



Schlussbericht zum Thema

**Standortspezifische Risikobewertung von
Verfahren mechanischer und chemischer
Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen als
Baustein eines nachhaltigen Pflanzenschutzes**

FKZ: 2815NA144, 2815NA197

**Projektnehmer: Verein der Zuckerindustrie e. V.,
Julius Kühn-Institut Bundesforschungsinstitut für
Kulturpflanzen (JKI)**

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung
und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des
Deutschen Bundestages im Rahmen des
Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau Landwirtschaft (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische und nachhaltige Land- und Lebensmittelwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der BÖL-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in Bonn in die Praxis umgesetzt. Das Programm untergliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder, den Forschungs- und den Informationsbereich.

Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter www.bundesprogramm.de

Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Tel: 0228-6845-3280
E-Mail: boel@ble.de

Abschlussbericht

Standortsspezifische Risikobewertung von Verfahren mechanischer und chemischer Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen als Baustein eines nachhaltigen Pflanzenschutzes (EvaHerb)

Gemeinsamer Schlussbericht von:

- Zuwendungsempfänger: Verein der Zuckerindustrie e.V.
Förderkennzeichen: 2815NA144
- Ausführende Stelle: Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ)
Prof. Dr. A.-K. Mahlein, Dr. H.-J. Koch, Dr. O. Fishkis
(Projektkoordination)
Holtenser Landstr. 77
D-37079 Göttingen
Tel.: 0551/5056250
E-Mail: koch@ifz-goettingen.de
- Zuwendungsempfänger: Julius Kühn-Institut Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen
Förderkennzeichen: 2815NA197
- Ausführende Stelle: Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland (JKI-A)
Dr. J. Lehmus
Messweg 11/12
38104 Braunschweig
Tel. 0531/299-4506
E-Mail: joern.lehmus@jki.bund.de
- Ausführende Stelle: Institut für Strategien und Folgenabschätzung (JKI-SF)
Dr. H. Kehlenbeck, Dr. J. Strassemeyer
Stahnsdorfer Damm 81
14532 Kleinmachnow
Tel.: 033203/48-366
E-Mail: joern.strassemeyer@julius-kuehn.de
- Laufzeit: 01.03.2019 bis 31.10.2022
- Autoren: Olga Fishkis, Heinz-Josef Koch, Jörn Lehmus, Franz Pöllinger, Jörn Strassemeyer, Jessica Weller

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Standortspezifische Risikobewertung von Verfahren mechanischer und chemischer Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen als Baustein eines nachhaltigen Pflanzenschutzes (EvaHerb)

Olga Fishkis¹, Heinz-Josef Koch¹, Jörn Lehmhus², Franz Pöllinger³, Jörn Strassemeyer³, Jessica Weller²

¹Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ), Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen, E-Mail: fishkis@ifz-goettingen.de, koch@ifz-goettingen.de;

²Julius Kühn-Institut (JKI-A) Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig; E-Mail: joern.lehmhus@jki.bund.de

³Julius Kühn-Institut (JKI-SF) Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow; E-Mail: joern.strassemeyer@jki.bund.de

Die F2F-Strategie der EU zielt auf eine Reduktion des Pestizideinsatzes ab. In der Unkrautkontrolle sollen dazu mechanische Maßnahmen chemische ersetzen. Eine mehrdimensionale Bewertung mechanischer Verfahren auf ökologische, ökonomische und verfahrenstechnische Parameter liegt jedoch bislang nicht vor. Ziel des Projekts war es daher, Kenngrößen mechanischer und chemischer Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben als Modellfrucht zu erfassen und zu bewerten.

Zu diesem Zweck wurden 3 methodische Ansätze verwendet: (i) Feldversuche wurden in 3 Jahren auf 5-7 Feldern bei Göttingen durchgeführt, um die Auswirkungen des Hackens zur Unkrautkontrolle auf Regenwürmer, Insekten und Spinnen, Wassererosion sowie Unkrautwirkungsgrad und Zuckerrübenenertrag zu erfassen; (ii) Das ökotoxikologische Risiko von 5 Unkrautbekämpfungsverfahren wurde mit SYNOPSIS-GIS modelliert; (iii) Ressourcenverbrauch, Treibhausgas(THG)-Emissionen und Wirtschaftlichkeit wurden für 11 Unkrautbekämpfungsverfahren mittels Literatur und Webanwendungen berechnet.

Die Gesamtbetrachtung der mehrdimensionalen Risiken verschiedener konventioneller und neuer Verfahren zeigt, dass derzeit keine Methode als uneingeschränkt umweltfreundlich bezeichnet werden kann. Die toxikologische Risikobewertung mit SYNOPSIS-GIS zeigt, dass die Flächenspritzung von praxisüblichen Herbiziden in den meisten Boden-Klima-Räumen (BKR) und Jahren mit einem niedrigen toxikologischen Risiko verbunden. Die Flächenspritzung mit einem Herbizid wie Conviso One ist zwar vorteilhaft für Energieverbrauch, Klimawirkung und Toxizität für Bodenorganismen, weist aber die höchste akute Toxizität auf. Herkömmliche mechanische Verfahren sind toxikologisch zwar unbedenklich, im Vergleich zum ganzflächigen Herbizideinsatz aber mit 100-150 % höheren THG-Emissionen verbunden. Insgesamt hat ein Kleinroboter kombiniert mit Punktspritzung Vorteile. Diese Technik weist einen geringeren Ressourcen- und Energieverbrauch als die konventionelle Flächenspritzung sowie ca. 30 % geringere THG-Emissionen auf und hat ein um 87 % niedrigeres toxikologisches Risiko.

Bodenerosion, Abundanz von Regenwürmern, Insekten und Spinnen sowie Zuckerrübenenertrag unterschieden sich nicht zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren.

Abstract

Site specific risk evaluation of mechanical and chemical weed control in row crops promoting sustainable crop protection (EvaHerb)

Olga Fishkis¹, Heinz-Josef Koch¹, Jörn Lehmhus², Franz Pöllinger³, Jörn Strassemeyer³, Jessica Weller²

¹Institute of Sugar Beet Research (IfZ), Holtenser Landstr. 77, 37079 Göttingen, E-Mail: fishkis@ifz-goettingen.de, koch@ifz-goettingen.de

²Julius Kühn-Institut (JKI-A), Institute for Plant Protection in Field Crops and Grassland, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig; E-Mail: joern.lehmhus@jki.bund.de

³Julius Kühn-Institut (JKI-SF), Institute for Strategies and Technology Assessment, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow; E-Mail: joern.strassemeyer@jki.bund.de

The EU's F2F-strategy aims to reduce pesticide use. In weed control, chemical measures are to be replaced by mechanical ones. However, a comprehensive evaluation of mechanical methods with respect to ecological and economic parameters is not yet available. The aim of the project was therefore to measure and evaluate relevant parameters of mechanical and chemical weed control in sugar beet as a model crop. For this purpose, 3 methodological approaches were used: (i) Field experiments were conducted over 3 years in 5-7 fields near Göttingen to assess the effects of hoeing for weed control on soil organisms (earthworms, insects and spiders), soil erosion by water, weed control efficiency, and sugar beet yield; (ii) Ecotoxicological risks of 5 mechanical-chemical and chemical weed control methods were modeled using SYNOPS-GIS; (iii) Resource use, greenhouse gas emissions (GHG), and economic parameters were calculated for 11 weed control methods using literature and open-source web applications.

An overall consideration of the multidimensional risks for different conventional and new methods shows that currently no method can be described as fully environmentally friendly. Toxicological risk assessment with SYNOPS-GIS shows that broadcast spraying of conventional herbicides is associated with low toxicological risk in most soil-climate regions (BKR) and years. Broadcast spraying with herbicides such as Conviso One, while beneficial for energy use, climatic effects, and toxicity to soil organisms, has the highest acute toxicity. Conventional mechanical methods, while toxicologically safe, are associated with 100-150% higher GHG emissions compared to conventional herbicide application. Overall, a small-scale robot combined with spot spraying has the greatest advantages. This technique requires relatively low resource and energy consumption, produces about 30% lower GHG emissions and has by 87% lower toxicological risk than conventional herbicide spraying.

The extent of soil erosion, abundance of earthworms, insects and spiders, and sugar beet yield did not differ between weed control methods.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
I. Abbildungsverzeichnis	I
II. Tabellenverzeichnis	III
1 Einführung	1
1.1 Bezug des Vorhabens zu den Zielen des BÖLN	1
1.2 Potenzielle Risiken mechanischer und kombinierter Unkrautbekämpfung	1
1.3 Gegenstand des Vorhabens, Ziele und Aufgabenstellung des Projekts	2
1.4 Planung und Ablauf des Projektes	3
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand	3
3 Material und Methoden	5
3.1 Feldversuche	5
Standorte und Versuchsablauf (IfZ + JKI-A)	5
Bodenerosion (IfZ)	5
Epigäische Raubarthropoden (JKI-A) und Schädlinge (JKI-A)	8
Regenwürmer (IfZ)	12
Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung, Rüben- und Zuckerertrag (IfZ)	12
3.2 Ökotoxikologische Risikobewertung mittels SYNOPSIS-GIS (JKI-SF)	13
3.3 Kosten, Zeitaufwand, Rohstoff- und Energieverbrauch, THG-Emissionen (IfZ)	19
3.4 Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage für die Unkrautkontrolle (IfZ)	22
4 Ausführliche Darstellung und Diskussion der wichtigsten Ergebnisse	23
4.1 Bodenerosion (IfZ)	23
4.2 Epigäische Raubarthropoden und Schädlinge (JKI-A)	25
Abundanz epigäischer Raubarthropoden	25
Abundanz von Schadinsekten	30
Prädationsversuche	31
Präferenzversuche	32
4.3 Regenwürmer (IfZ)	32
4.4 Ökotoxikologische regionale Risikobewertung mit SYNOPSIS-GIS (JKI-SF, IfZ)	34
4.5 Rohstoffverbrauch, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen (IfZ)	38
4.6 Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung und Ertrag (IfZ)	40
4.7 Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage, Kosten und Arbeitszeitbedarf (IfZ)	42
5 Multidimensionale Risiken und Empfehlungen (IfZ, JKI-A, JKI-SF)	47
6 Voraussichtiger Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.	52
7 Gegenüberstellung geplanter und erreichter Ziele	52
8 Zusammenfassung	53
9 Literaturverzeichnis	55
10 Realisierte und geplante Veröffentlichungen sowie Verbreitung der Ergebnisse	58

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fallenaufbau im Feld zur Untersuchung von Raubarthropoden.	9
Abbildung 2: Schema des Aufbaus a) der Blattlauskarten und b) der Raupenattrappen.	10
Abbildung 3: Im Labor hergestellte Bodenstruktur für die Präferenzversuche.	11
Abbildung 4: Auf dem Feld (Braunschweig) direkt nach der Unkrautbekämpfung fotografierte Bodenstruktur (links Flächenspritzung (H); rechts Hacke in und zwischen den Reihen (H)).....	11
Abbildung 5: Cluster für die regionale Erhebung und Analyse der Pflanzenschutzintensität (CEPI) im Ackerbau in Deutschland (Dachbrodt-Saaydeh et al. 2019).....	15
Abbildung 6: Kumulativer Abfluss und Bodenabtrag (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 4$) nach mechanischer oder chemischer Unkrautbekämpfung in Feldversuchen mit Zuckerrüben, gemessen auf Kleinparzellen ($n = 86$) mittels Regensimulationen. Um die Ergebnisse mit anderen Studien vergleichbar zu machen, wurden die Daten standardisiert, indem sie durch die Regendauer dividiert wurden. H - mechanische Unkrautkontrolle (Hacke); S - chemische Unkrautkontrolle (Spritze).....	24
Abbildung 7: Gesamte Anzahl von Kurzflügelkäfern an den beiden Standorten im Versuchsjahr 2019; S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. den Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen; H = Hacke i. und zw. d. Reihen (Photoelektorfänge).	28
Abbildung 8: Gesamte Anzahl von Spinnen an allen Standorten im Versuchsjahr 2020; S=Flächenspritzung, HS=Hacke zw. d. Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen; H=Hacke i. und zw. den Reihen (Photoelektorfänge).....	28
Abbildung 9: Gesamte Anzahl von Laufkäfern an den beiden Standorten im Versuchsjahr 2021; S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. den Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen, H = Hacke i. und zw. den Reihen (Photoelektorfänge).....	29
Abbildung 10: Gesamte Anzahl von Moosknopfkäfern an den beiden Standorten 2021 in den Photoelektorfängen; S=Flächenspritzung, HS=Hacke zw. d. Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen; H=Hacke i. und zw. den Reihen.	30
Abbildung 11: Gesamte Anzahl von Blattläusen (<i>Aphis fabae</i> , <i>Myzus persicae</i> , <i>Macrosiphum euphorbiae</i> , <i>Aulacorthum solani</i>) in der Sichtbonitur in Bühle 2020, S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. d. Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen, H = Hacke i. und zw. d. Reihen.....	31
Abbildung 12: Prädation an aufgeklebten Erbsenblattläusen auf Blattlauskarten 2020 und 2021 an je zwei Standorten, S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. d. Reihe und Bandspritzung i. d. Reihe, H=Hacke i. und zw. den Reihen	32
Abbildung 13: Aufenthaltshäufigkeit 6 verschiedener Laufkäferarten auf aufgerautem und geglättetem Boden im Präferenzversuch.	32
Abbildung 14: Einfluss des Unkrautbekämpfungsverfahrens in Zuckerrüben auf die Abundanz (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n=4$) von adultem und juvenilem <i>L. terrestris</i> (A) und adulten und juvenilen endogäischen Regenwürmern (B) im Herbst. Unterschiede zwischen den drei Verfahren waren nicht signifikant ($p \leq 0.05$). H = Hacken, HS = Bandspritzung i. d. Reihe und Hacken zw. d. Reihen, S = Flächenspritzung	33
Abbildung 15: 90. Perzentile des akuten aquatischen ($ETR_{A(aqu)}$) und chronischen terrestrischen ($ETR_{C(bod)}$) Risikos in verschiedenen Boden-Klima-Räumen in 6 CEPI-Regionen (A-F). Zur Lage der CEPI-Regionen und Boden-Klima-Räume siehe Abb. 5. Jeder Boxplot umfasst 8 Datenpunkte (8 Jahre, 2011-2018). Die gelbe Linie zeigt den Übergang von sehr niedrigem zu niedrigem Risiko, die orangene Linie den Übergang von niedrigem zu erhöhtem Risiko.....	35

Abbildung 16: CEPI-Regionen (A-F) und Bodenklimaräume (101-198) nach Dachbrodt-Saaydeh et al., 2019. Bodenklimaräume mit einem erhöhten 90. Perzentil des akuten aquatischen ($> 0,1$) und chronischen terrestrischen ($> 0,5$) Risikos (siehe Abb. 4) wurden durch gelbe bzw. orangefarbene Kreise gekennzeichnet. Für die Risikobewertung wurden in SYNOPSIS-GIS CEPI-regionsspezifische generische Anwendungsmuster von Herbiziden (GAMs) verwendet (siehe 3.2.3.).....	36
Abbildung 17: Toxikologisches Risiko ($ETR_{A(aqu)}$; $ETR_{C(bod)}$) von Unkrautbekämpfungsverfahren mit reduzierter Herbizidmenge im Vergleich zu dem Risiko der konventionellen Flächenspritzung für ausgewählte Boden-Klima-Räume (105, 145, 115, 154, 153, 111) in den CEPI-Regionen A-F (A) und für alle CEPI-Regionen (B). Die Lage der CEPI-Regionen und Boden-Klima-Räume ist Abb. 5 zu entnehmen. Jeder Boxplot umfasst 8 Datenpunkte für 8 Jahre (2011-2018). Die Unkrautbekämpfungsverfahren sind in Tab. 6 beschrieben. Signifikante Unterschiede zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren sind mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben gekennzeichnet.	37
Abbildung 18: Regionale Variabilität des akuten aquatischen Risikos ($ETR_{A(aqu)}$) für eine Conviso One-Herbizidapplikation im Bandverfahren im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung nach dem jeweiligen generischen Applikationsmuster.	38
Abbildung 19: Wirkungsgrad der Unkrautkontrolle (Gl.[1]). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Datenlücken an manchen Stellen (zB Si19 für NAK2) bezeichnen die Fälle, wo die Zahl der Unkräuter vor jeweiliger Maßnahme <5 war und daher konnte WG1 nicht zuverlässig bestimmt werden. Das Sternchen bezeichnet einen signifikanten Unterschied im Vergleich zur chemischen Unkrautregulierung.....	41
Abbildung 20: Wirkungsgrad der Unkrautkontrolle, berechnet mit Gl.[2], bei mechanischer (H), kombinierter (HS) und chemischer (S) Unkrautkontrolle auf 5 Standorten. *Unterschied signifikant zur chemischen Unkrautregulierung.	41
Abbildung 21: Bestandesdichte im Oktober an 5 Standorten bei mechanischer (H), kombinierter (HS) und chemischer (S) Unkrautkontrolle. Unterschiede zwischen den Varianten nicht signifikant	42
Abbildung 22: Rübenertrag (links), Zuckergehalt (Mitte) und Zuckerertrag (rechts) bei mechanischer (H), kombinierter (HS) und chemischer (S) Unkrautkontrolle an 5 Standorten. *Unterschied zur chemischen Unkrautkontrolle signifikant.....	42
Abbildung 23: Median und minimale Zahl der Feldarbeitstage (2015-2021), die für die Unkrautbekämpfung in sandigem Lehmboden zur Verfügung standen. Jeder Boxplot repräsentiert Daten von 15 Wetterstationen (Tab. 7). *Unterschied zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren signifikant.....	45
Abbildung 24: Regionale Unterschiede in der Anzahl der für das Hacken verfügbaren Feldarbeitstage. Die Zahlen geben die DWD-Wetterstation an (siehe Tab. 7). Die Anzahl der für das Hacken verfügbaren Tage zeigte eine negative lineare Korrelation (Pearson) mit den kumulierten Niederschlägen.	
Abbildung 25: Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage für Herbizidanwendungen (Spritze) und traktorbasiertes (Hacke) sowie robotergestütztes (FarmDroid Roboter) Hacken an verschiedenen Standorten in Deutschland. Jeder Boxplot umfasst 7 Datenpunkte für die Jahre 2015-2021.	45
Abbildung 26: Umweltrisiken und wirtschaftliche Risiken von konventionellen (A) und neuen (B) Unkrautbekämpfungsverfahren. Der maximale Verbrauch jeder Ressource (Herbizidmenge, Diesel, Energie, Bodenerosion usw.) oder das maximale ökotoxikologische Risiko (Toxizität akut aquatisch $ETR_{A(aqu)}$ und Toxizität chronisch terrestrisch $ETR_{C(bod)}$) wurde auf 100 % festgelegt. Der Ressourcenverbrauch durch andere Unkrautbekämpfungsverfahren wurde in Prozent des maximalen Verbrauchs ausgedrückt.....	51

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standortcharakterisierung und Ablauf der Feldversuche.....	6
Tabelle 2: Regensimulationsversuche: physikalische Daten und Umweltbedingungen. Das Hacken reduzierte den Mulchdeckungsgrad in den Versuchen O19_III, B21_II und B21_III signifikant, daher werden die Mittelwerte des Mulchdeckungsgrades für diese Versuche separat für Parzellen mit chemischer/mechanischer Unkrautbekämpfung angegeben. Bodenwassergehalt und Rübendeckungsgrad wurden durch die Unkrautbekämpfungsmethode nicht signifikant beeinflusst.....	8
Tabelle 3: Generisches Applikationsmuster von Herbiziden für 3 Intensitätsstufen für die CEPI-Region D im Jahr 2018.....	16
Tabelle 4: Risikoklassen der ETR-Werte in SYNOPS.....	18
Tabelle 5: Unkrautbekämpfungsverfahren, für die eine regionale Risikobewertung mit SYNOPSIS-GIS durchgeführt wurde. Die in der Risikobewertung für die Unkrautbekämpfungsverfahren 1-4 verwendeten Spritzfolgen sind die CEPI-regionsspezifischen generischen Applikationsmuster für die Jahre 2011 - 2018 (siehe 3.2.3.).....	19
Tabelle 6: Auswahl der Unkrautbekämpfungsverfahren für die Evaluierung der Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit.....	19
Tabelle 7: Umrechnungskoeffizienten zur Schätzung des Energieaufwandes und der CO ₂ -Emissionen (Quelle: BioGrace Version 4d: Standard Values).....	21
Tabelle 8: Mittelwerte des kumulativen Abflusses und des kumulativen Bodenabtrages bei mechanischer (H = Hacke i. und zw. d. Reihen) und chemischer (S) Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $p \leq 0,05$) innerhalb einer Regenrate.....	24
Tabelle 9: Anzahl der 10 häufigsten Kurzflügelkäferarten 2019 - 2021 in den Photoelektorfängen. H = Hacke in und zwischen den Reihen, HS = Hacke zwischen und Bandspritzung in den Reihen, S = Flächenspritzung.....	26
Tabelle 10: Anzahl der 10 häufigsten Spinnenarten 2019 – 2021 in den Photoelektorfängen. H=Hacke i. und zw. d. Reihen, HS=Hacke zw. und Bandspritzung i. d. Reihen, S = Flächenspritzung.....	26
Tabelle 11: Anzahl der 10 häufigsten Laufkäferarten 2019 - 2021 in den Photoelektorfängen. H = Hacke i. und zw. d. Reihen, HS = Hacke zw. und Bandspritzung i. d. Reihen, S = Flächenspritzung.....	27
Tabelle 12: Anzahl der 15 häufigsten Schädlinge 2019 - 2021 in Photoelektorfängen. H = Hacke in und zwischen den Reihen, HS = Hacke zwischen und Bandspritzung in den Reihen, S = Flächenspritzung.....	27
Tabelle 13: Verhältnis zwischen Herbizidaufwandmenge und toxikologischem Risiko.....	38
Tabelle 14: Ressourcen- und Energieverbrauch sowie Treibhausgasemissionen für chemische, kombinierte mechanisch-chemische und mechanische Unkrautbekämpfungsverfahren.....	40
Tabelle 15: Medianwert und Mindestanzahl der verfügbaren Feldarbeitstage für Unkrautkontrollmaßnahmen auf sandigem Lehmboden (2015-2021).	44
Tabelle 16: Kosten, Zeitaufwand und Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage für verschiedene Unkrautbekämpfungsverfahren	46
Tabelle 17: Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem EvaHerb-Projekt im Berichtszeitraum.	58
Tabelle 18: Konferenzbeiträge aus dem EvaHerb-Projekt (2020-2022).....	59

1 Einführung

1.1 Bezug des Vorhabens zu den Zielen des BÖLN

Aufgrund ihrer langsamen Entwicklung im Frühjahr sind Zuckerrüben konkurrenzschwach gegenüber Unkräutern in Bezug auf Licht, Nährstoffe und Wasser (Schweizer & May 1993). Der bei weitem wichtigste limitierende Faktor für das Wachstum von Zuckerrüben ist dabei eine frühe Lichtkonkurrenz (Brimhall et al. 1965). Studien zeigen, dass Unkräuter, die während des frühen Entwicklungsstadiums der Rübe bis zum 8-Blatt-Stadium auflaufen, den Zuckerertrag besonders stark um 26-100 % reduzieren (Schweizer & Dexter 1987, Jursik 2008, Gerhards et al. 2017). Daher ist eine wirksame Unkrautbekämpfung für die Zuckerrüben- und Zuckerproduktion unerlässlich.

Die Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben erfolgt derzeit auf über 90 % aller Zuckerrübenfelder in Deutschland durch die Ausbringung von Herbiziden (Roß et al. 2018). Der Einsatz von Herbiziden wird jedoch aufgrund ihrer aquatischen und terrestrischen Toxizität stark kritisiert und muss gemäß der „Farm to Fork“-Strategie der EU bis 2030 um 50 % reduziert werden (Europäische Kommission 2020). Um dieses Ziel zu erreichen, will die Europäische Kommission die mechanische Unkrautbekämpfung fördern. Die Bundesregierung Deutschlands verfolgt außerdem das Ziel, bis 2030 den Anteil ökologisch bewirtschafteter Fläche an der landwirtschaftlichen Gesamtfläche von rund 10 % im Jahr 2020 auf 30 % im Jahr 2030 zu erhöhen (BMEL 2021). Es ist zu erwarten, dass der vollständige oder teilweise Ersatz der Herbizidanwendung durch mechanische Unkrautbekämpfung zahlreiche positive oder negative Umweltauswirkungen auf ökotoxikologische Risiken, biologische Eigenschaften (Bodenbiota, Insekten, bodenbrütende Vögel, Kleintiere), bodenphysikalische Prozesse (Bodenverdichtung, Bodenerosion) und technologische Aspekte (Ressourcenverbrauch, Kohlenstoffbilanz) hat. Bislang sind diese Auswirkungen jedoch nicht untersucht worden.

1.2 Potenzielle Risiken mechanischer und kombinierter Unkrautbekämpfung

Die mechanische Unkrautbekämpfung zwischen den Zuckerrübenreihen erfolgt meist mit traktormontierten Hackmaschinen, die mit Gänsefuß- oder Winkelscharen ausgestattet sind, die in einer Tiefe von 3 bis 4 cm durch den Boden gezogen werden und das Unkraut abschneiden oder entwurzeln. Danach wird es entweder mit Boden bedeckt oder zum Austrocknen auf der Bodenoberfläche abgelegt (Parish 1990). Innerhalb der Reihen wird das Unkraut mit einer Handhacke entfernt. Durch das Hacken wird eine feinkrümelige, lockere Bodenoberfläche mit einer größeren spezifischen Oberfläche erzeugt als bei der chemischen Unkrautbekämpfung. Deshalb wurde die Hypothese aufgestellt, dass die mechanische Unkrautbekämpfung die Bodenerosion durch Wasser begünstigen könnte (Kunz et al. 2015). Obwohl diese Annahme bislang nicht durch experimentelle Daten gestützt wurde, gibt es mehrere Argumente, die für eine verstärkte Erosion nach dem Hacken sprechen. Da die Schare der Hacke die Bodenaggregate aufbrechen, ist zu erwarten, dass die Bodenpartikel mit niedrigerem Energieaufwand durch aufprallende Regentropfen oder Oberflächenabfluss abgelöst und transportiert werden können als bei ungestörtem Boden unter chemischer Unkrautkontrolle. Außerdem erhöht die vergrößerte spezifische Oberfläche nach dem Hacken den Kontakt der Bodenpartikel zur erosiven Kraft der Regentropfen. Darüber hinaus können vertikale Regenwurmgänge, die bei starken Regenfällen eine schnelle und tiefe Infiltration von Wasser ermöglichen, durch das Hacken blockiert werden, was die Infiltrationsrate senken und den Oberflächenabfluss und damit die Bodenerosion verstärken kann. Andererseits erleichtert die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche und der Bodenrauigkeit nach dem Hacken die Infiltration und verringert somit den Oberflächenabfluss (Thomsen et al. 2015). Das geringere Abflussvolumen würde wiederum zu einem geringeren Bodenabtrag führen (Cogo et al.

1984). Diese potenziell gegenläufigen Auswirkungen des Hackens auf die Bodenerosion machen Feldmessungen erforderlich, um die Nettoauswirkungen des Hackens auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion zu bestimmen.

Auch Bodenorganismen können durch das Hacken gefährdet werden. Die Schare können Regenwürmer und ihre Nachkommen, die in den obersten Bodenschichten leben, töten oder verletzen oder ihre Lebensräume zerstören. *Aporrectodea caliginosa*, eine in Ackerböden der gemäßigten Zone vorherrschende Art, bewohnt bekanntermaßen die oberen 15-20 cm des Bodens und kann daher durch Hacken gefährdet sein (Capowiez et al. 2021). Auch die Jungtiere der tiefgrabenden Art *Lumbricus terrestris* bewohnen die oberste Bodenschicht (Butt und Lowe 2007) und können ebenfalls durch Hacken gefährdet werden. Nach Boström et al. (1995) verringerte sich die Regenwurbiomasse unmittelbar nach einer rotierenden Bodenbearbeitung mit einer Arbeitstiefe von 7 cm im Grünland um 61-68 %, doch ein Jahr später erreichten die Gesamtbio-masse und die Regenwurmabundanz wieder die Ausgangswerte. Daher muss nicht nur die kurzfristige, sondern auch die langfristige Wirkung berücksichtigt werden, um die Resilienz einer Regenwurmpopulation gegenüber dem Hacken zu bewerten.

Für epigäische Raubarthropoden ist bekannt, dass mechanische Bodenbearbeitung ebenfalls Einfluss auf Populationen mancher Artengruppe haben kann (Thorbeck & Bilde 2004, Navntoft et al. 2016). Gleichzeitig gibt es Ergebnisse, die für einige Artengruppen keinen Einfluss der Bodenbearbeitung feststellen konnten (Lorenz 1994, Thorbeck & Bilde 2004). Es existierten allerdings keine Studien, die der vorliegenden Untersuchung direkt vergleichbar wären oder den Schadinsektenbefall einbeziehen.

Weitere potenzielle Risiken sind mit der Energieintensität und den Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) der mechanischen Unkrautbekämpfung verbunden. Die wesentlich geringere Flächenleistung der Maschinenhacke gegenüber der Feldspritze zur Herbizidapplikation führt zu einem höheren Dieserverbrauch, was wiederum zu einem höheren CO₂-Fußabdruck führt. Andererseits ist auch die Herstellung von Herbiziden energieintensiv. Daher müssen die gegenläufigen Effekte des Kraftstoffverbrauchs und der Herbizidproduktion berücksichtigt werden, um zuverlässige Schätzungen des Kohlenstoff-Fußabdrucks und des gesamten fossilen Energieverbrauchs für jedes Unkrautbekämpfungsverfahren zu erhalten.

Auch die Umsetzbarkeit mechanischer Unkrautbekämpfung muss evaluiert werden. In feuchtem Boden kann das Unkraut nur unvollständig ausgerissen werden und die Hackschare verstopfen rasch. Daher sollte überprüft werden, inwieweit auch in einem Jahr mit ungünstiger Witterung genügend Feldarbeitstage für die mechanische Unkrautkontrolle zur Verfügung stehen. Falls Regen nach dem Einsatz der Hacke fällt, können sich die ausgerissenen Unkräuter wieder verwurzeln. Dadurch wird der Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung verringert.

1.3 Gegenstand des Vorhabens, Ziele und Aufgabenstellung des Projekts

Das Projekt zielte auf eine Gesamtevaluierung der Umweltrisiken und Wirtschaftlichkeit mechanischer, chemischer und kombiniert mechanisch-chemischer Unkrautregulierungsverfahren. Durch Feldversuche auf Zuckerrübenslägen an mehreren Standorten in Niedersachsen sollten Bodenabtrag, Abundanzen von Regenwürmern, epigäischen Raubarthropoden und Schadinsekten sowie Wirkungsgrad der Unkrautkontrolle und Zuckerertrag für drei Unkrautbekämpfungsverfahren (mechanisch, chemisch kombiniert) quantifiziert werden. Für eine erweiterte Auswahl an relevanten Unkrautbekämpfungsverfahren in Zuckerrüben sollten außerdem Ressourcenverbrauch, Energieintensität und CO₂-Bilanz sowie Kosten, Zeitaufwand und Umsetzbarkeit berechnet werden. Außerdem sollten ökotoxikologische Risiken für die erweiterte Auswahl an Unkrautbekämpfungsverfahren mittels dem Modell SYNOPSIS-GIS berechnet und deutschlandweit bis auf Gemeindeebene

auf dem JKI Geoportal visualisiert und als öffentliche Webanwendung bereitgestellt werden. Alle Ergebnisse sollten in einer Technikfolgenabschätzung zusammengestellt werden. Abschließend sollten den multiplen potenziellen Umweltrisiken - Ressourcenverbrauch, Treibhausgasemissionen, Bodenerosion, Ökotoxizität und potenzieller Verlust an Bodenbiota - die multiplen wirtschaftlichen Risiken - Ertragsverlust, Kosten, Zeitaufwand und Anzahl ungeeigneter Feldarbeitstage - für verschiedene Unkrautbekämpfungsverfahren in Zuckerrüben standortspezifisch gegenübergestellt werden. Aufgrund dieser umfassender Technikfolgenabschätzung verschiedener Unkrautbekämpfungsverfahren können in Zukunft politische Entscheidungen bezüglich der Unkrautkontrolle für Zuckerrüben, aber auch für andere Reihenkulturen getroffen werden.

1.4 Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt war in 5 Arbeitspaketen (AP) organisiert. AP1 umfasste die Implementierung der Hacktechnik und Bandspritze in der Versuchstechnik des IfZ sowie die Grundbetreuung der Feldversuche durch das IfZ. AP2 umfasste die Erhebung boden- und pflanzenbezogener Basisdaten zur Bestimmung von Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung, N-Versorgung der Rübenpflanzen, Ertrag und Bodenerosion und wurde ebenfalls vom IfZ durchgeführt. AP3 beinhaltete die Erhebung von Basisdaten zur Biodiversität (Abundanz und Diversität von Laufkäfern, Kurzflüglern, Spinnen und Schädlingen durch JKI-A; Abundanz und Diversität von Regenwürmern durch das IfZ). Der überwiegende Teil der Arbeit in AP3 wurde vom JKI-A geleistet. AP4 umfasste die ökotoxikologische Risikobewertung und wurde vom JKI-SF geleistet. Dazu gehört 1) die Erstellung von Generischen Applikationsmustern in Zuckerrüben für sechs CEPI-Regionen in Deutschland basierend auf Erhebungen zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau (PAPA-Erhebungen, Roßberg et al. 2016), 2) die Berechnung des aquatischen und terrestrischen toxikologischen Risikos für chemische und kombinierte Unkrautbekämpfungsverfahren sowie 3) die Entwicklung einer Web-Anwendung zur Visualisierung der Ergebnisse. AP5 beinhaltete Ermittlung von Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Umsetzbarkeit verschiedener Verfahren durch das IfZ und die Erstellung der Technikfolgenabschätzung gemeinsam durch alle Projektpartner.

Drei methodische Ansätze kamen im Projekt zur Anwendung: 1) Feldversuche (AP2-3); 2) Modellrechnungen mit SYNOPSIS-GIS für die toxikologische Risikoschätzung (AP4) und 3) Berechnungen der Wirtschaftlichkeit- und Nachhaltigkeitskriterien (Ressourcenverbrauch, CO₂-Fußabdruck) mittels Literaturrecherche und bereits existierenden Web-Anwendungen (AP5).

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bodenerosion: Im Gegensatz zu der unter Landwirten und Wissenschaftlern weit verbreiteten Annahme, dass mechanische Unkrautkontrolle die Bodenerosion fördert (Kunz et al. 2015), zeigte die einzige Studie zu diesem Thema von Whitaker et al. (1973), dass verkrusteter schluffreicher Lehm-boden eines Maisfeldes in Missouri unter chemischer im Vergleich zu mechanischer Unkrautbekämpfung zwei- bis viermal so viel Oberflächenabfluss und vier- bis achtmal so viel Bodenabtrag aufwies. Gemessen wurden Oberflächenabfluss und Erosion über einen Zeitraum von vier Jahren bei natürlichen Regenereignissen. Vergleichbare Studien in Europa wurden bisher nicht durchgeführt. Es gibt aber indirekte Hinweise darauf, dass eine Erhöhung der Bodenrauhigkeit durch das Hacken die Infiltration fördert und somit den Bodenabtrag durch Wassererosion verringert (Cogo et al. 1984, Steichen 1984). Außerdem wurde berichtet, dass eine raue Oberfläche die Fließgeschwindigkeit von Wasser an der Oberfläche verringert (Mombini 2021), die Wiederablagerung von Partikeln in Vertiefungen erleichtert (Zhao et al. 2014) und die Erosivität von Regentropfen verringert (Helming et al. 1993).

Regenwürmer und Arthropoden: Marwitz et al. (2012) untersuchten Auswirkungen verschiedener Herbizidstrategien auf Regenwürmer unter verschiedenen Umweltbedingungen in Zuckerrüben. Es wurden keine nachteiligen Auswirkungen auf Regenwürmer festgestellt. Die Auswirkungen der mechanischen Unkrautbekämpfung auf Regenwürmer in Reihenkulturen wurden bisher noch nicht untersucht. Die Auswirkungen unterschiedlicher Herbizidintensitäten auf Laufkäfer in Zuckerrüben wurden von Fischer & Heimbach (2011) untersucht, wobei keine nachteiligen Effekte beobachtet wurden. Auswirkungen mechanischer Bodenbearbeitung auf epigäische Raubarthropoden wurden in verschiedenen Kulturen mit unterschiedlichen Geräten (Striegel, Egge, Hacke) erfasst (Lorenz 1994, Thorbek & Bilde 2004, Navntoft et al. 2016, Huusela-Veistola 1996, Baguette & Hance 1997), wobei in einigen Studien negative Auswirkungen auf Laufkäfer, Kurzflügelkäfer oder Spinnen festgestellt wurden. In Zuckerrüben wurden die Auswirkungen mechanischer Unkrautbekämpfung auf epigäische Raubarthropoden bisher noch nicht untersucht.

Toxikologische Risiken: Die Risiken verschiedener Herbizidanwendungen wurden mit dem Modell SYNOPS-GIS auf der Grundlage von Herbizidapplikationsdaten aus 2314 zufällig ausgewählten Zuckerrübenanbaubetrieben berechnet (Nause et al. 2021). Die Menge und Häufigkeit der Ausbringung von Herbiziden, die Standorteigenschaften und die Umweltbedingungen können das Umweltrisiko stark beeinflussen (Strassemeyer et al 2017). Durch eine Reduktion der Herbizid-Anwendungen aufgrund des Einsatzes von mechanischer Unkrautbekämpfung kann das Risiko für terrestrische und aquatische Ökosysteme reduziert werden. Das toxikologische Risiko der kombinierten mechanisch-chemischen Unkrautbekämpfungsverfahren wurde bisher jedoch nicht untersucht. Außerdem wurden regionale Unterschiede im toxikologischen Risiko des neuen Herbizids Conviso One bislang nicht bewertet.

Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen): Diese Parameter wurden für die ökologische Zuckerrübenproduktion unter Verwendung verschiedener mechanischer bzw. thermischer Unkrautbekämpfungsmethoden von Bručienė et al. (2021) bewertet. Allerdings wurden die Parameter nur für die Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen betrachtet. Für die Gesamtfläche in und zwischen den Reihen wurden Energieverbrauch und THG-Emissionen für chemische, kombinierte und mechanische Unkrautbekämpfungsverfahren bislang nicht durchgeführt.

Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung und Zuckerertrag: Diese waren bei verschiedenen kombinierten mechanisch-chemischen Unkrautbekämpfungsverfahren ebenso hoch wie bei der Flächenspritzung, wie Kunz et al. (2015) es für 5 Standorte feststellten. Nur die zeitgleiche Anwendung von Bandspritzung und Hacken reduzierte tendenziell die Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung im Vergleich zur getrennten Anwendung beider Techniken. Feldversuche mit Zuckerrüben auf humosen Böden im Vereinigten Königreich zeigten ebenfalls keine Ertragsunterschiede zwischen mechanischer, kombinierter und chemischer Unkrautbekämpfung (Wiltshire et al. 2003), aber die Effizienz der chemischen Unkrautbekämpfung war im Vergleich zu den anderen Methoden geringer.

Kosten und Zeitaufwand: Verschiedene kombinierte Unkrautbekämpfungsmethoden in Zuckerrüben im Vergleich zur Flächenspritzung wurden von Schrölkamp et al. (2015) untersucht. Die Flächenspritzung wies mit Abstand den geringsten Zeitaufwand, aber die höchsten Kosten im Vergleich zu den kombinierten Methoden auf. Kosten und Zeitaufwand der mechanischen Unkrautbekämpfung im Vergleich zu den anderen Unkrautbekämpfungsmethoden wurden noch nicht bewertet.

3 Material und Methoden

3.1 Feldversuche

Standorte und Versuchsablauf (IfZ + JKI-A)

Feldversuche auf Zuckerrübenfeldern wurden in den Jahren 2019-2021 an 5 Standorten bei Göttingen und 2 Standorten bei Braunschweig (Süd-niedersachsen, Deutschland, Tabelle 1) durchgeführt. Die durchschnittliche Tagestemperatur von April bis September lag bei 15-16 °C und der kumulierte Niederschlag für denselben Zeitraum zwischen 265 und 381 mm. Die Bodenart der Untersuchungsflächen war schluffiger Lehm in Göttingen und sandiger Lehm in Braunschweig. Auf jedem Feld wurden drei Unkrautbekämpfungsverfahren in vier Wiederholungen getestet: i) Hacken = 3x maschinelles Hacken zwischen den Reihen mit ca. ca. 30 cm breiten Gänsefußscharen und 3x manuelles Hacken innerhalb der Zuckerrübenreihen; ii) kombiniertes Hacken und Spritzen = 3x maschinelles Hacken zwischen den Reihen mit Gänsefußscharen und 3x Bandspritzung innerhalb der Zuckerrübenreihen; und iii) Spritzen = 3x Flächenspritzung von Herbizidmischungen. Insgesamt umfasste jedes Versuchsfeld 12 Parzellen mit einer Größe von jeweils 360-720 m² je nach Versuchsstandort. Die Behandlungen unterschieden sich nur in der Unkrautbekämpfungsverfahren; alle anderen Anbaumaßnahmen waren identisch. Die Vorfrucht war Winterweizen oder Wintergerste gefolgt von Gelbsenf als Zwischenfrucht. Ende März bis Anfang April wurde der Boden mit einem Grubber mit starren Zinken bis zu einer Tiefe von 12-15 cm gelockert, gefolgt von zwei Überfahrten mit einer leichten Zinkenegge zur Saatbettvorbereitung. Die Zuckerrüben wurden in Reihen parallel zur Hangneigung mit 45 cm Reihenabstand gesät. Der Zeitplan für die Feldarbeiten mit detaillierten Informationen zur Unkrautbekämpfung nach der Aussaat ist in Tabelle 1 aufgeführt. Die erste Unkrautbekämpfung wurde ca. einen Monat nach der Aussaat durchgeführt, die zweite und in den meisten Fällen auch die dritte Unkrautbekämpfung folgten im Abstand von zwei Wochen. Bei der kombinierten Behandlung wurde das Hacken zwischen den Reihen gleichzeitig mit dem Hacken in den Parzellen der mechanischen Behandlung durchgeführt; ebenso erfolgte das Spritzen in den Reihen zum gleichen Zeitpunkt wie das Spritzen in den Parzellen mit Spritzbehandlung.

Bodenerosion (IfZ)

Nach der Unkrautbekämpfung wurden auf einer Teilfläche von 2 m² innerhalb jeder Parzelle mit mechanischer und chemischer Unkrautbekämpfung, jedoch nicht in Parzellen mit kombinierter mechanisch-chemischer Unkrautbekämpfung, Versuche zur Regensimulation durchgeführt. Eine Beregnungsanlage mit Schwenkdüsen für mittelgroße Tropfen (VeeJet 80100, Spraying Systems Co., Wheaton, IL, USA) kam dabei zum Einsatz. An den Rändern der Beregnungsfläche wurde ein Metallrahmen 5 cm tief in den Boden geschoben, um den Abfluss zu einem Auslass am unteren Ende des Metallrahmens zu leiten. Das Wasser wurde aus 2 m Höhe über dem Boden mit einem konstanten Druck von 0,6 bar bzw. 1 bar durch die Schwenkdüsen gepumpt, um eine Regenintensität von 1 mm min⁻¹ bzw. 1,5 mm min⁻¹ zu simulieren. Die applizierte Regenmenge, Regenrate, Dauer sowie weitere Parameter der Regensimulationsläufe (Bodenfeuchte, Rüben- und Mulchdeckungsgrad) sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der Abfluss von der Beregnungsfläche wurde während der simulierten Regenereignisse in einminütigen Abständen in PET-Flaschen aufgefangen. In jeder Flasche wurden das Wasservolumen und das Sedimentgewicht im Labor bestimmt. Die statistische Datenauswertung erfolgte mit gemischten Modellen und ist in Fishkis & Koch (2023) beschrieben. Schließlich wurden der kumulative Oberflächenabfluss und der kumulative Bodenabtrag pro Hektar im Zeitraum von der Zuckerrübenaussaat bis zum Reihenschluss Mitte Juni mit Hilfe der Curve-Number-Methode des USDA-Soil Conservation Service (SCS 1972), täglichen Niederschlagsaufzeichnungen und der RUSLE-Bodenerosionsgleichung (Renard et al. 1997) vorhergesagt.

Tabelle 1: Standortcharakterisierung und Ablauf der Feldversuche.

Schlag Jahr	Sieboldshausen1 2019	Obernjesa 2019	Bühle1 2020	Sieboldshausen2 2020	Braunschweig1 2020	Bühle2 2021	Braunschweig2 2021
Abkürzung	Si19	Ob19	Bu20	Si20	Bs20	Bu21	Bs21
Koordinaten	51.484255, 9.893876	51.467520, 9.908575	51.6556954, 9.965638	51.476527, 9.874960	52.273795, 10.565082	51.646221, 9.975315	52.272892, 10.566836
Niederschlag Apr-Sep	381 mm	381 mm	265 mm	320 mm	251 mm	305 mm	381 mm
Ø T Apr-Sept	16 °C	16 °C	16 °C	15 °C	16 °C	15,5 °C	15 °C
Hangneigung %	5,7	3,2	8,9	0	1,6	9,5	3,5
Bodentextur	mittel toniger Schluff (Ut3)	stark toniger Schluff (Ut4)	mittel bis stark toniger Schluff (Ut3-Ut4)	mittel bis stark toniger Schluff (Ut3-Ut4)	sandiger Lehm (Ls)	mittel bis stark toniger Schluff (Ut3-Ut4)	sandiger Lehm (Ls)
Parzellengröße	24 m x 15 m	24 m x 15 m	18 m x 30 m	24 m x 30 m	22 m x 30 m	18 m x 30 m	22 m x 27 m
Vorfrucht	Wintergerste	Wintergerste	Winterweizen	Wintergerste	Kartoffel	Winterweizen	Kartoffel
Zwischenfrucht	Senf	Senf	Senf	Senf	Zwischenfrucht	Senf	Zwischenfrucht
Zeitplan für die Feldarbeit: (Daten sind als Monat/Tag angegeben)							
Grubber & Egge Pflug & Gubber	3/31-4/1	4/6	3/30-3/31	4/5-4/6	3/25-4/1	3/29-3/30	3/29-3/30
Zuckerrübenaussaat	4/1	4/8	3/31	4/6	4/2	3/30	3/30
1. Herbizidanwendung	5/7 1 L/ha Betanal Expert, 1,5 L/ha Goltix Titan	4/30 1 L/ha Betanal Expert, 1,5 L/ha Goltix Titan	5/5 1,25 L/ha Betanal maxxPro, 2 L/ha Goltix Titan	5/6 1,25 L/ha Betanal maxxPro, 2 L/ha Goltix Titan	4/14 1,25 Betanal maxxPro, 1,2 L/ha Goltix Titan, 0,3 L/ha Stemat, 0,1 L/ha PhFix5	5/10 1,5 L/ha Goltix Titan, 16 g/ha Debut, 2 L/ha Betasana sc	5/11 1,3 L/ha Belevedere Duo, 2 L/ha Goltix titan, 1 L/ha Access
1. Hacke	5/7	5/2	5/6	5/7	5/5-5/6	-----	5/25-6/2

2. Herbizid-anwendung	5/28 1,5 L/ha Goltix Titan, 1,25 L/ha Betanal maxxPro	5/15 1,5 L/ ha Goltix Titan, 1,25 L/ha Betanal maxxPro	5/19 1,5 L/ha Goltix Titan, 1,25 L/ha Betanal maxxPro	5/19 1,5 L/ha Goltix Titan, 1,25 L/ha Betanal maxxPro	5/13 1,25 Betanal maxxPro, 1,2 Goltix Titan, 0,3 l/ha Stemat, 0,1 L/ha PhFix5	5/24 1,25 L/ha Beetix SC, 20 g/ha Debut, 2 L/Betasana sc	6/2 1,3 L/ha Beveledere Duo, 2 L/ha Goltix Titan, 30 g/ha Debut
2. Hacke	5/28	5/15	5/26	5/25	5/18-5/19	5/25	6/7-6/9
3. Herbizid-anwendung	----- -	6/7 1,5 L/ha Metafol SC, 1 L/ha Betanal maxxPro	6/2 2 L/ha Goltix Titan, 1,3 L/ha Beveledere Duo	6/2 2 L/ha Goltix Titan, 1,3 L/ha Beveledere Duo	6/10 1,25 Betanal maxxPro, 1,2 Goltix Titan, 0,3 l/ha Stemat, 0,1 L/ha PhFix5	6/4 1,25 l/ha Beetix SC, 2 L/Betasana sc	6/15 1,3 L/ha Beveledere Duo, 2 L/ha Goltix Titan, 30 g/ha Debut
3. Hacke	----- --	6/4	6/4	6/8	6/9	6/9	6/14-6/24
Insektizide	6/14 300 g/ha Pirimax	6/14 300 g/ha Pirimax	5/20 300 g/ha Pirimax	5/20 300 g/ha Pirimax	----- -	-----	-----
Fungizide	8/1 1 L/ha Juwel 8/22 0,6 L/ha Duett Ultra+1,6 L/ha Bor	8/1 1 L/ha Juwel 8/22 0,6 L/ha Duett Ultra+1,6 L/ha Bor	7/3 1 L/ha Juwel 7/31 0,6 L/ha Duett Ultra 8/25 1,25 l/ha Domark	7/3 1 L/ha Juwel 7/30 0,6 L/ha Duett Ultra 8/25 1,25 L/ha Domark	----- -	7/20 0,6 L/ha Duett Ultra 8/20 1 L/ha Amistar Gold	-----
Ernte	10/30	10/28; 10/29	10/7; 10/8	10/9	10/12	10/6	10/20
Erhobene Datensätze	<ul style="list-style-type: none"> · Unkrautwirkungsgrad · N_{min} Boden, N Pflanze · Bodenabtrag · Regenwürmer · Insekten · Ertrag 	<ul style="list-style-type: none"> · Unkrautwirkungsgrad N_{min} Boden, N Pflanze · Bodenabtrag · Regenwürmer · Insekten · Ertrag 	<ul style="list-style-type: none"> · Unkrautwirkungsgrad N_{min} Boden, N Pflanze · Bodenabtrag · Regenwürmer · Insekten · Ertrag 	<ul style="list-style-type: none"> · Unkrautwirkungsgrad N_{min} Boden, N Pflanze · Bodenabtrag · Regenwürmer · Insekten · Ertrag 	<ul style="list-style-type: none"> · Insekten 	<ul style="list-style-type: none"> · Unkrautwirkungsgrad N_{min} Boden, N Pflanze · Bodenabtrag · Regenwürmer · Insekten · Ertrag 	<ul style="list-style-type: none"> · Insekten

Tabelle 2: Regensimulationsversuche: physikalische Daten und Umweltbedingungen. Das Hacken reduzierte den Mulchdeckungsgrad in den Versuchen O19_III, B21_II und B21_III signifikant, daher werden die Mittelwerte des Mulchdeckungsgrades für diese Versuche separat für Parzellen mit chemischer/mechanischer Unkrautbekämpfung angegeben. Bodenwassergehalt und Rübendeckungsgrad wurden durch die Unkrautbekämpfungsmethode nicht signifikant beeinflusst.

Standort_ Simulationslauf	Si19_I ^a	Ob19_I	Ob19_II	Ob19_III	Bu20_I	Bu20_II	Bu20_III	Bu21_I	Bu21_II	Bu21_III	Bu21_IV
Monat/Tag	5/29	6/5	6/6	6/12	5/14	5/28	6/9	6/1	6/11	6/22	7/8
Jahr	2019	2019	2019	2019	2020	2020	2020	2021	2021	2021	2021
Regendauer, min	20	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30
Regenrate, mm min ⁻¹	1.5	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1	1	1	1
Regenmenge, mm	30	20	20	20	30	30	30	30	30	30	30
Bodenwasser- gehalt, Vol-%	29	27	25	31	22	24	22	26	26	21	38
Mulchdeckungs- grad, %	19	13	13	16/11	9	9	8	15	16/11	16/9	13
Rübendeckungs- grad, %	33	37	38	61	14	20	56	10	43	0	0
Fahrspur	nein	nein	ja	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Bodenverkrustung	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	ja	nein	Nein

^[1]Die römischen Ziffern in den Bezeichnungen der Regensimulationsversuche bezeichnen die einzelnen Regensimulationsereignisse innerhalb eines Standortes.

Epigäische Raubarthropoden (JKI-A) und Schädlinge (JKI-A)

Im Projektzeitraum von 2019 bis 2021 fanden auf insgesamt sieben verschiedenen Versuchsstandorte entomologische Untersuchungen zur Erfassung von epigäischen Raubarthropoden und Schadinsekten statt. Dabei kamen verschiedene Insektenfangmethoden zum Einsatz, die aufgrund von arbeitstechnischen Gründen und Wetterverhältnissen in unterschiedlichen Zeiträumen durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurden in den Versuchsjahren 2020 und 2021 an allen Versuchsstandorten Prädationsversuche durchgeführt. Zusätzlich zu den Freilandversuchen wurden im Jahr 2021 in einer Klimakammer des Julius-Kühn-Instituts Präferenzversuche mit unterschiedlicher Bodenstruktur durchgeführt. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Erfassungsmethoden für die untersuchten Arthropodengruppen aufgeführt.

Photoektoren: Photoektoren erfassen den Schlupf von Insekten aus dem Boden bzw. die Anzahl Arthropoden auf einer definierten Fläche (0,25 m²). Die Kopfdose des Photoektors fängt die nach oben zum Licht wandernden, also positiv phototaktischen Arthropoden, während der zusätzliche Einsatz einer Barberfalle von 5 cm Durchmesser innerhalb des Photoektors die nicht positiv phototaktischen Arten erfasst. In jeder Parzelle wurde ein Photoektor in einer Reihe in der Parzellenmitte aufgestellt und wöchentlich um einen Meter versetzt (Abb. 1), da in den durch den Photoektor abgeschlossenen Bereich keine neuen Tiere einwandern können. Als Fangflüssigkeit wurde in der Kopfdose und Barberfalle Wasser mit einem Tropfen Spülmittel und Natriumbenzoat als Konservierungsmittel eingesetzt. Die Leerung erfolgte wöchentlich und die gefangenen Arthropoden wurden im Labor nach fünf Kategorien sortiert (Laufkäfer, Kurzflügelkäfer, Spinnen, Zuckerrübenschadinsekten, sonstige Arten). Photoektoren wurden in allen Jahren aufgestellt und ausgewertet.

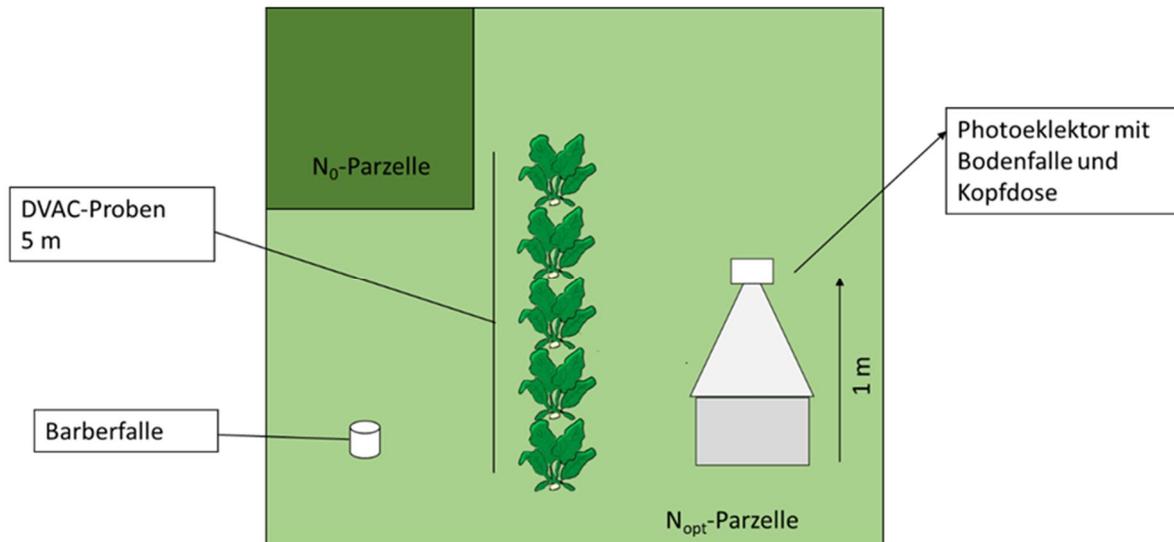


Abbildung 1: Fallenaufbau im Feld zur Untersuchung von Raubarthropoden.

Eco-VAC: Mit dem Eco-VAC-Insektensauger wurden in jeder Parzelle entlang eines Transsekts von 5 m Länge Arthropoden erfasst. Die Arthropoden wurden in einen Stoffbeutel gesaugt, der nach dem Fang im Labor bei -18°C eingefroren wurde. Später wurden die Arthropoden unter dem Binokular nach den fünf oben genannten Kategorien sortiert. Beim Absaugen wurde wöchentlich zwischen benachbarten Reihen gewechselt. Bei feuchten Beständen war aufgrund des Verklebens des eingesaugten Materials und daraus resultierender Beschädigungen der Arthropoden eine Anwendung dieser Methode nicht möglich. Daher bestehen hier keine durchgehenden Erfassungen.

Barberfallen: Nach Abschluss des Hackens wurden stationäre Barberfallen mit einem Durchmesser von 15 cm in den einzelnen Parzellen positioniert. Bei früherer Installation wären die Barberfallen während des Hackens zerstört worden. Die späte Aufstellung der Fallen war dennoch sinnvoll, weil die Beeinflussung der Bodenstruktur durch das Hacken auch nach der Hackperiode noch sichtbar war und somit ein Einfluss des Hackens auf die Bewegungen epigäischer Raubarthropoden in und zwischen den Versuchsvarianten auch nach Abschluss der Arbeiten auftreten kann. Die Fangflüssigkeit war dieselbe wie in den Photoelektroskopen (5 %ige Natriumbenzoatlösung, Spülmittel als Detergenz). Barberfallen liefern keinen direkten Flächenbezug, sondern erfassen die Aktivitätsdichte, da ihre Fängigkeit für verschiedene Arthropoden von der Laufaktivität und den Laufstrecken der unterschiedlichen Arten abhängig ist. Die Proben wurden im Labor nach taxonomischen Gruppen sortiert und ausgewertet. Barberfallen wurden in allen Versuchsjahren aufgestellt und ausgewertet.

Pflanzenentnahmen und Sichtbonituren: In den Jahren 2019 und 2020 wurde eine Pflanzenentnahme (7 Pflanzen je Parzelle) innerhalb von 14 Tagen vor dem ersten Hacken durchgeführt, um gegebenenfalls auftretende Schäden durch Moosknopfkäfer und andere Auflaufschädlinge zu erfassen. Es wurden nur Pflanzen im Parzellenkern entnommen und die äußersten zwei Reihen bzw. Pflanzen ausgespart, um Randeffekte zu vermeiden. Die Pflanzenbonitur sollte nach dem ersten Hacken fortgesetzt werden, aber die Pflanzen entwickelten sich so rasch, dass eine Erfassung nach dem ersten Hacken nicht mehr sinnvoll war. Im Jahr 2021 wurde aufgrund der sehr schnellen Pflanzenentwicklung von Beginn an darauf verzichtet.

Die Sichtbonitur beinhaltete die visuelle Erfassung von Schäden und Schaderregern an den Pflanzen. Erfasst wurden die Anzahl der Blattläuse und andere für die Rübe typische

Schadinsekten. Die Sichtbonitur erfolgte gemäß den EPPO-Standards 2006 PP1/250(1) und 2013 PP1/228(2). In allen Versuchsjahren wurden Sichtbonituren auf allen Versuchsstandorten durchgeführt.

Prädationsversuche: Zusätzlich zu den im Projekt geplanten Feldversuchen wurde in den Jahren 2020 und 2021 in Modellversuchen untersucht, ob die Prädationsleistung durch die mechanische Unkrautkontrolle im Vergleich zur chemischen Unkrautkontrolle beeinflusst wurde. Die Prädation wurde mit Blattlauskarten („aphid cards“, Erbsenblattlaus *Acyrtosiphon pisum*) und Raupenattrappen („caterpillar dummies“ aus Plastilin) überprüft.

Für die Blattlauskarten wurde Schleifpapier (C353, Bosch, P400) in den Maßen 11,5 cm x 14,0 cm in der Hälfte gefaltet. Auf die raue innenliegende Seite wurden sechs Erbsenblattläuse geklebt (Abb. 2a). Die Blattlauskarten wurden maximal zwei Tage vor Ausbringung im Feld erstellt und eingefroren, damit die benötigte Anzahl vorab vorbereitet werden konnte. Pro Parzelle wurden zwei Blattlauskarten eingesetzt.

Für die Raupenattrappen wurde handelsübliche grüne Knetmasse (Becks Plastilin, Gomaringen, Deutschland) in die Form einer Raupe (Länge 2 cm, Dicke 0,5 cm) gebracht. Die Raupenattrappe wurde auf einem Schleifpapier mit einer Stecknadel fixiert und jeweils zwei Raupenattrappen pro Parzelle ins Feld gesteckt. Um Prädation durch Vögel zu vermeiden, wurde eine umgedrehte Bellaplastschale als Schutz in ca. 10 cm Höhe über die Raupenattrappen positioniert (Abb. 2b). Eine Überwachung der Raupenattrappen mit einem Kamerasystem wurde zusätzlich geprüft. Eine Auswertung dieses Videomaterials war nicht möglich, da der Großteil der Aufnahmen durch vom Wind bewegte Pflanzenteile ausgelöst wurde.

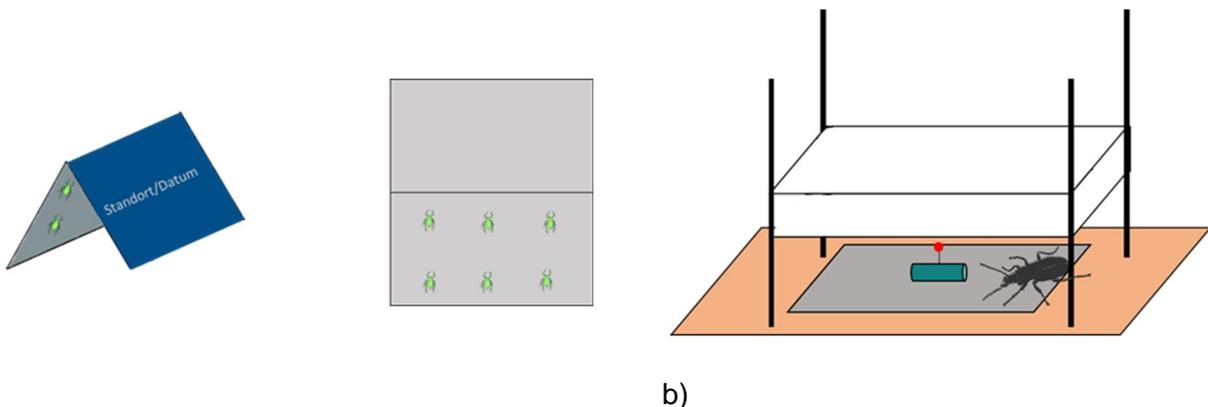


Abbildung 2: Schema des Aufbaus a) der Blattlauskarten und b) der Raupenattrappen.

Die Blattlauskarten wurden jeweils nach drei Tagen ausgewertet, während die Raupenattrappen für sieben Tage im Feld blieben, da bei den Raupenattrappen eine geringere Austrocknungsgefahr als bei den Blattlauskarten bestand und die Prädation an den Raupenattrappen geringer war. Diese Versuche wurden 2021 durch einen Masterstudenten der Georg-August-Universität Göttingen betreut, dessen Abschlussarbeit Ergebnisse aus diesen Versuchen beinhaltet. Der Zeitraum der Probeentnahme wurde im Jahr 2021 erweitert, da es sich im Jahr 2020 gezeigt hatte, dass auch nach Juli weiterhin Prädatoren aktiv waren.

Präferenzversuche: Mittels der Präferenzversuche sollte geklärt werden, ob Laufkäfer eine Präferenz für die ursprüngliche Bodenstruktur oder für die durch das Hacken bis in mehrere Zentimeter Tiefe veränderte Bodenstruktur zeigen. Eine Präferenz für letztere könnte zum Beispiel durch bessere Versteckmöglichkeiten in der durch das Hacken aufgelockerten Bodenoberfläche bedingt sein. In diesen Versuchen wurden die Laufkäferarten *Poecilus cupreus* (Bezugsquelle: BTL Bio-Test-Labor GmbH, Thünenplatz 1, 18190 Sanitz) und *Harpalus affinis*, *Pseudophonus rufipes*, *Bembidion tetracolum*, *Amara* spp., und *Pterostichus melanarius* (Wildfänge) eingesetzt.

Die beiden Bodeneigenschaften wurden im Labor durch Aufrauen mit einer Handhacke und durch Glätten mit einem Löffel hergestellt (Abb. 3). Die unterschiedlichen Bodenoberflächen waren angelehnt an die Bedingungen im Feld direkt nach der chemischen und mechanischen Unkrautkontrolle.



Abbildung 3: Im Labor hergestellte Bodenstruktur für die Präferenzversuche.



Abbildung 4: Auf dem Feld (Braunschweig) direkt nach der Unkrautbekämpfung fotografierte Bodenstruktur (links Flächenspritzung (H); rechts Hacke in und zwischen den Reihen (H)).

Es wurde angestrebt, ein den Feldbedingungen vergleichbares Aggregat- und Fragmentgefüge zu schaffen (Abb. 4). Für die Präferenzversuche wurde Boden (3,25 kg) vom Versuchsfeld in Braunschweig entnommen und in zehn Pflanzschalen (Bodenfläche 39 cm x 59 cm) verteilt. Bei der kleinen Art *B. tetracolum* wurden anstelle der Pflanzschalen verschließbare Bellaplastschalen (Bodenfläche 11 cm x 16 cm) verwendet, da diese Art sehr mobil und flugfähig ist. In den Pflanzschalen wurde der Boden mit 700 ml Wasser versetzt und glattgestrichen, um eine ebenmäßige Oberfläche zu schaffen. Bei Verwendung der Bellaplastschale wurde entsprechend weniger Material eingesetzt. Nachdem das Wasser nach zwei Tagen größtenteils evaporiert war, wurde die eine Hälfte der Fläche mit einem Löffel angeraut, während die andere Fläche nicht bearbeitet wurde (Abb. 3). Die Laufkäfer, welche zuvor zwei Tage nicht gefüttert worden waren, wurden in die Mitte der Pflanzschale bzw. Bellaplastschale gesetzt. Nach einer Eingewöhnungszeit von einer Stunde wurde die Position der Laufkäfer fünfmal im stündlichen Abstand erfasst.

Statistische Auswertung der Arthropodendaten: Die statistische Datenauswertung wurde mit dem Softwarepaket R durchgeführt. Die Gesamtanzahl der Kurzflügelkäfer 2019, Spinnen 2020, Laufkäfer 2021, Schädlinge 2021 und die Daten der Prädationsversuche wurden mittels glmmTMB analysiert. Post-hoc Tests wurden mit dem Tukey-Test (emmeans) durchgeführt. Die Graphen wurden mit ggplot2 erstellt.

Regenwürmer (IfZ)

Im Oktober, kurz vor der Zuckerrübenenernte, wurden Regenwürmer ausgetrieben, um deren Abundanz und Diversität zu ermitteln. Die Blätter von zwei benachbarten Rüben in derselben Reihe wurden entfernt und ein Metallrahmen mit einer Fläche von 0,5 m × 0,5 m so positioniert, dass sich zwei Rüben in gegenüberliegenden Ecken des Rahmens befanden. Der Rahmen wurde einige Zentimeter in den Boden gedrückt und mit Erde fixiert. Fünf Liter einer 0,2%igen Formalinlösung (wässriger Formaldehyd) wurden mit einer Gießkanne gleichmäßig auf die Bodenoberfläche innerhalb des Rahmens aufgetragen. Die an der Bodenoberfläche aufkommenden Regenwürmer wurden 15 Minuten lang eingesammelt, dann wurde der Vorgang wiederholt. Dies wurde an 4 Stellen innerhalb jeder Parzelle durchgeführt. Die gesammelten Regenwürmer wurden anhand des Vorhandenseins eines Clitellums in adulte und juvenile Tiere unterteilt und anschließend gezählt und anhand des taxonomischen Schlüssels von Herr & Bauchhenß (1987) auf Art-niveau bestimmt. Die Abundanz jeder Regenwurmart aus den 4 Probenahmeflächen jeder Parzelle wurde aufsummiert. Für die weitere Auswertung wurden die Arten in die endogäische oder anektische ökologische Gruppen zusammengefasst. Epigäische Regenwürmer kamen auf unseren Feldern nicht vor. Die Auswirkungen der Behandlung, des Standorts und deren Interaktion auf die Abundanz der endogäischen und anektischen Tiere, getrennt für Adulte und Jungtiere wurden durch gemischte Modelle unter Berücksichtigung eines zufälligen Blockeffekts überprüft. Die Modellkoeffizienten wurden mit REML angepasst und ein F-Test wurde verwendet, um die Signifikanz der Behandlungseffekte zu bewerten. Die Modellannahmen wurden durch Shapiro-Wilk- und Levene-Tests überprüft.

Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung, Rüben- und Zuckerertrag (IfZ)

Unkrautbonituren wurden jeweils vor und nach der Unkrautkontrolle durchgeführt. Dabei wurden die Unkräuter separat in der Reihe und zwischen den Reihen aufgezählt und der Mulchdeckungsgrad bestimmt. Zusätzlich wurde eine Unkrautbonitur im Juli durchgeführt, um die Restverunkrautung zu bestimmen. In 2019 wurden die Unkraut- und Mulchdeckungsgradbonituren an 6 Stellen in jeder Parzelle mit einem 0.25 m²-großen Boniturrahmen durchgeführt, so dass die Unkräuter insgesamt auf 1.5 m² pro Parzelle erfasst wurden. In den Jahren 2020 und 2021 wurden Unkräuter in 2 Reihen pro Parzelle bonitiert (16 m² bzw. 21.6 m² pro Parzelle). Der Mulchdeckungsgrad wurde in den Jahren 2020 und 2021 an 6 Stellen pro Parzelle wie 2019 bestimmt. Der Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung (WG) wurde mit 2 Verfahren berechnet:

$$WG1 = \frac{100 \times (vor_nNAK - nach_nNAK)}{vor_nNAK} \quad [1]$$

$$WG2 = \frac{100 \times ((vor1NAK + vor2NAK + vor3NAK) - Restverunkrautung)}{(vor1NAK + vor2NAK + vor3NAK)} \quad [2]$$

NAK Nachaufaufbehandlung

Die Blatt- und Rübenenernte erfolgten in Oktober (Tab. 1). In Si19, Ob19 und Si20 wurden die Rüben von 10.8 m² pro Parzelle, in Bu20 und Bu21 von 8.1 m² pro Parzelle geerntet. Zunächst wurden die Rüben der Erntefläche gezählt, danach wurden die Rüben per Hand geköpft und anschließend maschinell gerodet. Blatt- und Rübenenertrag wurde mittels Waage bestimmt, die Rüben gewaschen und nach der Wiegung zu Rübenbrei verarbeitet, eine Teilprobe des Blattes zu Mus zerkleinert. Der Trockensubstanzgehalt von Blatt und Rübenbrei wurde durch Ofentrocknung bei 105 °C bestimmt. Der Rübenbrei wurde nach Schockgefrierung und Lagerung bei -18 °C auf Zucker-, K-, Na- and Amino-N-Gehalt analysiert (ICUMSA, 2007).

3.2 Ökotoxikologische Risikobewertung mittels SYNOPSIS-GIS (JKI-SF)

Die Analyse der Umweltrisiken durch die Anwendung von Herbiziden wurde mit dem Modell SYNOPSIS-GIS mit folgenden Schritten durchgeführt.

- ∅ Entwicklung von generischen Applikationsmustern (GAM) der Pflanzenschutzbehandlungen im Zuckerrübenanbau für drei Intensitätsstufen in den Jahren 2011 - 2018.
- ∅ Zufallsverteilung der Kulturart Zuckerrübe auf die ATKIS Feldblöcke gemäß den Kulturartenanteilen in den Gemeinden im Jahr 2016 in Deutschland.
- ∅ Berechnung des Wirkstoffeintrags über Spraydrift, Runoff (Oberflächenabfluss) und Erosion in Oberflächengewässern aus den einzelnen Anwendungen gemäß der generischen Applikationsmuster auf diesen Feldblöcken in den Jahren 2011 - 2018.
- ∅ Ermittlung des akuten und des chronischen ökotoxikologischen Risikos für terrestrische und aquatische Nichtzielorganismen als Maximalwert aus den einzelnen Risikoindizes (ETR, Exposure Toxicity Ratio) für verschiedene Indikatororganismen in den modellierten Jahren.
- ∅ Räumlich zusammengefasste Auswertung der Risikoindizes über alle Feldblöcke in Deutschland.

Methoden der räumlichen Risikoanalyse: Räumliche Datengrundlage für die hier durchgeführten Risikoanalysen mit dem Modell SYNOPSIS-GIS sind die Feldblöcke mit Ackerkulturen aus ATKIS (AdV 2008, 2015). Die Geometrien der ATKIS Feldblöcke werden mit weiteren digitalen Datensätzen wie digitaler Bodenkarte und digitalem Höhenmodell und Informationen zu Oberflächengewässern verschnitten, um die Eingangsparameter der SYNOPSIS-Modellierung abzuleiten. Für die Risikoberechnungen werden je Jahr und Kultur drei generische Applikationsmuster (niedrig, mittel, hoch) aus den PAPA-Erhebungen der Jahre 2011 bis 2018 abgeleitet und den Zuckerrübenflächen randomisiert zugewiesen. Mit diesem Datensatz kann SYNOPSIS-GIS schlagspezifisch analysieren, welche akuten und chronischen Risiken für aquatischen und terrestrischen Ökosysteme durch den Eintrag von Wirkstoffen entstehen. Die so berechneten Risikoindizes können für die einzelnen Jahre zusammengefasst oder räumlich aggregiert werden.

Untersuchungsregionen und Datenbasis: Die Datengrundlage sind die Feldblöcke, die Gewässergeometrien basieren auf dem ATKIS-Basis-DLM (ATKIS). Die Zuordnung der Kultur Zuckerrübe zu den ATKIS-Feldblöcken basiert auf Daten zu den Anbaustatistiken von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen auf Gemeindeebene. Die zufällige Verteilung der Kulturarten erfolgt dabei je Gemeinde, wobei die Information zu den Anbauverhältnissen dem Thünen-Agraratlas (Gocht & Röder, 2014) entnommen wurden. Bei der Verteilung der Anbaukulturen wurden Bodenkennzahlen und Schlagflächen berücksichtigt.

Durch Verschneidung mit weiteren Geodaten können die Lage und Nachbarschaften der landwirtschaftlich genutzten Flächen (Feldblöcke) zu Nichtzielflächen und zu anderen relevanten Strukturelementen in der Agrarlandschaft (Gewässer, Wege, Gehölze etc.) analysiert werden. Zum Beispiel wird durch Verschneidung der Schlaggeometrien mit den ATKIS-Gewässern die Entfernung zu einem oder mehreren Oberflächengewässern sowie der Gewässertyp und die Breitenklasse des betreffenden Gewässers ermittelt. Zusätzliche GIS-Prozeduren ermöglichen es, die digitale Bodenkarte BÜK1000N (BGR 1996) für die Beschreibung der Bodenparameter sowie das digitale Geländemodell DGM-10 (BKG 2016) für die Beschreibung des Reliefs der Landschaft mit den Schlaggeometrien zu verknüpfen. Im Ergebnis werden feldbezogene Bodenparameter und die Hangneigungen der einzelnen Flächen abgeleitet.

Neben den Feldblock-Geometrien sind weitere räumliche Informationen erforderlich. Für die zufällige Verteilung der Anbaukulturen auf Gemeindeebene wurde eine Zuordnung der Feldblöcke zu den Gemeinden in Deutschland (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2004)

durchgeführt. Weitere räumliche Zuordnungen zu Landkreisen, Gewässereinzugsgebieten (UBA 2004) oder Bodenklimaräumen (Rossberg et al. 2007) sind verfügbar, um eine Aggregation der flächenspezifischen Risikoindizes für verschiedene Raumgliederungen zu ermöglichen. Als klimatische Modelleingangsgrößen werden die Tageswerte zu Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Wind von ca. 280 Klimastationen und 2800 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2016) verwendet. Diese Daten wurden auf ein 1 km x 1 km-Raster interpoliert und anschließend den einzelnen Schlägen zugeordnet.

Die Information zu den Wirkstoffgehalten und den Anwendungsaufgaben der eingesetzten Pflanzenschutzmittel (PSM) erfolgte über die Verknüpfung mit der online-Datenbank der zugelassenen Pflanzenschutzmitteln des BVL (BVL 2019). Dabei wurden die Anwendungsaufgaben in Bezug auf (i) die einzuhaltenden Mindestabstände zu Oberflächengewässern und (ii) die Runoff-Minderung auf Flächen mit Hangneigung >2% bzw. >4% der Datenbank entnommen und bei der Risikoanalyse berücksichtigt. Die toxikologischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften der PSM-Wirkstoffe werden der online verfügbaren Pesticide Property Database (PPDB) entnommen (Lewis et al. 2016). Beide Datenbanken werden im Abstand von drei Monaten aktualisiert.

Ableitung der generischen Anwendungsmuster aus der PAPA-Erhebung: Für die Berechnungen wurden generische Applikationsmuster (GAM) für die Zuckerrübe basierend auf den PAPA-Erhebungen der Jahre 2011 - 2018 erzeugt. Seit dem Jahr 2011 werden vom Julius-Kühn-Institut in Zusammenarbeit mit landwirtschaftlichen Fachverbänden jährlich Erhebungen zur Anwendung von PSM in der Praxis (PAPA) in neun Pflanzenschutz-relevanten Hauptkulturgruppen im Ackerbau in Deutschland durchgeführt (Rossberg 2016). Die Originaldaten der PAPA-Erhebung können aufgrund vertragsrechtlicher Gründe nicht direkt genutzt werden. Daher wurde eine Methode entwickelt, um allgemeingültige (generische) Applikationsmuster für die ausgewählten Anbaukulturen aus den Originaldaten abzuleiten.

Die PAPA-Erhebungsdaten wurden regional auf Basis der sechs CEPI-Regionen (Dachbrodt-Saaydeh et al. 2019) ausgewertet (Abb. 5). Ziel war es, drei Anwendungsmuster für jedes der Jahre 2011 - 2018 in jeder CEPI-Region zu generieren. Diese drei Anwendungsmuster entsprechen drei Spritzfolgen mit einer hohen, einer mittleren und einer niedrigen PSM-Intensität, welche für diese Kulturen die übliche landwirtschaftliche Praxis in Deutschland darstellen. Die Bewertung der PSM-Intensität basierte auf dem Behandlungsindex (BI), der die Anzahl der PSM-Anwendungen im Verlauf einer Anbauperiode standardisiert auf die maximal zugelassene Anwendungsrate je Applikationsmuster zusammenfasst (Gleichung 3).

$$BI = \sum_{i=1}^n \frac{AR_i * Ab_i}{rRAR_i * A} \quad [3]$$

wobei i die i -te Anwendung, n die Gesamtzahl der Anwendungen auf einem Schlag, Ab_i die behandelte Fläche [ha], A die Fläche des Schlages [ha], AR_i die tatsächliche Anwendungsrate [kg ha⁻¹] und $rRAR_i$ die maximal zugelassene Anwendungsrate [kg ha⁻¹] ist.

Die Ermittlung der generischen Applikationsmuster erfolgte in vier Schritten.

Schritt 1: Festlegung der Anzahl der PSM-Anwendungen pro Vegetationsperiode auf der Basis der kulturspezifischen Anzahl der PSM-Behandlungen. Hierbei wurden drei Intensitätsstufen definiert. Die erfassten Applikationsmuster wurden entsprechend dem BI in drei Gruppen unterteilt:

- hohe Intensität: BI ≥ 66-Perzentil
- mittlere Intensität: 66-Perzentil > BI ≥ 33-Perzentil
- niedrige Intensität: BI ≤ 33-Perzentil.

Alle PSM-Anwendungen wurden entsprechend des BI einer der drei Intensitätsstufen zugeordnet. Die Schritte 2 bis 4 werden dann für jede Kombination aus Kultur/CEPI-Region/Intensitätsstufe separat durchgeführt.

Schritt 2: Festlegung der Zeiträume (Kalendermonate) für die einzelnen Anwendungen. Für jeden der drei Wirkstoffbereiche - Herbizide, Fungizide und Insektizide - werden die Anwendungen in den einzelnen Monaten gezählt. Die Monate mit den häufigsten Anwendungen werden als Anwendungszeiträume definiert.

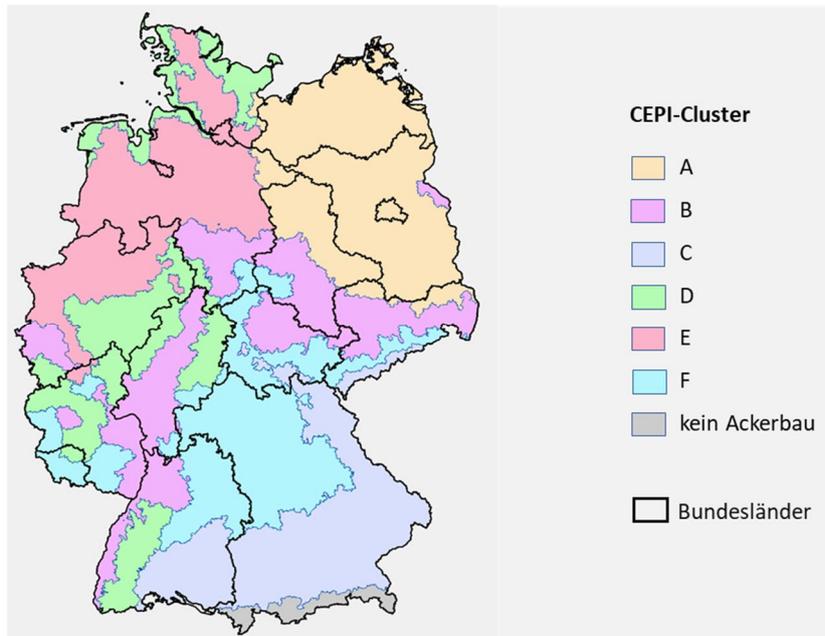


Abbildung 5: Cluster für die regionale Erhebung und Analyse der Pflanzenschutzintensität (CEPI) im Ackerbau in Deutschland (Dachbrodt-Saaydeh et al. 2019).

Schritt 3: Auswahl der am häufigsten eingesetzten PSM für die in Schritt 1 und 2 festgelegten Anwendungen entsprechend der erfassten Applikationen in den PAPA-Datenbanken. Auch Tankmischungen werden einbezogen. Die am häufigsten applizierten PSM bzw. Tankmischungen werden ausgewählt. Bei der Festlegung der Anwendungstermine wird ähnlich vorgegangen. Zunächst wird der häufigste Behandlungstermin pro Jahr gewählt. Als nachfolgender Behandlungstermin wird dann der nächsthäufige mit einem Mindestabstand von 7 Tagen genommen. Als Aufwandmenge wird der Modalwert der Aufwandmengen des ausgewählten PSM angenommen (bzw. der jeweiligen Aufwandmengen der Tankmischungspartner). Als behandelte Fläche dient der Modalwert der behandelten Fläche.

Schritt 4: Überprüfung der generierten Spritzfolgen hinsichtlich des BI, ob dieser den mittleren Werten der Intensitätsstufen für die CEPI-Region entspricht. Ist das nicht der Fall und die Differenz zum Ziel-BI ist größer als 0,5, dann werden im Schritt 2 andere oder zusätzliche PSM-Anwendungen ausgewählt und die Schritte 3 und 4 erneut durchlaufen.

Mithilfe einer JKI-internen Web-Anwendung wurde die Erzeugung generischer Applikationsmuster (halb-)automatisiert und der Grad der Reproduzierbarkeit damit erhöht. Darüber hinaus erhält der Anwender durch einen integrierten Plausibilitätstest Hinweise auf Überdosierungen (Aufwandmenge >100 % der zugelassenen Aufwandmenge) und geringe Aufwandmengen (<5 % der zugelassenen Aufwandmenge). Dies bietet Ansatzpunkte für die weitere Plausibilitätsprüfung, bei der die Sinnhaftigkeit der generischen Applikationsmuster durch den Vergleich mit den

Pflanzenschutzhinweisen der Pflanzenschutzdienste und der Zulassungssituation für PSM abgeglichen und, wenn nötig, korrigiert wird. Dabei werden die herbiziden Aufwandmengen der generischen Applikationsmuster mit den maximal zugelassenen Aufwandmengen verglichen und ggf. in Abhängigkeit von der Indikation angepasst. Die Aufwandmengen von Tankmischungspartnern werden mit den Pflanzenschutzempfehlungen der Pflanzenschutzdienste verglichen und ggf. angepasst. Abschließend wurden die generischen Applikationsmuster von Experten des Instituts für Zuckerrübenforschung und der Zuckerwirtschaft auf Plausibilität geprüft. In Tab. 3 ist das generische Applikationsmuster für die CEPI-Region D im Jahr 2018 beispielhaft gezeigt.

Tabelle 3: Generisches Applikationsmuster von Herbiziden für 3 Intensitätsstufen für die CEPI-Region D im Jahr 2018.

Datum	Herbizid	Anwendungsrate (kg ha ⁻¹)	Intensitätsstufe
2018-04-24	Betanal MAXXPRO	0,8	1
	DEBUT	0,015	1
	GOLTIX TITAN	1,7	1
2018-05-09	Betanal MAXXPRO	0,8	1
	DEBUT	0,015	1
	GOLTIX TITAN	1	1
2018-05-24	Betanal MAXXPRO	0,8	1
	Metafol SC	2,3	1
2018-04-16	Betanal MAXXPRO	0,8	2
	Betasana SC	1,25	2
	Metafol SC	1,25	2
2018-04-27	Betanal MAXXPRO	0,8	2
	DEBUT	0,02	2
2018-05-15	Betanal MAXXPRO	0,8	2
	DEBUT	0,02	2
	GOLTIX TITAN	1	2
2018-05-25	DEBUT	0,02	2
	Goltix Gold	1,5	2
	GOLTIX TITAN	1	2
2018-04-23	Belvedere Extra	1,25	3
	GOLTIX TITAN	2	3
2018-05-06	Betanal MAXXPRO	2	3
	GOLTIX TITAN	2	3
2018-05-18	Belvedere Extra	1,25	3
	Betanal MAXXPRO	2	3
	DEBUT	0,02	3
	Goltix Gold	2	3
	GOLTIX TITAN	2	3
	LONTREL 600	0,05	3
	STEMAT	0,5	3

Methodik der Risikoabschätzung auf Schlagebene: Das ökotoxikologische Risiko für Referenzorganismen wird mit dem *Exposure Toxicity Ratio* (ETR) ausgedrückt. Dies ist das Verhältnis der *Exposition* der Referenzorganismen mit PSM-Wirkstoffen unter worst-case-Bedingungen und der *Toxizität* dieser Wirkstoffe für diese Organismen.

$$\text{ETR} = \frac{\text{Exposition}}{\text{Toxizität}} \quad [4]$$

Die Methodik zur Berechnung des Umweltrisikos und der der Wirkstoffkonzentrationen im Gewässer sind in Strassemeyer et al. (2017) ausführlich dargestellt. Im Folgenden werden die wesentlichen Methoden zur Berechnung des Risikos in Oberflächengewässern zusammengefasst.

Die geschätzte PSM-Exposition von Nichtzielorganismen im Gewässer wird für PSM-Einträge über Spraydrift, Runoff (Oberflächenabfluss) und Erosion unter sogenannten worst-case-

Bedingungen berechnet. Dafür wird die Beladung (Exposition) der einzelnen Gewässerabschnitte von jeweils 100 m Länge durch Wirkstoffe (W) für jede Anwendung und für jedes Expositionsereignis eines Wirkstoffs einzeln ermittelt. Aus den Konzentrationsverläufen (PEC, predicted environmental concentration) der Einzelereignisse wird anschließend der Verlauf der zu erwartenden Wirkstoffkonzentration über ein Jahr in den Gewässerkompartimenten aggregiert. Beginnend mit dem Start der Vegetationsperiode werden innerhalb eines Zeitraums von einem Jahr zwei Risikoindikatoren berechnet:

„ 90-Perzentil des PEC-Verlaufs (PEC_{P90} , Gleichung 5) als worst-case-Wert der akuten Exposition

$$PEC_{P90} = \underset{1 \leq t \leq 365}{P90} PEC(t) \quad [5]$$

„ 90-Perzentil der zeitlich gewichteten Durchschnittskonzentration (time weighted average, TWA) von sieben Tagen ($PEC_{TWA.P90}$, Gleichung 6) als worst-case-Wert der chronischen Exposition

$$PEC_{TWA.P90} = \underset{1 \leq t \leq 365}{P90} PEC_{TWA}(t) \quad \text{wobei} \quad PEC_{TWA}(t) = \frac{\int_{t-7}^t PEC(t)}{7} \quad [6]$$

Zur Beschreibung der **Toxizität** wurden die halbmaximale letale Konzentration (LC_{50}) bzw. Effektkonzentration (EC_{50}) und die No-Effect-Konzentration (NOEC) der einzelnen Wirkstoffe verwendet. Zur Beschreibung der akuten und chronischen Toxizität werden LC_{50} bzw. EC_{50} und NOEC der einzelnen Wirkstoffe verwendet.

Für die einzelnen Referenzorganismen (RO ; s.u.) werden aus den Expositions- und Toxizitätswerten ein **akuter Risikoindex** ($ETR_{A(RO,W)}$, Gleichung 7) und ein **chronischer Risikoindex** ($ETR_{C(RO,W)}$, Gleichung 8) berechnet. Akute Risikoindizes werden nach Konvention mit einem Sicherheitsfaktor von 10 multipliziert.

$$ETR_{A(RO,W)} = \frac{PEC_{P90}}{LC50/LR50/EC50_{(RO,W)}} * 10 \quad [7]$$

$$ETR_{C(RO,W)} = \frac{PEC_{TWA.P90}}{NOEC_{(RO,W)}} \quad [8]$$

Die Gleichungen 7 und 8 charakterisieren das Risiko eines Wirkstoffs für die aquatische Lebensgemeinschaft, der auf einer bestimmten Fläche ausgebracht wird und nachfolgend über Spraydrift, Runoff und/oder Erosion in einen Gewässerabschnitt von 100 m Länge gelangt. Die hier berechneten Risikowerte beziehen sich also immer auf Einträge durch PSM-Anwendungen auf einer einzelnen Fläche.

In der Zuckerrübe werden zur Unkrautbekämpfung mit Herbiziden typischerweise mehrere Mittelkombinationen zu mehreren Terminen eingesetzt (siehe Tab. 3). Wirkstoffe mit identischen oder unterschiedlichen Wirkmechanismen können additiv zusammenwirken und synergistische Effekte erzielen, die größer sind als die individuellen Effekte der einzelnen Wirkstoffe. Die akuten und chronischen Risikoindizes der einzelnen Wirkstoffe bzw. einzelnen Anwendungen werden daher nach dem Konzept der Konzentrationsaddition aggregiert, um das Risiko über die gesamte Pflanzenschutzstrategie (mehrere Wirkstoffe und/oder mehrere Anwendungen) zu erfassen. Im Gegensatz zu der Modellbeschreibung in Strassemeyer et al. (2017), wird das Konzept der Konzentrationsaddition in dieser Untersuchung auch für das akute Risiko angewandt.

Die Risikoaggregation eines Applikationsmusters erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die akuten (Gleichung 7) und chronischen (Gleichung 8) Risikowerte für jeden angewandten Wirkstoff berechnet und auf täglicher Basis addiert, um die Jahres-Kurven der ETR -Summen abzuleiten.

Anschließend wird das 90-Perzentil dieser *ETR*-Summenkurven abgeleitet, welches das akute und chronische Risiko der gesamten Anwendungsstrategie darstellt (Gleichung 9 und 10).

$$ETR_{A(RO)} = \frac{P90}{1 \leq t \leq 365} \sum_{1 \leq i \leq n} \frac{PEC(t, W_i)}{LC50/LR50/EC50(RO, W_i)} \quad [9]$$

$$ETR_{C(RO)} = \frac{P90}{1 \leq t \leq 365} \sum_{1 \leq i \leq n} \frac{PEC_{TWA}(t, W_i)}{NOEC(RO, W_i)} \quad [10]$$

wobei n die Anzahl der Wirkstoffe mit additiver Wirkung repräsentiert.

Für die Bewertung des Risikos der PSM-Belastung von Oberflächengewässern berücksichtigt SYNOPS folgende fünf Referenzorganismen: Algen (al) aquatische Invertebraten (z.B. *Daphnia* sp., da), Fische (fi), Wasserpflanzen (*Lemna* sp., le) und Sedimentorganismen (*Chironomus* sp., ch). Die Risikoindizes werden zunächst für jeden der Referenzorganismen separat berechnet. Anschließend werden das akute (Gleichung 11) und das chronische (Gleichung 12) aquatische Risiko jeweils als Maximum der Risikoindizes der aquatischen Referenzorganismen ermittelt.

$$ETR_{A(aqu)} = \text{MAX}(ETR_{A(al)}, ETR_{A(da)}, ETR_{A(fi)}, ETR_{A(le)}, ETR_{A(ch)}) \quad [11]$$

$$ETR_{C(aqu)} = \text{MAX}(ETR_{C(al)}, ETR_{C(da)}, ETR_{C(fi)}) \quad [12]$$

Das chronische Risiko für Bodenorganismen wird entsprechend berechnet (Gleichung 13). Toxizitätsdaten der Referenzorganismen im Boden waren für Regenwürmer (*re*) und Springschwänze (*Collembolae*; *co*) verfügbar.

$$ETR_{C(bod)} = \text{MAX}(ETR_{C(re)}, ETR_{C(co)}) \quad [13]$$

Tabelle 4: Risikoklassen der *ETR*-Werte in SYNOPS.

Risikoklasse	Wertebereiche	Farbliche Darstellung
kein Risiko	$ETR \leq 0,01$	
sehr niedriges Risiko	$0,01 \leq ETR < 0,1$	
niedriges Risiko	$0,1 \leq ETR < 1$	
erhöhtes Risiko	$1 \leq ETR < 10$	
hohes Risiko	$ETR \geq 10$	

Für die drei Referenzorganismen in Saumbiotopen Honigbienen (*bi*), Raubmilben (*Typhlodromus pyri*; *tp*) und Brackwespen (*Aphidius rhopalosiphii*; *ar*) werden im Rahmen der Zulassung nur akute Toxizitätswerte erhoben. Daher wurden nur die akuten Risiken als Maximum der Indizes der drei Referenzorganismen im Saum berechnet (Gleichung 14).

$$ETR_{A(Saum)} = \text{MAX}(ETR_{A(bi)}; ETR_{A(ar)}; ETR_{A(tp)}) \quad [14]$$

Alle Berechnungen wurden mit der Annahme durchgeführt, dass die Abstandsauflagen zu Gewässern und terrestrischen Kleinstrukturen wie auch die Run-Off-Auflagen eingehalten wurden. Die berechneten *ETR*-Werte (Exposure-Toxicity-Ratio) für Organismen in Oberflächengewässern, Nichtzielarthropoden (NTA) im Saum und für Bodenorganismen werden entsprechend (Tab. 4) in fünf Risikoklassen eingeteilt.

Räumliche Aggregation der Risikoindizes und Berechnungen der relativen Risikoindizes: Die berechneten flächen- und jahresspezifischen Risikoindizes $ETR_{A(aqu)}$, $ETR_{C(aqu)}$, $ETR_{A(Saum)}$ und $ETR_{C(Bod)}$ werden in einer Datenbank gespeichert. Basierend auf dieser Datengrundlage können

die Risikoindizes für verschiedene Raumeinheiten aggregiert, analysiert und dargestellt werden. Als größte räumliche Einheiten werden die sechs Erhebungscluster (CEPI-Regionen, Abb. 5) aus PAPA gewählt. Für jedes Cluster wird das 80- bzw. das 90-Perzentil der PSM-Applikationen der sechs PAPA-Kulturen berechnet. Die Verwendung bspw. des 90-Perzentils impliziert, dass durch die PSM-Applikationen auf 10 % der Applikationsfläche das Risiko einer Beeinträchtigung der aquatischen Lebensgemeinschaft über dem räumlich aggregierten Risikoindex liegt. Darüber hinaus werden die Applikations-Flächenanteile analysiert, die zu Risikowerten über dem Schwellenwert von erhöhtem (ETR >1) und hohem Risikoindex (ETR >10) führen.

Da die Vielzahl der möglichen Detailauswertungen mit verschiedenen Aggregationsmethoden in Berichten nur schwer zusammengefasst werden können, wurden alle Ergebnisse in einem Web-basierten Map-Viewer (<https://sf.julius-kuehn.de/mapviewer/evaherb>) zusammenfassend dargestellt.

Risikobewertung verschiedener Unkrautbekämpfungsverfahren: Die Risikobewertung in SYNOPSIS-GIS wurde sowohl für die konventionelle Flächenspritzung als auch für vier andere kombinierte mechanisch-chemische Unkrautbekämpfungsverfahren mit reduziertem Einsatz der Herbizide durchgeführt (Tab. 5).

Tabelle 5: Unkrautbekämpfungsverfahren, für die eine regionale Risikobewertung mit SYNOPSIS-GIS durchgeführt wurde. Die in der Risikobewertung für die Unkrautbekämpfungsverfahren 1-4 verwendeten Spritzfolgen sind die CEPI-regionsspezifischen generischen Applikationsmuster für die Jahre 2011 – 2018.

Nr.	Unkrautbekämpfungsverfahren	Herbizide	Relative mit Herbizid-behandelte Fläche, %	Relative Herbizid-menge, %
1	3x Flächenspritzung ^[1]	GAM	100	100
2	1x Flächenspritzung (NAK 1) + 2x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	GAM	100 44	63
3	3x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	GAM	44	44
4	3x Punktspritzung (auf 12,5% der Fläche, 10 cm x 10 cm Spritzfenster) + 3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen	GAM	12,5	12,5
5	2x Bandspritzung i. d. Reihe mit Conviso 0,5l/ha + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	Conviso One	44	44

¹ Im Durchschnitt wurden 3 Herbizidanwendungen durchgeführt. Es wurden jedoch für jede CEPI-Region drei GAM mit niedriger, mittlerer und hoher Herbizidintensität erstellt, so dass die Anzahl der Herbizidspritzungen auf jedem Rübenfeld zwischen 2 und 4 variieren kann (Tab. 3).

3.3 Kosten, Zeitaufwand, Rohstoff- und Energieverbrauch, THG-Emissionen (IfZ)

Elf Unkrautbekämpfungsverfahren wurden in Bezug auf Nachhaltigkeit, Zeitaufwand und Kosten verglichen (Tab. 6). Nach Absprache mit Experten des Zuckerrübenanbaus wurden die drei Unkrautbekämpfungsverfahren, die in den Feldversuchen zum Einsatz kamen (Tab. 6, Nr. 1, 3, 7) durch 8 weitere Unkrautbekämpfungsverfahren ergänzt, die entweder schon jetzt für die Zuckerrübenproduktion relevant sind bzw. in naher Zukunft relevant sein werden. So wurde das Herbizid

Conviso One in Deutschland im Jahr 2022 mit praxistauglichen Aufwandmengen zugelassen und darf nun auf nicht drainierten Flächen mit $2x 0.5 l ha^{-1}$ sowie auf drainierten Flächen als Bandbehandlung mit derselben Aufwandmenge appliziert werden (Tab. 6, Nr. 5, 6). Dementsprechend ist die Verwendung von Conviso One zur Unkrautregulierung ab dem Jahr 2023 zu erwarten.

Tabelle 6: Auswahl der Unkrautbekämpfungsverfahren für die Evaluierung der Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit.

Nr.	Art der Unkrautbekämpfung	Verfahrensbeschreibung	Relative Herbizid-Menge %
1	chemisch	3x Flächenspritzung	100
2	kombiniert	1x Flächenspritzung (NAK 1) + 2x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	63
3	kombiniert	3x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	44
4	kombiniert	3x Punktspritzung (auf 12,5% der Fläche, 10 cm x 10 cm Spritzfenster) + 3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen	12,5
5	kombiniert	2x Bandspritzung i. d. Reihe mit Conviso One 0,5l/ha + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	44
6	chemisch	2x Flächenspritzung mit 0,5l/ha Conviso One (nicht-drai- nierte Flächen)	100
7	mechanisch	3x Schlepperhacke zw. den Reihen + 2x Handhacke	0
8	mechanisch	2x Striegel + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen +2x Hand- hacke	0
9	mechanisch	2x Striegel + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen +1x Hand- hacke	0
10	mechanisch	1x Striegel + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen + 1x Handhacke	0
11	mechanisch	3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen + 1x Handhacke	0

In ökologischen Betrieben wird oft der Striegel zur Unkrautbekämpfung eingesetzt. Die Methode ist vor dem Auflaufen der Zuckerrüben und ab dem ersten Laubblattpaar der Rüben wirksam (Mücke 2021). Auch Kombinationen von Striegel, Schlepperhacke und Handhacke (Tab. 5, Nr. 8-10) wurden in die Nachhaltigkeitsbewertung einbezogen. Bei Verfahren Nr. 11 handelt es sich um den FarmDroid-Hackroboter, der seit 2021 auf dem Markt ist und bereits auf einigen Bio-Betrieben in Deutschland eingesetzt wird. Der Roboter ist in der Lage, die Rüben an festgelegten GPS-Positionen auszusähen und später Unkraut zwischen und innerhalb der Zuckerrübenreihen zu hacken. Er kann jedoch kein Unkraut in unmittelbarer Nähe der Zuckerrübenpflanzen entfernen, so dass zumeist ca. 60 Stunden Handhacke erforderlich sind (persönliche Mitteilung von Landwirten). Verfahren Nr. 4 (Tab. 6) - Roboterhacke mit Punktspritzung - ist die einzige der ausgewählten Methoden, die derzeit noch nicht auf dem Markt erhältlich ist. Es handelt sich um eine eventuelle zukünftige Weiterentwicklung eines Hackroboters, für die der FarmDroid als Basis verwendet wurde.

Tabelle 7: Umrechnungskoeffizienten zur Schätzung des Energieaufwandes und der CO₂-Emissionen (Quelle: BioGrace Version 4d: Standard Values).

	Energieinhalt ^[1]	Herstellungsenergie	CO _{2e}
	MJ l ⁻¹	MJ l ⁻¹ (Diesel), MJ kg ⁻¹ (Herbizide)	kg CO _{2e} MJ ⁻¹
Diesel	35,86	41,6	0,088
Herbizide	.- .-	268,4	0,041

^[1]Energieinhalt bei Verbrennung

mit der Reduzierung der Applikationsfläche. Die Aufwandmenge an Herbiziden beim Conviso-Verfahren wurde den Zulassungsunterlagen für Conviso One entnommen (Stand Oktober 2022). Der Verbrauch von Diesel sowie Kosten und Zeitaufwand für die in Tabelle 6 aufgeführten Unkrautregulierungsverfahren wurde mit dem Webtool „Leistung-Kostenrechnung Pflanzenbau“ des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) abgeschätzt (<https://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html>; 29.04.2021).

Im Falle konventioneller Flächenspritzung (Nr. 1, Tab. 6) wurden folgende Optionen gewählt: Zuckerrüben, nichtwendend, Kreiselegge, Saat, konventionell/integriert, Schlaggröße 10 ha, Ertragsniveau mittel, mittlerer Boden, 67-kW-Mechanisierung, Hof-Feld-Entfernung 3 km. Es wurde von drei Herbizidanwendungen ausgegangen. Bei der mechanischen Unkrautbekämpfung (Tab. 6, Nr. 7) wurde „ökologisch“ als Wirtschaftsart und „nichtwendende Bodenbearbeitung“ als Anbausystem gewählt, ansonsten galten die gleichen Kriterien wie bei der chemischen Unkrautbekämpfung. Um Schätzungen für das Striegeln zu erhalten, wurde "Mais" anstelle von "Zuckerrüben" ausgewählt, da die Kenngrößen des Striegeln nur für den ökologischen Maisanbau aufgeführt waren. Bei der Berechnung von Dieselverbrauch, Zeitaufwand und Kosten für die kombinierte Unkrautbekämpfung wurde davon ausgegangen, dass die Bandspritzung in der Reihe und das Hacken mit der Schlepper-Hacke zwischen den Reihen nicht in einem Durchgang erfolgen, was die Wirksamkeit beeinträchtigen kann (Kunz et al. 2015), sondern zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt werden. Außerdem wurde angenommen, dass die Bandapplikation der Herbizide mit einer Feldspritze durchgeführt wird, so dass Diesel- und Zeitverbrauch sowie Maschinen- und Arbeitserledigungskosten für die Band- und die Flächenspritzung gleich waren. Lediglich die Herbizidkosten wurden bei der 20 cm breiten Bandapplikation und dem 45 cm Reihenabstand um 56 % reduziert. Das Herbizid Conviso One wird in Deutschland im Jahr 2023 zusammen mit Saatgut einer Conviso-resistenten Rübensorte verkauft. Der Durchschnittspreis für das gesamte System liegt laut Angaben von KWS SE bei 480 €/ha⁻¹. Diese Summe wurde um die durchschnittlichen Kosten des konventionellen Saatguts in Höhe von 250 €/ha⁻¹ vermindert, um die Kosten von Conviso One mit den Herbizidkosten anderer Verfahren vergleichen zu können. Die Maschinenkosten für den Roboter wurden auf der Grundlage des aktuellen Preises ca. 75.000 € berechnet, wobei entsprechend den technischen Angaben des Herstellers eine Lebensdauer von 10 Jahren und eine Flächenleistung von 20 ha pro Jahr angenommen wurde.

Der Zeitaufwand für die technische Betreuung des FarmDroid Roboters wurde auf 1,7 h ha⁻¹ gesetzt (Jungwirth & Handler 2022). Der mit der Herstellung und Nutzung von Diesel und Herbiziden verbundene Energieeinsatz sowie die entstehenden CO₂-Emissionen wurden aus Dieselverbrauch und Herbizidmenge mithilfe der Umrechnungskoeffizienten (Tab. 7) der Web-Anwendung BioGrace (Version 4d: Standard Values, <https://www.biograce.net/home> 07.05.2021) berechnet.

Der Roboter soll mit einem Spot-Applikationssystem ausgestattet werden, um die Unkräuter in der Nähe der Kulturpflanze chemisch punktuell bekämpfen zu können. Da die ersten Ergebnisse vielversprechend sind (Starck et al. 2021), dürfte das Verfahren in naher Zukunft etablieren werden. Die durch durchschnittliche Aufwandmenge an Herbiziden bei der konventionellen Flächenspritzung wurde anhand der Einsatzmengen in den Feldversuchen ermittelt. Die Menge an Herbiziden im Falle kombinierter Unkrautkontrolle reduzierte sich linear

Der Energieaufwand bei der Herstellung der Maschinen und Unterhaltung der Anlagen für jedes der Unkrautbekämpfungsverfahren wurde dem KTBL-Rechner entnommen. Für die Umrechnung des mit Maschinen und Anlagen verbundenen Energieverbrauchs in CO₂-Emissionen wurde ein Umrechnungskoeffizient für gemischte Energieträger verwendet von 0.13 kg CO_{2e} MJ⁻¹ (BioGrace Version 4d: Standard Values).

Der Energieaufwand für die Herstellung des Roboters wurde als Summe aus dem Energieaufwand für die Herstellung der Solarmodule sowie von Edelstahl und der Spritzeinrichtung bestimmt. Der Energieaufwand für die Herstellung der Solarmodule wurde anhand des Querschnitts der Solarzellen des FarmDroid, der Amortisationszeit der Solarmodule (Peng et al. 2013) und der mittleren Jahreseinstrahlung in Deutschland berechnet. Der Energieaufwand für die Edelstahlherstellung wurde aus dem geschätzten Gewicht von Stahl im FarmDroid und der Energieintensität primärer Stahlerzeugung kalkuliert. Die Herstellungsenergie für Anlagen und Gebäude für den Roboter wurde mit dem KTBL-Rechner geschätzt. Für die Berechnung der mit der Herstellung des Roboters verbundenen CO₂-Emissionen wurden die CO₂-Emissionen der Herstellung der Solarmodule, des Edelstahls sowie der Anlagen und Gebäude aufsummiert. Im Falle der Solarmodule wurde der Literaturwert für den CO₂-Fußabdruck von Solarstrom von Peng et al. (2013), 37 g CO₂ kWh⁻¹ verwendet, angepasst auf die kürzere Lebenserwartung (10 anstatt 25 Jahren) und 3,5-mal niedrigere jährliche Stromproduktion des 2-monatigen Einsatzes anstatt der ganzjährigen Laufzeit eines typischen Dachsolarmodul. Damit betrug der CO₂-Fußabdruck des vom FarmDroid produzierten Solarstroms 324 g CO₂ kWh⁻¹. Die jährliche Strommenge pro ha wurde anschließend mit der Annahme von 19.2 kWh täglicher Stromleistung, 56 Tagen Arbeitszeit und 20 ha Flächenleistung berechnet. Der CO₂-Fußabdruck der Edelstahlproduktion liegt bei 2 t CO₂ t⁻¹ (Hasanbeigi et al. 2016). Unter der Annahme, dass der FarmDroid 500 kg Stahl enthält, eine Nutzungsdauer von 10 Jahren und eine Flächenleistung von 20 ha hat, wurden die mit der FarmDroid-Stahlherstellung verbundenen CO₂-Emissionen pro ha berechnet.

3.4 Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage für die Unkrautkontrolle (IfZ)

Zur Berechnung der Anzahl der für die Unkrautbekämpfung zur Verfügung stehenden Tage wurden die Wetterdaten von 15 Wetterstationen in verschiedenen Zuckerrübenanbaugebieten in Deutschland herangezogen. Der mittlere Aussattermin für Zuckerrüben in Deutschland variiert zwischen den Regionen und wurde für verschiedene Boden-Klima-Räumen (BKR, Roßberg et al. 2007) aus den Daten der Betriebsbefragung zur Produktionstechnik im Zuckerrübenanbau (Stockfisch et al., 2013) von 2011 - 2018 berechnet. Es wurde angenommen, dass die Unkrautbekämpfung in jedem BKR drei Wochen nach der Aussaat beginnt und 46 Tage (6-7 Wochen) dauert. Um die Anzahl der für eine Herbizidanwendung geeigneten Feldtage zu bestimmen, muss berücksichtigt werden, dass die Anwendung von Pestiziden nur bei einer Windgeschwindigkeit < 5 m s⁻¹ erlaubt ist, um Abdrift und Verflüchtigung von Pestiziden zu reduzieren (Grundsätze für die Durchführung der guten fachlichen Praxis im Pflanzenschutz 2010). Außerdem kann der Einsatz von landwirtschaftlichen Maschinen auf nassen Böden zu Bodenverdichtungen führen (Müller et al. 2011), die die Zeitspannen der Befahrbarkeit begrenzen. Der kritische Bodenwassergehalt für einen bestimmten Boden hängt von der Bodentextur ab und schwankt zwischen 90% Feldkapazität für Sand und 80% Feldkapazität für Ton (Lorenz et al. 2016). Bei sandigen Lehm- und Lehmböden, die in Deutschland laut Betriebsbefragung zur Produktionstechnik im Zuckerrübenanbau 2019 überwiegend für den Zuckerrübenanbau verwendet werden, besteht ein hohes Verdichtungsrisiko, wenn der Bodenwassergehalt 88% der Feldkapazität übersteigt (Lorenz et al. 2016). Um die Anzahl der für die Herbizidausbringung zur Verfügung stehenden Tage zu ermitteln, wurden von den 46 potenziell für die Unkrautbekämpfung zur Verfügung stehenden Tagen (1) die Tage abgezogen, an denen die Windgeschwindigkeit sowohl morgens (7 Uhr und 8 Uhr) als auch

abends (19 Uhr und 20 Uhr) $> 5 \text{ m s}^{-1}$ war, und (2) die Tage gelöscht, an denen die Bodenfeuchte sandiger Lehmböden 88 % der Feldkapazität überstieg. Die Zahl der verbleibenden Tage wurde als Zahl der für Herbizidanwendungen verfügbaren Tage angenommen. Es wurden die Werte der stündlichen Windgeschwindigkeit und der täglichen Bodenfeuchte in 5 cm Tiefe eines sandigen Lehmbodens von 2015 - 2021 verwendet (Deutscher Wetterdienst, offene Klimadaten).

Beim Hacken eines feuchten Bodens wird das Unkraut nicht wirksam ausgerissen oder abgeschnitten und die Hacke kann leicht verstopfen. Außerdem kann das Hacken im feuchten Boden zu einer Verschmierung führen. Die Obergrenze der Bodenfeuchte für Bodenbearbeitung (Bearbeitbarkeit) wird von Dexter & Bird (2001) in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens angegeben. Bei sandigem Lehmboden mit einem durchschnittlichen Tongehalt von 21 % (KA5 2005) wird die obere Grenze der Bearbeitbarkeit bei einem gravimetrischen Wassergehalt von 22 % erreicht. Geht man von einer Trockenrohichte von $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ in den oberen 10 cm des Bodens aus, so liegt die Obergrenze des volumetrischen Wassergehalts bei 28,6 %. Unter Anwendung dieses Schwellenwerts wurden alle Tage mit einem Bodenwassergehalt $> 28,6 \text{ Vol. \%}$ in der oberen 10 cm Schicht des sandigen Lehmbodens aus dem Zeitfenster für die Unkrautbekämpfung entfernt. Die verbleibende Anzahl von Tagen wurde als die für Hackarbeiten verfügbare Anzahl an Tagen (Feldarbeitstage) betrachtet.

Die für die Berechnungen verwendeten Schwellenwerte für die Bearbeitbarkeit und Befahrbarkeit des Bodens gelten für herkömmliche Schlepperhacken und Feldspritzen. Der Feldroboter FarmDroid kann bereits unmittelbar nach Ende eines Regenereignisses aufgrund seines geringeren Gewichts wieder fahren, ohne den Boden zu verdichten. Nach einem Starkregenereignis von 20 mm oder mehr kann das Hacken fortgesetzt werden, sobald die ersten 2 cm des Bodens abgetrocknet sind. Dies kann bereits für den nächsten Tag erwartet werden. Um eine konservative Schätzung der für den FarmDroid verfügbaren Arbeitstage zu erhalten, wurden alle Tage mit 4 mm oder mehr Niederschlag als ungeeignet für die Unkrautbekämpfung mit FarmDroid gesetzt und von den insgesamt 46 potenziell für die Unkrautbekämpfung verfügbaren Tagen abgezogen.

4 Ausführliche Darstellung und Diskussion der wichtigsten Ergebnisse

4.1 Bodenerosion (IfZ)

In verkrusteten Böden wurden Oberflächenabfluss und Bodenabtrag bei einem simulierten Regenereignis mit einer Intensität von 1 mm min^{-1} um Faktor 6 und 8 nach mechanischer im Vergleich zur chemischen Unkrautregulierung reduziert. Bei nicht verkrusteten Böden gab es keine Unterschiede zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren (Abb. 6, Tab. 8). Insgesamt war der kumulative Abfluss bei verkrusteten Böden größer als bei nicht verkrusteten Böden. Bei einer Regenrate von $1,5 \text{ mm min}^{-1}$ wurden Oberflächenabfluss und Bodenabtrag durch die Unkrautbekämpfung in verkrusteten und nicht verkrusteten Böden nicht signifikant beeinflusst. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswirkung der Unkrautbekämpfungsverfahren auf die Bodenerosion vom Vorhandensein einer Bodenverkrustung vor Unkrautkontrolle abhängt. Schluffreiche Böden wie in unserer Studie sind besonders anfällig für Krustenbildung (Bresson & Boiffin 1990). Durch die mechanische Unkrautbekämpfung wird die Bodenkruste aufgebrochen, wodurch die Infiltrationskapazität erhöht und folglich das Abflussvolumen und der Bodenabtrag verringert werden. Ähnliche Ergebnisse wurden von Whitaker et al. (1973) für verkrustete Schlufflehmböden eines Maisfeldes in Missouri (USA) bei natürlichem Regenfall berichtet. Sie beobachteten zwei- bis viermal so viel Abfluss und vier- bis achtmal so viel Bodenabtrag bei chemischer als bei mechanischer Unkrautbekämpfung. In unserer Studie mit einer sehr hohen Regenrate von $1,5 \text{ mm min}^{-1}$ unterschied sich der kumulative Abfluss zwischen den Behandlungen jedoch nicht signifikant.

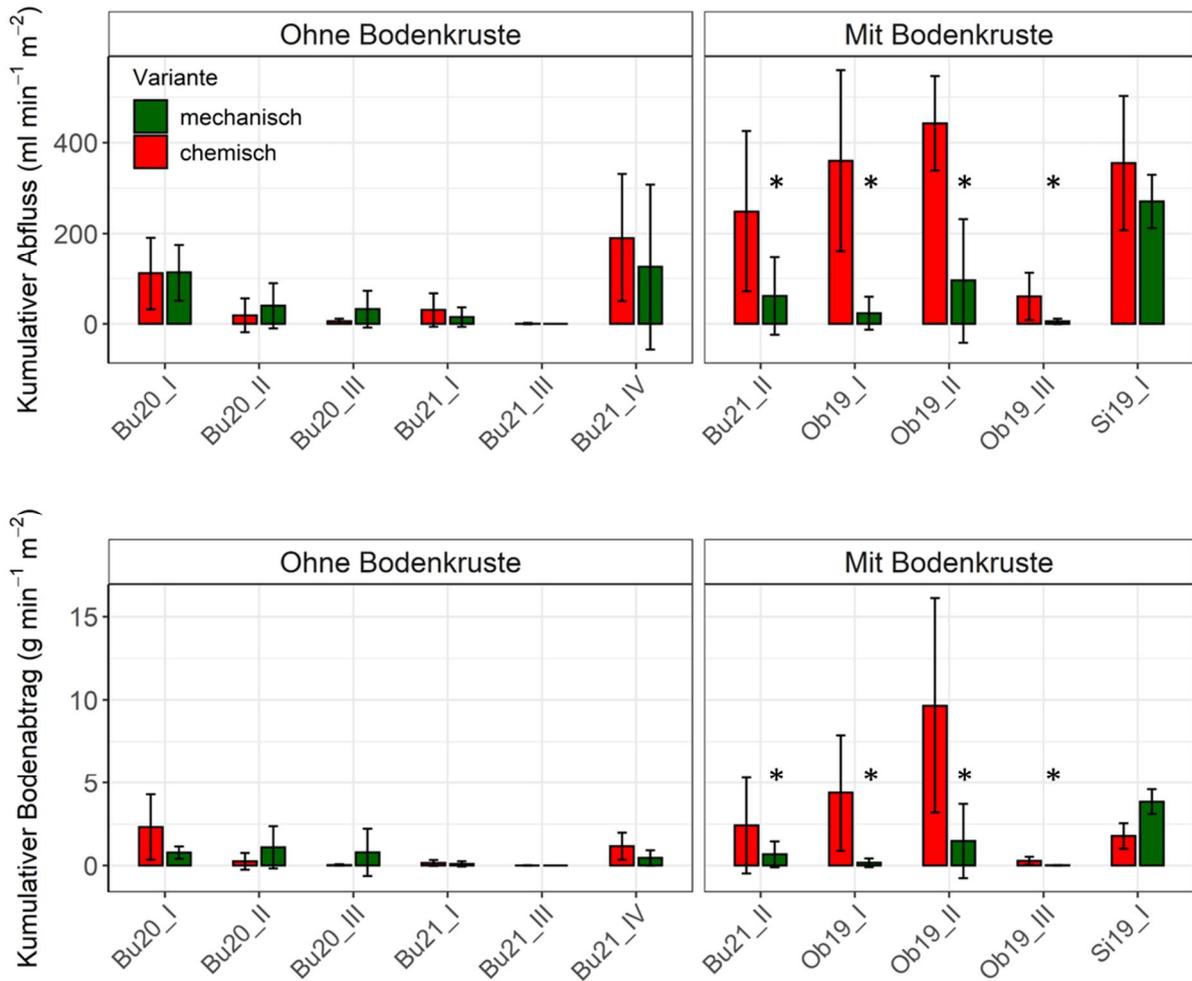


Abbildung 6: Kumulativer Abfluss und Bodenabtrag (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n = 4$) nach mechanischer oder chemischer Unkrautbekämpfung in Feldversuchen mit Zuckerrüben, gemessen auf Kleinparzellen ($n = 86$) mittels Regensimulationen. Um die Ergebnisse mit anderen Studien vergleichbar zu machen, wurden die Daten standardisiert, indem sie durch die Regendauer dividiert wurden. H - mechanische Unkrautkontrolle (Hacke); S - chemische Unkrautkontrolle (Spritze).

Tabelle 8: Mittelwerte des kumulativen Abflusses und des kumulativen Bodenabtrages bei mechanischer (H = Hacke i. und zw. d. Reihen) und chemischer (S) Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (Tukey-Test, $p \leq 0,05$) innerhalb einer Regenrate.

Bodenverkrustung	Kumulativer Abfluss ml m ⁻² min ⁻¹		Kumulativer Bodenabtrag g m ⁻² min ⁻¹	
	ohne	mit	ohne	mit
Unkrautkontrolle				
Regenrate 1,0 mm min ⁻¹				
H	20a	53a	0,09 ^[1]	0,3a
S	40a	297b	0,09 ^[1]	2,4b
Regenrate 1,5 mm min ⁻¹				
H	104ab	280ab	0,09 ^[1]	3,8b
S	55a	411b	0,09 ^[1]	1,8b

^[1]Der kumulative Bodenabtrag für nicht verkrustete Böden wurde weder durch die Unkrautbekämpfung noch durch die Regenmenge signifikant beeinflusst. Deshalb ist hier der Median des Bodenabtrags angegeben.

Dies lag hauptsächlich daran, dass die Infiltrationskapazität des Bodens unabhängig von der Unkrautbekämpfungsmethode überschritten wurde. In diesem Ausnahmefall (Si19_I, Abb. 6) war der kumulative Bodenabtrag bei der mechanischen Unkrautbekämpfung tendenziell höher, aber der Unterschied war nicht signifikant ($p=0,3$). Extreme Regenereignisse dieser Intensität kommen sehr selten vor und haben eine Wiederkehrperiode von 50-100 Jahren (Schmitt et al. 2018). In Jahren 2020 und 2021 fiel im Frühjahr nach der Saatbettbereitung und Aussaat nur wenig Regen, es bildete sich keine Kruste, und in diesem Fall wurden sowohl der kumulative Abfluss als auch der Bodenverlust in Roeb20 und Buehle21 durch das Hacken nicht wesentlich beeinflusst. Da die Hacke den Boden bis in eine Tiefe von 3-4 cm durchmischt, wodurch die Kontinuität der Makroporen gestört wird und die Regenwurmgänge blockiert werden, erwarteten wir, dass die Infiltrationskapazität abnimmt und das Abflussvolumen nach der Hacke in nicht verkrusteten Böden zunimmt. Unsere Daten bestätigten diese Hypothese jedoch nicht. Dies könnte auf die überwiegend trockenen Bodenverhältnisse in unserer Studie zurückzuführen sein, die zu einer sehr hohen Infiltrationskapazität und damit zu einer sehr langen Zeitspanne für die Sättigung der oberen 3-4 cm Boden führen. Doch selbst bei einem hohen anfänglichen Bodenwassergehalt (siehe Buehle21_IV in Abb. 6) wurden Abfluss und Bodenabtrag durch das Unkrautbekämpfungsverfahren nicht wesentlich beeinflusst. Wir vermuten, dass die negative Auswirkung der Hacke auf die Kontinuität der Makroporen durch ihre positive Wirkung auf die Infiltrationskapazität des Bodens ausgeglichen wurde. Außerdem wird durch das Hacken die Bodenrauhigkeit erhöht, was wiederum die Infiltrationskapazität verbessert (Steichen 1984).

4.2 Epigäische Raubarthropoden und Schädlinge (JKI-A)

Abundanz epigäischer Raubarthropoden

Die Arthropodenbestimmung im Projekt ist für die Photoeklektoren und die Barberfallen komplett abgeschlossen. Die Photoeklektorfänge werden in den nachfolgenden Tabellen und Grafiken detaillierter dargestellt, signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten wurden jedoch nicht gefunden. Die Barberfallenfänge zeigten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten für die epigäischen Raubarthropoden und werden deshalb hier nicht aufgeführt. Es wurden im Allgemeinen dieselben Arten erfasst wie in den gleichzeitig fängigen Photoeklektoren. Die Fänge vieler Arten waren in den Versuchsjahren eher gering, was möglicherweise auch mit den teils extremen Witterungsbedingungen zusammenhing. Für die Proben des EcoVac wurde nur einige Arten bestimmt, da die Arthropoden trotz großer Sorgfalt beim Aufsaugen teilweise beschädigt wurden und es sich vornehmlich um Zikaden der Gattung *Empoasca* und um Spinnen handelte, von denen allerdings viele juvenil waren. Es wurden keine Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten festgestellt.

Die Photoeklektoren erwiesen sich als die geeignetste Erfassungsmethode für die epigäischen Raubarthropoden in Bezug auf die Fragestellung. Diese Ergebnisse werden hier daher etwas detaillierter dargestellt. Auch bei den Photoeklektorfänge ergaben sich jedoch insgesamt mit Ausnahme von Einzelterminen für keine der untersuchten Gruppen oder Arten signifikante Unterschiede. Beispielhaft ist dies für die zehn häufigsten epigäischen Raubarthropoden-Arten im Photoeklektor aufgelistet (Tab. 9-11). Dabei sind die Gesamtanzahlen dieser Arten in den Versuchsvarianten über alle Standorte und Versuchsjahre aufgeführt. Es muss berücksichtigt werden, dass es 2020 insgesamt drei Standorte (Sieboldshausen2, Bühle1 und Braunschweig) gab, 2019 (Oberjesa, Sieboldshausen1) und 2021 (Bühle2, Braunschweig) aber nur zwei Standorte. Bei den Kurzflügelkäfern war in allen Versuchsjahren ein vermehrtes Auftreten von Arten der Unterfamilie Aleocharinae zu beobachten. Bei den Spinnen kam die Art *Tenuiphantes tenuis* am häufigsten vor.

Tabelle 9: Anzahl der 10 häufigsten Kurzflügelkäferarten 2019 - 2021 in den Photoelektorfängen. H = Hacke in und zwischen den Reihen, HS = Hacke zwischen und Bandspritzung in den Reihen, S = Flächenspritzung.

Jahr	Standorte						Jahr	Standorte						Jahr	Standorte											
	2019			Obernjesa				2020			Sieboldshausen 2				Buehle 1			Braunschweig 1			2021			Buehle 2		
Arten	H	HS	S	H	HS	S	Arten	H	HS	S	H	HS	S	H	HS	S	Arten	H	HS	S	H	HS	S			
Aleocharinae *	259	351	261	338	327	356	Aleocharinae *	572	399	391	408	382	289	738	533	604	Aleocharinae *	286	293	317	663	525	508			
<i>Tachyporus hypnorum</i>	101	90	80	37	33	41	<i>Tachyporus hypnorum</i>	122	101	73	59	63	56	38	25	33	<i>Anotylus nitidulus</i>	28	26	39	68	21	13			
<i>Heterothops praevius</i>	5	0	0	12	14	19	<i>Xantholinus longiventris</i>	11	4	5	2	2	2	19	10	13	<i>Tachyporus hypnorum</i>	34	36	37	6	4	4			
<i>Proteinus atomaris</i>	5	5	11	12	3	4	<i>Anotylus tetracarinated</i>	11	10	6	14	9	6	5	3	2	<i>Anotylus rugosus</i>	17	12	22	2	1	1			
<i>Tachyporus obtusus</i>	6	8	9	3	4	9	<i>Anotylus nitidulus</i>	9	7	12	11	5	3	2	2	2	<i>Xantholinus elegans</i>	16	6	13	0	0	0			
<i>Tachyporus solutus</i>	4	4	5	5	4	11	<i>Tachinus rufipes</i>	2	2	1	16	12	6	1	0	0	<i>Tachinus rufipes</i>	22	2	5	0	0	0			
<i>Xantholinus elegans</i>	4	9	6	2	3	3	<i>Anotylus rugosus</i>	7	3	2	9	11	2	4	1	0	<i>Tachyporus solutus</i>	2	3	6	3	5	4			
<i>Anotylus rugosus</i>	1	3	6	5	3	1	<i>Xantholinus elegans</i>	7	5	9	7	2	2	0	0	0	<i>Xantholinus longiventris</i>	3	3	7	3	1	3			
<i>Anotylus tetracarinated</i>	1	2	0	4	3	5	<i>Tachyporus solutus</i>	4	3	5	0	3	2	4	1	9	<i>Philonthus cognatus</i>	0	2	0	7	5	2			
<i>Xantholinus longiventris</i>	0	0	0	3	4	6	<i>Philonthus cognatus</i>	0	0	1	0	0	0	19	3	4	<i>Philonthus succiola</i>	5	2	2	2	0	4			
Alle Kurzflügelkäfer gesamt	407	482	396	438	417	476	Alle Kurzflügelkäfer gesamt	768	549	523	545	519	386	869	608	690	Alle Kurzflügelkäfer gesamt	439	411	483	779	578	554			

*Nicht in Arten aufgetrennt, da die Unterfamilie Aleocharinae extrem artenreich ist und vollständige Bestimmung im Rahmen des Projektes nicht möglich war

Tabelle 10: Anzahl der 10 häufigsten Spinnenarten 2019 – 2021 in den Photoelektorfängen. H=Hacke i. und zw. d. Reihen, HS=Hacke zw. und Bandspritzung i. d. Reihen, S = Flächenspritzung.

Jahr	Standorte						Jahr	Standorte						Jahr	Standorte											
	2019			Obernjesa				2020			Sieboldshausen 2				Buehle 1			Braunschweig 1			2021			Buehle 2		
Arten	H	HS	S	H	HS	S	Arten	H	HS	S	H	HS	S	H	HS	S	Arten	H	HS	S	H	HS	S			
<i>Tenuiphantes tenuis</i>	233	222	252	196	289	231	<i>Tenuiphantes tenuis</i>	232	251	210	345	472	443	184	164	248	<i>Tenuiphantes tenuis</i>	417	400	381	382	429	333			
<i>Agyneta rurestris</i>	100	99	111	146	233	130	<i>Oedothorax apicatus</i>	31	23	41	143	228	169	155	111	173	<i>Agyneta rurestris</i>	106	109	117	178	171	95			
<i>Oedothorax apicatus</i>	80	45	101	199	104	231	<i>Agyneta rurestris</i>	90	91	86	75	81	93	106	64	58	<i>Oedothorax apicatus</i>	174	158	206	39	43	50			
<i>Porrhomma errans</i>	22	28	28	21	41	35	<i>Porrhomma errans</i>	23	23	27	61	71	52	4	8	6	<i>Bathyphantes gracilis</i>	112	81	84	2	7	10			
<i>Porrhomma microphthalmum</i>	19	23	28	22	49	28	<i>Bathyphantes gracilis</i>	10	17	14	33	62	32	4	1	4	<i>Erigone dentipalpis</i>	15	10	4	77	71	42			
<i>Bathyphantes gracilis</i>	10	24	28	7	3	7	<i>Erigone atra</i>	5	2	10	8	15	5	65	30	36	<i>Erigone atra</i>	18	24	10	68	65	29			
<i>Phylloneta impressa</i>	5	10	18	13	17	11	<i>Araencus humilis</i>	1	2	3	6	2	0	24	32	24	<i>Araencus humilis</i>	5	4	9	70	69	43			
<i>Erigone dentipalpis</i>	8	3	3	16	21	14	<i>Erigone dentipalpis</i>	0	2	6	3	2	0	47	8	22	<i>Oedothorax retusus</i>	38	61	66	3	2	8			
<i>Erigone atra</i>	9	9	16	4	18	8	<i>Porrhomma microphthalmum</i>	7	10	14	14	9	12	10	5	6	<i>Porrhomma errans</i>	40	51	43	14	7	9			
<i>Oedothorax retusus</i>	4	7	13	8	4	4	<i>Oedothorax retusus</i>	1	1	2	13	16	19	9	2	5	<i>Porrhomma microphthalmum</i>	13	17	17	15	18	14			
alle Spinnen gesamt	751	803	966	1102	1211	1075	alle Spinnen gesamt	614	607	601	1023	1372	1161	716	545	739	alle Spinnen gesamt	1056	1033	1061	915	950	692			

Tabelle 11: Anzahl der 10 häufigsten Laufkäferarten 2019 - 2021 in den Photoelektorfängen. H = Hacke i. und zw. d. Reihen, HS = Hacke zw. und Bandspritzung i. d. Reihen, S = Flächenspritzung.

Jahr 2019	Standorte						Jahr 2020	Standorte						Jahr 2021	Standorte								
	Obernjesa			Sieboldshausen 1				Sieboldshausen 2			Buehle 1				Braunschweig 1			Buehle 2			Braunschweig 2		
Arten	H	HS	S	H	HS	S	Arten	H	HS	S	H	HS	S	H	HS	S	Arten	H	HS	S	H	HS	S
<i>Pterostichus melanarius</i>	238	222	167	50	52	43	<i>Pterostichus melanarius</i>	494	388	439	170	196	246	4	3	2	<i>Pseudoophonus rufipes</i>	17	17	15	197	275	284
<i>Pseudoophonus rufipes</i>	95	67	46	27	18	9	<i>Trechus quadristriatus</i>	247	207	155	69	99	104	42	14	52	<i>Pterostichus melanarius</i>	189	194	127	1	0	3
<i>Trechus quadristriatus</i>	45	59	44	28	26	22	<i>Nebria brevicollis</i>	6	9	16	33	32	25	34	28	20	<i>Trechus quadristriatus</i>	72	49	45	13	38	27
<i>Anchomenus dorsalis</i>	6	15	11	11	13	11	<i>Pseudoophonus rufipes</i>	14	23	8	2	4	3	34	31	23	<i>Harpalus affinis</i>	9	5	7	46	89	51
<i>Bembidion lampros</i>	7	5	0	9	11	15	<i>Harpalus affinis</i>	3	3	6	7	8	3	38	31	41	<i>Calathus melanocephalus</i>	0	0	1	33	84	49
<i>Nebria brevicollis</i>	4	4	1	17	13	3	<i>Anchomenus dorsalis</i>	11	11	14	29	27	21	1	2	1	<i>Anchomenus dorsalis</i>	29	17	41	0	1	1
<i>Harpalus affinis</i>	1	4	4	1	2	1	<i>Bembidion obtusum</i>	20	31	28	5	5	14	0	0	1	<i>Bembidion lampros</i>	21	13	11	11	4	7
<i>Zabrus tenebroides</i>	6	0	2	24	28	16	<i>Bembidion quadrimaculatum</i>	30	16	24	1	0	0	4	7	1	<i>Brosicus cephalotes</i>	0	0	0	10	20	18
<i>Demetrias atricapillas</i>	1	3	3	1	0	0	<i>Bembidion lampros</i>	13	5	10	1	3	3	13	12	11	<i>Amara apricaria</i>	0	0	0	10	25	7
<i>Loricera pilicornis</i>	0	2		1	2	1	<i>Bembidion tetracolum</i>	5	1	0	0	0	0	15	25	26	<i>Bembidion obtusum</i>	16	11	8	0	0	0
Alle Laufkäfer gesamt	408	385	285	188	175	130	Alle Laufkäfer gesamt	870	712	720	341	390	440	226	183	239	Alle Laufkäfer gesamt	384	338	300	390	631	522

Tabelle 12: Anzahl der 15 häufigsten Schädlinge 2019 - 2021 in Photoelektorfängen. H = Hacke in und zwischen den Reihen, HS = Hacke zwischen und Bandspritzung in den Reihen, S = Flächenspritzung.

Jahr 2019	Standorte						Jahr 2020	Standorte						Jahr 2021	Standorte								
	Obernjesa			Sieboldshausen 1				Sieboldshausen 2			Buehle 1				Braunschweig 1			Buehle 2			Braunschweig 2		
Schadinsekten	H	HS	S	H	HS	S	Schadinsekten	H	HS	S	H	HS	S	H	HS	S	Schadinsekten	H	HS	S	H	HS	S
Thripse	1515	3239	3418	1931	1961	1407	Springschwänze	8194	9736	10671	6297	6525	7173	2415	1418	2260	Springschwänze	6740	7238	7434	9476	10995	5986
Springschwänze	1565	1257	1300	3213	3633	3154	Kugelspringer	674	563	627	1085	961	1403	476	327	488	Kugelspringer	2297	3116	2481	1689	1733	1415
Kugelspringer	37	64	54	543	544	383	Moosknopfkäfer	2054	1877	2396	771	545	674	684	494	424	Moosknopfkäfer	1229	1339	1069	853	985	754
Moosknopfkäfer	221	160	168	117	141	110	Thripse	1397	1684	1761	2441	2550	1316	1216	524	664	Thripse	724	864	477	892	1186	1041
Tausendfüßer	23	29	41	57	12	10	Schwarze Bohnenblattlaus	66	40	40	20	23	42	73	29	19	Rübenerdföhe	2	5	5	11	16	8
Schwarze Bohnenblattlaus	16	17	16	21	19	24	Grüne Pfirsichblattlaus	5	13	5	8	5	11	38	26	15	Schwarze Bohnenblattlaus	9	6	2	28	38	35
Grüne Pfirsichblattlaus	7	14	31	8	5	16	Grünstreifige Kartoffelblattlaus	6	3	9	1	11	9	27	14	34	Grüne Pfirsichblattlaus	2	1	5	22	8	14
Grünstreifige Kartoffelblattlaus	3	2	3	0	1	31	Grünfleckige Kartoffelblattlaus	0	0	0	0	0	0	1	2	0	Grünstreifige Kartoffelblattlaus	1	1	0	10	24	11
Grünfleckige Kartoffelblattlaus	0	7	1	0	1	6	Zwergzikaden	21	26	18	10	17	17	35	12	30	SchildkäferLV	1	3	5	40	25	10
Zwergzikaden	41	55	38	47	38	11	Tausendfüßer	52	66	60	44	42	32	2	1	4	Rüben-Aaskäfer	0	0	0	117	136	119
Wanzen	20	36	23	5	6	2	Rübenmotte	11	6	8	3	11	45	6	1	1	Wanzen	41	40	44	190	238	115
Rübenmotte	6	3	3	5	5	0	Wanzen	43	58	34	28	11	19	100	29	95	Tausendfüßler	39	46	38	1	127	3
Rübenerdfloh	7	5	7	0	5	4	Rübenerdföhe	3	2	0	6	2	6	29	8	4	Zwergzikaden	38	30	27	67	36	56
Spitzsteißiger Rübenrüssler	1	0	0	0	0	2	Gemüseeeule + Kohleule	6	4	1	2	1	3	8	9	7	Gemüseeeule + Kohleule	0	3	0	12	10	6
Gammaeeule	0	0	0	1	1	0	Rüben-Aaskäfer	0	0	0	0	0	0	6	1	4	Rübenmotte	0	2	1	5	2	1

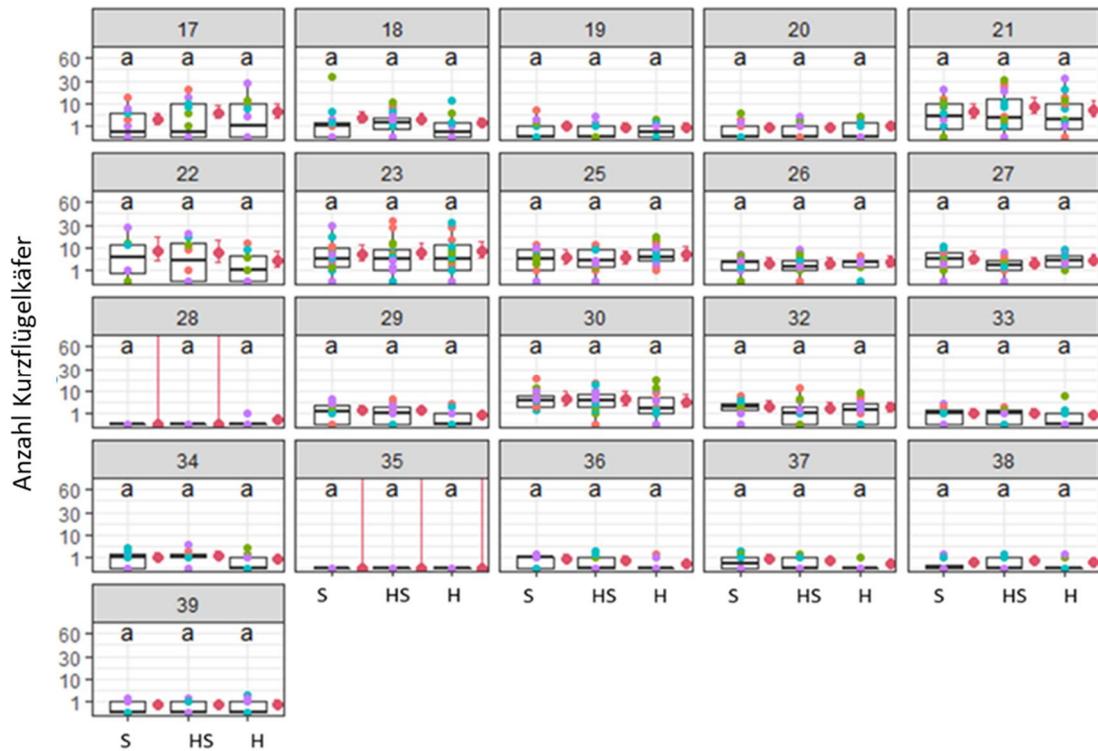


Abbildung 7: Gesamte Anzahl von Kurzflügelkäfern an den beiden Standorten im Versuchsjahr 2019; S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. den Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen; H = Hacke i. und zw. d. Reihen (Photoelektorfänge).



Abbildung 8: Gesamte Anzahl von Spinnen an allen Standorten im Versuchsjahr 2020; S=Flächenspritzung, HS=Hacke zw. d. Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen; H=Hacke i. und zw. den Reihen (Photoelektorfänge).

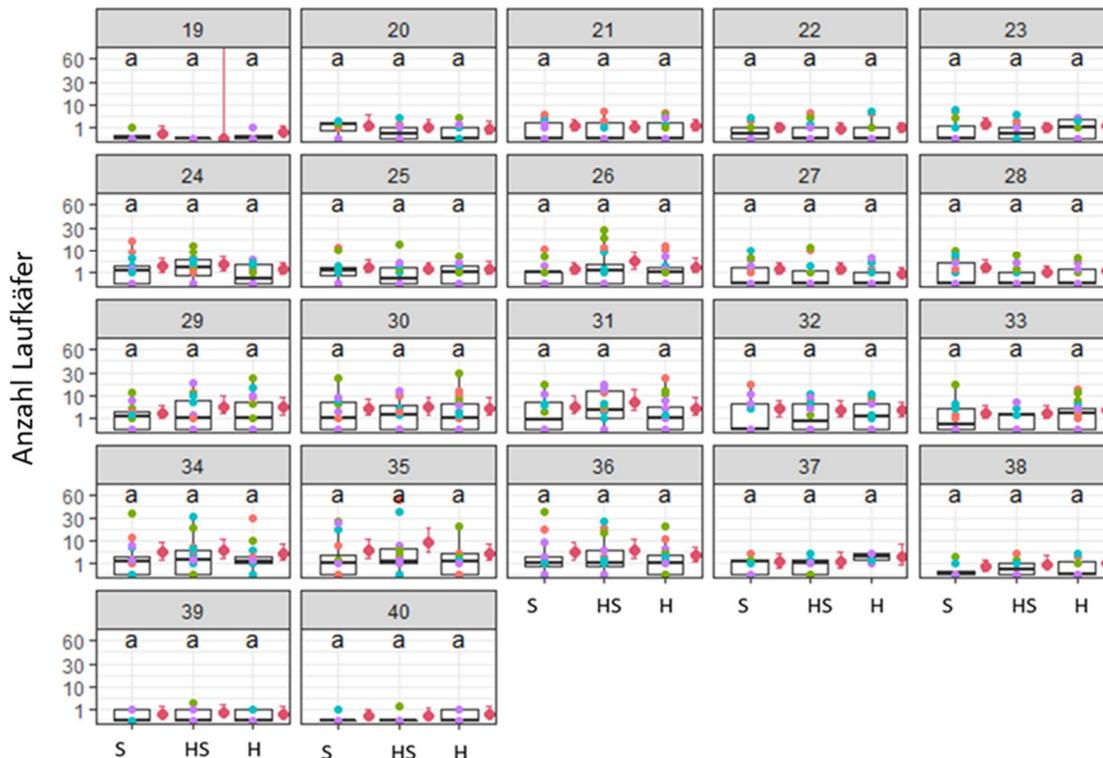


Abbildung 9: Gesamte Anzahl von Laufkäfern an den beiden Standorten im Versuchsjahr 2021; S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. den Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen, H = Hacke i. und zw. den Reihen (Photoelektorfänge).

Die häufigsten Laufkäfer-Arten waren *Pterostichus melanarius* und *Pseudoophonus rufipes*. Nachfolgend sind zusätzlich für einzelne Jahre die Photoelektorfänge für die unterschiedlichen Raubarthropodengruppen (Kurzflügelkäfer 2019, Spinnen 2020 und Laufkäfer 2021) beispielhaft abgebildet. In den Jahren 2019 und 2021 gab es für keine der drei Gruppen signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Unkrautkontrollverfahren (Abb. 7-9). Im Versuchsjahr 2020 traten bei den Spinnen signifikante Unterschiede zwischen der Flächenspritzung und der rein mechanischen Variante in Kalenderwoche 31 auf. Nur zu diesem einen Zeitpunkt gab es signifikante Unterschiede. Die kombinierte Variante war zu keiner der beiden anderen Varianten signifikant unterschiedlich. Andere Studien (Thorbek & Bilde 2004, Navntoft et al. 2016) zeigten im Gegensatz dazu, dass eine mechanische Unkrautkontrolle mittels Egge einen negativen Einfluss auf das Vorkommen von Spinnen haben kann. Vergleichbare Versuche mit einer mechanischen Hacke sind allerdings nicht bekannt. Die Wirkung auf Spinnen könnte also bei unterschiedlicher mechanischer Bearbeitung auch verschieden sein, da unter anderem die mechanischen Bodenbewegungen durch die Geräte, Egge und Hacke, und möglicherweise auch die Bearbeitungstiefen unterschiedlich sind. In unserem Versuch lag die Bearbeitungstiefe bei 3-5 cm Bodentiefe. Lorenz (1994) zeigte, dass die Puppen der Laufkäferart *Trechus quadristriatus* in einer Bodentiefe von etwa 15 cm vorkommen. Damit wäre diese Art nicht im gefährdeten Bodentiefenbereich. Die Verpuppungstiefe könnte jedoch für andere Laufkäferarten anders sein. Lorenz (1994) belegte außerdem, dass die Laufkäferabundanz durch die mechanische Hacke nicht negativ beeinflusst wurde. Ähnliche Ergebnisse erlangten wir in unseren Versuchen, da die Laufkäfer im Allgemeinen keine unterschiedlichen Abundanzen zwischen den Versuchsvarianten aufwiesen.

Kurzflügelkäfer halten sich gewöhnlich bis auf der Bodenoberfläche bis zu einer Tiefe von bis zu 5 cm auf (De Graaf, Schoeman & Brandenburg 2003). Demnach könnten Kurzflügelkäfer einschließlich ihrer Larven von der Hacke erreicht werden. Wir fanden allerdings keine signifikanten Unterschiede in den Versuchsvarianten, so dass anzunehmen ist, dass die Störung durch die

Hacke keinen Einfluss hat. Ein weiterer Grund dafür könnte sein, dass Kurzflügelkäfer gute Flieger sind, welche wahrscheinlich bei Störungen in die umliegenden Felder emigrieren (Bohac 1999). Thorbek & Bilde (2004) zeigten ebenfalls in ihrer Studie, dass die Kurzflügelkäferabundanz nicht durch mechanische Unkrautkontrolle negativ beeinflusst wird.

Abundanz von Schadinsekten

Der Schadinsektenbefall in den Versuchsjahren war eher gering, mit Ausnahme des Auftretens von Thripsen (Thysanoptera), Moosknopfkäfern und auch von Rübenaskäfern, letzterer nur im Versuchsjahr 2021 am Standort Braunschweig (Tab. 12). Das Auftreten der schwarzen Bohnenblattlaus war insgesamt nicht stark, aber im Einzelfall wurden die Rüben bei Schadschwellenüberschreitung mit einem Insektizid behandelt. Daneben gab es auch weitere Schadinsekten-Taxa, die in allen Jahren vorkamen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Bedeutung der einzelnen Taxa sehr unterschiedlich ist. Thripse verursachen zu Beginn bei noch kleinen Pflanzen Schäden, die sich aber im Allgemeinen wieder verwachsen. Zwergzikaden traten zwar häufig auf, die potenziell SBR-übertragende Schilfglasflügelzikade wurde jedoch nicht gefunden. Collembolen (Springschwänze, Kugelspringer) waren sehr häufig und einzelne Arten können gelegentlich Jungpflanzen schädigen. Im Projektzeitraum war es nicht möglich, diese taxonomische Gruppe weiter aufzuschlüsseln. Daher werden nur Kugelspringer und andere Springschwänze aufgeführt.

Die Anzahlen der Moosknopfkäfer beider Standorte des Versuchsjahres 2021 sind hier beispielhaft für ein typisches Schadinsekt der Zuckerrübe dargestellt (Abb. 10). Im gesamten Beprobungszeitraum gab es keine oder nur wenige signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Unkrautkontrollverfahren, so z. B. in Kalenderwoche 24 zwischen der chemischen und den anderen Varianten. In allen Versuchsjahren war das Bild vergleichbar.



Abbildung 10: Gesamte Anzahl von Moosknopfkäfern an den beiden Standorten 2021 in den Photoelektorfängen; S=Flächenspritzung, HS=Hacke zw. d. Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen; H=Hacke i. und zw. den Reihen.

Mittels des Eco-Vac-Insektensaugers wurden nur geringe Anzahlen an Schadinsekten und nur einzelne epigäische Raubarthropoden, insbesondere Spinnen, erfasst. Die hauptsächlich erfassten Schadinsekten waren die an der Rübe kaum relevanten Zwergzikaden der Gattung *Empoasca*. Die Schilfglasflügelzikade trat auch in Fängen mit dieser Methode nicht auf.

Bei der Sichtbonitur auf Schadinsekten an den Rübepflanzen gab es im Allgemeinen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten. Zu einzelnen Terminen (Abb. 11) sieht man signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen, allerdings sind diese nicht gleichgerichtet.

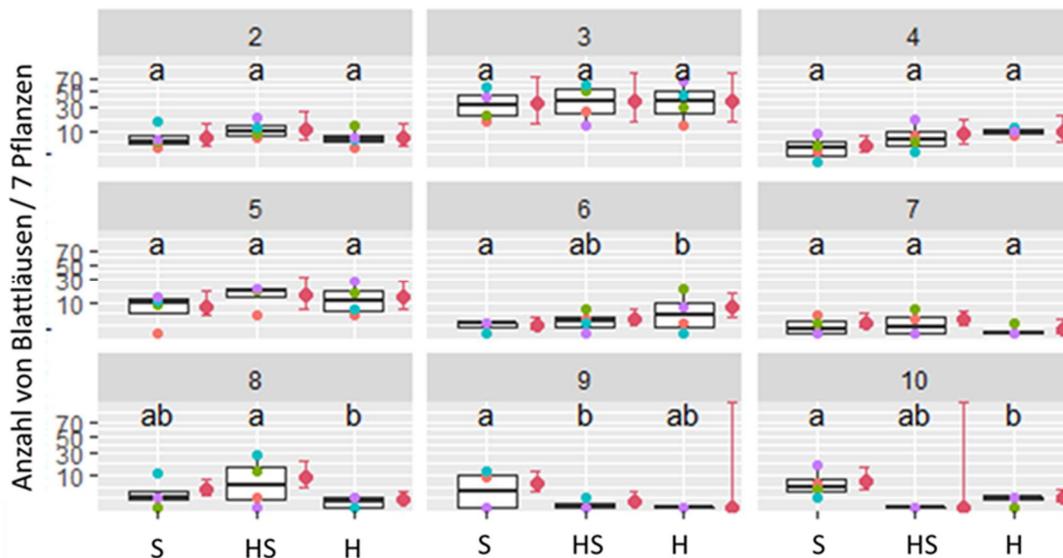


Abbildung 11: Gesamte Anzahl von Blattläusen (*Aphis fabae*, *Myzus persicae*, *Macrosiphum euphorbiae*, *Aulacorthum solani*) in der Sichtbonitur in Böhle 2020, S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. d. Reihen und Bandspritzung i. d. Reihen, H = Hacke i. und zw. d. Reihen

An den Pflanzen wurde im Wesentlichen die Schwarze Bohnenblattlaus in allen Jahren und die Rübenmotte vor allem im Versuchsjahr 2019 festgestellt. Andere Schadinsekten (Gammaeule, andere Eulenfallterraupen, Rübenerdföhe) traten nur in geringen Anzahlen auf.

Prädationsversuche

In den Prädationsversuchen mit Blattlauskarten und Raupenattrappen hatte das Verfahren der Unkrautbekämpfung 2020 an keinem Versuchsstandort (Böhle und Braunschweig) einen Einfluss auf die Prädationsleistung. Demgegenüber zeigten die Ergebnisse aus dem Versuchsjahr 2021, dass das mechanische Unkrautkontrollverfahren möglicherweise einen negativen Einfluss auf die Prädationsleistung hat (Abb 12). Inwieweit dies in Zusammenhang mit den epigäischen Raubarthropoden steht, ist jedoch unklar, da deren Populationen nicht vermindert waren. In der Studie von Brust et al. 1986 zeigte sich, dass die Prädatorendichten erst nach drei Wochen nach der letzten landwirtschaftlichen Bearbeitung anstiegen. Eine Auswirkung der mechanischen Hacke auf Prädatoren kann daher nicht ausgeschlossen werden. Es müssten aber noch weitere Untersuchungen hinsichtlich dieser Ergebnisse durchgeführt werden, da möglicherweise auch andere Prädatorengruppen als die hier untersuchten betroffen sind. Marienkäfer und ihre Larven, räuberische Wanzen sowie Florfliegenlarven wären zum Beispiel solche Gruppen, die hauptsächlich auf Pflanzen, teilweise aber auch am Boden aktiv sind.

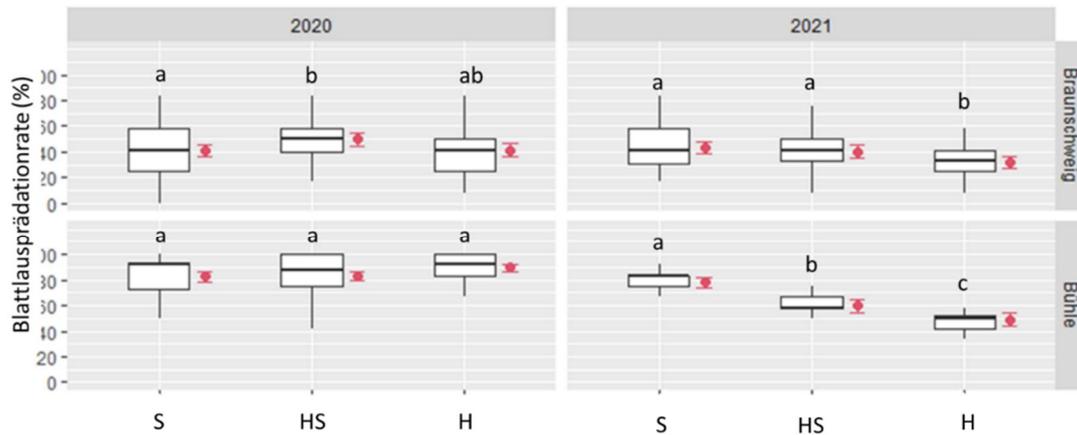


Abbildung 12: Prädation an aufgeklebten Erbsenblattläusen auf Blattlausarten 2020 und 2021 an je zwei Standorten, S = Flächenspritzung, HS = Hacke zw. d. Reihe und Bandspritzung i. d. Reihe, H=Hacke i. und zw. den Reihen

Präferenzversuche

Alle bezüglich der Präferenz für die unterschiedlichen Bodenstrukturen untersuchten Laufkäferarten hielten sich im Laborversuch zur Präferenz häufiger im aufgerauten, grob strukturierten Bereich auf (Abb. 13). Die Präferenzen für den aufgerauten Boden sind bei den Arten jedoch möglicherweise unterschiedlich stark. Für eine detailliertere Aussage hinsichtlich der einzelnen Arten müssen allerdings noch weitere Versuche durchgeführt werden.

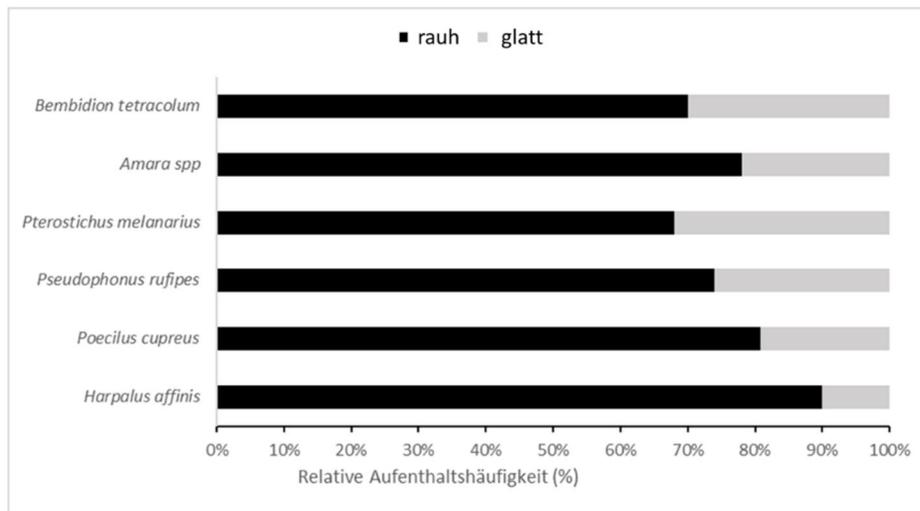


Abbildung 13: Aufenthaltshäufigkeit 6 verschiedener Laufkäferarten auf aufgerautem und geglättetem Boden im Präferenzversuch.

4.3 Regenwürmer (lfZ)

Das Spektrum der Regenwurmarten war an den 5 untersuchten Standorten sehr ähnlich. Die endogäische Arten machten 55-70% der gesamten Regenwurmzahl aus. Die übrigen 30-45% der Regenwürmer gehörten zur anektischen Gruppe, die ausschließlich durch *L. terrestris* vertreten war. Von den endogäischen Regenwürmern stammten ca. 95% aus der Art *A. caliginosa*, 2-3% gehörten zur Art *O. lacteum*. Außerdem wurden einige wenige Individuen von *A. rosea* gefunden. Somit waren *A. caliginosa* und *L. terrestris* an allen Untersuchungsstandorten die dominierenden Arten. Die herbstlichen Abundanzen der juvenilen/adulten anektischen oder juvenilen/adulten endogäischen Regenwürmer wurde weder durch das Unkrautbekämpfungsverfahren noch durch die Interaktion von Standort und Unkrautbekämpfungsverfahren signifikant

beeinflusst (Abb. 14). Beim Vergleich der drei Unkrautbekämpfungsverfahren hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Regenwurmabundanz wurde die chemische Unkrautbekämpfung als Referenzbehandlung verwendet, da frühere Studien keine negativen Auswirkungen auf Regenwürmer durch Herbizide feststellten (Marwitz et al. 2012). Ähnlich hohe Abundanzen von endogäischen Regenwürmern bei mechanischer und chemischer Unkrautkontrolle deuten darauf hin, dass entweder die Arbeitstiefe der Hacke (3-4 cm) nicht tief genug war, um die Abundanz endogäischer Regenwürmer zu beeinflussen, oder dass sich die Population von Juni bis Oktober erholen konnte. Marinissen et al. (1992) stellten fest, dass, obwohl die Hälfte aller *A. caliginosa*-Individuen im April durch die Rollhacke getötet wurde, einen Monat später die Abundanz von *A. caliginosa* höher war als vor dem Hacken. Boström (1995) berichtete, dass die Rollhacke mit einer Arbeitstiefe von 7 cm eine hohe Mortalität von 61-68% von *A. caliginosa* verursachte. Ein Jahr später konnte sich die Population jedoch wieder auf ihr ursprüngliches Niveau erholen. Auch im Falle von *L. terrestris*, konnten wir keinen negativen Effekt der mechanischen Unkrautbekämpfung nachweisen.

Während sich Individuen des adulten *L. terrestris* tagsüber tief im Boden befinden können (Laird et al. 1981, Krumm 2005), halten sich die Jungtiere von *L. terrestris* im Alter von bis zu 12 Wochen ständig in der Nähe der Bodenoberfläche auf (Lowe & Butt 2002, Butt & Lowe 2007). Daher erwarteten wir, dass die Jungtiere von *L. terrestris* durch das Hacken negativ beeinflusst werden. Bei einer durchschnittlichen Inkubationszeit von 3 Monaten bei 15°C (Butt 1993) konnten aber mögliche Verluste von Jungtieren im Mai/Anfang Juni durch neue Schlüpflinge bis September/Oktober ausgeglichen werden.

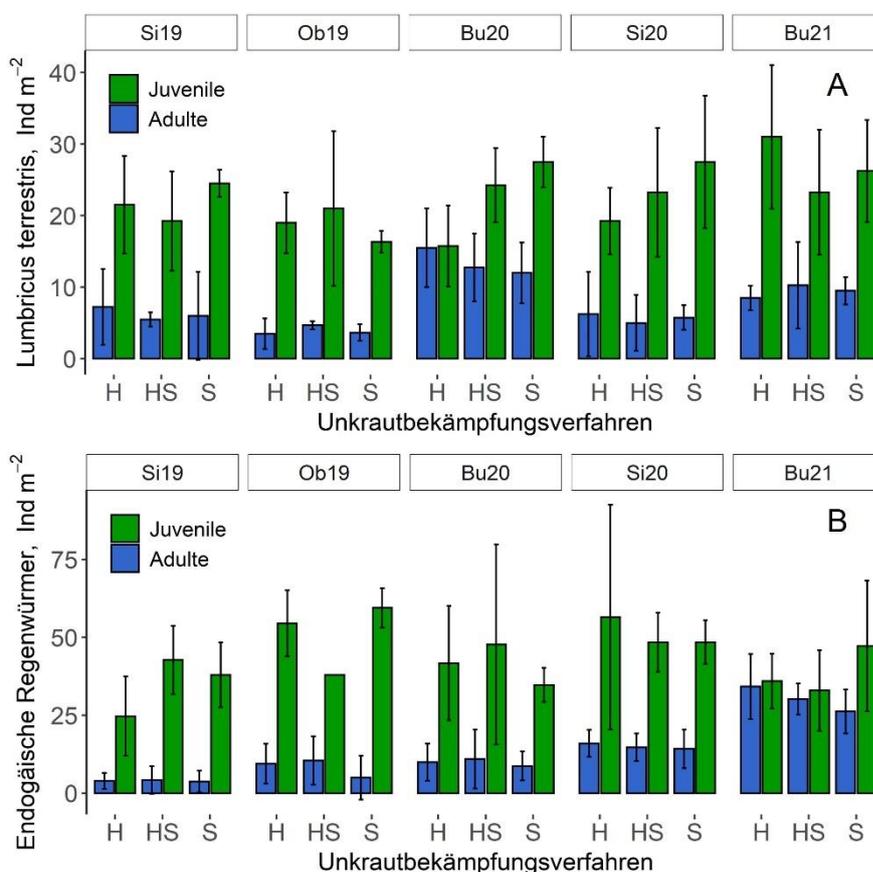


Abbildung 14: Einfluss des Unkrautbekämpfungsverfahrens in Zuckerrüben auf die Abundanz (Mittelwert \pm Standardabweichung, $n=4$) von adultem und juvenilem *L. terrestris* (A) und adulten und juvenilen endogäischen Regenwürmern (B) im Herbst. Unterschiede zwischen den drei Verfahren waren nicht signifikant ($p \leq 0.05$). H = Hacken, HS = Bandspritzung i. d. Reihe und Hacken zw. d. Reihen, S = Flächenspritzung

4.4 Ökotoxikologische regionale Risikobewertung mit SYNOPSIS-GIS (JKI-SF, IfZ)

Das akute aquatische ($ETRA(aqu)$) und chronische Risiko für Bodenorganismen ($ETRC(bod)$) durch die konventionelle Flächenspritzung variierte stark zwischen den Boden-Klima-Räumen (BKR), aber auch zwischen den 8 Untersuchungsjahren (2011 - 2018). In den meisten BKR und Jahren war das 90. Perzentil des akuten aquatischen Risikos mit $\leq 0,1$ sehr niedrig. In einigen BKR (101, 152, 154, 157, 158) lag das 90. Perzentil des akuten aquatischen Risikos jedoch in allen 8 Untersuchungsjahren bei 0,2-0,8, was einem geringfügig erhöhten, aber insgesamt noch niedrigen Risiko entspricht (Abb. 15). In den meisten BKR blieb das chronische Risiko für Bodenorganismen mit 0,1-0,2 niedrig, stieg jedoch in einzelnen BKR (105, 151, 153, 156) auf 1,0-1,5 an was als erhöhtes Risiko eingestuft wird (Tab. 4). Auffallend ist, dass die Risikowerte zwischen den BKR selbst innerhalb einer CEPI-Region (aquatisches Risiko: A, B, D; terrestrisches Risiko: A, D und E) stark variierten (Abb. 15) Da die Wirkstoffe, Ausbringungsmengen und die Reihenfolge der applizierten Herbizide innerhalb einer CEPI-Region identisch waren, müssen die Unterschiede im toxikologischen Risiko auf die Variabilität der Umweltbedingungen zwischen den BKR zurückzuführen sein. Die BKR mit permanent höherem akuten aquatischen ($>0,1$) oder chronischen terrestrischen ($>0,5$) Risiko befinden sich alle in Norddeutschland (Abb. 16). Das höhere aquatische Risiko in den nördlichen Gebieten könnte mit der höheren Gewässerdichte dort zusammenhängen. Das aquatische Risiko zeigte eine negative Korrelation mit dem Mindestabstand zu Gewässern ($r_{\text{Spearman}} = -0,66$, $p\text{-value} < 2,2e^{-16}$). Die Gründe für das erhöhte terrestrische Risiko für Bodenorganismen im Norden müssen noch geklärt werden. Das 90. Perzentil des chronischen aquatischen Risikos ($ETRC(aqu)$) und das 90. Perzentil des akuten Risikos für Saumbiotope ($ETRA(saum)$) blieb in allen BKR gering und wird hier nicht dargestellt.

In Abb. 17A ist das 90. Perzentil des toxikologischen Risikos für kombinierte Unkrautbekämpfungsverfahren mit reduzierter Herbizidaufwandmenge sowie für konventionelle Flächenspritzungen in 6 BKR dargestellt. Für diesen Vergleich wurde ein BKR pro CEPI-Region ausgewählt, dessen toxikologisches Risiko bei der Flächenspritzung höher war als das der anderen BKR derselben CEPI-Region. Die Verringerung der Ausbringungsmenge konventioneller Herbizide bewirkte auch die Verringerung des damit verbundenen toxikologischen Risikos. Der Unterschied zwischen den Verfahren mit 63 % und 44 % der Herbizidaufwandmenge war jedoch beim akuten aquatischen Risiko und in einzelnen Regionen auch beim chronischen Risiko für Bodenorganismen nicht signifikant (Abb. 17A). Ansonsten bestand ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Aufwandmenge konventioneller Herbizide und dem damit verbundenen toxikologischen Risiko (Tab. 13). Dabei muss beachtet werden, dass die Größe des berechneten Risikos vom Aggregationsniveau abhängt. So lag beispielsweise das 90. Perzentil des akuten aquatischen Risikos der Flächenspritzung in allen BKR <1 (Abb. 15), war jedoch für 1759 Feldjahren in Deutschland (0.5 % aller Feldjahre) >1 . Je größer die Aggregationsfläche, desto niedriger ist offensichtlich das Risiko. So ergibt die Berechnung des 90. Perzentils des aquatischen und terrestrischen Risikos für Deutschland insgesamt (Abb. 17B) geringere Werte als die Berechnung auf BKR-Ebene (Abb. 17A).

Das Verfahren mit dem neuen Herbizid CONVISO ONE verursachte trotz geringer Aufwandmengen ein ebenso hohes akutes aquatisches Risiko wie die Flächenspritzungen mit konventionellen Herbiziden (Abb. 17A).

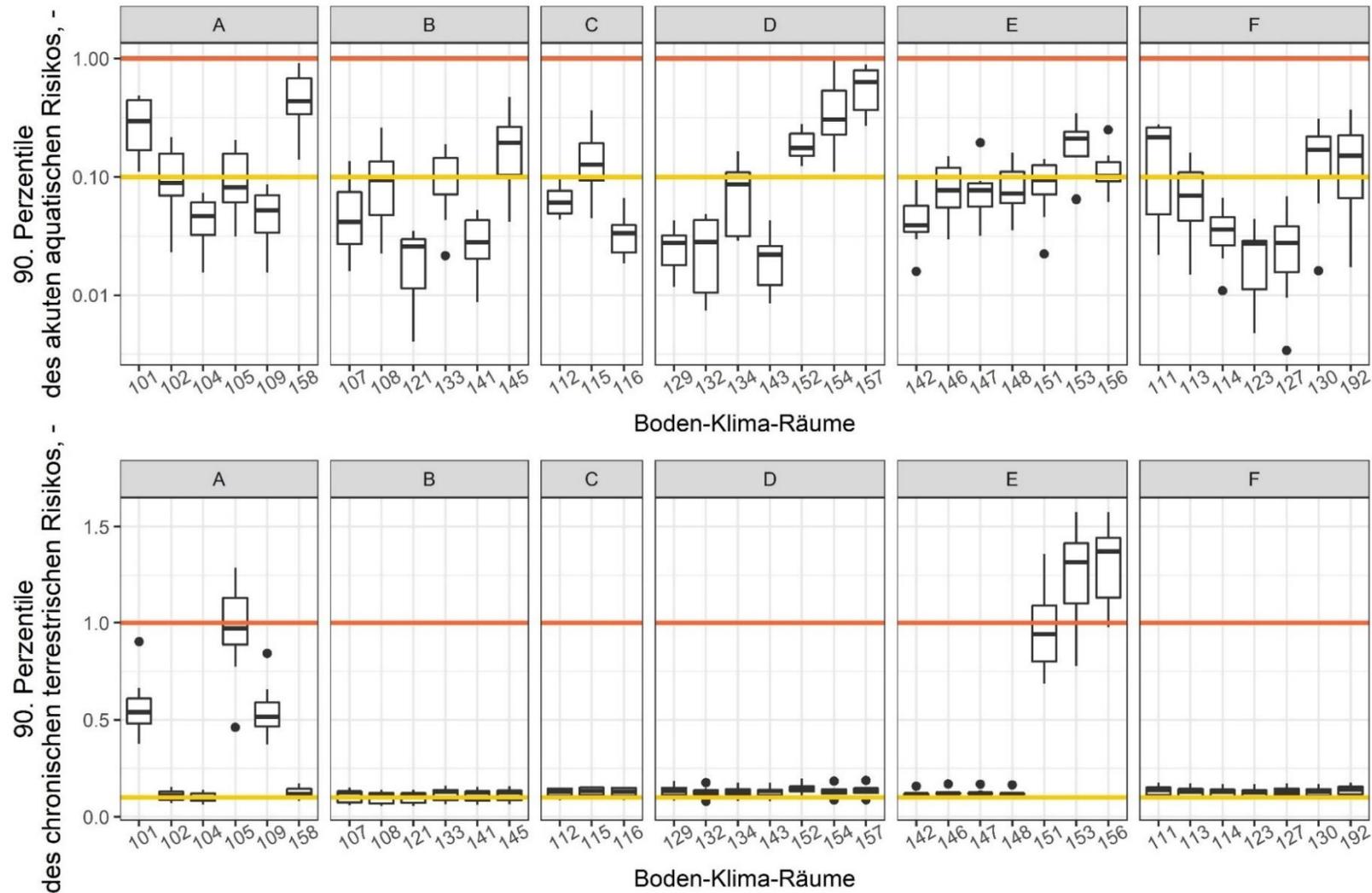


Abbildung 15: 90. Perzentile des akuten aquatischen ($ETR_{A(aqu)}$) und chronischen terrestrischen ($ETR_{C(bod)}$) Risikos in verschiedenen Boden-Klima-Räumen in 6 CEPI-Regionen (A-F). Zur Lage der CEPI-Regionen und Boden-Klima-Räume siehe Abb. 5. Jeder Boxplot umfasst 8 Datenpunkte (8 Jahre, 2011-2018). Die gelbe Linie zeigt den Übergang von sehr niedrigem zu niedrigem Risiko, die orangene Linie den Übergang von niedrigem zu erhöhtem Risiko.

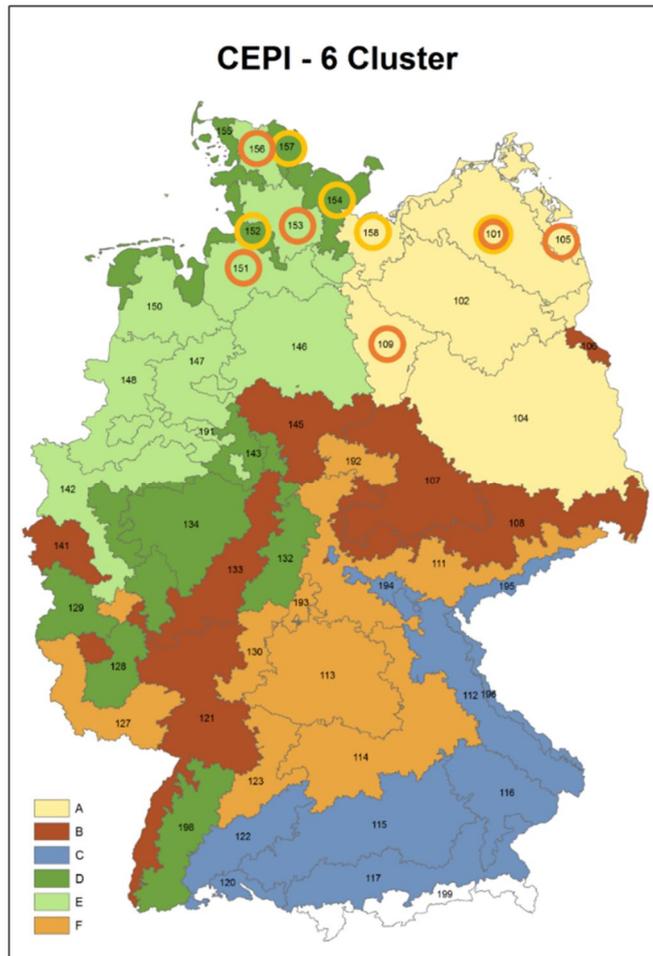


Abbildung 16: CEPI-Regionen (A-F) und Bodenklimaräume (101-198) nach Dachbrodt-Saaydeh et al., 2019. Bodenklimaräume mit einem erhöhten 90. Perzentil des akuten aquatischen ($> 0,1$) und chronischen terrestrischen ($> 0,5$) Risikos (siehe Abb. 4) wurden durch gelbe bzw. orange-farbene Kreise gekennzeichnet. Für die Risikobewertung wurden in SYNOPSIS-GIS CEPI-regions-spezifische generische Anwendungsmuster von Herbiziden (GAMs) verwendet (siehe 3.2.3.)

Betrachtet man alle 36 zuckerrübenproduzierenden BKR in Deutschland so war das akute aquatische Risiko einer zweifachen Bandapplikation von Conviso One in 10 BKR signifikant höher und in 6 BKR signifikant niedriger als bei einer Flächenspritzung von konventionellen Herbiziden (Abb. 18). In den BKR 152 und 158 verursachte das Verfahren Conviso One in einigen Jahren sogar ein erhöhtes akutes aquatisches Risiko ($ETR > 1$). Der Grund für die höhere aquatische Toxizität des Conviso-Verfahrens ist eine starke Empfindlichkeit der Wasserlinse (*Lemna minor*) gegenüber den beiden Wirkstoffen des Conviso-Herbizids ($EC_{50} = 0,001 \text{ mg L}^{-1}$ für Thiencarbazone-methyl und Foramsulfuron). Dagegen war das chronische Risiko für Bodenorganismen in allen Regionen und Jahren beim Conviso-Verfahren im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung deutlich geringer (Abb 17A). In dieser Studie wurde die SYNOPSIS GIS-Risikobewertung nur für die Reihenanwendung von CONISO ONE durchgeführt. Da es jedoch einen linearen Zusammenhang zwischen Aufwandmenge und Risikowerten für konventionelle Herbizide gibt (Tab. 13), ist davon auszugehen, dass eine Erhöhung der Aufwandmenge um den Faktor 2,3 im Falle der Flächenanwendung von CONVISIO One den Risikowert entsprechend erhöht.

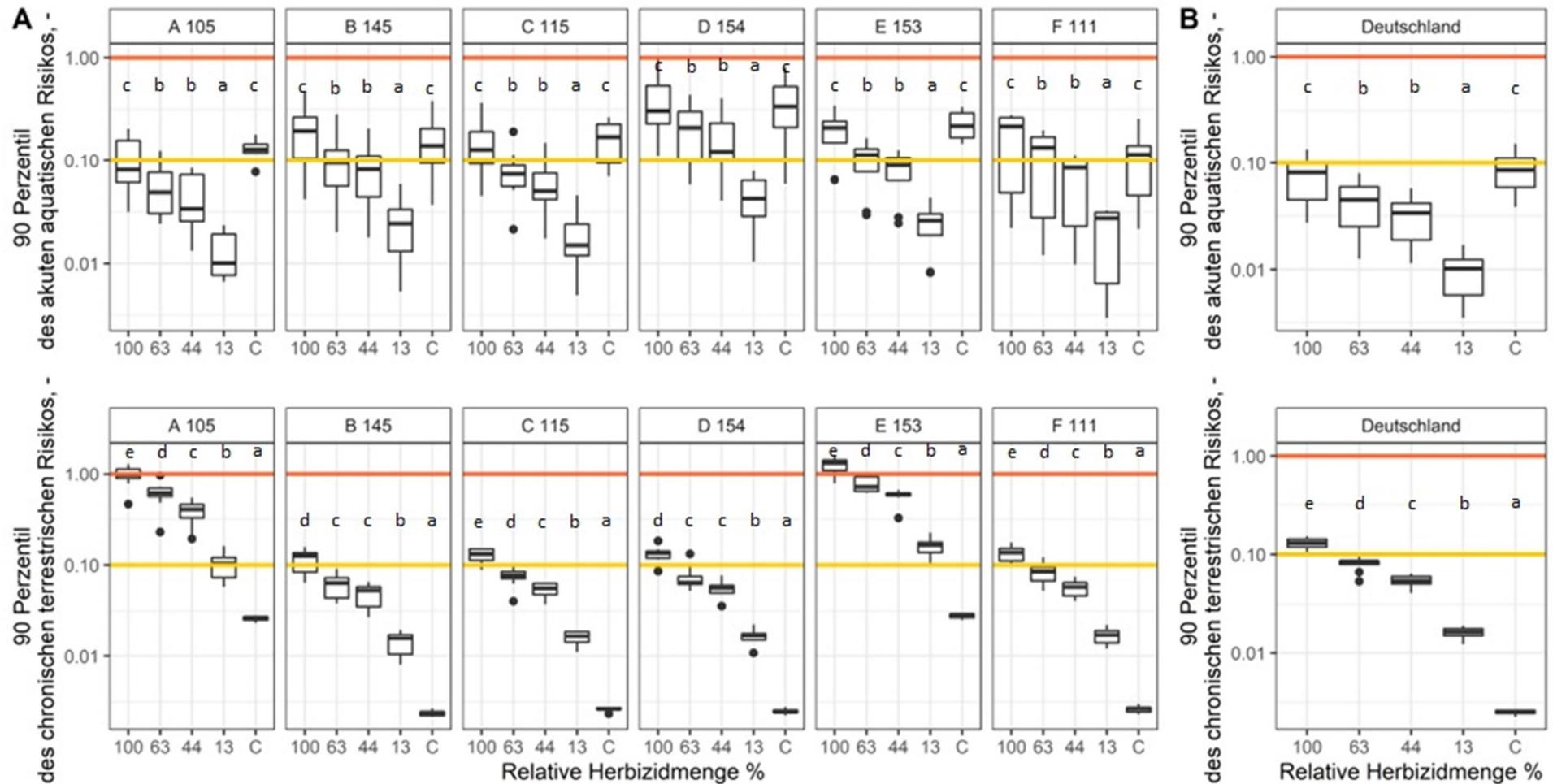


Abbildung 17: Toxikologisches Risiko ($ETR_{A(aqu)}$; $ETR_{C(bod)}$) von Unkrautbekämpfungsverfahren mit reduzierter Herbizidmenge im Vergleich zu dem Risiko der konventionellen Flächenspritzung für ausgewählte Boden-Klima-Räume (105, 145, 115, 154, 153, 111) in den CEPI-Regionen A-F (A) und für alle CEPI-Regionen (B). Die Lage der CEPI-Regionen und Boden-Klima-Räume ist Abb. 5 zu entnehmen. Jeder Boxplot umfasst 8 Datenpunkte für 8 Jahre (2011-2018). Die Unkrautbekämpfungsverfahren sind in Tab. 6 beschrieben. Signifikante Unterschiede zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren sind mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

Aus Abb. 18 ist ersichtlich, dass das akute aquatische Risiko in diesem Fall bei einigen BKR auf ≥ 1 ansteigen würde und für das jeweilige BKR als erhöhtes Risiko eingestuft werden müsste. Im JKI-Geoportal werden die mit SYNOPSIS-GIS berechneten ökotoxikologischen Risiken in Form von interaktiven Karten dargestellt. Dies ermöglicht den Vergleich des toxikologischen Risikos für verschiedene Regionen, Aggregationsstufen und Unkrautbekämpfungsverfahren für einzelne Jahre von 2011 - 2018. Darüber hinaus bietet die Anwendung die Möglichkeit, das Flächenverhältnis zwischen konventioneller Flächenspritzung und einem anderen Unkrautbekämpfungsverfahren (z. B. mechanische Unkrautbekämpfung) in Deutschland einzustellen. So kann das Risiko für verschiedene Verfahrenskombinationen bewertet werden.

Tabelle 13: Verhältnis zwischen Herbizidaufwandmenge und toxikologischem Risiko.

Unkrautbekämpfungsverfahren	Relative Herbizidmenge (%)	Akutes aquatisches Risiko (% des Risikos bei Flächenspritzung) (Mittelwert (±SA))	Chronisches terrestrisches Risiko (Mittelwert (±SA))
3x Flächenspritzung (GAM) ^[1]	100	100,0 (0,0)	100,0 (0,0)
1x Flächenspritzung (NAK 1) + 2x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	63	54,3 (3,8)	58,7 (3,3)
3x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	44	41,8 (0,8)	42,2 (2,1)
3x Punktspritzung (auf 12,5 % der Fläche, 10 cm x 10 cm Spritzfenster) + 3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen	13	12,5 (0,6)	12,2 (0,9)
2x Bandspritzung i. d. Reihe mit Conviso One 0,5 l/ha + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	C	105,0 (27,3)	2,2 (0,3)

^[1] Im Durchschnitt wurden 3 Herbizidanwendungen durchgeführt. Wie in 3.2 beschrieben, wurden jedoch für jede CEPI-Region drei GAM mit drei Intensitätsstufen erstellt, so dass die Anzahl der Herbizidspritzungen auf jedem Rübenfeld zwischen 2 und 4 variieren kann.

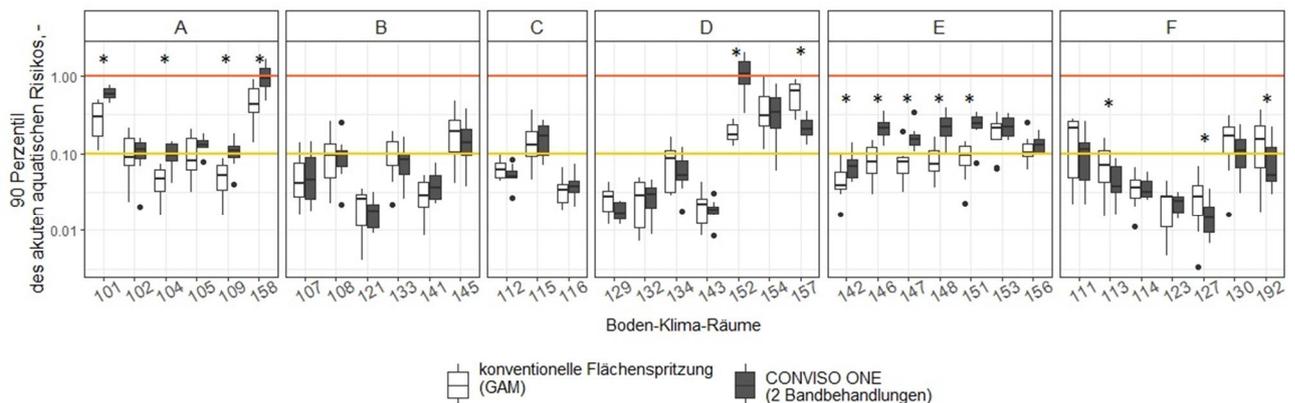


Abbildung 18: Regionale Variabilität des akuten aquatischen Risikos ($ETR_{A(aqu)}$) für eine Conviso One-Herbizidapplikation im Bandverfahren im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung nach dem jeweiligen generischen Applikationsmuster.

4.5 Rohstoffverbrauch, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen (IfZ)

Die Ergebnisse der Berechnungen des Ressourcen- und Energieverbrauchs sowie des CO₂-Fußabdrucks für verschiedene Unkrautbekämpfungsverfahren sind in Tab. 14 zusammengefasst. Der Dieselverbrauch war bei der mechanischen Unkrautbekämpfung 5–7-mal höher als bei der 3-

fachen Flächenspritzung. Erstens ist die Flächenleistung einer Schlepperhacke im Vergleich zu einer Feldspritze deutlich geringer und zweitens sind zusätzliche Fahrten erforderlich, um Arbeitskräfte für das Hacken von Hand zum Feld zu bringen. Bei der kombinierten Methode mit Bandspritzen in der Reihe und Schlepperhacke zwischen den Reihen ist der Dieserverbrauch im Vergleich zur mechanischen Unkrautbekämpfung deutlich geringer, aber immer noch etwa 4-mal so hoch wie beim chemischen Verfahren. Zu beachten ist dabei, dass die Berechnungen auf der Annahme beruhen, dass die Bandspritzung mit einer praxisüblichen Feldspritze und nicht mit der traditionellen 6-12-reihigen Bandspritze durchgeführt wird. Die ersten Feldspritzen, die auch eine Bandapplikation durchführen können, sind bereits auf dem Markt, so dass wir mit den Berechnungen den aktuellen Stand der Technik berücksichtigen. Die zeitgleiche Durchführung des Hackens zwischen den Reihen und der Bandspritzung in der Reihe mindert die Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung, so dass es sich empfiehlt, beide Maßnahmen getrennt anzuwenden. Die getrennte Anwendung einer 12-reihigen Bandspritze, die mit einer Schlepperhacke kombiniert ist, erhöht den Dieserverbrauch auf das Niveau der intensiven mechanischen Unkrautbekämpfung. Die einzige kombinierte Methode, die den Dieserverbrauch deutlich auf $1,2 \text{ L ha}^{-1}$ reduziert, ist die mit Solarstrom betriebene Roboterhacke kombiniert mit einer Herbizid-Punktspritzung (Nr. 4. Tab. 14). Der fossile Energieverbrauch der mechanischen Unkrautbekämpfung hängt stark von der Häufigkeit der Hackvorgänge ab und war 42 % höher bei der intensiven (Nr. 7) und 3 % niedriger bei der extensivsten (Nr. 10) mechanischen Unkrautbekämpfung im Vergleich zur konventionellen chemischen Unkrautbekämpfung (Nr. 1). Obwohl die Herstellung von Herbiziden energieintensiv ist, verursacht die Herstellung und Verbrennung von Diesel einen noch höheren Energieverbrauch, zumindest auf mittel bis stark verunkrauteten Standorten. Noch deutlicher wird der Unterschied zwischen chemischer und mechanischer Unkrautbekämpfung bei den THG-Emissionen. Je nach Intensität verursacht mechanische Unkrautregulierung um 71-150 % höhere THG-Emissionen im Vergleich zur chemischen Unkrautregulierung. Grund dafür ist der höhere CO_2 -Fußabdruck der Dieselproduktion und -verbrennung im Vergleich zur Herstellung von Herbiziden. Die Kombination aus Bandspritze und Schlepperhacke (Nr. 3) zeigt einen um 23 % geringeren Energieverbrauch und um 46 % geringere THG-Emissionen im Vergleich zur intensiven mechanischen Unkrautbekämpfung (Nr. 7), aber einen um 14 % höheren Energieverbrauch und um 42 % höhere THG-Emissionen im Vergleich zur chemischen Unkrautbekämpfung (Nr. 1).

Die Ergebnisse zeigen, dass die chemische Unkrautbekämpfung zwar den höchsten Herbizidaufwand, aber auch den niedrigsten Dieserverbrauch und die geringsten THG-Emissionen unter den derzeit verfügbaren Unkrautbekämpfungsverfahren aufweist.

Eine deutliche Verbesserung in Bezug auf den Dieserverbrauch und die Klimafreundlichkeit würde die solarbetriebene Roboterhacke mit Spotapplikation erbringen. Diese würde den Herbizidaufwand um 87 %, den Dieserverbrauch um etwa das 3-fache, den Energieverbrauch um 49 % und die THG-Emissionen um 27 % gegenüber der chemischen Unkrautbekämpfung senken. Auffallend ist, dass der Rückgang der THG-Emissionen deutlich geringer ausfällt als die starke Reduzierung des Dieserverbrauchs und des Herbizideinsatzes. Der Grund dafür ist ein größerer CO_2 -Fußabdruck bei der Herstellung von Solarzellen für Roboter im Vergleich zu herkömmlichen Solarzellen für die Stromerzeugung (siehe Kap. 3.3).

Die Flächenspritzung von Conviso One (Nr. 6), die ab 2023 für nicht drainierten Flächen verfügbar sein wird, zeichnet sich durch den geringsten Energieverbrauch und die geringsten THG-Emissionen unter allen Verfahren aus. Die Reihenanwendung von Conviso One in Kombination mit einer Schlepperhacke (Nr. 5) erfordert dagegen 33 % höhere THG-Emissionen im Vergleich zur konventionellen chemischen Unkrautbekämpfung (Nr. 1).

Tabelle 14: Ressourcen- und Energieverbrauch sowie Treibhausgasemissionen für chemische, kombinierte mechanisch-chemische und mechanische Unkrautbekämpfungsverfahren.

Nr.	Unkrautbekämpfungsverfahren	Herbizide, kg ha ⁻¹	Diesel, L ha ⁻¹	Fossile Energie, MJ ha ⁻¹	Fußab- druck, CO _{2e} kg ha ⁻¹
1	3x Flächenspritzung	4,2	3,2	1434,0	75,2
2	1x Flächenspritzung (NAK 1) + 2x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	2,6	12,7	1865,6	137,3
3	3x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	1,9	12,7	1659,2	128,9
4	3x Punktspritzung (auf 12.5 % der Fläche. 10 cm x 10 cm Spritzfenster) + 3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen	0,5	0,7	695,7	51,6
5	2x Bandspritzung i. d. Reihe mit Conviso One 0.5 L/ha + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	0,035	11,6	1065,4	99,1
6	2x Flächenspritzung mit Conviso One 0.5 L/ha (nicht dränierete Flächen)	0,08	2,1	222,8	20,1
7	3x Schlepperhacke zw. den Reihen + 2x Handhacke	0,0	23,5	2040,2	187,8
8	2x Striegel+2x Schlepperhacke zw. d. Reihen + 2x Handhacke	0,0	23,0	1992,1	183,1
9	2x Striegel+2x Schlepperhacke zw. d. Reihen + 1x Handhacke	0,0	18,3	1608,6	148,5
10	1x Striegel+2x Schlepperhacke zw. d. Reihen + 1x Handhacke	0,0	16,0	1396,9	128,9
11	3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen + 1x Handhacke	0,0	4,0	810,1	91,0

4.6 Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung und Ertrag (IfZ)

Die untersuchten Standorte waren durch einen insgesamt geringen Unkrautdruck gekennzeichnet. Die Bestimmung des Unkrautwirkungsgrades WG1 nach der Standardberechnungsmethode (Gl. [1], S. 11) war in einigen Fällen nicht möglich, weil die Anzahl der Unkräuter vor der Unkrautbekämpfung mit <5 Pflanzen auf der gesamten Boniturfläche zu gering war. Die Beprobungsfläche von 1,5 m² pro Parzelle im Jahr 2019 war für Si19 eindeutig zu klein. Aber auch eine deutlich größere Beprobungsfläche von 16 bis 21 m² in den Folgejahren reichte in einigen Fällen nicht aus, um WG1 zuverlässig zu bestimmen. Deshalb weist das Balkendiagramm Abb. 19 zahlreiche Lücken auf.

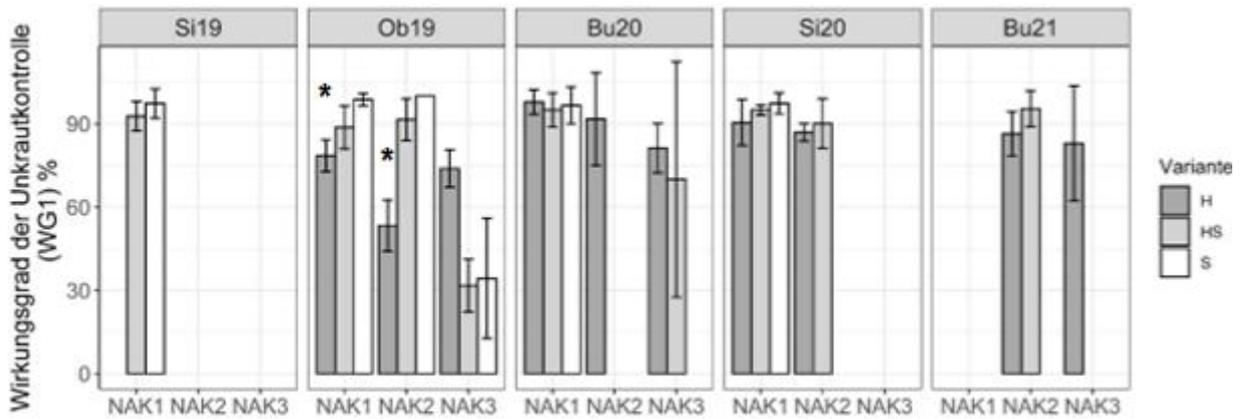


Abbildung 19: Wirkungsgang der Unkrautkontrolle (Gl.[1]). Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Datenlücken an manchen Stellen (zB Si19 für NAK2) bezeichnen die Fälle, wo die Zahl der Unkräuter vor jeweiliger Maßnahme <5 war und daher konnte WG1 nicht zuverlässig bestimmt werden. Das Sternchen bezeichnet einen signifikanten Unterschied im Vergleich zur chemischen Unkrautregulierung.

Nur am Standort Ob19 war es möglich, den Wirkungsgang WG1 für alle Unkrautbekämpfungsmaßnahmen und alle Varianten zu berechnen. In Ob19 war WG1 bei der mechanischen Unkrautbekämpfung für die 1. und 2. Anwendung signifikant niedriger als bei der chemischen Unkrautbekämpfung. Bei der 3. Unkrautbekämpfung erfolgte die Herbizidapplikation bei der chemischen und der kombinierten Variante zu spät. Dadurch war die Effizienz dieser beiden Maßnahmen bei der dritten Unkrautbekämpfung geringer. Bei Bu20 und Si20 konnte WG1 nur für die erste Unkrautbekämpfung berechnet werden und unterschied sich in beiden Fällen nicht zwischen den Varianten. Der anhand von Gleichung 2 berechnete Wirkungsgang der Unkrautbekämpfung (WG2) zeigte eine geringere Effizienz der mechanischen im Vergleich zur chemischen Unkrautbekämpfung nur in Si19, nicht aber in Bu20, Si20 und Bu21 (Abb.20).

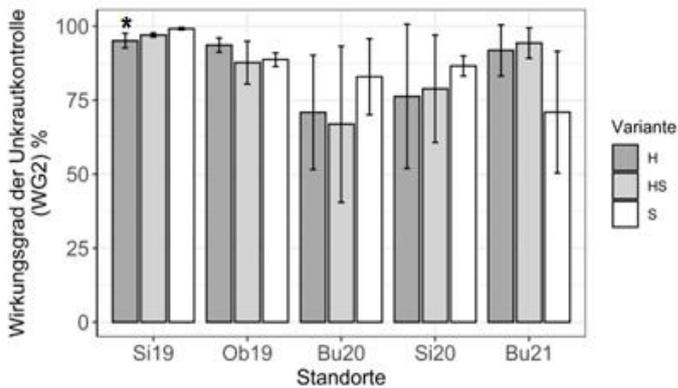


Abbildung 20: Wirkungsgang der Unkrautkontrolle, berechnet mit Gl.[2], bei mechanischer (H), kombinierter (HS) und chemischer (S) Unkrautkontrolle auf 5 Standorten. *Unterschied signifikant zur chemischen Unkrautregulierung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Effizienz der Unkrautbekämpfung an drei von fünf Standorten nicht von der Unkrautbekämpfungsverfahren beeinflusst wurde, war aber an 2 der 5 Standorte geringer für die mechanische im Vergleich zur chemischen Unkrautbekämpfung. Die Bestandesdichte im Oktober unterschied sich nicht zwischen den Varianten (Abb 21). Auch der Zuckergehalt war nicht durch die Unkrautbekämpfungsverfahren beeinflusst (Abb 22). Der Rübenenertrag war nur an einem der 5 untersuchten Standorte um 7 t ha^{-1} signifikant niedriger bei der mechanischen und kombinierten als bei der chemischen Unkrautkontrolle. Die Ursache für die Reduzierung des Rübenenertrages in den gehackten Parzellen bleibt unklar. Der Wirkungsgrad der Unkrautbekämpfung war zwar an diesem Standort durch das Hacken reduziert aber nicht die Restverunkrautung, die an diesem Standort insgesamt niedrig war. Eine mögliche Ursache könnte die ungenaue Einstellung der Hackschare bei einem der ersten Hacktermine in Si19 gewesen sein, bei der die Schare sehr nahe an den Rübenpflanzen vorbeigeführt wurden, so dass die Seitenwurzel der Pflanzen verletzt wurden. Dies könnte sich auf das Rübenwachstum und Rübenenertrag, nicht aber auf Bestandesdichte negativ ausgewirkt haben. An den 4 anderen Standorten war Rüben- und auch Zuckerertrag nicht durch das Unkrautbekämpfungsverfahren beeinflusst (Abb. 22).

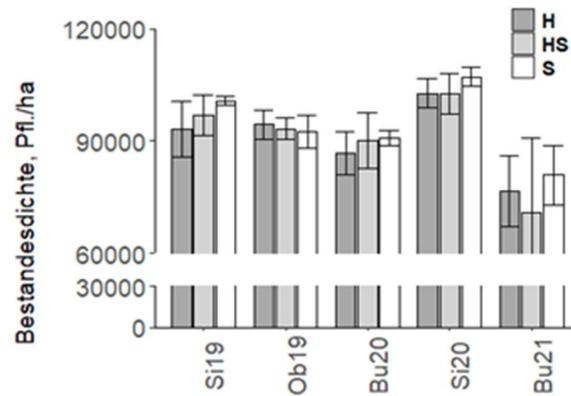


Abbildung 21: Bestandesdichte im Oktober an 5 Standorten bei mechanischer (H), kombinierter (HS) und chemischer (S) Unkrautkontrolle. Unterschiede zwischen den Varianten nicht signifikant

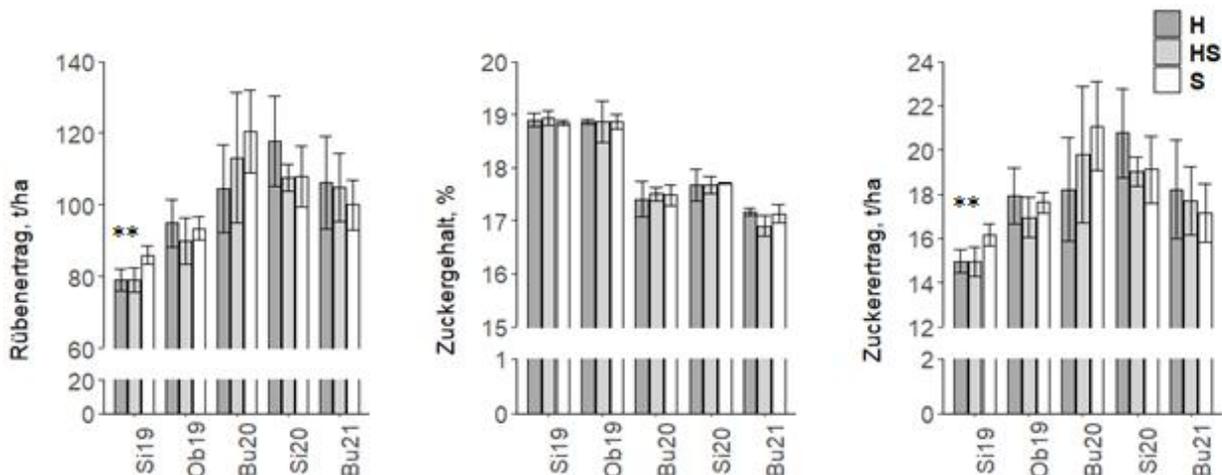


Abbildung 22: Rübenenertrag (links), Zuckergehalt (Mitte) und Zuckerertrag (rechts) bei mechanischer (H), kombinierter (HS) und chemischer (S) Unkrautkontrolle an 5 Standorten. *Unterschied zur chemischen Unkrautkontrolle signifikant.

4.7 Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage, Kosten und Arbeitszeitbedarf (lfZ)

Die Anzahl der für die Unkrautbekämpfung zur Verfügung stehenden Feldarbeitstage wurde für 15 Regionen in Deutschland über einen Zeitraum von 7 Jahren anhand von täglichen Bodenfeuchtwerten, stündlichen Windgeschwindigkeitswerten und literaturbasierten Schwellenwerten für die Bearbeitbarkeit und Befahrbarkeit von sandigem Lehmboden ermittelt. Die Median- und Mindestwerte der 7 analysierten Jahre der Regionen sind in Tab. 15 aufgeführt. Die Medianzahl

der Tage, die für das Hacken zur Verfügung standen, unterschied sich erheblich zwischen den Regionen. Sie war mit 28 Tagen in Regensburg deutlich geringer als in Braunschweig mit 43 Tagen. Demgegenüber war die mittlere Anzahl der Tage, die für Herbizidanwendungen zur Verfügung standen, zwischen den Regionen ähnlich. Im Durchschnitt standen 42 ± 2 bzw. 37 ± 4 Tage des insgesamt 46-tägigen Zeitraums für Herbizidanwendungen und Hacken zur Verfügung. Der Unterschied zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren war signifikant ($p < 0,004$, Abb. 23). Es bestand ein negativer linearer Zusammenhang zwischen dem Medianwert der für die Hacke zur Verfügung stehenden Tage und der mittleren kumulierten Niederschlagsmenge während des für die Unkrautbekämpfung vorgesehenen Zeitintervalls (Abb. 24, $r = -0,7$ nach Pearson, $p = 0,006$). Einziger Ausreißer war der Standort Düsseldorf, der trotz hoher Niederschlagsmengen eine hohe Anzahl an verfügbaren Hackarbeitstagen aufwies. Die minimale Anzahl der verfügbaren Tage der Jahre 2015-2021 betrug durchschnittlich 33 ± 6 und 19 ± 9 Tagen für die Herbizidanwendung und das Hacken. Die geringste Anzahl an verfügbaren Tagen für die Hacke wurde in den nördlichen Zuckerrübenanbaugebieten (Dörnick, Faßberg, Groß Lüsewitz), aber auch in Öhringen und in Regensburg im Süden Deutschlands mit 8 bis 12 Tagen festgestellt. Insgesamt war die Varianz der Anzahl der verfügbaren Hacktage zwischen den Jahren deutlich größer als die regionale Varianz (Abb. 25). Nur im Zuckerrübenanbaugelände Ost Ackerebene war die jährliche Varianz aufgrund der insgesamt geringen Niederschläge im Sommer klein. In allen anderen Regionen gab es im Zeitraum 2015-2021 ein oder mehrere Jahre mit geringer Anzahl der verfügbaren Tage zum Hacken, was die Durchführung mechanischer Unkrautkontrolle an diesen Einzeljahren erschweren bzw. unmöglich machen würde. In trockenen Jahren wiederum lässt sich Hacken in denselben Regionen sehr gut umsetzen (Abb. 25).

Der FarmDroid-Hackroboter kann aufgrund seines geringen Gewichts sofort nach dem Ende eines Regenereignisses weiterarbeiten, ohne den Boden zu verdichten. Nach Tagen mit Dauerregen, an denen auch Robotern nicht arbeiten können, können diese jedoch am Folgetag wieder mit der Unkrautbekämpfung beginnen, da nur die oberen 2 Zentimeter des Bodens abtrocknen müssen. Somit wird die Zeit zum Trocknen deutlich verkürzt und der Roboter hat im Vergleich zur Traktorhacke deutlich mehr Tage für die Feldarbeit zur Verfügung (Abb. 25). Die Mindestanzahl verfügbarer Feldarbeitstage für den FarmDroid -Roboter im Zeitraum 2015-2021 variierte zwischen 35 und 39 Tagen je nach Standort. Trotz geringer Flächenleistung des FarmDroid-Hackroboter im Vergleich zur Schlepperhacke ist diese Anzahl der Arbeitstage ausreichend, um die Unkrautkontrolle durchzuführen.

Der Arbeitszeitbedarf für die rein mechanische Unkrautbekämpfung ist mit $167-174 \text{ h ha}^{-1}$ um ein Vielfaches höher als für die Flächenspritzung mit weniger als 1 h ha^{-1} (Tab. 16, Nr. 7, 8 im Vergleich zu Nr. 1, 6). Die Kosten der mechanischen Unkrautbekämpfung sind mit $2317-2403 \text{ € ha}^{-1}$ 6-7-mal höher als 357 € ha^{-1} bei der Flächenspritzung (Nr. 1). Grund dafür ist die zeit- und damit kostenintensive Handhacke, die für die Beseitigung von Unkraut innerhalb der Rübenreihen erforderlich ist. Da die Roboterhacke auch in den Rübenreihen arbeiten kann, reduzieren sich Kosten und Zeitaufwand für die Handhacke im Vergleich zu anderen mechanischen Verfahren erheblich (Nr. 11). Das Unkraut in der Nähe der Kulturpflanze muss jedoch auch im Hackroboter-Verfahren von Hand entfernt werden, so dass dennoch etwa 60 h ha^{-1} für das manuelle Hacken benötigt werden. Bei den kombinierten Verfahren werden Zeitbedarf und Lohnkosten durch den Wegfall der Handhacke stark reduziert (Nr. 2-5), bleiben aber noch etwa 3-mal so hoch wie bei den chemischen Verfahren (Nr. 1, 6). Der Grund dafür ist, dass Schlepperhacken mit 5-6 m Arbeitsbreite eine geringere Flächenleistung haben als eine Feldspritze mit 15-30 m Arbeitsbreite. Die flächige Ausbringung von Conviso One zeichnet sich im Vergleich zur Flächenspritzung mit konventionellen Herbiziden durch einen geringeren Zeit- und Kostenaufwand aus.

Tabelle 15: Medianwert und Mindestanzahl der verfügbaren Feldarbeitstage für Unkrautkontrollmaßnahmen auf sandigem Lehmboden (2015-2021).

Wetterstation DWD		Boden-Klima-Raum		Saat-termin	Beginn Unkrautkontrolle	Ende	Mindestanzahl der für Unkrautkontrolle verfügbaren Tage		Median	
Name	ID_DWD	Nr.	Name/Lage				Hacken	Spritzen	Hacken	Spritzen
Dörnack	6163	154	Schlesw.-Holst. Hügelland	15.04.	06.05.	20.06.	11	20	38	40
Groß Lüsewitz	1803	101	Meckl.-Vorp., Uckermark	04.04.	25.04.	09.06.	12	35	35	40
Faßberg	1339	146	Lüneburger Heide	30.03.	20.04.	04.06.	8	19	37	41
Wunstorf	5715	145	Südhannover	29.03.	19.04.	03.06.	16	31	41	40
Braunschweig	662	146	Lüneburger Heide	30.03.	20.04.	04.06.	27	38	43	43
Göttingen	1691	145	Südhannover	29.03.	19.04.	03.06.	22	35	35	43
Artern	198	107	Ostdt. Ackerebene (Thür.)	29.03.	19.04.	03.06.	38	40	41	42
Oschatz	3811	108	Ostdt. Übergangslagen (Sachs.)	06.04.	27.04.	11.06.	28	39	42	43
Düsseldorf	1078	142	Oberer Mittelrhein	02.04.	23.04.	07.06.	27	36	42	39
Nörvenich	3623	141	Köln-Aachener Bucht	31. 3.	21.04.	05.06.	23	37	31	44
Frankfurt/M.	1420	121	Rheinebene	21.03.	11.04.	26.05.	23	34	36	38
Würzburg	5705	113	Nordwestbayern-Franken	24.03.	14.04.	29.05.	17	33	37	40
Mannheim	5906	121	Rheinebene	21.03.	11.04.	26.05.	15	28	40	43
Öhringen	3761	123	Oberes Gäu (Heilbronn)	26.03.	16. 4.	31.05.	8	28	33	43
Regensburg	4104	116	Gäu, Donau- und Inntal	27.03.	17.04.	01.06.	10	36	28	44
Mittelwert (Standardabweichung)							19 (9)	33 (6)	37 (4)	42 (2)

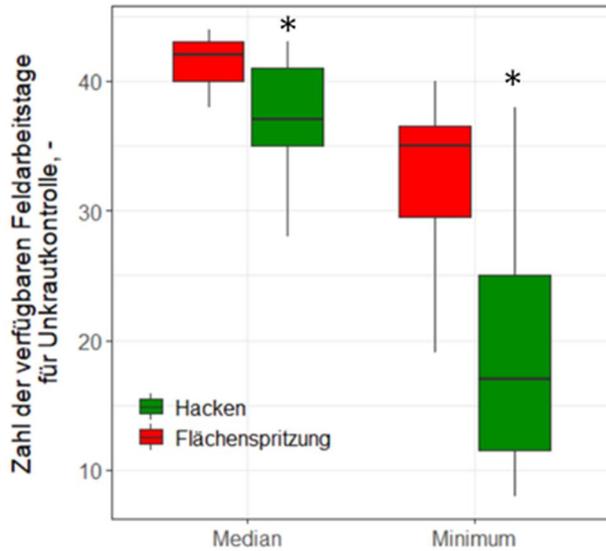


Abbildung 23: Median und minimale Zahl der Feldarbeitstage (2015-2021), die für die Unkrautbekämpfung in sandigem Lehmboden zur Verfügung standen. Jeder Boxplot repräsentiert Daten von 15 Wetterstationen (Tab.15). *Unterschied zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren signifikant.

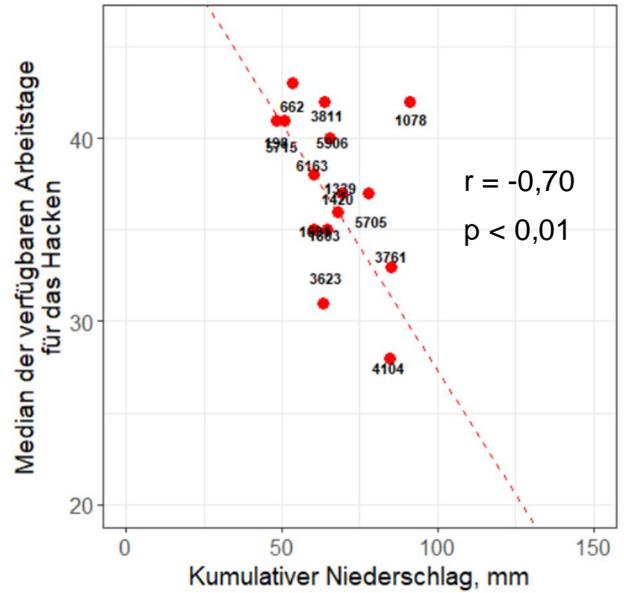


Abbildung 24: Regionale Unterschiede in der Anzahl der für das Hacken verfügbaren Feldarbeitstage. Die Zahlen geben die DWD-Wetterstation an (siehe Tab. 15). Die Anzahl der für das Hacken verfügbaren Tage zeigte eine negative lineare Korrelation (Pearson) mit den kumulierten Niederschlägen.

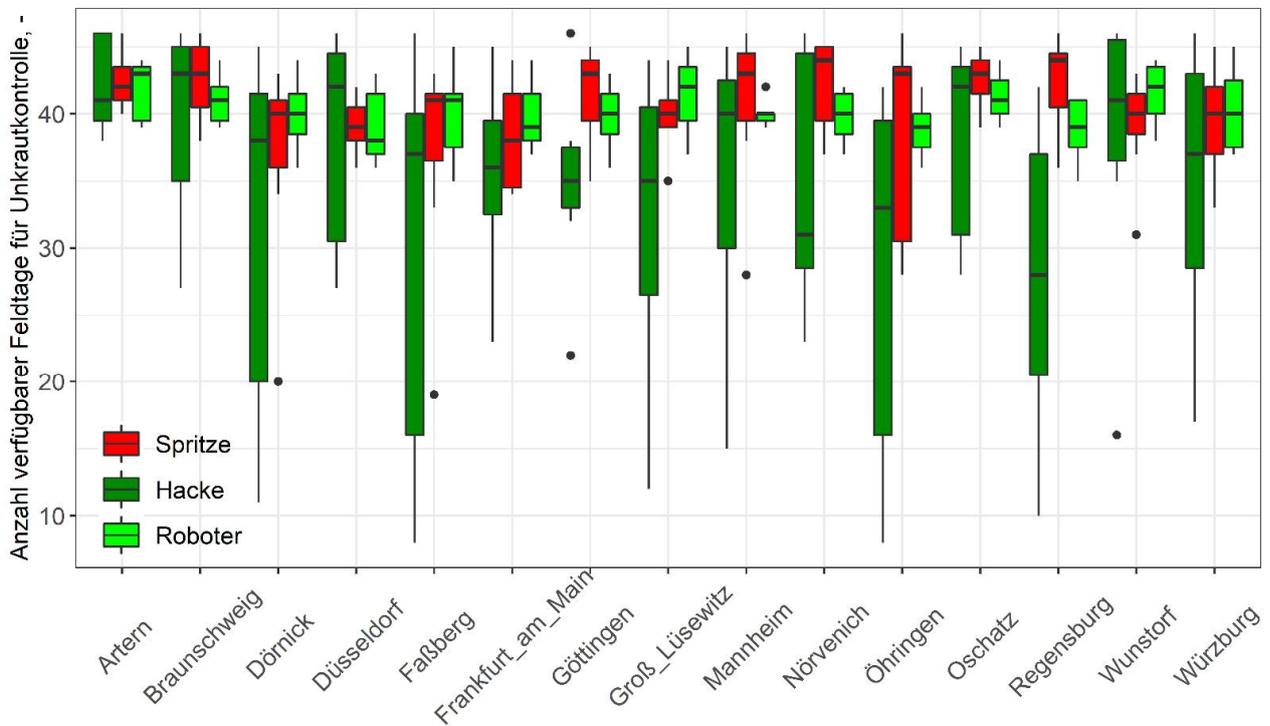


Abbildung 25: Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage für Herbizidanwendungen (Spritze) und traktorbasierteres (Hacke) sowie robotergestütztes (FarmDroid Roboter) Hacken an verschiedenen Standorten in Deutschland. Jeder Boxplot umfasst 7 Datenpunkte für die Jahre 2015-2021.

Einerseits werden mit dem Einsatz von Conviso One die Lohn- und Maschinenkosten reduziert, da 2 statt 3 Herbizidanwendungen ausreichen (Tab. 16). Andererseits sind darüber hinaus auch die Herbizidkosten von Conviso One im Vergleich zu konventionellen Herbiziden geringer.

Die Conviso-Bandanwendung (Nr. 5) hat die niedrigsten Gesamtkosten aller Verfahren. Die Roboterhacke in Kombination mit der Punktspritzung (Nr. 4) hat höhere Gesamtkosten als die anderen kombinierten und chemischen Methoden, aber deutlich niedrigere Gesamtkosten als die mechanischen Verfahren. Hinsichtlich der Praktikabilität sind alle Verfahren mit einem Medianwert von ≥ 37 Feldarbeitstagen von insgesamt 46 Tagen im relevanten Zeitraum in den meisten Jahren gut umsetzbar. In einzelnen Jahren mit ungünstiger Witterung ist der Einsatz der Schlepperhacke jedoch nur an 19 von 46 Tagen möglich, was die Praktikabilität der mechanischen und kombinierten Verfahren mit Schlepperhacke in einzelnen Jahren stark herabsetzt (Tab.16, Nr. 2, 3, 5, 7-10).

Tabelle 16: Kosten, Arbeitszeitbedarf und Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage für verschiedene Unkrautbekämpfungsverfahren.

Nr.	Unkrautbekämpfungsverfahren	Kosten, € ha ⁻¹				Zeitbedarf, h ha ⁻¹	Anzahl Feldarbeitstage	
		Lohn	Ma-schi-nen	Her-bi-zide	Ge-samt		Mini-mum ¹⁾	Me-dian ¹⁾
1	3x Flächenspritzung	18	24	315	357	0,8	33	42
2	1x Flächenspritzung (NAK 1) + 2x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	55	71	198	324	2,6	19	37
3	3x Bandspritzung i. d. Reihe + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	55	71	139	265	2,6	19	37
4	3x Punktspritzung (auf 12.5 % der Fläche. 10 cm x 10 cm Spritzfenster) + 3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen	36	375	39	450	1,7	37	40
5	2x Bandspritzung i. d. Reihe mit Conviso 0.5 L/ha + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen	49	63	101	213	2,3	19	37
6	2x Flächenspritzung mit Conviso 0.5 L/ha (nicht dränierte Flächen)	12	16	230	258	0,6	33	42
7	3x Schlepperhacke zw. den Reihen + 2x Handhacke	2230	87	0	2317	166,7	19	37
8	2x Striegel+2x Schlepperhacke zw. d. Reihen + 2x Handhacke	2322	80	0	2403	174,0	19	37
9	2x Striegel + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen + 1x Handhacke	1185	72	0	1257	88,1	19	37
10	1x Striegel + 2x Schlepperhacke zw. d. Reihen + 1x Handhacke	1178	63	0	1241	87,8	19	37
11	3x Roboterhacke i. und zw. d. Reihen + 1x Handhacke	831	375	0	1206	61,7	37	40

¹⁾ Mittelwerte der minimalen Anzahl und des Medians der verfügbaren Feldarbeitstage für Hacken und Spritzen aus 46 Tagen des Gesamtzeitraums (2015-2021, 15 Standorte, siehe Tab. 15).

5 Multidimensionale Risiken und Empfehlungen (IfZ, JKI-A, JKI-SF)

Die multiplen ökologischen und wirtschaftlichen Risiken verschiedener Unkrautbekämpfungsverfahren werden anhand von Spinnendiagrammen gegenübergestellt (Abb. 26). Im oberen Teil der Abbildung werden Verfahren verglichen, die bereits seit langem angewendet werden. Im unteren Teil werden neuere Methoden der konventionellen Flächenspritzung im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit gegenübergestellt.

Bodenerosion: Entgegen unserer Erwartung trat nach dem Hacken kein erhöhter Bodenabtrag durch Wassererosion auf. Die Bodenerosion unterschied sich nicht signifikant zwischen gehackten und nicht gehackten Parzellen. Bei Vorhandensein einer Bodenkruste brach die Hacke diese Versiegelung auf und trug zu einer erhöhten Infiltration und einem verringerten Oberflächenabfluss bei, wodurch der kumulative Bodenabtrag erheblich verringert wurde (die Situation mit einer Kruste ist in Abbildung 26 nicht dargestellt, aber in Abb. 6 gezeigt). In dieser Studie wurde die Bodenerosion jedoch durch Regensimulationen auf kleinen Parzellen von 2 m Länge und 1 m Breite gemessen. An Hängen von 100 m Länge kann sich das Regenwasser im Bereich des unteren Hanges akkumulieren, so dass die Mächtigkeit und Erosivität des Oberflächenabflusses deutlich zunimmt, was zur Entwicklung von Rillen und Rillenerosion führen kann. Diese kann sich auf kleinen Parzellen aufgrund der geringen Transportdistanz nicht entwickeln. Daher sind weitere Messungen der Wassererosion auf großen Parzellen unter verschiedenen Unkrautbekämpfungsverfahren erforderlich, um sowohl die Zwischenrillen- als auch die Rillenerosion zu berücksichtigen.

Epigäische Raubarthropoden und Schädlinge: Die Studie zeigt, dass unter den vorliegenden Versuchsbedingungen das 3-malige flächige Hacken sowie die Kombination von Hacke und Bandspritzung keine oder nur geringe Auswirkungen auf epigäische Raubarthropoden hatte. Dies galt für alle drei untersuchten Gruppen epigäischer Raubarthropoden (Spinnen, Laufkäfer und Kurzflügelkäfer). Auswirkungen auf Schadinsekten ließen sich ebenfalls nicht nachweisen. Die Ergebnisse der Prädationsversuche zeigten jedoch in einem Versuchsjahr, dass das Hacken eventuell einen negativen Einfluss auf die Prädatoren im Feld haben könnte. Für eine abschließende Bewertung müssen diese Ergebnisse in weiteren Untersuchungen überprüft werden, da möglicherweise auch andere Prädatorengruppen als die bislang untersuchten betroffen sind. Marienkäfer und ihre Larven, räuberische Wanzen sowie Florfliegenlarven könnten solche Gruppen sein, die hauptsächlich auf Pflanzen, teilweise aber auch am Boden aktiv sind.

Die Präferenzversuche im Labor zeigen eine eindeutige Präferenz der Laufkäfer für eine aufgeraute Bodenoberfläche. Im Feld führte dies jedoch nicht zu Aggregationen in den gehackten Versuchsvarianten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass weitere Faktoren die Verteilung der Laufkäfer und möglicherweise auch die Verteilung anderer epigäischer Raubarthropoden im Feld bestimmen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass unter den Bedingungen der hier auf 7 Versuchsflächen in 3 Jahren durchgeführten Untersuchung mit mechanischer, chemischer und kombinierter Unkrautbekämpfung keine negative Beeinflussung der Populationen epigäischer Raubarthropoden durch die mechanische Unkrautbekämpfung mittels Hacken zu beobachten ist. Da die untersuchten Flächen jedoch im Vergleich zu konventionellen Zuckerrübenfeldern aus Gründen der technischen Umsetzung klein waren und in konventionell bewirtschafteten Zuckerrübenfeldern lagen, erscheint eine schnelle Wiederbesiedlung aus der angrenzenden Umgebung möglich. Daher sollten entsprechende Untersuchungen bei Verfügbarkeit entsprechender Hacktechnik zukünftig auch auf größeren Flächen durchgeführt werden.

Regenwürmer und Wirbeltiere: Die Anzahl junger und adulter Tiere von anektischen und endogäischen Regenwurmarten wurde kurz vor der Rübenernte untersucht. Zu betonen ist, dass in dieser Studie nicht die kurzfristigen, sondern die mittel- bis langfristigen Auswirkungen der Hacke

auf die Regenwurmpopulation untersucht wurden. Ziel war es festzustellen, ob sich die Regenwurmpopulation nach einer möglichen Schädigung durch die Hacke über einen Zeitraum von 4 Monaten bis zur Rübenernte erholen kann. Die Regenwurmzahlen für anektische und endogäische Arten unterschieden sich nicht signifikant zwischen Varianten mit mechanischer, kombinierter und chemischer Unkrautbekämpfung. Entweder war die Arbeitstiefe beim Hacken nicht tief genug, um die Regenwurmpopulation zu schädigen, oder die Population war in der Lage, sich im Laufe der vier Monate von den Schäden zu erholen.

Im Projekt wurden die Wirkungen verschiedener Verfahren der Unkrautbekämpfung auf die Abundanz von bodenbrütenden Vögeln nicht untersucht. Aufgrund der Arbeitsweise beim Hacken ist jedoch davon auszugehen, dass wiederholtes Hacken einen deutlich negativen Effekt auf den Bruterfolg von Vögeln wie der Feldlerche oder dem Kiebitz hat. Auch könnte Feldhasen und Rebhühner davon betroffen sein.

Toxikologisches Risiko: In dieser Studie wurden die toxikologischen Risiken für 360.848 Rübenerfelder über 8 Jahre (2011-2018) in Deutschland mit SYNOPSIS-GIS berechnet. Die Aggregation der Daten ist notwendig, um eine Aussage über das Risiko in einer Region in Deutschland oder über das Risiko für Deutschland insgesamt zu treffen. Je größer das Aggregationsgebiet ist, desto geringer erscheinen die Risiken (Abb. 17A, B). Beispielsweise lag das 90. Perzentil des akuten aquatischen Risikos für die konventionelle Flächenspritzung auf BKR-Ebene unter 1 (Abb. 15) und wurde je nach BKR als sehr niedriges oder niedriges Risiko eingestuft, war aber für 1759 Feldjahre (0,5% aller Feldjahre in Deutschland), d. h. auf Einzelfeldebene, als erhöhtes Risiko einzustufen. Das akute aquatische Risiko und das chronische Risiko für Bodenorganismen bei konventioneller Flächenspritzung variierte stark zwischen den BKR und war in den nördlichen BKR höher als in den anderen BKR (Abb. 16). Die Gründe hierfür konnten in dieser Studie nicht untersucht werden. Vermutlich hängt das erhöhte aquatische Risiko in nördlichen BKR mit der höheren Gewässerdichte zusammen (Nause et al. 2021). Das erhöhte chronische Risiko für Bodenorganismen könnte mit den niedrigeren Temperaturen und damit geringeren Abbauraten der Herbizide im Boden nördlicher Gebiete zusammenhängen. Bei den Unkrautkontrollverfahren mit reduzierter Aufwandmenge (z. B. Bandspritzung in Kombination mit Schlepperhacke) nahm das Risiko linear mit der Reduzierung der Aufwandmenge ab (Tab. 13).

Das neue kombinierte Verfahren mit Bandspritzung von Conviso One in der Reihe und traktorgestütztes Hacken zwischen den Reihen verursachte in einigen BKR ein ebenso hohes oder sogar höheres akutes aquatisches Risiko als die Flächenspritzung mit herkömmlichen Herbiziden. Der Grund für die höhere aquatische Toxizität der Conviso-Methode ist eine starke Empfindlichkeit der Wasserlinse (*Lemna minor*) gegenüber beiden Wirkstoffen des Conviso-Herbizids. Im Gegensatz dazu war das chronische Risiko für Bodenorganismen beim Conviso-Verfahren im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung in allen Regionen und Jahren deutlich geringer (Abb. 17A). Unter der Annahme, dass das Risiko der Conviso-Anwendung linear mit der Aufwandmenge ansteigt, würde das akute aquatische Risiko der Conviso-One-Flächenspritzung im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung um den Faktor 2,3 ansteigen (Abb. 17A) und müsste dann in einigen BKR als erhöht eingestuft werden (Abb. 18). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das höchste chronische Risiko für Bodenorganismen von der konventionellen Flächenspritzung ausging, während das höchste akute aquatische Risiko von der Conviso-One-Flächenspritzung ausging. Im Gegensatz dazu war das akute Risiko für Saumbiota und das chronische aquatische Risiko bei beiden chemischen Methoden in allen Regionen und Jahren gering.

Ressourcenverbrauch und THG-Emissionen: Das mechanische Unkrautbekämpfungsverfahren mit 3x Schlepperhacke + 2x Handhacke weist im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung einen 7-fach höheren Dieserverbrauch und 2,5-fach höhere THG-Emissionen auf (Abb. 26A).

Selbst das extensivste mechanische Verfahren mit 1x Striegel + 2x Schlepperhacke + 1x Handhacke, das allerdings nur an wenig verunkrauteten Standorten geeignet ist, liegt bei Dieserverbrauch und THG-Emissionen noch 5- bzw. 1,7- mal höher als die konventionelle Flächenspritzung. Auch alle kombinierten Verfahren mit dem Einsatz von Schlepperhacken zeichnen sich durch deutlich höheren Dieserverbrauch, Energieverbrauch und THG-Emissionen im Vergleich zur Flächenspritzung aus, liegen aber immer noch deutlich niedriger als die intensive mechanische Unkrautbekämpfung. Bei den vorgestellten Berechnungen ist zu beachten, dass sie auf einer Bandspritzung mit einer Feldspritze und nicht mit herkömmlichen 6- bis 12-reihigen Bandspritzern basieren. Für diese wären der Dieserverbrauch und THG-Emissionen bei den kombinierten Verfahren ähnlich oder sogar höher als bei der ausschließlichen mechanischen Unkrautbekämpfung.

Die neue mechanische Unkrautbekämpfungsmethode mit dem solarbetriebenen FarmDroid-Roboter reduziert den Energieverbrauch, den Dieserverbrauch und die THG-Emissionen erheblich (Abb. 26B). Dies ist auf den Wegfall der viel Diesel verbrauchenden Schlepperhacke und die Verringerung der für die Handhacke benötigten Arbeitsstunden zurückzuführen. Da auf die manuelle Hacke aber nicht ganz verzichtet werden kann und die Roboterunterstützung zusätzliche Fahrten zum Feld für Kontrolle und Wartung erfordert, sind Dieserverbrauch und THG-Emissionen bei der mechanischen Unkrautbekämpfung mit dem FarmDroid im Vergleich zur Flächenspritzung immer noch 1,2-mal höher. Der Energieverbrauch für die mechanische Unkrautbekämpfung mit dem FarmDroid ist jedoch deutlich niedriger als bei der herkömmlichen Flächenspritzung, da die Herbizidherstellung sehr energieintensiv ist. Zwei neuere Methoden weisen im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung deutlich geringere THG-Emissionen auf: der FarmDroid-Roboter mit Punktspritzung und die Flächenspritzung mit Conviso. Sie reduzieren die THG-Emissionen um den Faktor 1,5 bzw. 4 (Abb. 26B). Der Grund für die niedrigsten THG-Emissionen bei der Flächenspritzung mit Conviso ist zum einen die sehr geringe Ausbringungsmenge von Conviso und zum anderen der geringere Dieserverbrauch aufgrund der reduzierten Anzahl von Feldfahrten, 2 statt 3 bei der konventionellen Flächenspritzung.

Wirtschaftliche Risiken: Es wurden keine Ertragsunterschiede zwischen mechanischer, kombinierter und chemischer Unkrautbekämpfung festgestellt. Allerdings ist die bisher eingesetzte mechanische Unkrautbekämpfung im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung mit einem deutlich höheren Kosten- und Arbeitszeitbedarf verbunden (Abb. 26A). Dies ist auf die kostspielige und zeitaufwändige Anwendung der Handhacke zurückzuführen. Bei der kombinierten Unkrautbekämpfung werden die Kosten durch den Ersatz der Handhacke durch die Bandspritzung deutlich reduziert. Durch die Senkung der Herbizidkosten und unter der Annahme, dass die Bandspritzung mit einer Feldspritze durchgeführt wird, sinken die Kosten der kombinierten Methoden im Vergleich zur Flächenspritzung um 30% (Abb. 26A). Der Arbeitszeitbedarf für die herkömmlichen kombinierten Methoden bleibt jedoch im Vergleich zur Flächenspritzung 3,3-mal höher. Der Median der verfügbaren Feldarbeitstage ist bei der Schlepperhacke im Vergleich zur Feldspritze zwar geringer, aber immer noch ausreichend hoch, um die mechanische Unkrautbekämpfung in den meisten Jahren sicher umzusetzen (Abb. 23). In Jahren mit ungünstiger, regenreicher Witterung kann die Schlepperhacke jedoch an vielen Tagen nicht eingesetzt werden (Abb. 25), so dass in diesen einzelnen Jahren die mechanische Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen nicht mehr rechtzeitig durchgeführt werden kann. Die Umsetzbarkeit der neuen kombinierten Conviso-Bandapplikation ist in einzelnen regenreichen Jahren ebenfalls gefährdet, da für die Unkrautkontrolle zwischen den Reihen eine Schlepperhacke eingesetzt wird (Abb. 26B). Der Einsatz des FarmDroid-Hackroboters ist aufgrund seines geringen Gewichts bereits sehr kurz nach einem Regenereignis möglich. Daher kann die mechanische Unkrautbekämpfung mit dem

FarmDroid auch in Jahren mit regenreicher Witterung durchgeführt werden. Unter den neuen Verfahren weist die Reihenapplikation von Conviso One 70 %, gefolgt von der Flächenspritzung mit Conviso One 40 %, niedrigere Kosten auf, während der FarmDroid mit einer Punktspritzung 30 % höhere Kosten im Vergleich zur Flächenspritzung verursacht. Die rein mechanische Unkrautbekämpfung mit dem FarmDroid ist aufgrund des erforderlichen manuellen Hackens mit Abstand am kosten- und zeitintensivsten (Abb. 26B). Die Conviso-Flächenspritzung und die konventionelle Flächenapplikation zeichnen sich durch den geringsten Arbeitszeitbedarf aus.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen: Die Gegenüberstellung der mehrdimensionalen Risiken für verschiedene konventionelle und moderne Unkrautbekämpfungsverfahren zeigt erhebliche Unterschiede in den Bewertungsparametern zwischen den analysierten Verfahren der Unkrautbekämpfung auf und weist somit auf gravierende Zielkonflikte hin.

Allgemein lässt sich feststellen, dass die konventionelle Flächenspritzung von praxisüblichen Herbiziden in den meisten Boden-Klima-Räumen (BKR) und Jahren mit einem niedrigen bis sehr niedrigen toxikologischen Risiko verbunden ist. Außerdem zeigt sich, dass stark reduzierte Herbizidaufwandmengen nicht immer zu einem geringen toxikologischen Risiko führen. Bei einer Bandanwendung von Conviso One ist die Herbizidmenge 120-mal geringer, aber das akute aquatische Risiko gleich hoch im Vergleich zum Risiko bei der Flächenspritzung herkömmlicher Herbizide, bei jedoch günstiger chronischer terrestrischer Toxizität. Diese mögliche Diskrepanz zwischen Aufwandmenge und Umwelttoxizität sollte in Bewertungsansätzen wie dem „Harmonisierten Risikoindikator“ der EU beachtet werden. Darüber hinaus ist die Flächenspritzung mit Conviso One das günstigste Verfahren in Bezug auf Energieverbrauch und Klimafreundlichkeit.

Die herkömmlichen mechanischen Verfahren sind toxikologisch unbedenklich, aber im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung mit 100 % bis 150 % höheren THG-Emissionen verbunden. Das Verfahren FarmDroid mit Punktspritzung erscheint als günstiger Kompromiss. Diese Technik weist einen geringeren Ressourcen- und Energieverbrauch sowie etwa 30 % geringere THG-Emissionen auf als die konventionelle Flächenspritzung, während das toxikologische Risiko des Verfahrens nur 12-13 % beträgt. Der Kosten- und Zeitaufwand für die Unkrautbekämpfung mit dem FarmDroid in Kombination mit Punktspritzung sind nur unwesentlich höher im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung, während die Zahl der verfügbaren Feldarbeitstage sogar höher ist. Für biologisch wirtschaftende Betriebe ist die mechanische Unkrautbekämpfung mit dem FarmDroid in Kombination mit der Handhacke sowohl aus Gründen der Umweltfreundlichkeit als auch der wirtschaftlichen Effizienz zu empfehlen. Die THG-Emissionen dieses Verfahrens sind im Vergleich zur Flächenspritzung nur um 20 % höher, was im Vergleich zu anderen mechanischen Methoden wesentlich klimafreundlicher ist. Auch hinsichtlich der Kosten, des Arbeitszeitbedarfs und der Feldarbeitstage hat dieses Verfahren Vorteile gegenüber anderen mechanischen Methoden. Allerdings ist dieses Verfahren erst kurze Zeit im Praxiseinsatz und noch nicht in der im Zuckerrübenanbau Deutschlands vorhandenen Vielzahl von Einsatzbedingungen (Boden, Jahreswitterung, Feldgeometrie, Topografie) überprüft. Eingesetzt wird es bislang nur auf Feldern mit eher sandigen Böden und weitgehend ebener, rechtwinkliger Geometrie.

Insgesamt zeigen unsere Ergebnisse, dass eine eindeutige Identifikation einer optimalen Alternative zur ganzflächigen chemischen Unkrautkontrolle in Zuckerrüben nicht möglich ist. Der verstärkte Einsatz mechanischer Unkrautbekämpfungsverfahren, wie in der „Farm to Fork“-Strategie angestrebt, würde die THG-Emissionen im Vergleich zur herkömmlichen Flächenspritzung stark erhöhen, insbesondere wenn die schleppergestützte Hacke eingesetzt wird. Die bislang nachhaltigste Unkrautkontrolle könnte mit solarbetriebenen Roboterhacken mit und ohne Punktspritzung erreicht werden. Dies sollte bei der Ausgestaltung der Umsetzung der „Farm to Fork“-Strategie berücksichtigt werden.

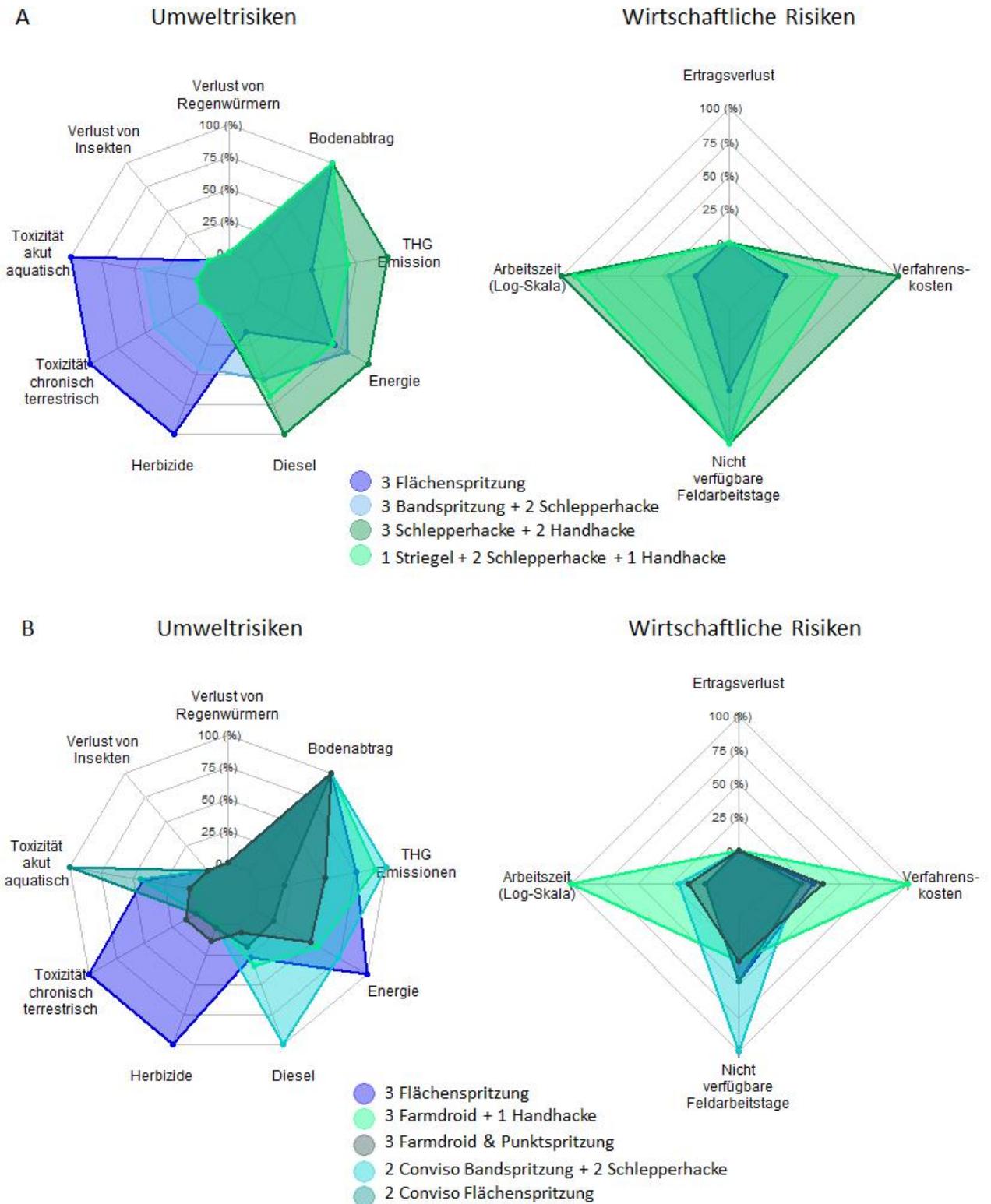


Abbildung 26: Umweltrisiken und wirtschaftliche Risiken von konventionellen (A) und neuen (B) Unkrautbekämpfungsverfahren. Der maximale Verbrauch jeder Ressource (Herbizidmenge, Diesel, Energie, Bodenerosion usw.) oder das maximale ökotoxikologische Risiko (Toxizität akut aquatisch $ETR_{A(aqu)}$ und Toxizität chronisch terrestrisch $ETR_{C(bod)}$) wurde auf 100 % festgelegt. Der Ressourcenverbrauch durch andere Unkrautbekämpfungsverfahren wurde in Prozent des maximalen Verbrauchs ausgedrückt.

6 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.

Der Vergleich verschiedener chemischer, chemisch-mechanisch kombinierter und mechanischer Verfahren auf Basis von Feldversuchen und Berechnungen quantifiziert erstmals nicht nur standortspezifische Risiken des Herbizideinsatzes, sondern auch weitere Umweltrisiken und ökonomische und verfahrenstechnische Wirkungen im Vergleich zu mechanischen und kombinierten Verfahren.

Die Projektergebnisse können unmittelbar in der Politikberatung bei der Ausgestaltung der nationalen Umsetzung der SUR-Richtlinie im Rahmen der „Farm to Fork“-Strategie der EU verwendet werden. Außerdem können die Empfehlungen dieses Projektes (siehe Kap. 5, letzter Abschnitt) in die Weiterentwicklung der EU-Risikoindikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit des Herbizideinsatzes einfließen. Technikunternehmen im Bereich der mechanischen Unkrautkontrolle könnten die Projektergebnisse auf ihre spezifischen Produkte anwenden und ggf. als Argumente in der Vermarktung nutzen.

Die bei Antragstellung angestrebte Verwertung der Projektergebnisse durch landwirtschaftliche Betriebe, die die Projektergebnisse für die Entscheidung über ein standortspezifisch optimiertes Verfahren der Unkrautbekämpfung nutzen könnten, wird derzeit nicht als umsetzbar angesehen. Grund dafür ist, dass sich die verschiedenen analysierten Unkrautbekämpfungsverfahren erheblich in den Bewertungsparametern unterscheiden und somit ausgeprägte Zielkonflikte vorliegen. Die eindeutige Identifikation einer optimalen Alternative zur ganzflächigen chemischen Unkrautkontrolle in Zuckerrüben ist somit nicht möglich. Dennoch erscheint es wichtig, die Ergebnisse über die vielfältigen Auswirkungen der Alternativen zur ganzflächigen Herbizidanwendung in der landwirtschaftlichen Praxis zu verbreiten. Zu diesem Zweck sollen die Ergebnisse in Form von Vorträgen und Praxisartikeln zeitnah an Beratungsstellen und Betriebe kommuniziert werden. So ist eine umfassende Präsentation der Projektergebnisse für die Göttinger Zuckerrüben tagung am 7. September 2023 fest eingeplant. Außerdem ist die Erstellung eines Merkblattes für Landwirte in Prüfung.

Die im Projekt EvaHerb gewonnenen Ergebnisse zur Wassererosion sollen in einem weiteren, bei der DBU beantragten Projekt auf Großflächen validiert werden. Darüber hinaus wird das in EvaHerb entwickelte Verfahren der Technikfolgenabschätzung im derzeit laufenden BMEL-geförderten Projekt OptiKult für eine Bewertung weiterer, in Entwicklung befindlicher Verfahren mechanischer und kombinierter Verfahren der Unkrautkontrolle verwendet.

Beim Projektpartner IfZ ist die Abgrenzung der Projekte EvaHerb und OptiKult wie folgt sichergestellt: 1. In OptiKult steht die Technikfolgenabschätzung für einen zu entwickelnden, neuartigen Roboter im Mittelpunkt, der in verschiedenen Verfahrensvarianten (mit/ohne Aussaat, mit/ohne Querhacke; mit/ohne Punktapplikation) analysiert werden soll, während in EvaHerb im Wesentlichen bereits am Markt verfügbare schleppergestützte Hacken als Alternative zur chemischen Unkrautkontrolle analysiert wurden. Die Eigenschaften des darüber hinaus bewerteten Saat- und Hackroboters FarmDroid unterscheiden sich deutlich vom OptiKult-Roboter. 2. Des Weiteren ist die Bewertung der Funktionalität einer Feldspritze für die Bandapplikation unter komplexen Feldgeometrien und -topografien Bestandteil des Projektes OptiKult. Dies wird in EvaHerb nicht bearbeitet.

7 Gegenüberstellung geplanter und erreichter Ziele

Das Gesamtziel des Projektes war es, die Umweltrisiken des Einsatzes von Hackgeräten zu bewerten und darauf aufbauend eine Systemanalyse von Verfahrensalternativen der mechanischen und chemischen Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen als Grundlage für eine Entscheidungshilfe für Landwirte am Beispiel der Zuckerrübe zu erstellen. Die erarbeitete Systemanalyse der

mehrdimensionalen ökologischen, ökonomischen und verfahrenstechnischen Risiken verschiedener Unkrautbekämpfungsverfahren wird in diesem Bericht vorgestellt.

Dabei sind einzelne Aspekte zu nennen, die von der ursprünglichen Planung abweichen. Die derzeitige rasante Entwicklung und teilweise auch Implementierung neuer Unkrautbekämpfungsverfahren war Anlass, nicht nur die herkömmlichen (wie geplant), sondern auch neue, seit Projektbeginn in die Praxis eingeführte Verfahren wie z.B. den FarmDroid-Hackroboter mit oder ohne Punktspritzung in die Systemanalyse einzubeziehen. Auch chemische und kombinierte Verfahren mit Conviso One, die erst 2022 mit praxisrelevanten Aufwandmengen zugelassen wurden, wurden abweichend von der ursprünglichen Planung in die Risikobewertung einbezogen. Bei der Bewertung der ökonomischen Risiken verschiedener Verfahren wurde - auf Wunsch von Fachberatern der Zuckerwirtschaft - neben den ursprünglich geplanten Parametern wie Unkrautbekämpfungseffizienz, Ertrag, Zeitaufwand und Kosten auch die Anzahl verfügbarer Feldarbeitstage für verschiedene Rübenanbauregionen Deutschlands berechnet. Auf die ursprünglich vorgesehene Integration der Literaturergebnisse zum Humusabbau und den Risiken für die Avifauna in unsere Systemanalyse musste aus Zeitgründen verzichtet werden.

8 Zusammenfassung

Die europäische "Farm to Fork"-Strategie zielt darauf ab, den Einsatz von Pestiziden zu reduzieren und die Anwendung von Herbiziden möglichst weitgehend durch Verfahren mechanischer Unkrautbekämpfung zu ersetzen. Die Umweltauswirkungen der mechanischen Unkrautbekämpfung sind jedoch bislang nicht untersucht worden. Ziel des Projekts war es daher, die wesentlichen ökologischen, wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Risiken der mechanischen, mechanisch-chemischen und chemischen Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben zu quantifizieren und zu bewerten.

Dazu wurden drei methodische Ansätze verwendet: (i) Feldversuche wurden über 3 Jahre auf 5 Feldern in der Nähe von Göttingen in Südniedersachsen durchgeführt, um die Auswirkungen der mechanischen Unkrautbekämpfung auf (1) Bodenorganismen (Regenwürmer und Insekten), (2) Bodenerosion durch Wasser, (3) die Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung und (4) den Zuckerrübenenertrag zu bewerten; (ii) Modellberechnungen mit SYNOPSIS-GIS wurden für die toxikologische Risikobewertung von 5 mechanisch-chemischen und chemischen Unkrautbekämpfungsmethoden durchgeführt; (iii) Auf der Grundlage von Literaturrecherchen und Open-Source-Webanwendungen wurden Ressourcenverbrauch, Treibhausgasemissionen und wirtschaftliche Parameter für 11 Unkrautbekämpfungsverfahren berechnet.

Die Berücksichtigung von standort- und jahresspezifischen Bedingungen war in diesem Projekt von besonderer Bedeutung. Bei der Erhebung von Felddaten, bei der ökotoxikologischen Risikobewertung und bei der Berechnung von Versuchsparametern für verschiedene Unkrautbekämpfungsmethoden wurde darauf geachtet, ein breites Spektrum von Umweltbedingungen abbilden zu können.

Die Ergebnisse der Feldversuche zeigen, dass die mechanische Unkrautbekämpfung keine signifikanten langfristigen Auswirkungen auf die Anzahl endogäischer und anektischer Regenwürmer sowie auf die Häufigkeit von Laufkäfern, Kurzflügelkäfern, Spinnen und Schadinsekten hatte. Entgegen unseren Erwartungen konnten wir nach dem Hacken keine erhöhte Bodenerosion durch Wasser beobachten. Das Hacken verkrusteter Böden trug sogar zu einer erhöhten Infiltration und einem geringeren Oberflächenabfluss bei, was die kumulative Bodenerosion deutlich verringerte. Da die Bodenerosion in dieser Studie jedoch anhand von Regensimulationen auf kleinen Parzellen ermittelt wurde, sind weitere Messungen im Feldmaßstab mit realen Hanglängen erforderlich, um einen möglichen Skaleneffekt zu erfassen. Auch für weitere Studien zu

epigäischen Raubarthropoden wird empfohlen, großflächigere Parzellen zu verwenden, um mögliche Randeffekte zu minimieren und die Mobilität vor allem größerer Insektenarten stärker zu berücksichtigen. Die Effizienz der mechanischen Unkrautbekämpfung war an 2 der 5 Standorte geringer und an 3 Standorten gleich gegenüber der chemischen Unkrautbekämpfung. Rübenertrag, Zuckergehalt und Zuckerertrag unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren.

Die toxikologische Risikobewertung mit SYNOPSIS-GIS zeigte, dass die konventionelle Flächenspritzung von praxisüblichen Herbiziden in den meisten Boden-Klima-Räumen (BKR) und Jahren mit einem niedrigen und teilweise sogar sehr niedrigen toxikologischen Risiko verbunden ist. In einigen nördlichen BKR werden jedoch das akute aquatische Risiko und das chronische Risiko für Bodenorganismen in allen untersuchten Jahren (2011-2018) als höher, d. h. als niedrig oder sogar als erhöht eingestuft. Weitere Studien sind erforderlich, um die Gründe für das erhöhte Risiko in Norddeutschland zu identifizieren. Das toxikologische Risiko der mechanisch-chemischen Unkrautbekämpfung stand in linearem Zusammenhang mit der relativen Menge der ausgebrachten Herbizide. Die einzige Ausnahme bildete die Reihenanwendung von Conviso One: obwohl die ausgebrachte Herbizidmenge im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung viel geringer war, lag die akute aquatische Toxizität auf demselben Niveau wie bei der konventionellen Flächenspritzung. Geht man davon aus, dass das Risiko der Conviso One-Anwendung linear mit der Ausbringungsmenge ansteigt, würde das akute aquatische Risiko der Conviso One-Flächenausbringung im Vergleich zur Flächenausbringung konventioneller Herbizide um den Faktor 2,3 ansteigen, was in einigen BKR zu einem erhöhten akuten aquatischen Risiko führen würde.

Der berechnete Ressourcen- und Energieverbrauch sowie die Treibhausgasemissionen unterschieden sich stark zwischen den Unkrautbekämpfungsverfahren. Die mechanische Unkrautbekämpfung mit 3x Schlepperhacke + 2x Handhacke wies einen 7-mal höheren Dieserverbrauch und 2,5-mal höhere THG-Emissionen im Vergleich zur konventionellen Spritzung auf. Auch alle kombinierten Methoden mit dem Einsatz von Traktorhacken waren im Vergleich zur chemischen Unkrautbekämpfung durch einen deutlich höheren Dieserverbrauch, Energieverbrauch und THG-Emissionen gekennzeichnet.

Das neue mechanische Unkrautbekämpfungsverfahren mit dem solarbetriebenen FarmDroid-Roboter reduzierte Energie- und Dieserverbrauch und die THG-Emissionen erheblich. Dies ist auf den Wegfall der viel Diesel verbrauchenden Traktorhacken und die geringere Anzahl von Fahrten zum Feld für die Handhacke zurückzuführen. Da die auf die manuelle Hacke jedoch nicht vollständig verzichtet werden kann und die Roboterkontrolle und -wartung ebenfalls Fahrten zum Feld erfordert, sind Dieserverbrauch und THG-Emissionen bei der mechanischen Unkrautbekämpfung mit dem FarmDroid im Vergleich zur chemischen Unkrautbekämpfung immer noch um 20% höher. Kosten und Arbeitszeitbedarf für die mechanische Unkrautbekämpfung mit dem FarmDroid sind 2-fach niedriger als bei der traditionellen mechanischen Unkrautbekämpfung, aber immer noch um den Faktor 3 bzw. 77 höher als bei der chemischen Unkrautbekämpfung. Unter den mechanischen Unkrautbekämpfungsverfahren hat der FarmDroid die geringste Flächenleistung, aber die höchste Anzahl von Feldarbeitstagen, die für die Unkrautbekämpfung zur Verfügung stehen. Während die Schlepperhacke bei ungünstigen Witterungsbedingungen deutlich weniger eingesetzt werden kann, ist der FarmDroid aufgrund seines geringen Gewichts sofort oder am nächsten Tag auch nach einem größeren Regenereignis einsetzbar. Die neue kombinierte Methode FarmDroid-Roboter mit Herbizid-Punktapplikation in unmittelbarer Nähe der Rübepflanzen reduziert das toxikologische Risiko um 87%, die Treibhausgasemissionen um 30% und ist nur 26% teurer im Vergleich zur konventionellen Flächenspritzung.

Die Gegenüberstellung der mehrdimensionalen Risiken für verschiedene konventionelle und moderne Unkrautbekämpfungsverfahren zeigte erhebliche Unterschiede in den Bewertungsparametern zwischen den analysierten Verfahren der Unkrautbekämpfung auf und weist auf ausgeprägte Zielkonflikte hin, so dass eine eindeutige Identifikation einer optimalen Alternative zur ganzflächigen chemischen Unkrautkontrolle in Zuckerrüben nicht möglich ist.

So zeigte sich, dass stark reduzierte Herbizidaufwandmengen nicht immer zu einem geringen toxikologischen Risiko führen. Diese mögliche Diskrepanz zwischen Aufwandmenge und Umwelttoxizität sollte in Bewertungsansätzen wie dem „Harmonisierten Risikoindikator“ der EU beachtet werden. Der verstärkte Einsatz mechanischer Unkrautbekämpfungsverfahren, wie in der „Farm to Fork“-Strategie angestrebt, würde die THG-Emissionen im Vergleich zur herkömmlichen Flächenspritzung stark erhöhen, insbesondere wenn die schleppergestützte Hacke eingesetzt wird. Die bislang nachhaltigste Unkrautkontrolle könnte mit solarbetriebenen Roboterhacken mit und ohne Punktspritzung erreicht werden. Dies sollte bei der Ausgestaltung der Umsetzung der „Farm to Fork“-Strategie berücksichtigt werden.

9 Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5th ed.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten: Hannover
- Baguette, M., Hance, T. (1997): Carabid Beetles and Agricultural Practices: Influence of Soil Ploughing. *Biological Agriculture & Horticulture* 15 (1–4), 185–90. <https://doi.org/10.1080/01448765.1997.9755193>.
- Bekanntmachung der Grundsätze für die Durchführung der guten fachlichen Praxis im Pflanzenschutz. In *Bundesanzeiger*, 21. Mai 2010, 1–46
- BioGrace-I GHG calculation tool-version 4d (2015). Align Biofuel GHG Emission Calculations in Europe (BioGrace), <https://www.biograce.net/home>, (accessed 07.05.2021)
- BMEL (2021): Jahresbericht 2021. Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln
- Bohac, J. (1999): Staphylinid Beetles as Bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 74, 357–372
- Boström, U. (1995): Earthworm populations (Lumbricidae) in ploughed and undisturbed leys. *Soil Till. Res.* 35 (3), 125–133 DOI: 10.1016/0167-1987(95)00489-0
- Bresson L.-M.; Boiffin J. (1990): Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma* 47, 301–325
- Brimhall, P.B.; Chamberlain, E.W.; Alley, H.P. (1965): Competition of Annual Weeds and Sugar Beets. *Weeds* 13 (1), 33 DOI: 10.2307/4041092
- Bručienė, I.; Aleliūnas, D.; Šarauskis, E.; Romaneckas, K. (2021): Influence of Mechanical and Intelligent Robotic Weed Control Methods on Energy Efficiency and Environment in Organic Sugar Beet Production. *Agriculture* 11 (5), 449 DOI: 10.3390/agriculture11050449
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2004): VG250 (Ebenen) Verwaltungsgrenzen (Gemeinden) Bundesrepublik Deutschland.
- Butt, K.; Frederickson, J.; Morris, R. (1993): Investigations of an earthworm inoculation experiment, London Borough of Hillingdon. *Waste Planning* 7, 9–12
- Butt, K.R.; Lowe, C.N. (2007): Presence of earthworm species within and beneath *Lumbricus terrestris* (L.) middens. *European Journal of Soil Biology* 43, S57-S60 DOI: 10.1016/j.ejsobi.2007.08.002
- BVL (2019): Online-Datenbank Pflanzenschutzmittel. BVL. Braunschweig. Online verfügbar unter <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp>, zuletzt geprüft am 01.02.2019.
- Capowiez, Y.; Gilbert, F.; Vallat, A.; Poggiale, J.-C.; Bonzom, J.-M. (2021): Depth distribution of soil organic matter and burrowing activity of earthworms—mesocosm study using X-ray tomography and luminophores. *Biol. Fert. Soils* 57 (3), 337–346 DOI: 10.1007/s00374-020-01536-y
- Cogo, N.P.; Moldenhauer, W.C.; Foster, G.R. (1984): Soil Loss Reductions from Conservation Tillage Practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 (2), 368–373 DOI: 10.2136/sssaj1984.03615995004800020029x
- Dachbrodt-Saaydeh, S.; Sellmann, J.; Roßberg, D. (2019): Cluster zur regionalen Erhebung und Analyse der Pflanzenschutzintensität (CEPI) im Ackerbau. *Journal für Kulturpflanzen* 71 (10), 264–270 DOI: 10.5073/JFK.2019.10.02
- De Graaf, J., Schoeman, A.S. Brandenburg, R.L. (2003): Ecology and Control of *Nesorius Brevipennis* (Coleoptera: Staphylinidae) On Turf Grass on South Africa. *Florida Entomologist* 86 (3), 370–372

- Dexter, A.R.; Bird, N.R.A. (2001): Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & tillage research* 57 (4), 203–212 DOI: 10.1016/S0167-1987(00)00154-9
- DWD (2016): Climate Data Center, ftp. Online verfügbar unter //ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/
- EPPO (2006): PP1/250(1) Efficacy evaluation of insecticides - Leaf eating insects on beet.
- EPPO (2013): PP1/228(1) Efficacy evaluation of insecticides - Aphids on beet.
- European Commission (2020): *A Farm to Fork Strategy for a Fair, Healthy and Environmentally-Friendly Food System. COM(2020) 381 Final. Brussels: European Commission.*
- Fischer, F., Heimbach, U. (2011): Auswirkung verschiedener Herbizidstrategien auf Laufkäfer (Carabidae) in Zuckerrüben. *Sugarind.* (136), 104–108
- Fishkis, O.; Koch, H.-J. (2023): Effect of mechanical weeding on soil erosion and earthworm abundance in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Soil and Tillage Research* 225 (34), 105548 DOI: 10.1016/j.still.2022.105548
- Gerhards, R.; Kostyantyn, B.; Santel, H.-J. (2017): Sugar beet yield loss predicted by relative weed cover, weed biomass and weed density. *Plant Protect. Sci.* 53 (No. 2), 118–125 DOI: 10.17221/57/2016-PPS
- Gocht, A.; Röder, N. (2014): Using a Bayesian estimator to combine information from a cluster analysis and remote sensing data to estimate high-resolution data for agricultural production in Germany. In: *International Journal of Geographical Information Science* 28 (9), 1744–1764. DOI: 10.1080/13658816.2014.897348.
- Hasanbeigi, A., Arens M., Cardenas, J., Price, L., Triolo, R. (2016): Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States. *Resources, Conservation and Recycling* 113, 127–139
- Helming, K.; Roth, C.H.; Wolf, R.; Diestel, H. (1993): Characterization of rainfall - microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology* 6 (3), 273–286 DOI: 10.1016/0933-3630(93)90016-8
- Herr, S., Bauchhenß, J. (1987): *Einfacher Bestimmungsschlüssel für Regenwürmer. Schule und Beratung, 2, III 15-III 20*
- Huusela-Veistola, E. (1996): Effects of Pesticide Use and Cultivation Techniques in Ground Beetles (Col. Carabidae) in Cereal Fields. *Annales Zoologici Fennici* 33, 197–205.
- ICUMSA Methods Book (2003): *Method GS6-3: the determination of the polarisation of sugar beet by the macerator or cold aqueous digestion method using aluminium sulphate as clarifying agent—official*; Dr. Albert Bartens, Berlin.
- Jungwirth, M. & Handler, F.: Arbeitswirtschaftliche Aspekte am Beispiel eines teilautonomen Feldroboters beim Säen und Hacken von Biozuckerrüben. In *42. GIL-Jahrestagung Bonn*, 147–152
- Jursík, M.; Holec, J.; Soukup, J.; Venclová, V. (2008): Competitive relationships between sugar beet and weeds in dependence on time of weed control. *Plant Soil Environ.* 54 (No. 3), 108–116 DOI: 10.17221/2687-PSE
- Krumm, S., (2005): Der Regenwurm als Bioindikator: Einfluss von Schwermetallen und Pestiziden auf den Ionentransport über das Integument von *Lumbricus terrestris*. Dissertation, Institut für Tierphysiologie der Justus-Liebig-Universität Gießen
- Kunz, C.; Schrölkamp, C.; Koch, H.-J.; Eßer, C.; Schulze Lammers, P.; Gerhards, R. (2015): Potenzial der mechanischen Unkrautkontrolle in Zuckerrüben zur Herbizideinsparung. *Landtechnik* (70), 67–81 DOI: 10.1515/LT.2015.2661
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL): *Leistung-Kostenrechnung Pflanzenbau, Web-Tool*, <https://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html>; (assessed 29.04.2021)
- Laird, J.M.; Kroger, M.; Heddleson, M.R. (1981): Earthworms. *C R C Critical Reviews in Environmental Control* 11 (3), 189–218 DOI: 10.1080/10643388109381688
- Lewis, K. A.; Tzilivakis, J.; Warner, D. J.; Green, A. (2016): An international database for pesticide risk assessments and management. In: *Human and Ecological Risk Assessment* 22 (4), 1050–1064. DOI: 10.1080/10807039.2015.1133242.
- Lorenz, E. (1994): *Mechanische Unkrautbekämpfungsverfahren in Zuckerrübenkulturen Und Ihre Nebenwirkungen Auf Laufkäfer (Coleoptera, Carabidae) Und Andere Epigäische Raubarthropoden*; Göttingen: Georg-August-Universität
- Lorenz, M.; Brunotte, J.; Vorderbrügge, T. (2016): Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens - Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland. *Landbauforschung - applied agricultural and forestry research* 66, 101–144 DOI: 10.3220/LBF1473334823000
- Lowe, C.; Butt, K. (2002): Growth of hatchling earthworms in the presence of adults: interactions in laboratory culture. *Biology and Fertility of Soils* 35 (3), 204–209 DOI: 10.1007/s00374-002-0471-7
- Marinissen, J.C.Y. (1992): Population dynamics of earthworms in a silt loam soil under conventional and “integrated” arable farming during two years with different weather patterns. *Soil Biol Biochem.* 24 (12), 1647–1654 DOI: 10.1016/0038-0717(92)90164-S

- Marwitz, A.; Ladewig, E.; Märländer, B. (2012): Impact of herbicide application intensity in relation to environment and tillage on earthworm population in sugar beet in Germany. *European Journal of Agronomy* 39 (Sp. Iss), 25–34 DOI: 10.1016/j.eja.2012.01.005
- Mombini, A.; Amanian, N.; Talebi, A.; Kiani-Harchegani, M.; Rodrigo-Comino, J. (2021): Surface roughness effects on soil loss rate in complex hillslopes under laboratory conditions. *CATENA* 206 (3), 105503 DOI: 10.1016/j.catena.2021.105503
- Mücke, M.: Zuckerrüben lassen sich striegeln. *Land & Forst* 16, 34–35
- Mueller, L.; Lipiec, J.; Kornecki, T.; Gebhardt, S. (2011): Trafficability and Workability of Soils. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 912–924
- Nause, N.; Strassemeyer, J.; Mahlein, A.-K.; Stockfisch, N. (2021): Pesticide use in sugar beet cultivation in Germany and assessment of the associated environmental risks using the risk indicator SYNOPSIS-GIS. *Pest management science* 77 (10), 4614–4626 DOI: 10.1002/ps.6501
- Navntoft, S., Kristensen, K., Johnsen, Ib., Jensen, A-M., Sigsgaard, L., Esbjerg, P. (2016): Effects of Weed Harrowing Frequency on Beneficial Arthropods, Plants and Crop Yield. *Agricultural and Forest Entomology* 18, 59–67.
- Parish, S. (1990): A Review of Non-Chemical Weed Control Techniques. *Biological Agriculture & Horticulture* 7 (2), 117–137 DOI: 10.1080/01448765.1990.9754540
- Peng, J., Lu, L., Yang, H. (2013): Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, 255–274
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C (1997): *Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. *Agriculture Handbook 703*; U.S. Department of Agriculture, Washington, DC
- Roß, C.; Nause, N.; Stockfisch, N. (2018): Bodenschutz und reduzierter Herbizideinsatz. *dzz (Die Zuckerrübenzeitung)* 54 (4), 30–31
- Rosberg, D.; Michel, V.; Graf, R.; Neukampf, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. In: *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 59,
- Roßberg, D. (2016): Erhebungen zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Ackerbau. *Journal für Kulturpflanzen* 68 (2), 25–37 DOI: 10.5073/JfK.2016.02.01
- Schmitt, T.; Krüger, M.; Pfister, A.; Becker, M.; Mundersbach, C.; Fuchs, L.; Hoppe, H.; Lakes, I. (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. *KA Korrespondenz Abwasser* 65 (2), 113–120 DOI: 10.3242/kae2018.02.002
- Schrölkamp, C.; Eßer, C.; Schulze Lammers, P. (2015): Hilft die Hacke gegen Unkräuter? *Zuckerrüben-Journal* 2, 21–23
- Schweizer, E.E.; Dexter, A.G. (1987): Weed control in sugarbeets (*Beta vulgaris*) in North America. *Reviews of weed science (USA)* 3, 113–133
- Schweizer, E.E.; May, M.J. (1993): Weeds and weed control. In *The Sugar Beet Crop*; Cooke, D. A.; Scott, R. K., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, 485–519
- Soil Conservation Service (SCS) (1972): *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*; Department of Agriculture, Washington DC, p. 762
- Starck, T., Steinfort, J., Risser, P. (2021): Hackroboter in der Unkrautbekämpfung. Zwischen Zukunft und Gegenwart. Versuchsergebnisse zu Alternativen der Unkrautbekämpfung. *dzz (Die Zuckerrübenzeitung)* 5, 28–29
- Steichen J. M. (1984): Infiltration and random roughness of a tilled and untilled claypan soil. *Soil and Tillage Research* 4, 251–262
- Stockfisch, N.; Gallasch, M.; Reineke, H.; Trimpler, K.; Mielke, C.; Reiners, M.; Risser, P.; Schmitz, K.; Märländer, B. (2013): Betriebsbefragung zur Produktionstechnik im Zuckerrübenanbau: Datenbasis und Basisdaten. *Sugar Industry*, 656-663 DOI: 10.36961/si14540
- Strassemeyer, J.; Daehmlow, D.; Dominic, A. R.; Lorenz, S.; Golla, B. (2017): SYNOPSIS-WEB, an online tool for environmental risk assessment to evaluate pesticide verfahrens on field level. In: *Crop Prot* (97), S. 28–44. DOI: 10.1016/j.cropro.2016.11.036
- Thomsen, L.M.; Baartman, J.E.M.; Barneveld, R.J.; Starkloff, T.; Stolte, J. (2015): Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. *SOIL* 1 (1), 399–410 DOI: 10.5194/soil-1-399-2015
- Thorbek, P.; Bilde, T. (2004): Reduced Numbers of Generalist Arthropod Predators after Crop Management. *Journal of Applied Ecology* 41, 526–38.
- Whitaker, F.D., Heinemann, H.G., Wischmeier, W.H. (1973): Chemical weed controls affect runoff, erosion, and corn yields. *Journal of Soil and Water Conservation* (28), 174–176
- Wiltshire, J.J.J., Tillett, N.D., Hague, T. (2003): Agronomic evaluation of precise mechanical hoeing and chemical weed control in sugar beet. *Weed Research* 43 (4), 236–244 DOI: 10.1046/j.1365-3180.2003.00338.x
- Zhao, L.; Liang, X.; Wu, F. (2014): Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China. *J. Arid Land* 6 (4), 400–409 DOI: 10.1007/s40333-013-0246-z

10 Realisierte und geplante Veröffentlichungen sowie Verbreitung der Ergebnisse

Eine Übersicht über die Veröffentlichungen der Projektergebnisse findet sich in Tab. 17.

Tabelle 17: Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem EvaHerb-Projekt im Berichtszeitraum.

Journal	Kategorie	Autoren	Titel	Sprache
Soil & Tillage Research 225 (2023) 105548	Internat. mit Peer-review	Fishkis, Koch	Effect of mechanical weeding on soil erosion and earthworm abundance in sugar beet (<i>Beta vulgaris</i> L.)	Englisch
Sugar Industry 147 (72) 2022	Fachzeitschrift	Fishkis, Koch	Comparison of mechanical vs. chemical weed control in sugar beets – Environmental effects:	Englisch
Zuckerrübenjournal (2022), 189(3), 12-13	Fachzeitschrift	Fishkis, Koch	Mechanische Unkrautkontrolle klimaschädlicher als Chemie	Deutsch
Zuckerrübe (2022), 71(4), 40-42	Fachzeitschrift	Fishkis, Koch	Welche Umweltwirkung hat die mechanische Unkrautkontrolle?	Deutsch
dzz (2022), 58(4), 28-30	Fachzeitschrift	Fishkis, Koch	Ist Hacken in Rüben umweltfreundlich?	Deutsch
Pflanzenarzt (2022)	Fachzeitschrift	Fishkis, Koch	Umweltwirkungen der mechanischen Unkrautbekämpfung in Zuckerrübe	Deutsch
Zuckerrübe (2022), 71(2), 1-3	Fachzeitschrift	Weller, Lehmhus	Hacktechnik: Auswirkungen auf Bodenlebewesen und Schädlinge	Deutsch
Sugar Industry 147 (72) 2022	Fachzeitschrift	Weller, Lehmhus	Comparison of mechanical and chemical weed control in sugar beet – Impact on pest insects and epigeic predatory arthropods	Englisch

Weitere Publikationen sind in Vorbereitung:

1. Fishkis, Weller, Pöllinger, Lehmhus, Strassemeyer, Koch: Technology impact assessment of mechanical, chemical and the combined, mechanical-chemical weed control in sugar beet (voraussichtlich Agricultural Systems)
2. Weller, Lehmhus: Effects of different weed control techniques on epigeic predatory beetles of the families Carabidae and Staphylinidae in sugar beet (*Beta vulgaris*) (Agriculture, Ecosystems and Environment or Journal of Applied Entomology)
3. Weller, Lehmhus: Predation by arthropods in an agroecosystem: Is it influenced by different weed control techniques? (Journal of Applied Entomology or Pest Management Science)

Die Ergebnisse des Projektes wurden auf zahlreichen wissenschaftlichen Tagungen vorgestellt (Tab.18). Im Juni 2022 wurden die Ergebnisse auch auf den DLG-Feldtagen im BLE-Forum

"Zuckerrüben & Kartoffeln: Innovationen aus dem ökologischen Pflanzenschutz" vorgestellt. Zweimal im Jahr wurden die vorläufigen Ergebnisse mit Experten aus den Arbeitskreisen Pflanzenbau und Pflanzenschutz des Koordinierungsausschusses am IfZ diskutiert bzw. die Anregungen der Experten in die laufenden Arbeiten integriert. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse bei einem Landwirte-Stammtisch sowie im wissenschaftlichen Kolloquium der Bundesanstalt für Gewissenswissenschaften und Rohstoffe (Abteilung BII) Ende 2022 vorgestellt.

Tabelle 6: Konferenzbeiträge aus dem EvaHerb-Projekt (2020-2022).

Termin	Veranstaltung	Autoren	Art des Beitrags
04.-08.09.22	DBG-Tagung, Trier	Fishkis und Koch	Vortrag
29.08.-02.09.22	XVII ESA Congress Potsdam	Fishkis, Weller, Lehmus, Koch	Vortrag
21.-23.06.22	78th IIRB Congress Mons (BE)	Fishkis, Weller, Pöllinger, Lehmus, Strassemeyer, Koch	Vortrag
28.-30.09.21	63. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V., Rostock	Fishkis und Koch	Vortrag
28.-30.09.21	63. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V., Rostock	Weller und Lehmus	Poster
21.-23.09.21	62. Deutsche Pflanzenschutztagung	Fishkis und Koch	Vortrag
21.-23.09.21	62. Deutsche Pflanzenschutztagung	Weller und Lehmus	Vortrag
21.-23.09.21	62. Deutsche Pflanzenschutztagung	Strassemeyer	Vortrag
01.-02.09.21	15. Göttinger Zuckerrüben tagung	Fishkis und Koch	Vortrag
01.-04.03.21	American Society of Sugar Beet Technologists (ASSBT)	Fishkis und Koch	Vortrag
03.-05.03.20	Unkrauttagung 2020, Braunschweig	Fishkis und Koch	Poster