze applizierte PSM nicht abgeschwemmt werden. In der Praxis können jedoch Regen oder Bewässerung, abhängig von den Eigenschaften der Wirkstoffe, einen Teil der auf die Kultur applizierten Wirkstoffmenge von der Pflanzenoberfläche abwaschen. Zudem ist zu beachten, dass die Kultur als Ellipse modelliert wurde, obwohl innerhalb dieser Fläche in der Realität teilweise auch Boden behandelt wird, was möglicherweise zu einer Überschätzung der durch Spotspraying erzielten Reduktion geführt haben könnte. Darüber hinaus wurden Umweltfaktoren wie Niederschlagsintensität, Bodentyp und Hangneigung nicht berücksichtigt, obwohl sie die tatsächliche Abschwemmung beeinflussen. Schliesslich basiert das Modell auf idealen Applikationsbedingungen und berücksichtigt keine Einschränkungen wie beispielsweise die Detektionsgenauigkeit, die die tatsächlich erzielten PSM-Einsparungen in der Praxis beeinflussen können.

Vergleich zwischen Testfahrten und Modellierung

Die in den Feldversuchen bestimmten PSM-Einsparungen und die anhand des Kulturparameter-Datensatzes modellierten PSM-Einsparungen zeigen konsistente Trends, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer absoluten Höhe und zeitlichen Dynamik. Während die Feldversuche die praktische Umsetzbarkeit belegen, liefert die Modellierung zusätzliche Einblicke in die zugrunde liegenden Einflussfaktoren wie Kulturart, Entwicklungsstadium und Kulturdeckungsgrad, die das PSM-Einsparpotenzial beeinflussen. Die Modellierung zeigt die theoretisch maximal möglichen Einsparungen und kann somit eine fundiertere Planung und Entscheidungsfindung für einen nachhaltigen PSM-Einsatz unterstützen.

Hohe Driftreduktion durch Spot-Applikationstechnologien

Die Driftversuche zeigten durchgehend sehr geringe Driftdepositionen für beide Spotspraying-Geräte. In insgesamt 10 gültigen Versuchen (bezüglich Windgeschwindigkeit und -richtung) mit 38 Wiederholungen blieb die Driftdeposition mit $<0,01\%$ der Soll-Aufwandmenge deutlich unter den Rautmann-Referenzwerten für Gemüsebaukulturen. In allen Versuchen wurde eine Driftreduktion von über 99 % erreicht, was auf eine hohe und konsistente Driftreduktion über beide Geräte und alle getesteten Einstellungen hinweg hinweist.

Driftreduzierende Düsen (75 % Abdriftminderungsklasse gemäss JKI, 2025) wurden beim Steketee-Prototyp II eingesetzt und zeigten bei den Distanzen von 0,5 m, 1,0 m, 1,5 und 3 m eine zusätzliche Driftminderung von etwa 60 %. Ab einer Distanz von 4,5 m war dieser Effekt aufgrund sehr geringer Drift nicht mehr nachweisbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei PSM-Behandlungen mit den getesteten Spotspraying-Geräten im Vergleich zu herkömmlicher flächiger Applikation deutlich weniger Abdrift entsteht. Der Vergleich der Berechnungsmethoden der Abdrift mit und ohne Berücksichtigung des PSM-Einsparpotenzials deutet darauf hin, dass ein Grossteil der Driftreduktion auf Geräteeigenschaften wie Abschirmung und niedrigere Düsenhöhen im Vergleich zur klassischen Feldspritze zurückzuführen ist.

Neuer Tracer und Analysemethode benötigt

Bei den Driftversuchen wurde mit einer etablierten Tracer-Technologie gearbeitet. Die insgesamt sehr niedrigen Driftwerte führten jedoch dazu, dass ein grosser Teil der Messwerte in Abständen von mehr als 1,5 m vom Beetrand entfernt bereits unterhalb der Quantifizierungsgrenze der Methode lag. Damit geht eine Unsicherheit in der Bestimmung der Perzentilwerte und des Kurvenverlaufs in grösserem Abstand zum Beetrand einher.

Damit auch Werte, die einer Abdriftminderung von mehr als 99 % im Vergleich zu den Standardwerten von Rautmann entsprechen, in grösseren Abständen vom Beetrand präzise gemessen werden können, müsste die Empfindlichkeit der Methode deutlich gesteigert werden. Möglicherweise muss dazu ein anderer Tracer verwendet werden, der in ausreichend hoher Dosierung appliziert werden kann, mit hoher Empfindlichkeit nachweisbar und nicht anfällig für Blindwerte ist.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese Studie zeigt, dass gezielte Applikationstechniken, insbesondere Spotspraying, ein erhebliches Potenzial zur Reduktion des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln (PSM) und der damit verbundenen Umweltauswirkungen im Gemüsebau bieten. Da durch gezielte Applikation vor allem jener Anteil an PSM reduziert wird, der auf den Boden gelangt, ist das Potenzial zur Verringerung des Abschwemmungspotenzials sogar höher als die Reduktion der insgesamt ausgebrachten PSM-Menge. Die Ergebnisse bestätigen, dass sowohl Spot- als auch Band-Applikation unter Praxisbedingungen wirksame Strategien zur Reduktion der Umweltbelastung darstellen.

Die Driftversuche zeigten, dass mit Spotspraying sehr geringe Driftdepositionen erreicht werden können. Die gemessenen Driftwerte entsprachen einer Driftreduktion von über 99 % im Vergleich zu den Rautmann-Referenzwerten. Diese Reduktionen sind insbesondere auf gerätespezifische Eigenschaften wie Abschirmung und niedrige Düsenhöhen zurückzuführen. Allerdings stiessen die eingesetzten analytischen Methoden an ihre Quantifizierungsgrenzen, was zu einer Abflachung der Driftkurven führte und wahrscheinlich zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Driftreduktion beitrug.

Um sehr geringe Driftdepositionen auch in grösserem Abstand zur behandelten Parzelle präzise quantifizieren und leistungsfähige Technologien besser differenzieren zu können, müsste die Empfindlichkeit der Methodik deutlich erhöht werden. Entsprechend sensitivere Messmethoden würden die regulatorische Bewertung unterstützen und die Integration gezielter Applikationssysteme als anerkannte risikomindernde Massnahmen im nachhaltigen Pflanzenschutz erleichtern.

Der im Rahmen der Spotspraying-Projekte aufgebaute Kulturparameter-Datensatz bietet zudem das Potenzial für zukünftige Modellierungen praxisnaher Anwendungsszenarien. Dadurch könnten auf Basis tatsächlicher Pflanzenschutzmittel-Applikationsdaten für reale Spritzfolgen über eine Vegetationsperiode und in verschiedenen Kulturen das PSM-Einsparpotenzial sowie die Reduktion des Abschwemmungspotenzials rechnerisch abgeschätzt werden. Darüber hinaus könnte der Datensatz künftig als Grundlage für ökotoxikologische Bewertungen dienen, um die Umweltwirkungen gezielter Applikationstechniken umfassender zu beurteilen.

Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Landwirtschaft für die Förderung des Projekts sowie allen Projektpartnerinnen und Projektpartnern für ihre Unterstützung. Unser Dank gilt zudem allen Personen und Institutionen, die mit ihrem Engagement zum Gelingen dieses Projekts beigetragen haben.

Literaturverzeichnis

- Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (BLV), 4. Juni, 2024. Weisungen der Zulassungsstelle betreffend die Massnahmen zur Reduktion der Risiken bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. [PDF-Dokument]. <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/zulassung-pflanzenschutzmittel/anwendung-und-vollzug/weisungen-und-merkblaetter.html>
- Haberey P., Hodel D., Collet L., Bucher C., Anken T., Total R., Keller M., 2021. Efficiency evaluation of automated insecticide spot spraying in lettuce and bok choy fields. In: Precision agriculture '21. June 25, Hrsg. John V. Stafford, Wageningen Academic Publishers. 121-128.
- ISO 22866, 2005. Equipment for crop protection - Methods for field measurement of spray drift. International Standardisation Organisation, Geneva.1-24.
- Julius Kühn-Institut (JKI), 2025. Universal application chart for drift reducing flat fan nozzles 90% 02 - 04 [Stand Juli 2025]. <https://wissen.julius-kuehn.de/mediaPublic/AT-Dokumente/03-Abdrift/PlantProtectionEquipment-drift-reduction/03-Universal-application-chart-for-drift-reducing-flat-fan-nozzles-90percent.pdf>. Last accessed on 06.03.2026.
- Keller M., Haberey P., Hodel D., Collet L., Steiner R., Bucher C., Möri H., Wyssa T., Duckert F., Hauenstein S., Matter R., Anken T., Total R., 2020. Spot Spraying im Gemüsebau: Deutliche Pflanzenschutzmittelreduktion möglich, aber anspruchsvoll. Agroscope Transfer, 353, 1-2.
- Kramer B., Nyffenegger L., Schelbert R., 2024. Abdrift und Abschwemmung im Pflanzenschutz. Agridea.
- Rautmann, D., Streloke, M., Winkler, R., 2001. New basic drift values in the authorization procedure for plant protection products. Workshop on Risk Assessment and Risk Mitigation Measures (WORMM), vol. 13. 3-141.
- van de Zande, J. C., Rautmann, D., Holterman, H. J., Huijsmans, J. F. M., 2015. Joined spray drift curves for boom sprayers in The Netherlands and Germany. Plant Research International; No. 526. 1-82.
- Witsoe J., Total R., Haberey P., Heitkämper K., Bravin E., Möri H., Steffen P., Wyssa T., Anken T., Matter R., Keller M., 2024. Nachhaltiger Pflanzenschutz im Gemüsebau durch Spotspraying-Technik (2021-2023). Agroscope Science, 186, 1-39.
- Witsoe, J., Haberey, P., Hodel, D., Collet, L., Keller, M. (2026). Vegetable Crop Parameter Dataset from Field Experiments (1.0.0.) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ze-nodo.20539113>
- Wullschlegel G., Collet L., Steiner R., Bucher C., Möri H., Wyssa T., Duckert F., Koller M., Matter R., Anken T., Total R., Keller M., 2020. Auf dem Weg zu einem nachhaltigen Pflanzenschutz: Einzelpflanzenbehandlung in Salat mit dem Steketee Pflanzenschutzroboter. Hrsg. Agroscope, Wädenswil, Mai, 2020, 1 S.

Appendix I: Artikel, Konferenz und Tagungsbeiträge

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

- Keller, M., & Witsoe, J. (2023, März 15). Spotspraying geht in die dritte Runde; Mitarbeiterporträt: Joshua Witsoe [Artikel]. Gemüsebau Info, 3, 2023, 1-2.
- Keller, M., Haberey, P., Total, R., Witsoe, J., Anken, T., & Poiger, T. (2023, Mai 11). Spot spraying in vegetable row crops: Advancing step by step – project by project [Vortrag]. Targeted Application, Spray Technology and Authorisation Workshop, Wageningen, NL.
- Keller, M., Witsoe, J., Haberey, P., Hodel, D., Total, R., Heitkämper, K., Bravin, E., Glück, S., Poiger, T., Collet, L., Wyss, S., Steiner, R., Möri, H., Wyssa, T., Anken, T., Duckert, F., & Matter, R. (2023, September 13). Reduktion der ausgebrachten PSM-Menge im Gemüsebau: kameragesteuerte Pflanzenschutzroboter [Vortrag]. National Tagung Aktionsplan PSM, Posieux, CH.
- Witsoe, J., Keller, M., Poiger, T., & Total, R. (2023, Oktober 26). Erste Ergebnisse aus dem Spotspraying III-Projekt [Vortrag]. Herbstbesprechung PSM-Zulassung, Liebefeld, CH.
- Keller, M., Haberey, P., Witsoe, J., Hodel, D., & Total, R. (2023, Oktober 27). Auf den Punkt genau [Artikel]. Gemüse (D), 12, 2023, 15-17.
- Witsoe, J., Keller, M., & Total, R. (2023, November 16). Spotspraying im Gemüsebau Projekt III – erstes Versuchsjahr [Vortrag]. Pflanzenschutztagung Gemüsebau 2023 (Forum Forschung Gemüse), Koppigen, CH.
- Keller, M., Witsoe, J., Haberey, P., Total, R., & Poiger, T. (2024, April 11). Spot spraying in vegetables: Applied research with an interdisciplinary approach [Vortrag]. Digital Agriculture: Regulatory and Scientific Aspects of Precision Application, Düsseldorf, DE.
- Keller, M. (2024, Mai 15). Präziser Pflanzenschutz im regulatorischen Kontext [Artikel]. Gemüsebau Info, 12, 2024, 1-4.
- Keller, M., & Witsoe, J. (2024, Juni 10). Abschwemmung – Was eingespart wird, wird auch nicht abgeschwemmt [Artikel]. Gmüesblatt, 3, 2024.
- Witsoe, J., Poiger, T., & Keller, M. (2024, Juli 5). Spotspraying: Effizienter Pflanzenschutz [Vortrag/Poster]. Interne Versuchsbesichtigung, Reckenholz, CH.
- Keller, M., Gugger, M., & Gasser, S. (2024, August 28). Spotspraying zur Reduktion der Spätverunkrautung in Zwiebeln [Vortrag/Poster]. Interkantonale Fachtagung Freilandgemüse, Ins, CH.
- Witsoe, J., Keller, M., & Poiger, T. (2024, September 5). Spot spraying in vegetable row crops: Quantification of environmental exposure reduction with targeted application [Vortrag]. XVII Symposium on Pesticide Chemistry, Piacenza, IT.
- Witsoe, J., Poiger, T., & Keller, M. (2024, November 20). Vermindert Spotspraying das Driftrisiko? – Aktuelle Ergebnisse aus zwei Versuchsjahren [Vortrag]. Pflanzenschutztagung Gemüsebau 2024 (Forum Forschung Gemüse), Koppigen, CH.
- Witsoe, J., Poiger, T., & Keller, M. (2025, April 7). Weniger Abdrift dank moderner Technik [Artikel]. Der Gemüsebau / Le Maraîcher, 2, 2025, 33.
- Witsoe, J., Poiger, T., & Häfner, F. (2025, Juli 3). Reducing spray drift in vegetable row crops using spot spraying robots [Vortrag/Poster]. Versuchsbesichtigung Reckenholz, Reckenholz, CH.
- Witsoe, J., Poiger, T., & Keller, M. (2025, Juli 3). Environmental exposure reduction using spot spraying robots in vegetable row crops [Poster]. European Conference on Precision Agriculture (ECPA), Barcelona, ES.
- Witsoe, J., Poiger, T., & Häfner, F. (2025, September 16). Nachhaltiger Gemüsebau – Bestimmung der Pflanzenschutzmittel-Einträge in die Umwelt bei Spotspraying-Anwendungen [Vortrag]. Aktionsplan PSM Tagung, Reckenholz, CH.

- Witsoe, J., Poiger, T., & Häfner, F. (2025, Oktober 21). Spotspraying III-Projekt – vorläufige Ergebnisse 2025 [Vortrag]. PSM-WB Fachaustausch, Wädenswil, CH.
- Witsoe, J., Häfner, F., & Poiger, T. (2025, November 19). Spotspraying im Gemüsebau – Weniger Verluste bei Drift und Abschwemmung [Vortrag]. Pflanzenschutztagung Gemüsebau 2025 (Forum Forschung Gemüse), Koppigen, CH.
- Poiger, T., Witsoe, J., Häfner, F., & Keller, M. (2026, November 26). Case study: Drift deposition from spot spraying in vegetable row crops [Vortrag]. Workshop on Precision Application of Pesticides in Environmental Risk Assessment, Dessau, DE.
- Witsoe, J., Häfner, F., & Poiger, T. (2026, Januar 20). Reduced spray drift in vegetable row crops with spot spraying robots [Vortrag/Poster]. International Advances in Pesticide Application (IAPA) Conference, Cagliari, IT.
- Witsoe, J., Häfner, F., & Poiger, T. (2026, Februar 19). Spot spraying robots in vegetable row crops: Mitigating the environmental exposure of pesticides with targeted applications [Vortrag]. In Enabling Precision Application Conference (EPAC), Melbourne, AUS.
- Häfner, F., Witsoe, J., Poiger, T. (2026, Juni). Abschwemmung: Gezielte Pflanzenschutzapplikationen senken das Abschwemmungsrisiko [Artikel]. Gmüesblatt 3, 2026.
- Witsoe, J., Haberey, P., Hodel, D., Collet, L., Keller, M. (2026). Vegetable Crop Parameter Dataset from Field Experiments (1.0.0.) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20539113>
- Witsoe, J., Häfner, F., Keller, M., Poiger, T. (in prep.) Pesticide Drift Reduction using Spot Spraying Robots in Vegetable Row Crops.

Appendix II: Weitere Modellierungsergebnisse zum Abschwemmungspotenzial

Im vorliegenden Appendix werden weitere Ergebnisse zur Modellierung der Reduktion des Abschwemmungspotenzials dargestellt, wie sie in Kapitel 5 beschrieben wurden, jedoch für verschiedene Gemüsereihenkulturen. Der erhobene Kulturparameter-Datensatz kann nicht nur zur Abschätzung der potenziellen Abschwemmungsreduktion, sondern auch als Grundlage für weiterführende Modellierungen und Auswertungen genutzt werden (z. B. praxisnahe Anwendungsszenarien oder ökotoxikologische Bewertungen). Die Abbildungen in den Abschnitten «Entwicklung der Blattfläche» und «Kulturhöhe pro Behandlungsbreite der Düse» zeigen die Entwicklung der Blattfläche und Pflanzenhöhe in Abhängigkeit der vorgesehenen Behandlungsbreiten für unterschiedliche Kulturen. Beide Parameter können dazu beitragen, die benötigte Spritzbrühemenge für Behandlungen abzuschätzen bzw. an die jeweilige Kultur anzupassen, wie dies z.B. beim «crop adapted spraying» umgesetzt wird (Witsoe et al., 2024, S. 31-37).

Die dargestellten Analysen basieren auf den vollständigen Datensätzen und umfassen mehrere Anbauzyklen derselben Kultur sowie, soweit verfügbar, unterschiedliche Jahreszeiten. Dadurch können Unterschiede im Abschwemmungsverhalten unter variierenden agronomischen und saisonalen Bedingungen berücksichtigt werden.

Für weitere Kulturen lagen ebenfalls Datensätze vor, die aber für eine detaillierte Auswertung nicht ausreichten. Die im Anhang dargestellten Ergebnisse repräsentieren somit jene Kulturen, für die eine konsistente und vollständige Datengrundlage zur Modellierung und Interpretation vorlag.

Abschwemmungspotenzial

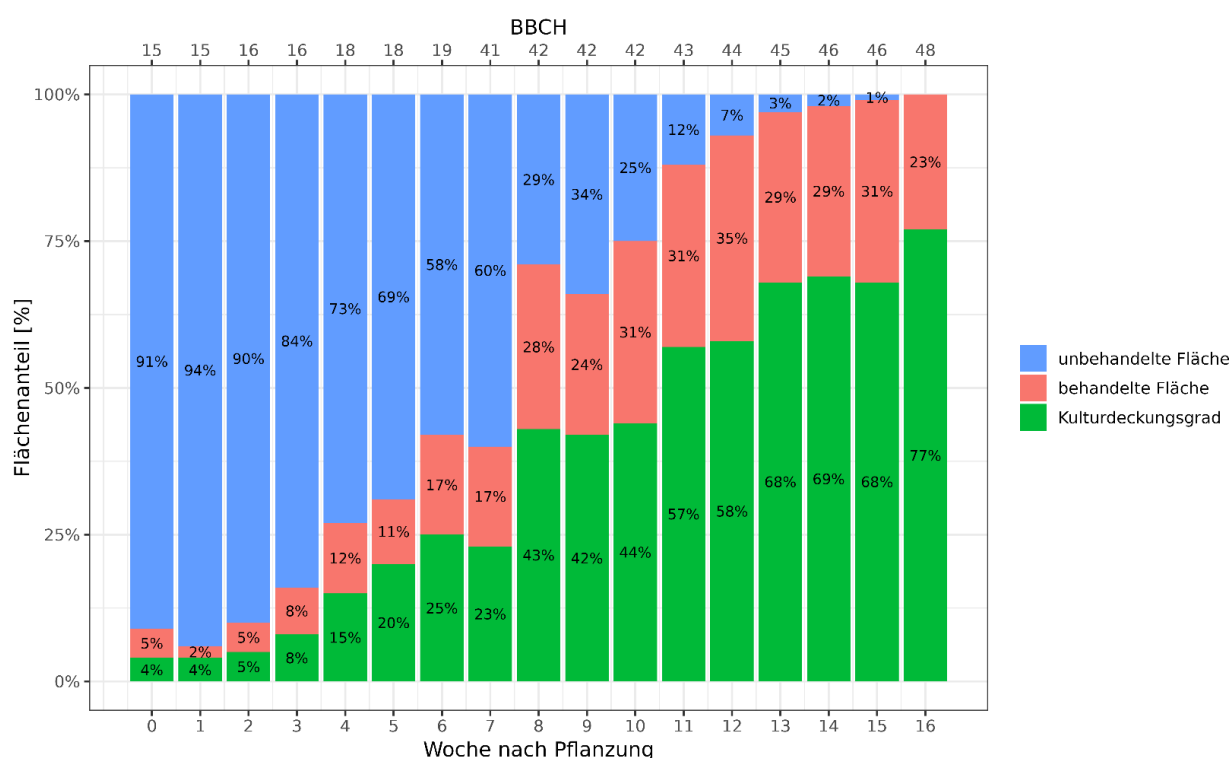


Abbildung 28: Modelliertes Abschwemmungspotenzial durch Spotspraying in Knollensellerie; n = 4 Versuche, 1100 gemessene Pflanzen.

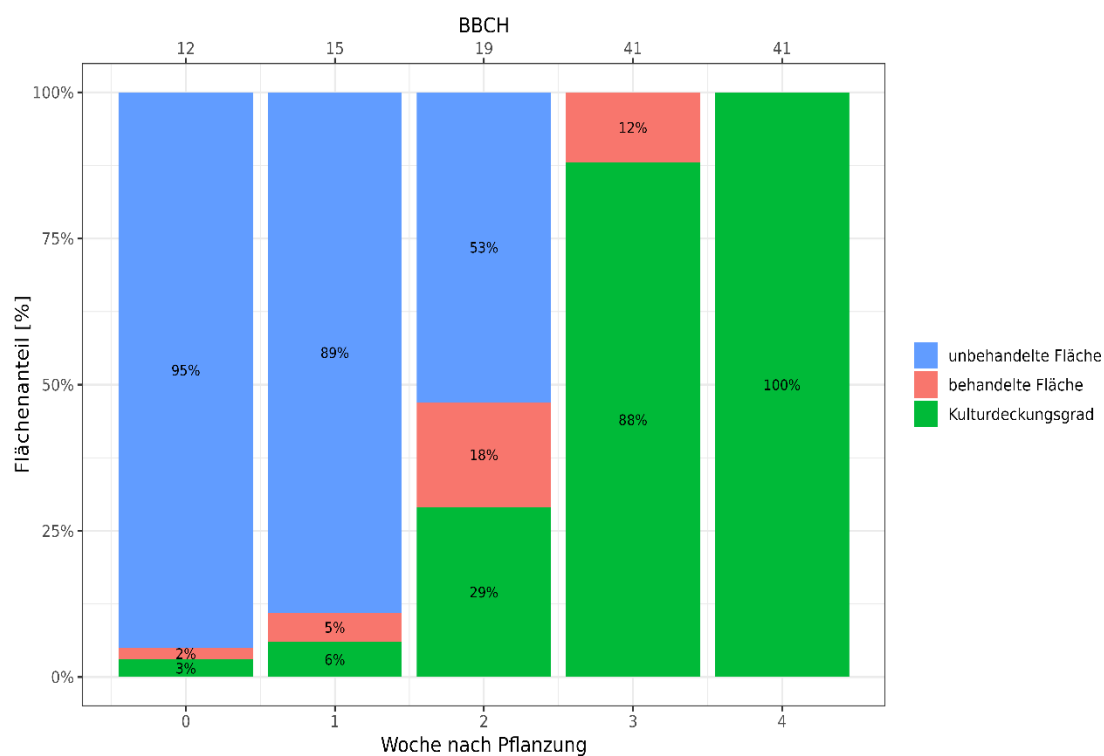


Abbildung 29: Modelliertes Abschwemmungspotenzial durch Spotspraying in Chinakohl; $n = 2$ Versuche, 235 gemessene Pflanzen.

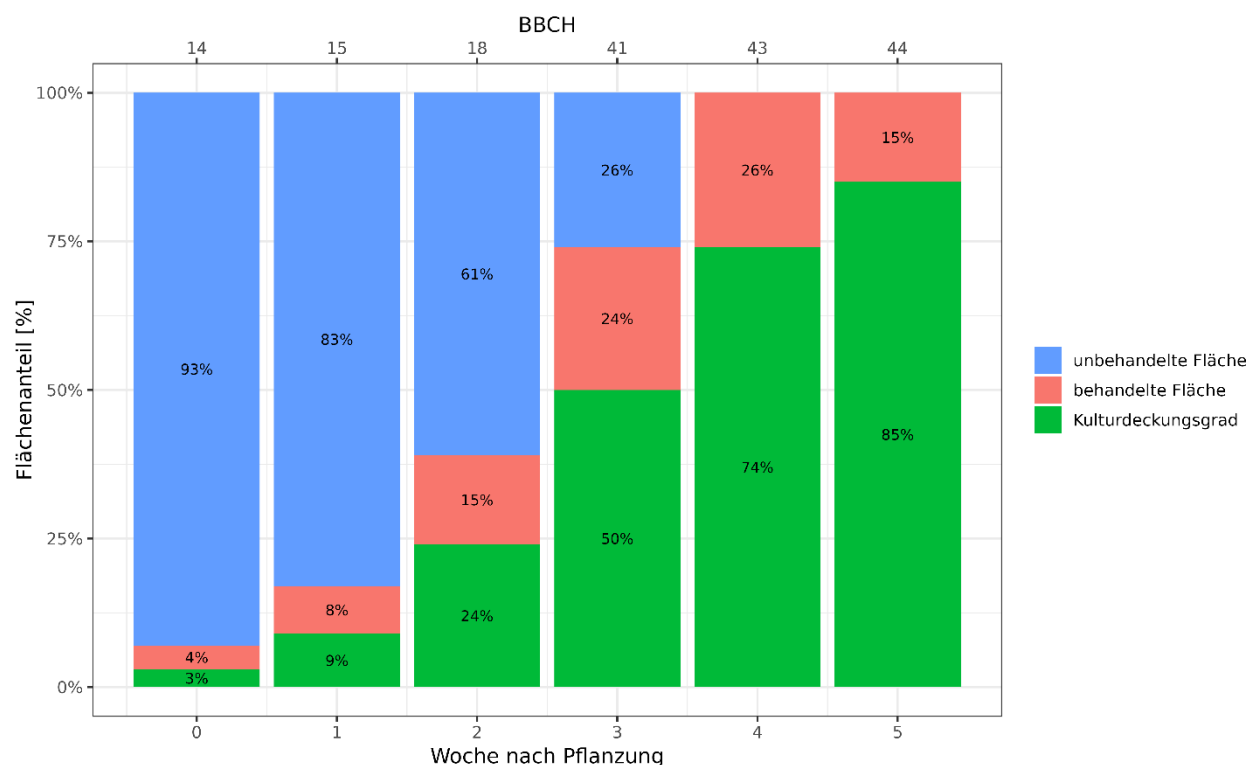


Abbildung 30: Modelliertes Abschwemmungspotenzial durch Spotspraying in Eisbergsalat; $n = 2$ Versuche, 320 gemessene Pflanzen.

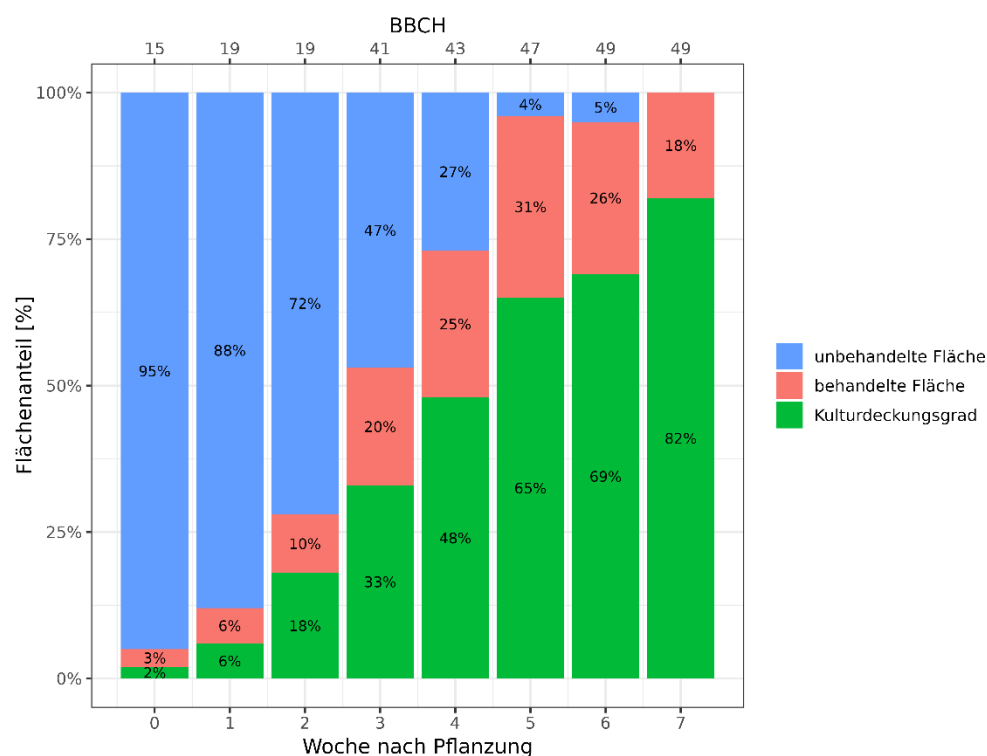


Abbildung 31: Modelliertes Abschwemmungspotenzial durch Spotspraying in Kopfsalat; $n = 10$ Versuche, 745 gemessene Pflanzen.

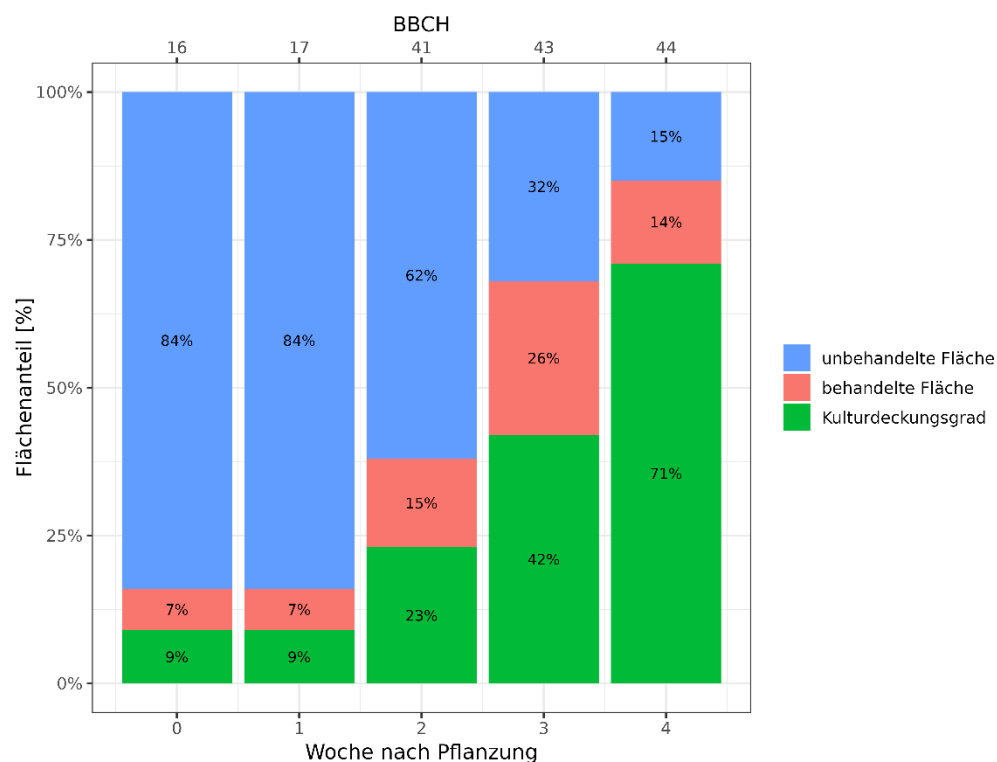


Abbildung 32: Modelliertes Abschwemmungspotenzial durch Spotspraying in Pak Choi; $n = 6$ Versuche, 190 gemessene Pflanzen.

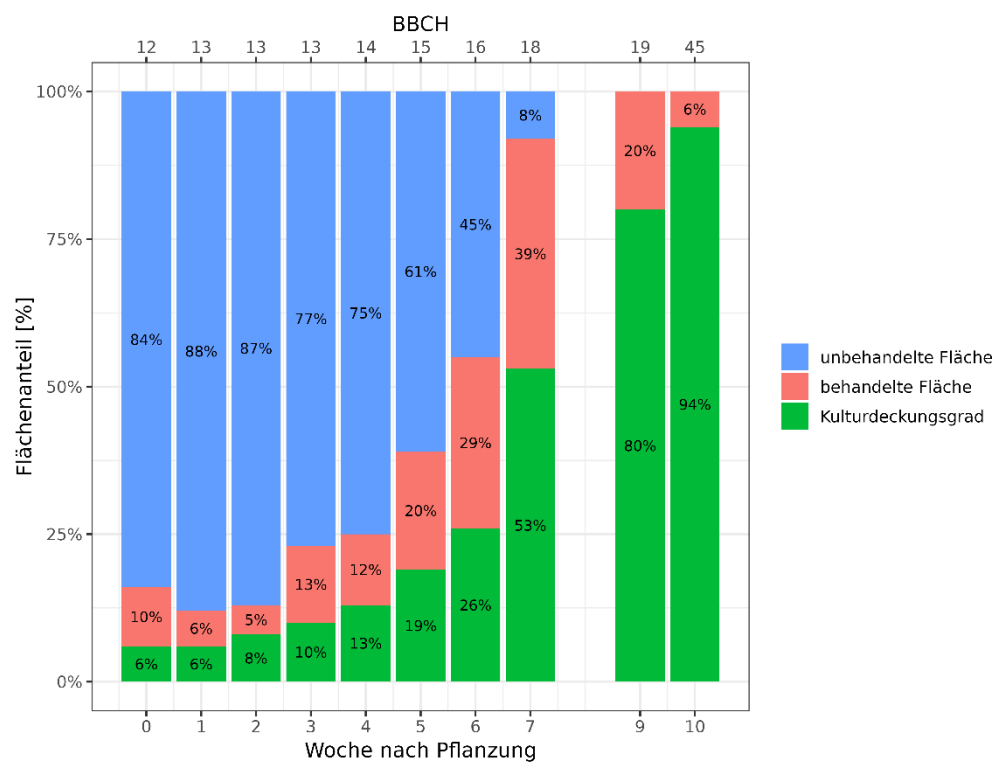


Abbildung 33: Modelliertes Abschwemmungspotenzial durch Spotspraying in Petersilie; $n = 1$ Versuch, 225 gemessene Pflanzen.

Reduktion des Abschwemmungspotenzials

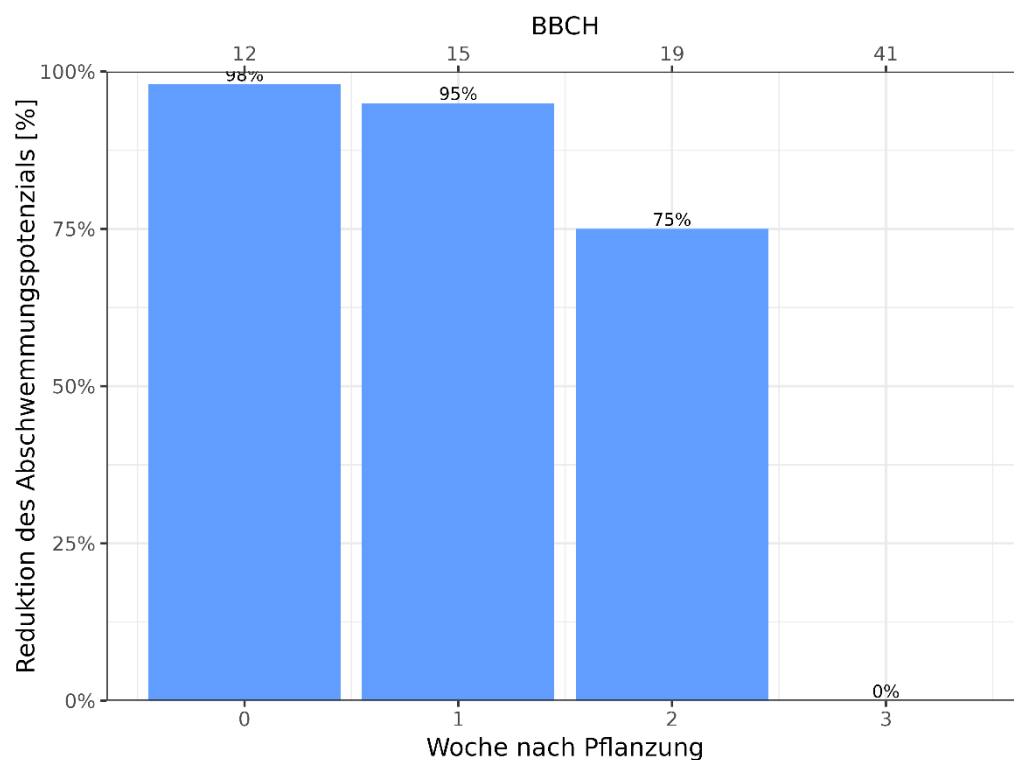


Abbildung 34: Modellierter Reduktion des Abschwemmungspotenzials mit einer Spot-Behandlung im Vergleich zu einer flächigen Behandlung in Chinakohl; n = 2 Versuche, 235 gemessene Pflanzen.

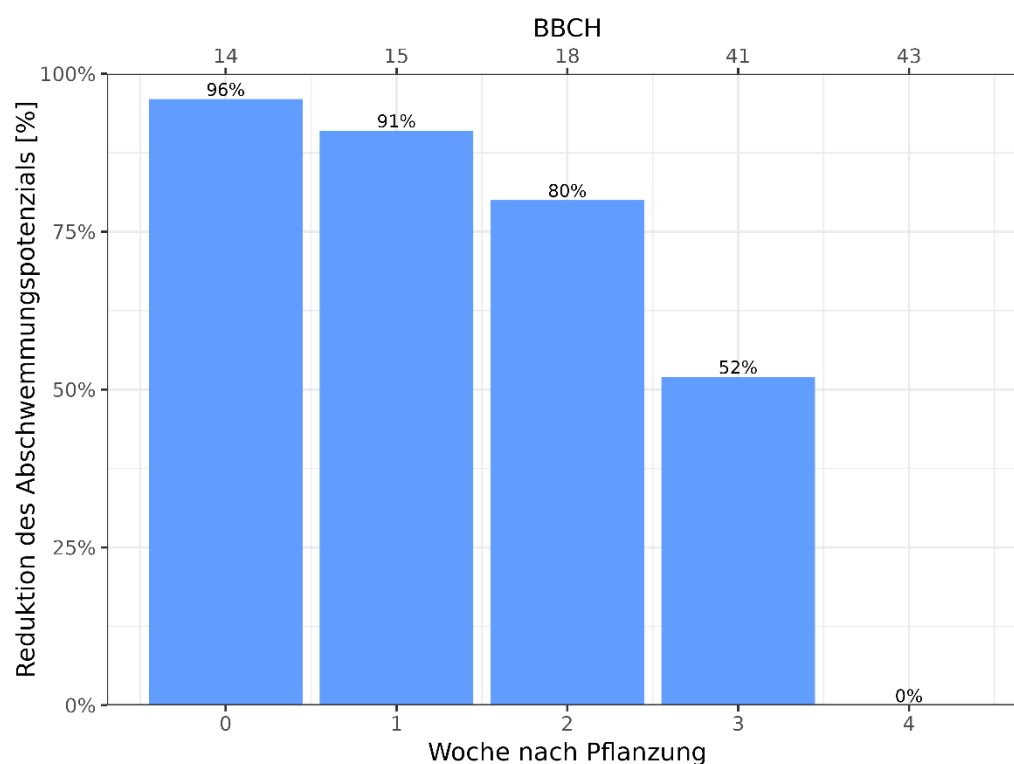


Abbildung 35: Modellierter Reduktion des Abschwemmungspotenzials mit einer Spot-Behandlung im Vergleich zu einer flächigen Behandlung in Eisbergsalat; n = 2 Versuche, 320 gemessene Pflanzen.

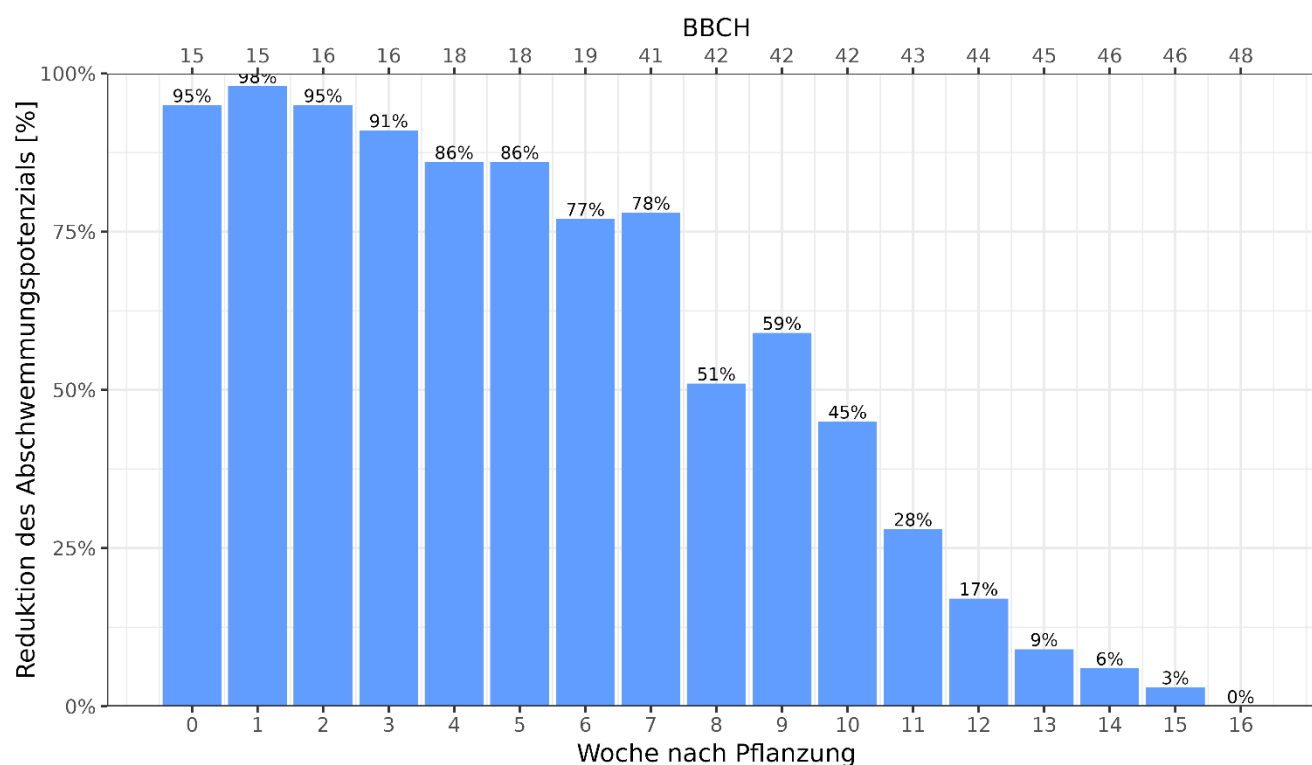


Abbildung 36: Modellierter Reduktion des Abschwemmungspotenzials mit einer Spot-Behandlung im Vergleich zu einer flächigen Behandlung in Knollensellerie; n = 4 Versuche, 1100 gemessene Pflanzen.

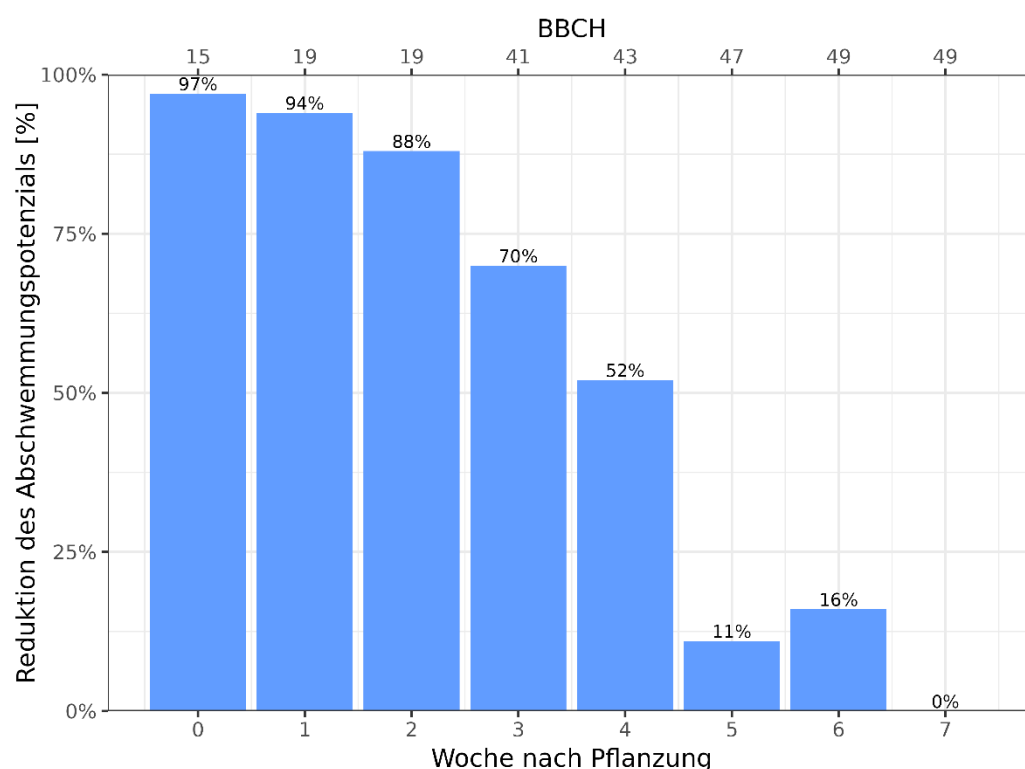


Abbildung 37: Modellierter Reduktion des Abschwemmungspotenzials mit einer Spot-Behandlung im Vergleich zu einer flächigen Behandlung in Kopfsalat; n = 10 Versuche, 745 gemessene Pflanzen.

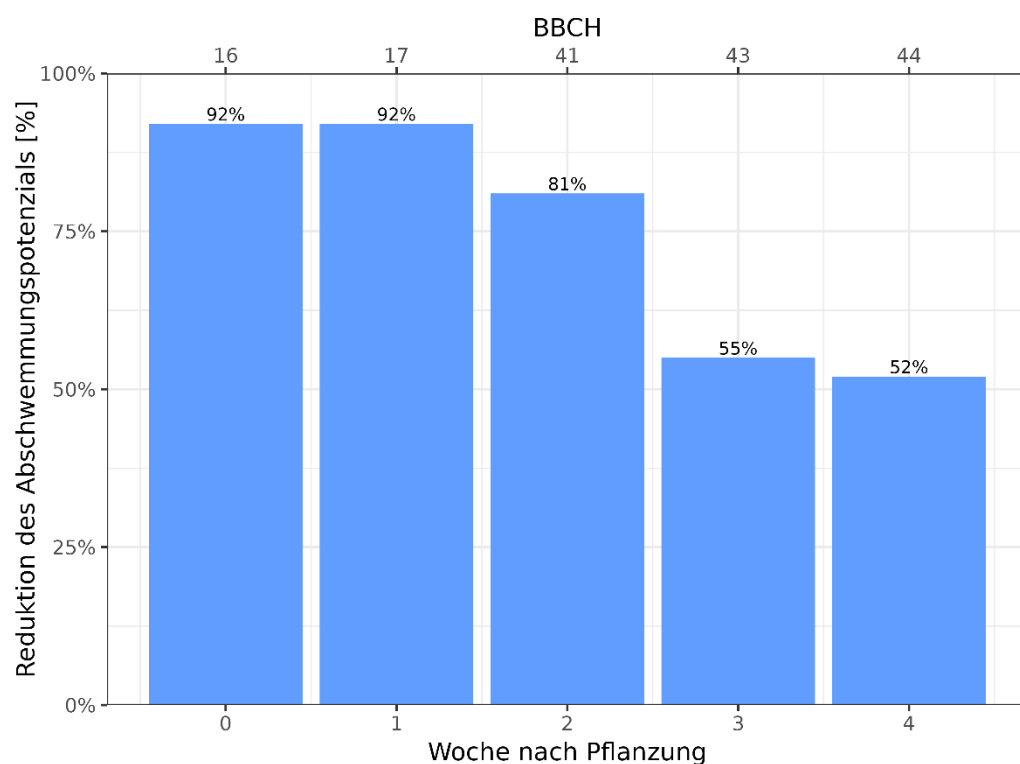


Abbildung 38: Modellierter Reduktion des Abschwemmungspotenzials mit einer Spot-Behandlung im Vergleich zu einer flächigen Behandlung in Pak Choi; n = 6 Versuche, 190 gemessene Pflanzen.

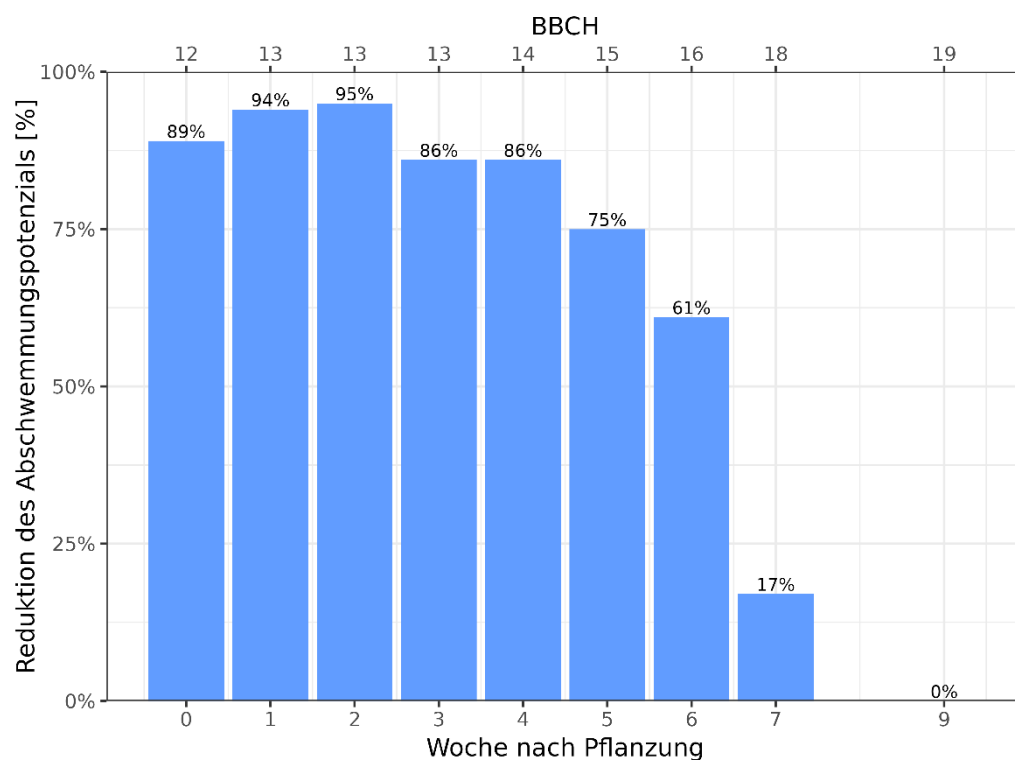


Abbildung 39: Modellierter Reduktion des Abschwemmungspotenzials mit einer Spot-Behandlung im Vergleich zu einer flächigen Behandlung in Petersilie; n = 1 Versuch, 225 gemessene Pflanzen.

Versuch, 225 gemessene Pflanzen.

Appendix III: Auswertung der Windmessungen und ISO 22866-Konformität der Versuchsdurchgänge

Um die ISO 22866-Konformität zu erfüllen, muss die Windgeschwindigkeit während der Applikation für mindestens 90 % der Datenpunkte über 1 m s⁻¹ liegen. Zudem muss auch die Windrichtung ausreichend stabil sein: Mindestens 70 % der Datenpunkte müssen sich während der Applikation innerhalb eines Bereichs von ±45° und der Mittelwert innerhalb von ±30° zur Zielwindrichtung befinden.

Diese Anforderungen sind schwer zu erfüllen, da die Windprognose und die ersten Sekunden der Versuche zwar oft eine ausreichende Windgeschwindigkeit und korrekte Windrichtung zeigten, dies jedoch während der gesamten Applikation nicht durchgehend gewährleistet war. Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der ISO-konformen und nicht konformen Durchgänge von 2023 und 2025. Die detaillierten Windergebnisse aus jedem Durchgang von 2023 bis 2025 sind im Anschluss an die Tabelle dargestellt.

Tabelle 6: Übersicht über die ISO 22866-Konformität der Durchgänge von 2023 bis 2025

Datum	Durchgang	Windgeschwindigkeit	Windrichtung
2023.08.23	1	O	X
	2	O	O
2023.08.25	1	X	X
	2	X	X
2023.09.27	1	X	X
	2	O	X
2024.06.05	1	O	O
	2	O	X
	3	O	O
	4	O	O
2024.07.11	1	O	X
	2	X	O
2024.08.21	1	O	O
	2	O	O
	3	O	X
	4	O	O
2025.05.15	1	O	O
	2	O	O
	3	O	X
	4	O	O
2025.06.19	1	O	O
	2	X	O
	3	X	X
	4	O	O
	5	O	O
2025.08.06	1	O	O
	2	O	O
	3	O	O
	4	O	O
2025.10.02	1	X	X
	2	O	O
	3	O	O
	4	O	X

O = ISO-konform

X = nicht ISO-konform

= Durchgang ISO-konform

= Durchgang nicht ISO-konform

2023.08.23 Band-Parzellen-Spritze

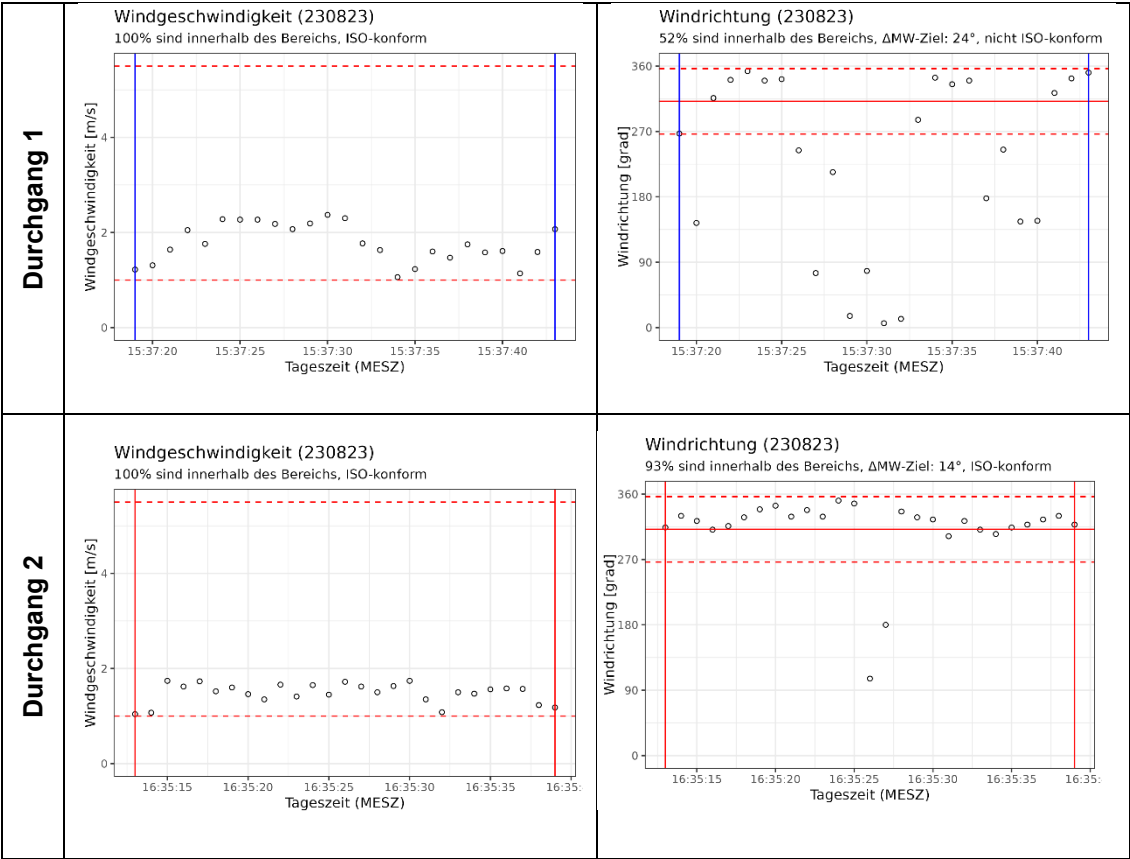


Abbildung 40: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 23.08.2023. ΔMW-Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2023.08.25 Band-Parzellen-Spritze

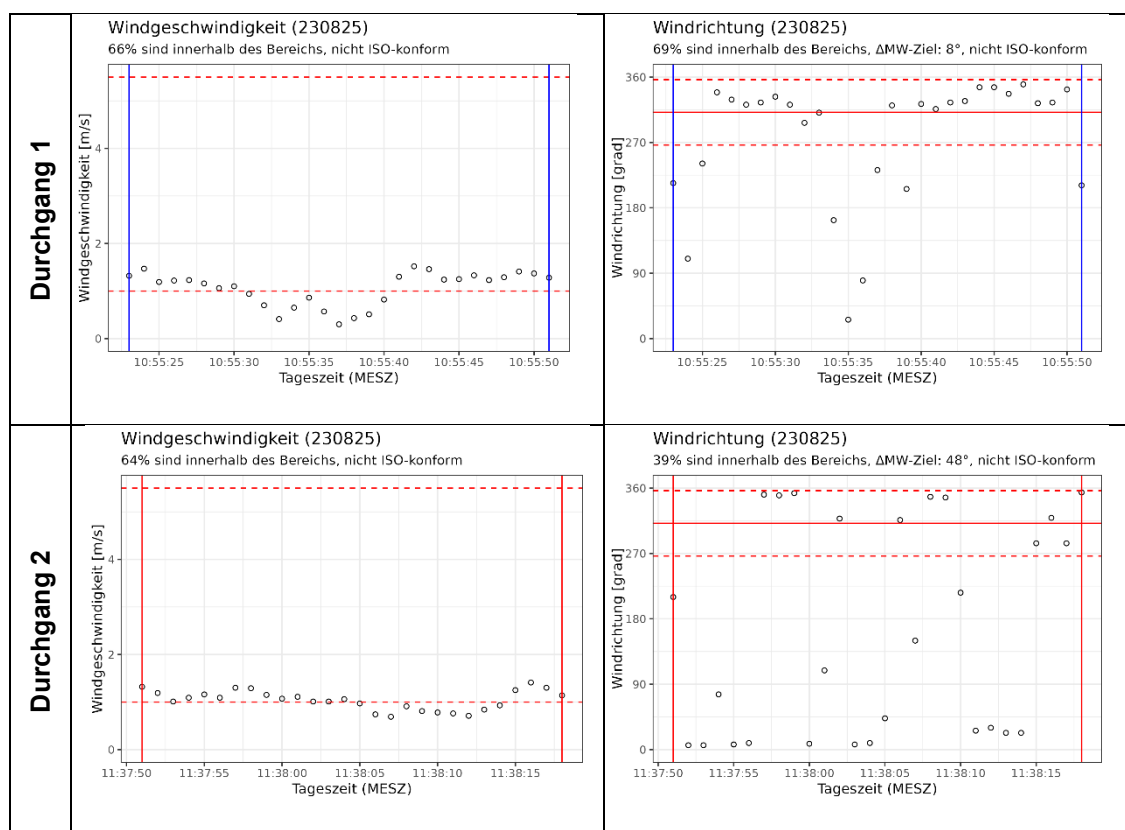


Abbildung 41: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 25.08.2023. ΔMW -Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2023.09.27 Band-Parzellen-Spritze

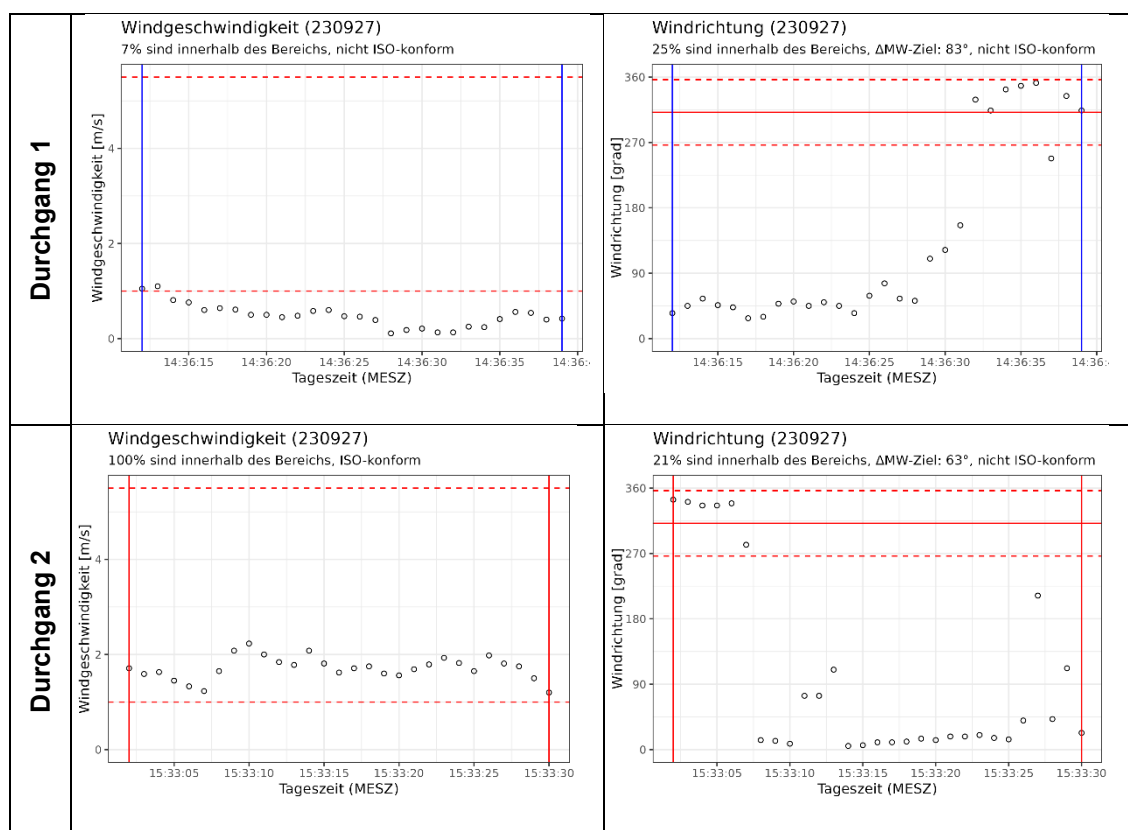


Abbildung 42: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 27.09.2023. ΔMW -Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2024.06.05 Stekete-Prototyp II

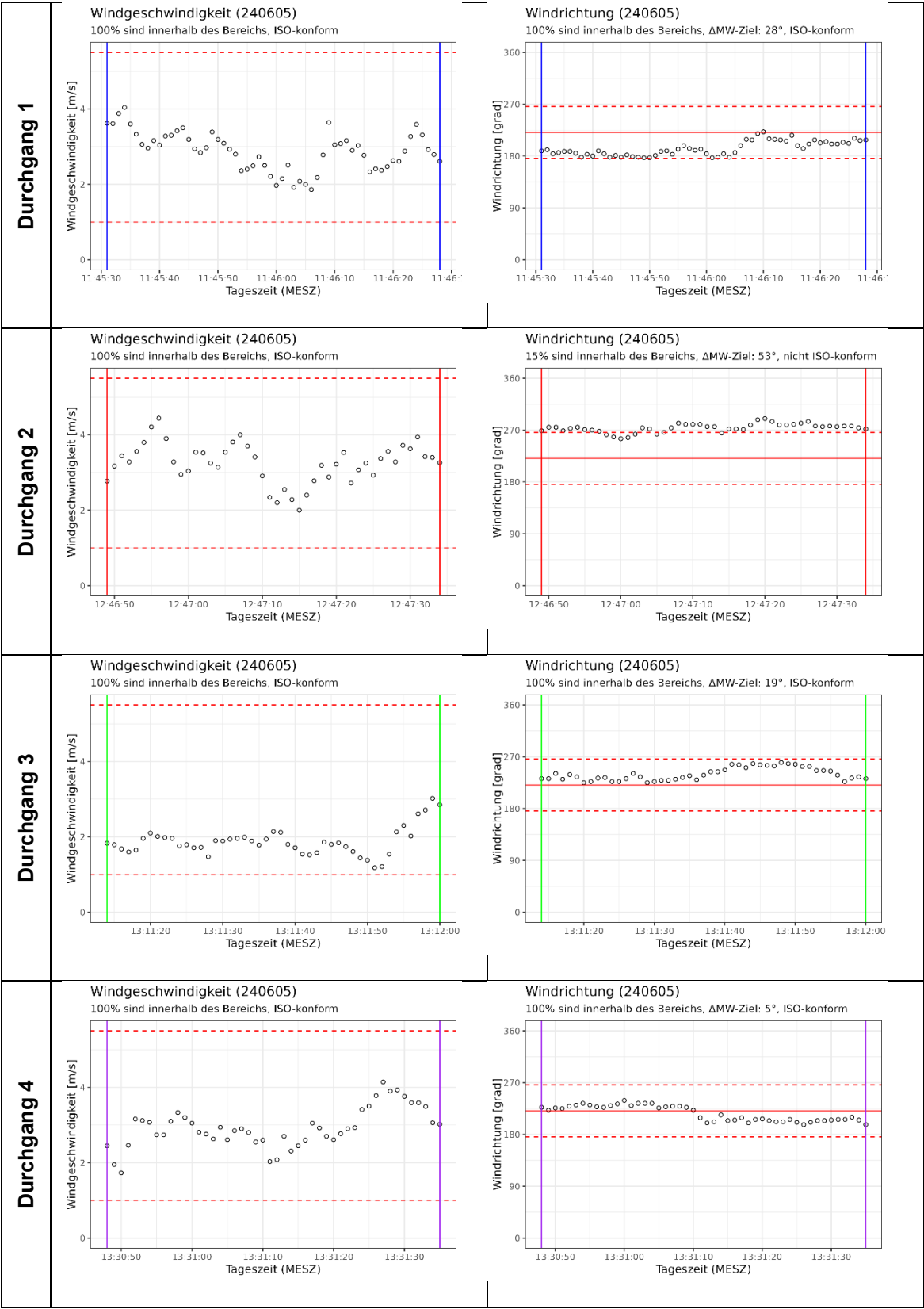


Abbildung 43: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche 05.06.2024. ΔMW-Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2024.07.11 Band-Parzellen-Spritze

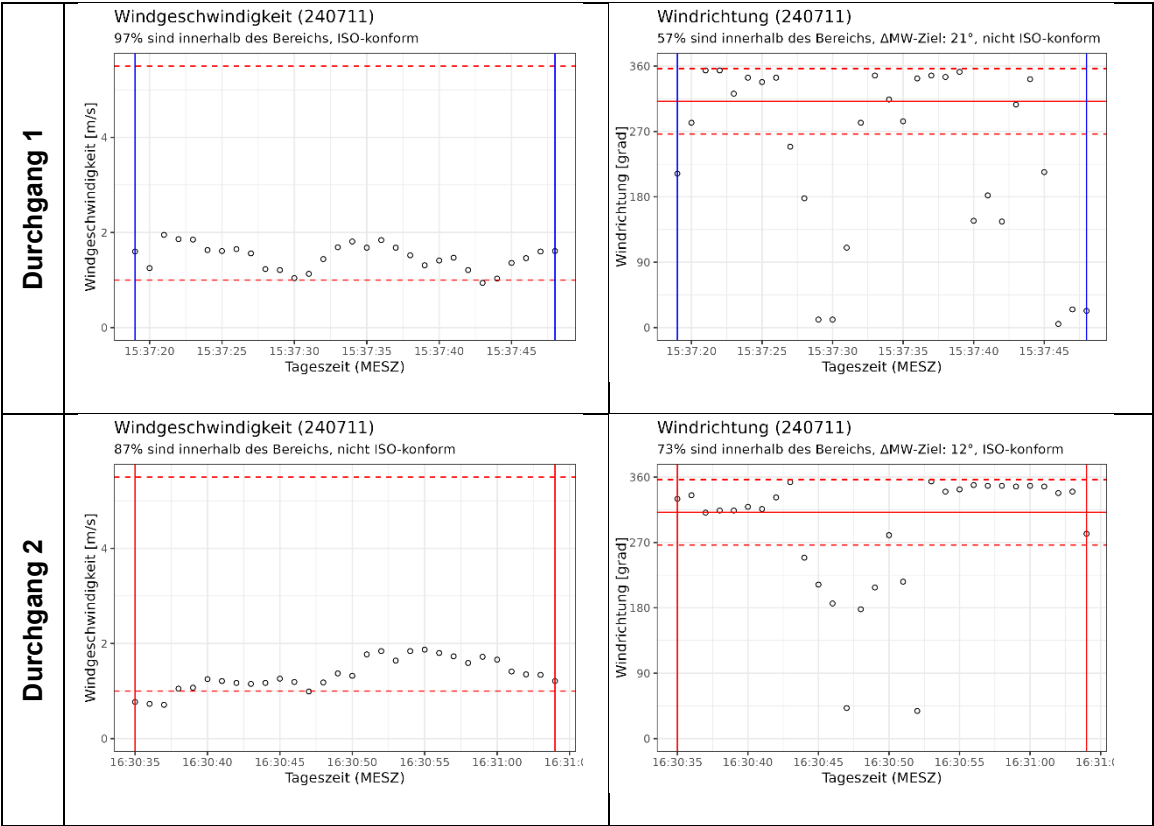


Abbildung 44: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 11.07.2024. ΔMW-Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2024.08.21 Ecorobotix ARA

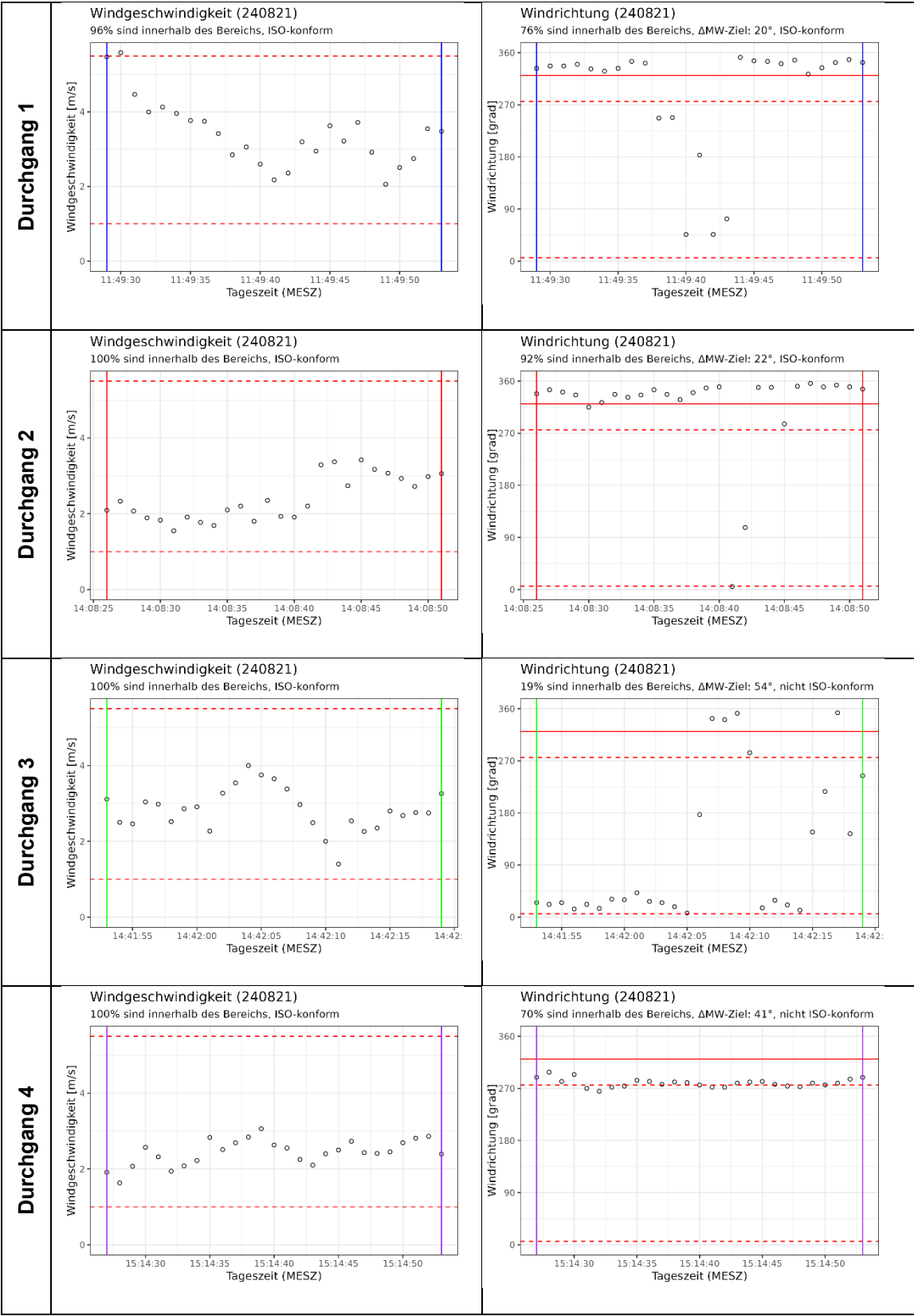


Abbildung 45: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 21.08.2024. ΔMW-Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2025.05.15 Steketee-Prototyp II

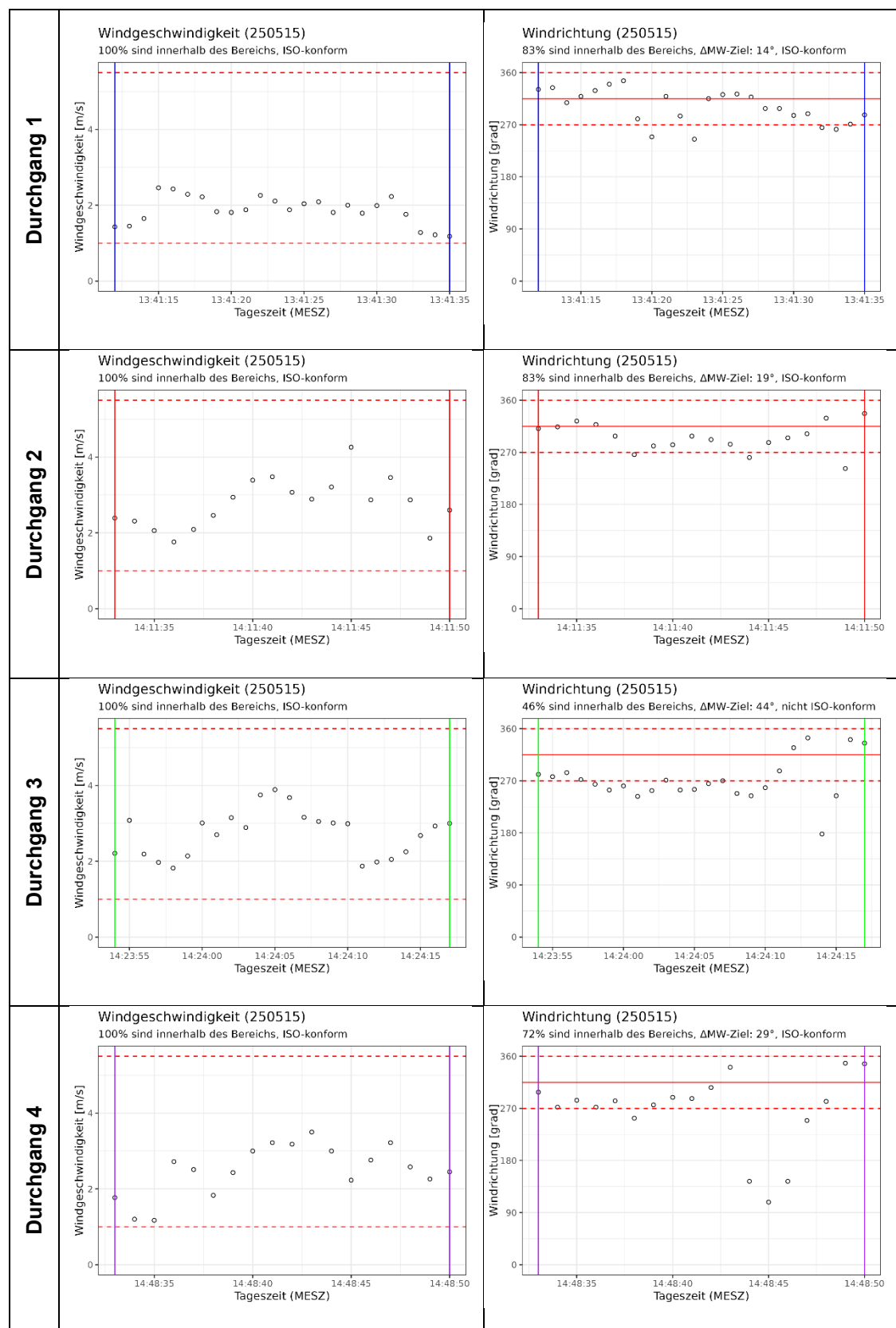
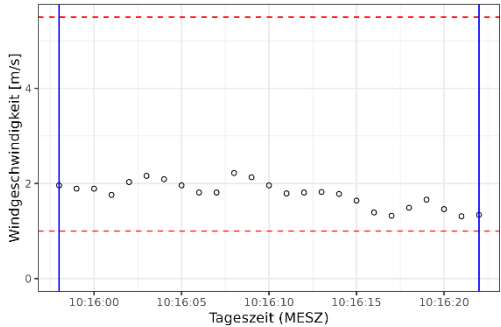
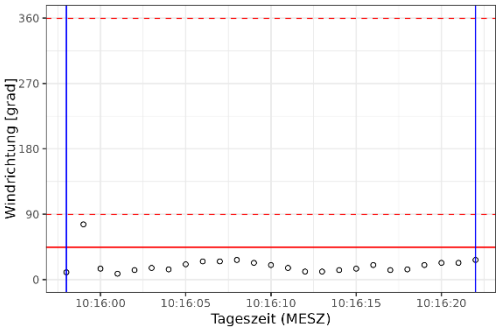
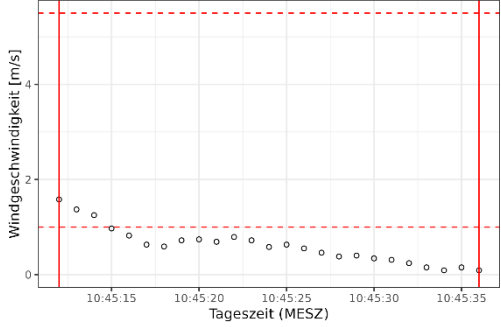
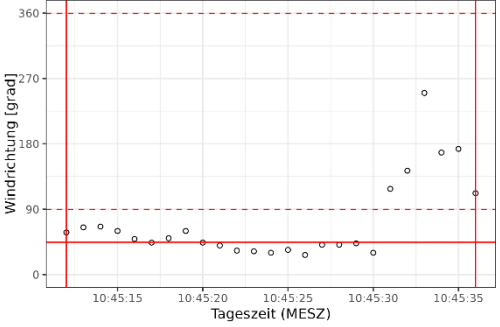
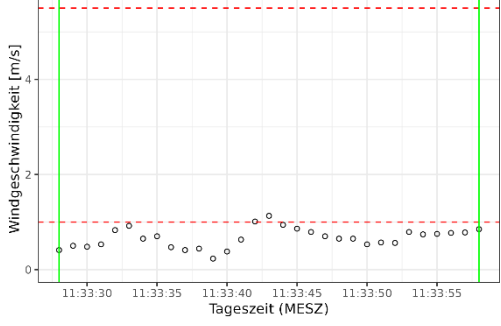
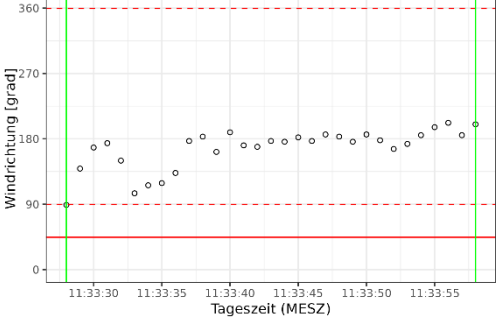
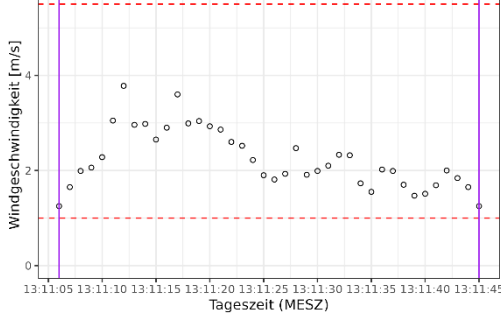
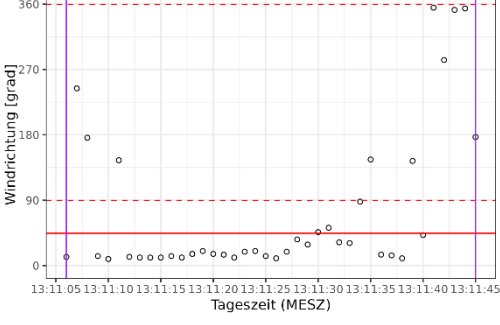


Abbildung 46: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 15.05.2025. ΔMW-Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2025.06.19 Steketee-Prototyp II

Durchgang 1	Windgeschwindigkeit (250619) 100% sind innerhalb des Bereichs, ISO-konform  Windrichtung (250619) 100% sind innerhalb des Bereichs, ΔMW-Ziel: 25°, ISO-konform 
Durchgang 2	Windgeschwindigkeit (250619) 12% sind innerhalb des Bereichs, nicht ISO-konform  Windrichtung (250619) 76% sind innerhalb des Bereichs, ΔMW-Ziel: 13°, ISO-konform 
Durchgang 3	Windgeschwindigkeit (250619) 6% sind innerhalb des Bereichs, nicht ISO-konform  Windrichtung (250619) 3% sind innerhalb des Bereichs, ΔMW-Ziel: 124°, nicht ISO-konform 
Durchgang 4	Windgeschwindigkeit (250619) 100% sind innerhalb des Bereichs, ISO-konform  Windrichtung (250619) 75% sind innerhalb des Bereichs, ΔMW-Ziel: 23°, ISO-konform 

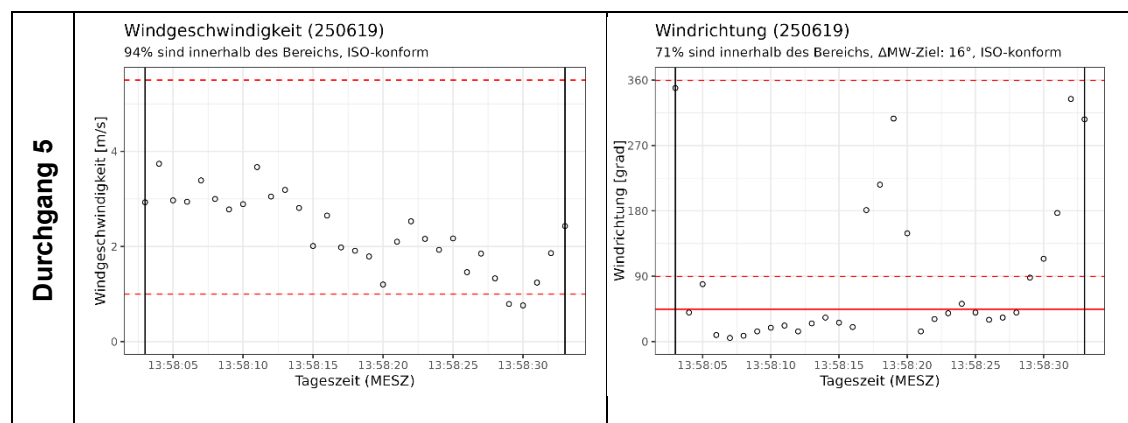


Abbildung 47: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 19.06.2025. ΔMW -Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2025.08.06 Ecorobotix ARA

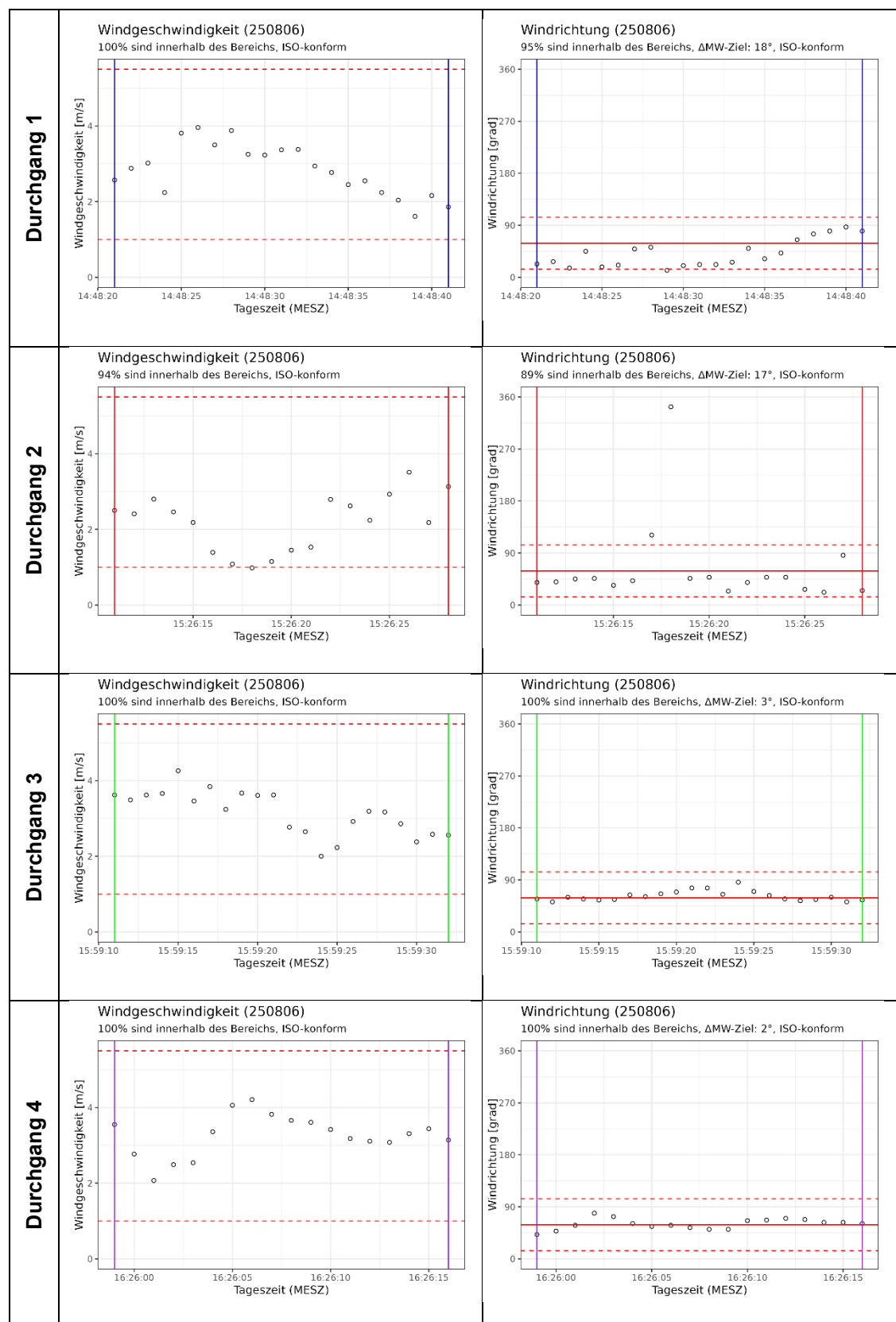


Abbildung 48: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 06.08.2025. ΔMW-Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.

2025.10.02 Steketee-Prototyp II

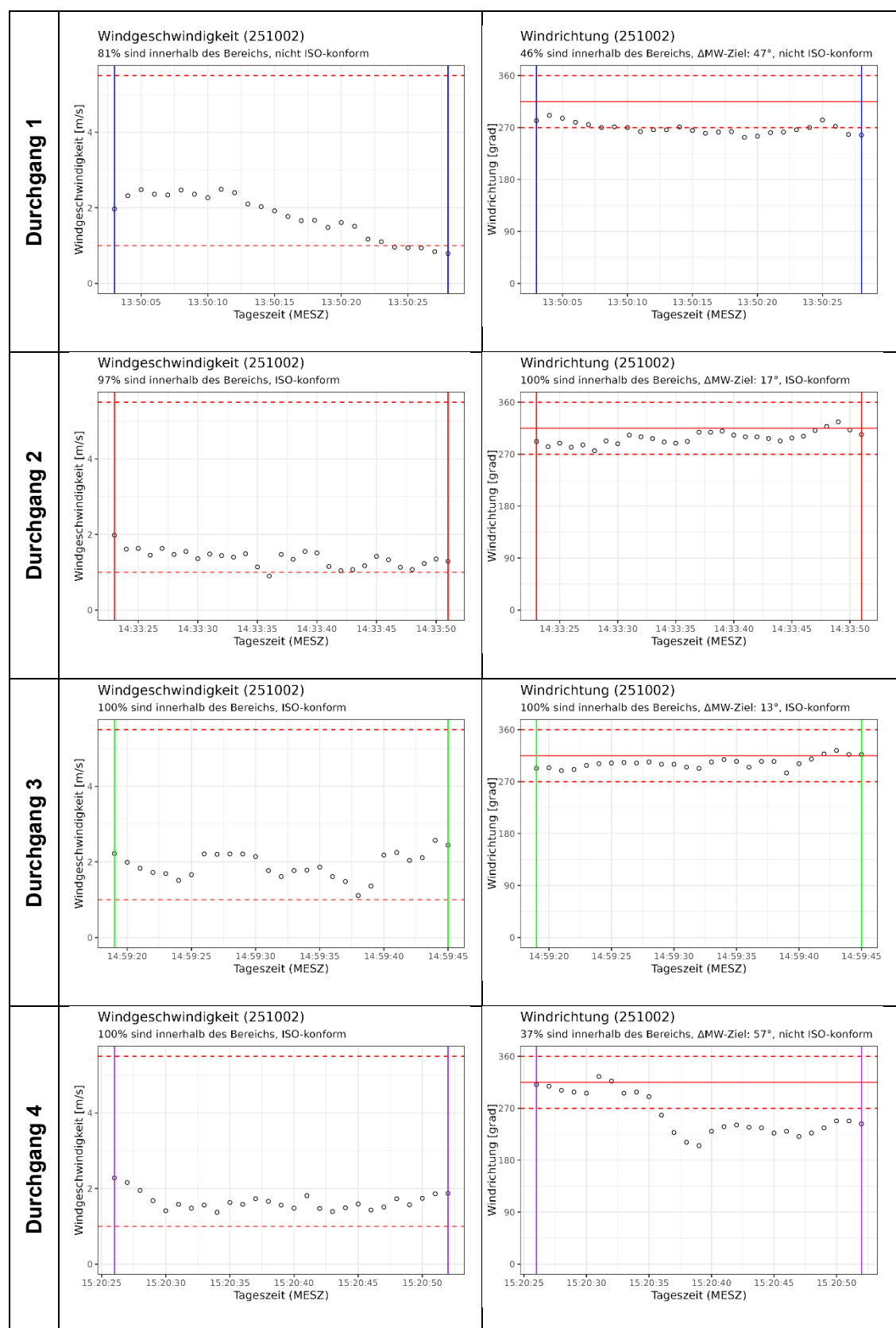


Abbildung 49: Gemessene Windgeschwindigkeit (links) und Windrichtung (rechts) während der Driftversuche am 02.10.2025. ΔMW -Ziel = Absolute Differenz zwischen dem Mittelwert der Windrichtung und der Zielwindrichtung.