

Evaluierung eines Gerätesystems zur ultraflachen Bodenbearbeitung

Dissertation zur
Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Agrar-, Ernährungs- und Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Phillip Müller

aus

Warburg

Bonn 2025

Referent: Prof. Dr. Thomas Döring

Koreferent: Prof. Dr. Wolfgang Kath-Petersen

Tag der mündlichen Prüfung: 17.11.2025

Angefertigt mit Genehmigung der Agrar-, Ernährungs- und Ingenieurwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bau- und Landmaschinentechnik der Technischen Hochschule Köln. In der Zeit von August 2020 bis August 2024 koordinierte ich dort das Projekt *Entwicklung eines innovativen Bodenbearbeitungs-Gerätesystems zur energiesparenden Strohkonditionierung und ultraflachen Bodenbearbeitung*, das in Kooperation mit der Seed2Soil GmbH Co. KG sowie der Saphir Maschinenbau GmbH durchgeführt wurde. Gefördert wurde das Vorhaben aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank.

Während des Projektes erhielt ich die Möglichkeit, ein neuartiges Bodenbearbeitungsgerät zur ultraflachen Bodenbearbeitung mitzuentwickeln, intensiv zu erproben und dessen potentiellen acker- und pflanzenbaulichen Mehrwert herauszuarbeiten. Ziel des Projekts war es, ein Gerät zu konzipieren, das eine extensive, zugleich jedoch effektive und effiziente Bearbeitung der Ernterückstände sowie der obersten zwei Zentimeter des Bodens ermöglicht.

Probleme mit Ausfall- und Durchwuchsrap, zunehmende Resistenzen von Ungräsern wie Ackerfuchsschwanz gegen herbizide Wirkstoffe und die stärker spürbaren Auswirkungen des Klimawandels gaben den Anstoß für dieses Vorhaben.

Der Projektstart im August 2020 stellte aufgrund der Corona-Pandemie eine besondere Herausforderung dar. Dennoch konnte bereits im Frühjahr 2021 ein erstes Versuchsmuster des neu entwickelten Bodenbearbeitungsgeräts unter Praxisbedingungen im Zwischenfruchtumbruch eingesetzt werden.

In der Projektarbeit konnte ich meine Begeisterung für Landtechnik mit meinem Interesse am Acker- und Pflanzenbau und insbesondere an nachhaltigen Bodenbewirtschaftungssystemen verbinden. Nachdem die ersten Testfahrten und Versuche vielversprechende Ergebnisse lieferten, fanden

ab 2022 erweiterte Feldversuche mit einem überarbeiteten Prototyp statt. Die kontinuierliche Weiterentwicklung im Projektverlauf, kombiniert mit Erkenntnissen aus wissenschaftlichen Feldversuchen und zahlreichen Einsätzen unter unterschiedlichsten Bedingungen, führte schließlich zur Serienreife des Gerätes.

Ein Highlight während der Projektlaufzeit war die Landtechnikmesse Agri-technica 2023. Der als *GrindStar* bezeichnete Rotationsschleifer wurde dort erstmals einem breiten Publikum vorgestellt und von einer Fachjury mit dem Innovation Award in Silber ausgezeichnet.

Den Abschluss des Projektes bildeten die Feldversuche 2024, in denen eine Vorserienmaschine des Rotationsschleifers nochmals umfangreich untersucht und getestet wurde. Die fast zeitgleiche Auslieferung der ersten serienmäßig von der Saphir Maschinenbau GmbH produzierten Rotationsschleifer rundeten das Projekt im Sommer 2024 ab.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Prof. Dr. Thomas Döring und Prof. Dr. Wolfgang Kath-Petersen für ihre fachliche Unterstützung und die konstruktive Begleitung der Arbeit. Ebenso danke ich Prof. Dr. Till Meinel, der mich gemeinsam mit Prof. Dr. Wolfgang Kath-Petersen während des gesamten Projektverlaufs unterstützt hat. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr. Claudia Knief für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie bei Dr. Thomas Gaiser für die Unterstützung der Prüfungskommission als fachnahes Mitglied bedanken.

Ein herzliches Dankeschön geht an Michael Pokriefke, Florian Lücking, Malte Hamann und Wilfried Klöpping von der Seed2Soil GmbH Co. KG sowie an Stefan Schröder, Tim Schröder, Ole Denker und Lars Wesch von der Saphir Maschinenbau GmbH. Für die zahlreichen Meetings, persönlichen Gespräche, Telefonate sowie die gemeinsame Arbeit in der Werkstatt und auf dem Feld mit den Versuchsmustern des Rotationsschleifers danke ich euch allen. Die angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit während der Projektlaufzeit werde ich in bester Erinnerung behalten.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Bau- und Landmaschinentechnik Köln, insbesondere bei meinem Kollegen Simon Kubinski, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Während des Projekts wurde ich von zahlreichen engagierten Studierenden unterstützt. Besonders bedanken möchte ich mich bei Felix Aumüller, Phelan Klemer, Gunnar Heins, Matthias Coenen und Katharina Bitterlich für ihre wertvolle Mitarbeit, den inspirierenden fachlichen Austausch und die hervorragende Zusammenarbeit.

Abschließend danke ich meiner Familie von Herzen. Hierbei gilt mein besonderer Dank meinem Vater Christian, der es mir ermöglichte, die in dieser Arbeit dargestellten Feldversuche auf unserem landwirtschaftlichen Betrieb durchzuführen. Ob beim Einsatz der Maschinen, dem Aufbau von Prototypen und Versuchsmustern oder beim Austausch von Verschleißteilen: Ich konnte mich stets auf deine und Opas Johannes Unterstützung und Expertise verlassen.

Daseburg, im Mai 2025

Kurzfassung

Die steigenden Anforderungen aus Politik und Gesellschaft sowie die bereits spürbaren Folgen des Klimawandels stellen den Ackerbau vor immer größere Herausforderungen. Diese Entwicklungen machen es notwendig, bestehende Verfahren zu überdenken und innovative Ansätze in die Praxis zu integrieren. Ein zentraler Faktor dabei ist die Bodenbearbeitung, die insbesondere im Hinblick auf die Regulierung der Begleitvegetation und ihren Einfluss auf zahlreiche Bodenparameter großes Potenzial für Optimierungen bietet. Eine vielversprechende Methode könnte die ultraflache, ganzflächige Stoppel- und Bodenbearbeitung mit einer Arbeitstiefe von 0 bis 2 cm sein.

Pflanzenkrankheiten, ausgelöst durch phytopathogene Erreger, sowie die Begleitvegetation beeinflussen sowohl den Ertrag als auch die Qualität von Ernteprodukten. Angesichts der Grenzen chemischer Regulierung, zum Beispiel durch zunehmende Resistenzbildungen und strenge Anwendungsvorgaben, sind alternative Strategien gefragt. Neben erweiterten Fruchtfolgen können auch optimierte Bodenbearbeitungsverfahren einen wesentlichen Beitrag zum Integrierten Pflanzenschutz leisten. Ziel ist es, den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel zu reduzieren, deren Risiken zu minimieren und der Entstehung von Resistenzen vorzubeugen.

Bodenbearbeitungsverfahren lassen sich anhand von Wirkprinzipien, Zielsetzungen sowie Bearbeitungstiefe und -intensität kategorisieren. Je nach Methode kommen spezifische Geräte zum Einsatz, die teilweise auf vollkommen unterschiedliche Wirkmechanismen zurückgreifen. Während bei der wendenden Bodenbearbeitung Pflüge zur Grundbodenbearbeitung verwendet werden, bietet die nicht-wendende Bodenbearbeitung eine breite Palette an Verfahren und Bodenbearbeitungsgeräten. Dazu zählen Geräte mit Zinken und Scheiben ebenso wie innovative Lösungen wie Kettenscheibeneggen, Strohstriegel oder Messerwalzen, die zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Die Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf ökologi-

sche, ökonomische und pflanzenbauliche Parameter sind komplex und hängen von weiteren Faktoren wie Witterung, Fruchtfolge und Zwischenfruchtanbau ab. Extensive Verfahren tragen zum Schutz von Boden und Umwelt bei, indem sie beispielsweise die Erosionsanfälligkeit durch Wind und Wasser verringern. Ertragsunterschiede im Vergleich zu intensiven Bodenbearbeitungsmethoden können durch gezielte Managementstrategien ausgeglichen werden.

Besonders anspruchsvoll im Hinblick auf die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen sowie die Folgen des Klimawandels gestaltet sich die Stoppelbearbeitung nach Winterraps und Wintergetreide. Nach der Winterrapserte stellen Ausfallraps und hohe Nmin-Werte wesentliche Herausforderungen dar. Nach der Wintergetreideernte sind es vor allem Ernterückstände und Ausfallgetreide, die Aufmerksamkeit erfordern, um Probleme bei der Aussaat und Etablierung der Folgefrucht zu vermeiden.

Die intensive, mischende Bodenbearbeitung weist jedoch Nachteile auf, insbesondere in Bezug auf das Management von Ernterückständen, den Erosionsschutz und die Bekämpfung von Ausfallraps und Ausfallgetreide. Eine vielversprechende Alternative ist die ultraflache, ganzflächige und nicht-mischende Bodenbearbeitung mit einer Arbeitstiefe von 0 bis 2 cm. Diese Methode könnte die Lücke zwischen intensiver Bodenbearbeitung und No-Tillage schließen und somit ökologische sowie ökonomische Vorteile kombinieren.

Die Anforderungen an die ultraflache Bodenbearbeitung können von herkömmlichen Bodenbearbeitungsgeräten bislang nicht vollständig erfüllt werden. Daher wurde ein neues Gerät entwickelt: ein 6 m breiter Rotationschleifer, der im Dreipunkt des Traktors getragen wird. Das Gerät besteht aus zwei Balken mit jeweils acht parallelogrammgeführten Rotoren, die entlang der X- und Y-Achse geneigt sind. Durch die Vorfahrtsgeschwindigkeit drehen sich die Rotoren um die Z-Achse, sodass die daran montierten Werkzeuge den Boden präzise in einer Tiefe von 0 bis 2 cm bearbeiten können.

Der Rotationsschleifer wurde in den Jahren 2022 bis 2024 zusammen mit einem Strohstriegel, einer Kurzscheibenegge und einer Großfederzinkenegge in umfangreichen Feldversuchen getestet, validiert und weiterentwickelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die ultraflache Stoppelbearbeitung die Keimung von Ausfallraps besser anregen kann als eine Bearbeitung in 5 cm

Tiefe mit der Kurzscheibenegge. Diese erwies sich jedoch als effektiver bei der Keimanregung von Ausfallgetreide und zeigte insgesamt eine höhere Wirksamkeit bei der Bekämpfung von Ausfallraps und -getreide. Ein Vorteil der ultraflachen Bearbeitung ist die bessere Erhaltung der Bodenbedeckung mit Ernterückständen, die im Vergleich zur Kurzscheibenegge weniger stark reduziert wird. Zudem sind die Verfahrenskosten bei der ultraflachen Bearbeitung mit Strohstriegel und Rotationsschleifer geringer. Allerdings zeigte sich, dass der Rotationsschleifer unter bestimmten Bedingungen nicht durchgehend ganzflächig schneidet, weshalb eine weitere technische Optimierung erforderlich ist.

Die Stoppelbearbeitung birgt zahlreiche Zielkonflikte, beispielsweise zwischen der effektiven Bekämpfung von Ausfallsamen und -pflanzen und dem Schutz vor Erosion. Hinzu kommen Herausforderungen durch den fortschreitenden Klimawandel sowie das Management von Ungräsern und Wurzelunkräutern, die ebenfalls Kompromisse in der Stoppelbearbeitung erfordern. Strategien müssen daher individuell an die Nachfrucht, die Witterungsbedingungen und die Zielsetzungen der jeweiligen Maßnahmen angepasst werden.

Alternative Ansätze wie der vollständige Verzicht auf Stoppelbearbeitung oder der Einsatz von Totalherbiziden sind nur eingeschränkt geeignet. Vielversprechend hingegen sind der Anbau von Zwischenfrüchten sowie die Umsetzung der sogenannten konservierenden Landwirtschaft (Conservation Agriculture).

Die getesteten Methoden haben sich insgesamt als praxistauglich und valide erwiesen. Unterschiede zeigten sich jedoch in Zeitaufwand, Kosten und der Umsetzbarkeit innerhalb der umfangreichen Versuche. Zukünftig werden Verfahren immer wichtiger, die die Datenerfassung auf dem Feld erleichtern und beschleunigen, dabei jedoch gleichzeitig eine hohe Datenqualität gewährleisten, wie beispielsweise die georeferenzierte Aufnahme von Felddaten.

Summary

The increasing demands from politics and society, along with the noticeable effects of climate change, are presenting significant challenges to arable farming. These developments necessitate rethinking traditional methods and integrating innovative approaches into practice. A key area for improvement is soil tillage, which offers substantial potential for optimization, particularly in weed regulation and its impact on various soil parameters. One promising method is ultra-shallow, full-surface stubble and soil cultivation at a working depth of 0 to 2 cm.

Plant diseases caused by phytopathogens and weed competition affect both the yield and quality of harvested products. With the growing limitations of chemical control—due to resistance development and stricter application regulations—alternative strategies are essential. Extended crop rotations and optimized tillage methods can significantly contribute to integrated pest management, aiming to reduce chemical pesticide use, minimize associated risks, and prevent resistance development.

Soil tillage methods are categorized by their working principles, objectives, and depth and intensity. Conventional tillage relies exclusively on ploughs, whereas non-inversion tillage employs a variety of implements, including tines, discs, and innovative tools such as chain disc harrows, straw harrows, and knife rollers, which are gaining prominence.

The effects of different tillage systems on ecological, economic, and crop production parameters are complex and influenced by factors such as weather conditions or crop rotation. Extensive methods help protect soil and the environment by reducing erosion. Yield differences compared to intensive tillage can often be mitigated through management strategies.

Stubble cultivation after winter oilseed rape and winter cereals presents specific challenges. Following winter oilseed rape, issues such as volunteer oilseed rape and high residual nitrogen levels are critical, whereas after winter cereals, harvest residues and volunteer cereals require attention to

ensure successful sowing and establishment of subsequent crops.

Intensive, mixed tillage has notable drawbacks, particularly in managing crop residues, controlling erosion, and addressing volunteer oilseed rape and cereals. Ultra-shallow, full-surface, non-mixing tillage at a depth of 0 to 2 cm offers a promising alternative, potentially bridging the gap between intensive tillage and no-tillage, combining ecological and economic benefits.

Conventional tillage equipment does not yet fully meet the demands of ultra-shallow cultivation. To address this, a new 6-meter-wide rotary grinder called tillage tool was developed, designed for three-point attachment. This device consists of two beams, each with eight parallelogram-guided rotors inclined along the X and Y axes. These rotors rotate around the Z-axis, allowing mounted tools to work the soil at a depth of 0 to 2 cm.

From 2022 to 2024, the rotary grinder was extensively tested, validated, and optimized alongside a straw harrow, compact disc harrow, and spring tine harrow in field trials. Results showed that ultra-shallow stubble cultivation stimulated the germination of volunteer oilseed rape more effectively than 5 cm deep cultivation with the disc harrow. However, the disc harrow proved superior in stimulating the germination of volunteer cereals and in controlling both volunteer rape and cereals. Ultra-shallow cultivation demonstrated advantages in preserving soil cover with crop residues, which were less disturbed compared to the disc harrow. Additionally, process costs were lower with the straw harrow and rotary grinder. Nevertheless, under certain conditions, the rotary grinder did not achieve full-surface cutting, necessitating further technical optimization.

Stubble cultivation involves multiple trade-offs, such as balancing effective volunteer seed and plant control with erosion prevention. Challenges like advancing climate change and the management of annual and perennial weeds require strategic compromises. Approaches must therefore be tailored to the succeeding crop, prevailing weather conditions, and specific objectives.

Alternative strategies, such as abandoning stubble cultivation entirely or using non-selective herbicides, have limited applicability. In contrast, the use of cover crops and the adoption of conservation agriculture (CA) offer promising solutions.

Overall, the tested methods proved practical and valid, though differences were observed in time requirements, costs, and feasibility. Future advancements will focus on methods that enhance and expedite field data collection while maintaining high data quality, such as georeferenced field data recording.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formelverzeichnis	XV
Abbildungsverzeichnis	XXIII
Tabellenverzeichnis	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Bodenbearbeitung	1
1.2 Rahmenbedingungen	2
1.2.1 Segetalflora	2
1.2.2 Ernterückstände	7
1.2.3 Klimawandel und Klimawandelfolgen	9
1.2.4 Politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen	10
1.3 Zusammenfassung	15
2 Stand von Wissenschaft und Technik	17
2.1 Definition und Beschreibung von Bodenbearbeitung und Bodenbearbeitungssystemen	17
2.1.1 Kategorisierung Bodenbearbeitung	17
2.1.2 Bodenbearbeitungsgeräte	31
2.2 Bodenbearbeitung in Ackerbausystemen	45
2.2.1 Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten	46
2.2.2 Regulierung der Begleitvegetation	51
2.3 Wirkung verschiedener Bodenbearbeitungssysteme	62
2.3.1 Ertrag, Ertragsbildung und Wachstumsverlauf	62
2.3.2 Ernterückstände, Bodenbedeckung und Bodenwasserhaushalt	65
2.3.3 Bodenphysikalische Parameter	66
2.3.4 Bodenbiologie	67
2.3.5 Bodenchemie, Nährstoffhaushalt und Nährstoffdynamik	72
2.3.6 Organische Bodensubstanz	73

2.3.7	Ökonomie	74
2.3.8	Ökologie	75
2.4	Zwischenfazit	77
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	78
3.1	Problemstellung: Stoppelbearbeitung nach Raps	78
3.2	Problemstellung: Stoppelbearbeitung nach Getreide	79
3.3	Hypothesen	84
4	Technische Entwicklung	86
4.1	Definition ultraflache Bodenbearbeitung	86
4.2	Anforderungen an Geräte zur flachen und ultraflachen Boden- und Stoppelbearbeitung	87
4.3	Problemstellung und Konzeptidee Rotationsschleifer GrindStar	89
4.4	Gerätekonzert Rotationsschleifer GrindStar	90
5	Feldversuche	95
5.1	Übergreifende und Methoden	95
5.1.1	Versuchsschlepper und eingesetzte Bodenbearbeitungs- geräte	95
5.1.2	Ermittlung der verfahrenstechnischen Parameter . . .	97
5.1.3	Ermittlung der Arbeitsqualität	97
5.1.4	Versuchsaufbau pflanzenbauliche Feldversuche	99
5.2	Feldversuche 2022	107
5.2.1	Beschreibung Rotationsschleifer Version 2 Stand 2022	107
5.2.2	Durchführung	109
5.2.3	Ergebnisse	111
5.2.4	Diskussion	125
5.2.5	Zwischenfazit	132
5.3	Feldversuche 2023	134
5.3.1	Beschreibung Rotationsschleifer Version 3 Stand 2023	134
5.3.2	Durchführung	135
5.3.3	Ergebnisse	139
5.3.4	Diskussion	151
5.3.5	Zwischenfazit	156
5.4	Feldversuche 2024	158
5.4.1	Beschreibung Rotationsschleifer Version 4 Stand 2024	158
5.4.2	Durchführung	159
5.4.3	Ergebnisse	159
5.4.4	Diskussion	162

5.4.5	Zwischenfazit	164
6	Diskussion	166
6.1	Rotationsschleifer	166
6.1.1	Bewertung der Technik	166
6.1.2	Bekämpfung von Ausfallsamen und Ausfallpflanzen . .	167
6.1.3	Stroh- und Stoppelkonditionierung	171
6.1.4	Verfahrenstechnik und -kosten	173
6.1.5	Bewertung der untersuchten Verfahrensketten	174
6.1.6	Zwischenfazit	176
6.2	Stoppelbearbeitung	177
6.2.1	Zielkonflikte in der Stoppelbearbeitung	177
6.2.2	Evaluierung Stoppelbearbeitung	180
6.2.3	Alternativen zur Stoppelbearbeitung	186
6.2.4	Zwischenfazit	198
6.3	Strategien für eine erfolgreiche Stoppelbearbeitung	199
6.3.1	Charakterisierung und Anforderungen wichtiger Kul- turen	203
6.3.2	Beispiele für die Stoppelbearbeitung zwischen ausge- wählten Fruchtfolgegliedern	206
6.3.3	Zwischenfazit	210
6.4	Diskussion der in den pflanzenbaulichen Feldversuchen ein- gesetzten Methoden	210
6.4.1	Bestimmung der Anzahl Pflanzen pro m ²	211
6.4.2	Vegetations- und Mulchdeckungsgrad	211
6.4.3	Bestimmung des NVDI	213
6.4.4	Statistik	215
6.4.5	Zwischenfazit	217
7	Fazit	219
8	Anhang	222

Abkürzungsverzeichnis

2,4,5-T 2,4,5-Trichlorphenoxyessigsäure

AM arbuskuläre Mykorrhiza

AMF Arbuskuläre Mykorrhizapilze

BYDV Barley yellow dwarf virus

CSV Comma-separated values

DON Deoxynivalenol

DSLR digitale Spiegelreflexkamera

DüV Düngeverordnung

GAB Grundanforderungen der Betriebsführung

GAP Gemeinsame Agrarpolitik

GLM Generalisiertes lineares Modell

GLÖZ Standards für den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand von Flächen

IPS Integrierter Pflanzenschutz

KAK Kationenaustauschkapazität

NDVI Normalized Difference Vegetation Index

PflSchAnwV Verordnung über Anwendungsverbote für Pflanzenschutzmittel

PflSchG Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen

RGB Rot-Grün-Blau

UAV Unmanned Aerial Vehicle

USA Vereinigte Staaten von Amerika

WDV Wheat dwarf virus

Formelverzeichnis

5.1:NDVI	104
5.2:Funktionsweise Canopeo	106

Abbildungsverzeichnis

2.1: Streichblechpflug	32
2.2: Zinkengrubber	34
2.3: Großfederzinkenegge	36
2.4: Kurzscheibenegge	37
2.5: Kettenscheibenegge und Busa Kreiselhackengrubber	38
2.6: Strohstriegel	40
2.7: Aufgesattelte Gerätekombination mit vorlaufender Kurzscheibenegge und Zinkenfeld	43
2.8: Wirkung der Bodenbearbeitung auf das Edaphon (verändert nach Roger-Estrade et al. (2010))	68
3.1: Winterweizenstoppel nach der Ernte	81
3.2: Mit einer Kurzscheibenegge bearbeitete Winterweizenstoppel	81
3.3: Winterweizenstoppel nach einem Arbeitsgang mit einer Großfederzinkenegge und Gänsefußscharen	83
3.4: Unterschiedlich bearbeitete Wintergerstenstoppel	84
4.1: Aufbau GrindStar	90
4.2: Wirkprinzip des Rotors und der Werkzeuge: angetrieben durch die Vorfahrtsgeschwindigkeit rotieren die entlang der X- und Y-Achse angestellten Rotoren, sodass die zur Rotorinnenseite geneigte Schnittkante Boden und pflanzliches Material bearbeitet.	91
4.3: Rotor Version 1 (2021)	92
4.4: Rotoraufnahmen Version 1 (2021 und 2022) und Version 2 (ab 2023)	92
4.5: Funktionsprinzip des Gesamtrtors	94
5.1: Wetter am Standort Daseburg im Jahr 2022. Die Balken zeigen den Niederschlag pro Monat bzw. pro Tag an. Die Linien bilden die durchschnittliche Lufttemperatur (rot) und die maximale bzw. minimale Lufttemperatur (schwarz) ab. (Deutscher Wetterdienst, 2024)	101

5.2:	Wetter am Standort Daseburg im Jahr 2023. Die Balken zeigen den Niederschlag pro Monat bzw. pro Tag an. Die Linien bilden die durchschnittliche Lufttemperatur (rot) und die maximale bzw. minimale Lufttemperatur (schwarz) ab. (Deutscher Wetterdienst, 2024)	102
5.3:	Rotor Version 2 (2022)	108
5.4:	Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	112
5.5:	Vegetationsdeckungsgrad Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	113
5.6:	NDVI Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	114
5.7:	Deckungsgrad Mulch Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	115

- 5.8: Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 116
- 5.9: Vegetationsdeckungsgrad Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 117
- 5.10: NDVI Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 118
- 5.11: Deckungsgrad Mulch Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 119
- 5.12: Vegetationsdeckungsgrad Winterraps Höhe Menne Windmühle 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 120

5.13: NDVI Winterraps Höte Menne Windmühle 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	121
5.14: Deckungsgrad Mulch Winterraps Höte Menne Windmühle 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	122
5.15: Aufgewickeltes Getreidestroh am Rotor des Rotationsschleifers Version 2	133
5.16: Rotor Version 3 (2023)	135
5.17: Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	139
5.18: Vegetationsdeckungsgrad Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	140

- 5.19: NDVI Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. . . . 141
- 5.20: Deckungsgrad Mulch Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 142
- 5.21: Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 143
- 5.22: Vegetationsdeckungsgrad Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. . . . 144
- 5.23: NDVI Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 145

5.24: Deckungsgrad Mulch Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. . . .	145
5.25: Vegetationsdeckungsgrad Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	146
5.26: NDVI Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. . . .	147
5.27: Deckungsgrad Mulch Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.	148
5.28: Mit dem Rotationsschleifer am 12.09.2023 bearbeitete Winterrapsstoppelparzelle 6 Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung	156
5.29: Rotor Version 4 (2024)	159
5.30: Bearbeitungsprofile der drei Bodenbearbeitungsgeräte. Die rote, gestrichelte Linie zeigt die durchschnittliche Arbeitstiefe des jeweiligen Bodenbearbeitungsgerätes in der jeweiligen Wiederholung an.	161

5.31: Vergleich von zwei Kurzscheibeneggentypen mit Hohl- scheibe (links) und Wellscheibe (rechts). Dargestellt ist jeweils die Seitenansicht sowie eine Draufsicht auf den Bearbeitungshorizont.	163
6.1: Mit dem Rotationsschleifer Version 4 zweimal bearbeitete Winterrapsstoppel 12 Tage nach der zweiten Stoppelbear- beitung	168
6.2: Mit dem Rotationsschleifer Version 4 dreimal bearbeitete Winterrapsstoppel unmittelbar nach der dritten Stoppelbe- arbeitung	169
6.3: Vereinfachte Darstellung der Stoppelbearbeitung mit dem Rotationsschleifer nach Winterraps; die rote Linie zeigt den Auflagepunkt des Gleittellers, die hellbraune Fläche ent- spricht der Mulchschicht, die dunkelbraune Fläche entspricht dem Boden	170
6.4: Bodenoberfläche einer Wintergerstenstoppel nach zwei Ar- beitsgängen mit dem Rotationsschleifer, die 4 bzw. 11 Tage nach der Ernte durchgeführt worden sind	172
6.5: Stoppeln und abgetrennte Wurzelballen einer zweimal mit dem Rotationsschleifer bearbeiteten Wintergerstenfläche	173
6.6: Zerkleinerung der oberirdischen Biomasse einer biodiversen Sommerzwischenfrucht mit einem Schlegelmulcher	193
6.7: Umbruch einer biodiversen Sommerzwischenfrucht mit einer Kurzscheibenegge	194
6.8: Direktsaat in eine stehende Sommerzwischenfrucht	194
6.9: Winterrapsstoppel zwei Wochen nach der Rapsernte; links ohne Untersaat, rechts mit 3 kg/ha Weißklee ausgebracht zusammen mit dem Winterraps	195
6.10: Prinzipien der Konservierenden Landwirtschaft (verändert nach (Choudhary et al., 2016; Food and Agricultural Orga- nization of the United Nations, 2023))	196
6.11: Entscheidungsbaum Nacherntemanagement; durchgehende rote Pfeile zeigen ideale Maßnahme an, gestrichelte rote Pfei- le zeigen Alternativen, schwarze Pfeile verweisen auf Ziele des Nacherntemanagements	199
6.12: Eine Veränderung des Winkels zwischen Kamera und Boden führt auch zu einem veränderten Bildausschnitt.	212

- 8.1: Deckungsgrad unbedeckter und unbewachsener Boden Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt. 223

Tabellenverzeichnis

2.1: Einteilungskriterien für herbizide Wirkstoffe, verändert nach Hallmann et al. (2009)	53
5.1: Eigenschaften Versuchstraktor Fendt 716 Vario TMS	96
5.2: Eigenschaften Bodenbearbeitungsgeräte	97
5.3: Versuchsvarianten zur Ermittlung der Arbeitsqualität	98
5.4: Versuchsflächen der drei Versuchsjahre 2022, 2023 und 2024 mit den jeweiligen Bodeneigenschaften nach VDLUFA	103
5.5: Eigenschaften der fünf monochromen Sensoren für die Erstellung von Multispektralaufnahmen mit dem UAV DJI P4 Multispectral	104
5.6: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Wintergerste Kötterbreite 2022	109
5.7: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterweizen Heide groß 2022	110
5.8: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterraps Höte Menne Windmühle 2022	111
5.9: Kraftstoffverbrauch 2022	124
5.10: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Wintergerste Döseler Kreuz 2023	136
5.11: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterweizen Wanne 2023	137
5.12: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterraps Höte Menne Garten 2023	138
5.13: Kraftstoffverbrauch 2023	150
5.14: Arbeitsqualität der drei Bodenbearbeitungsgeräte Rotationsschleifer, Großfederzinkenegge und Kurzscheibenegge. Die Werte für die Standardabweichung und den Variationskoeffizienten sind auf zwei Nachkommastellen gerundet.	160

6.1:	Gesamtbewertung der Verfahrensketten; Keimanregung Ausfallsamen wurde anhand der Anzahl Pflanzen pro m ² und des Vegetationsdeckungsgrades bei der ersten Bonitur nach dem 1. Stoppelbearbeitungsgang bewertet; Bekämpfung von aufgelaufenen Pflanzen wurde anhand der Anzahl Pflanzen pro m ² und des Vegetationsdeckungsgrades beim letzten Boniturtermin bewertet; Erhalt der Mulchauflage wurde anhand des Mulchdeckungsgrades beim letzten Boniturtermin bewertet; Die Verfahrenskosten wurden anhand von Kraftstoffverbrauch und Flächenleistung bewertet; - schlecht bzw. negativ, 0 durchschnittlich, + gut bzw. positiv	176
6.2:	Ziele der Stoppelbearbeitung und notwendige Funktionen der Bodenbearbeitungswerkzeuge	178
6.3:	Saatzeiträume und Ertragsniveau von Winterraps, Winterweizen, Sommerackerbohne und Zuckerrübe sowie Erntezeiträume und Ertragsniveau der Vorfrüchte Wintergerste, Winterweizen und Winterraps. Saat- und Erntetermine basieren auf dem Zeitraum der Erntejahre 2010 bis 2023. Das Ertragsniveau basiert auf den durchschnittlichen Erträgen von 2018 bis 2022. Saat- und Erntetermin sowie das Ertragsniveau der Sommerackerbohne basieren auf Richtwerten der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Doleschel & Hartl, 2024)	207
6.4:	Bewertung der eingesetzten Methoden zur Datenaufnahme und -analyse	218
8.1:	Übersicht über die Regularien zum Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in Deutschland und der EU	222
8.2:	Saat- und Erntetermine für die Szenarioanalyse zur Stoppelbearbeitung	223

1 Einleitung

Die Landwirtschaft in Europa und Deutschland sieht sich bedingt durch den Klimawandel, höhere gesellschaftliche Anforderungen und sich verändernde politische Rahmenbedingungen enormen Herausforderungen ausgesetzt. Etwa die Hälfte der Landfläche in Deutschland wird landwirtschaftlich genutzt. Ca. 70 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche wiederum werden für den Ackerbau verwendet (Statistisches Bundesamt, 07.12.2024). Dabei unterscheiden sich Regionen hinsichtlich ihres Klimas (Albrecht et al., 2023) und ihrer Böden (Schubert, 2016), sodass auch die Voraussetzung für den Acker- und Pflanzenbau regional unterschiedlich sind. Ganz unterschiedlich ist daher auch die Intensität in der Bodenbearbeitung sowie die Anforderungen an diese.

1.1 Bodenbearbeitung

Bodenbearbeitung umfasst den mechanischen Eingriff in den Boden mit dem primären Ziel, den Boden für die folgende Aussaat vorzubereiten (Bischoff et al., 2018) und unter möglichst vielen Bedingungen Erträge abzusichern (Baeumer, 1992). Neben der kurzfristigen Ertragssteigerung ist bei der Bodenbearbeitung zusätzlich der langfristige Erhalt der Bodenfruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit eines Standortes zu berücksichtigen. Gleichzeitig sollen potentiell negative Einflüsse auf die Umwelt minimiert werden (Estler & Knittel, 1996).

Zu den negativen Effekten und Nachteilen von Bodenbearbeitung können die höhere Anfälligkeit für Wind- und Wassererosion (van Oost et al., 2006), der hohe Energiebedarf (Rusu, 2014; Tabatabaefar et al., 2009), unerwünschte Mineralisation und Humusabbau (Koch & Stockfish, 2006), die Zerstörung natürlicher Bodenaggregate (Kasper et al., 2009; Paul et al., 2013) und die Störung des Bodenlebens (Kladivko, 2001) gezählt werden.

Alternative Verfahren wie Direktsaat bzw. No-Tillage verzichten auf Bodenbearbeitung. Diese Systeme sind jedoch in der Praxis mit anderen Herausforderungen wie der Notwendigkeit von (Total-) Herbiziden (Colbach &

Cordeau, 2022) und spezieller Sätechnik (Baker et al., 2007), der schwierigen Etablierung von Pflanzenbeständen unter sehr nassen Bedingungen, dem höheren Vorkommen von Schnecken und Mäusen sowie teilweise geringeren Erträgen (Soane et al., 2012) verbunden.

In den letzten Jahren wurde ultraflache Stoppel- und Bodenbearbeitung als Bindeglied zwischen intensiver Bodenbearbeitung und Direktsaat zunehmen stärker diskutiert. Ob dieses neue Verfahren praxistauglich ist und mögliche Vorteile intensiver Bodenbearbeitung und Direktsaat vereinen kann, soll in dieser Arbeit durch eine umfassende Literaturrecherche zum Thema Bodenbearbeitung und durch umfangreiche Feldversuche in der Stoppelbearbeitung nach Wintergetreide und Winterraps herausgefunden werden.

1.2 Rahmenbedingungen

Um besser zu verstehen, warum Bodenbearbeitung durchgeführt wird, woher Unterschiede zwischen Regionen und Betrieben stammen und welche potentiellen Chancen und Grenzen mit ihr verbunden sind, werden die Rahmenbedingungen und Herausforderungen im Acker- und Pflanzenbau in diesem Kapitel beispielhaft skizziert und mit Blick auf das Thema Bodenbearbeitung erläutert.

1.2.1 Segetalflora

Der maximal erreichbare Ertrag einer Kulturpflanze wird im Acker- und Pflanzenbau durch abiotische und biotische Faktoren begrenzt. Zu den abiotischen Faktoren zählen neben den Witterungsbedingungen und dem Klima am Anbaustandort auch die Verfügbarkeit von Nährstoffen. Einfluss auf den Ertrag haben weiterhin biotische Faktoren wie Pathogene, Schädlinge und insbesondere auch Unkräuter und Ungräser (Oerke, 2006; Oerke & Dehne, 2004). In diesem Kapitel werden Unkräuter, Ungräser sowie Ausfallsamen und Ausfallpflanzen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Ackerbau eingeordnet.

Unkräuter und Ungräser Hallmann et al. (2009) definieren Unkräuter als "vergesellschaftete Wildpflanzen in Agrarökosystemen, die mit den Kulturpflanzen um begrenzt verfügbare Wachstumsfaktoren (...) konkurrieren und diese dadurch indirekt schädigen". Gerowitt (2016) erläutert, dass

Ackerunkräuter keine festgelegte Taxa sind, sondern über das Vorkommen in bewirtschafteten Acker- und Pflanzenbausystemen definiert werden können. Etabliert haben sich vor allem mit Blick auf agrarökologische Funktionen von Unkräutern auch die Begriffe Beikraut, Ackerbeikraut, Ackerunkraut, Ackerwildkraut und Ackerbegleitflora. Ackerwildkrautgemeinschaften bzw. Ackerunkrautgesellschaften werden unter dem Begriff Segetalflora zusammengefasst (Freyer & Axmann, 2016; van Elsen, 2011). Der Begriff der Segetalflora beinhaltet zudem die Artenvielfalt auf landwirtschaftlichen Flächen abseits der Kultur- und Nutzpflanzen (Hallmann et al., 2009). Im Folgenden wird zwischen dikotylen, zweikeimblättrigen Pflanzen (Unkraut) und monokotylen, einkeimblättrigen Pflanzen (Ungras) unterschieden (Diepenbrock et al., 2005).

Differenziert werden können Unkräuter und Ungräser anhand spezifischer Merkmale. Dazu zählen Keimung, Vermehrung, Lebensdauer sowie Ansprüche an Standort und Klima. Bei der Keimung kann einerseits zwischen sommerannuellen Frühjahrskeimern und winterannuellen Sommer- und Herbstkeimern unterschieden werden. Hallmann et al. (2009) unterteilen winterannuelle Arten zudem in Pflanzen, die ganzjährig, vorwiegend im Herbst oder im Herbst und Frühjahr keimen. Zahlreiche Unkraut- und Ungrasarten wie beispielsweise Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) zählen zu den Lichtkeimern. Im Gegensatz zu den Dunkelkeimern, zu denen beispielsweise Schwarzer Nachtschatten (*Solanum nigrum*) gehört, benötigen sie Lichtreize zur Keimstimulation. Unterschiede finden sich auch bei der Vermehrung der Unkräuter, wobei im Wesentlichen zwischen Samen- und Wurzelunkräutern unterschieden wird. Einjährige, zweijährige und ausdauernde Unkrautarten werden auch als annuelle, bienne und perennierende Arten bezeichnet. Unterscheidungsmerkmal ist die Lebensdauer (Hallmann et al., 2009). Ellenberg (1996) klassifiziert Pflanzenarten anhand botanischer und ökologischer Eigenschaften sowie der Standortansprüche, zu denen unter anderem die Temperatur, die Beleuchtungsstärke und das Vorkommen von Stickstoff gezählt werden. Die Einteilung der Beikräuter in ökologische Gruppen anhand unterschiedlicher Standortansprüche und klimatische Bedingungen und die Standortbewertung anhand der Segetalflora kommen jedoch in Kulturlandschaften insbesondere auf intensiv genutztem Grünland und im Ackerbau an ihre Grenzen. Eingriffe wie Maßnahmen zur Unkrautregulierung, Bodenbearbeitung oder die Stickstoffdüngung beeinflussen die Segetalflora, weshalb eine Standortbewertung nach Ellenberg (1996) mit dem Konzept der Zeigerpflanzen nicht oder nur bedingt möglich ist (Wilhelm, 2016).

Moderner Acker- und Pflanzenbau ist durch den Anbau überwiegend einjähriger Arten gekennzeichnet, die mit Ausnahme von beispielsweise Wickroggen oder Gemengen aus Mais (*Zea mays* L.) und Stangenbohne (*Phaseolus vulgaris*) vorwiegend in Reinsaat angebaut werden. Beikräuter fördern in diesen Anbausystemen die Biodiversität. Die United Nations Organization (1992) definieren biologische Vielfalt bzw. Biodiversität als Variabilität unter lebenden Organismen jeglicher Herkunft. Vor allem Arten, die nur eine geringe Konkurrenz für die Kulturpflanzen darstellen, aber gleichzeitig beispielsweise als Nahrungsquelle für höhere trophische Stufen dienen, tragen zur Förderung der Biodiversität in Agrarökosystemen bei (Esposito et al., 2023; Storkey & Westbury, 2007). Unkräuter und Ungräser dienen u.a. Arthropoden als Nahrungsquelle und Habitat. Durch die Förderung von Nützlingen kann die Segetalflora dabei unterstützen, Ziele des Integrierten Pflanzenschutzes zu erreichen (Barberi et al., 2010; Norris & Kogan, 2000, 2005). Nützlich sind Unkräuter und Ungräser auch mit Blick auf Wind- und Wassererosion. Ähnlich wie Kulturpflanzen, Zwischenfrüchte oder Untersaaten durchwurzeln und bedecken Unkräuter und Ungräser den Boden und verringern das Erosionspotential (Seitz et al., 2019).

Unkräuter und Ungräser behindern den störungsfreien Einsatz von Bodenbearbeitungsgeräten und Erntemaschinen. Klettenlabkraut (*Galium aparine*), Ackerwinde (*Convolvulus arvensis*) oder die Gemeine Quecke (*Agropyron repens*) sammeln und wickeln sich beispielsweise am Scharstiel einer Großfederzinkenegge und verhindern den notwendigen Materialfluss durch das Bodenbearbeitungsgerät. Es kann zudem zu Haufenbildung am Vorgewende kommen, die einen weiteren Arbeitsgang zur Zerkleinerung und Einarbeitung erfordern. Während der Ernte verringern Unkräuter und Ungräser das Zeitfenster für den Mähdrusch. Die Pflanzenbestände trocknen schlechter ab und sind abends zu einem früheren Zeitpunkt wieder zu feucht für einen störungsfreuen Drusch. Im erntereifen Bestand können Klettenlabkraut, Ackerwinde oder Windenknöterich (*Polygonum convolvulus*) die Druschorgane verstopfen bzw. blockieren und damit zu einem Ausfall des Mähdreschers führen. Unkraut- und Ungrassamen sowie Bestandteile der Pflanzen sind als Besatz im Erntegut problematisch. Vermarktungsprobleme und Abzüge aufgrund höherer Reinigungs- und Trocknungskosten erhöhen die Produktionskosten und senken den Gewinn. Trocknungskosten entstehen durch die notwendige Nachtrocknung des Erntegutes, wenn die Feuchtigkeit durch Besatz auf ein nicht mehr tolerierbares Maß angestiegen ist (Köller & Hensel, 2019).

Relevant für Acker- und Pflanzenbau ist die Interaktion zwischen Kulturpflanzen und der Segetalflora. Insbesondere die Schadwirkung der Unkräuter und Ungräser auf die Kulturpflanze ist mit Blick auf die Regulierung der Ackerbegleitflora von Bedeutung. Kulturpflanzen konkurrieren mit Unkräutern und Ungräsern um Standraum, Licht, Wasser und Nährstoffe. Dieser Konkurrenzeffekt führt zu Ertragsrückgängen und kann bei starker Verunkrautung zum Totalausfall der Nutzpflanze führen. Oerke (2006) quantifiziert den weltweiten Ertragsverlust durch Unkräuter und Ungräser im Weizen auf durchschnittlich 7,7 % mit einer Spannbreite von 3 bis 13 %. Potentiell liegt der Ertragsverlust bei Verzicht auf Maßnahmen zur Unkrautregulierung mit durchschnittlich 23 % und einer Spannbreite von 18 bis 29 % nochmal deutlich höher. Für die USA und Kanada fassen Flessner et al. (2021) Versuchsergebnisse von 2007 und 2017 durchgeführten Feldversuchen zusammen und berichten von Ertragsverlusten durch Unkräuter von 3 bis 34,4 % im Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) und 3 bis 60 % im Sommerweizen. Geddes et al. (2022) werteten Versuchsergebnisse aus den USA und Canada zur Ertragsentwicklung von Sommerraps (*Brassica napus* L.) aus, die zwischen 2003 und 2020 erhoben worden sind. Die durchschnittliche durch Unkräuter bzw. Ungräser hervorgerufene potentielle Ertragsreduktion für Sommerraps betrug 29,5 %.

Segetalflora nimmt in Agrarökosystemen wichtige Funktionen ein. Gleichzeitig reduziert sie Ertrag und Qualität der Ernteprodukte. Herausfordernd ist daher die Unkrautregulierung auf ein für den Acker- und Pflanzenbau ökonomisch vertretbares Maß, ohne ökologisch wertvolle und nützliche Arten vollständig zu verdrängen (Storkey & Westbury, 2007).

Ausfallsamen und -pflanzen Im Gegensatz zu Unkräutern und Ungräsern entstammen Ausfallsamen wie Ausfallgetreide oder Ausfallraps den Kultur- bzw. Nutzpflanzen. Ogg und Parker (2000) zählen Ausfallsamen und -pflanzen zu den Unkräutern bzw. Ungräsern. Ausfallsamen und Ausfallpflanzen sind beim Mähdrusch entstandene Kornverluste. Schädlinge, ungünstige Witterungsbedingungen oder das Überschreiten der Totreife führen zu Ausfall- bzw. Vorernteverlusten. Bei der Ernte der Druschfrüchte können Aufnahmeverluste, Ausdruschverluste, Restkornabscheidungsverluste und Reinigungsverluste durch die korrekte Einstellung des Mähdreschers auf ein nicht vermeidbares Maß reduziert werden (Rademacher, 2019).

Das Vorkommen und die Höhe von Vorernteverlusten werden zunächst von den Sorteneigenschaften beeinflusst. Ein Zuchtziel von Winterraps oder Ackerbohne ist eine hohe Schoten- bzw. Hülsenplatzfestigkeit. Bei der Züchtung neuer Getreidesorten spielt insbesondere bei der Wintergerste die Reduzierung der Anfälligkeit für Ährenknicken eine wichtige Rolle, um Vorernteverluste zu vermeiden (Guddat et al., 2015). Bei ungünstigen Witterungsbedingungen wie Sturm oder Hagel kann es zu hohen Vorernteverlusten bis hin zum Totalausfall kommen. In der Regel entsteht der größte Teil der Kornverluste jedoch während der Druschfruchternte. Zeitlich treten Ausfallsamen und Ausfallpflanzen daher ab dem Zeitpunkt der Vollreife auf (Diepenbrock et al., 2005; Köller & Hensel, 2019).

Ausfallpflanzen treten einerseits zwischen zwei Hauptkulturen auf, andererseits können auch in der Folgefrucht Ausfallpflanzen vorkommen. Keimen und wachsen Ausfallpflanzen in der Folgefrucht, können sie direkte Konkurrenz für diese darstellen. Eine Bekämpfung ist chemisch und mechanisch möglich, wobei der Bekämpfungserfolg von zahlreichen Einflussfaktoren wie der Witterung, dem Zeitpunkt der Maßnahme und im Falle der chemischen Bekämpfung von den verwendeten Wirkstoffen und der angebauten Hauptkultur abhängig ist. Während beispielsweise Ausfallraps in der Folgefrucht chemisch gut reguliert werden kann, ist die Bekämpfung von Ausfallweizen in Wintergerste nicht möglich. Falls keine mechanische Kontrolle des Ausfallweizens in der Wintergerste möglich ist, muss der Ausfallweizen im Zeitraum zwischen Winterweizenernte und Aussaat der Wintergerste bekämpft werden.

Analog zur Segetalflora (siehe Unterabschnitt 1.2.1) konkurrieren Ausfallpflanzen mit den Hauptkulturen um Ressourcen. Ausfallpflanzen dienen zudem als Wirtspflanzen für Pathogene und Schädlinge. Beispielsweise schädigt der Rapserdfloh (*Psylliodes chrysocephala* L.) als bedeutender Herbstschädling durch Lochfrass junge Rapspflanzen. Auch die Larven verursachen durch Bohrfraß Schäden an Blattstielen und Stängeln. Rapserdföhe nutzen neben Unkräutern wie Ackersenf (*Sinapis arvensis*) oder Acker-Hellerkraut (*Thlaspi arvense*) auch Ausfallraps als Wirtspflanze (Hallmann et al., 2009).

Verzwergungsviren wie das Gerstengelbverzwergungsvirus (*Barley yellow dwarf virus*, BYDV) oder das Weizenverzwergungsvirus (*Wheat dwarf virus*, WDV) können im Getreide zu erheblichen Schäden führen. Ausfall-

getreide dient als Wirtspflanze für Blattläuse und Zikaden. Neben der direkten Bekämpfung der als Virusvektoren dienenden Blattläuse (*Aphidoidea*) und Zikaden (*Auchenorrhyncha*) ist insbesondere die konsequente Ausfallgetreidebekämpfung ein wichtiger Baustein, um Verzweigungsviren zu regulieren und den Befall im Wintergetreide möglichst gering zu halten (Hallmann et al., 2009).

Um Schäden durch Ausfallsamen und Ausfallpflanzen zu vermeiden, empfehlen Ogg und Parker (2000) einerseits präventive Maßnahmen wie die Vermeidung von Ernteverlusten und andererseits Boden- und Stoppelbearbeitung, Fruchtfolge, Herbizideinsatz, mechanisches Entfernen der Ausfallpflanzen aus der Folgefrucht und biologische Kontrolle durch Beweidung.

Die Bekämpfung und Regulierung von Ausfallgetreide und Ausfallraps nach der Ernte und zwischen zwei Hauptkulturen ist zusammenfassend ein wichtiger Baustein, um einerseits die Verbreitung von Schädlingen, Viren und weiteren Pathogenen zu verhindern und andererseits die Konkurrenz dieser Ausfallpflanzen zur folgenden Hauptkultur möglichst gering zu halten.

1.2.2 Ernterückstände

Als Ernterückstände werden alle Bestandteile einer Pflanze bezeichnet, die nicht mit der Ernte abgefahren werden und somit auf oder im Boden verbleiben (Spektrum Akademischer Verlag, 2000). Ernterückstände dienen als Erosionsschutz, führen Nährstoffe zurück in die Stoffkreisläufe, tragen zur Ernährung des Bodenlebens bei und tragen zum Erhalt und Aufbau der organischen Bodensubstanz bei (Diepenbrock et al., 2005; Köller & Hensel, 2019). Insbesondere in Direktsaatsystemen sind Ernterückstände als Erosionsschutz und zur Reduktion des Unkrautdruckes von Bedeutung. Durch allelopathische und mechanische Effekte unterdrücken sie das Wachstum einiger Beikrautarten (Kayode & Ayeni, 2009; Massucati & Köpke, 2014). Gleichzeitig können diese positiven Effekte mit Blick auf die Kulturpflanze auch dazu führen, dass Keimung und Wachstum der Hauptkultur gestört werden (Kayode & Ayeni, 2009; Wuest et al., 2000). Weiterhin führen Ernterückstände insbesondere bei heterogener Verteilung und bei hohen Mengen dazu, dass Bodenbearbeitungsgeräte und Direktsaatmaschinen nicht störungsfrei arbeiten können und eine ausreichende Arbeitsqualität nicht durchgängig sichergestellt werden kann (Baker et al., 2007). Bei Direktsaat beeinflussen Ernterückstände die Saatgutablage negativ. Stroh im Saatschlitz bindet Wasser und Nährstoffe, wodurch Keimung und Jugend-

entwicklung gestört werden (Köller & Hensel, 2019).

Phytopathogene Erreger können nach der Ernte auf Ernterückständen überleben und sich weiterhin vermehren (Duczek et al., 1999; Köhl et al., 2011). Beispielsweise verursacht *Gibberella zeae* (Anamorph: *Fusarium graminearum*) neben Keimlings- und Fußfäule auch Ährenfäule bzw. partielle Taubährigkeit an Getreideähren. Die mit Mykotoxinen wie Deoxynivalenol (DON) kontaminierten Körner sind für den Verzehr nicht mehr geeignet. Auf den Ernte- und Pflanzenrückständen von Weizen und Mais entstehen Perithezien, aus denen Ascosporen in die Umwelt gelangen und weitere Pflanzen infizieren können. Als vorbeugende, wirksame Maßnahme um die Ausbreitung von *Gibberella zeae* zu verringern und die Infektion von Winterweizen zu verhindern wird der Stoppelbearbeitung und der Zerkleinerung der Ernterückstände eine wichtige Rolle zugesprochen (Hallmann et al., 2009).

Neben phytopathogenen Erregern dienen Ernterückstände auch Schädlingen als Nahrung und Habitat. So nahmen Schäden durch den Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*), der in Ernterückständen von Silo- und Körnermais überwintert, beispielsweise in der Region Neubrandenburg von durchschnittlich 2,2 % befallene Pflanzen im Jahr 2001 auf 20,9 % befallene Pflanzen im Jahr 2006 zu (Heidel, 2015). Auch in anderen Regionen Deutschlands konnte sich dieser Schädling weiter ausbreiten (Freier et al., 2015; Gathmann & Rothmeier, 2005). Die Larven des Maiszünslers überdauern den Winter bodennah in den Ernterückständen von Silo- und Körnermais. Insbesondere intakte Stoppeln dienen als Habitat für die Larven. Etwa 78 % der Larven befinden sich nach der Ernte im Bereich von 0 bis 30 cm der Maisstoppeln über dem Boden (Schaafsma et al., 1996). Die Larven verpuppen sich im Mai. Adulte Maiszünsler legen ihre Eier von Juni bis August an der Blattunterseite der Maisblätter. Circa zwei Wochen nach der Eiablage schlüpfen die Larven und verursachen Schäden mit bis zu 30 % Ertragsverlust durch Fraß im Maisstängel. Schäden entstehen direkt durch Fraß der Maiszünslerlarven und indirekt durch ein Abknicken der Maispflanzen im Bereich des Blütenstandes sowie durch Sekundärbefall mit mykotoxinbildenden Pilzen (Hallmann et al., 2009). Als effektive Bekämpfungsmaßnahme mit hohem Wirkungsgrad wird daher die intensive Zerkleinerung der Maisstoppeln nach der Ernte empfohlen (Grosa et al., 2016).

Mit Blick auf das Management der Ernterückstände von Getreide, Win-

terraps und Mais ergibt sich somit ein Zielkonflikt aus Erosionsschutz und der vorbeugenden Bekämpfung von Schädlingen und Pathogenen.

1.2.3 Klimawandel und Klimawandelfolgen

Die globale Erwärmung und die damit verbundene Zunahme von Extremwetterereignissen beeinflusst den Acker- und Pflanzenbau (Altieri et al., 2015; Lobell & Gourdji, 2012; Paudel & Hatch, 2012). Gegenüber dem Referenzzeitraum von 1850 bis 1900 ist die globale Oberflächentemperatur zwischen 2011 und 2020 um 1,1 °Celsius höher gewesen. Es gilt als sehr wahrscheinlich, dass eine globale Erwärmung um 1,5 °Celsius in naher Zukunft erreicht und überschritten werden wird (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Die Auswirkungen sind bereits heute zum Beispiel in Form von häufigeren Dürreereignissen zu spüren. Anhand der Dürreintensität während der Vegetationsperiode zwischen April und Oktober kann aufgeführt werden, wie sich der Klimawandel auf den Bodenwasserhaushalt auswirken kann. So wurde im Rahmen des Dürremonitorings am Helmholtzzentrum für Umweltforschung im Zeitraum von 2018 bis 2023 insbesondere für Mittel- und Ostdeutschland nahezu kontinuierlich Dürre bis 2 m Bodentiefe ermittelt bzw. modelliert (Kumar et al., 2013; Marx, 2023; Marx et al., 2016; Samaniego et al., 2010, 2013). Grundsätzlich erhöht die globale Erwärmung die Wahrscheinlichkeit für bestimmte Wetterextreme. Neben Trockenheit und Dürre zählen dazu auch Starkniederschläge, Hochwasser, Sturmfluten, Hagel und Gewitter sowie Stürme und im Extremfall Tornados (Kaspar et al., 2021).

Ein weiterer Indikator für die globale Erwärmung ist die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten (Fitchett et al., 2015; Gordo & Sanz, 2010; Piao et al., 2019; Richardson et al., 2013). In Deutschland zeichnet sich ab, dass die Vegetationsperiode früher startet und länger andauert. Wintergetreide und im Herbst ausgesäte Ölsaaten profitieren zum Teil vom frühen Vegetationsstart. Diese Kulturen können die Winterfeuchte gut ausnutzen und leiden weniger stark unter einer Vorsommertrockenheit als Sommerungen. Kulturen, die sich in warmen Frühjahren gut entwickeln, können jedoch bei Spätfrösten zum Zeitpunkt der Blüte empfindlich geschädigt werden (He et al., 2017).

Mit stärkerem Blick auf die Landwirtschaft bedeutet die globale Erwärmung neben reduzierten Erträgen (Challinor et al., 2014) eine größere Ertragsunsicherheit und zunehmende Ertragsschwankungen (Ray et al.,

2015). Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Ertrag sind allerdings regional unterschiedlich und je nach Kulturart verschieden stark ausgeprägt (Challinor et al., 2014). Notwendig sind daher Anpassungsstrategien, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion zu minimieren. In diesem Zusammenhang spielt der Erhalt und die Steigerung der Bodenfruchtbarkeit eine wichtige Rolle. Bodenfruchtbarkeit wird in der Bodenkunde auch als Ertragsfähigkeit definiert (Amelung et al., 2018). Insbesondere im ökologischen Landbau umfasst der Begriff Bodenfruchtbarkeit als Summenparameter weitere physikalische (Aggregatstabilität, Bodendichte, Bodenstruktur, etc.), chemische (Kationenaustauschkapazität, Nährstoffgehalte, organische Substanz, etc.) und biologische bzw. biochemische (biologische Aktivität, Nährstoffumsatz, etc.) Eigenschaften des Bodens, die sich weitreichend auf das Pflanzenwachstum auswirken (Freyer & Axmann, 2016). Insbesondere der Anteil an organischer Substanz beeinflusst die Speicherfähigkeit von Nährstoffen und Wasser, sodass Erhalt und Erhöhung dieser zur Anpassung an den Klimawandel forciert (4 per 1000 initiative, 2024) und kontrovers diskutiert werden. Neben der Erweiterung der Fruchtfolge, dem Anbau von Zwischenfrüchten oder auch der Integration von Agroforstsystemen und holistischen Weidesystemen in den Ackerbau werden insbesondere Bodenbearbeitung und Verfahren mit stark reduzierter Bodenbearbeitung bzw. No-Tillage und Direktsaat als wesentliche Einflussfaktoren auf die Bodenfruchtbarkeit genannt (Freyer & Axmann, 2016).

1.2.4 Politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Neben dem Klimawandel und den damit verbundenen Folgen beeinflussen auch gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen den Acker- und Pflanzenbau. Innerhalb der Europäischen Union nimmt die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) starken Einfluss auf Düngung, Pflanzenschutz und mit Inkrafttreten der GAP Förderperiode 2023 bis 2027 am 01. Januar 2023 auch auf Bodenbearbeitung und Fruchtfolgegestaltung. Die GAP verfolgt neben dem Ziel der Ernährungs- und Nahrungsmittelsicherheit auch den Erhalt und die Förderung ländlicher Räume sowie die Anpassung an den Klimawandel und die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen. Relevant für landwirtschaftliche Betriebe ist dabei die Einkommensunterstützung in Form von Direktzahlungen, die unter anderem die Bereitstellung öffentlicher Güter und nachhaltige landwirtschaftliche Praktiken finanziell entlohnen (Generaldirektion Landwirtschaft und ländliche Entwicklung, 2023). Zusätzlich gibt die GAP Rahmenbedingungen in der

Bewirtschaftung von Acker- und Grünlandflächen vor. Neu in der Gemeinsamen Agrarpolitik 2023 - 2027 sind die sogenannten Nationalen Strategiepläne, die auf Basis der GAP-Strategieplan-Verordnung der EU für die 1. und 2. Säule der GAP aufgestellt werden müssen. Im genehmigten GAP-Strategieplan für Deutschland ist die Konditionalität verankert, die von landwirtschaftlichen Betriebsleitern und Betriebsleiterinnen für den Erhalt der Fördergelder eingehalten und umgesetzt werden muss (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2023a).

Die Konditionalität löst das Cross Compliance System ab und enthält neben den sogenannten Grundanforderungen der Betriebsführung (GAB) zusätzlich auch die Standards für den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand von Flächen (GLÖZ). Beides sind Grundvoraussetzungen für den Erhalt der Direktzahlungen bzw. flächen- und tierbezogener Fördermaßnahmen. Die Grundanforderungen für die Betriebsführung regeln unter anderem den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und umfassen auch die Wasserrahmenrichtlinien und den Gewässerschutz. Relevant in Bezug auf die Stoppel- und Bodenbearbeitung sind die Standards für den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand von Flächen GLÖZ 3 (Verbot des Abbrennen von Stoppelfeldern), GLÖZ 5 (Begrenzung von Erosion), GLÖZ 6 (Mindestbodenbedeckung in sensibelsten Zeiten) und GLÖZ 7 (Fruchtwechsel auf Ackerland), welche den Einsatz verschiedener ackerbaulicher Maßnahmen reglementieren (Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, 2023). GLÖZ 5 verbietet beispielsweise den Einsatz des Pfluges zur wendenden Bodenbearbeitung auf Standorten mit hohem Grad der Wind- oder Wassererosionsgefährdung. Die Mindestbodenbedeckung, welche z.B. durch Haupt- und Zwischenfrüchte oder durch nicht wendende Bodenbearbeitung sichergestellt werden kann, wird durch GLÖZ 6 festgeschrieben und muss vom 15. November des Antragjahres bis zum 15. Januar des Folgejahres auf 80 % der Ackerflächen sichergestellt werden (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2023; Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, 2023). In Kombination mit dem in GLÖZ 7 festgelegten verpflichtenden Fruchtwechsel auf 33 % der Ackerfläche und dem in GLÖZ 3 verankerten Verbot des Abbrennen von Stoppelfeldern ergeben sich neue Herausforderungen in Bezug auf die Fruchtfolgeplanung und die Bodenbearbeitung.

Neben den verpflichtenden Elementen der Gemeinsamen Agrarpolitik 2023 - 2027 umfasst diese zusätzlich auch freiwillige Öko-Regelungen im Be-

reich der 1. Säule. Darunter fallen Maßnahmen wie der Anbau vielfältiger Kulturen (ÖR2) und der Verzicht auf chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel (ÖR6), welche 2023 mit 45 bzw. 130 €/ha vergütet werden (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2023b). Analog zu den aufgeführten Standards für den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand von Flächen ergeben sich bei Inanspruchnahme dieser Öko-Regelungen insbesondere in Bezug auf die Fruchtfolgeplanung und die Bodenbearbeitung als protektive, vorbeugende Maßnahmen zur Reduktion chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel neue Herausforderungen.

Ergänzend zu den Rahmenbedingungen der Gemeinsamen Agrarpolitik 2023 - 2027 kommen durch den Europäischen Grünen Deal weitere Anforderungen auf die Landwirtschaft zu. Mit dem Europäischen Grünen Deal sollen die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber 1990 und bis 2050 um 100 % reduziert werden (Europäische Kommission, 2023a). Im Zuge dessen sind weitere Maßnahmen für die Landwirtschaft und den Agrarsektor geplant, die dazu beitragen sollen, die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft zu senken. Natürliche Ressourcen wie der Boden sollen geschont und die Biodiversität erhalten werden (Europäische Kommission, 2023-07-05). Verschiedene Instrumente, darunter die im Europäischen Grünen Deal verankerte Farm to Fork Strategie, sieht die EU dafür vor. Die Farm to Fork Strategie schreibt unter anderem die Reduktion des Einsatzes und Risikos chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel um 50 % bis 2030 vor (Europäische Kommission, 2023b). Insbesondere in der Bekämpfung von Unkräutern, Ungräsern sowie Ausfallraps- und Ausfallgetreide müssen daher neue Strategien entwickelt werden, mit denen der Einsatz von Herbiziden ohne nennenswerte Ertragsausfälle reduziert werden kann. Gleichzeitig muss der Boden als natürliche Ressource in besonderem Maße geschont werden, weshalb die im Europäischen Grünen Deal festgelegten Ziele zum Bodenschutz und die in der Gemeinsamen Agrarpolitik durch die Konditionalität vorgeschriebene Vermeidung von Wind- und Wassererosion einer Zunahme der Bodenbearbeitungsintensität und -häufigkeit zur Unkrautbekämpfung entgegen stehen.

Der chemische Pflanzenschutz, zu dem auch die Unkrautbekämpfung mit chemisch-synthetischen Herbiziden zählt, ist innerhalb der EU und innerhalb Deutschlands durch zahlreiche Gesetze, Verordnungen und Richtlinien reguliert (siehe 8.1). Relevant für den Einsatz von Herbiziden ist zunächst das Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (PflSchG), welches u.a. das Ziel des Schutzes von "Pflanzen, insbesondere Kulturpflanzen, vor Schadorga-

nismen und nichtparasitären Beeinträchtigungen"(Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 06.02.2012) verfolgt. Gleichzeitig sollen die mit dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verbundenen Gefahren für Umwelt und Anwender abgewendet, vorgebeugt oder reduziert werden. In Abschnitt 2 des PflSchG werden daher zunächst in §3 die gute fachliche Praxis und der integrierte Pflanzenschutz beschrieben. Dazu zählen vorbeugende Maßnahmen wie angepasste Fruchtfolgen, die Verhütung der Einschleppung von Schadorganismen sowie auch die Förderung von Nützlingen. Zu den vorbeugenden Maßnahmen kann auch die Boden- und insbesondere die Stoppelbearbeitung mit dem Ziel der Bekämpfung von Ausfallsamen, Unkräutern und Ungräsern gezählt werden (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 06.02.2012).

Hinsichtlich der Frage welche Stoffe im Rahmen von Pflanzenschutzmaßnahmen angewendet werden dürfen, unterscheidet die Verordnung über Anwendungsverbote für Pflanzenschutzmittel (PflSchAnwV) vollständige und eingeschränkte Anwendungsverbote und Anwendungsbeschränkungen die jeweils in den Anlagen 1 bis 3 der Verordnung festgelegt sind. Zu den Stoffen, die einem vollständigen Anwendungsverbot unterliegen, zählen auch in Herbiziden verwendete Wirkstoffe wie beispielsweise Atrazin oder 2,4,5-Trichlorphenoxyessigsäure (2,4,5-T). Atrazin kann als umwelt- und gesundheitsschädlich eingestuft werden (Singh et al., 2018). In Anlage 2 der PflSchAnwV aufgeführte Stoffe sind nur unter bestimmten Auflagen einsetzbar. Für die Anwendung der in Anlage 3 der PflSchAnwV gelisteten Stoffe gelten Anwendungsverbote für bestimmte Situationen, wie bspw. die Applikation von Luftfahrzeugen aus oder der Einsatz auf Gleisanlagen. Die in den Anlagen 2 und 3 der PflSchAnwV aufgeführten Stoffe dürfen zudem nicht in Gebieten mit Bedeutung für den Naturschutz angewendet werden. Grundsätzlich verboten ist die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln an "Gewässern, ausgenommen kleine Gewässer von wasserwirtschaftlich untergeordneter Bedeutung, innerhalb eines Abstands von zehn Metern zum Gewässer"(Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten et al., 10.11.1992). Ausnahme bildet eine ganzjährig begrünte Pflanzendecke, die den Abstand auf fünf Meter zur Böschungsoberkante reduziert. Mit Bezug auf die Unkrautbekämpfung führen diese Regeln und Gesetze in dem Moment zu neuen Herausforderungen, wo Herbizide nicht mehr eingesetzt werden dürfen. Besonderer Fokus liegt in diesen Bereichen auf der mechanischen Unkrautbekämpfung und den Bodenbearbeitungsmaßnahmen.

In Bezug auf die Unkrautbekämpfung spielen Gesetze und Verordnungen zur Düngung nur eine untergeordnete Rolle. Hinsichtlich der Unkrautbekämpfung relevant für die landwirtschaftliche Praxis ist allerdings der durch die (Düngeverordnung (DüV)) verpflichtende Anbau von Zwischenfrüchten vor Sommerungen. Bei Ernte der Vorfrucht vor dem 01. Oktober muss eine Zwischenfrucht angebaut werden, die erst am dem 15. Januar des Folgejahres umgebrochen werden darf (Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft et al., 2017). Wird nach späträumenden Kulturen wie Soja, Sonnenblumen, Zuckerrüben oder Silomais mit Ernteterminen in der zweiten Septemberhälfte eine Sommerung angebaut, bleibt nur wenig Zeit für die Aussaat der Zwischenfrucht und eine eventuelle mechanische Bekämpfung von Unkräutern und Ungräsern im Herbst. Folgt auf die Zwischenfrucht eine Sommerung mit frühem Aussaattermin wie beispielsweise Sommerweizen oder Sommerackerbohnen, kann die Bekämpfung der Zwischenfrucht und die Saatsbettbereitung aufgrund des Umbruchverbotes bis zum 15. Januar herausfordernd sein. Oft eignen sich Termine mit Bodenfrost im Dezember oder Januar, um die Zwischenfrucht in einem ersten Arbeitsschritt mit einer Messerwalze oder einem Mulcher zu zerkleinern. Dies ist aufgrund der DüV erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich, wo die Befahrbarkeit unter Umständen mangels Bodenfrost gerade nach einem niederschlagsreichen Winter nicht gegeben ist. Die Ansprüche an Effizienz und Effektivität der Bodenbearbeitungsmaßnahmen zum Umbruch der Zwischenfruchtbestände ist daher zunehmen als hoch einzustufen.

Neben Pflanzenkrankheiten und Schädlingen reduzieren insbesondere Unkräuter und Ungräser den Ertrag der Kulturpflanze signifikant (Flessner et al., 2021; Gharde et al., 2018; Milberg & Hallgren, 2004; Soltani et al., 2016, 2017). Der Einsatz von Herbiziden hat daher in den vergangenen Jahrzehnten einen hohen Stellenwert eingenommen und dazu geführt, dass der Ertragsverlust durch Unkräuter und Ungräser deutlich reduziert werden konnte. Alleine in Deutschland waren 2022 357 Mittel zur Unkrautbekämpfung zugelassen. Sowohl bezogen auf die Menge formulierter Pflanzenschutzmittel als auch auf die Menge der Wirkstoffe nehmen Herbizide in Deutschland den größten Anteil an Pflanzenschutzmitteln ein. 48269 t formulierte Herbizide wurden im Jahr 2022 in Deutschland in den Handel gebracht, wovon mit 94,4 % der überwiegende Anteil auf berufliche Anwender fällt. Bezogen auf die Wirkstoffe lag die Menge mit 16850 t im Inland abgegebenen herbiziden Wirkstoffen im Jahr 2022 damit knapp über dem Durchschnitt der Jahre 1994 bis 2022 (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2023).

Gleichzeitig wirkt sich der Herbizideinsatz auf vielfältige Weise auf die Umwelt aus. Die damit einhergehende Verringerung der Artenvielfalt und die nicht mehr ausgeübten Ökosystemleistungen der Ackerwildkräuter liefern gute Gründe, sich mit Alternativen zur chemischen Unkrautbekämpfung zu befassen (Wilhelm, 2016).

1.3 Zusammenfassung

Die Segetalflora umfasst Unkräuter, Ungräser und Ausfallpflanzen, die den Ackerbau vielseitig beeinflussen. Einerseits fördert sie die Biodiversität und schützt vor Erosion, andererseits verursacht sie Ertragsverluste und erschwert die Ernte. Die Herausforderung bei der Regulierung der Segetalflora besteht darin, die Balance zwischen minimalen Ertragsverlusten und der Maximierung ökologischer Funktionen zu finden. Ähnlich verhält es sich mit Ernterückständen. Diese tragen zum Erosionsschutz, zur Nährstoffrückführung und zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit bei. Gleichzeitig können sie jedoch als Habitat für Schädlinge und als Überlebensgrundlage für Pathogene dienen. Die Art, Intensität und Häufigkeit der Bodenbearbeitung entscheidet darüber, ob und wie stark Segetalflora und Ernterückstände das Pflanzenwachstum beeinträchtigen.

Die zukünftige Gestaltung von Bodenbearbeitungssystemen wird maßgeblich von verschiedenen Rahmenbedingungen beeinflusst. Dazu gehören die Folgen des Klimawandels sowie politische und gesellschaftliche Anforderungen an eine nachhaltige Landwirtschaft. Um die Nachteile intensiver Bodenbearbeitung zu verringern, ohne vollständig auf sie zu verzichten, wurde die sogenannte ultraflache Bodenbearbeitung entwickelt. Diese Methode ist eine Zwischenlösung zwischen intensiver Bodenbearbeitung und der Direktsaat, wobei letztere ohne Bodenbearbeitung auskommt.

Ob ultraflache Bodenbearbeitung eine praktikable Alternative zu intensiver Bodenbearbeitung und Direktsaat darstellen kann, wird in den folgenden Kapiteln analysiert. Zunächst wird eine umfassende Literaturrecherche zu Bodenbearbeitung und verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren durchgeführt. Diese beinhaltet die Beschreibung wichtiger Bodenbearbeitungsgeräte und deren Bewertung anhand agronomischer und ökologischer Parameter. Anschließend werden die Ergebnisse umfangreicher Feldversuche mit einem neuartigen Gerät zur ultraflachen Bodenbearbeitung, dem soge-

nannten Rotationsschleifer, in Kapitel 5 vorgestellt. Den Abschluss bildet die Diskussion der Technik, der Feldversuche sowie der Stoppelbearbeitung als Gesamtsystem.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Definition des Begriffs Bodenbearbeitung sowie die Kategorisierung nach Wirkprinzip, Zielsetzung und Bearbeitungstiefe bzw. -intensität. Anschließend werden wichtige Bodenbearbeitungsgeräte vorgestellt und ihre Wirkprinzipien beschrieben. Daraufhin wird Bodenbearbeitung in weitere acker- und pflanzenbauliche Zusammenhänge eingeordnet. Den Abschluss bildet eine Analyse der Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf ausgewählte ackerbauliche, ökologische und ökonomische Parameter.

2.1 Definition und Beschreibung von Bodenbearbeitung und Bodenbearbeitungssystemen

Bodenbearbeitung übernimmt im modernen Ackerbau vielfältige Funktionen und verfolgt unterschiedliche Ziele. Zur optimalen Vorbereitung auf die Aussaat dient sie zur Beseitigung unerwünschter Vegetation sowie der nachhaltigen Bekämpfung von Unkräutern und Ungräsern, um Konkurrenz während der Wachstumsphase der Folgefrucht zu minimieren. Zu den weiteren Zielen einer Bodenbearbeitungsmaßnahme kann das Management von Ernte- und Pflanzenrückständen gezählt werden. Die Zerkleinerung und Einmischung pflanzlicher Rückstände - letzteres optional ergänzt um die Einarbeitung mineralischer und organischer Düngemittel - ist insbesondere im Hinblick auf die am Betrieb vorhandene Sätechnik und phytosanitäre Aspekte (Rothrock, 1992; Sumner et al., 1981) von Relevanz.

2.1.1 Kategorisierung Bodenbearbeitung

Aufgrund der großen Bandbreite an Bodenbearbeitungsverfahren und -geräten ist zunächst eine Kategorisierung und Charakterisierung der Verfahren notwendig.

Einteilung anhand des Wirkprinzips Eine Einteilung der Bodenbearbeitung ist anhand des Wirkprinzips möglich, wobei wendende und nicht-wendende Bodenbearbeitungsverfahren unterschieden werden. Wendende Bodenbearbeitung umfasst Bodenbearbeitung mit dem Pflug und Schälppflug. Nicht-wendende Verfahren beinhalten Bodenbearbeitungs- und Direktsaatverfahren.

ren, bei denen auf den Einsatz des Pfluges verzichtet wird (Demmel & Kreitmayr, 2014; Lütke Entrup & Oehmichen, 2000).

Wendende, krumentiefe Bodenbearbeitung mit dem Streichblechpflug oder in seltenen Fällen mit dem Zweischichtenpflug kombiniert Wenden, Lockern und Mischen in einem Arbeitsgang. Dabei wird der Boden bzw. Erdbalken auf einer Tiefe von 25 bis 30 cm (Demmel & Kreitmayr, 2014) durch das Pflugschar um 135 bis 140 Grad gewendet. Je nach Zeitpunkt der wendenden Bodenbearbeitung kann zwischen Frühjahrs-, Sommer- und Herbst- bzw. Winterfurche unterschieden werden. Während auf die Sommer- und Frühjahrsfurche in der Regel unmittelbar die Saatbettbereitung und Aussaat der Folgekultur erfolgen, liegt die Herbst- bzw. Winterfurche über Winter brach, wodurch insbesondere durch Frosteinwirkung ein garer Boden entsteht (Bischoff et al., 2018).

Ernte- und Pflanzenrückstände werden vollständig in den Boden eingearbeitet und schichtweise im Bereich der Pflugsohle abgelegt, wodurch eine bewuchsfreie Fläche entsteht, die als sogenannter reiner Tisch bezeichnet wird. Ein wesentlicher Vorteil der wendenden Bodenbearbeitung liegt in ihrem ausgeprägten herbiziden Effekt, der eine Aussaat auf einem sauberen, unkrautfreien Acker ermöglicht. Allerdings bringt der sogenannte reine Tisch auch erhebliche Nachteile mit sich, insbesondere eine erhöhte Anfälligkeit des Bodens für Wind- und Wassererosion (Richter, 1998). Zudem zeichnet sich die wendende Bodenbearbeitung, die zur Lockerbodenwirtschaft zählt, durch eine intensive Bodenlockerung aus, die in manchen Fällen sogar zu einer Überlockerung führen kann. Ohne ausreichende Rückverfestigung nach dem Pflügen können erhebliche Unebenheiten und Bodenschadverdichtungen durch Befahren entstehen. Der Schlupf und Druck des in der Furche fahrenden Traktors fördern außerdem die Bildung einer Bearbeitungs- oder Pflugsohle, einer stark verdichteten und verschmierten Schicht, die das Wurzelwachstum in die tieferen Bodenhorizonte behindern kann (Murer, 2013).

Aufgrund des hohen Risikos von Wind- und Wassererosion auf gepflügten Flächen, den vergleichsweise hohen Verfahrenskosten und der unzureichenden Mischwirkung des Pfluges haben sich in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Verfahren zur pfluglosen Bodenbearbeitung entwickelt. Mit diesen Verfahren werden neben ökonomischen und agronomischen auch ökologische Ziele verfolgt (Derpsch, 2003).

Die ökonomischen Vorteile pflugloser Bodenbearbeitung liegen insbesondere in niedrigeren Verfahrenskosten, die durch höhere Flächenleistungen und einen geringeren Kraftstoffverbrauch erzielt werden. Agronomische Vorteile ergeben sich durch das geringere Risiko von Pflugsohlen- und Bodenschadverdichtungen sowie durch eine bessere Einmischung von Pflanzen- und Ernterückständen oder wahlweise deren Verbleib auf der Bodenoberfläche (Buchner & Köller, 1990). Aus ökologischer Sicht sind der verbesserte Erosionsschutz (Seitz et al., 2019) und die erhöhte Aktivität der Bodenbiologie hervorzuheben (P. Müller et al., 2022). Da die phytosanitäre und herbizide Wirkung des Pfluges nicht erreicht wird, sind weitere pflanzenbauliche Anpassung wie die Erweiterung und Auflockerung der Fruchtfolge, die Integration von Zwischenfrüchten und die Anpassung von Düngung und Pflanzenschutz bei Umstellung auf pfluglose Bewirtschaftung einzuplanen (Kahnt, 1976, 1995).

Grob unterteilt werden kann nicht-wendende Bodenbearbeitung anhand der Arbeitstiefe, der Eingriffsintensität und anhand der Mischwirkung. Eine Einmischung von Ernte- und Pflanzenrückständen ist insbesondere dann erforderlich, wenn die Sätechnik Probleme mit hohen Mengen an Ernte- und Pflanzenrückständen hat und eine gleichmäßige Saatgutablage nicht gewährleisten kann.

Strip-Tillage bzw. Streifensaart umfasst Verfahren, in denen lediglich der Streifen bearbeitet und gelockert wird, in dem später die Kulturpflanzen wachsen. Dabei werden die Begriffe Strip-Till, Strip-Tillage und Streifensaart synonym verwendet. Als Bindeglied zwischen No-Tillage und konventionellen Bodenbearbeitungsverfahren ist es Ziel der Streifensaart, die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren. Die unbearbeiteten Reihenzwischenräume weisen ähnliche Charakteristika wie No-Tillage Bestände auf. Der Boden ist dort mit Ernte- und Pflanzenrückständen bedeckt und so vor Erosion und Austrocknung geschützt. Die bearbeiteten Streifen hingegen sind frei von Ernterückständen, sodass der Boden sich im Frühjahr leichter erwärmen kann. Im bearbeiteten Streifen kann durch Erhöhung der Arbeitstiefe auch eine Bodenlockerung durchgeführt werden. Optional ist es möglich, feste oder flüssige Düngemittel im gelockerten Streifen zu applizieren (Blanco & Lal, 2023). So kann beim Anbau von Silo- oder Körnermais die organische Düngung mit Flüssigmist oder flüssigen Gärresten kombiniert mit der Streifenbodenbearbeitung erfolgen (Bischoff et al., 2014).

Unterschieden werden kombinierte Verfahren, in denen Bodenbearbeitung, Düngung und Aussaat in einem Arbeitsgang erfolgen und absätziges Verfahren, bei denen Bodenbearbeitung und Düngung getrennt von der Aussaat stattfinden. Bei Reihenkulturen wie Silo- und Körnermais, Zuckerrübe, Winterraps, Sonnenblume und Soja betragen die Reihenabstände bei Strip-Tillage im Normalfall 45 bis 75 cm, sodass die Aussaat mittels handelsüblicher Einzelkornsätechnik erfolgen kann. Voraussetzung beim absätzigen Verfahren ist die Nutzung eines automatischen Lenksystems, welches sicherstellt, dass die Aussaat exakt auf den bearbeiteten Streifen stattfindet (Hante, 06.12.2023; Kaul et al., 2022; Köller & Hensel, 2019).

Für den Anbau von Getreide, Raps, Leguminosen und Zwischenfrüchten haben sich bei der Streifensaat kombinierte Verfahren etabliert, in denen Bodenbearbeitung, Düngung und Aussaat in einer Überfahrt stattfinden. Im Getreideanbau werden im Vergleich zu Reihenkulturen wie Mais und Zuckerrübe deutlich höhere Bestandsdichten angestrebt und engere Reihenabstände zwischen 12,5 und 25 cm bei der Aussaat verwendet (Baeumer, 1992; Kaul et al., 2022; Köller & Hensel, 2019; Lütke Entrup & Oehmi-chen, 2000). Vorteil der engeren Reihenabstände ist vor allem der schnelle Bestandsschluss und die damit verbundene Unkrautunterdrückung (Drews et al., 2009). Höhere Reihenabstände haben vor allem auf Standorten mit geringen Niederschlägen und geringerem Ertragspotential (Lafond, 1994) oder in der ökologischen Landwirtschaft einen hohen Stellenwert. In der ökologischen Landwirtschaft erlauben größere Reihenabstände eine mechanische Unkrautregulierung mittels Hacke und können zu einer höheren Produktqualität beispielsweise in Form von höheren Rohproteingehalten im Winterweizen führen (Hiltbrunner et al., 2005). Der Anbau von Sommer- und Wintergetreide im Strip-Tillage Verfahren erfordert andere Geräte für die streifenförmige Bodenbearbeitung und Aussaat, die engere Reihenabstände zulässt. Um trotzdem die Vorteile der Streifensaat wie die höhere Bedeckung mit Pflanzenrückständen zu nutzen, werden breite Zinkensäschare mit einem Säscher zur Bandsaat ausgerüstet, sodass trotz hoher Reihenabstände zwischen 30 und 40 cm der Abstand zwischen den 10 bis 15 cm breiten Saatbändern ähnlich ausfällt wie bei konventionellen Aussaatverfahren.

Direktsaat (auch bekannt als No-Tillage oder No-Till) bezeichnet ein Verfahren, bei dem die Aussaat direkt in den unbearbeiteten Boden erfolgt. Hierbei wird lediglich eine schmale Saatsfurche mit einem Scheiben-, Zinken- oder Meißelschar geöffnet. In diese Furche werden das Saatgut und, falls

erforderlich, Dünger abgelegt. Anschließend wird die Furche wieder geschlossen, ohne den übrigen Boden zu bearbeiten (Bischoff et al., 2018). Die Begriffe Direktsaat, No-Till und No-Tillage werden in dieser Arbeit synonym verwendet.

Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) erweitert das Konzept der Direktsaat um zwei wesentliche Elemente: eine permanente Bodenbedeckung sowie eine hohe Diversität durch weite Fruchtfolgen und den Einsatz von Zwischenfrüchten. Dieses umfassende System wird als Konservierende Landwirtschaft (Conservation Agriculture) bezeichnet (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2023).

Permanente Bodenbedeckung umfasst lebendes oder abgestorbenes organisches, pflanzliches Material wie Ernterückstände aber auch Haupt- und Zwischenfrüchte inklusive Untersaaten (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2023; Hobbs et al., 2008). van Doren Jr und Allmaras (1978) unterscheiden dabei vier Arten von pflanzlichen Rückständen anhand ihrer Position im Boden bzw. auf der Bodenoberfläche: pflanzliche Rückstände auf und oberhalb der Bodenoberfläche, 5 bis 10 cm tief in den Boden eingearbeitete pflanzliche Rückstände mit einem nennenswerten Restanteil Mulch auf der Bodenoberfläche, komplett in den Boden eingearbeitete pflanzliche Rückstände sowie mit der Ernte komplett abgefahrte pflanzliche Rückstände wie zum Beispiel bei Silomais. Ziel ist der Verbleib von möglichst großen Mengen pflanzlicher Rückstände auf der Bodenoberfläche (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2023), weshalb in den Boden eingearbeitete Rückstände hier fast keine Bedeutung haben und der Boden lediglich nach der Ganzpflanzenernte von z.B. Silomais unbedeckt ist.

Die permanente Bodenbedeckung bietet dabei zahlreiche Vorteile unter anderem hinsichtlich der Infiltrations- und Wasserspeicherfähigkeit des Bodens (Unger et al., 1988; van Doren Jr & Allmaras, 1978), der Reduzierung und Vermeidung von Wind- und Wassererosion sowie Verkrustung und Versiegelung der Bodenoberfläche durch (Stark-) Niederschläge (Cassel et al., 1995; Ruan et al., 2001; van Doren Jr & Allmaras, 1978; Wilhelm, 2010), der Aggregatstabilität (Blanco-Canqui et al., 2006), der Bodentemperatur (Larney et al., 2003) sowie weiterer bodenphysikalischer, bodenchemischer und vor allem bodenbiologischer Parameter (Blanco-Canqui & Lal, 2009).

Die Erweiterung der Fruchtfolge und der möglichst konsequente Wechsel zwischen Blatt- und Halmfrucht sowie Sommerung und Winterung wirkt positiv auf die Bekämpfung von Schädlingen und phytopathogenen Erregern aus (Curl, 1963; Shah et al., 2021), führt zu einer Verbesserung der Bodengesundheit (Congreves et al., 2015; Wang et al., 2020) und zu höheren Erträgen (Agomoh et al., 2021; Stanger & Lauer, 2008).

Die Abgrenzung der Conservation Agriculture gegenüber konventioneller, wendender Bodenbearbeitung sowie konservierender Bodenbearbeitung geht somit über den Aspekt der Bodenbearbeitung hinaus. Conservation Agriculture wird als ganzheitliches Anbausystem definiert, bei dem Saatgut und Dünger ohne oder mit minimaler Bodenbewegung direkt in den unbearbeiteten und mit Ernterückständen oder Zwischenfrüchten bedeckten Boden abgelegt werden. Das System zielt in besonderem Maße darauf ab, den Boden als Ressource und Lebensraum zu schonen. Durch gezielte pflanzenbauliche Maßnahmen wie den Anbau von Zwischenfrüchten oder die Anpassung von Düngung und Pflanzenschutz werden Funktionen der Bodenbearbeitung weitgehend durch bodenbiologische Prozesse ersetzt. Conservation Agriculture wirkt sich somit in vielerlei Hinsicht auf bodenphysikalische, bodenchemische und bodenbiologische Parameter aus und unterscheidet sich dadurch von Verfahren mit stärkerem Bodeneingriff.

Einteilung anhand der Zielsetzung Mit der Stoppelbearbeitung, der Grund- bzw. Primärbodenbearbeitung, der Saatbettbereitung, Unterbodenlockerung und dem Umbruch von Zwischenfrucht- und Feldfutterbeständen werden verschiedene, sich teilweise überlappende Verfahren und Verfahrensketten charakterisiert. Diese können mit zeitlichem Abstand zwischen den Bodenbearbeitungsgängen, eng gestaffelt oder mit sogenannten One-Pass Geräten zusammengefasst durchgeführt werden. Hauptunterschiede zwischen den Verfahren und Verfahrensketten sind neben der Zielsetzung vor allem die Arbeitstiefe und Eingriffsintensität in den Boden sowie die Art der verwendeten Bodenbearbeitungswerkzeuge (Baeumer, 1992).

Mit der Stoppelbearbeitung werden zahlreiche Ziele mit Bezug zum Management von Unkräutern, Ungräsern und Ausfallsamen, zum Wasserhaushalt, zum Nährstoffhaushalt sowie zur Aussaat der Folgefrucht verfolgt (Köller & Hensel, 2019). Stoppelbearbeitung variiert abhängig davon welche Primärziele verfolgt werden, welche Bodenbearbeitungsgeräte vorhanden sind und welche Rahmenbedingungen durch den Standort sowie durch Klima und Wetter vorgegeben sind, von Betrieb zu Betrieb. Etabliert hat

sich auch der Begriff Nacherntemanagement, der jedoch neben der Stoppelbearbeitung auch weitere Maßnahmen umfasst.

Aufgrund des oftmals mehrere Wochen bis Monate umfassenden Zeitfensters zwischen der Druschfruchternte und Aussaat der Folgefrucht bietet sich ein hohes Potenzial zur mechanischen Bekämpfung von Ausfallsamen, Unkräutern und Ungräsern. Mit der ersten Stoppelbearbeitungsmaßnahme soll daher zunächst ein optimales Saatbett für Ausfall-, Unkraut- und Ungrassamen geschaffen werden. Möglichst unmittelbar nach der Ernte können diese in einem feinkrümeligen Saatbett keimen und mit der zweiten Stoppelbearbeitung 7 bis 14 Tage später mechanisch bekämpft werden (Martin Hänsel et al., 2014). Um auch Wurzelunkräuter zu bekämpfen ist dabei neben der passenden Arbeitstiefe auch ein möglichst ganzflächiger Schnitt erforderlich, bei dem jedoch unter weniger günstigen Bedingungen kein Verschmieren des Bearbeitungshorizontes erfolgen darf.

Die Arbeitstiefe der ersten Stoppelbearbeitung sollte sich insbesondere an den Leitunkräutern- und Ungräsern sowie der Vorfrucht orientieren. Mit zunehmender Einarbeitungstiefe vergrößert sich der Zeitraum, indem beispielsweise Wintergerste, Gelbsenf und Felderbse auflaufen, wobei der Effekt der zunehmenden Samentiefe im Boden auf die Keimrate bei den verschiedenen Kulturen unterschiedlich stark ausgeprägt ist (Håkansson et al., 2011). In Gefäßversuchen im Gewächshaus wiesen Winterrapssamen bei Ablagetiefen zwischen 1 und 5 cm höhere Keimraten auf als bei 0 cm oder über 7 cm Ablagetiefe (Gruber et al., 2010). In Bezug auf Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* Huds.) beeinflusst die Ablagetiefe zusammen mit der Saatbettqualität sowie der Saatguteinbettung in den Boden den Gasaustausch, den Anschluss an die Kapillarität und den Zugang zu Licht. Dadurch variiert die Keimrate von Ackerfuchsschwanz im Boden, auch wenn diese von weiteren Faktoren wie zum Beispiel der Dormanz und deren Ausprägung beeinflusst wird (Cussans et al., 1996; Landschreiber, 2014).

Die Wirkung der Stoppelbearbeitung auf annuell und perennierend vorkommende Unkräuter hängt von zahlreichen Faktoren ab, wodurch sich der Wirkungsgrad erheblich unterscheiden kann. In mehrjährigen Feldversuchen wurde nicht in jedem Versuchsjahr mehr Ausfallgetreide pro Quadratmeter gegenüber einer Kontrolle ohne Stoppelbearbeitung gezählt. Ein zweiter Stoppelbearbeitungsgang brachte hingegen signifikant mehr Ausfallgetreide zum Keimen als eine einmalige Stoppelbearbeitung oder keine

Stoppelbearbeitung (Pekrun et al., 2011, 2014). Bei der Bekämpfung perennierender Unkräuter wie der Ackerkratzdistel führte eine mehrmalige, mit jedem Arbeitsgang tiefer werdende Stoppelbearbeitung mit nachfolgender konkurrenzstarker Hauptfrucht zu einer signifikanten Reduktion der Ackerkratzdistel (Lukashyk et al., 2008). Dementsprechend sollte die Strategie der Stoppelbearbeitung an die spezifischen Gegebenheiten einzelner (Teil-)Flächen sowie an die örtlichen klimatischen Bedingungen angepasst werden (Dierauer Hansueli & Lefebvre Nicolas, 2022).

Zielt die Stoppelbearbeitung primär darauf ab, mechanisch Ausfallgetreide, Unkraut- und Ungrassamen zu bekämpfen und vorhandene Pflanzen zu entfernen, ist ein ganzflächiger Schnitt entscheidend. Dabei sollten die Pflanzen unterhalb der Bodenoberfläche im Bereich des Wurzelhalses durchtrennt werden. Um ein sicheres Absterben der Pflanzen zu gewährleisten, ist es erforderlich, dass die herausgetrennten Wurzeln enterdet und die Pflanzen auf der Bodenoberfläche abgelegt werden, wo sie vollständig vertrocknen können.

Ein zusätzlicher Aspekt in der Bekämpfung von Samenunkräutern, Ungräsern und Ausfallsamen ist die Samenprädation durch granivore Laufkäferarten (*Carabidae*). Diese fressen unter anderem Samen von Ackerfuchschwanz (Daouti et al., 2022) sowie andere Unkraut- und Ungrassamen (Osman et al., 2022). Bodenbearbeitungsmaßnahmen beeinflussen jedoch die Prädation negativ (Blubaugh & Kaplan, 2015; Shearin et al., 2007). Am Beispiel der Laufkäfer lässt sich dies unter anderem durch eine Reduktion des Nahrungsangebotes und durch Habitatveränderungen infolge der Bodenbearbeitung erklären. Dabei variieren die Effekte je nach Laufkäferart sowie Intensität und Häufigkeit der Bearbeitungsmaßnahmen. Zusätzlich beeinflussen modifizierende Faktoren wie Fruchtfolgen oder der Zwischenfruchtanbau die Laufkäferpopulationen (P. Müller et al., 2022).

Neben dem Management von Unkräutern, Ungräsern und Ausfallsamen spielt der Umgang mit Ernterückständen eine wesentliche Rolle in der Stoppelbearbeitung. Die Ernterückstände setzen sich aus den Bestandteile Wurzel, Stoppel und Stroh zusammen, wobei letzteres auch Spreu, Kaff, Schoten, Hülsen und Grannen umfasst. Diese Bestandteile unterscheiden sich in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften. Zu den chemischen Eigenschaften zählt das C:N-Verhältnis, das den mikrobiellen Abbau beeinflusst. Ein enges C:N-Verhältnis fördert einen schnellen Abbau und eine hohe mikrobiologische Aktivität, während ein weites C:N-Verhältnis

den Abbau durch Stickstoffmangel verzögert. Darüber hinaus wirkt sich das C:N-Verhältnis auf die Zusammensetzung der Mikroorganismen im Boden und auf den Ernterückständen aus (Eiland et al., 2001). Neben dem C:N-Verhältnis spielen auch der Ligningehalt und der Zellulosegehalt eine Rolle im Abbauprozess (Hadas et al., 2004; Stewart et al., 2015).

Zu den physikalischen Eigenschaften der Ernterückstände, die im Kontext der Stoppelbearbeitung relevant sind, gehört in erster Linie ihre Größe. Studien haben gezeigt, dass gemahlenes Weizenstroh im Vergleich zu längeren Strohstücken (0,9 cm bis 4,4 cm) eine höhere Dehydrogenaseaktivität und mikrobiologische Biomasse im Boden fördert. Die mikrobielle Aktivität variiert jedoch im Verlauf des Abbaus (Angers & Recous, 1997; Tarafdar et al., 2001). Dies wird unter anderem durch die größere spezifische Oberfläche zerkleinerter Ernterückstände erklärt, die eine überproportionale Zunahme der Kontaktfläche für Mikroorganismen bewirkt. Der mikrobiologische Abbau beginnt zudem verzögert, da die Ernterückstände zunächst mit Boden und Feuchtigkeit in Kontakt kommen und von Mikroorganismen besiedelt werden müssen, bevor die eigentlichen Abbauprozesse einsetzen (Angers & Recous, 1997).

Die Größe und Verteilung der Ernterückstände unterscheiden sich deutlich zwischen den einzelnen Bestandteilen. Während kleine Komponenten wie Spreu, Kaff, Grannen sowie Hülsen und Schoten kompakter sind und sich überwiegend auf der Bodenoberfläche verteilen, verbleiben Wurzeln vollständig im Boden. Stoppeln von Getreide, Raps oder Mais ragen vertikal aus der Bodenoberfläche heraus. Diese unterschiedlichen Positionen und Größen beeinflussen den Kontakt der Ernterückstände mit Boden und Mikroorganismen sowie deren Feuchtigkeitsgehalt, da Wasser aus Niederschlägen oder Tau nicht alle Bestandteile gleichermaßen erreicht. Größere Rückstände wie Getreidestoppeln oder gehäckselte Halme weisen zudem ein hohes Volumen auf, was die Qualität der Stoppelbearbeitung beeinflusst. Bei hohen Strohmengen können Maschinen mit begrenztem Materialdurchgang, wie etwa Großfederzinkeneggen, aufgrund von Verstopfungsgefahr nicht eingesetzt werden.

Die Strohverteilung durch Strohhäcksler und Spreuverteiler des Mähdeschers ist vor allem bei großen Arbeitsbreiten, Hangneigung oder Seitenwind häufig unzureichend (Köller & Hensel, 2019). Das führt zu einer horizontal heterogenen Strohverteilung. Auch auf dem Vorgewende, in den Feldecken und an Lagerstellen liegt häufig eine größere Menge Stroh, da

der Mähdrescher dort anhalten oder die Fahrgeschwindigkeit verringern muss. Eine schlechte Strohverteilung führt insbesondere bei einer geringen angestrebten Bodenbearbeitungsintensität in Mulch- und Direktsaatverfahren oder bei nicht geeigneter Sätechnik zu Problemen. Im Saathorizont eingearbeitetes Stroh kann bei Sämaschinen mit Scheibenscharen zum sogenannten Haarnadeffekt - auch Hairpinning genannt - führen, bei dem Stroh durch die Scheibe des Scheibenschares in die Saatsfurche gedrückt wird und das Saatgut keinen Anschluss an das Keimwasser hat. Als Folge lassen sich schlechte Feldaufgänge beobachten. Zusätzlich können beim Abbau der Ernterückstände allelopathische Substanzen freigesetzt werden, die die Keimung von Unkraut, Ungräsern und sogar Kulturpflanzen hemmen und so ebenfalls die Feldaufgänge beeinträchtigen (Steinsiek et al., 1982).

Ein zentrales Ziel der Stoppelbearbeitung ist daher das Management der Ernterückstände, um möglichst homogene Bedingungen für die nachfolgenden Bearbeitungsmaßnahmen und die Aussaat der Folgekultur zu schaffen. Dazu gehört das Auseinanderziehen und Verteilen von Strohhaufen sowie die Zerkleinerung und Trennung voluminöser Rückstände wie Stoppeln mit samt Wurzelballen. Die Volumenreduzierung erleichtert nachfolgende Arbeitsschritte und erhöht die Betriebssicherheit, insbesondere unter schwierigen Witterungsbedingungen.

Bei Verfahren wie der Direkt- und Streifensaat werden Ernterückstände bewusst auf der Bodenoberfläche belassen, um den Boden zu schützen und das Wachstum von Unkräutern und Ungräsern zu unterdrücken. Wird jedoch eine wendende Bodenbearbeitung oder eine pfluglose Bearbeitung durchgeführt, ist ein schrittweises Einmischen der Ernterückstände notwendig. Vor dem Einsatz des Pfluges sollten Ernterückstände bereits in den Boden eingearbeitet sein, um eine Konzentration auf der Pflugsohle zu vermeiden, die physikalische Sperrschichten oder Probleme durch Abbauprodukte verursachen könnte. Bei der pfluglosen Bearbeitung werden die Rückstände gleichmäßiger im Bearbeitungshorizont verteilt, was insbesondere für hohe Feldaufgänge in der Folgekultur vorteilhaft ist (Köller & Hensel, 2019).

Mit Blick auf den Klimawandel und zunehmende Wetterextreme wird die Bedeutung wassersparender Bewirtschaftungsmethoden immer größer. Traditionell gilt die Stoppelbearbeitung als Maßnahme zur Unterbrechung der Kapillarität, wodurch der kapillare Wasseraufstieg verhindert und Wasser gespart werden soll. Jedoch führt das Einmischen von Ernterückständen in

den Boden zu einer verstärkten Evaporation und damit zu unproduktiven Wasserverlusten (Schwartz et al., 2010).

Gefäßversuche von Ji und Unger (2001) zeigen, dass eine Bodenbedeckung mit Ernterückständen die Bodenfeuchtigkeit signifikant erhöhen kann. Beispielsweise führte die Bodenbedeckung mit Weizenstroh in Gefäßversuchen zu einer um 76 % geringeren Evaporation im Vergleich zu unbedecktem Boden. Bei einem weiteren Versuch reduzierte die Strohauflage die Evaporation gegenüber 10 cm eingemischtem Stroh um 21 %, verglichen mit 20 cm eingearbeitetem Stroh sogar um 25 %. Dies spiegelte sich auch in der Bodenfeuchtigkeit wieder, die in der Variante mit Mulchauflage von 0 bis 50 cm Bodentiefe am höchsten war (Cao et al., 2012). Vorversuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt worden sind, bestätigen diese Ergebnisse. Diese Erkenntnisse legen nahe, dass eine dichte Mulchschicht aus Ernterückständen hinsichtlich der Wasserspeicherung einer flachen oder wendenden Bodenbearbeitung überlegen ist.

Zunehmende Extremwetterereignisse (Orlowsky & Seneviratne, 2012) erhöhen zudem die Gefahr von Bodenerosion, insbesondere von Wassererosion. Untersuchungen zeigen, dass eine Strohauflage von 8 cm Dicke (entsprechend 5 t/ha Reisstroh) die Wassererosion um bis zu 70 % reduzieren kann (Gholami et al., 2013).

Die Vielzahl an Zielstellungen bei der Stoppelbearbeitung führt häufig zu Zielkonflikten (siehe Unterabschnitt 6.2.1). Unter extremen Witterungsbedingungen wie anhaltender Trockenheit, Hitze, ausdauernden Niederschlägen oder bei knappen Zeitfenstern zwischen Ernte und Bestellung der Folgefrucht können nicht alle Ziele gleichermaßen erreicht werden. So fehlt beispielsweise in trockenen Sommern oft das notwendige Keimwasser für die Keimung von Ausfallsamen. In feuchten Jahren wiederum trocknen abgeschnittene Unkräuter und Ungräser an der Bodenoberfläche nur unzureichend aus, was den Bekämpfungserfolg verringert. Ein einheitliches Verfahren zur Stoppelbearbeitung hat sich deshalb bislang nicht etabliert. Je nach Standort, Klima, Wetter, Fruchtfolge, Flächenstruktur und Maschinenpark variieren die Bearbeitungsmethoden in der Praxis erheblich, was zu einer Vielzahl von Vorgehensweisen führt (Lehnert & Watzka, 2020).

Ein häufig angewendetes Verfahren basiert auf der stufenweisen Erhöhung der Arbeitstiefe bzw. auf dem stufenweisen Einmischen der Ernterückständen. Darunter versteht man die Steigerung der Arbeitstiefe mit jedem Stop-

pelbearbeitungsgang. Begonnen wird mit einem möglichst flachen, ca. 1 bis 3 cm tiefen Arbeitsgang mit dem Ziel, Ernterückstände zu zerkleinern, flach einzumischen und gute Bedingungen für die Keimung von Ausfall-, Ungras- und Unkrautsamen zu schaffen. Ernterückstände werden mit Boden und damit mit Feuchtigkeit und Bodenorganismen in Kontakt gebracht, sodass der mikrobielle Abbau starten kann. Gleichzeitig werden Ausfall-, Unkraut- und Ungrassamen nicht vergraben und können zeitnah keimen (Mund & Hogrefe, 2024).

Der Zeitpunkt für den zweiten Bearbeitungsgang richtet sich nach der Witterung und dem Zeitraum bis zur Folgekultur. Bei kurzen Zeitfenstern ist die Förderung der Strohrotte ein zentrales Ziel. Hierbei wird das keimende Pflanzenmaterial durch die Bodenbearbeitung abgetötet, während das Stroh tiefer eingemischt und verdünnt wird. Eine maximale Strohkonzentration von 6 kg/m^3 Bodenvolumen wird angestrebt, um die Strohrotte sowie die Aussaat und das Wurzelwachstum der Folgefrucht zu optimieren (Köller, 1981).

Wenn zwischen Ernte und Aussaat ein längerer Zeitraum liegt, kann ein dritter, etwas tieferer Arbeitsgang sinnvoll sein (Mund & Hogrefe, 2024). Dabei werden nicht erfolgreich abgetötete oder neu gekeimte Pflanzen bekämpft, und die bereits eingemischten Ernterückstände werden weiter verdünnt. Ob eine zusätzliche Grundbodenbearbeitung notwendig ist, hängt vom Bodenzustand und den Anforderungen der Sätechnik ab.

Bis in die 1970er Jahre üblich und auch heute im Ökolandbau verbreitet ist der Einsatz des Schälpluges zur Stoppelbearbeitung. Dieses Gerät arbeitet nach dem Prinzip des Streichblechpflugs. Mit einer Arbeitstiefe von 8 bis 15 cm unterscheidet sich der Schälflug von hinsichtlich der Arbeitstiefe sowohl vom Pflug als auch von Geräten zur flachen Stoppelbearbeitung. Insbesondere zur Bekämpfung von Wurzelunkräutern wie der Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*) zeigt der Schälflug gute Ergebnisse (Hunger, Pekrun, Claupein & Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 2001; Pekrun et al., 2005). Er hinterlässt lockeren Boden ohne Ernterückstände, was die anschließende mechanische Bekämpfung von Unkräutern vereinfacht.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz des klassischen Streichblechpflugs. Im Unterschied zum Schälflug beträgt die Arbeitstiefe hier 20 bis 30 cm. Neben der Stoppelbearbeitung wird gleichzeitig eine Grundbodenbearbei-

tung durchgeführt. Nach dieser Methode folgt bis zur Aussaat meist nur noch die Saatbettbereitung.

Die Grundboden- bzw. Primärbodenbearbeitung umfasst die "Bodenbearbeitung auf volle Krumentiefe zur jeweiligen Hauptfrucht" (Estler & Knittel, 1996). Mit Arbeitstiefen von 10 bis 35 cm verfolgt sie insbesondere das Ziel, die Bodenstruktur im Oberboden wiederherzustellen (Baeumer, 1992). Die Bearbeitungstiefe ist größer als bei der Stoppelbearbeitung. Unterschieden werden lockernde, lockernde und mischende sowie lockernde und wendende Bodenbearbeitung (Fehr et al., 2019). Diese Methoden wirken sich unterschiedlich auf Ertrag und bodenphysikalische Parameter aus (F. Schulz et al., 2009; Vakali et al., 2001).

Bei Verdichtungshorizonten unterhalb der normalen Bearbeitungstiefe, Strukturschäden, Ortsteinschichten sowie bei Problemen in der Wasserführung wie Staunässe oder frühzeitigem Welken der Pflanzen unter trockenen Bedingungen kann eine Lockerung des Unterbodens erforderlich sein. Ein weiterer Indikator für Bodenverdichtung zeigt sich im Wurzelbild der Pflanze. Knickt die Wurzel horizontal ab, kann dies in Hinweis auf eine Bodenschadverdichtung sein (Baeumer, 1992).

Die Unterbodenlockerung bzw. -melioration sollte ausschließlich nach gründlicher Prüfung der Bodenverhältnisse unter trockenen Bedingungen durchgeführt werden. Eine Tiefenlockerung bei zu feuchten Bedingungen kann den Schaden an Bodenstruktur noch vergrößern (Lütke Entrup & Oehmichen, 2000). Direkt nach der Lockerung empfiehlt sich die Aussaat von Zwischenfrüchten oder Hauptkulturen mit intensiver Durchwurzelung, um die gelockerten Bereiche zu stabilisieren (Demmel & Kreitmayr, 2014).

Im Anschluss an Stoppel- und Grundbodenbearbeitung kann je nach Bodenzustand und Restverunkrautung eine Saatbettbereitung bzw. Sekundärbodenbearbeitung notwendig sein. Diese kann unmittelbar im Anschluss an die Grundbodenbearbeitung oder vor bzw. kombiniert mit der Aussaat erfolgen. Ziel der Saatbettbereitung ist die Sicherstellung eines gleichmäßigen und zügigen Feldaufgangs der Folgefrucht. Ein gleichmäßiger Feldaufgang erleichtert die Planung weiterer Maßnahme zur Kulturpflege und Düngung und führt zu einer guten Jugendentwicklung der Pflanzen, die sich unter Umständen als ertragswirksam herausstellen kann (Baeumer, 1992).

Eine optimale Saatbettbereitung findet angepasst an die Folgekultur auf Saattiefe statt und erfüllt mehrere Aufgaben: Der Boden soll eingeebnet und gleichmäßig rückverfestigt werden, sodass es zwischen Traktorspur und nicht überrolltem Bereich keine Unterschiede bei Bodendichte und Krümelstruktur gibt. Gleichzeitig müssen oberflächennahe Bodenaggregate zerkleinert werden, ohne ein zu feinkrümeliges und damit erosions- und verschlammungsanfälliges Saatbett zu produzieren. Der Oberboden sollte somit feinkrümlig sein, für Wasserinfiltration und Gasaustausch aber stabile Aggregate beinhalten (Demmel & Kreitmayr, 2014). Mit Abnehmender Korngröße und Saattiefe steigen die Anforderungen an die Saatbettqualität. Insbesondere Winterraps und Zuckerrüben benötigen ein gut rückverfestigtes Saatbett, sodass die Saatkörner Anschluss an die Kapillarität erhalten (Bischoff et al., 2018).

Einteilung anhand der Bearbeitungstiefe und -intensität Bodenbearbeitungsverfahren lassen sich nicht nur nach ihrer Funktion und Zielsetzung, sondern auch anhand der Bearbeitungstiefe und -intensität kategorisieren. Baeumer (1992) klassifiziert Bodenbearbeitungssysteme basierend auf ihrer Wirkung auf den Boden in drei Gruppen: Lockerbodenwirtschaft mit lockernder und wendender Bearbeitung durch den Pflug, Lockerboden-Mulchwirtschaft mit lockernder, wühlender und nicht-wendender Bearbeitung sowie Festboden-Mulchwirtschaft, die ausschließlich flache Bodenbearbeitung umfasst. In ihrer Extremform beinhaltet diese auch Anbausysteme ohne jegliche Bodenbearbeitung.

Die Intensität der Bodenbearbeitung definiert Baeumer (1992) als eine Kombination aus Bearbeitungstiefe, Flächenausdehnung und Bearbeitungshäufigkeit. Die Bearbeitungstiefe reicht von der Saattiefe bei Festboden-Mulchwirtschaft und Direktsaat bis zu einer tiefen Lockerung von bis zu 30 cm bei der Lockerbodenwirtschaft mit dem Pflug. Darüber hinaus gibt es Verfahren zur Tiefenlockerung, bei denen die Bearbeitungstiefe 50 cm oder mehr betragen kann.

Auch die Flächenausdehnung unterscheidet sich deutlich zwischen den Verfahren. Während bei Direktsaatverfahren lediglich der Bereich des Säschlitzes und der Saatgutablage bearbeitet wird, erfolgt bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug oder bei flacher, ganzflächiger Bodenbearbeitung mit Mulchsaatgrubber oder Scheibenegge eine Bearbeitung des gesamten Bodens in der jeweiligen Bearbeitungstiefe.

Herausfordernd in der Diskussion über Bodenbearbeitungssysteme ist die uneinheitliche Nomenklatur: Begriffe wie Festboden-Mulchwirtschaft, No-Tillage und Direktsaat werden oft synonym verwendet, obwohl sie im Kern dasselbe Konzept beschreiben. Zudem erschwert die große Variation der Bearbeitungsintensität insbesondere bei konservierender Bodenbearbeitung eine präzise Abgrenzung. Demmel und Kreitmayr (2014) unterscheiden zwischen zwei Lockerungsstufen: einer Lockerung der Oberkrume und einer Lockerung von Ober- und Unterkrume. Lütke Entrup und Oehmichen (2000) unterteilen konservierende Bodenbearbeitungssysteme in Mulchsaat mit ganzflächiger Saatbettbereitung, Mulchsaat mit streifenförmiger Saatbettbereitung und Mulchsaat ohne Saatbettbereitung. Dabei entspricht Mulchsaat mit streifenförmiger Saatbettbereitung der sogenannten Streifenbearbeitung (Strip-Tillage), während Mulchsaat ohne Saatbettbereitung der Direktsaat (No-Tillage) gleichkommt.

Strip-Tillage bezeichnet die streifenweise Bearbeitung des Bodens, bei der nur die Bereiche bearbeitet werden, in denen Kulturpflanzen ausgesät oder gepflanzt werden. Da maximal 25 % der Bodenoberfläche bearbeitet werden, eignet sich Strip-Tillage insbesondere für Reihenkulturen wie Mais oder Zuckerrüben. Das Ziel von Strip-Tillage ist es, die Vorteile von No-Tillage mit denen einer ganzflächigen Bodenbearbeitung zu kombinieren (Morrison, 2002). Eine klare Abgrenzung der einzelnen Verfahren bleibt jedoch oft schwierig.

2.1.2 Bodenbearbeitungsgeräte

Um die Auswirkungen einzelner Bodenbearbeitungsverfahren auf den Boden und die Umwelt besser zu verstehen sowie ihre jeweiligen Vor- und Nachteile nachvollziehen zu können, ist es entscheidend, die derzeit gängigen Bodenbearbeitungsgeräte und ihre Wirkprinzipien zu kennen. Im folgenden Abschnitt werden daher die aktuell am Markt erhältlichen Bodenbearbeitungsgeräte vorgestellt und charakterisiert.

Sofern nicht anders gekennzeichnet, stammen die Inhalte dieses Kapitels aus den Werken von Bischoff et al. (2018), Diepenbrock et al. (2005), Fehr et al. (2019), Köller (1981), Köller und Hensel (2019), Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (1998) und Lütke Entrup und Oehmichen (2000) und wurden entsprechend adaptiert.

Bodenbearbeitungsgeräte für die wendende Bodenbearbeitung Bodenbearbeitungsgeräte lassen sich anhand ihres Wirkprinzips unterteilen und zunächst grob

in Bodenbearbeitungsgeräte für die konventionelle, wendende Bodenbearbeitung und Bodenbearbeitungsgeräte für konservierende, nicht-wendende Bodenbearbeitung aufteilen. Zunächst werden Geräte für die wendende Bodenbearbeitung vorgestellt.



Abbildung 2.1: Streichblechpflug

Pflüge werden nach ihrer Arbeitsweise in Drehpflüge und Beetpflüge unterteilt. Während Drehpflüge die Hin- und Rückfahrt in derselben Furche ermöglichen, erfordern Beetpflüge die Anlage von Beeten, da sie nicht in beide Richtungen arbeiten können. Zudem unterscheiden sich Pflüge in ihrer Anbringung am Zugfahrzeug in Anhänger-, Aufsattel- und Anbaupflüge.

Ein Pflug besteht grundsätzlich aus einem Rahmen, an dem zentrale Elemente wie Drehturm, Anbaubock, Stützräder bzw. Fahrwerk, Beleuchtungsträger sowie die Schare befestigt sind. Die Rahmenhöhe variiert je nach Arbeitstiefe zwischen 65 und 80 cm. Schare, bestehend aus Streichblech, Streichschiene und Anlage, sind am Grindel montiert, das die Verbindung zwischen Schar und Rahmen darstellt. Am Rahmen können zudem Vorwerkzeuge sowie ein Packer oder Packerarm angebracht sein.

Bei den Werkzeugformen haben sich Streichblechpflüge durchgesetzt (siehe Abbildung 2.1). Je nach Bodenart kommen verschiedene Körperformen wie

Streifen-, Rauten- oder Universalkörper zum Einsatz. Das Grundprinzip aller Pflugkörper ist jedoch identisch: Das Pflugschar bricht die Erde auf und dreht den Erdbalken um 135 bis 140°. Verschiedene Vorwerkzeuge können je nach Anforderung hinzugefügt werden:

- Scheibenseche schneiden den Boden sowie Ernterückstände vor dem Pflugschar
- Vorschäler und Dungeinleger mischen Ernte- und Pflanzenrückstände vor dem Pflugschar in den Boden ein

Die Arbeitsbreite eines Pfluges hängt von der Breite pro Schar ab, die entweder fest eingestellt oder mechanisch bzw. hydraulisch angepasst werden kann. Moderne Pflüge erlauben Arbeitsbreiten von 30 bis 55 cm pro Schar, sodass bei einem Anbaudrehpflug mit vier Scharen Arbeitsbreiten zwischen 120 und 220 cm möglich sind.

Die Arbeitstiefe liegt typischerweise zwischen 20 und 30 cm und wird durch Stützräder reguliert. Bei Anbau- und Aufsattelpflügen ist zusätzlich die Einstellung der Unterlenkerhöhe am Traktor notwendig, um sicherzustellen, dass alle Schare gleichmäßig arbeiten. Für ein sauberes Pflugbild müssen zudem die Vorderfurchenbreite und der Zugpunkt auf Traktor und Boden abgestimmt werden.

Die Rückverfestigung erfolgt mithilfe nachlaufender oder am Pflug montierter Packer. Neben dem Ringpacker kommen auch Bauformen wie Nockeringwalzen oder Schollencracker zum Einsatz. Alternativ kann die Rückverfestigung bei der Saatbettbereitung oder Aussaat, z. B. durch Frontpacker, durchgeführt werden.

Streichblechpflüge werden vor allem für die Grundbodenbearbeitung eingesetzt, um den Boden zu lockern und unerwünschte Begleitvegetation zu beseitigen. Das Ziel der wendenden Bodenbearbeitung mit dem Pflug ist die Schaffung eines „reinen Tisches“: Ernte- und Pflanzenrückstände sowie der Pflanzenbestand werden vollständig eingearbeitet. Abhängig von der Bodenart entsteht eine grobe Oberfläche, die frei von pflanzlichem Material ist. Allerdings ist die Mischwirkung eines Pfluges geringer als die von Zinkengrubbern oder Scheibeneggen.

Schälplüge ähneln in ihrem Aufbau den Streichblechpflügen, sind jedoch für geringere Arbeitstiefen von 8 bis 15 cm ausgelegt. Sie verfügen über kleinere Pflugkörper und kommen in der Regel ohne Vorwerkzeuge aus. Dank



Zinkengrubber mit Federstempelwalze Mulchsaatgrubber mit Stützrädern zur Tiefenführung und Gänsefußscharen

Abbildung 2.2: Zinkengrubber

der geringeren Arbeitstiefe und des reduzierten Zugkraftbedarfs ermöglichen Schälplüge größere Arbeitsbreiten und eine höhere Flächenleistung.

Eingesetzt werden Schälplüge in der Stoppelbearbeitung oder für die flache Grundbodenbearbeitung, mit dem primären Ziel der Unkrautbekämpfung.

Bodenbearbeitungsgeräte für die nicht-wendende Bodenbearbeitung Die Mulchsaat sowie konservierende und pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren verzichten auf das Wenden des Bodens mit dem Pflug. Stattdessen kommen spezielle Bodenbearbeitungsgeräte zum Einsatz, die im Folgenden vorgestellt und charakterisiert werden.

Auf vielen landwirtschaftlichen Betrieben sind dreibalkige Mulchsaatgrubber als universell einsetzbare Geräte etabliert. Mit scharförmigen Werkzeugen ausgestattet, ermöglichen sie eine nichtwendende Bodenbearbeitung und decken dank zahlreicher Scharformen und -typen ein breites Einsatzspektrum von flacher bis tiefer Bearbeitung ab. Arbeitstiefen zwischen 3 und 35 cm sind realisierbar.

Typischerweise sind Mulchsaatgrubber dreibalkig aufgebaut. Hinter dem dritten Balken befinden sich Einebnungswerkzeuge und Nachlaufwalzen (Abbildung 2.2). Die drei Balken tragen die Grindel bzw. Grubberstile, an denen die Schare befestigt sind. Diese Grubberstile sind gegen Überlast durch Abscherschrauben oder Federpakete gesichert. Anders als bei der Großfederzinkenegge sind die Grubberstile strichstabil und weichen Hindernissen nicht seitlich aus. Zudem verfügen Mulchsaatgrubber über eine

größere Balkenhöhe von 600 bis 800 mm, wodurch mehr Material durch den Grubber fließen kann und größere Arbeitstiefen möglich sind.

Der Strichabstand liegt zwischen 25 und 30 cm. Für flache Arbeiten können breite Gänsefußschare oder Flügelschare montiert werden. Gänsefußschare sind einteilig aufgebaut und bis zu 420 mm breit. Flügelschare bestehen hingegen aus einem Schmalschar mit 50 bis 80 mm Breite, an das seitlich Flügel angebracht sind, die die Arbeitsbreite erweitern. Die tiefer arbeitende Scharspitze des Schmalschares verbessert zwar den Bodeneinzug, erhöht jedoch die minimale Arbeitstiefe bei ganzflächiger Bearbeitung im Vergleich zum Gänsefußschar.

Durch ihren Untergriff dringen die Schare in den Boden ein, heben diesen an und brechen ihn in Fahrtrichtung auf. Zur Steigerung der Mischwirkung kann am Scharstil ein Leitblech montiert werden, das das aufgeworfene Material nach oben ableitet. Dies führt dazu, dass der Grubber eine Bodenwalze vor sich her schiebt, die Boden und organisches Material intensiv vermischt.

Als Einebnungswerkzeuge kommen einfache Federzustreicher oder Hohl-scheiben zum Einsatz. Diese verteilen das aufgeworfene Material auf der Bodenoberfläche und glätten Haufen oder Dämme. Die korrekte Einstellung der Einebnungswerkzeuge ist entscheidend: Bei zu flacher Einstellung sinkt der Einebnungseffekt, während zu tiefe Einstellungen Bodenrillen verursachen können.

Für die Tiefenführung und Rückverfestigung stehen unterschiedliche Nachlaufwalzen zur Verfügung, die sich hinsichtlich Gewicht pro Meter Arbeitsbreite, Durchmesser und Form unterscheiden. Optional kann hinter der Nachlaufwalze ein Striegel montiert werden, um angedrückte Unkräuter und Ungräser herauszuarbeiten und auf der Bodenoberfläche abzulegen.

Als Großfederzinkenegge werden mehrbalkige Feingrubber mit Federzinken bezeichnet. Charakteristisch neben den Federzinken ist der mehrbalkige Aufbau mit 4 bis 8 Balken. Im Vergleich zum Mulchsaatgrubber weist sie eine geringere Rahmenhöhe und einen engeren Balkenabstand auf. Die Federzinken sind mit einem Strichabstand von 125 bis 200 mm montiert.

Zur Bodenbearbeitung werden neben Schmalscharen zur Auflockerung breite Gänsefußschare verwendet. Diese Schare, die je nach Strichabstand eine



Großfederzinkenegge mit vorlaufenden Stützrädern zur Tiefenführung Großfederzinkenegge mit Doppelstriegel

Abbildung 2.3: Großfederzinkenegge

Breite von 150 bis 220 mm aufweisen, gewährleisten eine flächendeckende Bearbeitung. Die Federzinken erzeugen durch ihre Vibration während der Arbeit eine größere Menge Feinerde im Vergleich zu starren Zinken. Allerdings ist die nicht strichstabile Bauweise ein Nachteil: Die Zinken weichen Hindernissen aus, was zwar Beschädigungen reduziert, jedoch auf schweren Böden die ganzflächige Bearbeitung erschwert.

Die Tiefenführung erfolgt über Stützräder, die entweder im Maschinenrahmen oder hinter diesem montiert sind. Einige Hersteller ergänzen diese durch Stützräder in der Front (Abbildung 2.3), wodurch sich die Maschine der Bodenkontur anpassen kann, wenn der Oberlenker im Langloch geführt wird. Alternativ kommen bei manchen Modellen leichte Nachlaufwalzen zum Einsatz, insbesondere wenn die Großfederzinkenegge für die Saatbettbereitung genutzt wird.

Zusätzlich kann ein Nachstriegel zur Verbesserung der Arbeitsqualität angebracht werden. Einige Modelle verfügen über zwei- oder dreibalkige Nachstriegel, die effektiv Unkräuter und Ungräser herauskämmen. Die Striegelzinken lassen sich durch Verstellen der Neigung um die Y-Achse in ihrer Aggressivität anpassen, um die Arbeitsweise an die jeweiligen Bedingungen anzupassen.

(Kurz-) Scheibeneggen verfügen über rotierende Werkzeuge, wobei in der Regel Hohl-scheiben verbaut werden. Alternativ bieten einige Hersteller Spezialscheiben an (Abbildung 2.4), die selbst bei geringen Arbeitstiefen eine flächendeckende Bodenbearbeitung ermöglichen sollen. Die Scheiben



Kurzscheibenegge mit 620 mm Hohl-scheiben Kurzscheibenegge mit Spezialscheiben für ul- und Doppelwalze zur Tiefenführung traflache Bodenbearbeitung

Abbildung 2.4: Kurzscheibenegge

sind einzeln an zwei Balken angebracht und mit Steinsicherungen wie Spiralfedern oder Gummipuffern ausgestattet.

Der Antrieb der Hohl-scheiben erfolgt ausschließlich durch die Bewegung über den Boden. Für eine effiziente Bearbeitung ist eine Arbeitsgeschwindigkeit von 10 bis 12 km/h erforderlich, wobei bei geringen Arbeitstiefen auch Geschwindigkeiten von 15 bis 20 km/h erreicht werden können. Der Untergriff der Hohl-scheiben, der durch deren Durchmesser und Neigung entlang der X- und Z-Achse bestimmt wird, sorgt für den Einzug der Scheiben in den Boden. Mit zunehmender Scheibengröße und steileren Anstellwinkeln steigt jedoch auch der Seitenzug der Maschine. Dieses Problem wird von einigen Herstellern durch eine symmetrische, x-förmige Anordnung der Scheiben gelöst.

Die Hohl-scheiben der Kurzscheibenegge unterschneiden einen Teil des Bodens und brechen dadurch den Boden auf. Eine ganzflächige Bodenbearbeitung ist je nach Größe und Neigung der Hohl-scheiben ab etwa 5 cm möglich. Das herausgebrochene Material wird durch die Rotation nach hinten geworfen. Da die Relativgeschwindigkeit zwischen Boden und Hohl-scheibe abhängig vom Durchmesser der Hohl-scheibe variiert, kann durch die Wahl der Hohl-scheibe zumindest bei größeren Arbeitstiefen auch der Mischeffekt beeinflusst werden. In der flachen Bodenbearbeitung - z.B. beim Stoppelsturz - spielt dieser Effekt allerdings eine untergeordnete Rolle und ist zu vernachlässigen.

Zur Tiefenführung und Rückverfestigung kommen ähnliche Nachlaufwal-



Kettenscheibenegge

Busa Rotor

Abbildung 2.5: Kettenscheibenegge und Busa Kreiselhackengrubber

zen wie beim Mulchsaatgrubber zum Einsatz. Bei einigen Modellen werden hinter jeder Scheibenreihe Striegel angebracht, die den Erdstrom bremsen. Dadurch wird das Verstopfen der zweiten Scheibenreihe oder der Nachlaufwalze verhindert. Gleichzeitig verbessert sich die Mischwirkung, da die Mischung aus Boden und organischen Rückständen durch den Striegel zurückgehalten und gleichmäßig verteilt wird. Ohne Striegel würden schwere Bestandteile wie Steine oder Boden schneller absinken als leichte Rückstände wie Stroh oder Pflanzenreste. Die Intensität der Mischwirkung kann durch die Verstellung oder den Ausbau der Striegel an die jeweiligen Bedingungen angepasst werden.

Zusätzlich wird bei einigen Maschinen hinter der Nachlaufwalze ein weiterer Striegel montiert. Dieser dient vor allem dazu, Unkräuter und Ungräser herauszuziehen und auf der Bodenoberfläche abzulegen, wo sie vertrocknen können.

Kettenscheibeneggen sind eine vergleichsweise neue Entwicklung am Markt und basieren auf einem ähnlichen Wirkprinzip wie (Kurz-)Scheibeneggen. Der wesentliche Unterschied liegt in der flexiblen Aufhängung der Scheiben an Ketten (Abbildung 2.5), die eine optimale Bodenanpassung ermöglicht. Zusätzlich verfügen einige Modelle über Stützräder, die sowohl zur Tiefenführung als auch zur Stabilisierung der Maschine während der Arbeit beitragen.

Während bei (Kurz-) Scheibeneggen Scheiben mit einem Durchmesser von 450 bis z.T. 730 mm Durchmesser ca. 15° schräg zur Fahrtrichtung montiert

sind, werden die an den Ketten befestigten mit 330 bis 350 mm Durchmesser deutlich kleineren Scheiben mit etwa 45° zur Fahrtrichtung durch den Boden gezogen. Da die Anzahl der Scheiben pro Meter Arbeitsbreite bei der Kettenscheibenegge höher als bei klassischen Scheibeneggen ist, soll in Kombination mit der starken Schrägstellung der Scheiben ein flacheres, ganzflächigeres Arbeiten möglich sein.

Durch Auswahl verschiedener Ketten und Scheiben, die hinsichtlich der Form und des Gewichtes variieren, kann die Kettenscheibenegge an die jeweiligen Standortbedingungen angepasst werden. Da die Kettenspannung angepasst werden kann, ist es möglich, die Arbeitsqualität während des Betriebes kurzfristig aus der Schlepperkabine heraus anzupassen. Allerdings ist die Variation der Arbeitstiefe nur in geringem Maße möglich. Die Arbeitstiefe liegt in Abhängigkeit von Bodenbeschaffenheit, Feuchtigkeit, Mulchauflage und den verwendeten Scheiben zwischen 0 und 5 cm.

Spatenrolleggen sind angebaute oder aufgesattelte Bodenbearbeitungsgeräte zur flachen Bodenbearbeitung, die in der Regel zwei- bis vierbalkig aufgebaut sind, in Ausnahmefällen auch bis zu acht Balken umfassen. An den Balken sind Wellen montiert, die jeweils vier bis fünf Messer tragen. Diese Wellen rotieren während der Arbeit um die Y-Achse, wobei sie durch den Bodenantrieb in Bewegung gesetzt werden. Da die Wellen mit einem Winkel kleiner oder größer 90° zur X-Achse angestellt sind, bearbeiten die Messer den Boden streifenförmig. Ausgeglichen wird dies durch eine hohe Anzahl an Messern. Während der Arbeit dringen die Messer etwa 4 bis 5 cm tief in den Boden ein, wobei sie Ernterückstände in den Boden eindrücken und gleichzeitig Boden herausreißen. Dies führt zu einer leichten Mischung des Materials mit dem Boden. Ein ganzflächiger Schnitt und eine vollständige Bodenbearbeitung sind mit einer Spatenrollegge jedoch nicht möglich.

Strohstriegel finden verstärkt Anwendung bei der Stoppelbearbeitung, insbesondere nach der Ernte von Getreide und Raps. Sie dienen der oberflächlichen, ultraflachen Bodenbearbeitung. Diese Geräte sind mit 16 bis 18 mm dicken Striegelzinken ausgestattet, die an einem vier- bis sechsbalkigen Rahmen montiert sind (Abbildung 2.6). Der Strichabstand zwischen den Striegelzinken beträgt 40 bis 100 mm und ist somit deutlich enger als bei Großfederzinkeneggen oder Mulchsaatgrubbern.

Die Balken, an denen die Striegelzinken befestigt sind, lassen sich hydrau-



Strohstriegel mit vorlaufender Impulsschiene

Strohstriegel aus Fahrerperspektive

Abbildung 2.6: Strohstriegel

lisch um die Y-Achse drehen. Dies ermöglicht das Einfahren der Zinken für den Straßentransport und eine flexible Anpassung an die Einsatzbedingungen. Bei einigen Modellen können die letzten zwei Balken separat über einen Oberlenker im Winkel verstellt werden, um die Arbeitsintensität zu variieren.

Strohstriegel arbeiten mit hohen Geschwindigkeiten von 15 bis 25 km/h. Durch diese Geschwindigkeit und das z.T. hohe Gewicht der Geräte beginnen die Striegelzinken auf der Bodenoberfläche zu vibrieren, wodurch Feinerde erzeugt wird. Aufgrund des geringen Bodeneingriffs von maximal 1 cm ist die Bodenbearbeitung im engeren Sinne jedoch auf günstige Bedingungen oder bereits vorbereitete Flächen beschränkt.

Während der Arbeit mit dem Strohstriegel wird das Gerät von der Heckhydraulik des Traktors getragen. Der Oberlenker ist dabei so eingestellt, dass der Rahmen annähernd parallel zur Bodenoberfläche ausgerichtet ist. Damit es nicht zum Aufstauen des organischen Materials kommt, wird der Oberlenker etwas eingefahren, sodass der Abstand zwischen Rahmen und Boden in Fahrtrichtung hinten minimal größer ist als vorne. Dadurch führen auch große Strohmenen nicht zum Verstopfen der Maschine.

Die Striegelzinken sind leicht nach hinten geneigt und in einem Winkel von 45 bis 85 Grad zur Y-Achse angestellt. Bei Modellen mit separater Einstellungsmöglichkeit der hinteren Balken kann der Zinkenwinkel dort zusätzlich vergrößert werden. Dies sorgt dafür, dass das Stroh in den ersten Balken flüssig durchläuft und sich in den hinteren Balken sammelt.

Durch die Vibration der Striegelzinken wird das Stroh gleichmäßig verteilt. Strohhaufen, wie sie beispielsweise bei der Ernte von Lagergetreide entstehen, lassen sich mit ein bis zwei Arbeitsgängen bei diagonalen Überfahrten effektiv verteilen.

Im Gegensatz zu Mulchsaatgrubbern, Großfederzinkeneggen, Kurzscheibeneggen oder aktiv angetriebenen Geräten wird der Strohstriegel während des Arbeitsprozesses flexibel an die vorherrschenden Bedingungen angepasst. Dies erfolgt durch Variationen in der Höhe der Heckhydraulik, die den Gesamtdruck des Rahmens auf die Striegelzinken reguliert. Zusätzlich kann die Neigung des Rahmens über den Oberlenker verändert werden, um gezielt mehr Druck auf die vorderen oder hinteren Balken auszuüben. Durch die hydraulische Verstellung des Zinkenwinkels lässt sich der Materialfluss innerhalb der Maschine optimieren. Diese drei Einstellungsmöglichkeiten erlauben eine schnelle Anpassung an wechselnde Bedingungen, wie beispielsweise unterschiedliche Strohmenngen oder variierende Bodenverhältnisse.

Im Gegensatz zu anderen Bodenbearbeitungsgeräten, die bei der Stoppelbearbeitung vor allem auf das flache Einmischen von Ausfallsamen und Ernterückständen ausgelegt sind, konzentriert sich die Messerwalze primär auf die Zerkleinerung von Ernterückständen. Zusätzlich können Zwischenfrüchte effektiv bearbeitet werden. Die Zerkleinerung erfolgt mittels rotierender Walzen, die um die Y-Achse drehen. Der Antrieb der Messerwalzen erfolgt passiv durch die Fahrgeschwindigkeit, die in der Regel zwischen 12 und 20 km/h liegt.

Die Zerkleinerungswirkung beruht auf den scharfen Messern, die das Material gegen den Boden drücken und durchtrennen, wobei der Boden als Gegenschneide fungiert. Messerwalzen unterscheiden sich in ihrer Konstruktion hinsichtlich der Anzahl der Walzen oder Walzensegmente, des Walzendurchmessers, der offenen oder geschlossenen Bauweise, der Messerform, der Wölbung der Messer über die Arbeitsbreite sowie durch die mögliche Kombination mit anderen Bodenbearbeitungswerkzeugen.

Große, geschlossene Messerwalzen werden hauptsächlich zur Stoppelbearbeitung nach Körnermais oder zur Zerkleinerung von grünen Pflanzen und Zwischenfrüchten eingesetzt. Für die Stoppelbearbeitung nach Getreide oder Raps kommen dagegen meist kleinere Messerwalzen mit einem oder zwei Walzen zum Einsatz. Durch den kleineren Durchmesser erreichen diese

eine höhere Umfangsgeschwindigkeit. In Kombination mit engeren Messerabständen sorgt dies für einen erhöhten Zerkleinerungsgrad. Ähnlich wie Strohstriegel können kleinere Messerwalzen auch unausgedroschene Ähren, Schoten und Hülsen aufbrechen, was den Bearbeitungserfolg bei Stoppelbearbeitungen zusätzlich steigert.

Ein weiterer Vorteil der Messerwalze ist die gezielte Ablage von Samen und Ernterückständen. Da Ausfall-, Ungras- und Unkrautsamen schwerer als Ernterückstände sind, sinken die Samen schneller zu Boden und werden von langsam herabfallenden Rückständen bedeckt. Dies kann insbesondere bei günstigen Bodenverhältnissen zur Förderung der Keimung beitragen. Je nach Bodenart und -zustand erzeugt die Messerwalze außerdem eine gewisse Menge an Feinerde. Dieser Effekt kann verstärkt werden, wenn die Messerwalze mit zusätzlichen Walzen oder Nachläufern zur Rückverfestigung kombiniert wird. Die Rückverfestigung verbessert den Bodenschluss und fördert ebenfalls die Keimung von Ausfallsamen.

Aktuell ist der Bomford Dyna Drive Zinkenrotor der einzige passiv angetriebene Zinkenrotor am Markt. Das Gerät verfügt über zwei Zinkenrotoren mit löffelartigen Zinken, die quer zur Fahrtrichtung angeordnet sind und um die Y-Achse rotieren. Der vordere Rotor treibt den hinteren über eine Kette mit einer Übersetzung von 1:3 an, wodurch der hintere Rotor mit der dreifachen Drehzahl arbeitet.

Die Arbeitsweise des Dyna Drive Zinkenrotors beruht auf einer Kombination aus Lockerung und Mischung: Der vordere Rotor öffnet die Bodenoberfläche und lockert den Boden, während Ernterückstände, Ausfallsamen und Boden gleichmäßig vermischt werden. Der hintere Rotor verstärkt diesen Effekt durch seine höhere Drehzahl, wodurch eine gleichmäßige und intensive Bodenbearbeitung erzielt werden soll.

Die Tiefenführung und Rückverfestigung erfolgt über eine Nachlaufwalze, wie sie auch bei Mulchsaatgrubbern und Kurzscheibeneggen zum Einsatz kommt. Analog zur Kurzscheibenegge benötigt der Dyna Drive Zinkenrotor Fahrgeschwindigkeiten von 12 bis 15 km/h, damit die Rotoren mit ausreichend Drehzahl rotieren und der angestrebte Misch- und Bearbeitungseffekt auftritt (Bomford Turner Ltd, 2024).

Während die Werkzeuge von (Kurz-) Scheibeneggen, Spatenrolleggen, Kettenscheibeneggen und Messerwalzen um die Y-Achse rotieren, sind die



Vorlaufende Kurzscheibenegge

Gut zu erkennen ist die Kombination aus Rohrstabwalze und Nachstriegel zur Rückverfestigung und Einebnung der Bodenoberfläche

Abbildung 2.7: Aufgesattelte Gerätekombination mit vorlaufender Kurzscheibenegge und Zinkenfeld

Kreiselrotoren des Kreiselhackengrubbers um die Z-Achse rotierend angebracht (Abbildung 2.5). Die Steinsicherung der Kreiselrotoren erfolgt dabei über eine Spiralfeder. Die im Durchmesser 520 oder 620 mm großen Rotoren verfügen über geschwungene, paddelartige Messer. Aufgrund der Neigung der Rotoren um die X- und Y-Achse werden diese durch den Boden bei Arbeitsgeschwindigkeiten zwischen 10 und 20 km/h angetrieben. Die Arbeitstiefe kann durch Veränderung der Rotorneigung angepasst werden und beträgt je nach Rotordurchmesser, Bodenart-, -feuchtigkeit und -zustand zwischen 0,5 und 5 cm (BUSA Bt., 2023).

Neben den genannten Bodenbearbeitungsgeräten werden zunehmend Gerätekombinationen für die flache und ultraflache Boden- sowie Stoppelbearbeitung angeboten. Im Segment der aufgesattelten Mulchsaatgrubber und Großfederzinkeneggen kommen beispielsweise vorlaufende Kurzscheibeneggen (Abbildung 2.7) oder Messerwalzen zum Einsatz.

Messerwalzen dienen dabei vorrangig der Zerkleinerung von Ernte- und Pflanzenrückständen, während Kurzscheibeneggen die Bodenoberfläche vor der Bearbeitung aufbrechen und organisches Material leicht einmischen. Beide Werkzeuge fördern den Materialfluss durch das nachgelagerte Zinkenfeld, sodass auch lange, zähe Ernterückstände oder Zwischenfrüchte eingearbeitet werden können.

Ähnlich wie Großfederzinkeneggen oder Mulchsaatgrubber lassen sich auch Strohstriegel mit vorlaufenden Messerwalzen oder alternativ mit einer Reihe von Schneidscheiben ausrüsten. Messerwalzen zerkleinern hier die Ernterückstände, während Schneidscheiben speziell darauf ausgelegt sind, Feinerde zu erzeugen und eine intensivere, ultraflache Bodenbearbeitung zu gewährleisten.

Die bisher beschriebenen Bodenbearbeitungsgeräte zeichnen sich dadurch aus, dass sie passiv durch die Vorfahrtsgeschwindigkeit und die Bewegung der Gesamtmaschine entlang der X-Achse angetrieben werden. Ergänzend dazu gibt es aktiv über die Gelenkwelle angetriebene Geräte, die ebenfalls in der Stoppelbearbeitung eingesetzt werden können. Diese Geräte ermöglichen eine zusätzliche Steuerung des Arbeitseffekts nicht nur über die Fahrgeschwindigkeit, sondern auch über die Zapfwellendrehzahl. Das Verhältnis zwischen Vorfahrtsgeschwindigkeit und Werkzeugdrehzahl bestimmt die Intensität der Zerkleinerungs- und Mischwirkung: Mit sinkendem Verhältnis steigt die Bearbeitungsintensität.

Dieser Vorteil wird jedoch durch niedrigere Arbeitsgeschwindigkeiten und damit geringere Flächenleistung erkauft. Zusätzlich erfordert der Betrieb aktiv angetriebener Geräte einen höheren Leistungsbedarf, und die Verfahrenskosten sind aufgrund von Anschaffungspreisen und Verschleiß höher als bei passiven Geräten (Bischoff et al., 2018). Grundsätzlich lassen sich aktive Geräte in Fräsen und Zinkenrotoren (Werkzeuge rotieren um die Y-Achse) sowie Kreiseleggen und Kreiselgrubber (Werkzeuge rotieren um die Z-Achse) unterteilen.

Der Hauptunterschied zwischen Fräsen und Zinkenrotoren liegt in der Gestaltung der Werkzeuge:

- Fräsen arbeiten mit Winkelmessern, die ähnlich wie Grubberschare horizontal durch den Boden schneiden. Je nach Anstellwinkel der Messer besteht bei feuchten Bedingungen das Risiko der Bildung von Schmier-schichten, insbesondere bei flachen Winkeln und niedrigen Fräswel-lendrehzahlen. Diese Schichten können die Wasserinfiltration und das Wurzelwachstum der Folgepflanzen beeinträchtigen.
- Zinkenrotoren haben eine höhere Anzahl an Werkzeugen pro Meter Arbeitsbreite, da die Zinken schmaler und weniger horizontal ausge-richtet sind. Während die Mischwirkung ähnlich der einer Fräse ist,

verarbeitet die Fräse mit Winkelmessern mehr organisches Material, wie z. B. langes Stroh (Köller & Hensel, 2019).

Die Tiefenführung erfolgt bei beiden Gerätetypen in der Regel über Nachlaufwalzen. Moderne Fräsen für die flache Bodenbearbeitung verfügen zunehmend über Stützräder vor der Fräswelle, um die Arbeitstiefe präzise zu steuern und das abgefräste Material nicht erneut anzudrücken.

Kreiseleggen und Kreiselgrubber sind durch gegenläufig rotierende Zinkenpaare gekennzeichnet, die über Zahnräder angetrieben werden. Diese Geräte verfügen häufig über einfache Schaltgetriebe, die eine Anpassung des Arbeitseffekts durch Variation der Zapfwellendrehzahl, Fahrgeschwindigkeit oder Getriebeübersetzungen ermöglichen. Unterschiede ergeben sich durch die Zinken:

- Kreiseleggen haben schleppend gestellte Zinken und werden primär für die Saatbettbereitung nach dem Pflügen eingesetzt.
- Kreiselgrubber besitzen auf Griff gestellte, leicht gebogene Zinken, die sich besser für die konservierende Bodenbearbeitung eignen

Aktiv angetriebene Geräte spielen in der Stoppelbearbeitung bislang eine untergeordnete Rolle. Ihre geringe Flächenleistung und hohen Verfahrenskosten schränken ihre Einsatzmöglichkeiten ein (Auernhammer et al., 1998). Eine Alternative zum mechanischen Gelenkwellenantrieb ist der hydraulische Antrieb. Auf der Agritechnica 2023 stellte die Firma 4Disc mit dem ActiCut ein neuartiges Bodenbearbeitungsgerät vor. Dieser als Schneidgrubber bezeichnete ActiCut nutzt pro Element einen Hydraulikmotor, der eine um die Z-Achse drehende Scheibe antreibt. Die Scheiben sind an einem Rundrohr befestigt und durch Spiralfedern gegen Steine gesichert. Die Tiefenführung erfolgt hydraulisch einstellbar über Stützräder, die den gesamten Rahmen oder bei klappbaren Modellen das Klappsegment stabilisieren. Für die Einebnung und zum Herausziehen von Pflanzen ist ein dreibalkiger Striegel integriert, dessen Neigung ebenfalls hydraulisch angepasst werden kann (4Disc GmbH, 2024).

2.2 Bodenbearbeitung in Ackerbausystemen

Bodenbearbeitung beeinflusst zahlreiche ertragsrelevante Parameter in Agrarökosystemen, einschließlich des Auftretens von Unkräutern, Ungräsern, Schädlingen und Pflanzenkrankheiten. Notwendig ist Pflanzenschutz, da

Unkräuter, Ungräser, Schädlinge, Pathogene und Viren einerseits den Ertrag reduzieren und andererseits die Qualität der Ernteprodukte negativ beeinflussen können (Börner, 2009; Hallmann et al., 2009; Köller & Hensel, 2019).

Der Integrierter Pflanzenschutz (IPS) umfasst sämtliche verfügbaren Maßnahmen zum Schutz der Kulturpflanzen vor Schadorganismen und basiert auf Grundsätzen, die ökologische und ökonomische Belange gleichermaßen berücksichtigen. Entscheidungen im Rahmen des IPS werden wissenschaftsbasiert und nach sorgfältiger Abwägung getroffen (Börner, 2009). Schadorganismen wie Unkräuter, Ungräser, Schädlinge und Krankheiten sollen möglichst durch kulturtechnische Maßnahmen vorbeugend vermieden und durch "vorhandene, regulierende und begrenzende Faktoren des Ökosystems auf ein ökonomisch vertretbares Maß reduziert (Steiner, 1968). Der IPS weist Parallelen zu den Prinzipien des ökologischen Landbaus auf, der aufgrund des Verzichts auf chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel primär auf vorbeugende Strategien setzt (Bruns, 2016). Chemische Pflanzenschutzmittel werden im IPS nur angewendet, wenn präventive Maßnahmen nicht ausreichen und alternative Ansätze keine ausreichende Wirkung zeigen (Wennemann, 2002). Der chemische Pflanzenschutz ist weiterhin auf ein notwendiges Maß zu beschränken („Report of the United Nations Conference on Environment and Development: Rio de Janeiro, 3 - 14 June 1992“, 1993).

Um diese Richtlinien und Ziele zu verfolgen und zu erreichen, ist auch die Anpassung der Bodenbearbeitung an Standort, Klima, Wetter und Fruchtfolge notwendig. Bevor in diesem Kapitel erläutert wird, welche Bedeutung Bodenbearbeitung auf die Regulierung und Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten, Unkräutern und Ungräsern hat, sollen zunächst chemische, agronomische und mechanische Verfahren vorgestellt und eingeordnet werden.

2.2.1 Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten

Pflanzenkrankheiten werden durch phytopathogene Erreger wie pilzähnliche Organismen, echte Pilze, Bakterien und Viren verursacht (Börner, 2009). Die sogenannte Basis- bzw. Nichtwirtsresistenz schützt Pflanzen gegen die meisten dieser Erreger, sodass Krankheiten nur von hochspezialisierten Pathogenen ausgelöst werden können. Dennoch führen Pflanzenkrankheiten weltweit zu potentiellen Ertragsverlusten von etwa 15 bis 16 %, wobei Schäden je nach Anbauregion und Kulturpflanze deutlich höher

ausfallen können (Oerke, 2006; Oerke & Dehne, 2004). Daher sind vorbeugende und kurative Maßnahmen zur Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten unerlässlich, um Erträge und Qualität der Ernteprodukte zu sichern.

Chemischer Pflanzenschutz Pflanzenschutzmittel lassen sich unter anderem nach Zielorganismus, Kulturpflanze, Wirkungsweise, chemischer Struktur und Ausbringungsform differenzieren. Im Hinblick auf Pflanzenkrankheiten richten sich fungizide Maßnahmen primär gegen Pilze und pilzähnliche Organismen. Während Bakterien und Viren häufig nur durch die Bekämpfung ihrer Vektoren kontrolliert werden können, ermöglichen fungizide Wirkstoffe eine direkte Kontrolle phytopathogener Pilze und pilzähnlicher Erreger (Hallmann et al., 2009).

Ein Beispiel ist der Einsatz von Fungiziden in der Weizenblüte (BBCH 61-69), um Schäden durch *Gibberella zeae* (Anamorph: *Fusarium graminearum*) zu reduzieren. Die Wirksamkeit hängt von der Weizensorte, den Witterungsbedingungen und dem eingesetzten Wirkstoff ab (Bolanos-Carriel et al., 2020). So konnte Tebuconazol in Sommerweizenversuchen sowohl den Befall mit partieller Taubährigkeit verringern als auch den Gehalt des Mykotoxins DON signifikant reduzieren (Jones, 2000). Bei Winterweizen führen Fungizide, abhängig von den Resistenzeigenschaften der Sorten und den lokalen Pathogenpopulationen, zu Mehrerträgen und Qualitätsverbesserungen (Kelley, 2001).

In Zuckerrüben hängt der Erfolg fungizider Maßnahmen von Umweltbedingungen, eingesetzten Wirkstoffen sowie Applikationstermin und -häufigkeit ab. Studien zeigen, dass Fungizide je nach Infektionsdruck Zuckererträge um 2 bis 25 % steigern können (Heick et al., 2020; Jaskulska et al., 2023).

Zur Bekämpfung der Weißstängeligkeit (*Sclerotinia sclerotiorum*) kann in Winterraps die sogenannte Blütenbehandlung mit Fungiziden durchgeführt werden (Hallmann et al., 2009). Mehrjährige Versuche von Bradley et al. (2006) zeigten, dass die Befallsstärke dieses Erregers mit Fungiziden reduziert werden kann. Gleichzeitig wirkten sich die Fungizidmaßnahmen nicht immer signifikant auf den Ertrag aus.

Die Wirtschaftlichkeit von Fungiziden zur Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten in Winterweizen ist abhängig von zahlreichen Faktoren, wie beispielsweise dem Marktpreis für Weizen, dem Ertragsgewinn durch die Applikation und schlussendlich auch der Befallsstärke. Abhängig von den Be-

dingungen ist die Nutzung von Fungiziden nicht immer ökonomisch sinnvoll (Wiik & Rosenqvist, 2010). Insbesondere bei geringem Befall ist eine Fungizidapplikation häufig unwirtschaftlich (Wegulo et al., 2011). Zu ähnlichen Ergebnissen in Zuckerrüben kamen Heick et al. (2020): die höchste Wirtschaftlichkeit hatte die Fungizidapplikation in Jahren mit hohem Infektionsdruck.

Die in Teilen hohe Effektivität fungizider Wirkstoffe wird zunehmend durch Fungizidresistenzen bedroht (Lucas et al., 2015). Diese sind vor allem auf unzureichendes Resistenzmanagement zurückzuführen. Das Risiko der Resistenzbildung kann beispielsweise durch die Einhaltung der korrekten Aufwandmenge oder durch den Wechsel und die Kombination von Wirkstoffen verringert werden (Schürch et al., 2009).

Neben phytophagen Erregern werden auch nützliche oder neutrale Pilze und pilzähnliche Organismen von Fungiziden beeinflusst und teils geschädigt. Beispielsweise verändert der Fungizideinsatz die Pilzgemeinschaft auf der Phyllosphäre von Weizen (Karlsson et al., 2014). Mehrfache Fungizidapplikationen im Winterweizen sind notwendig, da Pathogene wie Echter Mehltau (*Blumeria graminis*) oder Gelbrost (*Puccinia striiformis*) bereits in frühen Entwicklungsstadien auftreten können, während Fusariosen durch *Gibberella zeae* erst während der Blüte Schaden verursachen (Hallmann et al., 2009). Dennoch kann die frühe Anwendung von Fungiziden Antagonisten unterdrücken und somit indirekt das Fusariumbefallsrisiko erhöhen (Dik, 1991; Henriksen & Elen, 2005).

Auch Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AMF) können durch Fungizide geschädigt werden. Die Effekte fungizider Wirkstoffe auf AMF variieren je nach Wirkstoff, Wirkstoffmenge und -konzentration, Applikationsart und Applikationstermin (Hage-Ahmed et al., 2019; Jin et al., 2013; Trappe et al., 1984).

Bedeutung der Bodenbearbeitung für die Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten

Auch wenn Bodenbearbeitung durch Milieuveränderungen das Vorkommen von Schaderregern und den Befall von Nutzpflanzen mit Pathogenen beeinflusst, spielen weitere modifizierende Faktoren eine Rolle (Sturz et al., 1997). Das Vorkommen von Pathogenen hängt unter anderem von der Fruchtfolge (Paulitz et al., 2010; Rothrock, 1987), der Position, Art, Menge und Zusammensetzung der Ernte- und Pflanzenrückstände (Köhl et al., 2011), der Bodenbiologie (Azcón-Aguilar & Barea, 1997; van Elsas et al.,

2002), der Bodendurchlüftung (Carter & Johnston, 1989), dem Vorkommen von Schadverdichtungen (Allmaras et al., 1988) sowie den klimatischen Bedingungen (Garrett et al., 2021; Raza & Beber, 2022) ab. Schaafsma et al. (2001) führen Variationen im DON-Gehalt als Folge einer Infektion mit *Fusarium graminearum* vor allem auf Jahreseffekte, die Weizensorte und die Vorfrucht zurück. Am Beispiel *Fusarium graminearum* zeigten Versuche von Lori et al. (2009), dass weniger das Bodenbearbeitungssystem, sondern vor allem die Infektionsbedingungen und die Witterung entscheidend für eine Infektion mit *Fusarium graminearum* sind.

Bodenbearbeitung beeinflusst pathogene, neutrale und nützliche Bodenorganismen durch Veränderungen der Nährstoffverteilung, der Lagerungsdichte, der Bodenstruktur und der Größe und Position der Ernte- und Pflanzenrückstände. Mit Blick auf die Überdauerung von Pathogenen kommt den Ernterückständen eine besondere Bedeutung zu. Diese dienen phytopathogenen Erregern als Habitat und Nahrungsquelle (siehe u.a. (Hofgaard et al., 2016; Miller et al., 1998) und Unterabschnitt 1.2.2). So konnten Turkington et al. (2011) *Fusarium graminearum* auf Ernterückständen von Körnermais und Getreide nachweisen. Auch nach 630 Tagen konnten *Fusarium moniliforme*, *Fusarium proliferatum* und *Fusarium subglutinans* sowohl auf eingearbeiteten als auch auf an der Oberfläche belassenen Maisstängeln nachgewiesen werden. Die Überlebensrate der untersuchten *Fusarium*-Arten war an der Bodenoberfläche höher als auf eingearbeiteten Maisstängeln (Cotten & Munkvold, 1998).

Reduzierte Bodenbearbeitung und No-Tillage sind dadurch gekennzeichnet, dass im Vergleich zu konventioneller, wendender Bodenbearbeitung mehr Ernterückstände an der Bodenoberfläche verbleiben. Versuche von Maiorano et al. (2008) zeigten eine starke Korrelation zwischen der Menge der Ernterückstände in den obersten 10 cm Boden bzw. auf der Bodenoberfläche und der DON-Konzentration im Weizenkorn. Zurückzuführen ist dies auf die größere Konzentration von *Fusarium* spp.-Sporen an Getreidekörnern von Sommerweizen, Winterweizen, Sommergerste, Wintergerste und Wintertriticale bei No-Tillage. Turkington et al. (2011) kommen zu dem Schluss, dass die Aussaat von Winterweizen nach Körnermais oder Winterweizen zu einem höheren Befall mit *Fusarium graminearum* führt und gegebenenfalls höhere DON-Gehalte im Weizenkorn gemessen werden, da dieser Erreger auf den Ernterückständen gut überdauern kann. Hofgaard et al. (2016) führen wendende Bodenbearbeitung daher als effektive Maßnahme zur Bekämpfung von *Fusarium* spp. auf. Neben dem Boden-

bearbeitungssystem hat auch die Einarbeitungstiefe der Ernterückstände Einfluss auf die Überdauerung von *Fusarium* spp., wobei eine tiefere Einarbeitung der Ernterückstände in den Boden phytosanitäre Vorteile mit sich bringt (Steinkellner & Langer, 2004).

Ähnliche Effekte konnten auch mit weiteren Nutzpflanzen und Pathogenen ermittelt werden. Die Überlebensraten von pathogenen und nicht-pathogenen Pilzen auf Ernterückständen von Soja konnten in zweijährigen Versuchen durch Variation der Bodenbearbeitung beeinflusst werden. Insgesamt konnte wendende Bodenbearbeitung die Biomasse von Pilzen stärker reduzieren als No-Tillage. Unterschiede gab es hingegen zwischen den untersuchten Arten, die unterschiedlich stark auf die Bodenbearbeitung und das Vergraben der Ernterückstände reagierten (Almeida et al., 2001). Als einer von drei Erregern verursacht *Mycosphaerella pinodes* (Nebenfruchtform: *Ascochyta pinodes* Jones) an Erbsen die Fuß- und Brennfleckenkrankheit. Zhang et al. (2005) untersuchten daher, ob die 5 bzw. 10 cm tiefe Einarbeitung von Ernterückständen von Erbsen sich gegenüber dem Verbleib dieser auf der Bodenoberfläche hinsichtlich der Überlebensrate von *Mycosphaerella pinodes* auswirkt. Ernterückstände an der Bodenoberfläche wiesen eine höhere Sporenproduktion auf und verursachten bei damit inokulierten Erbsenpflanzen einen schwereren Krankheitsverlauf. Zu gegenteiligen Ergebnissen beim Anbau der Schmalblättrigen Lupine (*Lupinus angustifolius*) kamen Simpfendorfer et al. (2004), die einen geringeren Befall mit *Sclerotinia sclerotiorum* bei No-Tillage feststellten.

Zwischenfazit Pflanzenkrankheiten werden weltweit durch hochspezialisierte phytopathogene Erreger verursacht und führen je nach Region und Kulturpflanze zu erheblichen Ertragsverlusten. Chemische Pflanzenschutzmaßnahmen, insbesondere Fungizide, spielen eine zentrale Rolle bei der Bekämpfung phytopathogener Pilze, wobei die Wirksamkeit von Umweltfaktoren und Managementmaßnahmen abhängt. Bodenbearbeitung beeinflusst das Vorkommen von Pathogenen durch Veränderungen im Bodenmilieu und der Ernterückstände, wobei reduzierte Bodenbearbeitung das Überleben von Erregern wie *Fusarium* spp. fördert, während wendende Bodenbearbeitung phytosanitäre Vorteile bietet. Unterschiede bestehen je nach Pathogen, Kulturpflanze und Bearbeitungssystem, was eine individuelle Anpassung der Maßnahmen erforderlich macht. Effektiver integrierter Pflanzenschutz berücksichtigt daher chemischen Pflanzenschutz, Fruchtfolgen, Bodenbearbeitung und spezifische Umweltbedingungen. Besonders die gezielte Einarbeitung von Ernterückständen und das Resistenzmanagement

bei Fungiziden sind essenziell, um Pathogene nachhaltig zu bekämpfen und Erträge zu sichern.

2.2.2 Regulierung der Begleitvegetation

Im Vergleich zu Schädlingen und Pathogenen verursachen Unkräuter und Ungräser die größten Ertragsverluste im Acker- und Pflanzenbau. Daher spielt die Regulierung der Segetalflora eine zentrale Rolle. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene indirekte sowie direkte chemische und mechanische Verfahren zur Unkrautbekämpfung vorgestellt. Abschließend wird die Bedeutung der Bodenbearbeitung für eine effektive Regulierung der Segetalflora zusammenfassend erläutert.

Unkrautbekämpfung durch agronomische Maßnahmen Nach den Grundsätzen des IPS stehen vorbeugende, agronomische Maßnahmen im Vordergrund, um die Segetalflora auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu reduzieren. Dabei spielt die Wahl geeigneter Sorten eine zentrale Rolle: Verschwele (2014) zeigte in Versuchen mit Winterweizensorten, dass einige Sorten eine höhere Konkurrenzkraft gegen das Modellunkraut Weißer Senf (*Sinapis alba*) aufwiesen. Zwei Sorten stachen zudem durch ihre Unkrauttoleranz hervor, da sie auch bei starkem Unkrautdruck geringere Ertragseinbußen zeigten.

Auch der Aussaattermin kann im Rahmen der vorbeugenden Unkrautkontrolle angepasst werden. Die Anzahl Ackerfuchsschwanzpflanzen in einem Winterweizenbestand konnte in mehrjährigen Feldversuchen durch eine spätere Aussaat um 34 bis 52 % verringert werden (Gerhards et al., 2022). Eine Reduktion der Ackerfuchsschwanzpopulation von etwa 50 % erzielten Lutman et al. (2013) durch die Verschiebung der Winterweizenaussaat von September auf Ende Oktober.

Abhängig von der Fruchtfolge verändert sich auch die Zusammensetzung der Segetalflora (Cardina et al., 2002). Der Anbau von Winterweizen in Selbstfolge führte dazu, dass die Begleitflora zu großen Teilen aus einjährigen Ungräsern Bestand, während in Fruchtfolgen mit Weizen und Körnermais bzw. Weizen und Zuckerrüben der Anteil monokotyler Arten deutlich geringer war (Koocheki et al., 2009). In Versuchen von Menegat (2023) konnte Ackerfuchsschwanz durch den Anbau von Sommergerste in einer Fruchtfolge mit Winterweizen reduziert werden. Die Diversifizierung der Fruchtfolge kann nicht nur vorbeugend dazu beitragen, Herbizidresistenzen zu vermeiden. Auch die Wirtschaftlichkeit der diversifizierten Frucht-

folge liegt im Falle von Herbizidresistenzen deutlich höher im Vergleich zu Fruchtfolgen mit einem hohen Anbauumfang von Wintergetreide (Gerhards et al., 2016). Auch Zwischenfrüchte sollten stärker in die Fruchtfolge integriert werden, da ebenfalls positive Effekte auf die Unterdrückung von Unkräutern nachgewiesen werden konnten (MacLaren et al., 2019; Osipitan et al., 2018, 2019; M. Schulz et al., 2020).

Der Einsatz von Herbiziden ist als Baustein im IPS insbesondere dann effektiv, wenn weitere ackerbauliche Maßnahmen zur Vorbeugenden Beikrautregulierung genutzt werden (Gerhards et al., 2016). Insbesondere die Kombination aus verschiedenen vorbeugenden Maßnahmen wie der Fruchtfolgegestaltung und der Anwendung geeigneter Bodenbearbeitungsverfahren kann ein geeignetes Mittel sein, um Problemunkräuter und -ungräser zurückzudrängen. Optimierungspotential bietet auch die Bodenbearbeitung, die maßgeblich dazu beitragen kann, Unkräuter und Ungräser zu reduzieren, gleichzeitig bei falscher Anwendung aber auch gegenteilige Effekte hervorrufen kann. Zu beachten sind mögliche Wechselwirkungen zwischen Fruchtfolge und Bodenbearbeitungssystem (Cardina et al., 2002; Menegat, 2023; Murphy et al., 2006).

Die Regulierung der Segetalflora umfasst sowohl indirekte Maßnahmen wie Sortenwahl, Fruchtfolge, Düngung und Bodenbearbeitung als auch direkte, chemische und physikalische Verfahren (Wegener & von Hörsten, 2019). Chemische und physikalische Methoden, die während und zwischen den Hauptkulturen eingesetzt werden, werden in den folgenden Abschnitten detailliert erläutert.

Chemische Unkrautbekämpfung Herbizide sind "biologisch aktive chemische Verbindungen zur Abtötung von Pflanzen oder Pflanzenteilen, insbesondere zur Bekämpfung von Unkräutern und Ungräsern"(Spektrum Akademischer Verlag, 1999). Ihre Klassifizierung erfolgt nach unterschiedlichen Kriterien. Ein zentrales Merkmal ist die Selektivität: Während Totalherbizide unspezifisch den kompletten Pflanzenbewuchs abtöten, wirken selektive Herbizide nur gegen bestimmte Arten und sind für die Kulturpflanze verträglich. Weitere Kriterien (siehe 2.1) sind der Anwendungstermin, die Hauptindikation, die Aufnahme, der Wirkmechanismus, die Wirkungsweise und die chemische Struktur (Hallmann et al., 2009).

Tabelle 2.1: Einteilungskriterien für herbizide Wirkstoffe, verändert nach Hallmann et al. (2009)

Kriterium	Beschreibung
Selektivität	nicht-selektives Herbizid (Totalherbizid), selektives Herbizid
Anwendungstermin	Vorsaat, Voraufbau (VA), Nachaufbau (NA)
Hauptindikation	Ungräser (Graminizid), dikotyle Unkräuter
Aufnahme	Blattherbizid, Bodenherbizid
Wirkungsweise	Kontaktherbizid, systemisches Herbizid
Wirkort (Target)	Photosynthese, Atmung, Fettsäuresynthese, etc.
Chemische Struktur	Harnstoffderivate, Organo-P-Verbindungen, etc.

Herbizide werden gezielt zur Regulierung von Unkräutern und Ungräsern eingesetzt, um deren Konkurrenzdruck auf ein wirtschaftlich vertretbares Maß zu reduzieren. Dabei stellt sich zunächst die Frage, welchen Ertragsgewinn der Einsatz von Herbiziden ermöglicht beziehungsweise welche Ertragsverluste durch Unkräuter und Ungräser ohne ihren Einsatz auftreten könnten. Mehrjährige Feldversuche zeigen, dass der Verzicht auf Herbizide zu erheblichen Ertragseinbußen führen kann: So reduzierte Ackerfuchsschwanz in Versuchen den Ertrag angebauter Kulturen um bis zu 41 % (Zeller et al., 2021). Der gezielte Einsatz von Herbiziden im Voraufbau erwies sich als effektiv, indem er die Anzahl von Ackerfuchsschwanzpflanzen im Winterweizen signifikant verringerte, abhängig vom verwendeten Wirkstoff (Gerhards et al., 2022). Eine Analyse von 30-jährigen Feldversuchen zur Ackerfuchsschwanzkontrolle in Wintergerste (*Hordeum vulgare*) an 139 Standorten ergab für behandelte Varianten einen durchschnittlichen Mehrertrag von 40 % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (Gehring & Thyssen, 2022).

Neben Unkräutern und Ungräsern können auch Ausfallpflanzen der Vorfrucht den Ertrag der Hauptkultur erheblich mindern. In mehrjährigen Versuchen führte Ausfallgetreide beispielsweise zu einer Ertragsminderung von bis zu 44 % im Maisanbau (G. C. Wilson et al., 2010). Die chemische Kontrolle von Ausfallpflanzen ist jedoch nicht in jedem Fall möglich. Grundsätzlich lassen sich dikotyle Arten in monokotylen Kulturpflanzenbeständen vergleichsweise gut bekämpfen. Das gilt auch für die Bekämpfung monokotyler Arten in dikotylen Nutzpflanzen. Schwieriger ist die Bekämpfung dikotyler Ausfallpflanzen in einer ebenfalls dikotylen Hauptkultur bzw. Folgefrucht. Nicht möglich ist beispielsweise die chemische Bekämpfung von Ausfallweizen in Wintergerste, da entsprechende Wirkstoffe

auch die Wintergerste abtöten würden (Hallmann et al., 2009). Die chemische Kontrolle von Ausfallgetreide in Winterraps ist gut möglich (Bushong et al., 2011). In Mais bewegten sich die Wirkungsgrade der eingesetzten Herbizide gegenüber Ausfallgetreide zwischen 60 und 93 %. Unterschiede kamen durch den Applikationszeitpunkt, den Wirkstoff und die Ausfallgetreideart zustande (G. C. Wilson et al., 2010).

Herbizide dienen primär der Sicherung stabiler Erträge. Für hohe Bekämpfungserfolge bei der Unkraut- und Ungrasregulierung sind hohe Wirkungsgrade Voraussetzung. Diese sind notwendig, um Resistenzen vorzubeugen. Der Wirkungsgrad einer Herbizidbehandlung ist von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig und variiert dementsprechend stark. So erzielte beispielsweise die Wirkstoffkombination aus 240 g/ha Flufenacet und 1200 g/ha Pendimethalin zur Ackerfuchsschwanzbekämpfung in Versuchen Wirkungsgrade zwischen 79,7 und 91,1 % (Gerhards et al., 2022).

Unterschiede im Wirkungsgrad können einerseits durch die verwendeten Wirkstoffe zustande kommen. Versuche von Dicke et al. (2016) zur Bekämpfung des Gemeinen Windhalms (*Apera spica-venti* L.) zeigten Unterschiede im Wirkungsgrad bei den verwendeten Wirkstoffklassen, die je nach Herkunft der Biotypen bereits auf Mutationen zurückzuführen sind, die Resistenzen gegenüber einzelnen Wirkstoffgruppen bewirken. Dicke et al. (2014) verglichen die Wirkung verschiedener Herbizide auf Taube Trespe (*Bromus sterilis*) von zwei unterschiedlichen Standorten. Während der Wirkungsgrad bei den Pflanzen aus einem Standort teilweise bei über 90 % lag, führte eine Wirkortresistenz bei Pflanzen vom zweiten Standort zu einer Reduktion der Wirkungsgrade auf 20 bis 30 %. Die Resistenzentwicklung wurde auf pfluglose Bewirtschaftung sowie einen hohen Anteil an Winterungen in der Fruchtfolge zurückgeführt. Insbesondere der hohe Anteil an Winterungen fördert Ungräser wie Ackerfuchsschwanz, Gemeiner Windhalm und Taube Trespe und begünstigt die Bildung von Herbizidresistenzen durch wiederholte Anwendung einer geringen Anzahl an Wirkstoffen. Auch die Herbizidaufwandmenge beeinflusst den Wirkungsgrad. Die Reduzierung der Herbizidaufwandmenge ohne Ertragsverluste dulden zu müssen ist zwar möglich (Brathuhn & Petersen, 2016). Bei der nicht durch Herbizide bekämpften Restverunkrautung besteht allerdings die Gefahr der Selektion resistenter Pflanzen (Brathuhn & Petersen, 2016; Neve & Powles, 2005).

Die Beikrautregulierung mit Herbiziden stößt zunehmend an Grenzen. Grund

dafür sind zunächst sich ausbreitende Resistenzen gegen herbizide Wirkstoffe und Wirkstoffgruppen. Weltweit waren bereits 2013 404 herbizidresistente Arten gelistet, die sich in 208 dikotyle und 196 monokotyle Arten aufgeteilt haben. Mit 247 Arten entfiel mehr als die Hälfte der Herbizidresistenzen auf die ALS-Inhibitoren (HRAC-Gruppe 2), ACCase-Inhibitoren (HRAC-Gruppe 1) und Photosystem-II-Inhibitoren (HRAC-Gruppe 5). Gegen den in Totalherbiziden eingesetzten Wirkstoff Glyphosat (HRAC-Gruppe 9) konnten bereits 11 dikotyle und 13 monokotyle Arten Resistenzen ausbilden (Heap, 2014). Auch in Deutschland werden vermehrt Herbizidresistenzen festgestellt. In Bayern wurde Ackerfuchsschwanz aus verschiedenen Regionen auf Herbizidresistenzen untersucht. Der Anteil resistenter Herkünfte betrug bei ALS-Inhibitoren 37 % und bei ACCase-Inhibitoren sogar 54% (Gehring et al., 2018). Den wirtschaftlichen Verlust durch herbizidresistenten Ackerfuchsschwanz beziffern Gerhards et al. (2016) auf ca. 500 € pro Hektar in Anbausystemen mit mehr als 60 % Wintergetreide und reduzierter Bodenbearbeitung. Herbizidresistenzen führen somit vor allem auf Standorten mit Problemungräsern und -unkräutern zu hohen ökonomischen Verlusten.

Bereits in der Vergangenheit sind herbizide Wirkstoffe aufgrund von Verboten oder nicht erfolgter Wiedertzulassung weggefallen. Ein Beispiel dafür ist der Wirkstoff Desmedipham, der zur Bekämpfung von Weißem Gänsefuß (*Chenopodium album*) und Windenknöterich (*Polygonum convolvulus*) in Zuckerrüben von großer Bedeutung war (Laufer & Ladewig, 2020). Die Zulassung dieses Wirkstoffs wurde jedoch zum 1. Januar 2020 widerrufen, sodass er derzeit nicht mehr für die Unkrautbekämpfung verfügbar ist (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 04.12.2019). Zudem stellen Leit- und Problemunkräuter, die mit den verfügbaren Herbiziden entweder nicht oder nur unzureichend bekämpft werden können, weiterhin eine Herausforderung dar. In intensiven Raps- und Maisfruchtfolgen sind beispielsweise Arten aus der Gattung Storchschnabel (*Geranium* spp.) nur schwer mit Herbiziden zu kontrollieren (Gehring et al., 2012).

Neben der Wirkung auf Unkräuter und Ungräser können Herbizide auch zu Herbizidstress bei der Kulturpflanze führen. So reagierten beispielsweise Zuckerrüben abhängig von den eingesetzten Wirkstoffen mit einer Reduktion der Blattfläche und schlussendlich auch mit geringeren Erträgen gegenüber unbehandelten Vergleichsparzellen (R. G. Wilson, 1999). Auch Mais reagierte gegenüber einer unkrautfreien, nicht behandelten Kontrolle bei

Herbizidapplikation mit Mindererträgen (G. C. Wilson et al., 2010). Wie stark der Herbizidstress und der damit verbundene Ertragsrückgang ist, hängt von mehreren Faktoren, unter anderem der Aufwandmenge und den Witterungsbedingungen bei der Applikation ab (Winter & Wiese, 1978).

Kritisch zu betrachten sind Herbizide hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt. Herbizidwirkstoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Halbwertszeit, Persistenz im Boden (Stipičević et al., 2015) und ihrer Mobilität. So wurde der umstrittene Wirkstoff Glyphosat sowie dessen Metabolit AMPA (Aminomethylphosphonsäure) bereits in Böden, Grundwasser und Pflanzen nachgewiesen (van Bruggen et al., 2018). Die Persistenz im Boden wird zusätzlich von zahlreichen Einflussfaktoren wie dem pH-Wert des Bodens, der Aktivität der Bodenbiologie (Chauhan et al., 2006) und den Umsetzraten der herbiziden Wirkstoffe, der Witterung oder auch der Wasserlöslichkeit des Wirkstoffes beeinflusst (Curran, 2016). Unterschiede beim Abbau der Wirkstoffe im Boden führen Kah et al. (2007) unter anderem auf Bodeneigenschaften wie den pH-Wert und den Anteil organischer Substanz im Boden zurück, wobei die Abbauraten abhängig von der Kombination aus Wirkstoff und Boden in den Versuchen variiert haben.

Herbizidrückstände können auch das Wachstum und die Entwicklung nachfolgender Kulturpflanzen und Zwischenfrüchte negativ beeinflussen. In kanadischen Versuchen führten Rückstände von Imazethapyr beispielsweise zu einer geringeren Biomassebildung von Buchweizen (*Fagopyrum esculentum* Moench) und Sudangras (*Sorghum bicolor* L.), die als nachfolgende Zwischenfrüchte angebaut wurden (Yu et al., 2015).

Der regelmäßige Einsatz von Herbiziden beeinflusst sowohl die Biomasse und Individuenzahl (Helmecke et al., 1977) als auch die Zusammensetzung der Begleitvegetation (Derksen et al., 1995). Diese Veränderungen können sich auch auf die Populationen von phytophagen Insekten und Vögeln auswirken, da eine veränderte Segetalflora und die Reduktion der Biomasse von Unkräutern und Ungräsern die Habitate und Nahrungsquellen dieser Tiere beeinflussen (Marshall et al., 2001). Der Herbizideinsatz sollte jedoch nicht isoliert von weiteren Faktoren betrachtet werden, die ebenfalls das Agrarökosystem gestalten und verändern. Dazu gehören zum Beispiel Bodenbearbeitung und Fruchtfolgegestaltung (Grundy et al., 2011; Rose et al., 2016).

Der Einfluss von Herbiziden auf die Bodenbiologie und die Bodenfunktio-

nen wird von Rose et al. (2016) als komplex beschrieben. Auch wenn die Gruppierung von herbiziden Wirkstoffen anhand ihrer chemischen Eigenschaften und ihrer Wirkweise möglich ist, lässt diese Einteilung nicht auf ähnliche Wirkungen auf Bodenorganismen schließen. In zahlreichen Studien, bei denen die zugelassenen Mengen und Konzentrationen der Wirkstoffe verwendet wurden, zeigte sich lediglich ein kurzfristiger und vernachlässigbarer Effekt auf Bodenorganismen. Die Autoren betonen jedoch die große Variabilität der Daten und die Inkonsistenzen zwischen verschiedenen Studien (Rose et al., 2016).

Mechanische Unkrautbekämpfung Um Unkräuter und Ungräser innerhalb einer Hauptkultur mechanisch zu bekämpfen, werden aktiv oder passiv angetriebene Werkzeuge eingesetzt, die die Begleitflora herausreißen, abtrennen oder verschütten. Dabei muss bei der Wahl und Einstellung der Werkzeuge sowie beim Termin ein Kompromiss zwischen Wirkungsgrad, Kulturpflanzenverträglichkeit und Schlagkraft gefunden werden" (Köller & Hensel, 2019).

Wie bei der chemischen Unkrautregulierung ist auch bei der mechanischen Bekämpfung ein hoher Wirkungsgrad erforderlich, um die negativen Auswirkungen der Segetalflora auf den Ertrag der Kulturpflanze zu minimieren. Naruhn et al. (2021) verglichen die Wirkungsgrade verschiedener mechanischer Verfahren zur Unkrautregulierung von Winterweizen, Sommererbsen (*Pisum sativum*) und Sojabohne (*Glycine max* L. Merr). Der Wirkungsgrad der mechanischen Maßnahmen schwankte zwischen 40 und 100 %. Bei Reihenkulturen mit weiten Reihenabständen wie Zuckerrübe oder Mais lassen sich Unkräuter und Ungräser zwischen den Reihen im sogenannten Inter-row-Bereich mechanisch mit Hacktechnik gut kontrollieren. Innerhalb der Reihe befinden sich jedoch häufig Unkräuter und Ungräser zwischen den Kulturpflanze, die mit konventioneller Hacktechnik nur unzureichend bekämpft werden können, wodurch der Gesamtwirkungsgrad einerseits sinkt und andererseits variiert (Gerhards et al., 2020). Ähnliche Ergebnisse kamen in Versuchen von (Kunz et al., 2016) beim Vergleich verschiedener Verfahren zur mechanischen Unkrautregulierung in Zuckerrüben zustande. Während einige Varianten ähnliche Wirkungsgrade wie die zum Vergleich durchgeführte chemische Unkrautregulierung erreichen konnten, war die Anzahl an Unkrautpflanzen pro m² in anderen Varianten tendenziell deutlich höher.

Beim Einsatz eines Zinkenstriegels zur Unkrautregulierung hängt der Wir-

kungsgrad stark von der Einstellung der Zinken und damit der Aggressivität ab. Mit zunehmender Aggressivität steigt der Wirkungsgrad der Maßnahme, wobei auch die Pflanzenverluste der Hauptkultur bei aggressiverer Einstellung der Striegelzinken zunehmen. Herausfordernd ist daher die korrekte Einstellung der Technik, um einerseits hohe Wirkungsgrade zu erzielen und andererseits die Kulturpflanze nicht zu stark zu beschädigen (Spaeth et al., 2020). Für eine kulturschonende Unkrautregulierung nennt Verschwele (2014) neben der Geräteeinstellung auch den Behandlungszeitpunkt, die Fahrgeschwindigkeit und den Bodenzustand als entscheidende Einflussfaktoren.

Ein Nachteil der mechanischen Unkrautbekämpfung im Vergleich zur Anwendung von Herbiziden ist die Reduzierung der Bodenbedeckung durch Ernte- und Pflanzenrückstände. Der Einsatz einer Scharhacke zur mechanischen Unkrautbekämpfung führte in Versuchen zu einem signifikant geringeren Mulchdeckungsgrad im Vergleich zur Herbizidbehandlung (Kunz et al., 2016).

Weiterer Nachteil sind Pflanzenverluste durch mechanische Beschädigung der Kulturpflanze. Gegenüber der Beikrautregulierung mit Herbiziden führt mechanische Unkrautbekämpfung dabei zu höheren Pflanzenverlusten bei der Kulturpflanze, was durchaus zu Ertragsunterschieden führen kann (Gerhards et al., 2020). In Versuchen von Verschwele (2014) führte zweimaliges Striegeln im Vergleich zur Herbizidbehandlung, bei der keine phytotoxischen Effekte des Wirkstoffs sichtbar waren, ebenfalls zu einer Reduktion der Bestandesdichte.

Der Einsatz von automatischen Lenksystemen, kameragesteuerter Hacktechnik oder Feldrobotern könnte in Zukunft dazu beitragen, die Präzision und damit den Wirkungsgrad der mechanischen Unkrautbekämpfung zu steigern, wodurch Kulturpflanzenschäden reduziert werden könnten (Kunz et al., 2015; McCool et al., 2018).

Bedeutung der Bodenbearbeitung für die Beikrautregulierung Neben den vorgestellten direkten Maßnahmen zur Beikrautregulierung gewinnen vorbeugende Bekämpfungsstrategien zunehmend an Bedeutung. Ein zentraler Ansatz hierbei ist die Bodenbearbeitung. Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Segetalflora näher beleuchtet.

Die Begleitvegetation und die Entwicklung der Unkräuter und Ungräser wird maßgeblich von der Art und Intensität der Bodenbearbeitung beeinflusst. In einem Langzeitversuch führte der Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung zu einem erhöhten Einsatz sowohl von selektiven als auch von nicht-selektiven Herbiziden. Abhängig von der Vorfrucht und der Witterung variierte der Einsatz, weshalb z.B. in trockenen Erntejahren mit später Keimung des Ausfallgetreides der Einsatz eines Graminizides in Winterraps notwendig wurde. Zudem zeigte sich nach fünf Jahren pflugloser Bodenbearbeitung eine stärkere Zunahme dikotyler Unkräuter im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung (Schwarz & Pallutt, 2014).

Beim Vergleich von wendender und pflugloser Bodenbearbeitung in einem ökologisch bewirtschafteten Dauerversuch stieg die Anzahl dikotyler und monocotyldoner Unkräuter bei der Frühjahrsbonitur um das 1,6- bzw. 5,9-fache an. Insbesondere Windhalm (*Apera spica-venti*) entwickelte sich bei pflugloser Bearbeitung in Blauen Lupinen zu einem dominierenden Problemungras. Gegenüber wendender Bodenbearbeitung konnten bei Pflugverzicht ein viermal so hoher Deckungsgrad mit Windhalm sowie eine 160-mal höhere Anzahl an Windhalmrispen pro Quadratmeter bonitiert werden (Dittmann, 2012).

Der Zeitpunkt der Bodenbearbeitung hat neben dem gewählten Verfahren einen wesentlichen Einfluss auf die Verunkrautung. In mehrjährigen Feldversuchen an drei Standorten konnten jedoch nicht in jedem Jahr und an jedem Standort signifikante Unterschiede festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass Jahreseffekte sowie das standortspezifische Samenpotenzial der Unkräuter ebenfalls eine zentrale Rolle für die Gesamtverunkrautung spielen (Häberle, 2006).

Die Variation der Bodenbearbeitung und des Saattermins von Winterraps beeinflussten die Gesamtverunkrautung nicht signifikant, führte jedoch zu Unterschieden in der Artenzusammensetzung. Bei nicht-wendender Bodenbearbeitung war die Artenzahl signifikant höher als bei Pflugeinsatz. Zudem nahm die Artenvielfalt bei Frühsaat im Vergleich zu Normal- und Spätsaat signifikant zu. Dies weist darauf hin, dass sowohl der Saattermin als auch der Zeitpunkt der Grundboden- und Saatbettbereitung die Zusammensetzung der Unkrautflora beeinflussen können (Hanzlik & Gero-witt, 2010).

Herausfordernd bei Direktsaat und Conservation Agriculture ist die Un-

krautbekämpfung. Da keine Bodenbearbeitung durchgeführt wird, müssen andere Werkzeuge benutzt werden, um Unkräuter, Ungräser und Zwischenfrüchte zu regulieren. Weit verbreitet ist der Einsatz von selektiven Herbiziden im Vor- und Nachauflauf sowie von Totalherbiziden im Voraufbau. In Regionen, in denen gentechnisch veränderte, glyphosatresistente Nutzpflanzensorten zugelassen sind, kann Glyphosat auch im Nachauflauf eingesetzt werden. Diese Möglichkeit ist jedoch auf wenige Länder, wie die Vereinigten Staaten von Amerika (USA), beschränkt.

Direktsaat von Sommerackerbohnen in Strohmulch führte in einer zweijährigen Versuchsreihe unter ökologischen Bedingungen gegenüber dem Anbau einer Winterzwischenfrucht mit wendender Grundbodenbearbeitung im Frühjahr zu einer Reduzierung dikotyler annueller Arten um bis zu 85 %, während Gräser und perennierende Unkräuter in der gepflügten Variante um bis zu 82 % niedriger waren als bei Sommerackerbohnen in Direktsaat (Massucati & Köpke, 2014). Ähnliche Ergebnisse ebenfalls unter ökologischen Produktionsbedingungen wurden von Jung und Rauber (2016) festgehalten: Direktsaat von Sommerackerbohnen in eine Winterzwischenfrucht aus Hafer und Sonnenblume führte zu einer Reduzierung des Leitunkrautes Ackersenf (*Sinapis arvensis*), während die Abundanz der Ackerkratzdistel (*Cirsium arvense*) mit abnehmender Bearbeitungintensität zunahm.

Die partielle Direktsaat führte einerseits zu einer Reduzierung des Samenpotentials von Ackerfuchsschwanz in der Bodensamenbank und andererseits zu einem Rückgang des Besatzes mit Ackerfuchsschwanz (Menegat, 2023).

Ein Vergleich von konventioneller, reduzierter Bodenbearbeitung und Direktsaat ergab im gesamten Bodenhorizont zwischen 0 und 45 cm keine signifikanten Unterschiede in der Unkrautsamenbank. Allerdings zeigte sich in der Bodenschicht von 0 bis 15 cm eine höhere Unkrautsamendichte in langjährigen Direktsaatparzellen, während in tieferen Bodenschichten (15–30 cm bzw. 30–45 cm) die Samendichte in Parzellen mit Bodenbearbeitung erhöht war (Barberi & Lo Cascio, 2001). Die Auswertung eines weiteren Langzeitversuches zum Vergleich von Direktsaat und Mulchsaat führte zu ähnlichen Ergebnissen: Die Unkrautsamendichte variiert nicht zwischen den Bearbeitungsverfahren, während Verteilung der Unkrautsamen im Boden und die Zusammensetzung der Unkrautarten durch die Bodenbearbeitung beeinflusst wurde (Ruisi et al., 2015). In mehrjährigen Untersuchungen von (Murphy et al., 2006) zeigte sich hingegen ein deutlicher

Rückgang der Unkrautsamenbank in No-Tillage-Parzellen von etwa 41.000 Samen pro m² auf rund 8.000 Samen pro m².

Eine wichtige Rolle in Direktsaatsystemen spielen Zwischenfrüchte, die insbesondere zur Regulierung und Unterdrückung von Unkräutern und Ungräsern genutzt werden (Haramoto & Gallandt, 2004; Mennan et al., 2020). Zwischenfrüchte tragen dazu bei, den Herbizideinsatz zu senken (J. R. Teasdale, 1996; Teasdale et al., 2007). Neben den betrachteten Unkrautarten (Cordeau et al., 2015) und der Auswahl geeigneter Zwischenfruchtarten und -mischungen (Silva, 2014; M. M. Williams et al., 1998) spielt jedoch das Management der Zwischenfrüchte eine entscheidende Rolle für die Unkrautregulierung mittels Zwischenfruchtanbau (Osipitan et al., 2019).

Eine Möglichkeit Zwischenfrüchte abzutöten ist der Einsatz von Quetschwalzen (engl.: *Roller Crimper*). Beim Walzvorgang wird der Zwischenfruchtbestand zu Boden gedrückt und der Assimilatstrom durch mehrfaches Knicken der Pflanze unterbrochen. Ein Schneiden findet aufgrund der verwendeten stumpfen Messer nicht statt (Kornecki et al., 2009; Kornecki & Price, 2010). Der Abtötungserfolg der Zwischenfrüchte hängt jedoch maßgeblich vom Wachstumsstadium der Pflanzen ab. Winterroggen (*Secale cereale* L.) stirbt beispielsweise nur zuverlässig ab, wenn er mindestens das Blühstadium erreicht hat (Mirsky et al., 2009). Wird der optimale Zeitpunkt eingehalten, kann das Walzen mittels Roller Crimper einen ähnlich hohen Wirkungsgrad wie die chemische Regulierung mit einem Voraufbauherbizid erzielen (Davis, 2010).

Um Unkräuter und Ungräser auch nach der Saat zuverlässig zu unterdrücken, ist eine hohe Zwischenfruchtbiomasse erforderlich. Mirsky et al. (2011) untersuchten unter anderem die Auswirkung des Saattermins einer Winterroggenzwischenfrucht auf die Biomassebildung. Dabei führte die frühe Aussaat Anfang September zu deutlich höherer Biomassebildung gegenüber der Aussaat Mitte Oktober. Ein spätes Abtöten der Zwischenfrucht, welches aufgrund des notwendigen Entwicklungszustandes ohnehin erforderlich ist, führte ebenfalls zu einer signifikant höheren Zwischenfruchtbiomasse. Als Schwellwert für die erfolgreiche Unterdrückung von Unkräutern und Ungräsern wird für Winterroggen 8000 kg Trockenmasse pro Hektar angegeben (Mirsky et al., 2013).

In Direktsaatsystemen spielt die Fruchtfolge – ähnlich wie in der ökologischen Landwirtschaft – eine zentrale Rolle, insbesondere für die Un-

krautregulierung. Anderson (2015) beschreiben, wie ausgeweitete, komplexe Fruchtfolgen die Unkrautkeimung verzögern und reduzieren sowie Ertragsverluste durch Konkurrenz der Ackerbegleitflora im Vergleich zu einfachen, wenig diversen Fruchtfolgen verringern können.

Zwischenfazit Die Regulierung der Segetalflora ist essenziell, um Ertrag und Qualität der Kulturpflanzen zu sichern und den landwirtschaftlichen Anbau wirtschaftlich zu gestalten. Neben den ökonomischen Aspekten rücken zunehmend ökologische Überlegungen in den Fokus, die im Rahmen der Prinzipien des IPS gleichermaßen berücksichtigt werden. Die chemische Unkrautbekämpfung stößt durch zunehmende Herbizidresistenzen, potenzielle Risiken für Anwender und Umwelt, eine schrumpfende Auswahl zugelassener Wirkstoffe sowie unzureichende Wirkungsgrade an ihre Grenzen. Mechanische Alternativen bieten zwar Potenzial, zeigen jedoch oft geringere Wirkungsgrade und verursachen höhere Pflanzenschäden und -verluste. Ergänzende agronomische Maßnahmen, wie die Stoppel- und Bodenbearbeitung zwischen Hauptkulturen oder vor Zwischenfrüchten, bieten daher sinnvolle Ansätze zur Unkrautregulierung.

2.3 Wirkung verschiedener Bodenbearbeitungssysteme

Die konventionelle Bodenbearbeitung mit dem Pflug, die Mulchsaat oder pfluglosen Bestellverfahren sowie die Direktsaat (No-Tillage) haben jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf agronomische und ökologische Parameter. Nachdem bereits die Effekte der verschiedenen Bodenbearbeitungsmethoden auf phytopathogene Erreger und die Segetalflora detailliert betrachtet wurden, widmet sich dieses Kapitel dem Vergleich und der Einordnung der Verfahren unter Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen.

2.3.1 Ertrag, Ertragsbildung und Wachstumsverlauf

Unter ökologischen Anbaubedingungen zeigt sich, dass die Wahl der Bodenbearbeitung je nach Kulturpflanze und Standortbedingungen unterschiedlich starke Auswirkungen auf den Ertrag hat. Ein Dauerfeldversuch mit differenzierter Grundbodenbearbeitung ergab beispielsweise keine signifikanten Ertragsunterschiede bei Luzernekleegras, Sommerackerbohnen, Kartoffeln und Sommererbsen. Sommerhafer hingegen erzielte bei pflugloser Bodenbearbeitung mit Flügelschargrubber und Rotoregge signifikant geringere Erträge. Ähnlich zeigte Winterweizen in einem von zwei Fällen Mindererträge, die auf erhöhten Beikrautdruck und eine reduzierte Nähr-

stofffreisetzung zurückgeführt wurden (F. Schulz et al., 2009).

Ein weiterer zweijähriger Versuch zeigte bei Sommererbse und Sommerhafer keine signifikanten Unterschiede zwischen Pflug, Stoppelhobel und Schälflug (Gronle & Böhm, 2011). Im Gegensatz dazu wurden bei Sommererbsen und Winterweizen signifikant höhere Erträge bei Pflugeinsatz im Vergleich zur Direktsaat festgestellt, was vor allem auf die unzureichende Unkrautregulierung in den Direktsaatvarianten zurückzuführen war (Stieber & Schmidtke, 2011).

Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse, dass Ertragsunterschiede unter ökologischen Anbaubedingungen bei variierenden Bodenbearbeitungsverfahren insbesondere durch Veränderungen im Beikrautdruck und in der Nährstoffmineralisation bedingt sind, wobei die Auswirkungen stark von der jeweiligen Kultur abhängen.

Pittelkow et al. (2015) führten eine umfassende Metaanalyse zu den Erträgen unter No-Tillage durch. Dabei stellten sie fest, dass bei Getreide durchschnittliche Ertragsreduktionen von 2,6 % bei Weizen und 7,6 % bei Körnermais auftreten, während Ölfrüchte, Baumwolle und Leguminosen unter Direktsaat keine Ertragsverluste zeigten. Besonders positiv wirkte sich die Direktsaat auf trockenen Standorten ohne Bewässerung aus, wo im Rahmen der Metaanalyse Ertragsvorteile nachgewiesen wurden. Ähnliche Ergebnisse berichteten Gristina et al. (2018), die mit einem erweiterten Datensatz die Auswirkungen von No-Tillage auf den Hartweizenertrag untersuchten. Daraus wird deutlich, dass Ertragsunterschiede zwischen Bodenbearbeitungsverfahren stark von der angebauten Kultur sowie den spezifischen Standort- und Klimabedingungen abhängen.

Die erfolgreiche Umstellung auf No-Tillage erfordert jedoch zusätzliche Maßnahmen, die über die Bodenbearbeitung hinausgehen. So tragen die Anpassung der Fruchtfolge (Ernst et al., 2020) und das Belassen von Ernterückständen auf der Bodenoberfläche dazu bei, die Erträge von Direktsaat an die konventioneller Verfahren anzugleichen (dos Santos Soares et al., 2019; Karlen et al., 1994; Maskina et al., 1993). Diese Beobachtungen unterstreichen die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Systemansatzes, wie er im Rahmen von Conservation Agriculture verfolgt wird. Auch die Wahl der Sätechnik spielt eine entscheidende Rolle: Beispielsweise erzielten Zinkensädhare bei Sommerraps eine signifikant höhere Bestandsdichte und höhere Erträge im Vergleich zu Scheibenschardrillmaschinen (Lundin,

2019).

Die Stabilisierung der Erträge nach der Einführung von No-Tillage erfordert eine Umstellungszeit, die laut Pittelkow et al. (2015) je nach Kultur zwischen drei und zehn Jahren liegt. In dieser Übergangsphase sind verschiedene agronomische Maßnahmen von zentraler Bedeutung. So kann die Integration von Zwischenfrüchten die Anreicherung organischer Substanz fördern und den Stickstoffgehalt im Oberboden erhöhen, was langfristig das Wachstum der Kulturpflanzen verbessert (Boselli et al., 2020).

Strip-Tillage als Bindeglied zwischen konventioneller Bodenbearbeitung und No-Tillage versucht die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren. Die um 1,2 bis 1,4 Grad Celsius höheren Bodentemperaturen im Bereich des Lockerungsstreifens erklären laut Al-Kaisi und Licht (2005) bessere Feldaufgänge und eine schnellere Pflanzenentwicklung bei Strip-Till im Vergleich zu No-Tillage. Unterschiede spiegeln sich nicht zwangsläufig im Ertrag oder weiteren Wachstumsparametern wieder: Körnermais reagierte in zweijährigen Versuchen von Al-Kaisi und Licht (2004) nicht mit signifikanten Unterschieden im Ertrag und der Stickstoffaufnahme. Gegensätzliche Ergebnisse publizierten Potratz et al. (2020), die sowohl bei Körnermais als auch bei Soja 5,7 bzw. 6,5 % höhere Erträge durch Strip-Tillage gegenüber No-Tillage erhoben haben und dies unter anderem auf die 15 cm tiefe, platzierte Phosphor- und Kaliumdüngung zurückführen. Ähnliche Ergebnisse und Schlussfolgerungen veröffentlichten auch Farmaha et al. (2011) und Fernández und White (2012).

Auch bei Winterraps sind gegensätzliche Ergebnisse veröffentlicht worden: Sokólski et al. (2018) erfassten Mehrerträge zwischen 2,5 und 4,7 % bei Strip-Tillage gegenüber wendender Bodenbearbeitung. Weitere Studien konnten keine signifikanten Ertragsunterschiede feststellen, betonen aber den Einfluss von Düngung und Wachstumsregulierung auf den Ertrag (Jankowski et al., 2023). Mögliche Ertragsvorteile von Strip-Tillage erklären Szatkowski et al. (2023) durch eine bessere Vorwinterentwicklung insbesondere der Pfahlwurzel.

Bei Strip-Tillage von Zuckerrüben beobachteten Schulze Lammers und Schmittmann (2014) einen langsameren Auflauf sowie geringere Bestandsdichten. Gleichzeitig zeigten die Zuckerrüben größere Einzelrübenmassen und zum Teil signifikant längere Wurzeln. Dennoch lagen Rüben- und Zuckerertrag bei Strip-Tillage zwischen 3,3 und 7,1 % unter den Werten,

die durch konventionelle, wendende Bodenbearbeitung erzielt wurden.

Tendenziell höhere Zucker- und Rübenenerträge konnten hingegen Röseler et al. (2010) beobachten, wobei auch hier die Etablierung der Bestände gegenüber der Mulchsaat verzögert war. Zudem war der Anteil an beinigen Rüben bei Strip-Tillage höher als bei der Mulchsaat. Górski et al. (2022) berichteten von signifikant höheren Zucker- und Rübenenerträgen bei Strip-Tillage im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung.

Ähnlich wie bei Körnermais und Winterraps kann somit auch bei Zuckerrüben keine einheitliche Aussage darüber getroffen werden, ob und wie stark Strip-Tillage Erträge und Qualitätsparameter beeinflusst.

Bodenbearbeitungssysteme haben vielfältige Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung und den Ertrag, die stark von der Kulturpflanze und den spezifischen Rahmenbedingungen abhängen. Eine reduzierte Bearbeitungsintensität kann zwar zu Ertragsverlusten führen, diese lassen sich jedoch durch gezielte Anpassungen im Management teilweise kompensieren (Baker et al., 2007; Dang et al., 2020). Auffällig ist, dass in den untersuchten Studien das Management häufig nicht ausreichend auf die jeweiligen Bodenbearbeitungssysteme abgestimmt wurde, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erschwert (siehe Unterunterabschnitt 6.2.2).

Um die Ursachen von Ertragsunterschieden besser zu verstehen und die Bedeutung einzelner Managementmaßnahmen zu bewerten, ist es notwendig, weitere Einflussfaktoren systematisch zu analysieren.

2.3.2 Ernterückstände, Bodenbedeckung und Bodenwasserhaushalt

Die Bodenbearbeitung beeinflusst den Bodenwasserhaushalt in Abhängigkeit von Tiefe und Intensität der Bearbeitung. Eine flächige Bodenbearbeitung in einer Tiefe von 7 bis 10 cm führte im Zeitraum von April bis Oktober zwischen 0 und 30 cm Bodentiefe zu einer erhöhten Evaporation im Vergleich zu unbearbeitetem Boden (Schwartz et al., 2010). Langfristige Untersuchungen von Zhai et al. (1990) zeigten, dass der Bodenwassergehalt in No-Tillage-Parzellen zwischen 0 und 20 cm höher war als in Parzellen mit wendender Herbstfurche.

In Brasilien wurde in Feldversuchen festgestellt, dass Parzellen ohne Mulchauflage eine geringere Wasserinfiltration aufwiesen als solche mit Mulchauflage (de Almeida et al., 2018). Besonders nach der Aussaat von Sojabohnen zeig-

te sich, dass No-Tillage gegenüber intensiver Bodenbearbeitung zu einer höheren Wasserinfiltration führte. Unter subtropischen Klimabedingungen hatte die Bodenbedeckung durch Mulchauflage oder Vegetation einen größeren Einfluss auf die Wasserinfiltration als die Bodenbearbeitung selbst.

Auch unter semi-ariden Bedingungen erwiesen sich No-Tillage und das Belassen von Ernterückständen auf der Fläche als wirksam, um den Bodenwassergehalt zu erhöhen. In Kombination führten diese Maßnahmen zu höheren Erträgen und einer verbesserten Wassernutzungseffizienz (C. L. Du et al., 2023). Generell lässt sich zusammenfassen, dass Bodenbearbeitung den Bodenwasserhaushalt durch die Reduktion der Mulchauflage beeinflusst, was zu einer gesteigerten Evaporation und einer verringerten Wasserinfiltrationsrate führen kann.

Mit Blick auf die Bodentemperaturen führen stehende Stoppeln und Bodenbedeckung mit Ernterückständen im Vergleich zu offenem Boden zu einer Reduktion der Bodentemperaturen an heißen Tagen sowie weiterhin zu höheren Bodentemperaturen bei sehr kalten Tagen und bei Frost (Aase & Siddoway, 1980).

2.3.3 Bodenphysikalische Parameter

Die Grundbodenbearbeitung mit Mulchsaatgrubber führte im Vergleich zu Wende- und Zweischichtenpflug in Untersuchungen zu einer signifikant höheren Stabilität der Bodenaggregate (Vakali et al., 2001). Eine reduzierte Bearbeitungsintensität und der Wechsel zu konservierender Bodenbearbeitung fördern die Aggregatstabilität und begünstigen die Anreicherung von organisch gebundenem Kohlenstoff an Makroaggregaten. Dies wird insbesondere durch das Belassen der Ernterückstände auf dem Feld unterstützt (Xin et al., 2015).

Die Kombination von No-Tillage mit dem Verbleib der Ernterückstände steigert nicht nur die Anzahl wasserbeständiger Mikro- und Makroaggregate im Oberboden, sondern wirkt sich auch positiv auf den Unterboden aus (Song et al., 2019). Strip-Tillage führte im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung zu einer um 12,7 % höheren Aggregatstabilität (Jaskulska et al., 2020).

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass konservierende Bodenbearbeitungssysteme, insbesondere in Kombination mit dem Belassen von Ernterückständen, einen Beitrag zur Verbesserung der Bodenstruktur und Boden-

qualität leisten können.

2.3.4 Bodenbiologie

Die Bodenbearbeitung beeinflusst in Abhängigkeit von Tiefe, Intensität und Zeitpunkt sowohl biochemische als auch biophysikalische Bodeneigenschaften (Roger-Estrade et al., 2010). Neben indirekten Auswirkungen durch die Veränderung des Bodens als Habitat (Im Young & Ritz, 2000) hat sie auch direkte mechanische Effekte, die teilweise letale Folgen für Bodenorganismen haben können. Roger-Estrade et al. (2010) differenzieren hierbei zwischen dem direkten Kontakt mit Bodenbearbeitungswerkzeugen oder Bodenpartikeln und der veränderten Position der Organismen, die sie beispielsweise für Prädatoren zugänglicher macht. Gleichzeitig beeinflusst die Bodenbearbeitung die Zusammensetzung des Edaphons, indem sie Populationsgrößen und Diversität innerhalb des Habitats verändert (Altieri, 1999). Dabei variiert die Wirkung auf einzelne Organismen und Arten in Abhängigkeit von der Art und Intensität der Bearbeitung (Kladivko, 2001).

Bewirtschaftungsmaßnahmen wie der Anbau von Zwischenfrüchten (Crotty & Stoate, 2019) oder die Gestaltung der Fruchtfolge (Beillouin et al., 2021; Li et al., 2021; Venter et al., 2016) können die Biodiversität positiv beeinflussen. Auch strukturelle Gegebenheiten, beispielsweise die Größe der bewirtschafteten Flächen (Clough et al., 2020; Fahrig et al., 2015) oder die Zusammensetzung der umgebenden Landschaft (Bianchi et al., 2006; Dauber et al., 2003), tragen wesentlich zur Vielfalt der Lebensgemeinschaften bei.

Darüber hinaus unterscheidet sich die Biozönose bewirtschafteter Flächen deutlich von der in angrenzenden Randstrukturen, Stilllegungen oder Grünland. Diese Unterschiede unterstreichen die Bedeutung einer diversifizierten Landschaftsgestaltung für die Förderung der Biodiversität in Agrarlandschaften (Frøslev et al., 2022).

Regenwürmer (*Lumbricidae*) und insbesondere der Tauwurm (*Lumbricus terrestris*) werden gerne als Modell- und Zeigerorganismen herangezogen.

Unterschiede in der Artenzahl und Abundanz von endogäischen und anöischen Regenwürmern konnten in einem 1998 etablierten Dauerversuch auf einer heterogenen Fläche mit Schwarzerde und Pararendzina 2012 nicht eindeutig auf die Bodenbearbeitungsverfahren oder Bodeneigenschaften zurückgeführt werden (Appel et al., 2013).

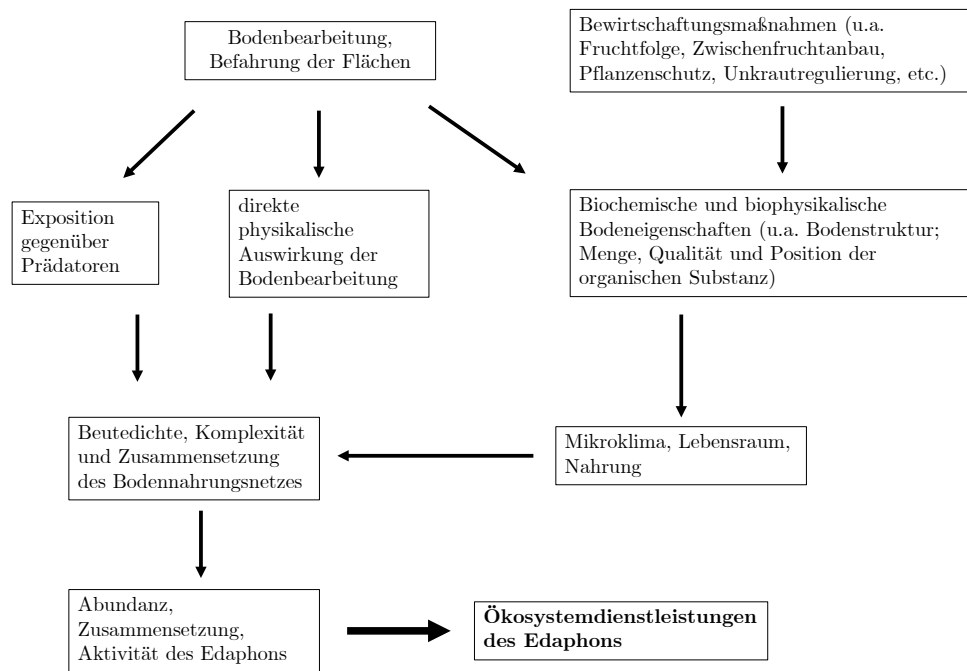


Abbildung 2.8: Wirkung der Bodenbearbeitung auf das Edaphon (verändert nach Roger-Estrade et al. (2010))

Im Gegensatz dazu wiesen Jaskulska et al. (2020) nach, dass Strip-Tillage im Vergleich zur konventionellen wendenden Bodenbearbeitung die Regenwurmbiomasse um das Fünffache erhöhen kann. Langjährige No-Tillage-Bewirtschaftung führte im Vergleich zu langjährig gepflügten Flächen zu signifikant höherer Regenwurmbiomasse, insbesondere bei tiefgrabenden anözischen Arten wie dem Tauwurm (*Lumbricus terrestris*), der wesentlich zur Bodenstruktur und Wasserinfiltration beiträgt. Zudem regenerierte sich die Regenwurmpopulation nach dem Kartoffelanbau auf No-Tillage-Parzellen schneller als auf regelmäßig gepflügten Flächen (Maurer-Troxler et al., 2005).

Die Biomasse, Artenzahl sowie Abundanz adulter und juveniler Regenwürmer war innerhalb eines fünfjährigen Untersuchungszeitraums in den pfluglos bewirtschafteten Parzellen tendenziell und in einigen Fällen signifikant größer als in Parzellen, die mit Pflug oder Zweischichtenpflug bearbeitet worden sind (Emmerling, 2002).

Ein dreijähriger Vergleich von Direkt- und Mulchsaatparzellen zeigte, dass die Regenwurmabundanz in Direktsaatparzellen in den ersten beiden Versuchsjahren tendenziell höher war und im dritten Jahr signifikant zunahm. Johnson-Maynard et al. (2007) argumentieren, dass die räumliche Variabi-

lität und hohe Streuung in den ersten Jahren dazu führte, dass keine statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten. Die deutliche Zunahme der Regenwurmabundanz im dritten Jahr zeigt jedoch, dass eine Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität oder die Umstellung auf Direktsaat bereits kurzfristig positive Effekte auf die Regenwurmpopulation haben kann.

Eine Metaanalyse von Moos et al. (2017) untersuchte die Effekte verschiedener Bodenbearbeitungssysteme im ökologischen Landbau. Nichtwendende reduzierte Bodenbearbeitung führte zu einer Zunahme der Regenwurmabundanz um 90 % und der Biomasse um 67 %. Ähnliche Ergebnisse stellten Peigné et al. (2009) im mehrjährigen Vergleich von 30 cm tiefer wendender Bodenbearbeitung, 20 cm tiefer wendender Bodenbearbeitung, reduzierter nicht-wendender Bodenbearbeitung mit 12 bis 15 cm Bearbeitungstiefe und Direktsaat fest. Die Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität führte dabei nicht nur zu einem Anstieg der Regenwurmabundanz und -biomasse, sondern auch zu einer veränderten Zusammensetzung der Regenwurmpopulationen. So konnten in den Direktsaatparzellen kurzfristig mehr anözische Regenwurmart gefunden werden. Die alleinige Reduktion der Bearbeitungstiefe bei wendender Bodenbearbeitung führte hingegen nicht zu einer Zunahme der Regenwurmbiomasse und -abundanz (Metzke et al., 2007).

Auf gepflügten Parzellen konnten lediglich vier Regenwurmart identifiziert werden, während auf Parzellen mit nicht-wendender Bodenbearbeitung sechs bis sieben Arten nachgewiesen wurden. Auch hier lag die Regenwurmabundanz in den pfluglos bewirtschafteten Parzellen signifikant höher als in den wendend bearbeiteten Parzellen (Emmerling, 2001).

Zusammenfassend führt die Umstellung auf pfluglose und konservierende Verfahren zu einer Zunahme der Biomasse, Abundanz und Artenvielfalt von Regenwürmern. Weiterhin beeinflusst Bodenbearbeitung auch die Bodenmikrobiologie.

Die Differenzierung der Grundbodenbearbeitung mit Pflug, Zweischichtenpflug und Schichtengrubber führte in einem fünfjährigen Feldversuch unter ökologischen Produktionsbedingungen zu einer durchschnittlich 7 bis 12 % höheren mikrobiellen Biomasse und einer 6 bis 8 % höheren mikrobiellen Aktivität in den pfluglos bzw. mit Zweischichtenpflug bewirtschafteten Parzellen (Emmerling, 2002). Auch ein Langzeitversuch unter

ökologischen Produktionsbedingungen konnte hinsichtlich der mikrobiellen Biomasse und mikrobiellen Aktivität eine Zunahme auf den Parzellen mit Minimalbodenbearbeitung gegenüber wendender Bodenbearbeitung feststellen (Schmidt et al., 2020).

Gegenüber wendender Bodenbearbeitung bewirkte No-Tillage im Bereich von 0 bis 5 cm Bodentiefe eine Zunahme der mikrobiellen Biomasse und der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte im Boden. Die Autoren schlussfolgern daher, dass konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat durch positive Veränderungen der bodenchemischen Eigenschaften auch positive Effekte auf die Mikrobiologie hat (Mathew et al., 2012). Auch in dreijährigen Feldversuchen von Gajda und Przewloka (2012) bewirkte reduzierte Bodenbearbeitung und Direktsaat in allen drei Versuchsjahren eine höhere Menge an mikrobiell gebundenem Kohlenstoff und Stickstoff.

Nunes et al. (2020) definierten für eine Metaanalyse sieben Indikatoren für Bodengesundheit und den biologischen Zustand des Bodens. Darunter befinden sich der Gehalt an organischer Bodensubstanz, die Höhe des mikrobiell gebundenen Kohlenstoffs und Stickstoffs und die Bodenatmung. Der Wechsel von wendender Bodenbearbeitung zu Direktsaat führte in Feldversuchen im Oberboden zu einer Verbesserung aller sieben Indikatoren, während eine Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität lediglich den Gehalt organischer Bodensubstanz, die Bodenatmung und die Höhe des mikrobiell gebundenen Kohlenstoffes positiv beeinflusste. Verstärkt wurden die Effekte in Anbausystemen mit Zwischenfruchtanbau und dem Belassen der Ernterückstände auf der Fläche (Nunes et al., 2020).

Grundsätzlich zeigt sich zunächst, dass auch die Bodenmikrobiologie von einer Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität profitiert. Die Effektstärke ist jedoch auch abhängig von modifizierenden Einflussgrößen wie dem Zwischenfruchtanbau und dem Verbleib der Ernterückstände an der Bodenoberfläche, weshalb positive Effekte einer reduzierten Bodenbearbeitung oder Direktsaat nicht ausschließlich auf diese zurückgeführt werden können.

Etwa 80 % der Landpflanzen (Begerow, 2021) und daher auch zahlreiche Acker- und Grünlandpflanzen gehen Symbiosen mit Mykorrhizapilzen ein (Oehl et al., 2011). In Ökosystemen haben arbuskuläre Mykorrhiza (AM) (*Glomeromycota* (Begerow, 2021)) zahlreiche Funktionen, insbesondere in Bezug auf die Nährstoff- und Wasserversorgung von Pflanzen. Im Vergleich

zu Pflanzenwurzeln haben Pilzhypen eine deutlich größere Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen. Aufgrund ihrer feineren Struktur können die Pilzhypen Nährstoffe und Wasser deutlich effizienter aufnehmen. Im Boden gebundene Substanzen werden u.a. durch Abgabe von Säuren gelöst und somit für die Pflanze verfügbar gemacht. Im Tausch gegen Assimilate bekommt die Pflanze über die Mykorrhiza die durch den Pilz gelösten Nährstoffe (Piepenbring, 2022). Hier spielt vor allem die Versorgung mit Phosphor eine wichtige Rolle (Bucher, 2007; Marschner & Dell, 1994; Smith et al., 2011).

Auch der Befall der Wurzeln mit Pathogenen und Schädlingen kann durch die Symbiose der Pflanzenwurzel mit Mykorrhizapilzen reduziert werden (Sikes et al., 2009), wobei die Effekte abhängig von verschiedenen Bedingungen wie der Wirtspflanze (Borowicz, 2001) oder der Art des Mykorrhizapilzes sind (Sikes, 2010). Auch bodenbiologische, bodenchemische und bodenphysikalische Eigenschaften werden durch AM positiv beeinflusst. Das von AM produzierte Glomalin dient als Klebstoff zwischen Bodenpartikeln. Durch Lebendverbauung tragen Mykorrhizapilze somit positiv zur Bodenstruktur und -stabilität. Oehl et al. (2011) charakterisiert Mykorrhizapilze aufgrund ihrer mit ca. 230 Arten überschaubaren Artenzahl und ihrer vom Ökosystem, Standort und dem Symbiosepartner abhängigen Leistung als potentielle Bioindikatoren. Die Auswirkungen von differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenbiologie lassen sich daher beispielhaft anhand der AM aufzeigen.

Bodenbearbeitung wirkt sich negativ auf arbuskuläre Mykorrhiza aus (Da Jasper et al., 1991). Sie beeinflusst zudem die Bodenstruktur und Lagerungsdichte, wodurch das Erosionspotenzial variiert. Infolgedessen hängt die Kolonisierung der Wurzeln mit verschiedenen AM indirekt von diesen Bodeneigenschaften ab (Singh, 2003).

Garcia et al. (2007) untersuchten die Kolonisierung der Wurzeln mit AM in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung. Der Einsatz des Pfluges reduzierte die Kolonisierung der Wurzeln mit AM um 58 bis 87 % gegenüber No-Tillage, wobei der Effekt auch 22 Monate nach der Bodenbearbeitung noch anhielt und sich die AM-Population in diesem Zeitraum nicht erholt hat. Auf der Dauerversuchsfläche Oberacker in Zollikofen in der Schweiz wird seit 1994 Direktsaat auf 6 Streifenparzellen mit dem Pflug verglichen (Sturny et al., 2007). Auf den No-Tillage Parzellen konnte eine höhere Artenzahl bei AM sowie ein höherer Diversitätsindex nach Shannon-Weaver

festgestellt werden. Die Autoren schlussfolgern zudem, dass die Interaktion zwischen Pilz und Pflanze bei No-Tillage stabiler ist (Maurer et al., 2014).

Weiterhin beeinflusst Bodenbearbeitung die Zusammensetzung der AM-Gesellschaften im Boden aufgrund von mechanischer Beschädigung der Hyphen, die Veränderung der Nährstoffzusammensetzung und -verteilung im Boden, die Veränderungen der mikrobiellen Aktivität und die Veränderungen der Ackerbegleitflora (Jansa et al., 2002, 2003). Neben der Bodenbearbeitung modifizieren weitere Einflussfaktoren wie die Düngung, die Bodentiefe und vor allem der Symbiosepartner die Zusammensetzung und Diversität der AM im Boden (Oehl et al., 2004, 2005), wobei zwischen spezialisierten Arten, die nur unter bestimmten Bedingungen Verbreitung finden und unabhängig von den Bedingungen vorkommenden Generalisten unterschieden werden kann (Oehl et al., 2010).

Zusammenfassend können am Beispiel der AM nochmals die positiven Auswirkungen reduzierter Bodenbearbeitung und Direktsaat auf die Aktivität, Abundanz, Artenzahl und Biomasse der Bodenbiologie aufgezeigt werden.

2.3.5 Bodenchemie, Nährstoffhaushalt und Nährstoffdynamik

Die Intensität und Art der Bodenbearbeitung sowie der Einsatz unterschiedlicher Bodenbearbeitungswerkzeuge beeinflussen die Durchmischung des Oberbodens. Besonders der Vergleich zwischen wendender Bodenbearbeitung und No-Tillage zeigt deutliche Unterschiede in der Verteilung der Nährstoffkonzentrationen über die Bodentiefe (Mestelan, 2008).

Ein fünfjähriger Feldversuch unter ökologischen Produktionsbedingungen konnte keine signifikanten Unterschiede in den pflanzenverfügbaren Nährstoffgehalten zwischen Pflug, Zweischichtenpflug und Schichtengrubber nachweisen. Allerdings führte der Schichtengrubber zu einer erhöhten Phosphorkonzentration im Oberboden, während die Phosphorgehalte im Unterboden abnahmen. Unterschiede im pH-Wert zwischen den verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren wurden nicht festgestellt (Emmerling, 2002).

Untersuchungen auf einem semi-ariden Standort in Australien zeigten signifikante Unterschiede zwischen konventioneller wendender Bodenbearbeitung, reduzierter Bodenbearbeitung und No-Tillage. Im Bereich von 0 bis 10 cm Bodentiefe wiesen die No-Tillage-Parzellen höhere Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff auf. In der Tiefe von 20 bis 30 cm wurden hingegen keine signifikanten Unterschiede festge-

stellt. Auch der pH-Wert blieb unabhängig von der Bodenbearbeitungsmethode unverändert. Jedoch lag die Kationenaustauschkapazität (KAK) der No-Tillage-Parzellen im Oberboden (0–10 cm) unter der KAK der konventionell oder reduziert bearbeiteten Parzellen (G. A. Thomas et al., 2007).

Die Art und Intensität der Bodenbearbeitung beeinflussen maßgeblich die Verteilung der Nährstoffkonzentrationen im Oberboden. Flache Bodenbearbeitung und Direktsaat fördern eine Anreicherung von Nährstoffen in den obersten 10 cm des Bodens. Im Gegensatz dazu bewirken tief mischende und wendende Verfahren eine gleichmäßigere Verteilung der Nährstoffe, was häufig zu einer Verdünnung innerhalb des Bearbeitungshorizonts führt.

2.3.6 Organische Bodensubstanz

Ein differenziertes Bild zeigt sich auch bei der Betrachtung der Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die organische Bodensubstanz: Flächen, die mit Zweischichtenpflug und Schichtengrubber bearbeitet wurden, wiesen im Vergleich zum klassischen Pflug innerhalb eines fünfjährigen Untersuchungszeitraums durchschnittlich 7 bis 10 % höhere Humusgehalte im Oberboden auf (Emmerling, 2002). Wendende Bodenbearbeitung führt zu einer Zunahme des Gesamtporenvolumens und einer deutlichen Erhöhung des Grobporenanteils, was die Mineralisation beschleunigt. Dadurch werden Stoffumsetzungsprozesse intensiviert, was sowohl eine verstärkte Nährstofffreisetzung als auch einen erhöhten Abbau organischer Substanz zur Folge hat (Estler & Knittel, 1996; Lütke Entrup & Oehmichen, 2000).

Die Erhaltung und Akkumulation organischer Substanz im Boden hängt nicht nur von der Menge eingetragener organischer Substanz ab, sondern auch von deren Stabilität im Boden. Direktsaat reduziert durch die geringere Mineralisationsrate (Autret et al., 2020) den Abbau organischer Substanz und trägt zusätzlich zu deren Stabilisierung bei. Im Vergleich zu bearbeiteten Böden ist der Priming-Effekt bei Direktsaat geringer, sodass neue Kohlenstoffeinträge den Abbau vorhandener organischer Substanz aufgrund des Priming-Effektes weniger beeinflussen (Z.-R. Kan et al., 2020).

M. Müller et al. (2007) fanden ebenfalls keine Unterschiede im Gesamthumusgehalt zwischen Pflug und Direktsaat, stellten jedoch Unterschiede in der vertikalen Verteilung der organischen Substanz fest: Bei Direktsaat kam es zu einer Anreicherung im Bereich von 5 bis 10 cm Tiefe.

Insgesamt fördert eine reduzierte Bodenbearbeitung, insbesondere der Verzicht auf Bodenbearbeitung, die Akkumulation und Stabilität organischer Substanz im Boden (Z.-R. Kan et al., 2022; Powlson et al., 2012). Diese Akkumulation erfolgt primär in den oberen 20 cm des Bodens (Z. Du et al., 2017; Song et al., 2019). Allerdings unterscheidet sich die Menge organisch gebundenen Kohlenstoffs im gesamten Bodenprofil nicht zwangsläufig zwischen No-Tillage und konventioneller Bodenbearbeitung, da neben der Bodenbearbeitung weitere Faktoren den Gehalt organischer Substanz beeinflussen (Blanco-Canqui & Lal, 2008; Lal, 2018; Oldfield et al., 2019).

2.3.7 Ökonomie

Die höchste Energieeffizienz wurde in dreijährigen Feldversuchen zum Winterrapsanbau bei Strip-Tillage im Vergleich zu Mulchsaat und konventioneller Bodenbearbeitung ermittelt (Jankowski et al., 2023). Bei der Etablierung von Wintergerste und Mais konnten durch Strip-Tillage im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung 73 bis 79 % Kraftstoff eingespart und der Arbeitszeitbedarf um 81 bis 87 % reduziert werden (Jaskulska et al., 2020).

Simulationen von Sørensen und Nielsen (2005) zeigten, dass der Energieaufwand bei einem Wechsel von wendender auf nicht-wendende Bodenbearbeitung um 18 bis 53 % reduziert werden kann. No-Tillage senkte den Energieeinsatz für Bodenbearbeitung und Aussaat sogar um 75 bis 83 % im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung. Ähnliche Ergebnisse präsentierten Sarauskis et al. (2012), die zeigten, dass No-Tillage größere Einsparungen bei Arbeitszeit, Kraftstoffverbrauch und Gesamtkosten erzielte als Minimalbodenbearbeitung. Szalay et al. (2015) konnten durch Direktsaat den Kraftstoffverbrauch und den Arbeitszeitbedarf pro Hektar gegenüber wendender Bodenbearbeitung um 85 bzw. 81 % reduzieren, wobei die Nebenzeiten wie z.B. Wendemanöver sowie der Einfluss der Arbeitsbreite des Anbaugerätes und die Flächengröße nicht mit in den Datensatz eingeflossen sind.

Sijtsma et al. (1998) untersuchten die Kosten, die durch Bodenbearbeitung entstehen, und verglichen dabei nicht-wendende Bodenbearbeitung bzw. Minimalbodenbearbeitung mit wendender Bodenbearbeitung. Zu den betrachteten Kosten zählten sowohl variable Aufwendungen wie Kraftstoffverbrauch, Arbeitszeit, Lohnkosten und Wartung als auch Ausgaben für die Neuanschaffung von Bodenbearbeitungsgeräten, die beim Wechsel auf Mi-

nimalbodenbearbeitung erforderlich sind. In einem Szenario mit einem 360 ha großen Ackerbaubetrieb und zwei Fruchtfolgen konnten durch den Umstieg auf Minimalbodenbearbeitung, abhängig von der eingesetzten Technik und der Fruchtfolge, 10 bis 60 % der Verfahrenskosten für die Bodenbearbeitung eingespart werden. Die Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit, bei der erzielte Erträge und zusätzliche Aufwendungen wie Düngung und Pflanzenschutz einbezogen wurden, zeigte jedoch, dass Systeme mit partieller oder konsequenter Direktsaat trotz geringerer Maschinenkosten in einer Fruchtfolge mit Körnermais und Soja nicht die beste Wirtschaftlichkeit erreichten. In den Direktsaatvarianten führten zum Teil signifikant niedrigere Erträge sowie höhere Kosten für die Unkrautregulierung dazu, dass das Verfahren der Minimalbodenbearbeitung mit einer Scheibenegge ökonomisch überlegen war. Dabei wurden potenzielle Folgekosten, etwa durch Bodenerosion nach Sojaanbau, nicht berücksichtigt (McIsaac et al., 1990).

Ergänzend beschrieben Archer und Reicosky (2009), dass bei gleichem Ertragsniveau die Nettoerlöse bei Direkt- und Streifensaat höher ausfielen als bei konventioneller, wendender Bodenbearbeitung.

Zusammenfassend zeigen Strip-Tillage und Direktsaat gegenüber wendender und konventioneller Bodenbearbeitung eine deutlich höhere Energieeffizienz und Einsparungen bei Kraftstoffverbrauch, Arbeitszeit und Kosten, wobei die wirtschaftliche Überlegenheit stark von Fruchtfolge, Erträgen und Zusatzkosten wie Unkrautregulierung abhängt, während Direktsaat bei gleichem Ertrag höhere Nettoerlöse erzielen kann.

2.3.8 Ökologie

Die Treibhausgasemissionen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren werden primär durch Maschinen- und Dieserverbrauch bestimmt, wobei nichtwendende Verfahren aufgrund ihres geringeren Kraftstoffverbrauchs und reduzierten Maschinenbedarfs Vorteile zeigen können (Feike et al., 2020; Schwarz, 2013). Neben der Flächenbezogenheit ($\text{t CO}_2/\text{ha}$) ist die produktbezogene Emissionsbetrachtung ($\text{t CO}_2/\text{t}$ Erntegut) entscheidend, da diese vom Ertrag abhängt, der wiederum durch Faktoren wie Düngung, Pflanzenschutz und Witterung beeinflusst wird (Kaul et al., 2022). Stickstoffdüngung spielt dabei eine zentrale Rolle, da sie je nach Menge, Art und Anwendung erheblich zu den Emissionen beiträgt (Dämmgen, 2005). Erhöht eine veränderte Bodenbearbeitung den Bedarf an Düngemitteln und

Pflanzenschutz, kann dies die Emissionen steigern.

Zu den Auswirkungen von verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen und -verfahren auf die Emissionen von Lachgas (N_2O) gibt es widersprüchliche Aussagen, da die Höhe der Lachgasemissionen von zahlreichen weiteren Faktoren wie beispielsweise der Stickstoffdüngung (Menge, Art, Terminierung), der Pflanzenart bzw. dem Pflanzenbestand, den Bodeneigenschaften (u.a. Bodenart, pH-Wert, etc.) sowie dem Wetter abhängig ist (Shcherbak et al., 2014). Eine Umstellung auf No-Tillage kann zu veränderten Lachgasemissionen führen, wobei eine Emissionssteigerung insbesondere bei schlecht durchlüfteten Böden auftritt (Rochette, 2008).

Hinsichtlich des CO_2 -Fußabdruckes von Körnermais nimmt Bodenbearbeitung nur einen vergleichsweise geringen Anteil ein, während insbesondere die Düngung mit chemisch-synthetischen Stickstoffdüngern zu über 90 % zum gesamten CO_2 -Fußabdruck beiträgt. Während nicht-wendende, konservierende Bodenbearbeitung und konventionelle, wendende Bodenbearbeitung sich nicht unterschieden haben, führte die Anwendung von Direktsaat bzw. No-Tillage zu einer Reduktion des CO_2 -Fußabdrucks um 21 % (Holka & Bieńkowski, 2020).

Gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung mit dem Pflug führten Mulch- und Direktsaat in mehrjährigen Feldversuchen zu einer Reduktion des Bodenabtrages um 58 bzw. 77 % (Rosner & Klik, 2001). Insgesamt führt Direktsaat zu einer deutlichen Verringerung von Wind- und Wassererosion gegenüber bearbeiteten Böden (Bradford & Huang, 1994; Carretta et al., 2021; Merten et al., 2015; J. D. Williams et al., 2009), was unter anderem durch die Bodenbedeckung mit Ernte- und Pflanzenrückständen zurückgeführt werden kann. Diese reduzieren die Geschwindigkeit der Regentropfen, die dadurch mit weniger Energie auf den Boden eintreffen und keine Bodenpartikel wegspülen (Langdale et al., 1979). Die Erosionsgefahr von konventionell wendend bearbeiteten Ackerflächen stufen Knapen et al. (2007) am höchsten ein, gefolgt von Mulchsaat und Direktsaat. Auch Strip-Tillage führte in mehrjährigen Feldversuchen auf einer Ackerfläche mit 11 % Hangneigung sowohl bei Silomais, als auch bei Winterweizen und Winterraps zu einer signifikanten Reduktion des Runoffs von bis zu 85 % (Jaskulska et al., 2020).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Gesamtemissionen nicht nur von der Bodenbearbeitung, sondern auch von weiteren Einflussfaktoren

abhängen. Dennoch führen Mulch- und insbesondere Direktsaat aufgrund des geringeren Kraftstoffverbrauchs zu einer Senkung der Treibhausgasemissionen und einer Verringerung der Erosionsgefahr.

2.4 Zwischenfazit

Die Bodenbearbeitung spielt im integrierten Pflanzenschutz weiterhin eine zentrale Rolle bei der vorbeugenden Regulierung von Pflanzenkrankheiten, Unkräutern und Ungräsern. Allerdings verändert sich die Intensität der Bodenbearbeitung zunehmend aufgrund ökonomischer und ökologischer Herausforderungen. Der Anteil der mit dem Pflug bearbeiteten Flächen in Deutschland ist beispielsweise von 53 % im Wirtschaftsjahr 2015/2016 (Statistisches Bundesamt, 25.11.2024) auf 40 % im Wirtschaftsjahr 2022/2023 zurückgegangen (Statistisches Bundesamt, 29.05.2024). Reduzierte Bodenbearbeitungsverfahren und Direktsaat bieten zahlreiche ökologische Vorteile, insbesondere die Verringerung des Erosionsrisikos und die Verbesserung der Wasserinfiltration, was angesichts zunehmender Starkniederschläge immer relevanter wird. Um jedoch den Zielkonflikt zwischen einem maximalen Erosionsschutz und der weiteren Reduktion im Einsatz und Risiko von Pflanzenschutzmitteln zu lösen, ist es entscheidend, die Bodenbearbeitungsintensität zu überdenken und weiter zu optimieren. Dabei gilt es, alle Werkzeuge des pflanzenbaulichen Werkzeugkastens gezielt einzusetzen.

In den letzten Jahrzehnten hat die Forschung umfangreiches Wissen zur chemischen und mechanischen Regulierung der Segetalflora, zu verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren und -geräten sowie zu deren Umweltauswirkungen gesammelt. Sowohl die konventionelle, wendende Bodenbearbeitung als auch konservierende Verfahren ohne Pflugeinsatz und Direktsaatmethoden ohne Bodenbearbeitung sind gut untersucht. Dennoch bestehen Wissenslücken über die Auswirkungen von Bodenbearbeitung mit einer Tiefe von 0 bis 2 cm auf agronomische und ökologische Parameter sowie auf die Segetalflora, insbesondere auf Ausfallgetreide und Ausfallraps. Diese Art der Bearbeitung, im Folgenden als ultraflach bezeichnet, wird in Kapitel 4 definiert und in Kapitel 5 durch umfangreiche Feldversuche analysiert und hinsichtlich ihrer pflanzenbaulichen Eignung bewertet.

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Hintergründe für die Entwicklung des Rotationsschleifers vorgestellt und erläutert. Anschließend erfolgt die Vorstellung der Hypothesen für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Feldversuche.

3.1 Problemstellung: Stoppelbearbeitung nach Raps

Die Stoppelbearbeitung nach Winterraps gehört von Beginn an zu den Hauptanwendungsfeldern des Rotationsschleifers. Im Vergleich zu Getreide hinterlässt Winterraps aufgrund seiner schlechteren Stickstoffnutzungseffizienz größere Mengen an Reststickstoff im Boden (Malagoli et al., 2005; Shepherd & Sylvester-Bradley, 1996). Nach der Rapsernte liegt ein Ziel daher darin, die Nitratauswaschung zu minimieren und den Stickstoff aus den Ernterückständen in die Folgefrucht zu überführen (Sieling & Kage, 2010). Um die Auswaschung zu reduzieren, empfehlen Henke et al. (2008) einerseits den Anbau von Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*) als Zwischenfrucht zwischen Winterraps und Winterweizen sowie andererseits eine reduzierte Bodenbearbeitung nach der Ernte.

Ein weiteres zentrales Ziel ist die Bekämpfung von Ausfallraps. Da dieser in Keimwellen aufläuft, sind mehrere mechanische Maßnahmen erforderlich. Hier entsteht ein Zielkonflikt: Während die Reduktion der Nitratauswaschung eine möglichst geringe Bodenbearbeitungsintensität verlangt, erfordert die effektive Bekämpfung von Ausfallraps oft intensivere Eingriffe. Das hohe Samenpotential von Ausfallraps erschwert die Situation zusätzlich. So zählten Weber et al. (2009) nach der Rapsernte durchschnittlich 4.700 Ausfallrapssamen pro Quadratmeter, wobei Spitzenwerte von bis zu 9.500 Samen pro Quadratmeter erreicht wurden.

Unter bestimmten Umweltbedingungen kann Ausfallraps eine sekundäre Dormanz entwickeln, wodurch die Samen mehrere Jahre im Boden überdauern und in Folgefrüchten zu Durchwuchsproblemen führen. Dies betrifft besonders den Anbau von Winterraps, wo Ertrags- und Qualitätsverluste

te drohen. Da die Keimraten von Ausfallraps mit zunehmender Einarbeitungstiefe abnehmen, stellt die wendende Bodenbearbeitung eine potenzielle Maßnahme zur Bekämpfung dar. Pflügen verlagert im ersten Jahr etwa 90 % der Samen in tiefere Bodenschichten unterhalb von 10 cm. Allerdings werden im darauffolgenden Jahr durch erneutes Pflügen 50 bis 65 % dieser Samen wieder an die Bodenoberfläche gebracht (Gruber & Claupen, 2009). Je nach Sorte und Ausprägung der Keimruhe kann die Verwendung eines Pflugs somit langfristig die Samenbank im Boden vergrößern (Lutman et al., 2003). Ein gezielter Einsatz des Pflugs kann jedoch kurzfristig das Unkrautpotenzial verringern.

Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch bei anderen Samenunkräutern und Lichtkeimern wie dem Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) beobachten. Tritt Ackerfuchsschwanz in Hauptkulturen der Fruchtfolge auf, kann wendende Bodenbearbeitung den Besatz in der Folgefrucht vorübergehend reduzieren. Allerdings werden dabei zuvor eingebettete Samen wieder an die Oberfläche gebracht und zum Keimen angeregt. Langfristig stößt diese Methode daher an ihre Grenzen.

Alternativ kann eine mehrfache, flache Bodenbearbeitung die Samenreserven im Boden deutlich stärker reduzieren (Lutman et al., 2003). Sowohl der Einsatz des Pflugs als auch intensive flache Bodenbearbeitung mit Kurzscheibeneggen oder Grubbern haben jedoch Nachteile (siehe Abschnitt 2.3). Zudem wird der Einsatz von selektiven und nicht-selektiven Herbiziden zunehmend durch rechtliche Einschränkungen und die Entwicklung von Resistenzen begrenzt. Vor diesem Hintergrund sind alternative Ansätze dringend erforderlich.

3.2 Problemstellung: Stoppelbearbeitung nach Getreide

Nach der Ernte bringen Getreidestoppeln andere Bedingungen und Herausforderungen mit sich als es bei Winterrapsstoppeln der Fall ist. Im Vergleich zu letzteren sind Getreidestoppeln in der Regel kürzer, aber deutlich zäher und weniger mürbe. Zudem ist die Anzahl der Stoppeln pro Quadratmeter bei Getreide etwa 10- bis 15-mal höher als bei Winterraps, und die Menge der Ernterückstände ist ebenfalls größer. Das oberirdische Material stellt daher hohe Anforderungen an Bodenbearbeitungsgeräte zur Stoppelbearbeitung. Ein zusätzliches Problem entsteht durch das Umknicken der Stoppeln, verursacht durch das Überfahren mit Mähdreschern, Transport-

fahrzeugen oder dem Traktor, der das Bodenbearbeitungsgerät trägt bzw. zieht. Je nach verwendetem Bodenbearbeitungsgerät und den eingesetzten Werkzeugen können abgeknickte Stoppeln unter Umständen nicht vollständig erfasst werden, was die gleichmäßige Bearbeitung erschwert.

Heterogene Bestände, Lagerstellen und Fahrgassen wirken sich zudem auf den Materialdurchsatz des Mähdreschers und die Fahrgeschwindigkeit aus. Da das Material einige Sekunden im Mähdrescher verbleibt – vom Schneidwerk bis zum Häcksler oder Spreuverteiler – und der Mähdrescher während des Druschvorgangs kontinuierlich fährt, werden die Ernterückstände nicht genau dort abgelegt, wo sie aufgenommen wurden. Besonders heterogene Bestände oder Lagerstellen führen so zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Ernterückstände in Längsrichtung (siehe Abbildung 3.1). Dies wird besonders deutlich, wenn der Mähdrescher auf dem Vorgewende wendet: Am Übergang zwischen Fläche und Vorgewende bleibt durch die Verweilzeit des Materials in den Drusch- und Abscheideorganen häufig mehr Stroh auf und zwischen den Stoppeln zurück als auf der übrigen Fläche.

Bei Mähdreschern mit großen Schneidwerksbreiten zeigt sich zudem eine ungleichmäßige Querverteilung der Ernterückstände über die gesamte Arbeitsbreite, wobei erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Mähdreschermodellen auftreten können (H. Müller & Bischoff, 2001; Voßhenrich, 1999). Analog dazu leidet auch die Verteilung der unvermeidlichen Körnerverluste quer zur Fahrtrichtung, insbesondere bei Seitenwind oder großen Arbeitsbreiten. Nach der Getreideernte sind die Flächen daher oft durch eine heterogene Verteilung der Ernterückstände, insbesondere des Häckselstrohs, gekennzeichnet.

Wird das Stroh nicht gleichmäßig nachverteilt, können bei der ersten Stoppelbearbeitung Streifen entstehen, die sich hinsichtlich der Mulchauflage deutlich unterscheiden. Abbildung 3.2 zeigt das Vorgewende einer Winterweizenstoppel, die mit einer Kurzscheibenegge bearbeitet wurde. Die Unterschiede in der Menge der Ernterückstände an der Bodenoberfläche sind deutlich erkennbar. Zudem blieben einige Stoppeln aufgrund von Bodenunebenheiten unbearbeitet.

Die Variation in der Menge der Ernterückstände auf der Bodenoberfläche und im Bearbeitungshorizont sowie Schwankungen in der Arbeitstiefe führen dazu, dass kein gleichmäßiger Auflauf von Ausfallsamen, Unkräutern und Ungräsern zu erwarten ist.



Schlecht verteiltes Häckselstroh

Gut verteiltes Häckselstroh

Abbildung 3.1: Winterweizenstoppel nach der Ernte



Abbildung 3.2: Mit einer Kurzscheibenegge bearbeitete Winterweizenstoppel

Neben den oberirdischen Ernterückständen unterscheiden sich auch die Wurzelsysteme von Winterraps und Getreide deutlich in ihrer Morphologie. Das tiefreichende, allorhize Wurzelsystem des Winterraps steht dem homorhizen Wurzelsystem der Getreidearten gegenüber (P. B. Barraclough et al., 1989; P. Barraclough, 1989; Lichtenegger et al., 2018; White et al., 2015).

Kemper et al. (2020) verglichen unter anderem die Wurzellängendichte von Winterrübse (*Brassica rapa* L. var. *silvestris*) und Winterroggen (*Secale cereale* L.). In den Versuchen zeigte Winterroggen vor dem Winter bis etwa 30 cm Tiefe und nach dem Winter bis ca. 50 cm eine z.T. signifikant höhere Wurzellängendichte. Auch die Wurzelbiomasse ist bis in 20 cm Tiefe bei Getreide höher als bei Raps (Pietola & Alakukku, 2005), Gelbsenf (*Sinapis alba* L.), Felderbse (*Pisum sativum* L.) oder Linse (*Lens culinaris*) (Gan et al., 2009). Diese Unterschiede machen die Bedingungen nach Wintergetreide in Bezug auf die Technik zur Stoppelbearbeitung herausfordernder als nach Winterraps oder Körnerleguminosen.

Ein weiteres Problem tritt bei der Arbeit mit Kurzscheibeneggen, Großfederzinkeneggen oder Mulchsaatgrubbern auf, insbesondere wenn flach gearbeitet wird. Großfederzinkeneggen und Mulchsaatgrubber mit Gänsefußscharen neigen dazu, ganze Wurzelballen mitsamt den Stoppeln aus dem Boden zu ziehen. Diese Ballen sind aus mehreren Gründen problematisch für nachfolgende Arbeitsgänge und die Erreichung der Ziele der Stoppelbearbeitung (siehe auch Abbildung 3.3).

Zum einen wird der vollständige Bodenkontakt der Stoppeln nach der Bearbeitung nicht gewährleistet. Dies führt dazu, dass der Boden weniger bedeckt ist und somit anfälliger für Austrocknung oder Erosion durch Starkregen wird. Zum anderen können Bodenfeuchtigkeit und Mikroorganismen die Stoppeln schlechter erreichen, was den biologischen Ab- und Umbau der Ernterückstände hemmt. Wie in Abbildung 3.3 zu sehen, werden zudem bereits gekeimte und aufgelaufene Pflanzen unter Umständen nicht durch die mechanische Bearbeitung abgetötet, was die Unkrautbekämpfung erschwert. Weiterhin erschweren große Wurzelballen das Einmischen der Ernterückstände in den Boden (Martin Hänsel et al., 2014).

Im Boden verbliebene Unkraut- und Ungrassamen aus dem Vorjahr keimen oft zu einem späteren, ungünstigen Zeitpunkt. Dies geschieht beispielsweise dann, wenn bei der Saatbettbereitung die Wurzelballen aufgebrochen werden und der für Lichtkeimer notwendige Lichtimpuls die Keimung auslöst. Das hohe Volumen von Wurzelballen und Stoppeln am Stück kann je nach Art und Intensität der Bodenbearbeitung zudem Probleme für die Sätechnik verursachen, da der Materialfluss zwischen den Säscharen nicht immer gewährleistet ist.

Eine zielführende Strategie wäre, die Stoppeln bereits im ersten Arbeits-



Wurzelballen und Stoppel

Mechanisch nicht bekämpfter Ausfallweizen

Abbildung 3.3: Winterweizenstoppel nach einem Arbeitsgang mit einer Großfederzinken-
negge und Gänsefußcharen



Wintergerstestoppel nach zwei Bodenbear- Wintergerstestoppel nach einer ca. 5 cm tie-
 beitungsgängen mit dem Rotationsschleifer fen Bodenbearbeitung mit einer Großfeder-
 zinkenegge mit Gänsefußscharen

Abbildung 3.4: Unterschiedlich bearbeitete Wintergerstestoppel

gang nach der Ernte von den Wurzeln zu trennen. Dabei sollten die einzelnen Halme voneinander gelöst und separat auf der Bodenoberfläche abgelegt werden, während die Wurzeln im Boden verbleiben. Unterschiede zwischen einer 5 cm tiefen Bearbeitung mit Kurzscheibenegge oder Großfederzinkenegge und einer ultraflachen, maximal 2 cm tiefen Bodenbearbeitung mit einem Strohstriegel oder dem Rotationsschleifer werden in Abbildung 3.4 deutlich. Insbesondere die groben Kluten, die durch die Großfederzinkenegge erzeugt werden, können zu den genannten Problemen führen.

3.3 Hypothesen

Ausgehend von den Herausforderungen der Stoppelbearbeitung nach Getreide und Raps ergeben sich vielfältige Fragestellungen. Im Rahmen dieser Arbeit sind daher einige Hypothesen formuliert worden, um relevante Aspekte mit Blick auf ultraflache Bodenbearbeitung und den Rotationsschleifer zu untersuchen:

1. Im Vergleich zu bisherigen Techniken der flachen Bodenbearbeitung ermöglicht der Rotationsschleifer eine konstant ganzflächige Bearbeitung mit einer deutlich geringeren Arbeitstiefe von maximal 2 cm.
2. Durch die ultraflache Bearbeitung mit dem Rotationsschleifer kann der Besatz von Ausfallsamen und Ausfallpflanzen im Vergleich zu bisherigen Stoppelbearbeitungsverfahren zum Zeitpunkt der Aussaat der Folgekultur oder der Grundbodenbearbeitung reduziert werden.

3. Nach einer ultraflachen Bearbeitung verbleiben mehr Ernte- und Pflanzenrückstände auf der Bodenoberfläche als nach einer flachen Bearbeitung mit einer Kurzscheibenegge oder Großfederzinkenegge.
4. Der Kraftstoffverbrauch beim Einsatz des Rotationsschleifers ist im Vergleich zum Status quo Kurzscheibenegge geringer.

Die Überprüfung dieser Hypothesen erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

4 Technische Entwicklung

Dieses Kapitel beginnt mit der Definition und Beschreibung der ultraflachen Bodenbearbeitung, wobei verschiedene zentrale Merkmale näher betrachtet werden. Im Anschluss werden die Anforderungen an Geräte für diese spezielle Bearbeitungsform dargelegt und bewertet. Den Abschluss bildet die Vorstellung des Rotationsschleifers GrindStar, einschließlich einer detaillierten Erläuterung seiner Funktionsweise und technischen Merkmale.

4.1 Definition ultraflache Bodenbearbeitung

Neben den etablierten Verfahren zur flachen, mitteltiefen und tiefen Bodenbearbeitung mit Arbeitstiefen zwischen 5 und 35 cm gewinnen Geräte für die ultraflache Bodenbearbeitung seit einigen Jahren zunehmend an Bedeutung. Während für konservierende Landwirtschaft (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2023) und wendende Bodenbearbeitung (Köller & Hensel, 2019) klare Definitionen existieren, fehlt es der ultraflachen Bodenbearbeitung bislang an einheitlichen Standards und präzisen Abgrenzungen. Bisherige wissenschaftliche Publikationen befassen sich kaum mit diesem Thema; lediglich Menegat (2023) erwähnt ultraflache Verfahren. Daher stützt sich eine Definition der ultraflachen Bodenbearbeitung vor allem auf die Charakterisierung bestehender Verfahren sowie auf Anforderungen und Erfahrungen aus der landwirtschaftlichen Praxis und Beratung.

Grundsätzlich lässt sich die ultraflache Stoppel- und Bodenbearbeitung der konservierenden Bodenbearbeitung (Loibl, 2006) und der Festboden-Mulchwirtschaft (Baeumer, 1992) zuordnen. Diese Verfahren zielen auf Erosionsschutz, Kostenreduktion, Emissionsminderung, den Erhalt bzw. die Steigerung der Bodenfruchtbarkeit und des Humusgehaltes sowie die Reduktion unproduktiver Bodenverdunstung ab, um die Bodenfeuchtigkeit zu erhalten (Bista et al., 2017; National Resources Conservation Service, 2016; Unger, 1990; Unger & McCalla, 1980).

Ein zentrales Merkmal der ultraflachen Bodenbearbeitung ist die geringe Arbeitstiefe: Hersteller von Geräten für diese Verfahren geben Arbeitstiefen von 2 bis 3 cm an (Knoche Maschinenbau GmbH, 2023; Väderstad GmbH, 2023). Auch Menegat (2023) definiert ultraflache Verfahren durch eine maximale Arbeitstiefe von 2 bis 3 cm. Diese Tiefe kann an die Anforderungen der Stoppelbearbeitung angepasst werden, etwa durch Orientierung an der Saattiefe der Kultur, deren Stoppeln bearbeitet werden. Für Winterrapstoppeln liegt die optimale Bearbeitungstiefe bei 1 bis 2 cm, während für Getreidestoppeln Arbeitstiefen von 2 bis 4 cm angestrebt werden (Tastowe, 2023). Aufgrund der hohen Anforderungen nach Winterraps und der zunehmenden Probleme mit Ungräsern wie dem Ackerfuchsschwanz (siehe Abschnitt 4.3) lässt sich die Arbeitstiefe bei ultraflacher Stoppelbearbeitung auf einen Bereich von 0 bis 2 cm begrenzen.

Mit Blick auf die Kontrolle und Regulierung von Ungräsern und Unkräutern ist zudem eine ganzflächige Bearbeitung des Bodens über die gesamte Maschinenarbeitsbreite erforderlich (Pekrun & Claupein, 2006).

Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist der Umgang mit Ernte- und Pflanzenrückständen. Diese sollen zwar zerkleinert, jedoch weiterhin auf der Bodenoberfläche verbleiben, um Verdunstung und Erosion zu minimieren (Unger & McCalla, 1980). Zudem steht die Reduzierung des Herbizideinsatzes, insbesondere der Verzicht auf Glyphosat, im Fokus (David, 16.02.2021; Ehrecke, 15.09.2022; Fricke & Leymann, 2022; Meyer, 2023).

Zusammenfassend lässt sich die ultraflache Bodenbearbeitung als ein Verfahren definieren, das eine ganzflächige, maximal 2 cm tiefe, nicht-mischende Bearbeitung des Bodens ermöglicht. Hauptanwendungsbereiche sind die Stoppelbearbeitung, die Saatbettbereitung und der Umbruch von Zwischenfrüchten. Nach Baeumer (1992) ist die ultraflache Bodenbearbeitung der Festboden-Mulchwirtschaft zuzuordnen.

4.2 Anforderungen an Geräte zur flachen und ultraflachen Boden- und Stoppelbearbeitung

Aus der Definition der ultraflachen Bodenbearbeitung ergeben sich spezifische Anforderungen an die entsprechenden Bodenbearbeitungsgeräte. Diese Anforderungen orientieren sich primär an den Zielen der Bodenbearbeitung und deren spezifischen Einsatzbereichen.

Im Rahmen der Stoppelbearbeitung, Saatbettbereitung und des Zwischenfruchtanbaus soll die gesamte Vegetation auf der Ackerfläche möglichst ganzflächig und gemäß der Definition maximal 2 cm tief abgeschnitten werden. Bodenbearbeitungsgeräte für ultraflache Verfahren müssen daher in erster Linie einen flächendeckenden, präzisen Schnitt in der vorgegebenen Arbeitstiefe gewährleisten. Zwei entscheidende Einflussfaktoren dabei sind die Werkzeugkonfiguration und die Tiefenführung.

Die Werkzeuge müssen in der Lage sein, einen ganzflächigen Schnitt ohne die Bildung von Schmierhorizonten zu erzeugen. Dafür ist häufig ein Überschnitt erforderlich: Die tatsächliche Arbeitsbreite der Werkzeuge sollte größer sein als die theoretische Arbeitsbreite, die sich aus dem Strichabstand ergibt. Bei einem Ultraflachgrubber mit einem Strichabstand von 180 mm bieten sich beispielsweise Gänsefußschare mit einer Breite von 220 mm an. Durch den Überschnitt von 40 mm wird ein flächendeckender Schnitt auch bei Zinken, die seitlich Hindernissen ausweichen können, erreicht.

Ebenso entscheidend ist die Tiefenführung, da sie maßgeblich die Gleichmäßigkeit des Arbeitsergebnisses beeinflusst. Ziel ist eine einheitliche Arbeitstiefe aller Werkzeuge über die gesamte Breite und Länge der Maschine. Dafür muss die Tiefenführung Bodenunebenheiten sowohl längs als auch quer zur Fahrtrichtung ausgleichen können. Dies wird in der Praxis häufig durch den Einsatz von Stützrädern und Nachläufern oder Walzen realisiert. Während Walzen in der Regel am Heck der Maschine positioniert sind, können Stützräder entlang der gesamten Breite und Länge der Maschine verteilt werden. Dabei gilt: Je kleiner die Arbeitsbreite und -länge der individuell tiefengeführten Segmente, desto präziser ist die Tiefenführung.

Abhängig von Zielsetzung, Standort, Bodenzustand und eingesetzten Bodenbearbeitungswerkzeugen sind zusätzliche Module erforderlich. Dazu gehören Werkzeuge zur Enterdung von Wurzelballen, zur Trennung von Wurzel und Spross sowie zur Rückverfestigung und Nachzerkleinerung von pflanzlichem Material und groben Bodenkluten. Beispiele hierfür sind verschiedene Walzentypen in einfacher oder doppelter Ausführung sowie Striegelzinken.

Da die ultraflache Bodenbearbeitung oft den ersten Schritt innerhalb einer Verfahrenskette darstellt, müssen die eingesetzten Geräte auch bei hohen

Mengen an Pflanzenrückständen – wie Getreide- und Maisstoppeln oder Zwischenfrüchten – verstopfungsfrei arbeiten.

Zudem ist eine einfache Bedienung und Handhabung der Maschinen anzustreben. Mit zunehmender Komplexität in der Einstellung steigt das Risiko von Fehlbedienungen, was die Effizienz der Arbeit beeinträchtigen kann. Leichtzügigkeit in Kombination mit großen Arbeitsbreiten ist ebenfalls ein wichtiger Faktor. Diese Eigenschaften ermöglichen hohe Flächenleistungen bei einem vergleichsweise geringen Kraftstoffverbrauch, was zu niedrigeren Verfahrenskosten führt.

4.3 Problemstellung und Konzeptidee Rotationsschleifer GrindStar

Ausgehend von den detaillierten Beschreibungen der Bodenbearbeitungsgeräte (siehe Unterabschnitt 2.1.2) und den im vorherigen Abschnitt erörterten Anforderungen an Geräte für die flache und ultraflache Bodenbearbeitung lässt sich die Eignung der Geräte für diesen Anwendungsbereich bestimmen.

Die derzeit auf dem Markt verfügbaren Bodenbearbeitungsgeräte erfüllen die Anforderungen nur teilweise. Großfederzinkeneggen mit Gänsefußscharen sind theoretisch in der Lage, den Boden aufgrund des Überschnitts der Schare ganzflächig zu bearbeiten. In der Praxis jedoch wird die Tiefenführung – bei Arbeitsbreiten bis 3 m über die gesamte Breite und bei größeren, klappbaren Ausführungen über Segmente – nicht präzise genug umgesetzt, sodass keine flächendeckende Bearbeitung bis zu einer Arbeitstiefe von maximal 2 cm erfolgt. Dies gilt auch für Zinken- und Mulchsaatgrubber, Kurzscheibeneggen, Spatenrolleggen sowie für aktiv angetriebene Geräte wie Zinkenrotoren, Fräsen und Kreiseleggen. Die Kettenscheibenegge folgt zwar der Bodenkontur, jedoch ist die Arbeitstiefe nicht auf 2 cm begrenzt, und der Einzug in den Boden hängt von Faktoren wie Ernterückständen, Bodenart und -zustand ab. Auch die Zinken des Strohstriegels passen sich der Bodenkontur an, können aber keinen ganzflächigen Schnitt durchführen. Daher ist die Entwicklung neuer Bodenbearbeitungswerkzeuge und -geräte erforderlich.

Der Rotationsschleifer GrindStar wurde entwickelt, um die Vorteile bestehender Geräte zu vereinen und sämtliche Anforderungen an die ultraflache

Stoppel- und Bodenbearbeitung zu erfüllen. Dabei soll die Arbeitstiefe auf maximal 2 cm begrenzt werden, um die negativen Auswirkungen einer zu intensiven Bodenbearbeitung zu minimieren. Diese ultraflache Bodenbearbeitung (siehe Abschnitt 4.1) wird dabei in Übereinstimmung mit der Definition als ganzflächig verstanden.

Im nächsten Abschnitt wird der Rotationsschleifer GrindStar im Detail vorgestellt.

4.4 Gerätekonzept Rotationsschleifer GrindStar



Abbildung 4.1: Aufbau GrindStar

Die Bodenbearbeitung sowie die oberirdische Bearbeitung der Ernte- und Pflanzenrückstände erfolgt durch die an den Rotoren angebrachten Werkzeuge. Allen Werkzeugversionen gemein ist dabei das Funktionsprinzip des ziehenden Schnitts mit der inneren Werkzeugkante (Abbildung 4.2). Die Werkzeuge bestehen aus dem Werkzeugstiel und dem Messer mit der Schnittkante. Der Werkzeugstiel dient als Bindeglied zwischen Messer und Rotor und wird in allen Werkzeugvarianten zweifach verschraubt am Werkzeughalter befestigt.

Die Unterschiede zwischen den Varianten liegen in der Länge der Werkzeuge, insbesondere der Schnittkanten, sowie im Winkel der Schnittkante zum

Rotor und zum Boden. Die Werkzeuge der Version 1 sind als Kant- und Laserteile mit gezackter Schnittkante ausgeführt. Durch die Drehrichtung der Rotoren trifft das Messer, beginnend vom Werkzeugstiel, zuerst auf den Boden.

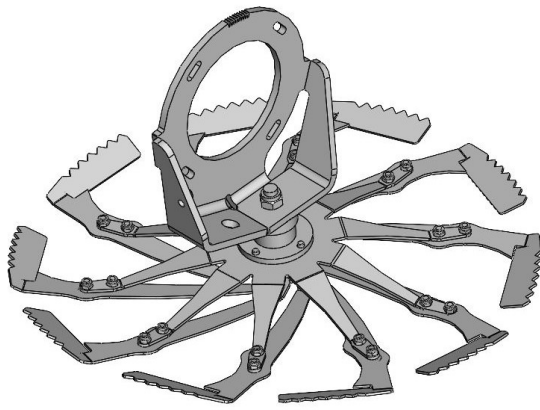


Abbildung 4.2: Wirkprinzip des Rotors und der Werkzeuge: angetrieben durch die Vorfahrtsgeschwindigkeit rotieren die entlang der X- und Y-Achse angestellten Rotoren, sodass die zur Rotorinnenseite geneigte Schnittkante Boden und pflanzliches Material bearbeitet.

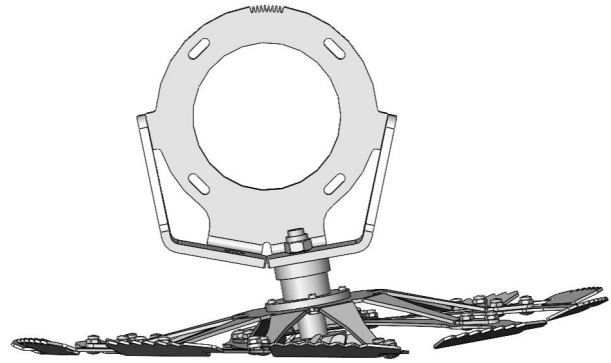
Der Rotor umfasst in allen Versionen die Drehlager mit Flansch und Koppelpunkt zur Rotoraufnahme sowie die Werkzeuganbindung. Alle Rotoren sind entlang der X- und Y-Achse geneigt, wobei die Neigung bestimmt, wann die Werkzeuge den Boden bearbeiten und wann sie nur oberirdisches Material bearbeiten. Die vorderen Rotoren sind gegenüber den hinteren Rotoren in der Ebene zwischen der X- und Z-Achse gespiegelt.

Der ursprüngliche Rotor (Version 1) besteht aus einem Kugellager und einer sternförmigen Scheibe mit 10 Werkzeughaltern (Abbildung 4.3). Die Werkzeuge sind mit zwei Schrauben an der Scheibe befestigt, während sie in der Rotormitte an einem Ring montiert werden. Die sternförmige Scheibe ist flexibel, wodurch sich die Werkzeuge dem Boden anpassen können.

Die Rotoraufnahme dient der Befestigung der Rotoren am Rahmen und erfüllt gleichzeitig die Aufgaben der Tiefenführung und Überlastsicherung. Sie ist als Parallelogramm ausgeführt, das sicherstellt, dass sich der Rotor

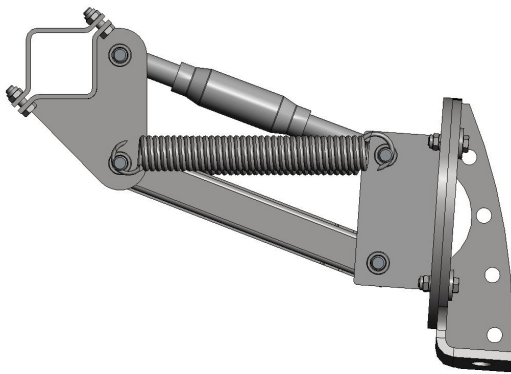


Rotor Version 1

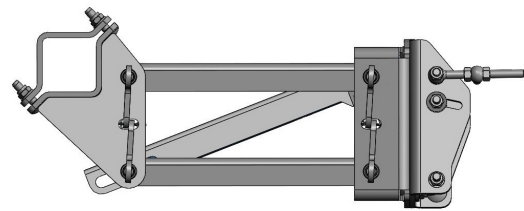


Rotor Version 1 Frontalansicht

Abbildung 4.3: Rotor Version 1 (2021)



Rotoraufnahme Version 1



Rotoraufnahme Version 2

Abbildung 4.4: Rotoraufnahmen Version 1 (2021 und 2022) und Version 2 (ab 2023)

an die Bodenkontur anpassen kann, während der Winkel der Werkzeuge zum Boden unabhängig von der Vertikalposition des Rotors konstant bleibt. Alle Versionen der Rotoraufnahme sind mit Klemmbacken am Rahmen befestigt und durch Schrauben gesichert. Die Überlastsicherung wird durch Spiralfedern am Parallelogramm gewährleistet. Die Rotorneigung lässt sich über Verstellmechanismen entlang der X- und Y-Achse anpassen.

Die Rotoraufnahme Version 1, die in den Jahren 2021 und 2022 verwendet wurde, besteht aus einem Parallelogramm, dessen Längsneigung über einen mechanischen Oberlenker der Kategorie 1 eingestellt werden kann. Zur Kraft- und Gewichtsübertragung können maximal zwei Spiralfedern montiert werden. Die Rotorneigung entlang der Y-Achse wird über vier Verschraubungen mit Langlöchern in der Flanschplatte eingestellt. Je nach Drehrichtung sind die Rotoren in den entsprechenden Anbaupositionen

nach rechts oder links geneigt verschraubt.

Das Versuchsmuster des Rotationsschleifers GrindStar (Abbildung 4.1) umfasst die vier wesentlichen Komponenten: Rahmen, Rotoraufnahme, Rotor und Werkzeuge. Der 700 kg schwere Rahmen, der für eine Arbeitsbreite von 6 m ausgelegt ist, wird im Dreipunkt angehängt. Er besteht aus einem Hauptrahmen und zwei 3 m breiten Seitenteilen, die für den Straßentransport eingeklappt werden können. Diese Seitenteile nehmen Rotoraufnahmen an zwei Balken auf. Die Position der Rotoraufnahmen ist nur begrenzt variabel, da der Mittelrahmen sowie Anbaupunkte für Ober- und Unterlenker und der Klappmechanismus die freie Positionierung einschränken. Um eine gleichmäßige Belastung aller Rotoraufnahmen und Rotoren zu gewährleisten, ist der hydraulische Klappmechanismus mit einem Sperrventil ausgestattet, das ein v-förmiges Anstellen des Rahmens bei stärkerer Belastung der äußeren Rotoraufnahmen verhindert. Der Rahmen ermöglicht zudem den Anbau einer pneumatischen Sämaschine zur Ausbringung von Zwischenfrüchten, die mittig am Hauptrahmen befestigt wird. Die beiden Seitenteile klappen neben der Sämaschine zusammen. Am Hauptrahmen sind außerdem die Abstellstützen und der Beleuchtungsträger montiert. Eingeklappt beträgt die Transportbreite des Rotationsschleifers weniger als 3 m, was einen problemlosen Straßentransport ermöglicht.

Durch die Neigung der Rotoren entlang der X- und Y-Achse rotiert der Rotor bei der Vorfahrt des Traktors um die Z-Achse (Abbildung 4.5). Die Schrägstellung der Werkzeuge und die geschliffenen Werkzeugkanten erzeugen einen Untergriff, der es den Werkzeugen ermöglicht, bei ausreichender Geschwindigkeit in den Boden einzudringen. Die Kombination aus Traktorvorfahrt und Rotorrotation führt zu einem ziehenden Schnitt der einzelnen Werkzeuge. Da die theoretische Arbeitsbreite größer ist als der Strichabstand (bzw. Rotorabstand) von 375 mm, entsteht eine Überlappung, die zu einem ganzflächigen Schnitt führen soll. Ziel ist eine gleichmäßige, maximal 2 cm tiefe Bodenbearbeitung bei einer Vorfahrtsgeschwindigkeit ab etwa 12 km/h.

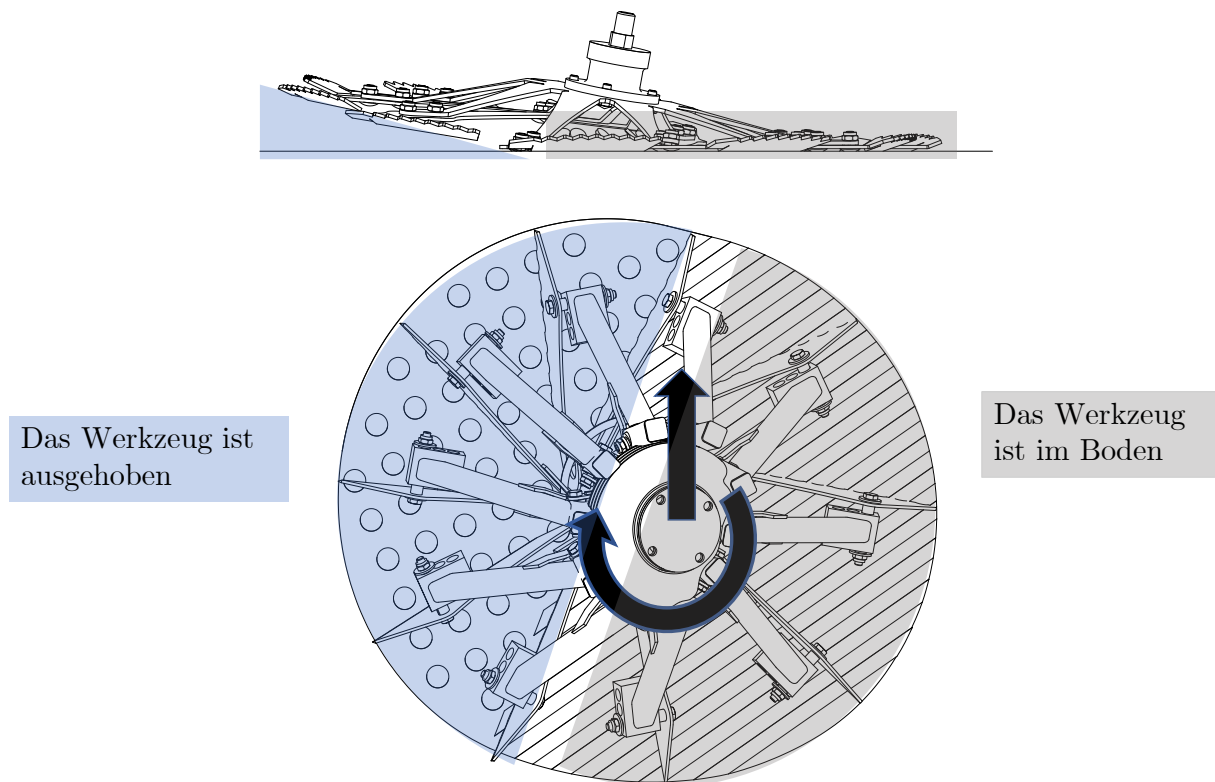


Abbildung 4.5: Funktionsprinzip des Gesamtrotors

5 Feldversuche

Von 2022 bis 2024 wurden umfangreiche Feldversuche zur Evaluierung der ultraflachen Bodenbearbeitung mit einem Rotationsschleifer durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche werden im folgenden Kapitel beschrieben und diskutiert.

5.1 Übergreifende und Methoden

Im folgenden Kapitel wird die Versuchsdurchführung der Feldversuche inklusive Ermittlung der verfahrenstechnischen Aspekte und Verfahrenskosten vorgestellt und erläutert. Da Versuchsschlepper, Bodenbearbeitungsgeräte und Versuchsfächen für beide Aspekte verwendet worden sind, wird an dieser Stelle nicht zwischen Pflanzenbau und Verfahrenstechnik unterschieden.

5.1.1 Versuchsschlepper und eingesetzte Bodenbearbeitungsgeräte

In allen Versuchsjahren kam ein Fendt Vario 716 TMS aus dem Baujahr 2009 zum Einsatz. Der Traktor verfügt über eine Motornennleistung von 110 kW (150 PS) und ein Leergewicht von etwa 7000 kg (siehe Tabelle 5.1). Für die Bearbeitung der Versuchsparzellen wurde ein automatisches Lenksystem mit RTK-Korrektursignal eingesetzt, das eine präzise Bearbeitung der Parzellen zu jedem Zeitpunkt sicherstellte.

Tabelle 5.1: Eigenschaften Versuchstraktor Fendt 716 Vario TMS

Eigenschaft	(Mess-) Wert	Einheit
Baujahr	2009	
Motornennleistung	110	kW
	150	PS
Leergewicht	7000	kg
zulässiges Gesamtgewicht	11500	kg
Ballastierung Vorderachse	1000	kg
Bereifung Vorderachse	VF 540/65R28	
Reifeninnendruck Vorderachse	0,8	bar
Bereifung Hinterachse	650/65R38	
Reifeninnendruck Hinterachse	1,2	bar

Eingesetzt wurden vier verschiedene Bodenbearbeitungsgeräte (siehe Tabelle 5.2). Die 3 m breite Kurzscheibenegge vom Typ Saphir DiscStar 305 Profi ist mit 24 Scheiben mit einem Scheibendurchmesser von 560 mm und 125 mm Strichabstand ausgestattet. Als Nachläufer zur Rückverfestigung und Tiefenführung ist eine Dachringwalze montiert. Der hinter der Dachringwalze verbaute Nachstriegel wurde in den Versuchen konstant auf Schlepp in der obersten Position gefahren, da die Einstellung auf Griff zum Zusammenziehen der Ernterückstände geführt hat. Die Arbeitstiefe der Kurzscheibenegge wurde in allen Versuchen auf 5 cm eingestellt, da bei flacherer Arbeit keine ganzflächige Bodenbearbeitung stattfindet. Die Kurzscheibenegge ist mit 13 km/h Arbeitsgeschwindigkeit eingesetzt worden.

Der 6 m breite Strohstriegel Saphir ClearStar 600 ist mit insgesamt 100 16 mm starken Zinken ausgestattet. Diese sind auf fünf Balken montiert und können hydraulisch um die Y-Achse verschwenkt werden. Zusätzlich ist die mechanische Verstellung der letzten zwei Balken möglich. Die vor den Zinken montierte Impulsschiene besteht aus einem Winkeleisen mit eingeschweißtem Flacheisen. Eingesetzt werden kann die Impulsschiene zur Zerkleinerung der Rapsstoppel in der ersten Stoppelbearbeitung. Da es in Vorversuchen im Jahr 2021 Probleme mit dem Materialfluss gegeben hat, ist die Impulsschiene ab 2022 nicht mehr eingesetzt worden. Der Strohstriegel ist mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 20 km/h eingesetzt worden.

Die 3 m breite Großfederzinkenegge Saphir AllStar Longline 301 besitzt 24 Federzinken. Die Federzinken sind auf acht Balken mit einem Strichabstand von 125 mm montiert. Durch die 200 mm breiten Gänsefußschare ergibt sich ein theoretischer Überschnitt von 75 mm. Die Tiefenführung erfolgt über Stützräder vor und hinter dem Arbeitsfeld. Der ebenfalls verbaute Nachstriegel ist nicht zum Einsatz gekommen und wurde in der höchsten Position arretiert. Die Arbeitstiefe wurde auf 3 cm festgelegt, da dies bereits für einen ganzflächigen Schnitt ausgereicht hat. Da die hohen Strohmenngen auf dem Versuchsstandort zu einem Verstopfen des Zinkenfeldes geführt haben, konnte diese Maschine nicht wie geplant auf allen Versuchsflächen eingesetzt werden. Auch die im Frühjahr 2023 durchgeführte Überarbeitung mit einer Neuordnung der Zinken brachte nur geringfügige Verbesserungen. Die Arbeitsgeschwindigkeit der Großfederzinkenegge in der Versuchsdurchführung betrug 10 km/h.

Der 6 m breite Rotationsschleifer wurde während der Versuchsdauer kontinuierlich modifiziert, wobei die Konfiguration innerhalb eines Versuchsjahres unverändert blieb. Der Rotationsschleifer wurde mit einer Arbeitsgeschwindigkeit von 15 km/h betrieben.

Tabelle 5.2: Eigenschaften Bodenbearbeitungsgeräte

Bodenbearbeitungsgerät	Arbeitsbreite	Arbeitsgeschwindigkeit	Arbeitstiefe
Einheit	m	km/h	cm
Großfederzinkenegge	3	10	3
Kurzscheibenegge	3	13	5
Rotationsschleifer	6	15	1 bis 2
Strohstriegel	6	20	0 bis 2

5.1.2 Ermittlung der verfahrenstechnischen Parameter

Die Ermittlung des Kraftstoffverbrauches erfolgte mit dem integrierten Flächenzähler des Traktors. Dieser nutzt die eingegebene Arbeitsbreite, die Hubwerksposition sowie die theoretische Fahrgeschwindigkeit ohne Schlupf zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches pro Flächeneinheit. Sobald sich das Heckhubwerk in Arbeitsposition befindet und der Traktor fährt, startet die geschwindigkeitsabhängige Aufzeichnung.

5.1.3 Ermittlung der Arbeitsqualität

Die Bewertung der Arbeitsqualität erfolgte unter Berücksichtigung der Ziele der ultraflachen Stoppel- und Bodenbearbeitung sowie der daraus abge-

leiteten Anforderungen an die Bodenbearbeitungsgeräte. Untersucht wurden dabei die Arbeitstiefe und deren Homogenität quer zur Fahrtrichtung.

In der Versuchssaison 2024 wurde nach der Ernte eine Fläche mit Winterrapstoppeln mit den Bodenbearbeitungsgeräten bearbeitet (siehe Tabelle 5.3). Aufgrund starker Verunkrautung und aufgelaufenem Ausfallraps wurde die Fläche zunächst mit einem Totalherbizid behandelt. Wenige Tage später erfolgte eine Überfahrt mit einem Schlegelmulcher, um die oberirdischen Pflanzenreste zu zerkleinern und sicherzustellen, dass die Arbeitstiefe der Bodenbearbeitungsgeräte nicht durch Rapsstoppeln, Ausfallraps, Ackerfuchsschwanz oder Wurzelunkräuter beeinträchtigt wird.

Anschließend wurden mit jedem Bodenbearbeitungsgerät drei Streifen von jeweils 5,8 m Breite und 100 m Länge bearbeitet. Die Rotoren des Rotationsschleifers wurden auf eine Neigung von 8 Grad entlang der x-Achse eingestellt. Sowohl die Großfederzinkenegge als auch die Kurzscheibenegge wurden auf die minimal mögliche Arbeitstiefe eingestellt, um gleichzeitig eine möglichst ganzflächige Bodenbearbeitung zu gewährleisten. Ziel war eine ultraflache, ganzflächige Bearbeitung des Bodens mit einer maximalen Arbeitstiefe von 2 cm.

Tabelle 5.3: Versuchsvarianten zur Ermittlung der Arbeitsqualität

Variante	Bodenbearbeitungsgerät	gerätespezifische Einstellung
GS	Rotationsschleifer	- 8 Grad Rotorquerneigung
- Nachstriegel ausgehoben		
KSE	Kurzscheibenegge	- Nachstriegel ausgehoben
GFZE	Großfederzinkenegge	- Oberlenker im Langloch
- Tiefenführung über Stützräder		
- Nachstriegel ausgehoben		

Auf jeder Parzelle wurde der Bearbeitungshorizont auf einer Fläche von 1,5 m mal 1,5 m freigelegt, sodass für jedes Bodenbearbeitungsgerät drei Profile erstellt werden konnten. Zur Ermittlung der Arbeitstiefe wurde eine 2 m lange Richtlatte verwendet, die auf dem unbearbeiteten Boden positioniert wurde. Innerhalb des freigelegten Bearbeitungshorizonts wurde die Arbeitstiefe auf einer Breite von 1 m in 1-cm Abständen gemessen. Die Messungen erfolgten mithilfe eines handelsüblichen Lineals.

5.1.4 Versuchsaufbau pflanzenbauliche Feldversuche

Das teilrandomisierte Blockdesign der pflanzenbaulichen Feldversuche umfasst vier vollständige Wiederholungen, wobei in jedem Block alle Verfahrensketten bzw. Varianten berücksichtigt werden (E. Thomas, 2006). Die Bodenbearbeitung erfolgte um 5 Grad quer zur vorherigen Saattrichtung, um den Einfluss von Fahrgassen auf das Bodenbearbeitungsergebnis zu minimieren und diesen gleichmäßig auf mehrere Parzellen zu verteilen.

In Vorversuchen im Jahr 2021 wurde festgestellt, dass die tatsächliche Arbeitsbreite der Kurzscheibenegge von der im Datenblatt angegebenen theoretischen Breite von 3 m abweicht und in der Praxis 2,9 m beträgt. Um unbehandelte Streifen in der Mitte der Parzellen zu vermeiden, wurde die Breite der Versuchsparzellen auf 5,8 m festgelegt. Überlappungsbereiche zwischen zwei Parzellen wurden von der Datenerhebung ausgeschlossen. Jede Versuchsparzelle hatte eine Länge von 100 m.

Unmittelbar nach der Ernte wurde auf allen Versuchsflächen eine erste Bonitur durchgeführt, um den Ist-Zustand der Flächen zu dokumentieren und zu quantifizieren. Ziel der Bonituren während des Versuchszeitraums war es, möglichst detailliert Veränderungen in der Pflanzenanzahl pro Quadratmeter sowie im Vegetations- und Mulchdeckungsgrad zu erfassen, die durch Bodenbearbeitung oder externe Einflüsse wie Niederschlagsereignisse verursacht wurden.

Die Bonituren fanden idealerweise unmittelbar vor einer Bodenbearbeitungsmaßnahme und drei bis fünf Tage nach dem Bearbeitungsgang statt. Bei größeren Abständen zwischen den Bearbeitungsterminen wurden zusätzliche Bonituren durchgeführt, um die Entwicklungen kontinuierlich zu dokumentieren. Die Terminierung der Bodenbearbeitungsmaßnahmen in der Stoppelbearbeitung orientierte sich am Entwicklungsstadium des Ausfallgetreides (maximal BBCH 21) bzw. Ausfallrapses (maximal BBCH 15), mit dem Ziel, eine Bestockung des Ausfallgetreides zu verhindern und den Ausfallraps aus phytosanitären Gründen frühzeitig zu bekämpfen. Die Entscheidung über Zeitpunkt und Durchführung der Maßnahmen wurde daher situationsabhängig getroffen.

Standort und Versuchsflächen Die Feldversuche wurden in den Jahren 2022, 2023 und 2024 in Daseburg (51° 31' N, 9° 13' O) durchgeführt. Daseburg liegt in der Warburger Börde am Fuße des Desenbergs. Die Warburger Börde

de wird durch das Eggegebirge im Westen, das Oberwälder Land im Norden und das Westhessische Bergland im Süden begrenzt. Charakteristisch für diese Region ist die vorwiegend ackerbaulich genutzte Bördelandschaft, die größtenteils von Löss bedeckt ist.

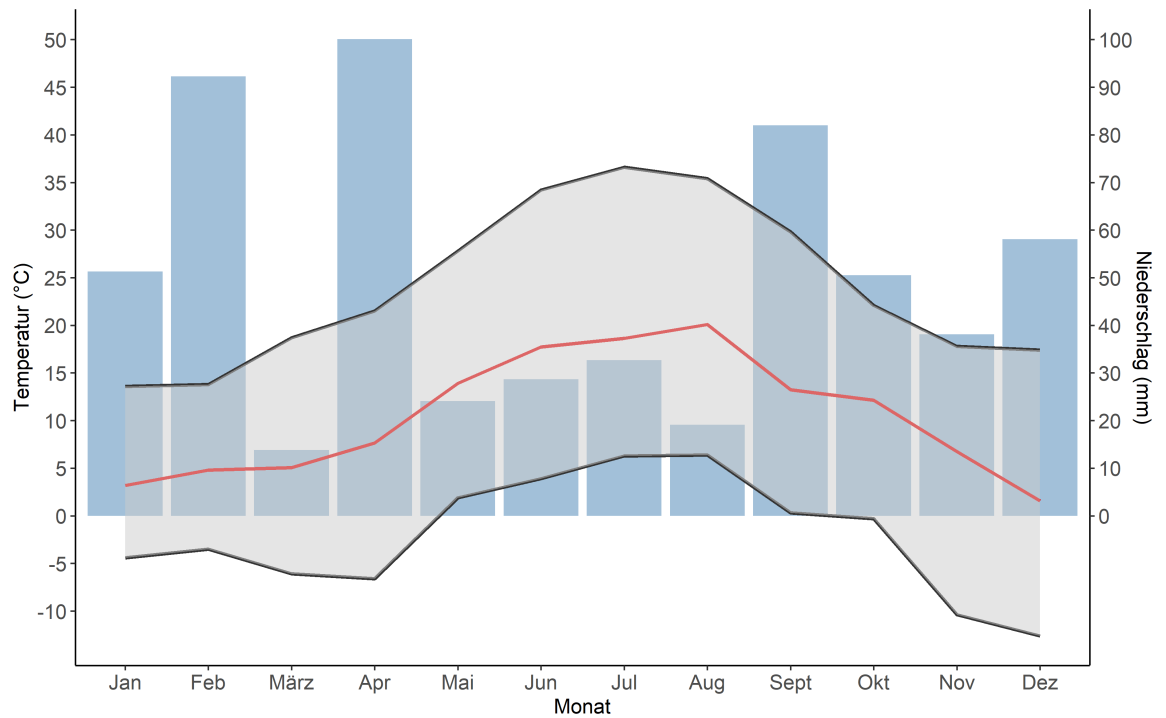
Zwischen 1961 und 1990 betrug der durchschnittliche jährliche Niederschlag 668 mm, während er zwischen 1991 und 2020 im Mittel auf 708 mm anstieg. Für die durchschnittliche Lufttemperatur in 2 m Höhe liegen Daten der Wetterstation Warburg für den Zeitraum 1998 bis 2022 vor, in dem ein Mittelwert von 7,7 Grad Celsius gemessen wurde.

Im Jahr 2022 lag die Durchschnittstemperatur an der etwa 4 km entfernten Wetterstation Warburg bei 10,4 Grad Celsius, und der Jahresniederschlag betrug 590 mm. Davon fielen 310 mm in der ersten Jahreshälfte. Im Versuchszeitraum von Juli bis September wurden 133 mm Niederschlag verzeichnet, wobei mit 82 mm der größte Anteil im September fiel. Im Juli wurden sechs Tage mit Temperaturen über 30 Grad Celsius registriert, wobei die Höchsttemperaturen bis zu 36 Grad Celsius erreichten. Auch im August gab es sieben heiße Tage mit Temperaturen über 30 Grad Celsius.

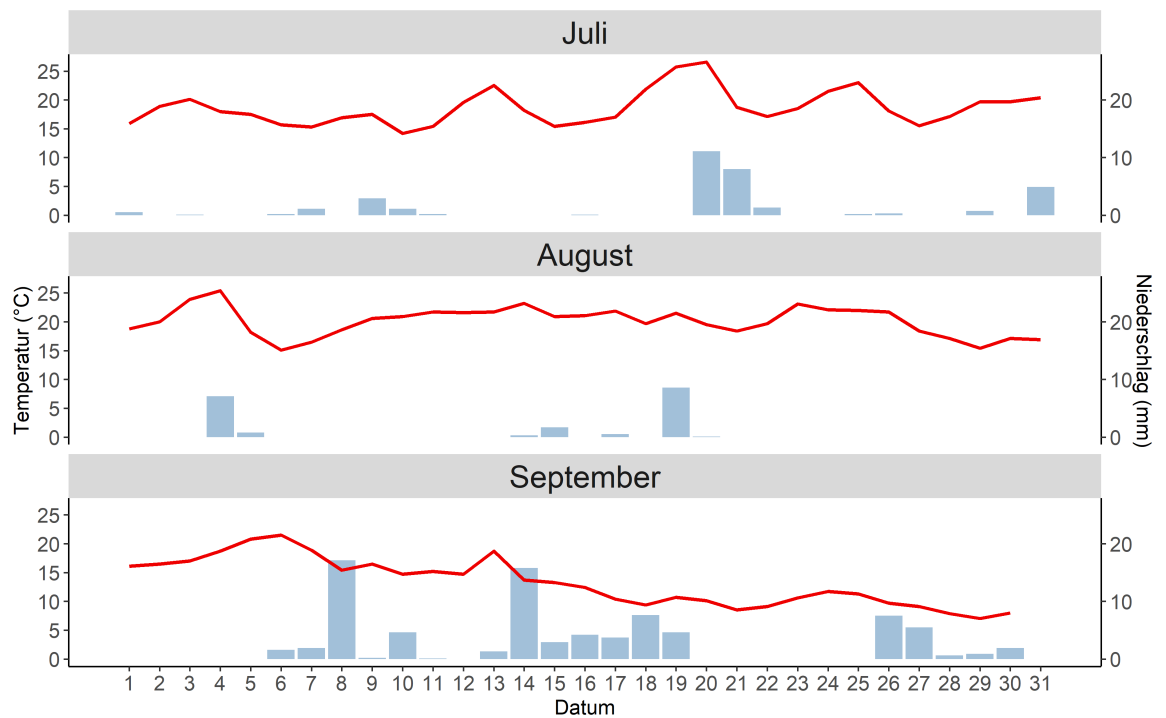
Im Jahr 2023 stieg die Durchschnittstemperatur an der Wetterstation Warburg leicht auf 10,5 Grad Celsius an, und der Jahresniederschlag erreichte 960 mm. Davon entfielen 348 mm auf die Monate ab Oktober. In der ersten Jahreshälfte wurden 359,7 mm Niederschlag gemessen, was nur geringfügig mehr war als im gleichen Zeitraum 2022. Jedoch waren die Niederschläge zwischen Juli und September mit 252 mm nahezu doppelt so hoch wie im gleichen Zeitraum des Vorjahres. Besonders hohe Niederschläge wurden im Juli (78 mm) und August (146 mm) verzeichnet.

Heiße Tage mit Temperaturen über 30 Grad Celsius gab es im Jahr 2023 drei im Juli und einen im September. Die monatlichen Durchschnittstemperaturen zeigen, dass sich die Bedingungen teils erheblich unterschieden: Während sich die Juli-Durchschnittstemperaturen 2022 und 2023 mit 18 bzw. 18,6 Grad Celsius kaum unterschieden, war der August 2022 mit 20 Grad Celsius deutlich wärmer als der August 2023 mit 17,5 Grad Celsius. Der September hingegen war 2022 mit 13 Grad Celsius kühler als 2023, als eine durchschnittliche Temperatur von nahezu 17 Grad Celsius gemessen wurde (Deutscher Wetterdienst, 2024).

Um den Einfluss der natürlichen Bodenheterogenität möglichst auszuschlie-

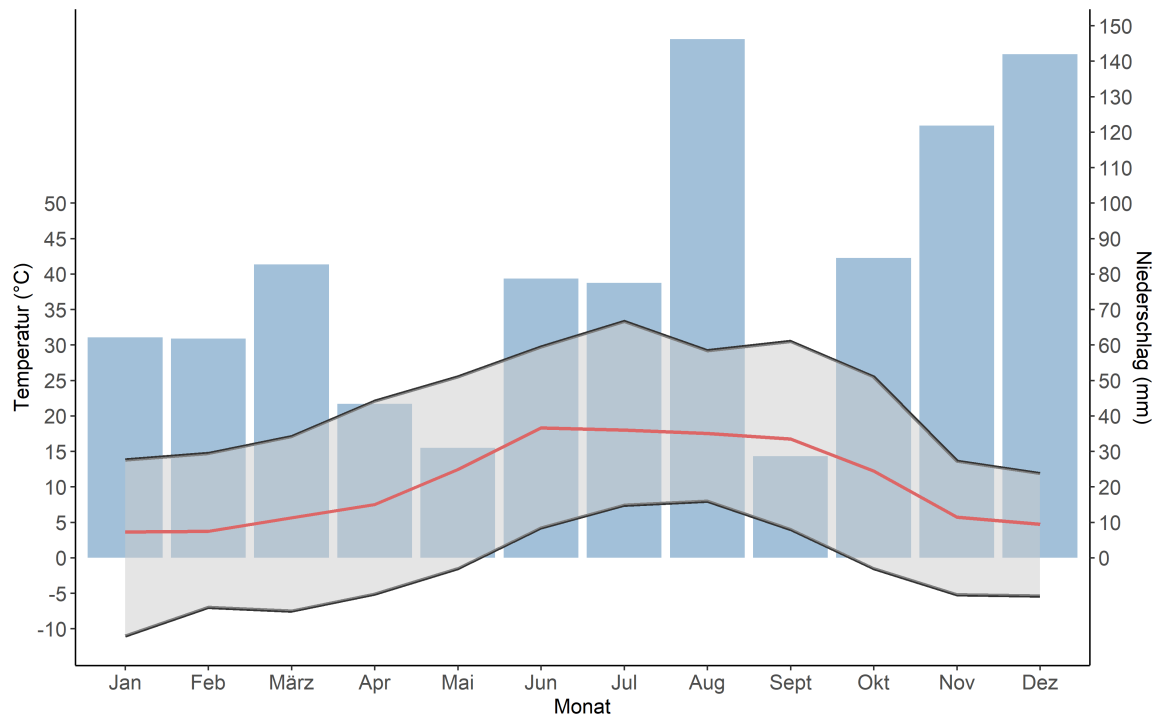


2022 gesamt

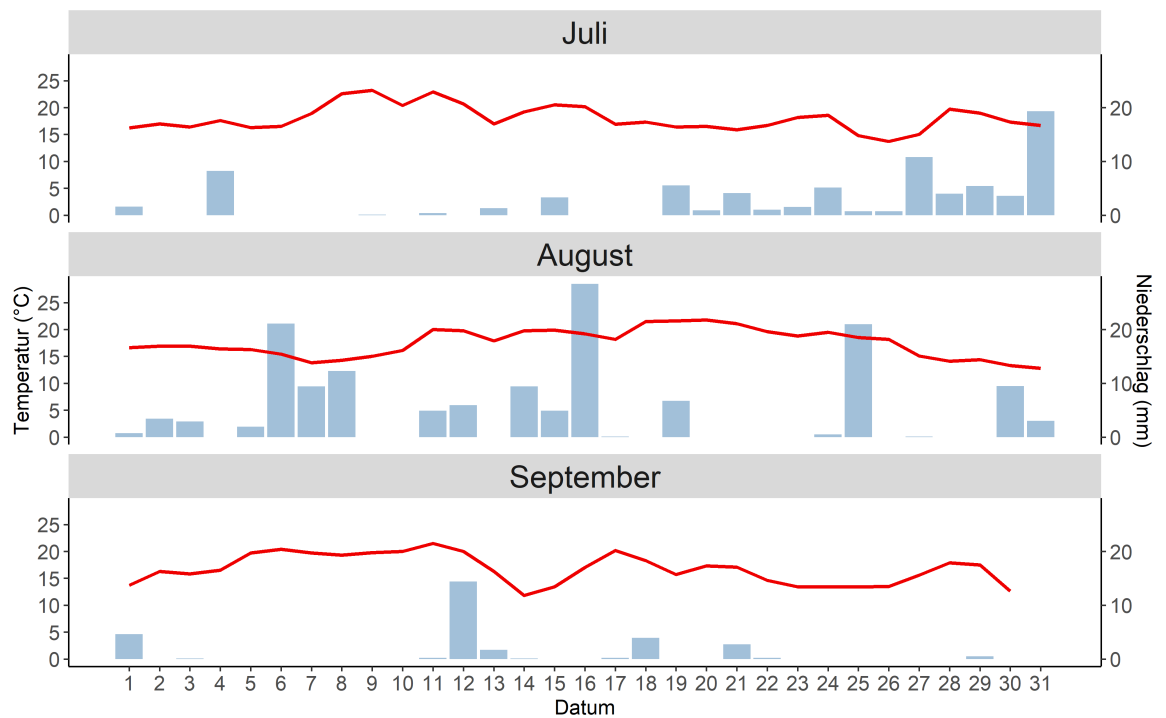


Versuchszeitraum Juli bis September 2022

Abbildung 5.1: Wetter am Standort Daseburg im Jahr 2022. Die Balken zeigen den Niederschlag pro Monat bzw. pro Tag an. Die Linien bilden die durchschnittliche Lufttemperatur (rot) und die maximale bzw. minimale Lufttemperatur (schwarz) ab. (Deutscher Wetterdienst, 2024)



2023 gesamt



Versuchszeitraum Juli bis September 2022

Abbildung 5.2: Wetter am Standort Daseburg im Jahr 2023. Die Balken zeigen den Niederschlag pro Monat bzw. pro Tag an. Die Linien bilden die durchschnittliche Lufttemperatur (rot) und die maximale bzw. minimale Lufttemperatur (schwarz) ab. (Deutscher Wetterdienst, 2024)

ßen, wurden gezielt homogene Teilflächen als Versuchsflächen ausgewählt. Ein zentrales Merkmal der Standorte und Flächen sind die tiefgründigen Böden mit 70 bis 85 Bodenpunkten, die ein entsprechend hohes Ertragspotential aufweisen. Die Böden können als Parabraunerden, Fahlerden oder Pseudogleye aus Löss oder Lösslehm charakterisiert werden (Schubert, 2016).

Zur detaillierten Charakterisierung der Versuchsflächen wurden Bodenproben entnommen, um die Bodenart, den pH-Wert sowie die Nährstoffgehalte für Phosphor/Phosphat, Kalium und Magnesium zu bestimmen. Zusätzlich erfolgten eine Korngrößenanalyse zur Bestimmung der Bodenart und eine Untersuchung des Gehalts an organischer Substanz (siehe Tabelle 5.4). Diese Analysen wurden durch die LUFA gemäß den standardisierten Methoden zur Untersuchung von Böden durchgeführt (VDLUFA, 2012).

Bis auf die Versuchsflächen Dörenberg und Tannenkopf, deren Bodenart als toniger Lehm (tL) klassifiziert wurde, wurden alle übrigen Versuchsflächen anhand der Korngrößenanalysen als schluffiger Lehm (uL) eingestuft. Aufgrund regelmäßiger Kalkungen weisen die Versuchsflächen insgesamt relativ hohe pH-Werte auf, wobei die Flächen Kötterbreite, Heide groß, Wanne und Höte Menne Garten der pH-Stufe D zugeordnet werden können. Der Gehalt an organischer Substanz liegt mit 2,3 bis 3,4 % im standorttypischen Bereich (Jacobs et al., 2018).

Tabelle 5.4: Versuchsflächen der drei Versuchsjahre 2022, 2023 und 2024 mit den jeweiligen Bodeneigenschaften nach VDLUFA

Fläche	Kultur	Jahr	Bodenart	pH-Wert		Phosphor P2O5	Kalium K2O	Magnesium Mg	Organische Substanz	Tonanteil
				pH-Stufe		mg/100 g	mg/100 g	mg/100 g	%	%
Kötterbreite	Wintergerste	2022	uL	7,1	D	7	8	8,4	3,4	20,6
Heide groß	Winterweizen	2022	uL	7,1	D	9	13	8,1	2,9	18,5
Höte Menne Windmühle	Winterraps	2022	uL	6,9	C	11	23	5,7	2,4	12,6
Dösseler Kreuz	Wintergerste	2023								
Wanne	Winterweizen	2023	uL	7,2	D	17	15	7,2	2,3	15,6
Höte Menne Garten	Winterraps	2023	uL	7,1	D	26	31	11,2	2,8	18,4

NDVI Für die Erstellung der Multispektralaufnahmen wurde ein Unmanned Aerial Vehicle (UAV) des Typs DJI P4 Multispectral eingesetzt. Dieser Quadrocopter verfügt über ein globales Navigationssatellitensystem (GNSS), das auf NAVSTAR GPS, Galileo und GLONASS zugreift. Zur präzisen Positionsbestimmung wird ein RTK-Signal genutzt, das über Mobilfunk empfangen wird.

Die Multispektralkamera des UAV ist zur Bildstabilisierung an einem Gimbal montiert. Für die Aufnahmen kamen ein RGB-Sensor und fünf monochrome Sensoren mit einer effektiven Auflösung von jeweils 2,08 Megapixeln zum Einsatz (siehe Tabelle 5.5). Die Steuerung des UAV erfolgte über eine Fernbedienung in Kombination mit einem Apple iPad mini, auf dem die App DJI Ground Station Pro installiert ist. Diese App diente sowohl der Flugroutenplanung als auch der Parametrisierung der Flugdaten.

Während der Multispektralaufnahmen wurde eine konstante Flughöhe von 40 m eingehalten.

Tabelle 5.5: Eigenschaften der fünf monochromen Sensoren für die Erstellung von Multispektralaufnahmen mit dem UAV DJI P4 Multispectral

Sensor	Wellenlängenbereich
	<i>nm</i>
Blau	450 ± 16
Grün	560 ± 16
Rot	650 ± 16
Red Edge	730 ± 16
Nahinfrarot (NIR)	840 ± 26

Zur Auswertung der Multispektralaufnahmen wurde die Software Pix4Dfields (Version 1.9.0) genutzt. Dazu werden die Aufnahmen in der Software zunächst zu einem Orthomosaik zusammengesetzt. Anschließend kann für die gesamte durch die Multispektralaufnahmen abgedeckte Fläche der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) berechnet werden:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (5.1)$$

Die Erstellung der georeferenzierten Parzellene erfolgte mit QGIS 3.28.0. Aufgrund der eventuellen Überlappung wurde die Breite der Parzellen auf 5,8 m festgelegt. Die Länge der Parzellen betrug 100 m, sodass die Parzellen jeweils 580 m² umfasst haben. Im Anschluss wurden die georeferenzierten Parzellen in Pix4Dfields als Layer über das Orthomosaik gelegt. PixDfields hat anschließend für jede Parzelle den Mittelwert und die Standardabweichung des NDVI zur Datenaufbereitung in Microsoft Excel (2019) ausgegeben.

Anzahl Pflanzen pro m² Zum Zählen der Pflanzen wurde ein 1 m² großer Zählrahmen verwendet. Dieser wurde pro Parzelle an jeweils fünf zufällig ausgewählten Positionen auf den Boden geworfen. Die Anzahl der Pflanzen wurde anschließend durch Auszählen ermittelt. Eine Differenzierung zwischen verschiedenen Pflanzenarten hat nicht stattgefunden, da die dominierenden Arten Ausfallgetreide oder Ausfallraps waren.

Deckungsgrad Zur Aufnahme der Fotos wurde eine digitale Spiegelreflexkamera (DSLR) vom Typ Canon EOS 90D mit einem Canon EF-S 18-135mm Objektiv verwendet. Die digitale Spiegelreflexkamera Canon EOS 90D verfügt über einen 22,3 x 14,8 mm großen APS-C-Sensor (Canon Deutschland GmbH, 2024). Aufgrund der begrenzten Höhe des Stativs wurde mit einer Brennweite von 18 mm fotografiert. Alle Fotos wurden mit einem dreibeinigen Stativ senkrecht von oben aufgenommen, sodass etwa 1 m² Bodenoberfläche erfasst wurde. Bodenunebenheiten oder ein minimales Einsinken des Stativs in den lockeren Boden konnten dennoch zu geringen Abweichungen beim Abstand zwischen Objektiv und Bodenoberfläche bzw. Pflanzenbestand führen, diese Abweichungen wurden jedoch im Vergleich zum Einsatz ohne Stativ auf ein notwendiges Mindestmaß reduziert. Um den Einfluss des Sonnenstandes zu minimieren, wurden die Aufnahmen tagsüber und nicht bei Sonnenauf- oder Sonnenuntergang erstellt.

Zur Ermittlung der Bodenbedeckung durch Pflanzen wurde Canopeo (Version 1.1) verwendet. Die Software ermöglicht eine schnelle Bestimmung des Vegetationsdeckungsgrades und kann als Smartphone-App auf iOS- und Android-Geräten ausgeführt werden (Lollato et al., 2016). Aufgrund der großen Datenmengen wurde Canopeo in Matlab (MathWorks, Inc., Version R2020a) verwendet. Dadurch konnte eine große Anzahl an Aufnahmen effizient verarbeitet werden. Zudem erlaubte diese Anwendung den Export der Ergebnisse als Text- oder Tabellenformat im Comma-separated values (CSV)-Dateiformat. Canopeo arbeitet mit dem Rot-Grün-Blau (RGB)-Farbraum (Patrignani & Ochsner, 2015). Neben dem Excess Green Index (Woebbecke et al., 1995) berücksichtigt die Software auch die Verhältnisse von Rot zu Grün sowie Blau zu Grün (Paruelo et al., 2000), um den Vegetationsdeckungsgrad zu berechnen.

Zur Bestimmung der Bodenbedeckung durch Pflanzen analysiert Canopeo alle Pixel eines Fotos. Basierend auf den definierten Selektionskriterien erstellt die Software ein binäres Bild aus schwarzen und weißen Pixeln, wobei

die weißen Pixel Vegetation darstellen. Die ausgegebenen Werte variieren zwischen 0 und 1 und entsprechen Deckungsgraden von 0 bis 100 %.

$$\frac{R}{G} < P_1 \text{ und } \frac{B}{G} < P_2 \text{ und } 2G - R - B > P_3 \quad (5.2)$$

Parameter P_1 und P_2 können in Canopeo variiert werden. Die Standardeinstellungen von P_1 und P_2 zur Klassifikation von grünen Pixeln im Bereich zwischen 500 und 570 nm ist 0,95 (Paruelo et al., 2000; Patrignani & Ochsner, 2015). Sinnvoll ist der Vergleich der grünen und weißen Pixel in Canopeo zur Validierung. Bei Abweichungen sollten P_1 und P_2 angepasst werden (Lollato et al., 2016). P_3 ist in Canopeo auf 20 festgelegt (Patrignani & Ochsner, 2015).

Die Software SoilCover dient zur Auswertung der Fotoaufnahmen hinsichtlich der Bodenbedeckung mit Vegetation und Mulch. Diese nutzt maschinelles Lernen um einzelne Pixel als Boden, Vegetation, Mulch oder Stein zu klassifizieren. Maschinelles Lernen teilt sich grundsätzlich in zwei Phasen auf. Zunächst wird das Modell mittels Trainingsdaten angelernet und trainiert. Anschließend kann der eigentliche Datensatz zur Auswertung bzw. im Fall von SoilCover zur Klassifizierung der Bodenoberfläche anhand von RGB-Aufnahmen eingelesen und analysiert werden. Um die Pixel in den Aufnahmen den Klassen Boden, Vegetation und Mulch zuzuweisen, durchläuft der Algorithmus mehrere Entscheidungsbäume. Diese basieren auf Entscheidungsfunktionen. Zunächst werden die Pixel hinsichtlich ihrer Farbe mit den umliegenden Pixeln verglichen. Der nächste Schritt basiert auf der Annahme, dass benachbarte Pixel in der Regel mit hoher Wahrscheinlichkeit zur gleichen Klasse gehören. Basierend auf den Ergebnissen werden die Pixel anschließend einer Klasse zugeordnet. SoilCover gibt nach der Analyse den prozentualen Anteil der jeweiligen Klasse für das gesamte Bild aus (Riegler-Nurscher et al., 2018). Wichtig für die Anwendung in Forschung, Wissenschaft und Praxis ist zudem die Validierung. Im Vergleich zur manuellen Klassifikation mittels Gitterraster konnten für Boden, Vegetation und Mulch Korrelationskoeffizienten von 0,92, 0,97 und 0,89 ermittelt werden (Riegler-Nurscher et al., 2016).

Statistische Auswertung Die Aufbereitung der Rohdaten erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (2019). Die statistische Auswertung und Erstellung der Grafiken wurde mit R (Version 4.2.3) bzw.

RStudio (Version 2023.09.0+463) durchgeführt (Handl & Kuhlenkasper, 2018; Hedderich & Sachs, 2018).

Für jedes Messverfahren, jeden Erhebungstermin und jede Versuchsfläche wurden die Datensätze zunächst auf Varianzhomogenität und Normalverteilung überprüft. Die Überprüfung der Varianzhomogenität erfolgte mittels Levene-Test. Die Überprüfung auf Normalverteilung fand im ersten Schritt mit dem Shapiro-Wilk-Test (Shapiro & Wilk, 1965) statt. Da dieser bei großen Stichproben oft zu streng und bei zu kleinen Stichprobengrößen zu liberal ist (Field, 2024; Razali & Wah, 2011), wurde die Normalverteilung ergänzend mithilfe von Histogrammen und QQ-Plots grafisch beurteilt.

Da keiner der Datensätze die Voraussetzungen für eine Varianzanalyse (ANOVA) (Lüpsen, 2021) erfüllte, wurde ein Generalisiertes lineares Modell (GLM) angewendet. Generalisierte lineare Modelle sind flexibel hinsichtlich der Verteilungsannahmen und ermöglichen statistische Tests auch bei Abweichungen von der Normalverteilung. Dabei wurde im Vorfeld die Verteilung der Daten mittels Maximum-Likelihood-Methode (Dormann, 2012) überprüft, wobei auf Basis von AIC-Werten die geeignetste Verteilung (z. B. Poisson, Binomial, Gamma) gewählt wurde. Basierend auf der ermittelten Verteilung analysierte das GLM, ob signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten in Bezug auf die untersuchten Parameter bestehen. Post-hoc-Analysen zur Ermittlung signifikanter Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahrensketten erfolgten mittels Tukey-Test, unter der Annahme homogener Varianzen (Köhler et al., 2012).

5.2 Feldversuche 2022

Das folgende Kapitel enthält die technische Beschreibung des Rotationsschleifers sowie die Durchführung, Ergebnisse und Diskussion der Feldversuche des Jahres 2022. Abschließend wird ein Zwischenfazit gezogen, das die Konsequenzen für die Versuchssaison 2023 berücksichtigt.

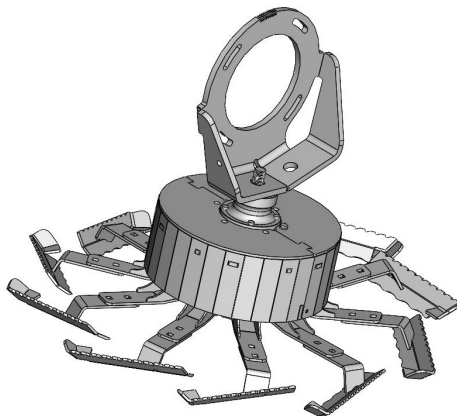
5.2.1 Beschreibung Rotationsschleifer Version 2 Stand 2022

In den Vorversuchen des Jahres 2021 wurden der Rotor und die Werkzeuge der Version 1 intensiv auf Getreide-, Raps- und Silomaisstoppeln sowie beim Umbruch abgefrorener Zwischenfrüchte getestet. Nach Winterraps

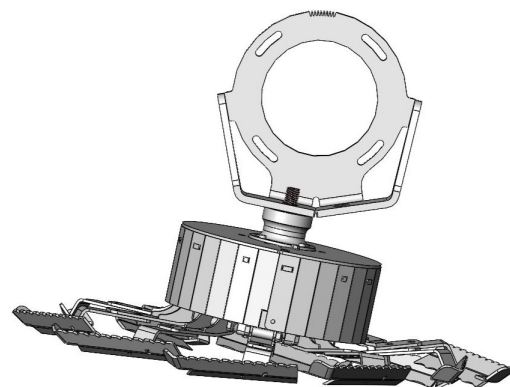
und abgefrorenen Zwischenfrüchten fiel insbesondere die streifenförmige Bodenbearbeitung und die Ablage des organischen Materials in leichten Schwaden auf. Nach Wintergetreide zeigte sich zudem, dass die Werkzeuge nicht in den Boden eindringen konnten, da die Werkzeughalter bei Bodenkontakt nachgaben und die erforderliche Eindringkraft nicht erreicht wurde.

Für die Feldversuche im Jahr 2022 wurde daher der Rotor der Version 1 durch die überarbeitete Variante Rotor Version 2 ersetzt (Abbildung 5.3). Die Rotoraufnahme blieb unverändert. Ein zentrales Merkmal des neuen Rotors Version 2 ist ein überarbeitetes Ausgleichssystem zur Boden Anpassung und Tiefenführung der Werkzeuge, das als wesentliches Konstruktionsmerkmal eingeführt wurde. Lager und Befestigung an der Rotoraufnahme wurden beibehalten.

Ein mit Luft gefüllter Reifen, an dem die Werkzeugträger anliegen, ist am Lager angeflanscht. Dieses System sorgt dafür, dass die Werkzeuge einerseits durch den Luftdruck im Reifen vorgespannt sind und so Druck auf den Boden ausüben können. Andererseits fungiert dieses Ausgleichssystem als Steinsicherung. Wie bei der Version 1 umfasst diese Konstruktion zehn Werkzeugaufnahmen. Die Werkzeugaufnahmen bestehen aus Flacheisen, die parallel zur Bodenoberfläche verlaufen. Die Werkzeuge sind mit zwei Schrauben an den Werkzeugaufnahmen befestigt.



Rotor Version 2



Rotor Version 2 Frontalansicht

Abbildung 5.3: Rotor Version 2 (2022)

Die Werkzeuge der Version 2 sind nicht mehr als Kantteile ausgeführt, sondern mit dem Werkzeugstiel verschweißt. Analog zu Version 1 sind die

Werkzeugkanten gezackt ausgeführt.

5.2.2 Durchführung

Im Jahr 2022 begann die Versuchsserie mit der Ernte von Wintergerste am 5. Juli. Winterraps und Winterweizen wurden am 24. Juli bzw. am 3. August geerntet.

Im Anschluss an die Wintergerstenernte erfolgte zunächst eine Bonitur. Danach wurden die Versuchspartzellen angelegt und im weiteren Verlauf regelmäßig bonitiert (siehe Tabelle 5.6). Aufgrund der hohen Strohmenen konnte die Verfahrenskette S/GFZE jedoch nicht wie geplant umgesetzt werden. Die Großfederzinkenegge arbeitete nicht verstopfungsfrei, weshalb die betroffenen Parzellen abschließend mit der Kurzscheibenegge bearbeitet wurden. Die Verfahrenskette wurde entsprechend als S/KSE weitergeführt.

Tabelle 5.6: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Wintergerste Kötterbreite 2022

Datum	Maßnahme	Verfahrenskette / Boniturmaßnahme	Bodenbearbeitungsgerät / Boniturequipment
05.07.2022	Ernte		
10.07.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
12.07.2022	Bodenbearbeitung	GS2	Rotationsschleifer
		GS3	Rotationsschleifer
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/KSE	Strohstriegel
18.07.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
19.07.2022	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
02.08.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
03.08.2022	Bodenbearbeitung	GS2	Rotationsschleifer
		GS3	Rotationsschleifer
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/KSE	Kurzscheibenegge
10.08.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
19.08.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV

Analog zur Wintergerste auf der Versuchsfläche Kötterbreite konnte die Großfederzinkenegge auch nach Winterweizen nicht verstopfungsfrei eingesetzt werden. Daher wurde die Variante GS/GFZE nicht wie ursprünglich geplant umgesetzt. Stattdessen erfolgten zwei Arbeitsgänge mit dem Rotationsschleifer, sodass die Parzellen als GS2 weitergeführt wurden. In der Verfahrenskette GS3 kam der Rotationsschleifer hingegen dreimal zum Einsatz.

Tabelle 5.7: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterweizen Heide groß 2022

Datum	Maßnahme	Verfahrenskette / Boniturmaßnahme	Bodenbearbeitungsgerät / Boniturequipment
03.08.2022	Ernte		
04.08.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
	Bodenbearbeitung	GS2	Rotationsschleifer
		GS3	Rotationsschleifer
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/KSE	Strohstriegel
22.08.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
	Bodenbearbeitung	GS2	Rotationsschleifer
		GS3	Rotationsschleifer
		KSE	keine Bodenbearbeitung
		S/KSE	Strohstriegel
05.09.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
12.09.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
13.09.2022	Bodenbearbeitung	GS2	keine Bodenbearbeitung
		GS3	Rotationsschleifer
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/KSE	Kurzscheibenegge
29.09.2022	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV

Ähnlich wie bei den Versuchsflächen zur Stoppelbearbeitung nach Wintergerste und Winterweizen war der Versuch nach Winterraps durch anhaltende Trockenheit und geringe Niederschlagsmengen geprägt (siehe Abbildung 5.1). Aufgrund starker Winderosion, die durch Testfahrten auf Teilflächen außerhalb des Versuchs ausgelöst wurde, wurde der Versuch nach der Bonitur am 23.08.2022 abgebrochen. Eine dritte Bodenbearbeitungsmaßnahme zur Ausfallrapsbekämpfung konnte im Versuchszeitraum daher nicht durchgeführt werden. In der Verfahrenskette KSE wurde somit lediglich eine Bodenbearbeitung vorgenommen.

Tabelle 5.8: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterraps Höte Menne Windmühle 2022

Datum	Maßnahme	Verfahrenskette / Boniturmaßnahme	Bodenbearbeitungsgerät / Boniturequipment
24.07.2022	Ernte		
25.07.2022	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/GS	Strohstriegel
		S/KSE	Strohstriegel
05.08.2022	Bonitur	NDVI	UAV
06.08.2022	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
08.08.2022	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		KSE	keine Bodenbearbeitung
		S/GS	Strohstriegel
		S/KSE	Strohstriegel
10.08.2022	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
11.08.2022	Bonitur	NDVI	UAV
23.08.2022	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV

5.2.3 Ergebnisse

Wintergerste 2022 Zu Versuchsbeginn am 10.07.2022 wurden auf der Versuchsfläche durchschnittlich 0,55 Pflanzen pro m² bonitiert. Sechs Tage nach der ersten Bodenbearbeitung konnte in keiner der Parzellen eine Pflanze mit dem Zählrahmen erfasst werden. Am 02.08.2022 waren je nach Verfahrenskette durchschnittlich 16,7 Pflanzen pro m² in der Verfahrenskette GS und 34,65 Pflanzen pro m² in der Verfahrenskette KSE aufgelaufen, wobei die Verfahrensketten GS und KSE signifikante Unterschiede aufwiesen.

Am 10.08.2022 wurden durchschnittlich 2,9 bis 4,05 Pflanzen pro m² gezählt, wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verfahrensketten erkennbar waren. Auch neun Tage später blieben signifikante Unterschiede aus, allerdings zeigte die Verfahrenskette GS mit durchschnittlich 20,95 Pflanzen pro m² tendenziell die höchste Pflanzendichte.

Auffällig war über die Versuchsdauer hinweg die hohe Standardabweichung der Daten am 18. Juli, 02. August und 19. August 2022 (siehe Abbildung 5.4).

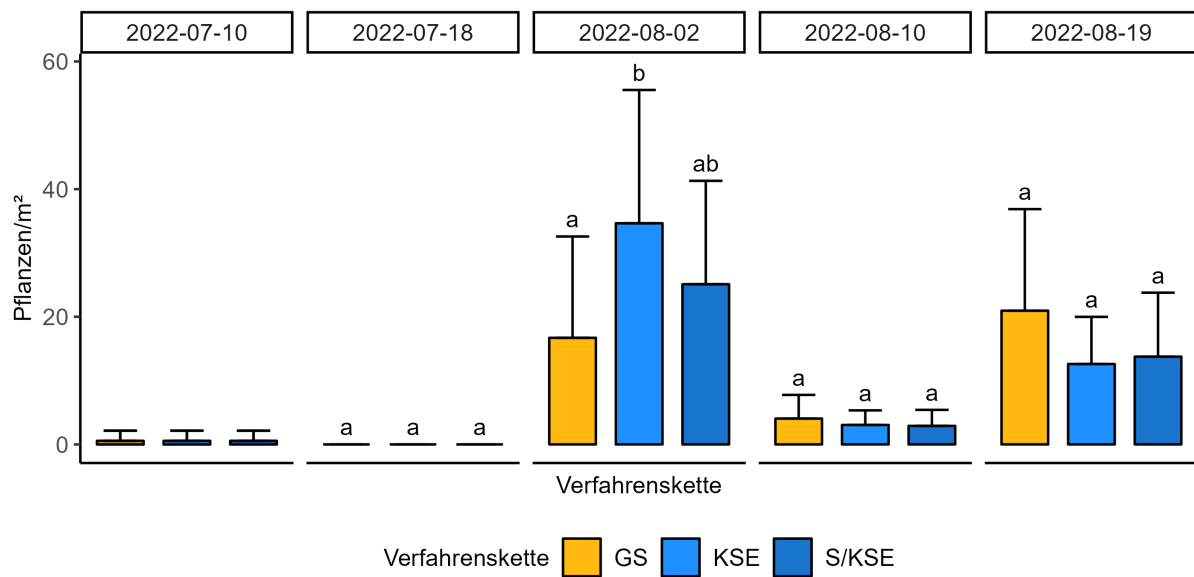


Abbildung 5.4: Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Der durchschnittliche Vegetationsdeckungsgrad blieb während des gesamten Versuchszeitraums mit maximal 1,43 % sehr gering. Eine Woche nach der ersten Bodenbearbeitung konnten weder signifikante noch tendenzielle Unterschiede zwischen den Verfahrensketten festgestellt werden.

Am 02. August 2022 zeigte die Verfahrenskette KSE mit einem durchschnittlichen Vegetationsdeckungsgrad von 1,41 % etwa den dreifachen Wert im Vergleich zu den übrigen Varianten. Sieben Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung war der Vegetationsdeckungsgrad in der Verfahrenskette KSE am niedrigsten, wobei der Unterschied zur Verfahrenskette GS

signifikant war.

Bis zur Abschlussbonitur stieg der Vegetationsdeckungsgrad in allen Verfahrensketten an. Am 19. August 2022 waren jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verfahrensketten mehr erkennbar (siehe Abbildung 5.5).

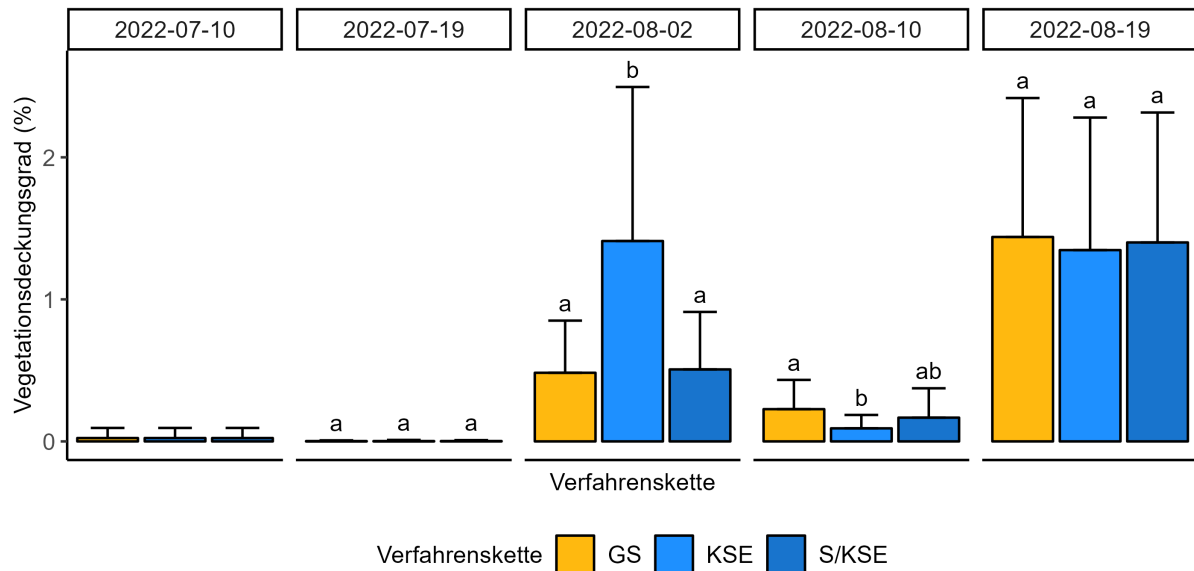


Abbildung 5.5: Vegetationsdeckungsgrad Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Die Verfahrensketten zeigten zu keinem Zeitpunkt signifikante Unterschiede im NDVI, der insgesamt mit durchschnittlichen Werten zwischen 0,06 und 0,14 gering ausfiel.

Tendenziell wies die Verfahrenskette KSE am 19.07.2022 und am 02.08.2022 einen niedrigeren NDVI auf als die Verfahrensketten GS und S/KSE.

Am 19.08.2022 lag der NDVI der Verfahrenskette GS tendenziell leicht über den Werten der Verfahrensketten KSE und S/KSE (siehe Abbildung 5.6).

Der Mulchdeckungsgrad lag vor Versuchsbeginn bei 99,85 %. Nach der ersten Stoppelbearbeitung fiel der Mulchdeckungsgrad in der Verfahrenskette KSE signifikant unter den der anderen Verfahrensketten, betrug jedoch noch durchschnittlich 92,68 %. Während der Mulchdeckungsgrad in

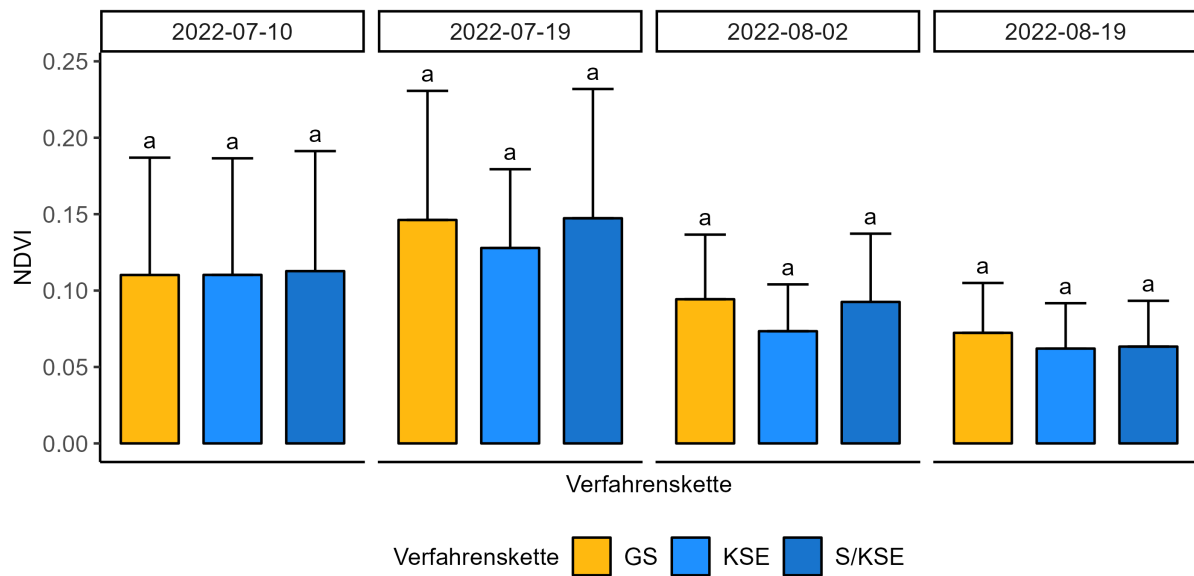


Abbildung 5.6: NDVI Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

der Verfahrenskette KSE bis zum zweiten Bodenbearbeitungstermin weiter sank, blieb er in den übrigen Verfahrensketten nahezu konstant bei etwa 98 %.

Eine Woche nach der zweiten Bodenbearbeitung war der Mulchdeckungsgrad in der Verfahrenskette GS signifikant höher als in den anderen Verfahrensketten. KSE wies mit durchschnittlich 76,36 % den niedrigsten Mulchdeckungsgrad auf, der zudem signifikant unter dem Wert der Verfahrenskette S/KSE lag (siehe Abbildung 5.7).

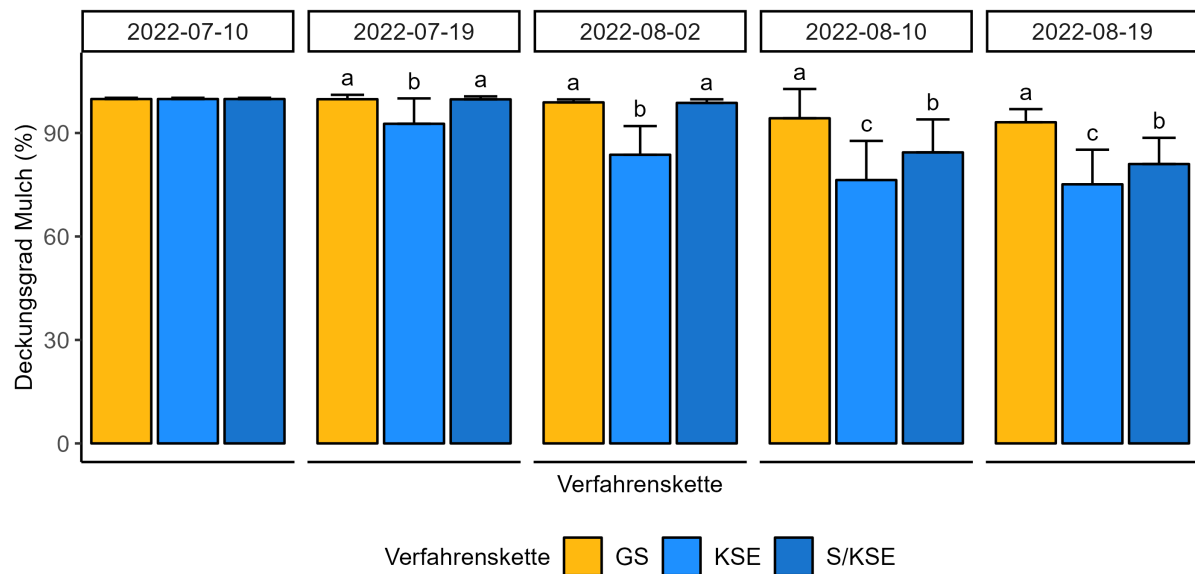


Abbildung 5.7: Deckungsgrad Mulch Wintergerste Kötterbreite 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Winterweizen 2022 Bei der Bonitur am 22. August 2022 konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Verfahrensketten festgestellt werden. Die Anzahl der Pflanzen pro Quadratmeter war insgesamt mit durchschnittlich 1,85 bis 2,35 Pflanzen sehr gering. Nach der zweiten Bodenbearbeitung in den Verfahrensketten GS2, GS3 und S/KSE war die Pflanzendichte am 05. und 12. September in diesen Varianten signifikant niedriger als in der Verfahrenskette KSE. In KSE wurden durchschnittlich 8,95 Pflanzen pro m² bonitiert, während in den übrigen Verfahrensketten lediglich 1,95 bis 3,2 Pflanzen pro m² gezählt wurden. Etwa zwei Wochen nach der dritten Stoppelbearbeitungsmaßnahme unterschieden sich die Verfahrensketten GS2 und KSE signifikant, wobei KSE eine geringere Pflanzendichte aufwies. Zum Abschluss des Versuches wurden in allen Verfahrensketten durchschnittlich 34,25 bis 53,2 Pflanzen pro m² bonitiert (siehe Abbildung 5.8).

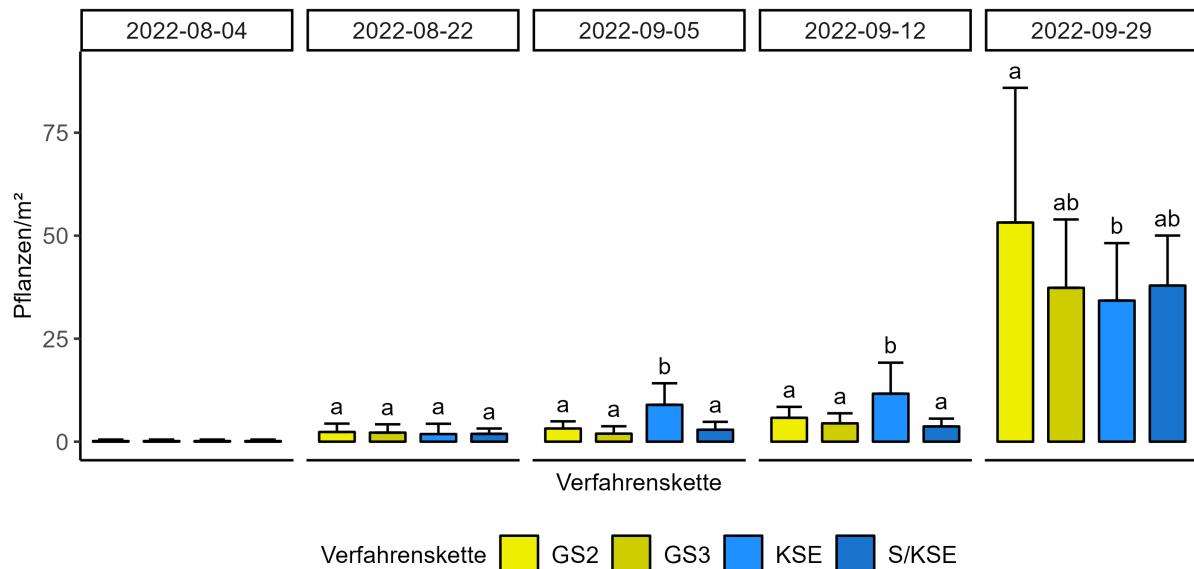


Abbildung 5.8: Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Sechzehn Tage nach der ersten Stoppelbearbeitung war der Vegetationsdeckungsgrad in der Verfahrenskette KSE signifikant höher als in GS3 und S/KSE. Dennoch blieb der durchschnittliche Vegetationsdeckungsgrad mit Werten zwischen 0,07 und 0,16 % insgesamt sehr gering. Nach der zweiten Stoppelbearbeitungsmaßnahme wurden am 12. September 2022 Vegetationsdeckungsgrade von durchschnittlich 0,40 % in der Verfahrenskette GS3

bis 1,40 % in der Verfahrenskette KSE gemessen. Der Vegetationsdeckungsgrad von KSE war signifikant größer als in den anderen Verfahrensketten, wobei GS3 tendenziell geringere Werte aufwies als GS2 und S/KSE.

Bei der Abschlussbonitur am 29. September 2022 zeigte GS2 mit einem durchschnittlichen Vegetationsdeckungsgrad von 1,19 % signifikant höhere Werte als die übrigen Verfahrensketten. KSE hatte mit durchschnittlich 0,79 % den niedrigsten Vegetationsdeckungsgrad, wobei der Unterschied nur zu GS2 und S/KSE signifikant war (siehe Abbildung 5.9).

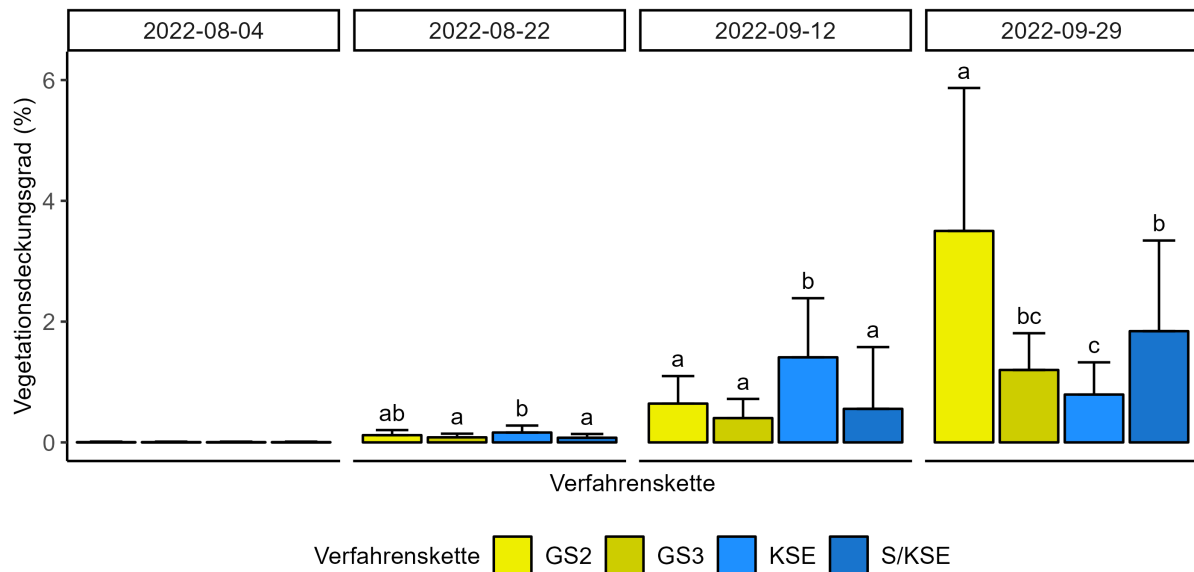


Abbildung 5.9: Vegetationsdeckungsgrad Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Signifikante Unterschiede im NDVI traten lediglich am 12. September 2022 zwischen den Verfahrensketten S/KSE und GS3 auf. Tendenziell zeigte die Verfahrenskette KSE am 22. August 2022 einen geringeren durchschnittlichen NDVI im Vergleich zu den übrigen Verfahrensketten. Bei der Abschlussbonitur am 29. September 2022 wies GS2 tendenziell einen höheren NDVI auf als GS3, KSE und S/KSE (siehe Abbildung 5.10).

Die erste Stoppelbearbeitung reduzierte den Mulchdeckungsgrad in der Verfahrenskette KSE signifikant auf durchschnittlich 87,01 %, während die anderen Verfahrensketten zu diesem Zeitpunkt noch durchschnittliche Mulchdeckungsgrade von etwa 99 % aufwiesen. Zwischen GS2, GS3 und S/KSE traten bis zur Abschlussbonitur keine signifikanten Unterschiede

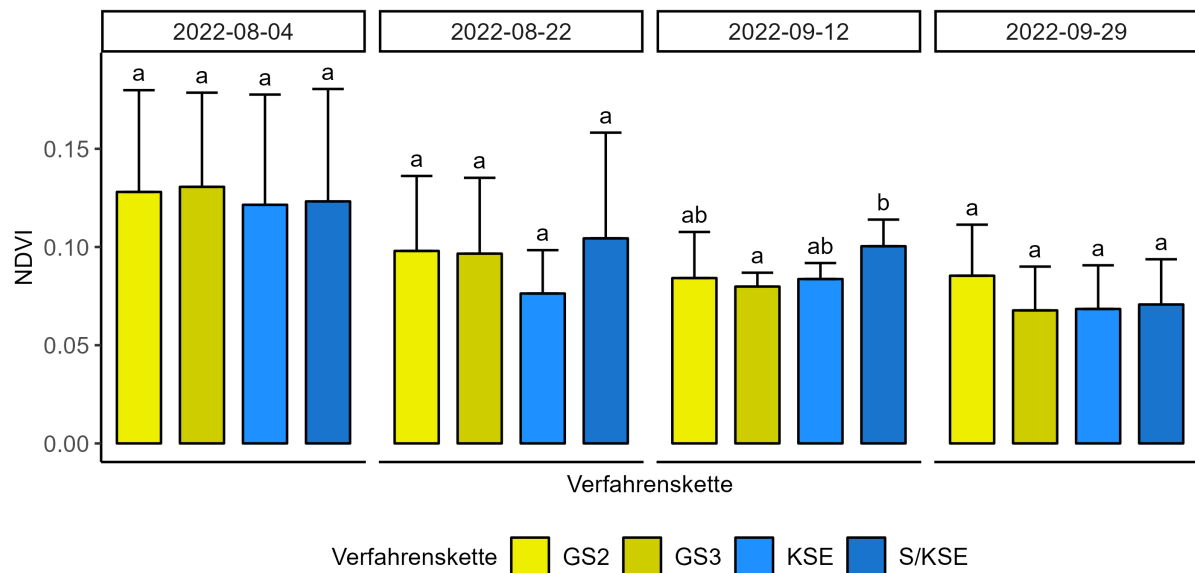


Abbildung 5.10: NDVI Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

auf. Im Laufe des Versuchs verringerte sich die Mulchauflage in allen Verfahrensketten, wobei nach Abschluss der Bodenbearbeitung in allen Parzellen noch mindestens 77 % der Bodenoberfläche mit Ernterückständen bedeckt war. Am 29. September 2022 wurde in den Verfahrensketten GS2, GS3 und S/KSE ein signifikant höherer Mulchdeckungsgrad von etwa 91 %, 90 % bzw. 90 % gegenüber KSE bonitiert (siehe Abbildung 5.11).

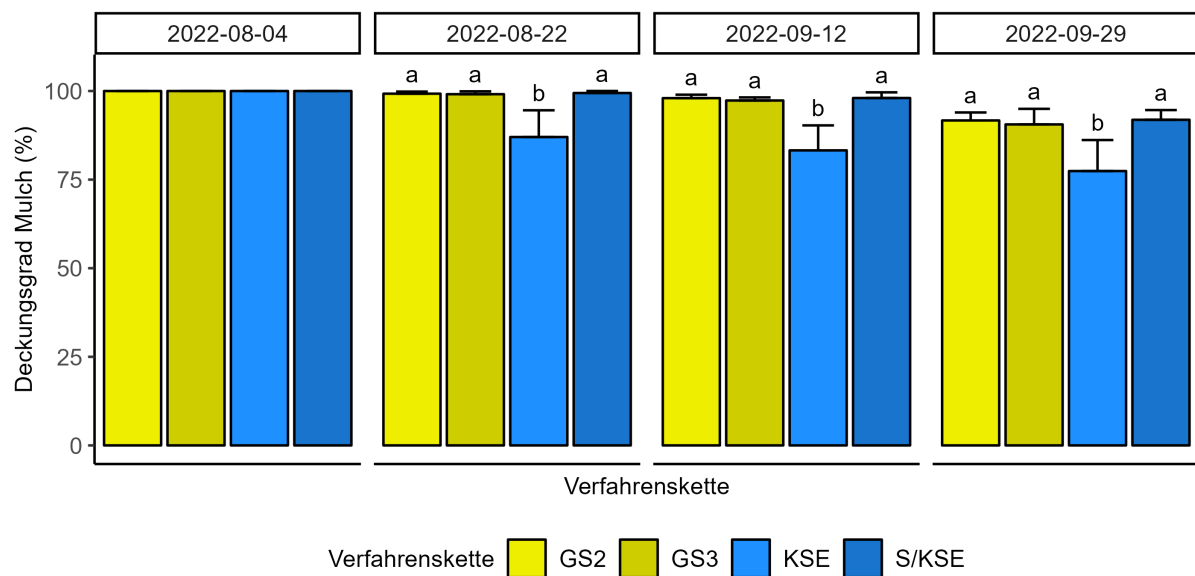


Abbildung 5.11: Deckungsgrad Mulch Winterweizen Heide groß 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Winterraps 2022 Bereits die erste Stoppelbearbeitung nach Winterraps führte bei der Bonitur am 08.06.2022 zu signifikanten Unterschieden zwischen den Verfahrensketten KSE, S/GS und S/KSE. Letztere wies mit 9,76 % den höchsten Vegetationsdeckungsgrad auf. Am 10.08.2022 unterschieden sich S/GS und S/KSE nicht signifikant, jedoch war der Vegetationsdeckungsgrad der Verfahrenskette GS mit durchschnittlich 0,49 % signifikant niedriger als bei den übrigen Verfahrensketten. KSE erreichte mit durchschnittlich 6,93 % den höchsten Vegetationsdeckungsgrad. Knapp zwei Wochen später stieg der Vegetationsdeckungsgrad in allen vier Verfahrensketten deutlich an, wobei die Proportionen ähnlich blieben wie am 10.08.2022 (siehe Abbildung 5.12).

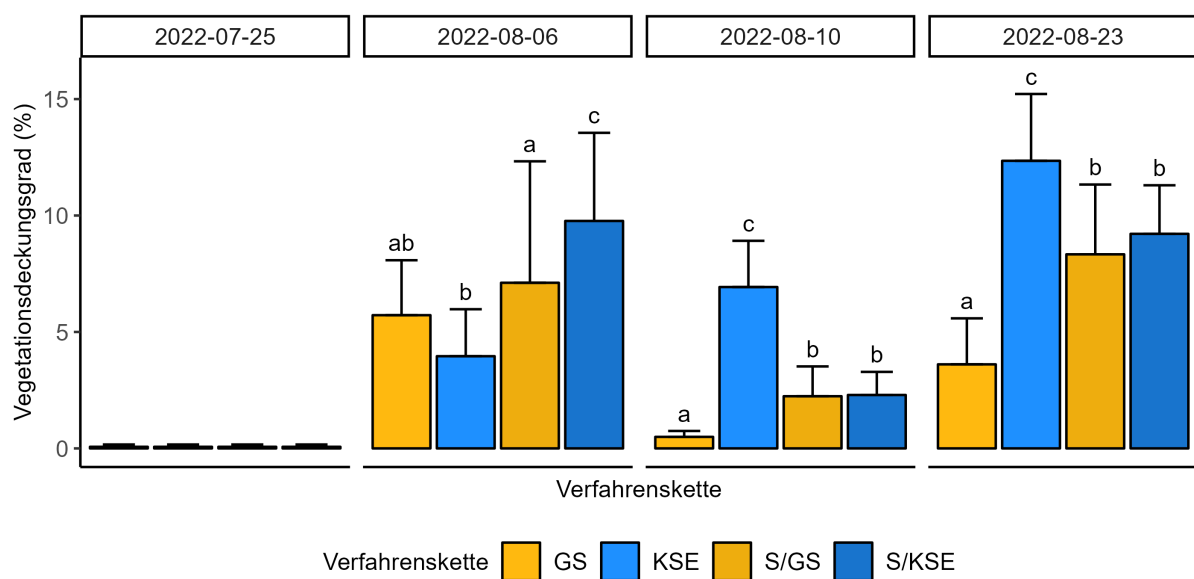


Abbildung 5.12: Vegetationsdeckungsgrad Winterraps Höte Menne Windmühle 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Im gesamten Versuchsverlauf zeigten die Verfahrensketten keine signifikanten Unterschiede im NDVI. Am 05.08.2022 lag der durchschnittliche NDVI der Verfahrenskette KSE tendenziell unter dem der anderen Verfahrensketten. Sechs Tage später waren die NDVI-Werte von S/GS und S/KSE auf einem vergleichbaren Niveau, während GS tendenziell den niedrigsten und KSE den höchsten NDVI aufwies. Dieser Trend setzte sich bis zur Abschlussbonitur am 23.08.2023 fort (siehe Abbildung 5.13).

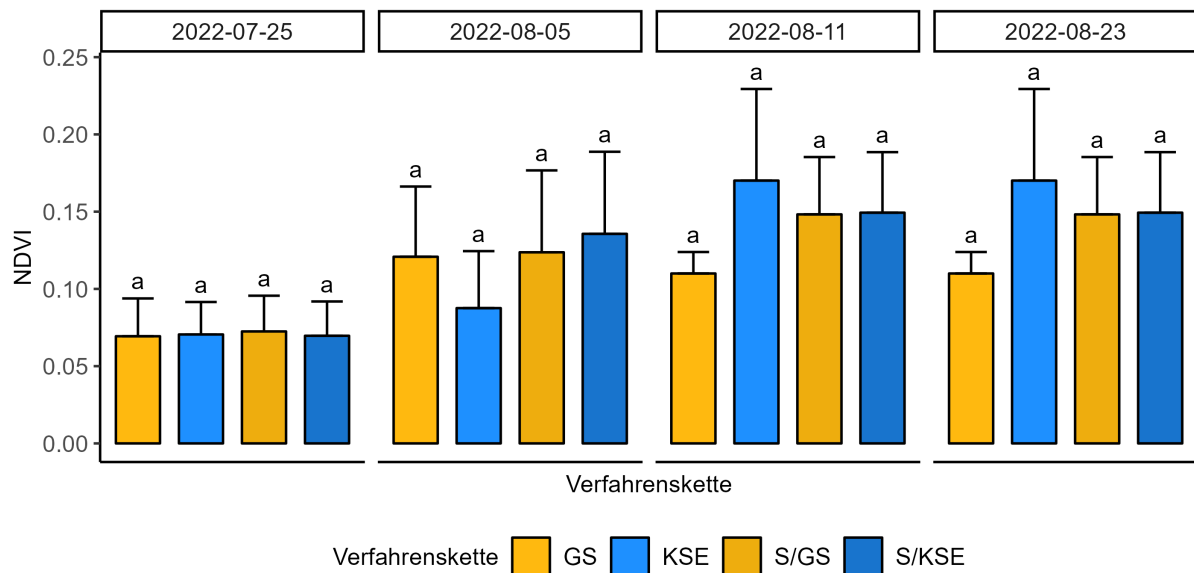


Abbildung 5.13: NDVI Winterraps Höte Menne Windmühle 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Nach der ersten Bodenbearbeitung wies die Verfahrenskette KSE mit durchschnittlich 60,08 % einen signifikant geringeren Mulchdeckungsgrad auf als die anderen Verfahrensketten, deren Mulchdeckungsgrad zwischen 82 % und 85 % lag. Im weiteren Versuchsverlauf nahm die Mulchauflage in allen Parzellen ab, wobei ab dem 10.08.2022 S/GS und S/KSE einen signifikant höheren Mulchdeckungsgrad zeigten als GS und KSE. Bei der Abschlussbonitur am 23.08.2022 wurde in der Verfahrenskette KSE mit 44,39 % der niedrigste durchschnittliche Mulchdeckungsgrad ermittelt, während S/GS und S/KSE mit etwa 76 % die signifikant höchsten Werte aufwiesen (siehe Abbildung 5.14).

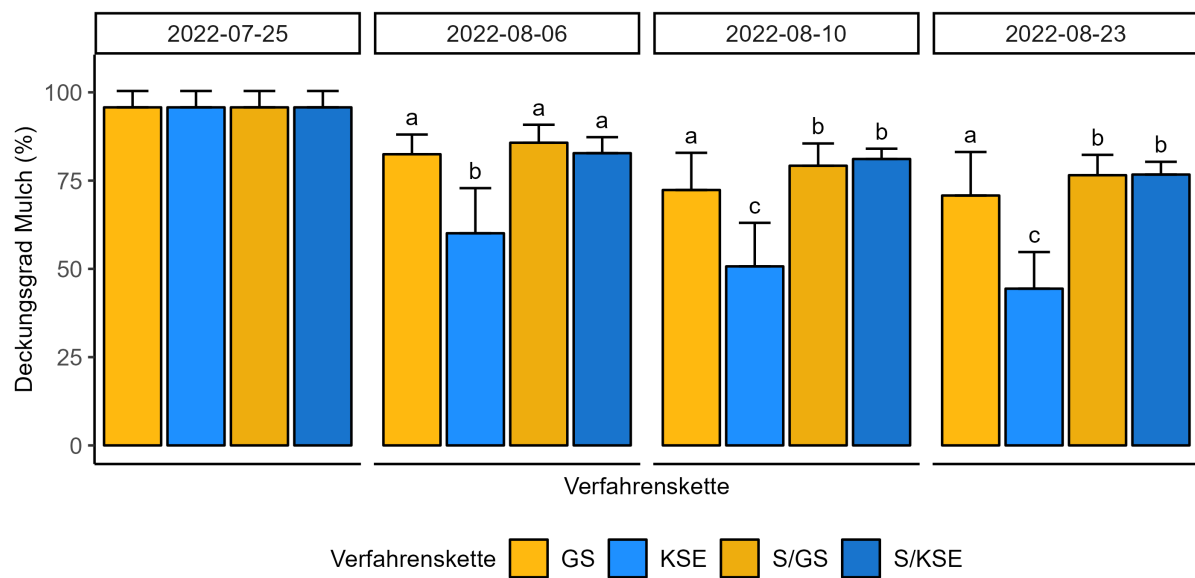


Abbildung 5.14: Deckungsgrad Mulch Winterraps Höte Menne Windmühle 2022. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Kraftstoffverbrauch 2022 Bei der Stoppelbearbeitung nach Wintergerste 2022 war der Kraftstoffverbrauch in der Verfahrenskette GS mit 6,85 l/ha am geringsten, gefolgt von S/KSE mit 7,45 l/ha und KSE mit 9,35 l/ha. Nach der Winterweizenernte erzielte die Verfahrenskette GS2 den niedrigsten Kraftstoffverbrauch mit 5,3 l/ha, gefolgt von S/KSE mit 6,45 l/ha. GS3 und KSE verbrauchten mit 8,6 bzw. 8,8 l/ha mehr Kraftstoff als die anderen Verfahrensketten. Nach Winterraps schwankte der Kraftstoffverbrauch zwischen 3,1 l/ha in der Verfahrenskette S/GFZE und 5,7 l/ha in GS (siehe 5.9).

Je nach Kultur und Einsatzzeitpunkt variierte der Kraftstoffverbrauch der eingesetzten Arbeitsgeräte zwischen 1,65 l/ha beim Strohstriegel nach Winterweizen und 5,05 l/ha beim Einsatz der Kurzscheibenegge nach Wintergerste. Der Rotationsschleifer führte zu Kraftstoffverbräuchen zwischen 2,65 l/ha nach Winterweizen und im zweiten Arbeitsgang nach Winterraps sowie 3,45 l/ha im zweiten Arbeitsgang nach Wintergerste.

Tabelle 5.9: Kraftstoffverbrauch 2022

Kultur	Verfahrenskette	Bodenbearbeitungsgerät	Arbeitsgang	Kraftstoffverbrauch (l/ha)
Wintergerste	GS	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	3,40
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	3,45
			Gesamt	6,85
	KSE	Kurzscheibenegge	1. Arbeitsgang	5,05
		Kurzscheibenegge	2. Arbeitsgang	4,30
			Gesamt	9,35
	S/KSE	Strohstriegel	1. Arbeitsgang	2,65
		Kurzscheibenegge	2. Arbeitsgang	4,80
			Gesamt	7,45
	GS2	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	2,65
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,65
			Gesamt	5,3
	GS3	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	2,65
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,65
		Rotationsschleifer	3. Arbeitsgang	3,30
Winterweizen	GS2	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	2,65
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,65
			Gesamt	5,3
	GS3	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	2,65
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,65
		Rotationsschleifer	3. Arbeitsgang	3,30
	KSE	Kurzscheibenegge	1. Arbeitsgang	4,55
		keine Bodenbearbeitung	2. Arbeitsgang	
		Kurzscheibenegge	3. Arbeitsgang	4,25
	S/KSE	Strohstriegel	1. Arbeitsgang	1,65
		Strohstriegel	2. Arbeitsgang	1,70
		Kurzscheibenegge	3. Arbeitsgang	3,10
Winterraps	GS	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	3,05
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,65
			Gesamt	5,70
	KSE	Kurzscheibenegge	1. Arbeitsgang	4,60
		Kurzscheibenegge	2. Arbeitsgang	
			Gesamt	4,60
	S/GS	Strohstriegel	1. Arbeitsgang	3,10
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,65
			Gesamt	5,75
	S/GFZE	Strohstriegel	1. Arbeitsgang	3,10
		keine Bodenbearbeitung	2. Arbeitsgang	
			Gesamt	3,10

5.2.4 Diskussion

Die Versuchssaison 2022 war durch hohe Temperaturen und geringe Niederschläge in den Sommermonaten gekennzeichnet (siehe Abbildung 5.1). Besonders im Juli und August führten Lufttemperaturen von bis zu 36 Grad Celsius zu einer schnellen Austrocknung des Bodens. Infolgedessen waren die Keimraten von Ausfallgetreide und Ausfallraps gering. Vom berechneten Samenpotenzial der Ausfallsamen keimte nur ein relativ kleiner Anteil. Es konnte jedoch nicht bestimmt werden, ob dies auf eine geringe Keimung oder das Vertrocknen der Samen während oder unmittelbar nach der Keimung zurückzuführen war. Aufgrund der ausbleibenden oder geringen Niederschläge, auch in Form von Tau, stand nur das im Boden gespeicherte Wasser für die Keimung und das Pflanzenwachstum zur Verfügung.

Wintergerste 2022 Im Jahr 2022 konnte nach der Wintergerstenernte lediglich an zwei Terminen eine Bodenbearbeitung durchgeführt werden, da auf dem Versuchsbetrieb vor der Folgekultur Zuckerrübe grundsätzlich Zwischenfrüchte angebaut werden. Diese werden nach der Kalkung, organischen Düngung und Grundbodenbearbeitung ausgesät, was das Zeitfenster für die Stoppelbearbeitung stark verkürzt. Hohe Erträge und Strohmenngen sowie die trockene Witterung mit hohen Temperaturen und geringen Niederschlagsmengen prägten die Stoppelbearbeitung nach Wintergerste im Jahr 2022. Aufgrund der Trockenheit (siehe Abbildung 5.1) keimten nur wenige Ausfallsamen, sodass die Entscheidung getroffen wurde, die Bodenbearbeitung möglichst zu minimieren, um Restfeuchtigkeit für die Zwischenfrucht zu erhalten.

Ein markantes Merkmal war der geringe Vegetationsdeckungsgrad während des gesamten Versuchsverlaufs. Der durchschnittliche Vegetationsdeckungsgrad lag unter 2 %, und der Höchstwert betrug weniger als 3 %. Auch die Anzahl der Pflanzen pro Quadratmeter war gering: Maximal wurden weniger als 60 Pflanzen pro Quadratmeter gezählt, wobei der höchste Durchschnittswert in der Verfahrenskette KSE bei nur 34,65 Pflanzen pro m² lag. Am ersten Boniturtermin, acht bzw. neun Tage nach der Stoppelbearbeitung, war noch keine Ausfallgerste aufgegangen, da aufgrund der hohen Temperaturen und geringen Niederschläge im Juli kein Keimwasser im Bearbeitungshorizont verfügbar war. Erst die Niederschläge vom 20. bis 22. Juli 2022 führten zur Keimung, was sich bei der Bonitur am 02.08.2022 in einer deutlich größeren Anzahl von Pflanzen pro Quadratmeter wider-

spiegelte. Unmittelbar nach der zweiten Stoppelbearbeitung am 03.08.2022 fielen 7,9 mm Niederschlag. Trotz dieser Niederschläge führte die Bodenbearbeitung dazu, dass am 10.08.2022 eine deutlich geringere Anzahl von Pflanzen pro Quadratmeter und ein niedrigerer Vegetationsdeckungsgrad festgestellt wurden. Bei der Abschlussbonitur am 19.08.2022 konnte jedoch wieder eine höhere Anzahl von Pflanzen pro Quadratmeter und ein größerer Vegetationsdeckungsgrad verzeichnet werden. Da die absoluten Werte jedoch insgesamt niedrig blieben, lässt sich vermuten, dass dieser Anstieg in Verfahren mit anschließender Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung keine negativen Auswirkungen hatte.

Es ist zudem auffällig, dass die Verfahrenskette KSE tendenziell eine signifikant höhere Anzahl von Pflanzen pro Quadratmeter sowie einen höheren Vegetationsdeckungsgrad aufwies. Mit einer Bearbeitungstiefe von 5 cm wurden die Ausfallsamen deutlich tiefer in den Boden eingemischt als in den ultraflach bearbeiteten Varianten mit Rotationsschleifer und Strohsriegel. Da zu Beginn des Versuchs Trockenheit herrschte und weder Niederschläge noch Taubildung Keimwasser lieferten, konnten die tiefer eingearbeiteten Ausfallsamen die Restfeuchtigkeit im Boden nutzen und keimen. Im Gegensatz dazu bewirkte die ultraflache Bodenbearbeitung mit Rotationsschleifer und Strohsriegel keine ausreichende Einmischung der Samen in den Boden, da beide Geräte hauptsächlich nahe der Bodenoberfläche arbeiteten und dabei Stroh und Stoppen bearbeiteten. Die mit Ernterückständen vermischten Ausfallsamen hatten keinen Zugang zum Keimwasser und keine Verbindung zur Kapillarität des Bodens. Potentiell vorhandene Feuchtigkeit wurde vermutlich teilweise von den Ernterückständen gebunden. Zudem reduzierte die größere Arbeitstiefe der Kurzscheibenegge im zweiten Arbeitsgang den Vegetationsdeckungsgrad stärker als die ultraflache Bodenbearbeitung.

Winterweizen 2022 Unmittelbar nach der Winterweizenernte erfolgten sowohl die Bonitur als auch die Bodenbearbeitung. Wenige Stunden nach Abschluss der Bodenbearbeitung fielen 7,9 mm Niederschlag, und weitere 11,2 mm Niederschlag wurden vom 14. bis 20. August 2022 verzeichnet. Trotz dieser Niederschläge war die durchschnittliche Anzahl der Pflanzen pro m² sowie der Vegetationsdeckungsgrad am 22.08.2022 sehr gering. Analog zur Ausfallgerste profitierte der Ausfallweizen von der tieferen Einarbeitung durch die Kurzscheibenegge und dem damit verbesserten Zugang zum Keimwasser. Da die optimale Saattiefe von Winterweizen bei drei

bis fünf Zentimetern (Photiades & Hadjichristodoulou, 1984) liegt und die Kurzscheibenegge mit einer Bearbeitungstiefe von 5 cm den Ausfallweizen in diesem Bereich einarbeitet, führten diese Bedingungen zu den höchsten Keimraten.

Am 05.09.2022 wies die Verfahrenskette KSE eine signifikant höhere Anzahl an Pflanzen pro m² auf als die anderen Verfahrensketten. Dies lässt sich durch die zweite Stoppelbearbeitung erklären: In den Parzellen der Verfahrensketten GS2, GS3 und S/KSE wurde der Ausfallweizen durch die Bodenbearbeitung am 22.08.2022 bekämpft. Bereits gekeimter Ausfallweizen in der Verfahrenskette KSE konnte jedoch weiterwachsen, da in dieser Verfahrenskette am 22.08.2022 keine Bodenbearbeitung durchgeführt wurde. Trotz des Ausbleibens der Bodenbearbeitung in der Verfahrenskette KSE konnte aufgrund ausreichender Keimwasserversorgung weiterer Ausfallweizen keimen.

Ausgiebige Niederschläge vom 6. bis 19. September führten dazu, dass die Anzahl der Pflanzen pro m² sowie der Vegetationsdeckungsgrad in allen Parzellen weiter anstiegen, obwohl am 13.09.2022 eine dritte Stoppelbearbeitung unter guten Bedingungen in einer Regopause stattgefunden hatte. Diese Entwicklung setzte sich bis zur Abschlussbonitur fort, bei der sowohl die Anzahl der Pflanzen pro m² als auch der Vegetationsdeckungsgrad am höchsten waren. Zwischen dem 12.09.2022 und dem 29.09.2022 stiegen diese Werte in allen Parzellen. In der Verfahrenskette GS2 wurde beim dritten Bearbeitungstermin keine Bodenbearbeitung durchgeführt. Die signifikant höhere Anzahl an Pflanzen pro m² und der signifikant höhere Vegetationsdeckungsgrad im Vergleich zu KSE sowie zu GS3 und S/KSE deuten darauf hin, dass mit der dritten Stoppelbearbeitung der Ausfallweizen effektiv bekämpft wurde. Da auch in der Verfahrenskette GS2 die Anzahl der Pflanzen pro m² bis zum 29.09.2022 anstieg, lässt sich schlussfolgern, dass die Niederschläge in der zweiten Septemberhälfte – unabhängig von der Häufigkeit und Intensität der Bearbeitung – den weiteren Ausfallweizen zur Keimung anregten.

Winterraps 2022 Der Versuchszeitraum für die Stoppelbearbeitung nach Winterraps im Jahr 2022 fiel in eine ähnliche Periode wie der für die Stoppelbearbeitung nach Wintergerste. Hohe Temperaturen und ungleichmäßig verteilte, geringe Niederschlagsmengen prägten diesen Zeitraum. Bereits einen Tag nach der Ernte des Winterraps, am 25.07.2022, wurde die ers-

te Stoppelbearbeitung durchgeführt. Bis zur Bonitur am 05.08.2022 fielen insgesamt 13,2 mm Niederschlag, während die Temperaturen an drei Tagen über 30 °C stiegen, mit einem Höchstwert von 35,4 °C am 04.08.2022. Im Vergleich zu Ausfallgerste und Ausfallweizen war der Vegetationsdeckungsgrad insgesamt höher.

Die Kurzscheibenegge regte signifikant weniger Ausfallraps zur Keimung an als der Strohstriegel und wies auch gegenüber dem Rotationsschleifer tendenziell einen geringeren Vegetationsdeckungsgrad auf. Durch die größere Bearbeitungstiefe der Kurzscheibenegge wurde Ausfallraps tiefer in den Boden vergraben. Da mit zunehmender Einarbeitungstiefe die Dormanz von Ausfallraps zunimmt (Lutman et al., 2003), könnte die größere Arbeits- und Einarbeitungstiefe der Kurzscheibenegge zu geringeren Keimraten geführt haben. Es bleibt jedoch unklar, wie hoch der Anteil an vergrabenen, gekeimten, nicht gekeimten oder dormanten Samen im gesamten Ausfallrapsbestand war.

Der Strohstriegel und der Rotationsschleifer arbeiteten intensiv an der Bodenoberfläche, wo heruntergefallene und nicht ausgedroschene Schoten geöffnet wurden. Da zudem kein Ausfallraps vergraben und dormant wurde, konnte potentiell ein größerer Anteil Ausfallraps keimen.

Ein auffälliger Unterschied im Vegetationsdeckungsgrad zeigte sich zwischen den Verfahrensketten S/GS und S/KSE, obwohl die Parzellen identisch bearbeitet wurden. Eine mögliche Erklärung hierfür sind heterogene Bodenverhältnisse, die zu Unterschieden beim Ertrag führten. Unterschiedliche Ertragsmengen beeinflussen die potenziellen Druschverluste bei einem angestrebten Verlustniveau von 1 %. Differenzen im Kornertrag bedingen zudem Schwankungen in der Strohmenge, was sich negativ auf die Druschqualität auswirken kann.

Im Mähdrescher führt eine höhere Material- und Strohmenge zu unterschiedlichen Herausforderung, wenn ein möglichst verlustarmer Ausdrusch angestrebt wird. Unterschiede in den Strohmenngen können somit Differenzen bei den Schüttler- und Rotorverlusten verursachen. Auch Strohhäcksler und Spreuverteiler stellen potenzielle Fehlerquellen bei der Verteilung des Ausfallrapses dar. Selbst unter optimalen Bedingungen kann eine Verschlechterung der Bedingungen, etwa durch Wind, die Homogenität der Verteilung der Ausfallsamen beeinträchtigen (Köller & Hensel, 2019).

Hohe Temperaturen im Sommer 2022 führten zu einer schnellen Abreife der Rapsbestände, sodass die Wahrscheinlichkeit von unreifem Stroh und einer hohen Anzahl an Gummischoten gering gewesen ist. Gleichzeitig ist die Gefahr von aufgeplatzten Schoten abhängig von der Schotenplatzfestigkeit der Rapssorte bei reifen, trockenen Beständen hoch gewesen. Einige Rapssamen könnten daher bereits vor der Ernte ausgefallen sein. Da der Vegetationsdeckungsgrad am 25.07.2022 durchschnittlich bei unter 0,1 % lag, bleibt unklar, ob und wie viel Ausfallraps bereits vor der Ernte gekeimt und gegebenenfalls vertrocknet ist und wie hoch das Samenpotential vor der Ernte war.

Bei der Ernte selbst sind gerade in reifen, trockenen Beständen nicht nur Druschverluste sondern auch Schneidwerksverluste kaum zu vermeiden. An den Rapstrennmessern, am Messerbalken und auch an der Haspel kann es dazu kommen, dass Schoten aufplatzen und Rapssamen nicht in das Schneidwerk und die Zuführschnecke sondern neben dem Schneidwerk auf den Acker gelangen. Durch Bodenheterogenität bedingte Unterschiede in der Pflanzenentwicklung und z.B. auch in der Bestandeshöhe könnten somit auch zu Unterschieden bei den Schneidwerksverlusten geführt haben.

Unterschiede zwischen S/GS und S/KSE können aufgrund dessen bereits vor der Ernte durch heterogene Bestände und Auswirkungen auf Ertrag und Druschqualität vorhanden gewesen sein. Bodenheterogenität kann sich auch nach der Rapsernte auf die Entwicklung von Ausfallraps auswirken, insbesondere unter trockenen Bedingungen. Abhängig von der Bodenart und der Korngrößenverteilung sowie dem Relief könnte es im Sommer 2022 Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit gegeben haben, die sich auch auf die Keimrate von Ausfallraps ausgewirkt haben könnte.

Die zweite Stoppelbearbeitung am 08.08.2022 in den Verfahrensketten GS, S/GS und S/KSE mit Rotationsschleifer bzw. Strohstriegel reduzierte den Ausfallraps innerhalb von zwei bis drei Tagen deutlich. Hohe Temperaturen und ausbleibende Niederschläge bewirkten ein Austrocknen der aus dem Boden herausgearbeiteten Ausfallrapspflanzen. Der Strohstriegel konnte im Vergleich zum Rotationsschleifer den Ausfallraps nicht flächig bearbeiten und entwurzeln, was sich in einem signifikant höheren Vegetationsdeckungsgrad widerspiegelt hat. Da der Boden zum Zeitpunkt der zweiten Stoppelbearbeitung oberflächlich trocken und hart war, konnten die Striegelzinken des Strohstriegels den Ausfallraps nicht entwurzeln oder verschütten.

Trotz 11,2 mm Niederschlag vom 14.08.2022 bis 20.08.2022 führte ein Testeininsatz des Rotationsschleifer außerhalb der Versuchsfläche zu massiver Winderosion, weshalb keine dritte Stoppelbearbeitung durchgeführt worden ist. Entsprechend konnte bereits gekeimter Ausfallraps weiterwachsen und der Vegetationsdeckungsgrad war am 23.08.2022 in allen Parzellen höher als am 10.08.2022. Da der Ausfallraps nicht gezählt worden ist, bleibt unklar, ob durch die zweite Stoppelbearbeitung in den Verfahrensketten GS, S/GS und S/KSE Ausfallraps zur Keimung angeregt wurde und der Pflanzenbestand zu Versuchsende primär aus nicht bekämpftem Ausfallraps der ersten Keimwelle oder neu gekeimten Pflanzen aus einer zweiten Keimwelle stammt.

Mulchdeckungsgrad 2022 Die differenzierte Bodenbearbeitung führte nach Wintergerste, Winterweizen und Winterraps zu unterschiedlich hohen Mulchdeckungsgraden. Während ultraflach arbeitende Bodenbearbeitungsgeräte die Ernterückstände größtenteils an der Bodenoberfläche belassen, werden diese bei Einsatz einer Kurzscheibenegge in größerer Arbeitstiefe mit Erde vermischt. Dadurch nimmt die Bodenbedeckung mit pflanzlichem Material ab. Die intensivere und tiefere Bodenbearbeitung fördert zudem die Mineralisation im Boden, was zu einer erhöhten Freisetzung von Stickstoff aus der organischen Substanz (Kandeler et al., 1999) und einer beschleunigten Zersetzung der Ernterückstände führen kann.

Nach der Winterrapsernte ging der Mulchdeckungsgrad im Vergleich zu Wintergerste und Winterweizen stärker zurück. Trotz des höheren Korn-Stroh-Verhältnisses von Winterraps verbleibt aufgrund deutlich geringerer Erträge eine geringere Strohmenge auf dem Feld.

Martin Hänsel et al. (2014) ermittelten nach der Getreideernte die Bodenbedeckung mit Ernterückständen. Unterschiede bestanden zwischen Lössböden und sandigen Böden. Letztere wiesen etwa 10 % geringere Mulchdeckungsgrade auf, was unter anderem durch geringere Erträge auf den sandigen Böden zurückgeführt wird. Die Bodenbedeckung mit Ernterückständen nach Getreideernte und Strohbergung war mit 59 % gegenüber vergleichbaren Flächen ohne Strohbergung etwa 30 bis 36 Prozentpunkte niedriger. Die Anforderungen an Bodenbearbeitungsgeräte sind nach der Strohbergung geringer, da weniger organisches Material von den Werkzeugen bearbeitet bzw. verarbeitet werden muss. Die Stoppelbearbeitung

nach der Strohbergung mit Mulchsaatgrubber mit Flügelscharen, Mulchsaatgrubber mit Gänsefußscharen und Scheibenegge führte dazu, dass der Mulchdeckungsgrad von durchschnittlich 59 % auf 16 bis 18 % abfiel. Diese Werte sind deutlich niedriger als die Messwerte, die in Abschnitt 5.2 und Abschnitt 5.3 vorgestellt worden sind. Dies kann jedoch nicht ausschließlich durch die Strohbergung erklärt werden. Auch die Arbeitstiefe des Mulchsaatgrubbers betrug bei Ausstattung mit Flügelscharen 12 und bei Gänsefußscharen 10 cm, sodass deutlich mehr Material in den Boden eingemischt worden ist.

Unterschiede zwischen Mulchsaatgrubber und Scheibenegge hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Bodenbedeckung mit Ernterückständen nach der ersten Stoppelbearbeitungsmaßnahme konnten in den Versuchen von Martin Hänsel et al. (2014) nicht festgestellt werden. Knechtges et al. (2010) zeigten in Versuchen mit Kurzscheibenegge und Mulchsaatgrubber, dass der Einsatz der Kurzscheibenegge zu einem geringeren Mulchdeckungsgrad führte. Die Arbeitstiefe beider Geräte betrug 5 cm, sodass die Ergebnisse vergleichbar mit denen aus dieser Arbeit sind. Die Autoren ermittelten weiterhin die Stroheinmischung in die Bodenschichten von 0 bis 5 und von 5 bis 10 cm. Einerseits mischt die Kurzscheibenegge Ernterückstände besser in den Boden ein. Bei beiden Geräten nahm die Menge der Ernterückstände mit zunehmender Bodentiefe ab.

Kraftstoffverbrauch 2022 Grundsätzlich profitieren alle Verfahrensketten, in denen Rotationsschleifer oder Strohstriegel eingesetzt werden, von den niedrigen Kraftstoffverbräuchen dieser Geräte zur ultraflachen Bodenbearbeitung. Mit zunehmender Arbeitstiefe steigt tendenziell auch der Kraftstoffverbrauch. Der Strohstriegel zeichnet sich durch seine oberflächennahe Bearbeitung, die große Arbeitsbreite und die hohe Fahrgeschwindigkeit aus, was ihn hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs besonders effizient macht. Der Rotationsschleifer hingegen greift stärker in den Boden ein als die Striegelzinken des Strohstriegels, wodurch mehr Boden bearbeitet und bewegt wird. Dies erhöht den Zugleistungsbedarf und folglich auch den Kraftstoffverbrauch des Traktors. Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge arbeiten noch tiefer, was den Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum Rotationsschleifer weiter ansteigen lässt.

Der Zugkraftbedarf wird zudem vom Bodenzustand, insbesondere von der Bodenfeuchtigkeit, beeinflusst. Da diese im Versuchsverlauf schwankte, kön-

nen Unterschiede im Kraftstoffverbrauch zwischen den Bearbeitungsterminen nicht eindeutig auf bestimmte Faktoren zurückgeführt werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass der Rotationsschleifer bei der zweiten Bearbeitung minimal tiefer arbeitet, da der Boden durch die erste Bearbeitung bereits gelockert ist. Dies führt dazu, dass mehr Material im Arbeitsbereich der Maschine liegt und der Zugleistungsbedarf steigt.

Die Kurzscheibenegge wurde nur nach Wintergerste ein zweites Mal eingesetzt. Beim zweiten Bearbeitungstermin war der Kraftstoffverbrauch geringer als beim ersten. Dies liegt daran, dass die Bearbeitungstiefe durch die nachlaufende Walze gut eingehalten wird und die Scheiben im bereits bearbeiteten Horizont arbeiten. Obwohl dieser durch die Walze rückverfestigt wurde, weist er im Vergleich zum unbearbeiteten Boden vermutlich einen geringeren Eindringwiderstand auf. Zudem führt die Bearbeitung mit der Kurzscheibenegge dazu, dass Luft in den Boden eingetragen wird, wodurch der Anteil an Luft im Boden steigt. Bei gleichbleibendem Volumen muss somit weniger Boden bewegt werden, was den Kraftstoffverbrauch reduziert.

5.2.5 Zwischenfazit

Während der Versuchssaison 2022 wurden umfassende Daten und Erkenntnisse zur Stoppelbearbeitung nach Wintergerste, Winterweizen und Winterraps gesammelt. Nach Wintergetreide führte die tiefere Bearbeitung mit der Kurzscheibenegge zu einer intensiveren Keimwelle von Ausfallgetreide. Im Gegensatz dazu regten Strohstriegel und Rotationsschleifer nach Winterraps eine stärkere Keimung von Ausfallraps an. Während Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge effektiver bei der Bekämpfung von Aufwuchs waren, reduzierten sie die Mulchauflage deutlich stärker als Strohstriegel und Rotationsschleifer. Letztere zeichneten sich zudem durch einen geringeren Kraftstoffverbrauch aus, verglichen mit der Kurzscheibenegge und der Großfederzinkenegge.

Die Großfederzinkenegge erwies sich im Sommer 2022 als besonders anfällig für Verstopfungen. Um die Einsatzsicherheit zu erhöhen und das Risiko von Verstopfungen zu minimieren, wurde die Maschine modifiziert. Die Zinkenanzordnung wurde so verändert, dass organisches Material sowie das Gemisch aus Boden und Stroh besser durch die Maschine fließen können. Engstellen, an denen es zuvor zu Materialstaus gekommen war, wurden durch die neue Zinkenanzordnung beseitigt. Zusätzlich wurden Stützräder

am vordersten Balken montiert, um die Tiefenführung zu verbessern.

Beim Einsatz des Rotationsschleifers zeigte sich, dass die Rotoren bei zehn Werkzeugen dazu neigen, Stroh aufzuwickeln (siehe Abbildung 5.15). Vor Beginn der Feldversuche wurde daher jedes zweite Werkzeug entfernt, so dass die Rotoren nur noch mit fünf Werkzeugen ausgestattet waren. Dies verhinderte einen ganzflächigen Schnitt, erlaubte jedoch das problemlose Durchfließen von langem Stroh durch die Rotoren. Während der Versuche traten dadurch keine Probleme mit dem Materialfluss im Rotor auf.



Abbildung 5.15: Aufgewickeltes Getreidestroh am Rotor des Rotationsschleifers Version 2

Das Parallelogramm erwies sich weiterhin als problematisch, da es nicht ausreichend Kraft auf den Rotor übertragen konnte. In Kombination mit den verbauten Werkzeugen führte dies dazu, dass diese bei den trockenen Bodenbedingungen im Sommer 2022 nicht in den Boden eindringen konnten. Für die Versuchssaison 2023 war daher eine umfassende Überarbeitung des Parallelogramms, des Rotors und der Werkzeuge erforderlich.

Das Versuchsdesign sowie die eingesetzten Methoden zur Bonitur und Auswertung haben sich 2022 bewährt, sodass keine Anpassungen notwendig waren. Allerdings zeigte sich, dass die flexible Anpassung der Verfahrensketten sowie der Bearbeitungstermine und -häufigkeit an den Witterungs-

verlauf und die aktuellen Bedingungen auf dem Versuchsfeld nicht nur notwendig, sondern auch sinnvoll ist.

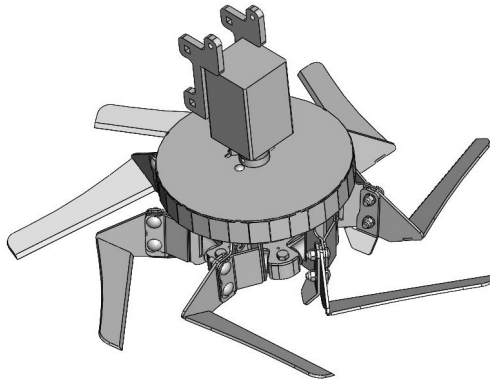
5.3 Feldversuche 2023

Das folgende Kapitel beschreibt den überarbeiteten Rotationsschleifer und präsentiert die Umsetzung, Ergebnisse sowie die Diskussion der Feldversuche im Jahr 2023. Analog zu Abschnitt 5.2 wird ein Zwischenfazit gezogen, in dem die erforderlichen Anpassungen des Rotationsschleifers zusammengefasst werden.

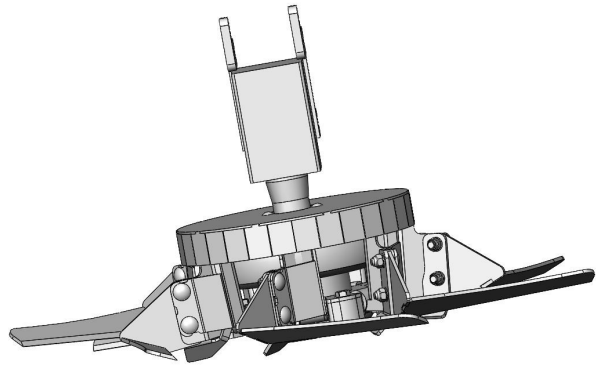
5.3.1 Beschreibung Rotationsschleifer Version 3 Stand 2023

Im Frühjahr 2023 wurden sämtliche Rotoren und Rotoraufnahmen ausgetauscht. Für die Feldversuche und Testeinsätze wurde eine neue Rotoraufnahme (Version 2, siehe Abbildung 4.4) entwickelt und installiert, die eine verbesserte Tiefenführung und Bodenanpassung ermöglicht. Diese neue Version verwendet innenliegende Spiralfedern, die sowohl für die Kraftübertragung als auch den Druckausgleich sorgen. Optimierte Verstellmöglichkeiten erlauben eine präzise Anpassung der Rotorneigung: Die Neigung entlang der X-Achse kann durch Lösen von zwei Schrauben eingestellt werden, während die Y-Achsen-Neigung durch das Verdrehen zweier Muttern auf einer Schraube justiert wird. Im Vergleich zur vorherigen Version 1 ist die neue Rotoraufnahme kompakter und leichter. Zudem gewährleistet die Spiralfeder während der gesamten Bewegung des Parallelogramms eine konstante Kraftübertragung auf den Rotor.

Die Rotorversion 3 (Abbildung 5.16) basiert auf dem Design von Version 2, unterscheidet sich jedoch in wesentlichen Punkten. Sie verfügt über sieben Werkzeugaufnahmen und ein überarbeitetes Lager, das nicht mehr in den Rotor integriert, sondern als separate Baugruppe zwischen Rotor und Rotoraufnahme ausgeführt ist. Ein weiterer Unterschied liegt in der Befestigung der Werkzeugaufnahmen, die vertikal statt horizontal am Rotor angebracht sind. Die Stabilität der Konstruktion wird durch ein zusätzliches Flacheisen erhöht, das einwirkende Kräfte besser abfängt. Die Werkzeuge werden mit zwei Schrauben fixiert, und es können optional Antriebsplatten montiert werden, um den Rotorantrieb auf leichten oder lockeren Böden zu verbessern. Ein Gleitteller, der an der Unterseite des Rotors angebracht werden kann, begrenzt die Arbeitstiefe der Werkzeuge auf 2 bis 3 cm.



Rotor Version 3



Rotor Version 3 Frontalansicht

Abbildung 5.16: Rotor Version 3 (2023)

Auch die Werkzeuge sind umfangreich für die Saison 2023 überarbeitet worden. Die Schnittkante ist länger und glatt geschliffen ausgeführt. Durch die Änderung der Rotordrehrichtung trifft ab dem Rotationsschleifer Version 3 die vom Werkzeugstiel entfernt liegende Messerspitze zuerst auf den Boden.

5.3.2 Durchführung

Im Jahr 2023 begann die Versuchsserie mit der Wintergerstenernte am 9. Juli. Winterraps und Winterweizen wurden am 30. Juli beziehungsweise am 21. August geerntet. Im Vergleich zum Vorjahr fand die Ernte von Wintergerste und Winterraps vier beziehungsweise sechs Tage später statt, während Winterweizen 18 Tage später gedroschen wurde.

Dank der höheren Niederschläge im Jahr 2023 (siehe Abbildung 5.2) konnte im Versuchszeitraum vermehrt Ausfallgetreide keimen, was eine planmäßige Durchführung des Versuchsprogramms nach Wintergerste ermöglichte. Es wurden drei Bodenbearbeitungsmaßnahmen durchgeführt, wobei in der Versuchskette KSE der zweite Bearbeitungstermin entfiel (siehe Tabelle 5.10).

Tabelle 5.10: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Wintergerste Dösseler Kreuz 2023

Datum	Maßnahme	Verfahrenskette / Boniturmaßnahme	Bodenbearbeitungsgerät / Boniturequipment
09.07.2023	Ernte		
10.07.2023	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
11.07.2023	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	Rotationsschleifer
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/GFZE	Strohstriegel
21.07.2023	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	Rotationsschleifer
		KSE	keine Bodenbearbeitung
		S/GFZE	Strohstriegel
25.07.2023	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
28.07.2023	Bonitur	NDVI	UAV
04.08.2023	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	Großfederzinkenegge
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/GFZE	Großfederzinkenegge
09.08.2023	Bonitur	NDVI	UAV
10.08.2023	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
18.08.2023	Bonitur	NDVI	UAV

Herausfordernd gestalteten sich die Witterungsbedingungen während der Getreide- und Rapsernte. Aufgrund anhaltender Niederschläge in der ersten Augusthälfte konnte die Versuchsfläche Winterweizen Wanne erst am 21. August 2023 vollständig geerntet werden. Der Versuchsbeginn der Stoppelbearbeitung nach Winterweizen verzögerte sich dadurch um etwa drei Wochen im Vergleich zu 2022. Die Anzahl der Bodenbearbeitungsgänge wurde daher reduziert.

In den Varianten GS/GFZE und S/GFZE konnte die Großfederzinkenegge wegen Verstopfungsproblemen nicht reibungslos eingesetzt werden. Daher wurden die Parzellen nur einmal, am ersten Bearbeitungstermin, bearbeitet. Nach der Bonitur am 28. August 2023 kam es erneut zu Regenfällen, wodurch eine weitere Bodenbearbeitung unmöglich wurde. Da infolge der Niederschläge noch Ausfallweizen keimte, war eine Zählung der Ausfallpflanzen pro Quadratmeter nicht durchführbar. Bei den verbleibenden Boniturterminen wurden daher lediglich Fotos zur Bildauswertung aufgenommen.

Tabelle 5.11: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterweizen Wanne 2023

Datum	Maßnahme	Verfahrenskette / Boniturmaßnahme	Bodenbearbeitungsgerät / Boniturequipment
21.08.2023	Ernte		
23.08.2023	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
24.08.2023	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	Rotationsschleifer
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/GFZE	Strohstriegel
28.08.2023	Bonitur	Anzahl Pflanzen pro m ²	Zählrahmen
		Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
06.09.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
07.09.2023	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	keine Bodenbearbeitung
		KSE	Kurzscheibenegge
		S/GFZE	keine Bodenbearbeitung
12.09.2023	Bonitur	NDVI	UAV
15.09.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera

Ähnlich wie beim Winterweizen konnte auch der Winterraps 2023 nicht unter optimalen Bedingungen geerntet werden. Eine Stoppelbearbeitung unmittelbar nach der Rapsernte war ebenfalls nicht möglich (siehe Abbildung 5.2). Da bereits Rapskörner aus aufgeplatzten Schoten auf den Boden gefallen und gekeimt waren, war die Versuchsfläche zum Zeitpunkt der ersten Bonitur bereits mit Ausfallraps bedeckt. Eine Bearbeitung mit dem Strohstriegel erschien unter diesen Bedingungen wenig sinnvoll, weshalb die Varianten angepasst wurden. Aufgrund eines technischen Fehlers bei der automatischen Spurführung wurde die gesamte Fläche am ersten Termin mit dem Rotationsschleifer bearbeitet, wodurch eine Differenzierung der Stoppelbearbeitung erst ab dem zweiten Bearbeitungstermin möglich war.

Tabelle 5.12: Bonitur- und Bodenbearbeitungstermine Winterraps Höte Menne Garten 2023

Datum	Maßnahme	Verfahrenskette / Boniturmaßnahme	Bodenbearbeitungsgerät / Boniturequipment
30.07.2023	Ernte		
09.08.2023	Bonitur	NDVI	UAV
10.08.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
11.08.2023	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	Rotationsschleifer
		GS/KSE	Rotationsschleifer
18.08.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
19.08.2023	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	Großfederzinkenegge
		GS/KSE	Rotationsschleifer
22.08.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
28.08.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
31.08.2023	Bonitur	NDVI	UAV
06.09.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
	Bodenbearbeitung	GS	Rotationsschleifer
		GS/GFZE	Großfederzinkenegge
		GS/KSE	Kurzscheibenegge
11.09.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera
		NDVI	UAV
15.09.2023	Bonitur	Canopeo	DSLR-Kamera
		Deckungsgrad	DSLR-Kamera

5.3.3 Ergebnisse

Wintergerste 2023 Die erste Stoppelbearbeitung führte in allen Verfahrensketten zu einer Steigerung der Pflanzenanzahl pro Quadratmeter. In der Verfahrenskette KSE wurden dabei mit durchschnittlich 23,7 Pflanzen pro m^2 signifikant höhere Werte erfasst. Vier Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung, am 25. Juli 2022, lagen die Pflanzenzahlen in der Variante KSE mit durchschnittlich 50,7 Pflanzen pro m^2 etwa fünfmal so hoch wie in den übrigen Varianten, die mit Werten zwischen 8,3 und 12,5 Pflanzen pro m^2 auf einem ähnlichen Niveau wie vor dem zweiten Arbeitsgang blieben.

Vor der abschließenden dritten Bodenbearbeitung wurde in allen Verfahrensketten ein weiterer Anstieg der Pflanzenanzahl bonitiert. Am 4. August 2023 wies die Verfahrenskette KSE mit durchschnittlich 166,9 Pflanzen pro m^2 signifikant höhere Werte auf als S/GFZE und GS/GFZE, die 120,4 bzw. 112,4 Pflanzen pro m^2 erreichten. Bis zum 10. August 2023 wurden in den mit GFZE und KSE bearbeiteten Parzellen der Verfahrensketten GS/GFZE, KSE und S/GFZE signifikant weniger Pflanzen pro m^2 gezählt als in GS. Dennoch wurden in diesen Varianten noch zwischen 24,7 und 35 Pflanzen pro m^2 festgestellt (siehe Abbildung 5.17).

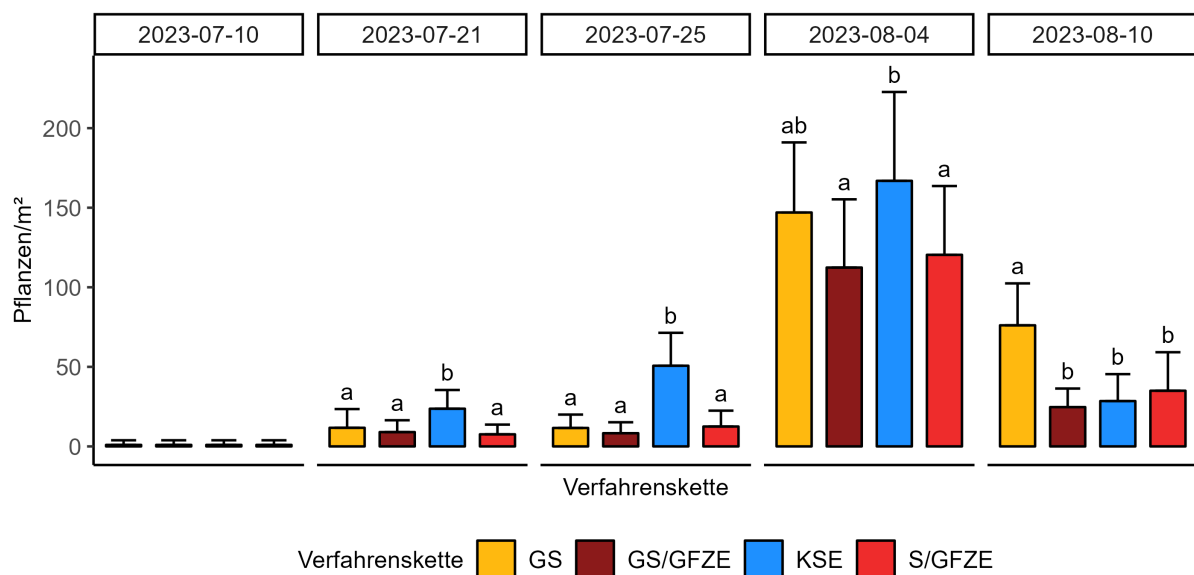


Abbildung 5.17: Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Bis zum 25. Juli 2023 zeigten die Verfahrensketten keine signifikanten Unterschiede beim Vegetationsdeckungsgrad, der in diesem Zeitraum zwischen 0,11 und 1,43 % lag. Ab dem 25. Juli wies die Verfahrenskette KSE einen signifikant höheren Vegetationsdeckungsgrad auf als die übrigen Varianten. Nach dem zweiten Bodenbearbeitungsgang war der Vegetationsdeckungsgrad in der Verfahrenskette GS mit 3,43 % am geringsten, was einen signifikanten Unterschied darstellte. Die Verfahrensketten GS/GFZE und S/GFZE unterschieden sich ebenfalls signifikant von GS und KSE, wobei ihre Vegetationsdeckungsgrade mit durchschnittlich 5,34 % bzw. 5,64 % auf ähnlichem Niveau lagen.

Die Abschlussbonitur am 10. August 2023 zeigte, dass die Vegetationsdeckungsgrade in den Verfahrensketten GS/GFZE, KSE und S/GFZE signifikant niedriger waren als in GS, wo ein durchschnittlicher Wert von 3,12 % erfasst wurde (siehe Abbildung 5.18).

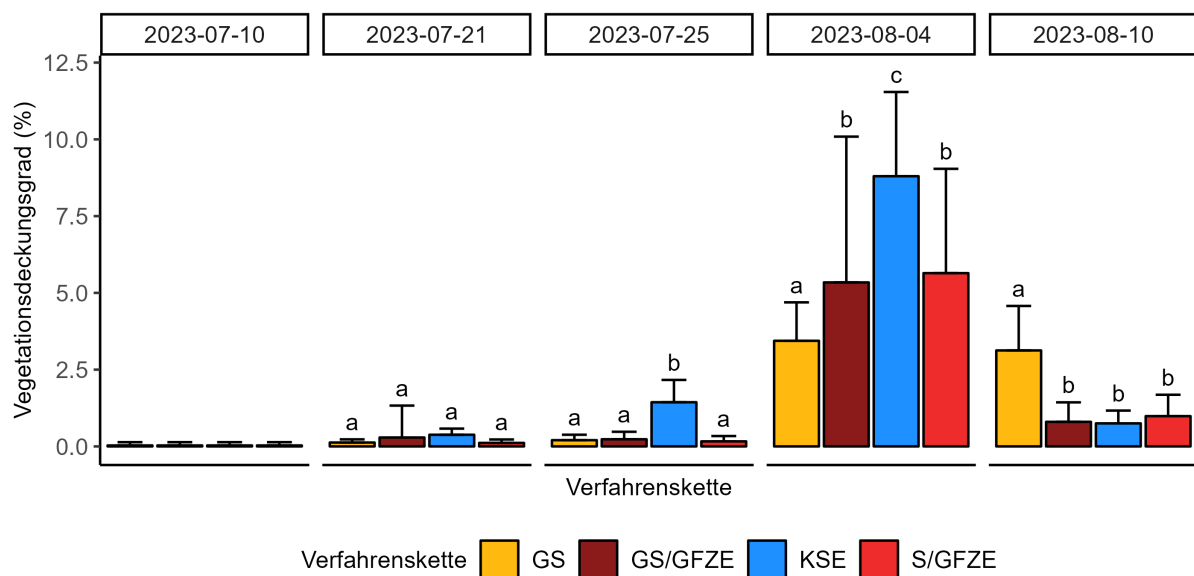


Abbildung 5.18: Vegetationsdeckungsgrad Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Zwischen den Verfahrensketten konnten im gesamten Versuchsverlauf keine signifikanten Unterschiede beim NDVI ermittelt werden. Insgesamt war der NDVI bis zum 09.08.2023 in allen Verfahrensketten auf vergleichbarem Niveau. Tendenzielle Unterschiede gab es am 21.07.2023 mit einem etwas geringeren NDVI in der Verfahrenskette KSE und am 04.08.2023 mit einem

etwas höheren NDVI in der Verfahrenskette KSE. Am 18.08.2023 hatte die Verfahrenskette GS den höchsten NDVI, wobei der Unterschied nicht signifikant war (siehe Abbildung 5.19).

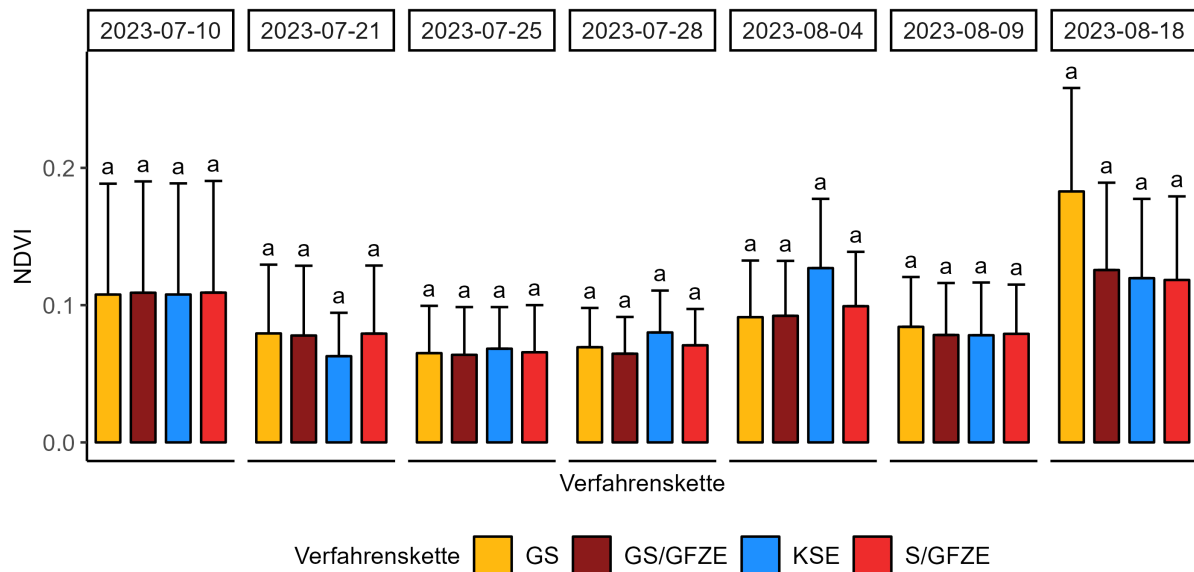


Abbildung 5.19: NDVI Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Die Mulchauflage blieb nach der Bodenbearbeitung in den Verfahrensketten GS, GS/GFZE und S/GFZE nahezu unverändert, mit Werten zwischen 98,46 % und 99,13 %. Dagegen führte die Bearbeitung mit der Kurzscheibenegge in der Verfahrenskette KSE zu einer signifikanten Reduktion des Mulchdeckungsgrades auf durchschnittlich 72,27 %. Bis zum 10. August 2023 blieb der Mulchdeckungsgrad in der Verfahrenskette KSE signifikant niedriger als in den anderen Varianten. Am 10. August 2023 zeigte GS mit 83,91 % den höchsten Mulchdeckungsgrad, der signifikant über den Werten der Verfahrensketten GS/GFZE, KSE und S/GFZE lag, die zwischen 45,91 % und 51,53 % aufwiesen (siehe Abbildung 5.20).

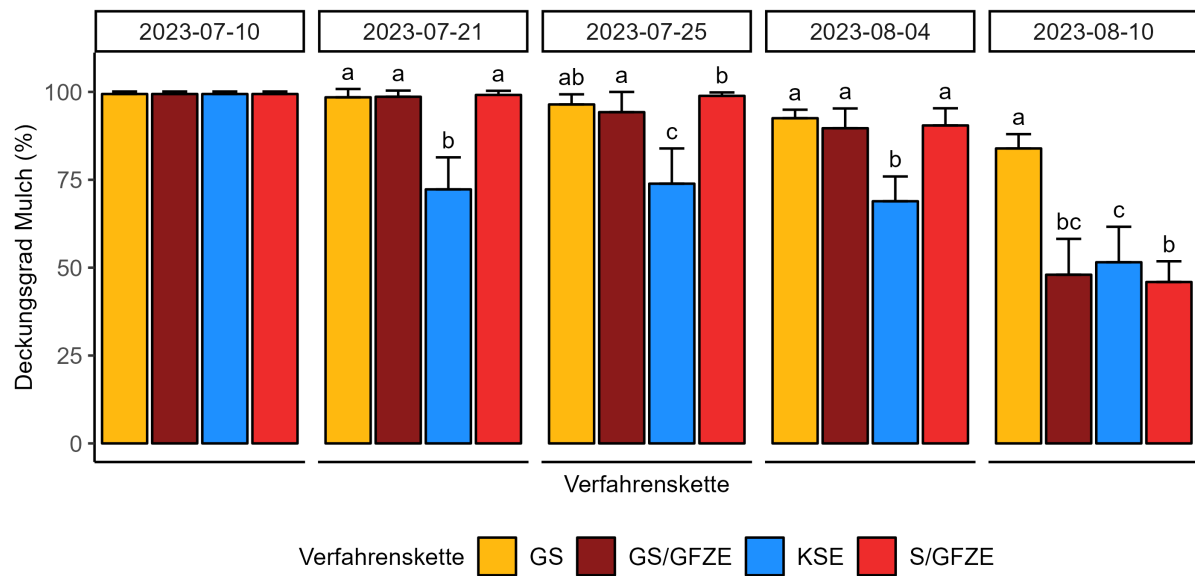


Abbildung 5.20: Deckungsgrad Mulch Wintergerste Dösseler Kreuz 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Winterweizen 2023 Für die Pflanzenanzahl pro m^2 liegen nur Daten vom 23.08.2023 und 28.08.2023 vor. Vier Tage nach der ersten Stoppelbearbeitung keimten durchschnittlich weniger als zwei Pflanzen pro m^2 . Die Verfahrenskette KSE wies dabei signifikant weniger Pflanzen pro m^2 auf als GS.

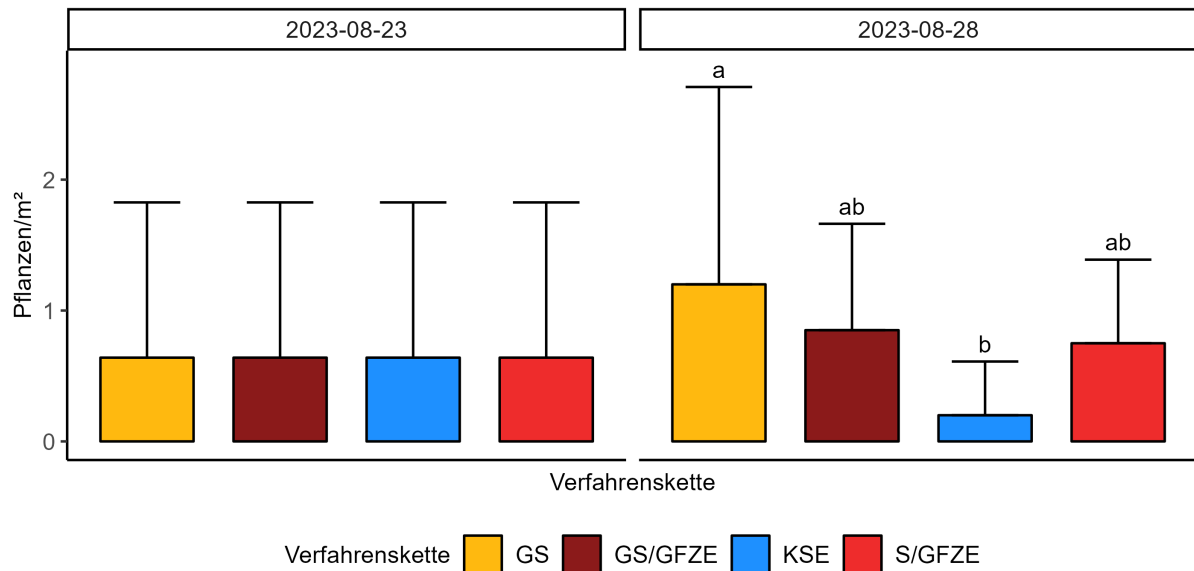


Abbildung 5.21: Anzahl Pflanzen pro Quadratmeter Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Bei der Bonitur vier Tage nach der ersten Stoppelbearbeitung war der Vegetationsdeckungsgrad der Verfahrenskette KSE signifikant geringer als bei GS, GS/GFZE und S/GFZE. Die absoluten Werte blieben jedoch sehr gering und erreichten maximal 0,11 %. Auch am 06.09.2023 blieben die Werte in der Verfahrenskette KSE mit maximal 2,07 % sehr niedrig. Dennoch zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen GS/GFZE und KSE. Acht Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung wies die Verfahrenskette KSE mit 0,88 % den niedrigsten Vegetationsdeckungsgrad auf, wobei die Unterschiede zu den übrigen Verfahrensketten signifikant waren. GS verzeichnete mit 6,29 % einen signifikant geringeren Deckungsgrad als GS/GFZE und S/GFZE, deren Werte bei 9,55 % bzw. 9,75 % lagen (siehe Abbildung 5.22).

Signifikante Unterschiede im NDVI zwischen den Verfahrensketten konnten nicht festgestellt werden. Allerdings zeigte die Verfahrenskette KSE ab

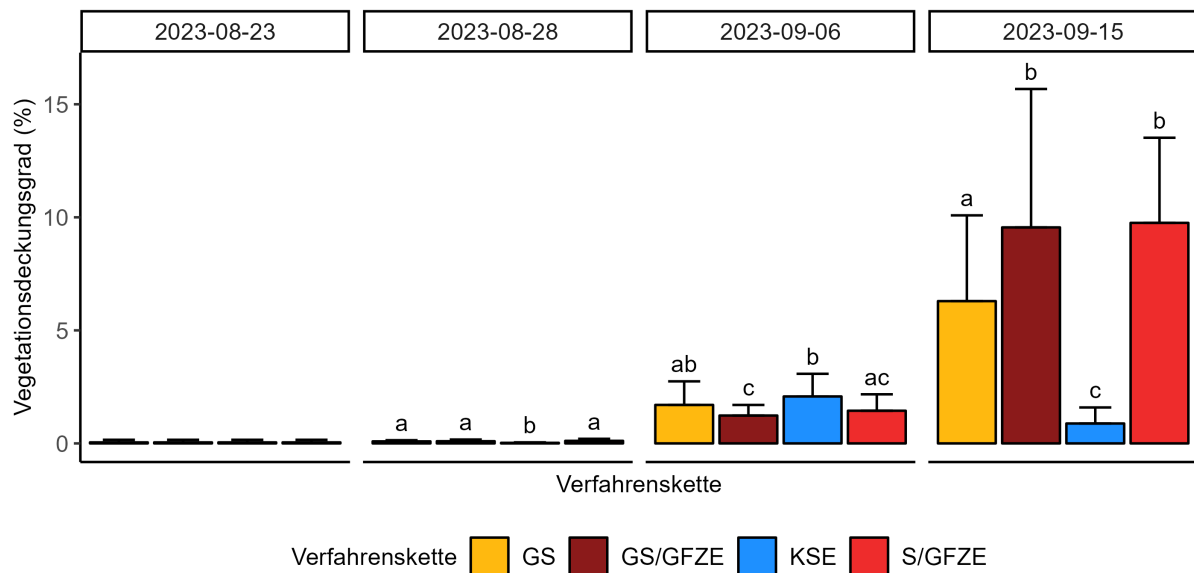


Abbildung 5.22: Vegetationsdeckungsgrad Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

dem 28.08.2023 tendenziell den niedrigsten NDVI (siehe Abbildung 5.23).

Durch den Einsatz der Kurzscheibenegge in der Verfahrenskette KSE wurde der Mulchdeckungsgrad mit der ersten Stoppelbearbeitung auf 86,66 % reduziert. Die übrigen Verfahrensketten unterschieden sich nicht signifikant voneinander, wiesen jedoch einen signifikant höheren Mulchdeckungsgrad auf als KSE. Nach der zweiten Bodenbearbeitung am 07.09.2023, die nur in den Verfahrensketten GS (Rotationsschleifer) und KSE (Kurzscheibenegge) durchgeführt wurde, sank der Mulchdeckungsgrad in allen Verfahrensketten. Dabei unterschieden sich GS, GS/GFZE und KSE signifikant: GS erreichte mit 89,10 % den höchsten, KSE mit 76,26 % den niedrigsten Mulchdeckungsgrad (siehe Abbildung 5.24).

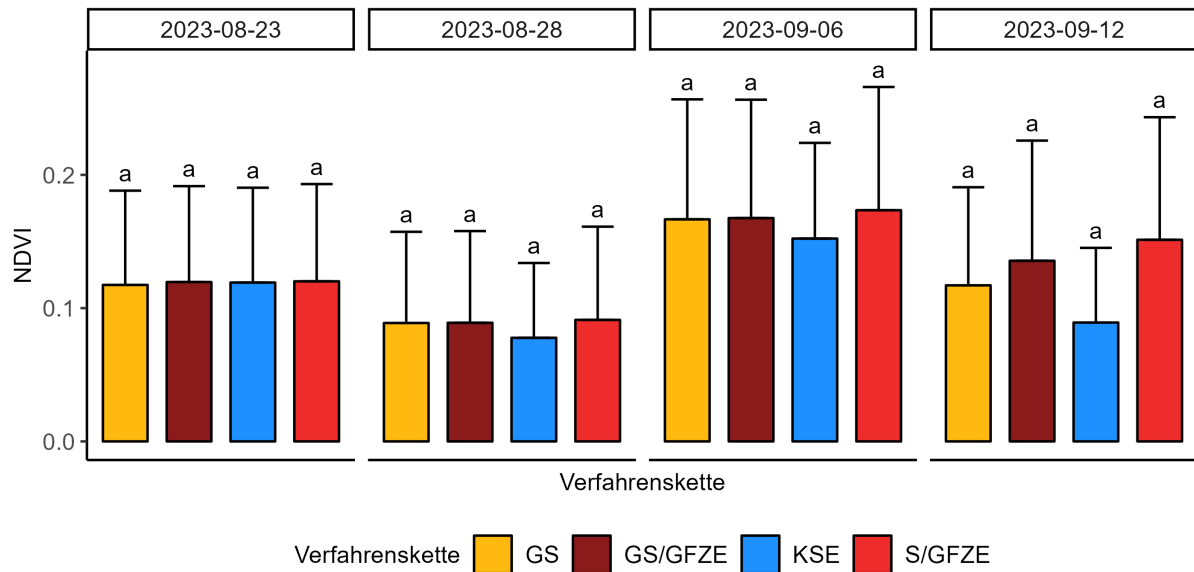


Abbildung 5.23: NDVI Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

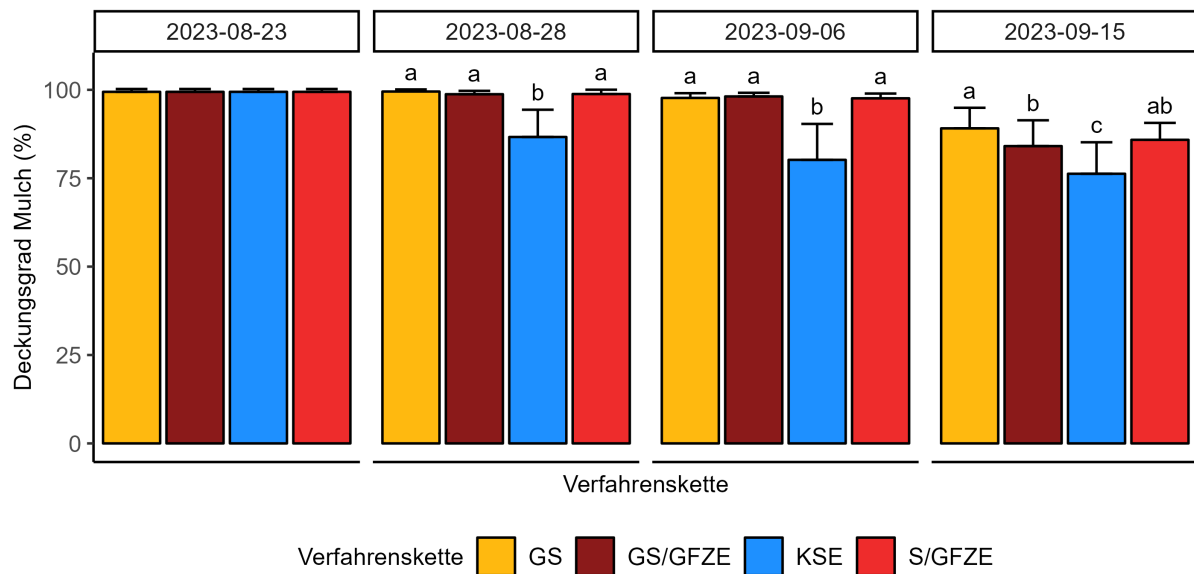


Abbildung 5.24: Deckungsgrad Mulch Winterweizen Wanne 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Winterraps 2023 Bereits bei der Nacherntebonitur am 10.08.2023 war der durchschnittliche Vegetationsdeckungsgrad mit 13,72 % vergleichsweise hoch. Nach der ersten Stoppelbearbeitung sank er auf 7,42 %. Der Vegetationsdeckungsgrad von GS/KSE blieb bis zum 06.09.2023 signifikant höher als bei den anderen Verfahrensketten, wobei der Vegetationsdeckungsgrad in allen Parzellen anstieg. Ab dem 28.08.2023 wurden signifikante Unterschiede zwischen GS und GS/GFZE festgestellt, wobei der Wert bei GS signifikant höher lag. Zum Versuchsende am 15.09.2023 erreichte GS/GFZE mit 0,87 % den niedrigsten, GS/KSE mit 30,40 % den höchsten Vegetationsdeckungsgrad. GS lag mit durchschnittlich 21,71 % zwischen den beiden Verfahrensketten, wobei alle Unterschiede signifikant waren (siehe Abbildung 5.25).

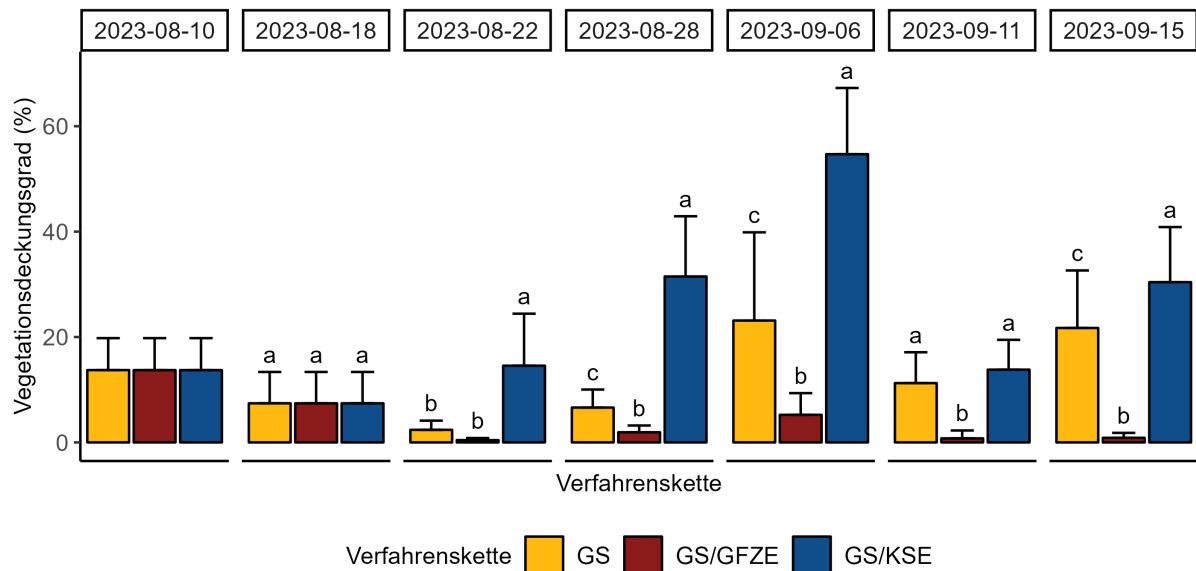


Abbildung 5.25: Vegetationsdeckungsgrad Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Bis zum 28.08.2023 konnten keine signifikanten Unterschiede im NDVI festgestellt werden. Ab dem 22.08.2023 zeigte GS/GFZE tendenziell die niedrigsten Werte, gefolgt von GS/KSE und GS. An den Terminen 28.08.2023, 31.08.2023 und 12.09.2023 unterschieden sich GS und GS/GFZE signifikant voneinander (siehe Abbildung 5.26).

Die erste Stoppelbearbeitung nach der Rapsernte führte am 18.08.2023 in allen Parzellen zu einer Zunahme des Mulchdeckungsgrades. Mit der diffe-

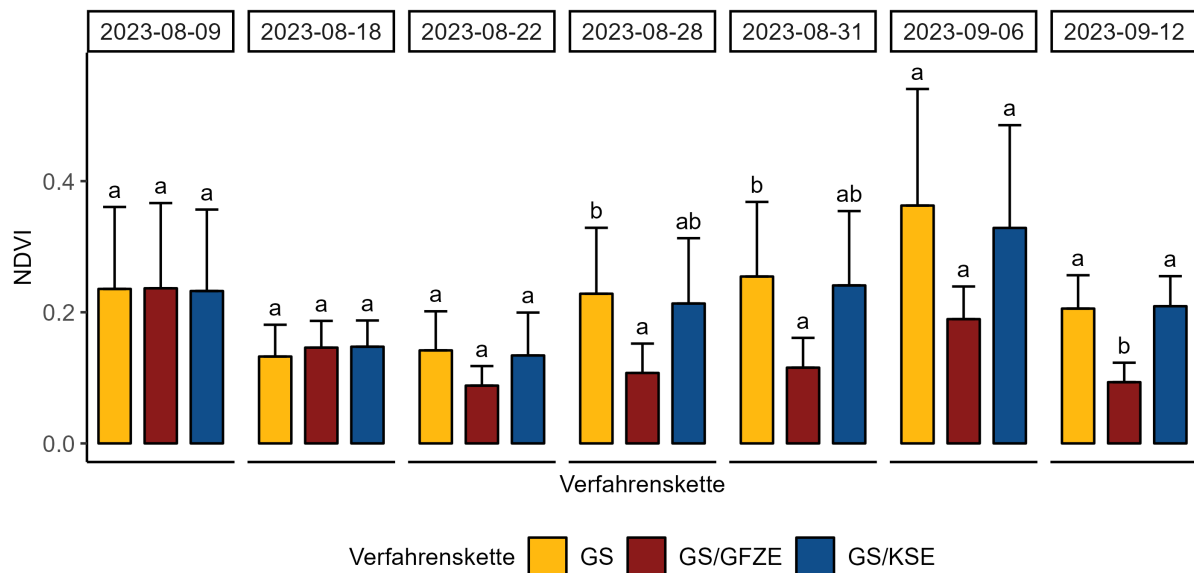


Abbildung 5.26: NDVI Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

renzierten Bodenbearbeitung am zweiten Termin zeigten sich erstmals Unterschiede zwischen den Verfahrensketten. Am 22.08.2023 lag der Mulchdeckungsgrad in GS/GFZE mit 63,00 % signifikant unter dem von GS (84,06 %) und GS/KSE (78,39 %). An den Boniturterminen 28.08.2023 und 06.09.2023 wies GS den höchsten Mulchdeckungsgrad auf, gefolgt von GS/GFZE und GS/KSE, wobei alle Unterschiede signifikant waren.

Während die dritte Stoppelbearbeitung bei GS und GS/GFZE nur zu einer geringen Abnahme des Mulchdeckungsgrades führte, stieg er in der Verfahrenskette GS/KSE auf durchschnittlich 38,66 %. Vier Tage später war der Mulchdeckungsgrad in allen Verfahrensketten höher: GS/KSE zeigte mit 49,36 % einen signifikant niedrigeren Wert als GS (63,23 %) und GS/GFZE (70,24 %) (siehe Abbildung 5.27).

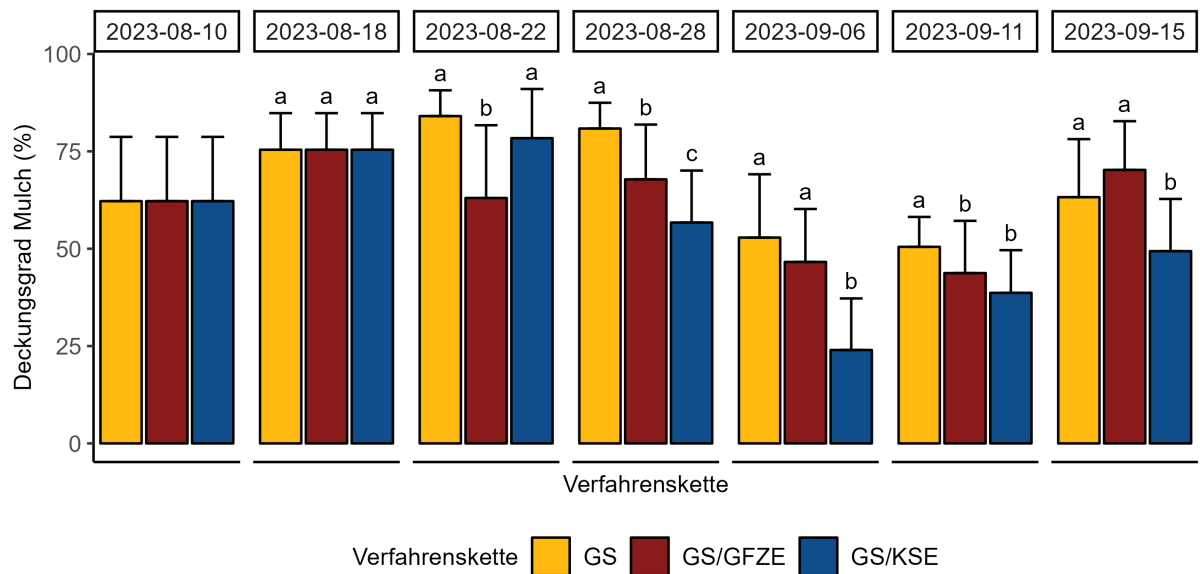


Abbildung 5.27: Deckungsgrad Mulch Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Kraftstoffverbrauch 2023 Der Kraftstoffverbrauch der Verfahrensketten bei der Stoppelbearbeitung nach Wintergerste 2023 lag zwischen 9,00 l/ha (GS) und 11,45 l/ha (GS/GFZE). Nach Winterweizen verzeichnete die Verfahrenskette GS mit 5,10 l/ha den höchsten Verbrauch im Vergleich zu den anderen Varianten. Nach Winterraps hatte GS/KSE mit 6,90 l/ha den niedrigsten Kraftstoffverbrauch, während die Verfahrensketten GS (9,00 l/ha) und GS/GFZE (11,60 l/ha) deutlich höhere Werte aufwiesen (siehe 5.13).

Im Vergleich zu 2022 blieb der Kraftstoffverbrauch beim Einsatz des Rotationsschleifers 2023 auf einem ähnlichen Niveau: 2,70 l/ha beim dritten Arbeitsgang nach Winterraps und bis zu 3,15 l/ha nach Wintergerste. Der Strohstriegel führte zu Verbrauchswerten zwischen 2,00 l/ha nach Winterweizen und 2,35 l/ha nach Wintergerste. Die Kurzscheibenegge und die Großfederzinkenegge zeigten Kraftstoffverbräuche im Bereich von 3,80 bis 5,05 l/ha bzw. 3,90 bis 5,35 l/ha.

Tabelle 5.13: Kraftstoffverbrauch 2023

Kultur	Verfahrenskette	Bodenbearbeitungsgerät	Arbeitsgang	Kraftstoffverbrauch (l/ha)
Wintergerste	GS	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	3,05
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,80
		Rotationsschleifer	3. Arbeitsgang	3,15
			Gesamt	9,00
	GS/GFZE	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	3,05
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,80
		Großfederzinkenegge	3. Arbeitsgang	5,60
			Gesamt	11,45
	KSE	Kurzscheibenegge	1. Arbeitsgang	5,05
		keine Bodenbearbeitung	2. Arbeitsgang	
		Kurzscheibenegge	3. Arbeitsgang	5,00
			Gesamt	10,05
	S/GFZE	Strohstriegel	1. Arbeitsgang	2,35
		Strohstriegel	2. Arbeitsgang	2,25
		Großfederzinkenegge	3. Arbeitsgang	5,35
			Gesamt	9,95
Winterweizen	GS	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	2,50
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	2,60
			Gesamt	5,10
	GS/GFZE	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	2,50
			Gesamt	2,50
	KSE	Kurzscheibenegge	1. Arbeitsgang	4,60
			Gesamt	4,60
	S/GFZE	Strohstriegel	1. Arbeitsgang	2,00
			Gesamt	2,00
Winterraps	GS	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	3,10
		Rotationsschleifer	2. Arbeitsgang	3,20
		Rotationsschleifer	3. Arbeitsgang	2,70
			Gesamt	9,00
	GS/GFZE	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	3,10
		Großfederzinkenegge	2. Arbeitsgang	4,60
		Großfederzinkenegge	3. Arbeitsgang	3,90
			Gesamt	11,60
	GS/KSE	Rotationsschleifer	1. Arbeitsgang	3,10
		Kurzscheibenegge	2. Arbeitsgang	3,80
		keine Bodenbearbeitung	3. Arbeitsgang	
			Gesamt	6,90

5.3.4 Diskussion

Im Vergleich zu 2022 waren die Monate Juli, August und September 2023 nicht nur kühler, sondern insbesondere im August auch durch höhere Niederschlagsmengen geprägt (siehe Abbildung 5.2). Dies wirkte sich direkt auf die Erntebedingungen aus: Winterweizen und Winterraps konnten auf dem Versuchsbetrieb im Vergleich zu 2022 erst deutlich später geerntet werden. Aufgrund der Niederschläge war eine Stoppelbearbeitung unmittelbar nach der Ernte nicht immer möglich.

Die Versuchsfläche für die Stoppelbearbeitung nach Winterraps konnte erst zwölf Tage nach der Ernte bearbeitet werden. Die günstigen Bedingungen mit ausreichend Keimwasser führten dazu, dass in diesem Zeitraum bereits Ausfallraps keimte. Diese Bedingungen unterschieden sich stark von 2022, als Trockenheit und starke Staubentwicklung dazu führten, dass bei Teusteinsätzen außerhalb der Versuchsflächen entschieden wurde, keine weitere Bodenbearbeitung auf der Winterrapsstoppel durchzuführen. In beiden Versuchsjahren konnte daher das ursprünglich geplante Versuchsprogramm nicht vollständig umgesetzt werden, und es mussten alternative Strategien entwickelt werden. Ähnliches galt für die Versuche auf Winterweizenstoppel 2023, die aufgrund der sehr späten Ernte nur eingeschränkt durchgeführt werden konnten.

Nach allen drei Kulturen sollte die Großfederzinkenegge in verschiedenen Verfahrensketten eingesetzt werden. Aufgrund ihrer Bauweise mit engem Strichabstand von 12,5 cm und geringer Rahmenhöhe verfügte sie jedoch über zu wenig Durchgang. Die hohen Strohmenen nach Wintergetreide führten selbst nach vorangegangenen Arbeitsgängen mit Rotationsschleifer und Strohstriegel in einigen Fällen zu Verstopfungen. Nach Wintergetreide konnte die Großfederzinkenegge daher nur auf der Versuchsfläche nach Wintergerste 2023 eingesetzt werden. Der Versuch auf der Fläche Dösseler Kreuz nach Wintergerste war damit in beiden Versuchsjahren der einzige von sechs Versuchen, der planmäßig durchgeführt werden konnte.

Wintergerste 2023 Zur Zeit der Wintergerstenernte am 09.07.2023 sowie der ersten Stoppelbearbeitung am 11.07.2023 wurden Höchsttemperaturen von bis zu 32 °C gemessen. Zwischen der ersten Stoppelbearbeitung und der darauffolgenden Bonitur am 21.07.2023 lagen die Tageshöchsttemperaturen zwischen 21,9 und 27,4 °C, begleitet von 11,4 mm Niederschlag. Im Vergleich zu 2022 führte dies zu einer höheren Anzahl Pflanzen pro m² so-

wie einem höheren Vegetationsdeckungsgrad. Die höchste Anzahl Pflanzen pro m^2 wurde, wie bereits 2022, in der Verfahrenskette KSE festgestellt. Dies lässt sich durch die tiefere Einarbeitung der Ausfallgerste und die Rückverfestigung durch die Nachlaufwalze der Kurzscheibenegge erklären, die in Kombination mit ausreichendem Niederschlag die Keimung förderte. Dagegen regten Rotationsschleifer und Strohstriegel durch ihre oberflächennahe Bearbeitung signifikant weniger Ausfallgerste zur Keimung an.

Vier Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung in den Verfahrensketten GS, GS/GFZE und S/GFZE zeigte sich nur eine geringe Veränderung in der Anzahl Pflanzen pro m^2 im Vergleich zur Bonitur am 21.07.2023. Vermutlich wurde ein Teil der Ausfallgerste bekämpft und im Wachstum gehemmt. Gleichzeitig führte die Bearbeitung zusammen mit 11,7 mm Niederschlag dazu, dass weitere Ausfallgerste gekeimt ist. Der Anstieg an Pflanzen pro m^2 in der Verfahrenskette KSE stützt diese Annahme.

Zwischen dem 25.07.2023 und dem 04.08.2023 fielen insgesamt 51,5 mm Niederschlag, was zu einer deutlichen Zunahme der Anzahl Pflanzen pro m^2 und des Vegetationsdeckungsgrades in allen Verfahrensketten führte. Auffällig ist der Unterschied zwischen den bis zu diesem Zeitpunkt identisch behandelten Verfahrensketten GS und GS/GFZE. Am 04.08.2023 wies GS eine tendenziell höhere Anzahl Pflanzen pro m^2 , jedoch einen signifikant niedrigeren Vegetationsdeckungsgrad auf. Diese Kombination deutet darauf hin, dass die Pflanzen in GS vergleichsweise kleiner und in einem früheren Entwicklungsstadium waren als in GS/GFZE. Der NDVI beider Verfahrensketten war zu diesem Zeitpunkt vergleichbar, ebenso wie der Mulchdeckungsgrad, was die Ursache für die Unterschiede unklar lässt.

Die Abschlussbonitur am 10.08.2023 bestätigte erneut, dass Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge durch ihre größere Arbeitstiefe effektiver Ausfallgetreide mechanisch bekämpfen können. Der Rotationsschleifer Version 3 war im Sommer 2023 weiterhin nicht in der Lage, Ausfallgetreide flächendeckend abzuschneiden oder vollständig zu entwurzeln. Bei der Abschlussbonitur wurden in den Verfahrensketten GS/GFZE, KSE und S/GFZE durchschnittlich 24,7 bis 35 Pflanzen pro m^2 gezählt. Dies zeigt, dass selbst eine Bodenbearbeitung in einer Tiefe von 3 bis 5 cm nicht ausreicht, um alle Pflanzen zu eliminieren. Der Niederschlag von 44,7 mm zwischen der letzten Bodenbearbeitung und der Abschlussbonitur führte vermutlich dazu, dass entwurzelte und mechanisch geschädigte Pflanzen teilweise wieder anwuchsen.

Winterweizen 2023 Im August 2023 fielen insgesamt 146,2 mm Niederschlag. Während des Versuchszeitraums vom 21.08.2023 bis zum 15.09.2023 betrug die Niederschlagsmenge 55,2 mm. Die verspätete Ernte, in Kombination mit den hohen Niederschlagsmengen, erschwerte die Stoppelbearbeitung erheblich. Kurze Bearbeitungsfenster und suboptimale Bearbeitungstermine verringerten die Aussagekraft der Ergebnisse. In den Verfahrensketten GS/GFZE und S/GFZE konnte aufgrund von Verstopfungen der Großfederzinkenegge nur ein einziger Bearbeitungsgang durchgeführt werden, wodurch eine abschließende Bewertung dieser Varianten nicht möglich ist.

Die Anzahl der Pflanzen pro m² war fünf Tage nach der ersten Stoppelbearbeitung mit Werten zwischen durchschnittlich 0,2 und 1,26 sehr gering. Obwohl in der Verfahrenskette GS eine signifikant höhere Anzahl Pflanzen pro m² festgestellt wurde als in der Verfahrenskette KSE, fehlen weitere Boniturtermine, um belastbare Aussagen darüber zu treffen, wie sich die differenzierte Stoppelbearbeitung unter den spezifischen Bedingungen des Jahres 2023 auf die Entwicklung von Ausfallweizen ausgewirkt hat.

Aufschlussreicher ist die Entwicklung des Vegetationsdeckungsgrades, der bis zum 15.09.2023 dokumentiert wurde und auch die zweite Bearbeitung in den Verfahrensketten GS und KSE berücksichtigt. Im Vergleich zum 28.08.2023 stieg der Vegetationsdeckungsgrad bis zum 06.09.2023 in allen Verfahrensketten an. Der reichliche Niederschlag sorgte für ausreichendes Wasser, um die Keimung und das Wachstum des Ausfallweizens zu fördern. Die Verfahrenskette KSE unterschied sich signifikant von GS/GFZE und S/GFZE, jedoch nicht von GS. Insgesamt deutet dies darauf hin, dass die Bearbeitung mit der Kurzscheibenegge im Vergleich zu Strohstriegel und Rotationsschleifer eine bessere Keimanregung bewirkte.

Bis zum 15.09.2023 nahm der Vegetationsdeckungsgrad in allen Verfahrensketten weiter zu. Dennoch wiesen die am 07.09.2023 bearbeiteten Parzellen der Verfahrensketten GS und KSE signifikant geringere Vegetationsdeckungsgrade auf. Die Kurzscheibenegge erwies sich als die effektivste Methode zur Bekämpfung von Ausfallweizen. Analog zu den Ergebnissen bei Wintergerste war der Rotationsschleifer nicht in der Lage, den Ausfallweizen flächendeckend abzuschneiden und vollständig zu entwurzeln, weshalb der Vegetationsdeckungsgrad in den Parzellen dieser Verfahrenskette signifikant höher war als in den Parzellen der Verfahrenskette KSE.

Trotz eines zusätzlichen Bearbeitungsgangs in der Verfahrenskette GS war der Mulchdeckungsgrad am 15.09.2023 signifikant höher als in GS/GFZE. Dafür kommen mehrere Ursachen infrage. Erstens spricht die Entwicklung des Vegetationsdeckungsgrades dafür, dass abgestorbener Ausfallweizen als Mulch klassifiziert wurde. Gleichzeitig war der Vegetationsdeckungsgrad in GS/GFZE am 15.09.2023 signifikant höher als in KSE, was darauf hindeutet, dass lebende Ausfallweizenpflanzen den Boden sowie liegendes Mulchmaterial bedeckt haben. Darüber hinaus kann angenommen werden, dass der Rotationsschleifer bei der zweiten Stoppelbearbeitung weitere stehende Stoppeln abtrennte und auf der Bodenoberfläche ablegte. Solche abgetrennten Stoppeln bedecken den Boden stärker als stehende Stoppeln, was den höheren Mulchdeckungsgrad erklären könnte.

Winterraps 2023 Die anhaltenden Niederschläge sowie ein Fehler im automatischen Lenksystem führten 2023 dazu, dass zunächst alle Parzellen mit dem Rotationsschleifer bearbeitet wurden. Zwischen der Ernte am 30.07.2023 und der ersten Stoppelbearbeitung am 11.08.2023 wurden 74,6 mm Niederschlag registriert. Der hohe Vegetationsdeckungsgrad von durchschnittlich 13,72 % vor der ersten Stoppelbearbeitung ist vor allem auf die erste Keimwelle des Ausfallrapses zurückzuführen, der bereits vor der ersten Bodenbearbeitung aufgelaufen ist.

Da die Ernte nicht zum optimalen Zeitpunkt erfolgte und bereits vor der Ernte erste Ausfallrapssamen abgefallen waren, dürfte diese erste Keimwelle sowohl aus vor der Ernte verlorenen Samen als auch aus nach der Ernte gekeimten Druschverlusten bestanden haben. Die erhebliche Niederschlagsmenge hat Keimung und Wachstum in jedem Fall gefördert.

Bodenheterogenität, heterogene Verluste vor der Ernte sowie unterschiedliche Druschverluste und deren erwartbar ungleichmäßige Verteilung könnten dazu geführt haben, dass sich die identisch bearbeiteten Verfahrensketten GS und GS/KSE trotz gleicher Behandlung zeitweise signifikant im Vegetationsdeckungsgrad unterscheiden haben (siehe auch Unterunterabschnitt 5.2.4).

Die effektivste Bekämpfung des Ausfallrapses wurde mit der Verfahrenskette GS/GFZE erzielt. Die Großfederzinkenegge arbeitete bei einer Arbeitstiefe von 3 cm flächendeckend und schnitt den Ausfallraps vollständig

ab, wobei die Pflanzen an der Bodenoberfläche abgelegt wurden.

Im Gegensatz dazu erwies sich die streifenförmige Bearbeitung mit dem Rotationsschleifer als problematisch, da etwa 25 bis 35 % der Fläche unberührt blieben (siehe Abbildung 5.28). In den bearbeiteten Bereichen war der Bekämpfungserfolg jedoch mit dem der Großfederzinkenegge vergleichbar.

Ähnlich wie 2022 zeigen sich auch 2023 deutliche Unterschiede im Mulchdeckungsgrad: Mit zunehmender Bearbeitungstiefe und -intensität nimmt der Mulchdeckungsgrad ab. Besonders bemerkenswert ist jedoch die Entwicklung des Mulchdeckungsgrades in der Stoppelbearbeitung nach Winterraps. Die erste Stoppelbearbeitung führte zu einer Zunahme des Mulchdeckungsgrades.

Vor der ersten Stoppelbearbeitung war bereits Ausfallraps durch die Schicht aus Ernterückständen gewachsen, sodass der gemessene Mulchdeckungsgrad geringer ausfiel als nach der Bearbeitung. Vergleicht man dies mit den Daten aus 2022, als direkt nach der Ernte deutlich weniger Ausfallraps auf der Fläche stand und der Boden nahezu vollständig mit Ernterückständen bedeckt war, wird deutlich, dass der tatsächliche Mulchdeckungsgrad höher gewesen sein könnte, als die Messungen zeigten.

Ausfallrapspflanzen verdeckten auf den Fotoaufnahmen, die für die Auswertung genutzt wurden, Teile der Mulchschicht. Zudem wird mechanisch bekämpfter und oberflächlich abgelegter Ausfallraps zu späteren Zeitpunkten als Teil der Mulchschicht erfasst. Abgetrennte und auf der Bodenoberfläche abgelegte Rapsstoppeln bedecken den Boden stärker als stehende Rapsstoppeln. Diese Faktoren erklären den Effekt der Bearbeitung mit dem Rotationsschleifer auf den Mulchdeckungsgrad.

Kraftstoffverbrauch 2023 Die Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsmessung aus dem Jahr 2023 sind aufgrund veränderter Rahmenbedingungen, Verfahrensketten und Anpassungen am Rotationsschleifer nicht direkt mit den Daten aus 2022 vergleichbar. Dennoch zeigen sich ähnliche Trends wie im Vorjahr: Mit zunehmender Bearbeitungsintensität und -tiefe stieg auch 2023 der Kraftstoffverbrauch.

Im Vergleich zu 2022 wurde beim Einsatz des überarbeiteten Rotationsschleifers ein tendenziell höherer Kraftstoffverbrauch gemessen. Dies lässt



Abbildung 5.28: Mit dem Rotationsschleifer am 12.09.2023 bearbeitete Winterrapsstoppelparzelle 6 Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung

sich auf die technischen Optimierungen der Maschine zurückführen, die eine ganzflächigere Bearbeitung auch unter schwierigen Bedingungen ermöglichen sollten. Das optimierte Rotorausgleichssystem und die neuen Parallelogramme erlaubten einen höheren Werkzeugdruck auf den Boden, wodurch die Werkzeuge tiefer in den Boden eindringen.

Die hohen Niederschlagsmengen im Sommer 2023 führten zudem zu aufgeweichten Böden, die den Einzug der Werkzeuge begünstigten. Dieser tiefere Bodeneingriff bewegte mehr Material, was den Zugkraftbedarf und damit den Kraftstoffverbrauch entsprechend erhöhte.

5.3.5 Zwischenfazit

Die Ergebnisse der Feldversuche aus 2022 wurden 2023 weitgehend bestätigt, obwohl die Witterungsbedingungen in beiden Jahren stark voneinander abwichen. Strohstriegel und Rotationsschleifer zeigten erneut ihr Potenzial Ausfallraps zur Keimung anzuregen. Dennoch erzielte die Kurzscheibenegge bei Ausfallgetreide eine deutlich effektivere Keimanregung.

Hinsichtlich der Bekämpfung erwiesen sich Strohstriegel und Rotationschleifer als weniger wirksam im Vergleich zur Großfederzinkenegge und Kurzscheibenegge. Zwischen diesen beiden Werkzeugen zeigte der Rotationsschleifer jedoch Vorteile, da er Ausfallraps effektiver abschneiden und bekämpfen konnte als der Strohstriegel.

Ein zentrales Problem des Rotationsschleifers in der Stoppelbearbeitung nach Getreide bleibt das vollständige Abschneiden und Entwurzeln von Ausfallgetreidepflanzen. Auch nach zwei Arbeitsgängen blieben verwurzelte Stoppeln im Boden, und selbst bei der dritten Stoppelbearbeitung konnte kein ganzflächiger Schnitt erzielt werden, was die vollständige Bekämpfung des Ausfallgetreides verhinderte.

Nach Winterraps fiel vor allem das streifenförmige Bearbeitungsmuster des Rotationsschleifers auf. Innerhalb der bearbeiteten Streifen wurde Ausfallraps zuverlässig abgeschnitten und oberflächlich abgelegt. Außerhalb dieser Streifen hingegen wurde der Ausfallraps zwar mechanisch beansprucht, jedoch nicht entwurzelt oder abgetötet. Zudem trat ab der zweiten Bearbeitung eine unerwünschte Dammbildung längs zur Fahrtrichtung auf. Dieses Phänomen resultierte aus der Rotation der Rotoren um die Z-Achse und der Neigung entlang der X-Achse, die ein lockeres Gemisch aus Boden und Ernterückständen in Längsdämme ablegte.

Die Dammbildung wurde erst ab der zweiten Stoppelbearbeitung deutlich sichtbar, da die Werkzeuge während der ersten Bearbeitung ausschließlich in festem Boden und aufliegenden Ernterückständen arbeiteten. Bei den folgenden Bearbeitungsgängen bewegten sich die Werkzeuge auch durch die lockere Schicht aus Erde und Ernterückständen, was die Bildung von Längsdämmen begünstigte.

Zur Verbesserung des Rotationsschleifers Version 3 waren daher grundlegende Anpassungen notwendig. Insbesondere die Modifikation der Werkzeuge und die Optimierung der Werkzeuggeometrie wurden als erforderlich erkannt. Während weiterer Feldtests zeigte sich zudem ein Bedarf an erhöhter Stabilität und Haltbarkeit, da es wiederholt zu abgebrochenen Werkzeugen und verbogenen Werkzeughaltern kam. Diese Schwachstellen wurde bei der weiteren Überarbeitung berücksichtigt.

5.4 Feldversuche 2024

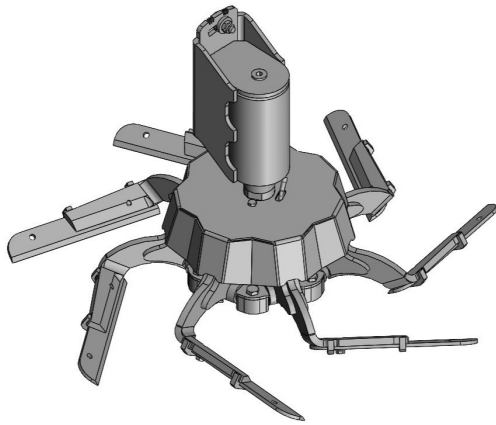
2024 wurden keine umfangreichen pflanzenbaulichen Feldversuche durchgeführt. Allerdings ist die Arbeitsqualität der Bodenbearbeitungsgeräte exemplarisch untersucht worden.

5.4.1 Beschreibung Rotationsschleifer Version 4 Stand 2024

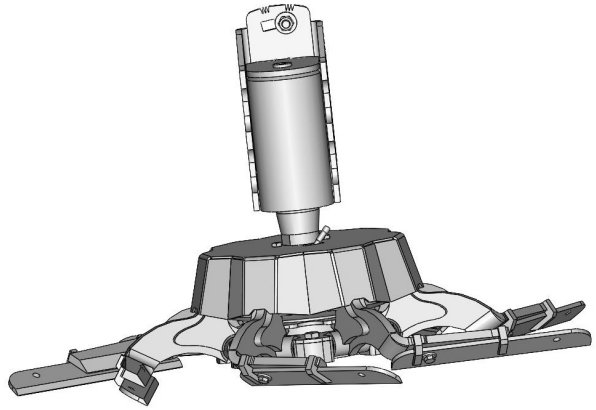
Für die Feldversuchssaison 2024 wurde der Rotationsschleifer durch ein Vorserienmodell ersetzt, das mehrere Verbesserungen umfasst. Der überarbeitete Rahmen verfügt nun über integrierte Abstellstützen, die nicht mehr separat ein- oder ausgeklappt werden müssen. Zudem wurde ein zweireihiger Stroh- und Nachstriegel installiert, dessen Höhe variabel ist und dessen Neigung entlang der Y-Achse für jede Reihe individuell angepasst werden kann. Ziel des Nachstriegels ist die Querverteilung von organischem Material zur Fahrtrichtung sowie die Einarbeitung eventuell auftretender Dämme.

Im Vergleich zur Version 3 wurde der Lagerbock für eine Serienfertigung überarbeitet. Der Rotor der Version 4 besitzt weiterhin eine optimierte Umhausung, die Verschmutzungen und Beeinträchtigungen der innenliegenden Bauteile effektiv verhindert (Abbildung 5.29). Zu den häufigen Problemen der Version 3 zählte die Verformung der Werkzeugaufnahmen, die bei Version 4 durch Verstärkungen behoben wurde. Auch die Werkzeughalter, die in der Vorgängerversion den Materialfluss behinderten, wurden optimiert. Die Werkzeugaufnahme ist nun so gestaltet, dass organisches Material und Boden besser zur Rotormitte abfließen können.

Wie in der vorherigen Version ist auch die Version 4 mit einem Gleitteller an der Rotorunterseite ausgestattet, der die Arbeitstiefe auf 2 bis 3 cm begrenzt. Zur Anpassung der Bearbeitungsaggressivität und Arbeitstiefe kann die Querneigung auf 6, 8 oder 10 Grad eingestellt werden. Dies erfolgt durch das Lösen zweier Muttern, das Drehen des Rotors entlang der X-Achse und das anschließende Fixieren in der gewünschten Position durch Anziehen der Muttern. Diese Modifikationen ermöglichen eine flexible Anpassung an aktuelle Einsatzbedingungen.



Rotor Version 4



Rotor Version 4 Frontalansicht

Abbildung 5.29: Rotor Version 4 (2024)

Die Werkzeuge sind von der Funktionalität mit denen des Rotationsschleifer Version 3 identisch. Hauptunterschied ist jedoch der symmetrische Aufbau des Messers, welches direkt mit dem Werkzeugstiel verschraubt ist. Dadurch kann bei zunehmendem Verschleiß ein Tausch der Messer vom vorderen auf den hinteren Balken und umgekehrt erfolgen.

5.4.2 Durchführung

Das letzte Versuchsjahr 2024 beinhaltete die Bewertung der Arbeitsqualität. Ziel war die Überprüfung der technischen Funktionalität des überarbeiteten, seriennahen Rotationsschleifers.

5.4.3 Ergebnisse

Die durchschnittliche Arbeitstiefe variierte bei allen drei getesteten Bodenbearbeitungsgeräten. Die Kurzscheibenegge erreichte durchschnittliche Arbeitstiefen zwischen 10,46 und 14,59 mm, während die Großfederzinkenegge mit 14,19 bis 19,12 mm die größten Arbeitstiefen erzielte. Der Rotationsschleifer lag mit durchschnittlichen Arbeitstiefen von 14,7 bis 17,76 mm im Mittelfeld zwischen den beiden anderen Geräten.

Der Variationskoeffizient der Arbeitstiefe war bei der Kurzscheibenegge am höchsten und reichte von 55,68 bis 78,45. Bei der Großfederzinkenegge war der Variationskoeffizient mit Werten zwischen 38,5 und 60,57 geringer, während der Rotationsschleifer mit einem Variationskoeffizienten zwischen

28,36 und 58,20 die homogensten Ergebnisse erzielte (siehe Tabelle 5.14).

Tabelle 5.14: Arbeitsqualität der drei Bodenbearbeitungsgeräte Rotationsschleifer, Großfederzinkenegge und Kurzscheibenegge. Die Werte für die Standardabweichung und den Variationskoeffizienten sind auf zwei Nachkommastellen gerundet.

Bodenbearbeitungsgerät	Wiederholung	durchschnittliche Arbeitstiefe (mm)	Standardabweichung (mm)	Variationskoeffizient (%)
Rotationsschleifer	1	16,90	5,65	33,46
Rotationsschleifer	2	17,76	5,04	28,36
Rotationsschleifer	3	14,70	8,56	58,20
Großfederzinkenegge	1	16,65	6,41	38,50
Großfederzinkenegge	2	14,19	8,59	60,57
Großfederzinkenegge	3	19,12	8,80	46,01
Kurzscheibenegge	1	10,46	8,21	78,45
Kurzscheibenegge	2	11,27	6,27	55,68
Kurzscheibenegge	3	14,59	9,07	62,14

Abbildung 5.30 zeigt drei Bearbeitungsprofile für die Großfederzinkenegge, die Kurzscheibenegge und den Rotationsschleifer, einschließlich der durchschnittlichen Arbeitstiefe in den jeweiligen Wiederholungen. In den Wiederholungen 1 und 2 erreichte der Rotationsschleifer ein vergleichsweise gleichmäßigeres Arbeitsbild als in Wiederholung 3. Im Gegensatz dazu zeigten Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge ein insgesamt heterogenes Bearbeitungsmuster. Besonders bei der Kurzscheibenegge wurden in Wiederholung 3 deutlich abweichende Arbeitstiefen festgestellt, etwa in der Position zwischen 90 und 100 cm quer zur Fahrtrichtung, wo Bereiche entweder zu tief oder zu flach bearbeitet wurden.

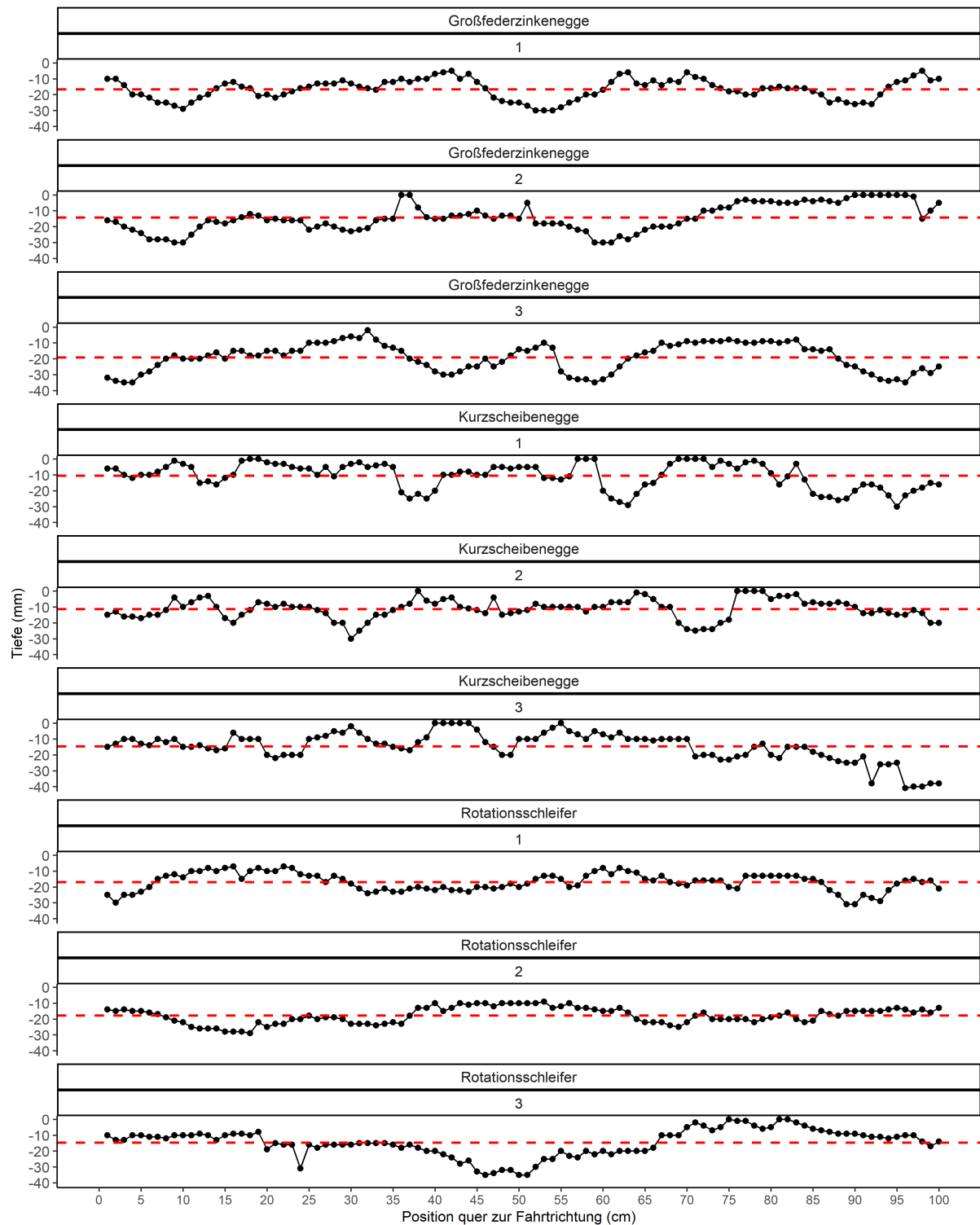


Abbildung 5.30: Bearbeitungsprofile der drei Bodenbearbeitungsgeräte. Die rote, gestrichelte Linie zeigt die durchschnittliche Arbeitstiefe des jeweiligen Bodenbearbeitungsgerätes in der jeweiligen Wiederholung an.

5.4.4 Diskussion

Der niedrigere Variationskoeffizient der Arbeitstiefe und die gleichmäßigeren Bearbeitungsprofile verdeutlichen, dass der Rotationsschleifer das homogenste Arbeitsergebnis erzielt. Die Tiefenführung der einzelnen Rotoren durch Gleitteller und Parallelogramm sowie die Werkzeugführung mittels des Ausgleichssystems im Rotor ermöglichen eine ultraflache, ganzflächige Bodenbearbeitung besser als Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass für eine ultraflache, flächendeckende Bodenbearbeitung eine präzise Tiefenführung möglichst schmaler Arbeitssegmente erforderlich ist.

Im Gegensatz dazu ermöglicht die starre Tiefenführung der Kurzscheibenegge über die Nachlaufwalze nur eine Anpassung der Arbeitstiefe über die gesamte Arbeitsbreite. Die gezackten Scheiben verursachen zudem einen heterogenen Bearbeitungshorizont, da die Differenz im Scheibendurchmesser aufgrund des gezackten Designs größer ist als die angestrebte Arbeitstiefe von maximal 2 cm. Daher ist eine ultraflache, ganzflächige Bearbeitung längs zur Fahrtrichtung mit diesem Gerät nicht realisierbar.

Zudem verlangt der Aufbau als Hohl- und Wellscheibe und der Strichabstand von 12,5 cm des verwendeten Versuchgeräts eine Mindestarbeitstiefe, um eine flächendeckende Bearbeitung zu erreichen. Die am Versuchgerät montierten gezackten Hohl- und Wellscheiben verhindern jedoch eine ultraflache, gleichmäßige Bodenbearbeitung. Aus diesem Grund setzen einige Hersteller auf Wellscheiben, die den Boden in einem Zickzackmuster bearbeiten. Dies soll eine flächendeckende Bearbeitung bei geringer Arbeitstiefe ermöglichen (Amazonen-Werke H. Dreyer SE & Co. KG, 2024; Väderstad GmbH, 2024). Das auch die Arbeitstiefe Einfluss auf den Bearbeitungshorizont sowie die Oberfläche hat, stellten Knechtges et al. (2010) in Feldversuchen fest: bei geringer Arbeitstiefe hinterließ die Kurzscheibenegge den Acker deutlich unebener als bei größerer Arbeitstiefe.

Abbildung 5.31 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Wirkprinzipien von Hohl- und Wellscheiben. Während Hohl- und Wellscheiben, die quer und längs zur Fahrtrichtung angestellt sind, einen schmalen Streifen bearbeiten, verbleiben Wellscheiben – die nicht gezackt sind – dauerhaft im Bodeneingriff. Dadurch gewährleisten sie selbst bei geringen Arbeitstiefen eine möglichst flächendeckende Bearbeitung längs zur Fahrtrichtung.

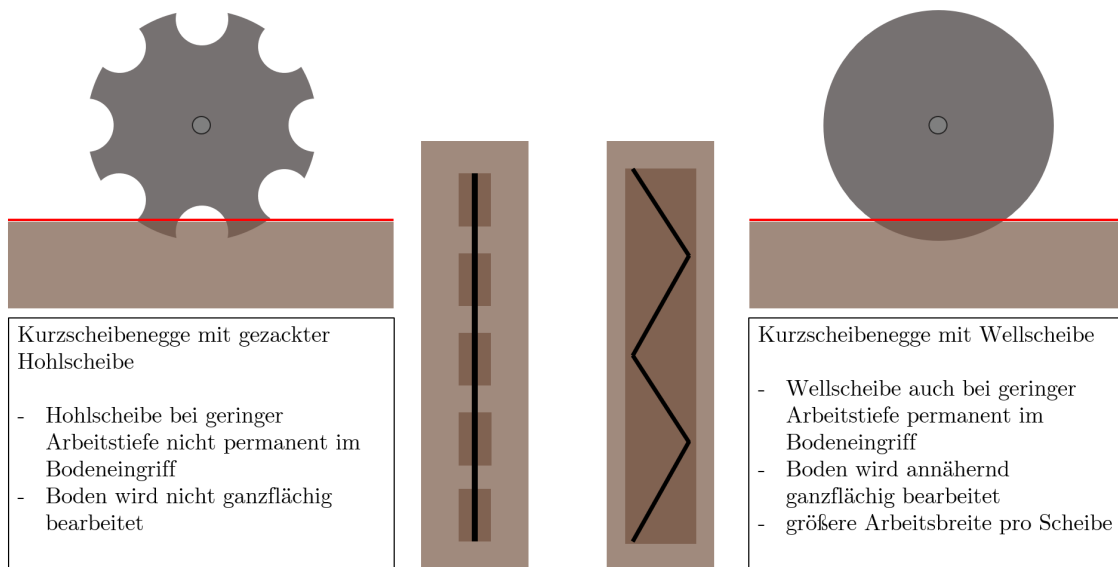


Abbildung 5.31: Vergleich von zwei Kurzscheibeneggentypen mit Hohl-scheibe (links) und Welscheibe (rechts). Dargestellt ist jeweils die Seitenansicht sowie eine Draufsicht auf den Bearbeitungshorizont.

Die Großfederzinkenegge ist mit jeweils zwei Stützrädern am vorderen und hinteren Ende ausgestattet, wodurch sie sich dank des im Langloch positionierten Oberlenkers besser an die Bodenkontur anpassen kann als die Kurzscheibenegge. Dennoch führt die große Baulänge dazu, dass einzelne Werkzeuge bei längs zur Fahrtrichtung verlaufenden Unebenheiten entweder ausgehoben werden oder zu tief in den Boden eindringen. Darüber hinaus erzeugt die Vibration der Federzinken eine zusätzliche Variation in der Arbeitstiefe. Dies spiegelt sich in einem im Vergleich zum Rotations-schleifer heterogeneren Bearbeitungshorizont sowie einem teilweise hohen Variationskoeffizienten der Arbeitstiefe wider.

Eine Verbesserung des Arbeitsergebnisses könnte durch den Austausch der Federzinken gegen starre Zinken oder strichstabile Scharstiele erreicht werden, die nicht seitlich ausweichen oder vibrieren. Solche Scharstiele ermöglichen ein ruhigeres Laufen des Gänsefußschares im Boden und verhindern das seitliche Ausweichen bei der Bearbeitung von Wurzelballen oder Stoppeln, was insbesondere bei viel Wurzelmasse einen flächendeckenden Schnitt gewährleistet. Federzinken hingegen können sowohl quer als auch längs zur Fahrtrichtung ausweichen. Während die Bewegung längs zur Fahrtrichtung einerseits Feinerde erzeugt und das Schar Steinen ausweichen lässt, was den Federstiel auch als Steinsicherung nützlich macht, kann ein Nachteil insbesondere auf harten Böden und bei einem großen Anstellwinkel des Gänsefußschares auftreten. Hierbei wird das Schar auf die Spit-

ze gestellt, wodurch die Scharbreite nicht mehr vollständig genutzt wird. Dieses Problem ließe sich durch stärkere Federn oder den Einsatz starrer Scharstiele beheben. Als Steinsicherung könnten Spiralfedern, Blattfedern oder hydraulische Systeme verwendet werden.

Die Versuchsergebnisse sind jedoch nicht uneingeschränkt auf die Praxis übertragbar. Im Versuch wurde ein Totalherbizid eingesetzt, sodass zum Bearbeitungszeitpunkt keine lebenden Pflanzen auf der Fläche vorhanden waren. Abgestorbene Pflanzen sind im Vergleich zu lebenden Pflanzen leichter zu durchschneiden und zu bearbeiten. Zudem wurde das Volumen der Ernterückstände sowie deren Fraktionierung durch den Einsatz eines Schlegelmulchers reduziert bzw. verändert. Der gewählte Versuchsaufbau diente dazu, die maximale Leistungsfähigkeit der Bodenbearbeitungsgeräte bei ultraflacher Bodenbearbeitung unter idealen Bedingungen zu demonstrieren.

In der Praxis werden diese Geräte jedoch oft unter deutlich anspruchsvolleren Bedingungen eingesetzt, etwa auf Flächen mit Grünbewuchs oder größeren Mengen an Pflanzenrückständen. Die Erfahrungen aus den Feldversuchen 2022 und 2023 unter solchen Bedingungen zeigen, dass die Arbeitsqualität des Rotationsschleifers stark von den Rahmenbedingungen abhängt. Besonders große Mengen an Wurzelmasse im angestrebten Bearbeitungshorizont sowie eine hohe Menge an Ernterückständen können das Eindringen der Werkzeuge in den Boden erschweren, wodurch keine flächendeckende Bearbeitung erreicht wird.

Auch die Großfederzinkenegge profitiert davon, wenn organisches Material auf der Bodenoberfläche zuvor abgeführt oder zerkleinert wird, um ein Verstopfen der Maschine zu vermeiden. In der Stoppelbearbeitung nach Getreide könnte der Einsatz einer Messerwalze im Frontanbau dazu beitragen, dass sowohl der Rotationsschleifer als auch die Großfederzinkenegge ein besseres Arbeitsergebnis erzielen. Eine möglichst flache und flächendeckende Bearbeitung könnte auf diese Weise zuverlässiger realisiert werden.

5.4.5 Zwischenfazit

Die ultraflache Bodenbearbeitung stellt hohe Anforderungen an die eingesetzte Technik. Insbesondere die präzise Tiefenführung der Werkzeuge ist entscheidend, um die angestrebte maximale Arbeitstiefe von 2 cm zuverlässig einzuhalten. Zusätzlich stellen die Art, Zusammensetzung und Menge

der Ernte- und Pflanzenrückstände eine weitere Herausforderung dar, die die Effizienz und Qualität der Bearbeitung maßgeblich beeinflussen kann.

6 Diskussion

In diesem Kapitel werden die bisherigen Ergebnisse und Erkenntnisse aus 2, 4 und 5 zusammengefasst und abschließend diskutiert.

Der Einstieg erfolgt mit der Analyse der technischen Eigenschaften des Rotationsschleifers und deren Einordnung in pflanzenbauliche Zusammenhänge. Daran schließt sich die Bewertung der untersuchten Verfahrensketten an.

Im weiteren Verlauf werden Zielkonflikte in der Stoppelbearbeitung aufgezeigt und erläutert. Anschließend wird Stoppelbearbeitung als integraler Bestandteil von Ackerbausystemen evaluiert wobei auch mögliche Alternativen kritisch betrachtet werden. Ergänzend werden Strategien für eine erfolgreiche Stoppelbearbeitung vorgestellt, exemplarisch anhand der Fruchtfolge des Versuchsbetriebes.

Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der in den pflanzenbaulichen Feldversuchen angewandten Methoden ab.

6.1 Rotationsschleifer

Der Rotationsschleifer wurde von 2021 bis 2024 in umfangreichen Feldversuchen und zahlreichen Tests erprobt und kontinuierlich weiterentwickelt. Der folgende Abschnitt fasst die bisherigen Erkenntnisse zum Gerät und zur ultraflachen Stoppel- und Bodenbearbeitung zusammen.

6.1.1 Bewertung der Technik

Zu Beginn der Versuchsplanung wurde die folgende Hypothese aufgestellt: *Im Vergleich zu bisheriger Technik zur flachen Bodenbearbeitung ist eine deutlich flachere, maximal 2 cm tiefe, konstant ganzflächige Bodenbearbeitung mit dem neuartigen Gerätekonzept Rotationsschleifer möglich.* Die Ergebnisse und die Versuchsdokumentation zeigen jedoch, dass dieses Ziel nicht vollständig erreicht werden konnte und die Hypothese somit nicht

bestätigt werden kann.

Die Versuche zeigen, dass die Einhaltung der Arbeitstiefe durch das Parallelogramm und das Ausgleichssystem im Rotor theoretisch möglich ist. Tatsächlich ist die Arbeitstiefe im Vergleich zu Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge homogener und durch die Tiefenbegrenzung auf maximal 2 cm beschränkt (siehe Unterabschnitt 5.4.4). Dennoch konnte in den drei Versuchsjahren nur nach Winterraps eine durchgehend ganzflächige Bodenbearbeitung beobachtet werden. Diese Ergebnisse sind stark abhängig von Bearbeitungszeitpunkt, -termin und der Menge der Ernterückstände. Bei größeren Mengen an Ernterückständen, etwa nach einer Getreideernte ohne Strohabfuhr, wird der Boden kaum bearbeitet, und ein durchgängiger Schnitt im Boden ist nicht möglich. In solchen Fällen arbeiten die Werkzeuge überwiegend in der Mulchauflage und nicht im Boden.

6.1.2 Bekämpfung von Ausfallsamen und Ausfallpflanzen

In den Testeinsätzen 2024 zeigte sich, dass der Rotationsschleifer Version 4 (Stand 2024) nach Winterraps eine ganzflächige Bearbeitung erzielen kann. Die Streifen- bzw. Dammbildung wurde durch den zweireihigen Striegel bei der ersten Bearbeitung nach der Winterrapsernte deutlich reduziert. Fünf Tage nach dem ersten Arbeitsgang konnte mit dem Rotationsschleifer die erste Keimwelle von Ausfallraps erfolgreich bekämpft werden. Nach der Bearbeitung waren allerdings Dämme längs zur Fahrtrichtung erkennbar. Zwölf Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung keimte der Ausfallraps vor allem in diesen Dämmen erneut auf (siehe Abbildung 6.1).

Nach der dritten Stoppelbearbeitung mit dem Rotationsschleifer Version 4 waren die Längsdämme noch stärker ausgeprägt (siehe Abbildung 6.2), obwohl die Fahrtrichtung mit jeder Überfahrt variiert wurde.

Die Begrenzung der Arbeitstiefe der Rotoren erklärt die beobachteten Ergebnisse. Die Werkzeuge arbeiten in einer Tiefe von 2 bis 3 cm, gemessen als Differenz zwischen Gleitteller und dem tiefsten Punkt des Werkzeugeingriffs in den Boden oder die Mulchschicht. Bei einer Mulchauflage von 1 cm dringen die Werkzeuge maximal 1 bis 2 cm in den Boden ein. Bei dickeren Mulchschichten erfolgt die Bearbeitung lediglich oberflächennah, ohne in den Boden einzudringen.

Nach der Winterrapsernte zeigt sich beim ersten Arbeitsgang, dass die



Abbildung 6.1: Mit dem Rotationsschleifer Version 4 zweimal bearbeitete Winterrapstoppel 12 Tage nach der zweiten Stoppelbearbeitung

dünne Mulchauflage aus gehäckseltem Stroh, Ausfallraps und Rapsschoten eine tendenziell ganzflächige Bodenbearbeitung ermöglicht. Beim zweiten Arbeitsgang sind jedoch bereits größere Mengen an Stoppeln abgeschnitten und auf der Oberfläche verteilt, wodurch die Mulchauflage dicker wird und die Arbeitstiefe der Werkzeuge entsprechend sinkt. Dies führt dazu, dass der Boden nicht mehr vollständig bearbeitet wird und Ausfallraps in schmalen Streifen stehen bleibt.

Die Neigung der Rotoren entlang der X-Achse bewirkt, dass organisches Material mit Erde vermischt und in Dämmen abgelegt wird. Da keine Rückverfestigung durch eine Walze erfolgt, bleibt die Bodenoberfläche nach der dritten Stoppelbearbeitung durch ein loses Gemisch aus Ernterückständen und Erde gekennzeichnet. Die Dicke der Mulchauflage, die von der Verrottung des organischen Materials abhängt, beeinflusst somit die Bearbeitungstiefe der Werkzeuge. Mit zunehmender Mulchschicht durch abgetrennte Stoppeln und abgeschnittenen Ausfallraps verringert sich die Bearbeitungstiefe weiter (siehe Abbildung 6.3).



Abbildung 6.2: Mit dem Rotationsschleifer Version 4 dreimal bearbeitete Winterrapsstoppel unmittelbar nach der dritten Stoppelbearbeitung

Technisch ist es bei der Stoppelbearbeitung nach Wintergetreide nur begrenzt möglich, durch ultraflache Bearbeitung den Besatz mit Unkräutern, Ungräsern und Ausfallpflanzen im Vergleich zu bisherigen Verfahren mit Kurzscheibenegge oder Mulchsaatgrubber zu reduzieren. Nach Wintergetreide zeigte der Rotationsschleifer Version 4 eine deutlich aggressivere Bearbeitung als in den Versuchsjahren 2022 und 2023, benötigte jedoch weiterhin zwei bis drei Arbeitsgänge, um annähernd eine ganzflächige Bodenbearbeitung zu erreichen.

Es bleibt unklar, ob Ausfallgetreide allein durch die höhere Aggressivität der Werkzeuge und den verbesserten Mischeffekt ähnlich gut zur Keimung angeregt werden kann wie mit einer Kurzscheibenegge. Die bisherigen Ergebnisse sprechen dagegen. Weitere Versuche mit dem Rotationsschleifer Version 4 bei der Stoppelbearbeitung nach Wintergetreide und Winterraps sind erforderlich, um diese Fragen abschließend zu klären.

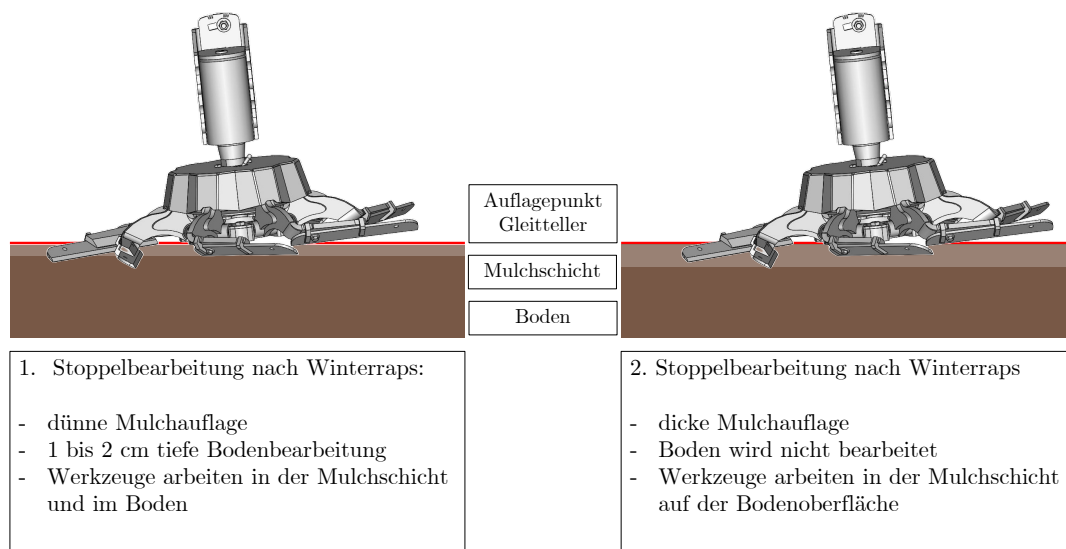


Abbildung 6.3: Vereinfachte Darstellung der Stoppelbearbeitung mit dem Rotationsschleifer nach Winterraps; die rote Linie zeigt den Auflagepunkt des Gleittellers, die hellbraune Fläche entspricht der Mulchsicht, die dunkelbraune Fläche entspricht dem Boden

Je nach Bodenart, Witterungsverhältnissen und eingesetztem Arbeitsgerät beeinflusst die Arbeitstiefe nicht nur die Einbettung von Samen im Boden, sondern auch die Qualität des Saatbetts. Auf schweren Böden mit hohem Tonanteil kann eine tiefere Bearbeitung grobe Bestandteile an die Oberfläche fördern, die ohne Zerkleinerung durch Nachlaufwerkzeuge wie Walzen die weitere Bodenbearbeitung erschweren. Diese Kluten können Samen im Inneren einschließen, die erst keimen, wenn die Kluten zerfallen, was die mechanische Bekämpfung von Ausfallsamen und Unkräutern behindert.

Die Hypothese Gegenüber bisherigen Verfahren in der Stoppelbearbeitung kann der Besatz mit Ausfallsamen und Ausfallpflanzen durch ultraflache Bodenbearbeitung mit dem Rotationsschleifer zum Zeitpunkt der Aussaat der Folgekultur oder zum Zeitpunkt der Grundbodenbearbeitung zur Folgekultur reduziert werden konnte nicht bestätigt werden.

Abhilfe könnten optimierte, breitere Werkzeuge schaffen, die tiefer in den Boden eindringen und somit auch bei größerer Menge an pflanzlichem Material an der Bodenoberfläche zu einer ganzflächigen Bearbeitung führen könnten. Hier besteht jedoch die Gefahr, dass Samen vergraben werden, wodurch ein Tausch der Werkzeuge unumgänglich erscheint.

Zusätzlich sollte der Rahmen angepasst werden, damit der Abstand der Rotoren geringer und die theoretisch bearbeitete Fläche größer werden. Durch die größere Überlappung der Arbeitsbereich der Rotoren kann eine ganzflächige Bearbeitung tendenziell auch bei großen Mengen an Ernterückständen sichergestellt werden.

6.1.3 Stroh- und Stoppelkonditionierung

In nahezu allen Versuchen zeigte sich, dass die ultraflache Stoppel- und Bodenbearbeitung mit Rotationsschleifer oder Strohstriegel einen signifikant höheren Mulchdeckungsgrad im Vergleich zu Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge bewirkte. Eine Ausnahme bildete der letzte Boniturtermin nach Winterraps am 15.09.2023, bei dem der Mulchdeckungsgrad in der Parzelle GS/GFZE trotz Bearbeitung mit der Großfederzinkenegge höher lag als in der Verfahrenskette GS. Dies ist jedoch auf den Vegetationsdeckungsgrad zurückzuführen, der in der Parzelle GS mit etwa 20 % signifikant höher war als in GS/GFZE.

Da die Summe der Deckungsgrade von Vegetation, Mulch, Boden und ggf. Steinen stets 100 % beträgt, resultiert der geringere Mulchdeckungsgrad der Verfahrenskette GS aus dem höheren Vegetationsanteil. Um den tatsächlichen Mulchdeckungsgrad zu bewerten, ist der Anteil unbedeckten Bodens (weder bewachsen noch mit Ernterückständen bedeckt) ein hilfreicher Indikator, der in der Verfahrenskette GS/GFZE signifikant höher war (siehe Anhang Abbildung 8.1).

Diese Ergebnisse lassen sich durch die Arbeitstiefe erklären: Der Rotationsschleifer arbeitet konstruktionsbedingt maximal 2 cm tief. Bei hohen Mengen an Ernterückständen, insbesondere nach Wintergetreide ohne Strohabfuhr, wird die Arbeitstiefe durch die Dicke der Mulchschicht und die Gleitteller der Rotoren begrenzt. Der erste Arbeitsgang konzentriert sich daher vor allem auf die intensive Bearbeitung der Mulchauflage. Dabei wird das organische Material teilweise zerkleinert und aufgefasert, jedoch nicht mit dem Boden vermischt. Dadurch bleibt die Mulchauflage länger erhalten (siehe auch Abbildung 6.4).

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal des Rotationsschleifers gegenüber Strohstriegel und Kurzscheibenegge ist die Länge der Wurzelballen der bearbeiteten Getreidestoppeln. Abbildung 6.5 zeigt Wintergerstenstoppeln von einer Fläche, die zweimal mit dem Rotationsschleifer bearbeitet wurde.



Abbildung 6.4: Bodenoberfläche einer Wintergerstestoppel nach zwei Arbeitsgängen mit dem Rotationsschleifer, die 4 bzw. 11 Tage nach der Ernte durchgeführt worden sind

Auch der Strohstriegel bewirkt, ähnlich wie der Rotationsschleifer, nur eine geringe Abnahme des Mulchdeckungsgrades. Die Striegelzinken arbeiten überwiegend an der Bodenoberfläche und dringen lediglich auf leichten oder bereits bearbeiteten Böden 1 bis 2 cm tief ein. Dadurch wird das organische Material nicht mit dem Boden vermischt, sondern lediglich verteilt und mechanisch beansprucht.

Die Kurzscheibenegge hingegen zieht aufgrund ihres Eigengewichts, der Fahrgeschwindigkeit sowie der Wölbung und Neigung der Scheiben in den Boden ein. Durch dieses Wirkprinzip wird das organische Material intensiv mit dem Boden vermischt, was zu einem deutlichen Rückgang des Mulch- und Ernterückstandsdeckungsgrades führt.

Die Hypothese 3 *In der Stoppelbearbeitung verbleiben mehr Ernte- bzw. Pflanzenrückstände nach einer ultraflachen Bearbeitung mit dem Rotationsschleifer auf der Bodenoberfläche als nach einer flachen Bodenbearbeitung mit Kurzscheibenegge oder Großfederzinkenegge* kann daher bestätigt werden.



Abbildung 6.5: Stoppeln und abgetrennte Wurzelballen einer zweimal mit dem Rotationsschleifer bearbeiteten Wintergerstenfläche

6.1.4 Verfahrenstechnik und -kosten

Die Analyse der Verfahrensketten und Ergebnisse aus den pflanzenbaulichen Versuchen zeigt im Vergleich zu den einzelnen Verbrauchsdaten ein differenziertes Bild. Grundsätzlich zeichnet sich die Verfahrenskette GS durch niedrige Kraftstoffverbräuche aus (siehe Tabelle 5.9 und Tabelle 5.13). Dennoch ist die Verfahrenskette GS nicht in allen Fällen die effektivste bei der Bekämpfung von Ausfallsamen. Dies kann zusätzliche Maßnahmen zur Bekämpfung unerwünschter Vegetation erforderlich machen.

Zu diesen Maßnahmen zählen beispielsweise eine weitere Bodenbearbeitung, der Einsatz von Totalherbiziden vor der Aussaat oder selektive Herbizide im Vor- oder Nachauflauf. Auch mechanische Verfahren wie Hacken oder Striegeln sowie eine wendende Bodenbearbeitung vor der Aussaat könnten bei unzureichender Bekämpfung von Unkräutern, Ungräsern und Ausfallgetreide notwendig werden. Daher sollten bei der Kostenkalkulation nicht nur die Kraftstoffverbräuche, sondern auch die Bekämpfungserfolge der einzelnen Bodenbearbeitungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

Rotationsschleifer und Strohstriegel weisen aufgrund ihrer größeren Ar-

beitsbreite und höheren Einsatzgeschwindigkeit höhere theoretische Flächenleistungen auf als Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge. Zudem führen die geringere Arbeitsbreite und die damit verbundene höhere Anzahl von Wendevorgängen bei Geräten mit 3 m Arbeitsbreite zu einem höheren Anteil der Wendezeiten an der Gesamtarbeitszeit auf einer Referenzfläche von 1 ha im Vergleich zu Geräten mit 6 m Arbeitsbreite.

In allen Versuchen war der Kraftstoffverbrauch pro Hektar beim Einsatz des Rotationsschleifers geringer als bei der Kurzscheibenegge. Die Hypothese 4 *Im Vergleich zum Status Quo Kurzscheibenegge ist der Kraftstoffverbrauch beim Einsatz des Rotationsschleifers geringer* kann daher bestätigt werden.

6.1.5 Bewertung der untersuchten Verfahrensketten

Lediglich bei den Feldversuchen zur Stoppelbearbeitung nach Wintergerste im Jahr 2023 konnte das Versuchsprogramm mit drei Bearbeitungsterminen wie geplant durchgeführt werden. Daher bezieht sich die Gesamtbetrachtung vorrangig auf diesen Versuch. Für die Stoppelbearbeitung lassen sich drei Hauptziele formulieren:

1. Geringer Besatz mit Ausfallgetreide am Ende des Versuchs
2. Hohe Bodenbedeckung mit Ernterückständen
3. Geringe Verfahrenskosten

Die ultraflache Bodenbearbeitung mit Rotationsschleifer oder Strohstriegel erzielt aufgrund ihrer hohen Flächenleistung und des niedrigen Kraftstoffverbrauchs geringe Verfahrenskosten. Gleichzeitig bleibt durch die geringe Arbeitstiefe und die schwache Mischwirkung die Mulchauflage weitgehend erhalten. Im Gegensatz dazu ermöglicht die tiefere, ganzflächige Bodenbearbeitung mit der Großfederzinkenegge am dritten Bearbeitungstermin eine effektive Bekämpfung der Ausfallgerste. Damit bieten die Verfahrensketten GS/GFZE und S/GFZE in der Gesamtbetrachtung Vorteile gegenüber GS und KSE.

Im Versuch zur Stoppelbearbeitung nach Winterweizen 2022 konnten die ersten beiden Bearbeitungstermine wie geplant durchgeführt werden, der dritte Termin musste jedoch an die örtlichen Bedingungen angepasst werden. Auch hier zeigt sich ein ähnliches Muster wie bei der Stoppelbearbeitung nach Wintergerste 2023: Die ultraflache Bearbeitung führt zu ge-

ringeren Keimraten und niedrigeren Bekämpfungserfolgen bei Ausfallweizen, ermöglicht jedoch einen guten Erhalt der Mulchauflage sowie günstige Verfahrenskosten. Wenn der Fokus jedoch auf der Bekämpfung von Ausfallweizen liegt, erweist sich die Verfahrenskette KSE trotz leicht höherer Verfahrenskosten und einer stärkeren Reduktion der Mulchauflage als am effektivsten.

Weitere Versuche zur Stoppelbearbeitung nach Wintergerste, Winterweizen und Winterraps konnten nicht vollständig wie geplant durchgeführt werden. Daher ist eine umfassende Bewertung der Verfahrensketten nur eingeschränkt möglich. Dennoch zeigt sich, dass nach allen Vorfrüchten die Mulchauflage am längsten erhalten blieb, wenn zunächst Strohstriegel oder Rotationsschleifer eingesetzt wurden. Aufgrund ihrer hohen theoretischen Flächenleistung und der im Vergleich zu Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge geringeren Kraftstoffverbräuche weisen diese Geräte tendenziell geringere Verfahrenskosten auf.

Hinsichtlich der Bekämpfung von Ausfallgetreide und Ausfallraps ergibt sich ein differenziertes Bild: Während Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge besonders effektiv im Bekämpfen von aufgelaufenen Pflanzen und in der Anregung von Ausfallgetreide zur Keimung sind, erzielen Strohstriegel und Rotationsschleifer höhere Keimraten bei Ausfallraps. Allerdings regen sie Ausfallweizen und Ausfallgerste weniger stark zur Keimung an als die Kurzscheibenegge.

Die Analyse der Versuchsergebnisse und die Gesamtbewertung (siehe Tabelle 6.1) zeigen deutlich, dass keine Verfahrenskette alle Ziele gleichermaßen erfüllt. Die Auswahl einer geeigneten Verfahrenskette oder einzelner Verfahrensschritte hängt daher stark von der jeweiligen Kulturart, den primären Zielen sowie den herrschenden Witterungsbedingungen ab.

Tabelle 6.1: Gesamtbewertung der Verfahrensketten; Keimanregung Ausfallsamen wurde anhand der Anzahl Pflanzen pro m² und des Vegetationsdeckungsgrades bei der ersten Bonitur nach dem 1. Stoppelbearbeitungsgang bewertet; Bekämpfung von aufgelaufenen Pflanzen wurde anhand der Anzahl Pflanzen pro m² und des Vegetationsdeckungsgrades beim letzten Boniturtermin bewertet; Erhalt der Mulchauflage wurde anhand des Mulchdeckungsgrades beim letzten Boniturtermin bewertet; Die Verfahrenskosten wurden anhand von Kraftstoffverbrauch und Flächenleistung bewertet; - schlecht bzw. negativ, 0 durchschnittlich, + gut bzw. positiv

Jahr	Kultur	Verfahrenskette	Keimanregung Ausfallsamen	Bekämpfung von aufgelaufenen Pflanzen	Erhalt der Mulchauflage	Verfahrenskosten
2022	Wintergerste	GS	-	-	+	+
		KSE	+	+	-	-
		S/KSE	0	+	0	0
	Winterweizen	GS2	-	-	+	+
		GS3	0	-	+	-
		KSE	+	0	0	-
	Winterraps	S/KSE	-	-	+	+
		GS	0	+	0	0
		KSE	-	-	-	-
		S/KSE	0	0	+	0
		S/GS	+	0	+	+
2023	Wintergerste	GS	0	-	+	+
		GS/GFZE	-	+	-	0
		KSE	+	+	-	-
		S/GFZE	-	0	-	0
	Winterweizen	GS	+	0	+	+
		GS/GFZE	0	-	0	0
		KSE	-	+	-	-
		S/GFZE	0	-	0	0
	Winterraps	GS	0	0	0	+
		GS/GFZE	0	+	+	0
		GS/KSE	+	-	-	0

6.1.6 Zwischenfazit

Der Rotationsschleifer zeigte sich im Jahr 2024 als einsatzsicher. Überzeugen konnte dieses Gerät durch die gute Boden Anpassung. Das bei guten Bedingungen homogene Arbeitsbild wird jedoch mit zunehmender Organik an der Bodenoberfläche schlechter. Die weitere Überarbeitung für Bedingungen mit Ernterückständen auf der Bodenoberfläche ist daher nach wie vor erforderlich.

Ultraflache Stoppel- und Bodenbearbeitung mit dem Rotationsschleifer oder Strohstriegel erhält die Mulchauflage weitestgehend und bietet geringe Verfahrenskosten. Schwächen zeigt dieses Verfahren bei der Bekämpfung von Ausfallgetreide im Vergleich zu Kurzscheibenegge und Großfederzinkenegge. Tiefere Bodenbearbeitung kann Ausfallgetreide effektiver bekämpfen, wobei jedoch die Verfahrenskosten höher liegen und die Mulchauflage

stärker reduziert wird.

Die Wahl des geeigneten Verfahrens hängt stark von der Kulturart, den Umweltbedingungen und den Zielen ab. Da keine Methode alle Ziele erreicht, sind weitere Versuchsreihen notwendig, um spezifische Handlungsempfehlungen für möglichst viele Szenarien ableiten zu können.

6.2 Stoppelbearbeitung

Ultraflache Bodenbearbeitung stellt eine Möglichkeit zur Stoppelbearbeitung dar. Im Folgenden werden Zielkonflikte in der Stoppelbearbeitung untersucht und die Praxisrelevanz dieser Methode bewertet.

6.2.1 Zielkonflikte in der Stoppelbearbeitung

Da mit der Stoppelbearbeitung mehrere Ziele verfolgt werden, sind Zielkonflikte unvermeidlich. Tabelle 6.2 fasst die zentralen Ziele des Nacherntemanagements zusammen und zeigt, welche Arbeitstiefen und Funktionen der Bodenbearbeitungswerkzeuge für deren Erreichung erforderlich sind.

Ein zentraler Zielkonflikt betrifft die Arbeitstiefe: Während die Bekämpfung von Ausfallgetreide eine größere Arbeitstiefe erfordert, ist für den Erhalt der Mulchauflage oder die Strohkonditionierung eine geringere Tiefe sinnvoll. Die mit der Ausfallgetreidebekämpfung verbundene Mischung von Ernterückständen und Ausfallsamen mit Boden kann den Erhalt der Mulchauflage und andere Ziele beeinträchtigen. Der ganzflächige Schnitt ist für die Bekämpfung von Ausfallsamen und -pflanzen sowie Ungräsern und Unkräutern hilfreich und notwendig, erschwert jedoch die Strohverteilung und Strohkonditionierung. Auch die oberflächliche Materialzerkleinerung begünstigt die Strohkonditionierung und die Bekämpfung von Ausfallraps, da geschlossene Schoten aufgebrochen und Ausfallrapssamen an die Bodenoberfläche gelangen. Da kleinere Fraktionen der Ernterückstände mit großer Oberfläche aber schneller biologisch abgebaut werden, kann sich die Zerkleinerung der Ernterückstände negativ auf den Erhalt der Mulchauflage auswirken. Einzig die oberflächliche Materialverteilung wirkt sich mindestens neutral, in einigen Fällen aber positiv auf die Zielerreichung aus.

Weitere Zielkonflikte verbergen sich hinter Begriffen, die mit der Stoppelbearbeitung und den Nacherntemanagement in Verbindung gebracht

werden. Beispielsweise kann unter dem Management der Ernterückstände einerseits das Einmischen in den Boden verstanden werden, mit dem Ziel das pflanzliche Material in mehreren Arbeitsgängen mit zunehmender Arbeitstiefe möglichst homogen im Boden zu verteilen. Das Belassen der Ernterückstände auf der Bodenoberfläche für maximalen Erosions- und Verdunstungsschutz zählt ebenso zum Management der Ernterückstände. Bearbeitungstiefe und -häufigkeit sollten mit Blick auf eine größtmögliche Bodenbedeckung so gering wie möglich sein.

Ein weiteres Beispiel für Zielkonflikte ist die Regulierung von Ungräsern und Wurzelunkräutern. Ungräser lassen sich am besten durch flache oder ultraflache Bearbeitung kontrollieren, da dies die Samen an der Bodenoberfläche austrocknen oder von Mikroorganismen abbauen lässt. Ein tieferes Einmischen könnte hingegen die Dormanz der Samen fördern und deren Keimfähigkeit bewahren. Die Bekämpfung von Wurzelunkräutern erfordert hingegen ein tieferes Eingreifen, um Rhizome oder Ausläufer zu zerschneiden und durch mehrfache Bearbeitung die Pflanzen auszuhungern. Hier zeigen sich die Zielkonflikte besonders deutlich in den Anforderungen an Bearbeitungstiefe und -häufigkeit.

Tabelle 6.2: Ziele der Stoppelbearbeitung und notwendige Funktionen der Bodenbearbeitungswerkzeuge

Ziel	Arbeitstiefe (cm)	Mischen	ganzflächiger Schnitt	oberflächliche Materialzerkleinerung	oberflächliche Materialverteilung	Anzahl Überfahrten
Bekämpfung von Ausfallgetreide	3 bis 5	+	+	0	0 bis +	2 bis 3
Bekämpfung von Ausfallrap	2	-	+	+	0 bis +	2 bis 3
Bekämpfung von Ungräsern	2	-	+	0	0 bis +	2 bis 3
Bekämpfung von Wurzelunkräutern	3	-	+	0	0	2 bis 3
Erhalt der Mulchauflage	2	-	- bis 0	- bis 0	0 bis +	2
Strohverteilung	2	-	-	- bis 0	+	1 bis 2
Strohkonditionierung	2	-	-	+	0 bis +	1 bis 3

Abhängig vom Erntetermin der Vorfrucht und dem Aussattermin der Nachfrucht ergibt sich ein unterschiedlich großes Zeitfenster für Stoppel- und Bodenbearbeitungsmaßnahmen. Folgt beispielsweise auf Wintergetreide Winterraps, ist der Zeitraum zwischen Ernte und Aussaat geringer als bei einer nachfolgenden Sommerkultur. Der in nitratbelasteten Gebieten verpflichtende Anbau einer Zwischenfrucht vor Sommerungen verkürzt hingegen das Zeitfenster für Bodenbearbeitungsmaßnahmen deutlich, da Zwischenfrüchte von einer frühen Aussaat und der damit verbundenen längeren Vegetations- und Wachstumsdauer profitieren und somit möglichst unmittelbar nach der Ernte etabliert werden müssen.

Regionale Unterschiede bei den Zeitfenstern ergeben sich zudem durch die geografische Lage: in der Kölner Bucht ist der Zeitraum zwischen der Winterweizenernte und der Aussaat von Winterraps deutlich größer als bei-

spielsweise in Nordfriesland. Weiterhin führen die Fruchtfolge und damit auch die Ansprüche der nachfolgenden Hauptkultur gerade bei engen Zeitfenstern zu Zielkonflikten, da in kurzer Zeit mehrere Ziele mit der Stoppelbearbeitung erreicht werden müssen.

Als Beispiel sei die Aussaat von Winterraps nach Winterweizen mit Verbleib der Ernterückstände auf dem Feld genannt. Winterraps stellt hohe Ansprüche an das Saatbett. Dieses sollte feinkrümelig und möglichst frei von Stroh und Stoppel im Saathorizont und der späteren Saatrille sein. Stroh bindet im Abbauprozess Stickstoff, der den jungen Rapspflanzen nicht zur Verfügung steht. Aufgrund des hohen Stickstoffbedarfs von Winterraps im Herbst und der Möglichkeit, hohe Mengen Stickstoff pro Hektar im Herbst aufzunehmen, sollte ein Stickstoffmangel möglichst vermieden werden. Da außerdem eine organische oder mineralische Düngung nicht immer möglich und in nitratbelasteten Gebieten auch nur bei Nmin-Werten unter 45 kg Stickstoff pro Hektar erlaubt ist ((Bundministerium für Ernährung und Landwirtschaft et al., 2017), muss das Stroh entweder homogen eingemischt werden oder komplett auf der Bodenoberfläche verbleiben. Das Einmischen in den Boden bewirkt eine Verdünnung der Strohmenge im Bodenhorizont. Gleichzeitig mineralisiert mit jedem Bodenbearbeitungsgang Stickstoff, der von den Rapspflanzen genutzt werden kann. Der Verbleib von Stroh an der Bodenoberfläche stellt hingegen hohe Anforderungen an die Sätechnik, verzögert aber den Abbau durch Bodenmikroorganismen, der aufgrund der weiten C:N-Verhältnisse der Ernterückstände Stickstoff bindet. Dadurch kann der nach der Weizenernte im Boden verbliebene Stickstoff von den Rapspflanzen genutzt werden.

In beiden Verfahren ist eine gleichmäßige Strohverteilung notwendig, die den Einsatz eines Strohstriegels zur Strohverteilung erfordern kann. Sollen die Ernterückstände in den Boden eingemischt werden, sind dazu mehrere Arbeitsgänge erforderlich, mit denen zusätzlich auch auflaufendes Ausfallgetreide bekämpft wird. Ist die Zeitspanne zwischen Weizenernte und Rapsaussaat kurz, sind die Ansprüche an die Bodenbearbeitungsgeräte somit deutlich höher und zwangsläufig müssen mehrere Arbeitsschritte kombiniert werden, die unter Umständen Spezialgeräte mit mehreren Werkzeugtypen erfordern.

Winterraps profitiert mit seiner Pfahlwurzel und seinem allorhizen Wurzelsystem von einer Lockerung. Ist diese vor der Winterrapsaussaat notwendig, schrumpft das Zeitfenster für die Stoppelbearbeitung zusätzlich.

Landwirte und Landwirtinnen sind somit gezwungen, in kurzer Zeit angepasst an Standort und Wetter mehrere Entscheidungen mit Blick in die unmittelbare Zukunft zu treffen und zeitgleich Zielkonflikte möglichst zu vermeiden. Verstärkt wird dies in sehr trockenen oder sehr nassen Sommern, die jeweils eine ganz eigene Vorgehensweise erfordern.

Besonders in der Stoppelbearbeitung steht heute weiterhin eine große Bandbreite an Werkzeugen mit unterschiedlichen Wirkprinzipien zur Verfügung (siehe Unterabschnitt 2.1.2). Einige Geräte wie bspw. Strohstriegel und Messerwalze arbeiten auf der Bodenoberfläche, mit dem Ziel Ernterückstände zu verteilen oder zu zerkleinern. Wiederum andere Geräte wie Grubber und Kurzscheibenegge können diese Aufgaben bauartbedingt nicht übernehmen. Dafür kann mit diesen Geräten und den montierten Werkzeugen Boden mit Ernterückständen vermischt werden. Für eine ganzflächige Bodenbearbeitung ist je nach Strichabstand und Werkzeugform eine Mindestarbeitstiefe von 3 bis 5 cm notwendig. In der Praxis entsteht dadurch ein Zielkonflikt bei der Auswahl der Werkzeuge und der Reihenfolge ihres Einsatzes. Bereits mit Boden vermischte Ernterückstände lassen sich nicht mehr zerkleinern und eine Verteilung ist zumindest deutlich schwieriger, wenn das organische Material im Boden eingearbeitet ist. Sollen Ernterückstände verteilt oder zerkleinert werden, muss zunächst dieser Arbeitsgang mit Strohstriegel oder Messerwalze stattfinden, bevor ein Einmischen in den Boden mittels Scheibenegge oder Grubber herbeigeführt wird. Um Zielkonflikte in der Stoppelbearbeitung zu vermeiden, ist daher auch eine sorgfältige Nacherntebonitur notwendig.

Hinsichtlich der Zielkonflikte in der Stoppelbearbeitung lässt sich zusammenfassen, dass diese nicht nur aus den mit der Stoppelbearbeitung verbundenen Zielen, sondern auch aus der Fruchtfolge, den Zeitfenstern zwischen Ernte der Vorfrucht und Aussaat der Folgekultur, dem Standort, dem Klima und Wetter, sowie der großen Bandbreite an Werkzeugen resultieren. Notwendig ist daher eine standort- und wetterangepasste Strategie für unterschiedliche Szenarien.

6.2.2 Evaluierung Stoppelbearbeitung

Im Folgenden wird das Konzept der Stoppelbearbeitung umfassend evaluiert.

Stoppelbearbeitung in der wissenschaftlichen Literatur Bei der Literaturrecherche zur Stoppel- und Bodenbearbeitung fällt auf, dass die Versuchsdurchführungen in vielen Fällen nicht ausreichend detailliert beschrieben werden. Wichtige Parameter wie Bodenbearbeitungsgerät, Arbeitstiefe, Bearbeitungstermine oder der Witterungsverlauf werden teils nur unvollständig oder gar nicht angegeben. So nennen einige Studien zwar die Bearbeitungstermine und Arbeitstiefen (z. B. (Pekrun & Claupein, 2001, 2003; Pekrun et al., 2002)), während andere diese grundlegenden Informationen vollständig auslassen (z. B. (Hunger, Pekrun & Claupein, 2001; Hunger, Pekrun, Claupein & Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 2001)). Besonders kritisch ist, dass häufig keine genauen Angaben zu den verwendeten Bodenbearbeitungsgeräten gemacht werden. Unterschiede in Balkenzahl, Strichabstand, Schartyp und Nachläufer können bei Geräten wie Mulchsaatgrubbern erhebliche Auswirkungen auf die Arbeitsergebnisse haben, was die Vergleichbarkeit erschwert.

Ein weiteres Problem ist die oft unscharfe Kategorisierung von Geräten, insbesondere in englischsprachigen Studien, wo der Begriff „Tine Cultivator“ sowohl Mulchsaatgrubber als auch Großfederzinkeneggen umfasst. Obwohl beide Geräte ähnliche Wirkprinzipien haben, unterscheiden sich ihre Arbeitsergebnisse deutlich. Solche Ungenauigkeiten führen dazu, dass Studien schwer miteinander vergleichbar sind und die Übertragung der Ergebnisse in die Praxis oder weiterführende Forschung problematisch ist.

Positiv hervorzuheben ist beispielsweise die Arbeit von Brandsæter et al. (2017), die neben den genannten Parametern auch das Entwicklungsstadium der zu bekämpfenden Pflanzen als Grundlage für die Bearbeitungstermine angeben. Dies erleichtert die Interpretation von Ergebnissen, insbesondere bei der Bekämpfung von Ausfallgetreide, Ausfallraps oder Unkräutern.

Um die Vergleichbarkeit von Studien zur Stoppel- und Bodenbearbeitung zu verbessern, sollten künftig standardisierte Angaben gemacht werden. Wichtige Parameter und Fragen, die bei der Versuchsdurchführung beantwortet werden sollten, umfassen:

- Welche Ziele verfolgt die Versuchsreihe?
- Welche Ziele sollen mit der durchgeführten Bodenbearbeitung erreicht werden?

- Angaben zu klimatische Bedingungen, Witterungsverlauf und Standortbeschreibung
- Informationen zur Fruchtfolge und zum Ertrag der Vorfrucht
- Wurde das Stroh ins Schwad abgelegt oder gehäckselt und breit verteilt?
- Detaillierte Beschreibung der eingesetzt Bodenbearbeitungsgeräte inklusive der Bearbeitungstiefe und der Einsatztermine

Stoppelbearbeitung in Zeiten zunehmender Extremwetterereignisse und klimatischer Veränderungen Die Ergebnisse der Feldversuche verdeutlichen, dass der Erfolg von Stoppelbearbeitungsmaßnahmen stark von den klimatischen Bedingungen abhängt. Zwischen trockenen, heißen Sommermonaten und gemäßigter Witterung mit regelmäßigen Niederschlägen zeigten sich deutliche Unterschiede, insbesondere bei der Keimung von Ausfallsamen. Unter trockenen, heißen Bedingungen keimen weniger Ausfallsamen, da intensive Bodenbearbeitung die Mulchauflage reduziert, Bodentemperaturen erhöht und somit den Wasserhaushalt, das Bodenleben sowie den Erosionsschutz negativ beeinflusst. Auf harten, trockenen Böden können Bodenbearbeitungsgeräte häufig nicht effektiv eindringen, was eine sinnvolle Stoppelbearbeitung unmöglich macht.

Gegensätzlich erschweren auch extrem nasse Sommermonate mit anhaltenden Niederschlägen die Durchführung der Stoppelbearbeitung, da die Befahrbarkeit der Böden eingeschränkt ist. Zwar kann die erste Stoppelbearbeitung auf festem Boden oft auch bei feuchten Bedingungen durchgeführt werden, jedoch birgt dies das Risiko von verschmierten und verschlammten Bearbeitungshorizonten sowie Schadverdichtungen, insbesondere bei empfindlichen Böden. Eine zweite Stoppelbearbeitung ist unter feuchten Bedingungen noch problematischer, vor allem, wenn zuvor Geräte wie Kurzscheibeneggen, Großfederzinkeneggen oder Mulchsaatgrubber eingesetzt wurden. Auf solchen bearbeiteten Flächen ist die Befahrbarkeit häufig erst nach ausreichendem Abtrocknen gegeben, was den optimalen Bearbeitungszeitpunkt hinauszögern und verpasste Zeitfenster zur Bekämpfung von Ausfallpflanzen zur Folge haben kann. Sind diese Pflanzen bereits zu weit entwickelt, erschwert dies ihre vollständige mechanische Bekämpfung in einem Arbeitsgang erheblich.

Die beschriebenen Extremsituationen – trockene Hitze oder anhaltende Feuchtigkeit – sind zwar Grenzfälle, nehmen jedoch durch den Klimawan-

del und die Zunahme von Extremwetterereignissen weiter zu (Huber & Gulledge, 2011; Jentsch & Beierkuhnlein, 2008; McBean, 2004; Meehl et al., 2000). Anpassungsstrategien in der Stoppelbearbeitung werden daher zunehmend wichtiger, um die Herausforderungen wechselnder Klimabedingungen zu bewältigen.

Stoppelbearbeitung und Ungräser Stoppelbearbeitung wird häufig im Zusammenhang mit der Bekämpfung von Ungräsern wie beispielsweise Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) diskutiert. Abhängig von der Bearbeitungstiefe und -intensität unterscheiden sich dabei die Bekämpfungserfolge erheblich (Messelhäuser et al., 2022). Ein tiefes Einmischen von Ackerfuchsschwanz in den Boden führt dazu, dass dieser in der Samenbank persistent bleibt (Jensen, 2019). Dies lässt sich unter anderem durch die Ausprägung der Dormanz bzw. Keimruhe erklären, die je nach Witterung während der generativen Phase unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann (Menegat et al., 2018). Warme, trockene Witterung während der generativen Phase von Ackerfuchsschwanz führte in Versuchen zu einem kleineren Anteil an dormanten Samen als kühle, feuchte Witterung (Swain et al., 2006).

Die Keimung von Ackerfuchsschwanz wird wiederum durch Licht stimuliert (Colbach et al., 2002; Froud-Williams, 1981). Mit Laborversuchen konnten (Colbach et al., 2002) nachweisen, dass der Zeitpunkt des Lichtreizes die Keimrate beeinflusst. Je später Ackerfuchsschwanzsamen Licht ausgesetzt waren, desto geringer war die Keimrate. Keimrate und Zeitpunkt der Keimung von Ackerfuchsschwanz hängen daher von multiplen Faktoren ab (Holloway et al., 2024).

Andersson und Åkerblom Espeby (2009) schlussfolgern, dass die Keimrate von Ackerfuchsschwanz bei geringer Ausprägung der Dormanz und ausreichendem Lichtreiz hoch ist. Auch die Position der Ackerfuchsschwanzsamen im Boden beeinflusst die Keimrate. Je tiefer die Samen im Boden sind, desto geringer ist die Keimrate, wobei dies nicht nur für Ackerfuchsschwanz, sondern mit der gleichen Versuchsreihe u.a. auch für Weißer Gänsefuß (*Chenopodium album* L.), Schwarzer Nachtschatten (*Solanum nigrum* L.), Ackerwinde (*Convolvulaceae arvensis* L.), Vogelknöterich (*Polygonum aviculare* L.), Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense* L.) und Ackersenf (*Sinapis arvensis* L.) festgestellt werden konnte (Benvenuti et al., 2001). Auch in Versuchen von Froud-Williams et al. (1984) und Froud-Williams et al.

(1984) keimte Ackerfuchsschwanz vor allem in der Bodenschicht von 0 bis 2 cm mit hohen Keimraten.

Soll die Stoppelbearbeitung als effektive Maßnahme zur nachhaltigen Ackerfuchsschwanzbekämpfung eingesetzt werden, sind diese Eigenschaften zu berücksichtigen. Mit Blick auf die Stoppelbearbeitung ist zunächst die Arbeitstiefe relevant. Werden die Ackerfuchsschwanzsamen tiefer als 2 cm in den Boden eingemischt, sinkt die Keimrate. Es besteht die Gefahr, dass diese Samen zu einem späteren Zeitpunkt beispielsweise bei der Grundbodenbearbeitung oder Saatbettbereitung an die Oberfläche gelangen und aufgrund des Lichtreizes die Keimung induziert wird. Während die gekeimten Ackerfuchsschwanzpflanzen nach der Grundbodenbearbeitung noch mechanisch oder gegebenenfalls mit einem Totalherbizid chemisch bekämpft werden können, besteht insbesondere bei kombinierter Saatbettbereitung und Aussaat die Gefahr, dass Ackerfuchsschwanz und Hauptkultur zeitgleich keimen. Eine Regulation ist dann nur mit selektiven Herbiziden oder mechanischer Unkrautbekämpfung möglich, wobei die Wirkungsgrade beider Maßnahmen variieren und von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig sind.

Mehrfache ultraflache Stoppelbearbeitung bietet dann Chancen in der Ackerfuchsschwanzbekämpfung, wenn die frischen Ackerfuchsschwanzsamen eine geringe Ausprägung der Keimruhe aufweisen (Andersson & Åkerblom Espeby, 2009). Eine starke Ausprägung der Dormanz z.B. nach kühler, feuchter Witterung während der generativen Phase des Ackerfuchsschwanzes (Swain et al., 2006) führt nur zu geringen Keimraten. Ob die Dormanz durch einen Lichtreiz und damit durch ultraflache Stoppelbearbeitung gebrochen und die Keimung induziert werden kann, hängt weiterhin von weiteren Umweltfaktoren wie Temperatur, Bodenfeuchtigkeit und dem Witterungsverlauf ab (Holloway et al., 2024). Der Erfolg einer ultraflachen Stoppelbearbeitung als Maßnahme zur Ackerfuchsschwanzbekämpfung kann daher insbesondere bei hoher Ausprägung der Dormanz nicht kalkuliert und sichergestellt werden. Jedoch könnte durch die Implementierung ultraflacher Stoppel- und Bodenbearbeitung, insbesondere wenn bisher in der Stoppelbearbeitung tiefer als 2 cm gearbeitet wurde, das Risiko, eine Samenbank mit persistenten Samen aufzubauen (Jensen, 2019), gesenkt werden. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen und Versuche notwendig, die beispielsweise auch den Vergleich zwischen konsequenter Umsetzung der konservierenden Landwirtschaft und ultraflacher Bodenbearbeitung beinhalten könnten.

Stoppelbearbeitung und Unkräuter Stoppelbearbeitung wirkt sich auf das Vorkommen dikotyler Arten aus. In Versuchen von Gruber et al. (2012) reduzierte Stoppelbearbeitung das Auftreten von Unkräutern vor allem im Herbst. Je nach Bearbeitungstiefe variiert die Zusammensetzung der Segetalflora (Boström & Fogelfors, 1999). Dabei reagieren verschiedene Unkrautarten unterschiedlich stark auf die Stoppelbearbeitung (Boström et al., 2000). Mehrfache Stoppelbearbeitung kann zu einer Verbesserung des gewünschten Effektes führen, wobei auch der Zeitpunkt der Bearbeitung Einfluss auf die Zusammensetzung der Segetalflora haben kann (Pekrun & Claupein, 2006).

Stoppelbearbeitung und Wurzelunkräuter In Kapitel Unterabschnitt 6.2.1 wurde bereits erläutert, dass die Bekämpfung von Samenunkräutern und -ungräsern wie Ackerfuchsschwanz und Windhalm andere Arbeitstiefen und Bearbeitungsstrategien erfordern als Wurzelunkräuter. Der Erfolg einer Bodenbearbeitungsmaßnahme die das Ziel hat, Wurzelunkräuter zu bekämpfen, hängt neben der Arbeitstiefe auch von den Witterungsbedingungen ab. Trockene Witterung nach der Bearbeitung fördert das Austrocknen der abgetrennten Pflanzenteile, sodass zunächst eine Reduktion der Wurzelunkräuter stattfindet. Regelmäßig durchgeführt, können Ackerkratzdisteln und andere Wurzelunkräuter regelrecht ausgehungert und dadurch bekämpft werden. Insbesondere im ökologischen Landbau stellt die Stoppelbearbeitung somit ein wichtiges Werkzeug dar, um Wurzelunkräuter zu regulieren (Dierauer Hansueli & Lefebvre Nicolas, 2022; Lukashyk et al., 2008; Pekrun et al., 2003).

Ökologische Nachteile der Stoppelbearbeitung Wirkung und Effekte verschiedener Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf den Boden und das Agrarökosystem sind in Abschnitt 2.3 bereits umfassend erläutert worden. Mit Blick auf die Stoppelbearbeitung gelten die dargelegten Erkenntnisse zur Auswirkung von Bodenbearbeitung zum Beispiel auf das Erosionsrisiko, den Bodenwasserhaushalt, die Bodentemperatur sowie auf Bodenleben und Bodenbiologie auch für die Stoppelbearbeitung. Negative Aspekte der Bodenbearbeitung können auch bei der Stoppelbearbeitung nicht vollständig vermieden werden. Durch die geringe Arbeitstiefe findet zumindest eine Verringerung bestimmter Risikofaktoren statt. Angepasste Bodenbearbeitungsstrategien erlauben beispielsweise den weitestgehenden Erhalt der Mulchauflage während der Stoppelbearbeitungsphase, auch wenn dies zu Kompromissen in der Bekämpfung von Ausfallsamen und Ausfallpflanzen

führt.

6.2.3 Alternativen zur Stoppelbearbeitung

Aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 5 und Unterabschnitt 6.2.2 stellt sich die Frage, welche alternativen Ansätze und Methoden zur Stoppelbearbeitung denkbar und heute bereits praxistauglich sind. Im folgenden Abschnitt werden daher einige Verfahren vorgestellt und diskutiert.

Verzicht auf Stoppelbearbeitung Soll auf die Stoppelbearbeitung verzichtet werden, können grundlegend zwei Ansätze unterschieden werden. Verfahren, in denen keine Bodenbearbeitung stattfindet, werden in Unterabschnitt 6.2.3 und Unterabschnitt 6.2.3 diskutiert. In diesem Abschnitt werden daher Verfahren vorgestellt und erläutert, in denen keine Stoppelbearbeitung aber trotzdem Grundboden- und Saatbettbereitung durchgeführt werden. Ausgenommen sind weiterhin die Bodenbearbeitung nach Zuckerrüben, Kartoffeln und Speisezwiebeln, da nach diesen Kulturen in der Regel keine Stoppelbearbeitung im eigentlichen Sinne stattfindet.

Unabhängig davon, ob die Grundbodenbearbeitung wendend mit dem Pflug oder nicht-wendend mit einem Mulchsaatgrubber oder einer Werkzeugkombination durchgeführt wird, ist zunächst der Zeitpunkt der Maßnahme relevant. Der zeitliche Rahmen erstreckt sich dabei von der Ernte bis zur Aussaat der Folgekultur im Herbst oder folgenden Frühjahr.

Im ersten Szenario erfolgt die Grundbodenbearbeitung unmittelbar nach der Ernte der Hauptkultur. Die Maßnahme führt – abhängig von Gerät und Arbeitstiefe – zu einem Einmischen der Ernterückstände, ohne diese zuvor zu zerkleinern oder zu verteilen. Besonders bei wendender Bearbeitung sinkt der Erosionsschutz, und die Gefahr von Wind- oder Wassererosion steigt. Der unbedeckte Boden erwärmt sich zudem und trocknet schneller aus. Begleitvegetation wird abgeschnitten und eingemischt, sodass die Fläche zunächst vegetationsfrei ist.

Die eingemischten Samen von Ausfallgetreide, Unkräutern und Ungräsern sowie zuvor im Boden befindliche Samen können keimen, was die Fläche bis zur Aussaat begrünt. Infolgedessen könnte der Einsatz eines Totalherbizids (Unterabschnitt 6.2.3) oder eine zusätzliche Bodenbearbeitung zur Regulierung der Begleitvegetation vor der Saatbettbereitung erforder-

lich werden.

Alternativ dazu kann die Grundbodenbearbeitung auch auf den Zeitraum unmittelbar vor der Aussaat der folgenden Winterung verschoben werden. Die Ernterückstände schützen den Boden vor Erosion und Austrocknung. Da Ausfall-, Unkraut- und Ungrassamen nicht in den Boden eingemischt werden, kann es bei ausreichenden Niederschlägen dazu kommen, dass diese auch ohne Bodenbearbeitung keimen und die Ackerfläche begrünen. Je nach Entwicklung der Begleitvegetation kann vor der Grundbodenbearbeitung der Einsatz eines Totalherbizides erforderlich sein.

Für den Fall, dass diese Maßnahme nicht möglich ist oder das Gerät zur Grundbodenbearbeitung aufgrund der Biomasse nicht zielführend arbeiten kann, muss eine Bodenbearbeitungsmaßnahme zur Zerkleinerung und flachen Einarbeitung der Begleitvegetation und Ernterückstände vor der Grundbodenbearbeitung erfolgen. In diesem Fall wird zwar auf die unmittelbare Stoppelbearbeitung nach der Ernte verzichtet, jedoch findet eine Verschiebung der Stoppelbearbeitung in den Herbst bzw. den Zeitraum unmittelbar vor der Grundbodenbearbeitung im Herbst statt.

Folgt nach der Ernte im Sommer die Aussaat einer Sommerung im nachfolgenden Frühjahr, kann die Grundbodenbearbeitung ähnlich wie zu einer Winterung unmittelbar nach der Ernte oder im Herbst durchgeführt werden. Die Effekte hinsichtlich des Erosionsschutzes und der Regulierung der Begleitvegetation sind vergleichbar mit den bereits beschriebenen Szenarien. Wird die Grundbodenbearbeitung im Sommer oder Herbst vorgenommen, geht die Ackerfläche bearbeitet und gegebenenfalls mit einem schlechten Erosionsschutz in den Winter. Bei früher Grundbodenbearbeitung kann es noch zur Keimung von Ausfall-, Unkraut- und Ungrassamen kommen, die über Winter als schützende Vegetation dienen. Die Grundbodenbearbeitung im späten Herbst führt jedoch dazu, dass der Acker ohne Vegetation in den Winter geht. Dies ist nicht nur hinsichtlich des Erosionsschutzes problematisch. Ohne Vegetation werden mobile Nährstoffe, insbesondere Stickstoff als Nitrat, in der Hauptsickerwasserperiode im Winter ausgewaschen. Mineralisation durch Bodenbearbeitung verstärkt diesen Effekt. Vorteilhaft bei später Grundbodenbearbeitung im Herbst ist die unter Umständen einfache Handhabung der Böden im Frühjahr. Da die Ernterückstände eingearbeitet sind, der Acker im Frühjahr zunächst wenig Vegetation aufweist und durch Frosteinwirkung grobe Kluten zerkleinert werden, ist die Saatbettbereitung im Frühjahr mit diesem Verfahren vergleichsweise

einfach durchzuführen.

Vor einer Sommerung kann die Grundbodenbearbeitung auch in das Frühjahr geschoben werden. In diesem Szenario geht der Boden bedeckt mit Ernterückständen in den Winter und ist somit gut vor Erosion geschützt. Da keine Bodenbearbeitung im Sommer oder Herbst stattgefunden hat, sind im Herbst wenig Nährstoffe durch Mineralisation freigesetzt worden, wodurch die Verluste über Winter geringer als bei vorgezogener Grundbodenbearbeitung im Herbst sind. Abhängig davon, wie viele Samen im Sommer und Herbst auch ohne Bodenbearbeitung gekeimt sind, geht der Acker nicht komplett unbewachsen in den Winter. Herausfordernd im Frühjahr ist dann die Beseitigung der Begleitvegetation, insbesondere bei bestocktem Ausfallgetreide oder weit entwickelten Wurzelunkräutern.

Einsatz von Totalherbiziden auf der Stoppel Zur Bekämpfung von Wurzelunkräutern wie Gemeiner Quecke (*Elymus repens*), Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*), Stumpfblättrigem Ampfer (*Rumex obtusifolius*) oder Landwasserknöterich (*Polygonum amphibium*) kann – sofern zugelassen – ein Totalherbizid mit dem Wirkstoff Glyphosat auf der Stoppel eingesetzt werden. Darüber hinaus wird Glyphosat nach der Ernte zur Bekämpfung von Ausfallraps und seltener für Ausfallgetreide eingesetzt. Einer Umfrage aus dem Jahr 2009 zufolge entfiel ein erheblicher Teil des Glyphosateinsatzes auf Stoppelbehandlungen: 27,5 % der Flächen nach Winterraps, 20,1 % nach Wintergerste und 15,8 % nach Winterweizen. Ob dabei auch Zwischenfrüchte im Frühjahr berücksichtigt wurden, bleibt unklar (Dickeduisberg et al., 2012). Laut einer Umfrage aus dem Winter 2014/2015 wurden 37,1 % der Ackerflächen in Deutschland mit Glyphosat behandelt, wobei die Stoppelbehandlung mit 22,2 % den größten Anteil ausmachte (Wiese et al., 2017).

Die maximal zulässige Wirkstoffmenge von 1800 g/ha wird vor allem bei schwer zu bekämpfenden Unkräutern und Ungräsern angewendet. Geringere Mengen genügen hingegen zur Bekämpfung von Ausfallraps und Ausfallgetreide (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2023). Ein ausreichender Bestand an Blattmasse ist Voraussetzung für die Wirksamkeit, weshalb die Applikation nicht direkt nach der Ernte, sondern erst später durchgeführt wird. Die Verfahrenskosten sind vergleichsweise gering, da sowohl die Kosten für den Wirkstoff als auch für die zugelassenen Pflanzenschutzmittel niedrig sind. Zudem ermöglicht der Einsatz moderner Pflanz-

zenschutzspritzen mit großen Arbeitsbreiten eine kosteneffiziente Applikation.

Ein wesentlicher Vorteil von Glyphosat ist sein hoher Wirkungsgrad gegenüber Wurzelunkräutern (Hunter, 1996) und Ungräsern, wenn die Applikation zum richtigen Zeitpunkt bzw. passendem Entwicklungsstadium der Zielpflanzen durchgeführt wird.

Eine Herausforderung stellt die Behandlung bei keimwellenartigem Auftreten von Ungräsern wie Ackerfuchsschwanz oder Ausfallraps dar. Es besteht das Risiko, den optimalen Applikationszeitpunkt zu verpassen. Während die erste Keimwelle erfolgreich beseitigt werden kann, bleibt die zweite Keimwelle unbehandelt, da eine wiederholte chemische Anwendung aufgrund von Zulassungsbeschränkungen nicht möglich ist (Bundeministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz et al., 27.06.2023; Europäisches Parlament & Europarat, 08.11.2023). Eine Behandlung sollte sich daher gezielt an den Pflanzenarten orientieren, die den Einsatz von Glyphosat erfordern.

Im Vergleich zu Bodenbearbeitungsverfahren entfällt bei Glyphosatbehandlungen die Bearbeitung von Stoppeln und Ernterückständen. Dies ist unproblematisch, wenn Direktsaat- oder Streifensaatmaschinen verwendet werden und die Fruchtfolge keine Einarbeitung der Ernterückstände erfordert. Bei Mulchsaat- oder konventionellen Bestellverfahren muss jedoch eine Bodenbearbeitung erfolgen, wodurch zusätzliche Kosten entstehen. Eine Glyphosatbehandlung ist daher nur sinnvoll, wenn mechanische Verfahren die gewünschte Unkraut- und Ungrasregulierung nicht gewährleisten.

Zudem ist der Einsatz von Glyphosat im ökologischen Landbau nicht zugelassen. Ebenso bestehen Nutzungsverbote in Wasserschutzgebieten, Heilquellenschutzgebieten sowie in Kern- und Pflegezonen von Biosphärenreservaten (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten et al., 10.11.1992).

Zwischenfrüchte und Untersaaten Der Anbau von Zwischenfrüchten gewinnt aufgrund der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) und veränderter klimatischer Bedingungen zunehmend an Bedeutung im Ackerbau. Zwischenfrüchte tragen erheblich zur Reduzierung von Wind- und Wassererosion bei (de Baets et al., 2011; Gómez et al., 2018; Langdale et al., 1991). Sie verbessern

die Wasserhaltefähigkeit und die Infiltrationsleistung von Böden, was vor allem durch die Förderung eines besseren Porensystems erreicht wird (Araza et al., 2022; Basche et al., 2016; Haruna et al., 2018). Besonders wirksam sind Zwischenfrüchte bei der Verringerung der Nitratauswaschung (Abdalla et al., 2019; Brandi–Dohrn et al., 1997; Nouri et al., 2022). Mischungen mit Leguminosen bereichern das Ackerbausystem zusätzlich durch biologische Stickstofffixierung (Anugroho et al., 2009; Perrone et al., 2020). Zudem fördern Zwischenfrüchte den Humusaufbau und die Kohlenstoffeinlagerung im Boden (Abdalla et al., 2019; Ding et al., 2006) und erfüllen somit eine Vielzahl ökologischer und ackerbaulicher Funktionen.

Ein zentrales Ziel der Stoppelbearbeitung ist die Bekämpfung von Unkräutern und Ungräsern. Zwischenfrüchte können nach ihrer Abtötung bis zu sieben Wochen nach der Aussaat der Hauptkultur eine vergleichbare Unkrautunterdrückung wie mechanische oder chemische Verfahren erreichen. Die Auswahl geeigneter Arten und Mischungen ist entscheidend (Osipitan et al., 2018). Die Unkrautunterdrückung korreliert stark mit der Biomasse der Zwischenfrüchte ($r^2 = 0,67$ für Unkrautbiomasse und $r^2 = 0,64$ für Unkrautdichte). Konkurrenzstarke Arten wie Roggen, Hafer, Triticale, Weizen und Sudangras zeigen eine besonders hohe Unkrautunterdrückung im Vergleich zu Arten wie Buchweizen, Ölrettich, Felderbse, Gelbsenf und Sonnenblume (Osipitan et al., 2019). Insbesondere konkurrenzstarke Arten die viel Biomasse produzieren, sind in der Lage, Unkräuter wirkungsvoll zu unterdrücken (MacLaren et al., 2019).

Weiterhin von Bedeutung ist der Saattermin der Zwischenfrucht. Eine frühe Etablierung möglichst unmittelbar nach der Getreideernte erlaubt der Zwischenfrucht möglichst viel von der Vegetationszeit zu nutzen und im Sommer und Herbst viel Biomasse zu bilden (Murrell et al., 2017). Folgt auf die Zwischenfrucht eine im späten Frühjahr ausgesäte Sommerung wie Mais, Soja oder Sonnenblume, kann die Zwischenfruchtmischung winterharte Arten enthalten, die im Frühjahr weiterwachsen. Eine zu späte Aussaat im Herbst führt jedoch zu einer geringeren Biomasseproduktion (Lawson et al., 2015).

Auch die Art der Etablierung wirkt sich auf die Biomasse der Zwischenfrucht aus. Gegenüber einer breitflächig gestreuten Zwischenfrucht konnte eine mittels Drillmaschine gesäte Zwischenfrucht in mehrjährigen Versuchen signifikant mehr Biomasse bilden (Haramoto, 2019). In Versuchen von Schappert et al. (2018) führte sowohl die Etablierung von Zwischen-

früchten in Mulchsaat als auch mittels No-Tillage zu 91,7 bis 100 % Wirkungsgrad in der Ackerfuchsschwanzbekämpfung. Flache Stoppelbearbeitung, tiefe Bodenbearbeitung, wendende Bodenbearbeitung und die einmalige Anwendung von Glyphosat konnten Ackerfuchsschwanz gegenüber der Kontrollvariante nicht reduzieren und förderten den Besatz z.T. um bis zu 860,6 %. Signifikante Unterschiede in der Unterdrückung von Ackerfuchsschwanz zwischen den Etablierungsmethoden der Zwischenfrucht konnten nicht festgestellt werden, jedoch konnte signifikant weniger Ausfallweizen aufgrund der Stoppelbearbeitung vor der Zwischenfruchtaussaat bonitiert werden.

Grundsätzlich können passende Zwischenfruchtmischungen und -arten die Segetalflora unterdrücken und zur Beikrautregulierung beitragen (Masilionyte et al., 2017). Dabei gibt es jedoch deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Arten und Zwischenfruchtmischungen (Brant et al., 2009). Beim Anbau von Zwischenfrüchten werden neben der Unkrautunterdrückung weitere Ziele verfolgt. Zur Zielerreichung ist eine hohe Biomasseproduktion notwendig. Gegenüber Reinsaaten produzieren Zwischenfruchtmischungen mehr Biomasse und bieten den Vorteil einer höheren Anbausicherheit (Wendling et al., 2019).

Vor der Aussaat der Folgekultur stellt sich bei Anbauverfahren mit Zwischenfrüchten die Frage nach der geeigneten Methode zur Abtötung der Zwischenfrucht. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Notwendig bei Strip-Tillage und No-Tillage ist das Abtöten der Zwischenfrüchte ohne Eingriff in den Boden. Zu diesem Zweck eignen sich Totalherbizide mit dem Wirkstoff Glyphosat. Diese werden vor der Aussaat appliziert. Vorteil der Totalherbizide ist die breite Wirkung auf Unkräuter, Ungräser und Zwischenfrüchte. Allerdings ist die Anwendung in Wasserschutzgebieten und Heilquellenschutzgebieten genauso verboten wie in Kern- und Pflegezonen von Biosphärenreservaten sowie in Naturschutzgebieten. Auf Flächen, die diesen Einschränkungen nicht unterliegen, gelten weitere Regelungen. So ist die Anwendung von Glyphosat nur im Einzelfall zulässig, wenn andere Maßnahmen nicht zumutbar oder ungeeignet sind. Die Anwendung zur Vorsaatbehandlung bei Direktsaat ist mit den beschriebenen Einschränkungen erlaubt, sodass Zwischenfrüchte bei Direktsaat in den grünen, stehenden Bestand mit einem glyphosathaltigen Totalherbizid abgetötet werden können (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2024).

Alternativ können selektive Herbizide verwendet werden. Diese Methode hat jedoch Einschränkungen, da nicht alle Arten in Zwischenfruchtmischungen bekämpft werden können. Wirkstoffe, die Leguminosen in einer Mischung abtöten, schädigen auch Leguminosen in der Hauptkultur. Daher sollte die Zwischenfruchtmischung sorgfältig auf die folgende Hauptkultur abgestimmt werden, um gegebenenfalls den Bestand chemisch von Unkräutern, Ungräsern und Zwischenfruchtpflanzen befreien zu können.

Alternative mechanische Verfahren zur Abtötung von Zwischenfrüchten umfassen den Einsatz von Quetschwalzen, die auch als Roller Crimper bezeichnet werden. Dazu sollte die Zwischenfrucht möglichst weit entwickelt und im Idealfall in der generativen Phase sein. In diesem Fall sind Wirkungsgrade von 90 % und mehr realisierbar. Die Spannbreite beim Wirkungsgrad ist jedoch höher als beim Einsatz von Totalherbiziden und hohe Wirkungsgrade sind nicht unter allen Bedingungen zu erreichen (Alonso-Ayuso et al., 2020; Kornecki et al., 2009; Mirsky et al., 2011; Mirsky et al., 2009).

Bodenbearbeitung stellt eine weitere Möglichkeit dar, Zwischenfrüchte abzutöten und in den Boden einzuarbeiten. Je nach Menge der oberirdischen Biomasse eignen sich nicht alle Bodenbearbeitungsgeräte gleich gut für den Umbruch der Zwischenfrüchte. Insbesondere Zinkengeräte wie Großfederzinkeneggen oder Mulchsaatgrubber würden bei hohen Zwischenfruchtbeständen verstopfen, weshalb die vorherige Zerkleinerung mit einer Messerwalze oder einem Mulcher erforderlich ist (siehe Abbildung 6.6).

Eine Möglichkeit, die Biomasse vor der Einarbeitung in den Boden oder der Direktsaat der Folgefrucht zu reduzieren, ist die gezielte Beweidung mit Wiederkäuern. Durch Beweidung können Zwischenfrüchte zusätzlich positiv zum Betriebseinkommen beitragen. Weiterhin kann gerade beim Anbau von winterharten Zwischenfrüchten die Weidesaison verlängert werden. Positive Effekte durch die Kombination aus Zwischenfrucht und Beweidung ergeben sich auch hinsichtlich verschiedener Bodenfruchtbarkeitsparameter (de Faccio Carvalho et al., 2010). Nach der Zerkleinerung der Zwischenfrucht kann diese im Boden abgeschnitten und flach eingearbeitet werden. Da einzelne Pflanzen erneut austreiben können, kann ein zweiter Arbeitsgang notwendig sein.

Kurzscheibeneggen und Kettenscheibeneggen erlauben in vielen Fällen das



Abbildung 6.6: Zerkleinerung der oberirdischen Biomasse einer biodiversen Sommerzwischenfrucht mit einem Schlegelmulcher

Einarbeiten von Zwischenfrüchten ohne vorherige Zerkleinerung. Bei flacher Einstellung der Geräte wird die oberirdische Biomasse im Boden abgeschnitten und leicht mit Erde vermischt. Auch hier ist in den meisten Fällen ein zweiter Arbeitsgang erforderlich.

Herausfordernd beim mechanischen Umbruch von Winterzwischenfrüchten ist das Nährstoffmanagement. Stickstoff ist insbesondere in Nitratform mobil im Boden und sollte aus ökologischer und ökonomischer Sicht nicht ins Grundwasser gelangen, sondern pflanzenverfügbar im Boden verbleiben. Zwischenfrüchte sind in der Lage, Stickstoff im Herbst aufzunehmen und während der Hauptsickerwasserperiode über Winter zu binden (Tauchnitz et al., 2015). Höhere Nitratverluste treten auf, wenn diese bereits im Herbst umgebrochen werden (Bodner et al., 2002; Spiess et al., 2015). Neben dem Umbruchtermin beeinflusst auch die Zusammensetzung der Zwischenfruchtmischung die Höhe der Nitratauswaschung (Kolbe, 2007).

Abfrierende Zwischenfrüchte können einerseits vor Sommerungen und andererseits auch vor Wintergetreide oder Winterkörnerleguminosen angebaut werden. Im ersten Fall frieren die Zwischenfrüchte über Winter ab und hinterlassen im Idealfall einen möglichst unkrautfreien Acker, sodass auf



Abbildung 6.7: Umbruch einer biodiversen Sommerzwischenfrucht mit einer Kurzscheibenegge

Totalherbizide oder Bodenbearbeitung verzichtet werden kann. Im zweiten Fall wird nach der Ernte im Sommer eine Zwischenfrucht etabliert, in welche die Folgefrucht im Herbst ohne Bodenbearbeitung in Direktsaat eingesät wird. Während die neue Hauptkultur keimt und wächst, stirbt die Zwischenfrucht durch Frosteinwirkung ab, wodurch im Herbst auf Herbizide verzichtet werden kann (siehe Abbildung 6.8).



Direktsaatmaschine im Einsatz

Wenig Bodenbewegung durch die Säscharre der Direktsaatmaschine

Abbildung 6.8: Direktsaat in eine stehende Sommerzwischenfrucht

Denkbar ist auch die Anlage einer Untersaat mit der Hauptkultur oder die Einsaat der Untersaat in die Hauptkultur zu einem späteren Zeitpunkt. Auf dem Versuchsbetrieb, auf dem auch die hier diskutierten Feldversuche zur Stoppelbearbeitung durchgeführt worden sind, wurden zur Rapsausaat 2023 3 kg/ha Weißklee zusammen mit dem Winterraps ausgesät. Am 21. April fielen ca. 20 cm Schnee. Der Winterraps, der zu diesem Zeitpunkt in der Vollblüte (BBCH 65) war, wurde durch den Schnee heruntergedrückt und teilweise abgeknickt. Unkräuter, Ungräser und Weißklee konnten sich insbesondere durch den Lichteinfall bis zur Ernte gut entwickeln. Deutlich erkennbar in Abbildung 6.9 ist die unkrautunterdrückende Wirkung der Weißkleeuntersaat.



Abbildung 6.9: Winterrapsstoppel zwei Wochen nach der Rapsernte; links ohne Untersaat, rechts mit 3 kg/ha Weißklee ausgebracht zusammen mit dem Winterraps

Konservierende Landwirtschaft Konservierende Landwirtschaft (Conservation Agriculture) umfasst ein Gesamtsystem aus Maßnahmen zur Bodenbewirtschaftung mit dem Ziel Ernährungssicherheit zu gewährleisten und natürliche Ressourcen zu schützen. Sie fußt dabei auf drei wesentlichen Prinzipien (Abbildung 6.10). Neben der Minimierung des mechanischen Bodeneingriffes bis hin zu No-Tillage gehört die permanente Bodenbedeckung mit Pflanzen sowie Pflanzen- und Ernterückständen genauso dazu wie eine

größtmögliche Diversität, die durch Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte, Untersaaten und Gemengeanbau realisiert wird (Choudhary et al., 2016; Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2023).

Insbesondere Zwischenfrüchte dienen als essentieller Systembestandteil bei konservierender Landwirtschaft (Cárceles Rodríguez et al., 2022). Die drei aufgeführten Prinzipien werden durch Dumanski et al. (2006) erweitert und ergänzt: Gefördert werden soll die Bodenmikrobiologie bzw. das Edaphon hinsichtlich Abundanz und Diversität. Bodenphysikalische und bodenchemische Eigenschaften sollen durch weite Fruchtfolgen, den Anbau von Zwischenfrüchten und die Anwendung des Integrierten Pflanzenschutzes verbessert werden. Dies betrifft unter anderem die Fähigkeit des Bodens, Wasser und Nährstoffe pflanzenverfügbar zu speichern und natürliche Stoffkreisläufe zu erhalten. Düngung und Pflanzenschutz werden nach den Richtlinien des Integrierten Pflanzenschutzes durchgeführt (Bundministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2024). Ziel ist nicht die Maximierung der Erträge, sondern eine Optimierung des Gesamtsystems. Angestrebt wird eine nachhaltige Landbewirtschaftung mit ökologischen und ökonomischen Vorteilen (Dumanski et al., 2006).

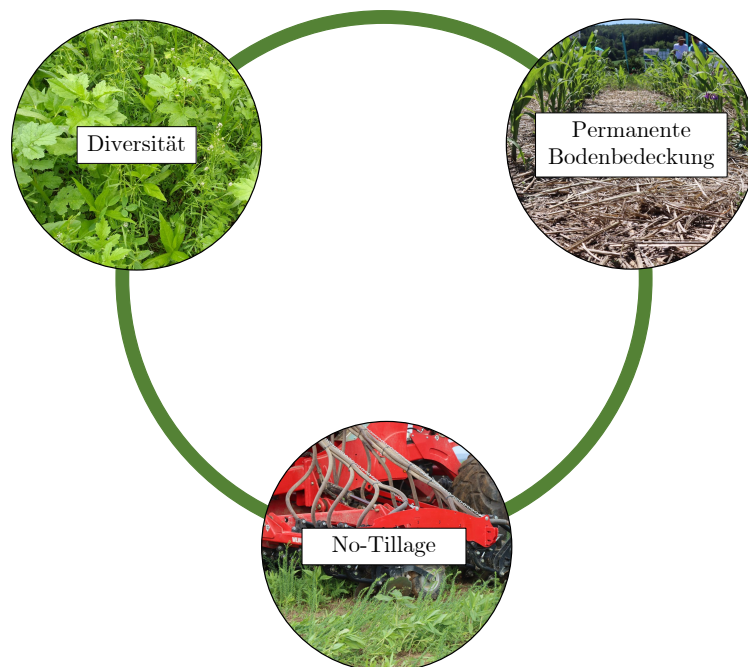


Abbildung 6.10: Prinzipien der Konservierenden Landwirtschaft (verändert nach (Choudhary et al., 2016; Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2023))

Um das System der konservierenden Landwirtschaft einzuordnen und zu

bewerten, ist es zunächst notwendig, zwischen einzelnen Maßnahmen und Prinzipien sowie Systemeffekten zu unterscheiden. Einzelne Maßnahmen wie No-Tillage (siehe Abschnitt 2.3) oder der Anbau von Zwischenfrüchten sind in vorhergehenden Kapiteln bereits umfangreich diskutiert worden. Positive Effekte von diversifizierten Fruchtfolgen sind ebenfalls hinlänglich bekannt (Reeves, 2018; Selim, 2019). Zu den Vorteilen zählen unter anderem die Reduktion des Befalls- und Infektionsrisikos mit Schädlingen und phytophathogenen Erregern, die effizientere Nährstoffausnutzung sowie positive aber variable Effekte auf Bodenstruktur und Humusgehalt (Dias et al., 2015). Durch den Anbau von diversifizierten Fruchtfolgen lässt sich außerdem das Anbaurisiko streuen, wodurch sich mit Blick auf den Klimawandel und zunehmende Wetterextreme ökonomische Vorteile ergeben. Die Wechselwirkung dieser Einzelmaßnahmen und die Systemeffekte sind allerdings schwierig zu quantifizieren.

Mit Blick auf das Nacherntemanagement und die Stoppelbearbeitung stellt sich die Frage, inwiefern konservierende Landwirtschaft als Strategie dazu beitragen kann, annuelle Unkräuter oder Ungräser wie Ackerfuchsschwanz nachhaltig zu bekämpfen. Cordeau et al. (2015) zeigten, dass die Keimrate von Unkraut- und Ungrassamen auf der Bodenoberfläche geringer ist als bei Einmischung in den Boden. Weiterhin führte der Anbau von Welschem Weidelgras (*Lolium multiflorum*) als Zwischenfrucht zu einer Verringerung der Keimrate. Auch die Keimrate von Ackerfuchsschwanz sank durch den Anbau der Zwischenfrucht und dem Verbleib der Ackerfuchsschwanzsamen auf der Bodenoberfläche. Die Autoren schlussfolgern, dass No-Tillage und Zwischenfruchtanbau in Kombination die Keimung der annuellen Unkraut- und Ungrassamen negativ beeinflussen. Ein höherer Samenfraß durch granivore Laufkäferarten nach mindestens vier Jahren Anwendung von konservierender Landwirtschaft erklären Petit et al. (2017) durch die höhere Abundanz granivorer Laufkäfer, wobei die Zusammensetzung der Landschaft den Samenfraß ebenfalls stark beeinflusst. Konservierende Landwirtschaft bietet somit Potential, Samenunkräuter und Samenungräser wie Ackerfuchsschwanz zu reduzieren.

Konservierende Landwirtschaft führt zu einer Verringerung von Wind- und Wassererosion, zu einer besseren Wasserqualität und zu einer Steigerung der Wasserhaltekapazität des Bodens, was sich insbesondere bei Trockenheit und Dürre positiv auswirkt. Die Effekte und die Effektstärke von konservierender Landwirtschaft auf weitere Ökosystemdienstleistungen wie die Kohlenstoffsequestrierung, den Austausch von Treibhausgasen oder die Re-

gulation von Krankheiten und Schädlingen sind jedoch variabel und nicht immer eindeutig diesem Ackerbausystem zuzuschreiben (Palm et al., 2014). Cárceles Rodríguez et al. (2022), Hobbs (2007) und Stevens (2018) beschreiben für konservierende Landwirtschaft reduzierte Kosten durch Einsparungen bei Arbeitszeit, Kraftstoff und Düngemitteln. Hinsichtlich der Auswirkungen von konservierender Landwirtschaft auf die Umwelt führen die Autoren reduzierte Emissionen, ein geringeres Erosionspotential, eine höhere Bodenbiodiversität sowie eine höhere mikrobiologische Aktivität im Boden als Vorteile auf.

Meister et al. (2025) untersuchten 17 Beispielbetriebe, die bereits länger nach dem System der konservierenden Landwirtschaft arbeiten, in 4 bodenklimatischen Regionen in Deutschland. Ein um bis zu 75 % geringerer Kraftstoffverbrauch pro Hektar sowie durchschnittlich 14 % und maximal sogar 20 % weniger Düngemittel pro Hektar spiegeln sich auch in einem bis zu 16 % höheren Deckungsbeitrag wieder. Positiv heben die Autoren und Autorinnen die deutliche Reduktion des ökologischen und gesundheitlichen Risikos durch Pflanzenschutzmittel im System der konservierenden Landwirtschaft hervor, welches durchschnittlich um 50 % und maximal um 70 % geringer im Vergleich zu klassischen Bearbeitungsweisen ist.

Cárceles Rodríguez et al. (2022) bewerten konservierende Landwirtschaft gegenüber konventioneller Bewirtschaftung von Ackerflächen grundsätzlich als positiv, führen aber einige Herausforderungen auf. Zunächst stellt die Umsetzung für kleinere landwirtschaftliche Betriebe eine Herausforderung dar, da notwendige Maschinen nicht überall verfügbar sind und der Kauf mit hohen Kosten verbunden sein kann. Die Autoren heben zudem hervor, dass die Integration von konservierender Landwirtschaft ein hohes Maß an zusätzlichem Wissen erfordert. Weiterhin bestehen weitläufig Vorurteile gegenüber diesem Anbausystem oder einzelnen Maßnahmen, die die Umstellung bei vielen Landwirtinnen und Landwirten erschwert oder verhindert.

6.2.4 Zwischenfazit

Literatur zur Stoppel- und Bodenbearbeitung weist erhebliche Lücken in der Dokumentation der Versuchsdurchführung auf. Essentielle Parameter wie Arbeitstiefe und die vollständige Beschreibung der verwendeten Geräte fehlen in auffällig vielen Studien. Ergebnisse sind daher schwierig zu vergleichen und nicht immer sinnvoll in die Praxis übertragbar.

Eine erfolgreiche Stoppelbearbeitung wird einerseits durch Zielkonflikte und andererseits durch Witterungsbedingungen erschwert. Trockene, heiße Sommer behindern beispielsweise die Keimung von Ausfallsamen und die Bodenbearbeitung selbst, während feuchte Bedingungen die Befahrbarkeit einschränken und die Wirksamkeit der Maßnahme mindern können. Ökologische Nachteile der Stoppelbearbeitung, wie ein erhöhtes Erosionsrisiko oder negative Effekte auf den Bodenwasserhaushalt, können durch angepasste Verfahren reduziert, aber nicht vollständig vermieden werden.

Bei Verzicht auf die Stoppelbearbeitung werden verschiedene Alternativen diskutiert. Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung oder die Anwendung von Totalherbiziden können zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt werden, wobei der Erosionsschutz, die Regulierung der Begleitvegetation und mögliche Nährstoffverluste berücksichtigt werden sollten.

Konservierende Landwirtschaft, die unter anderem auch Maßnahmen wie No-Tillage oder den Anbau von Zwischenfrüchten beinhaltet, kann dazu beitragen, Samenunkräuter und Samenungräser nachhaltig zu reduzieren. Insbesondere der Zwischenfruchtanbau hat das Potential, vielfältige agronomische Ziele mit der Unterdrückung von Unkräutern und Ungräsern zu kombinieren.

6.3 Strategien für eine erfolgreiche Stoppelbearbeitung

Die Stoppelbearbeitung sollte stets an den individuellen Zielen des Nacherntemanagements ausgerichtet sein. Im Wesentlichen umfassen diese Ziele die Strohverteilung, das Einmischen von Ernterückständen, die Förderung der Keimung von Ausfallsamen, die Bekämpfung von Ausfallpflanzen, (Wurzel-)Unkräutern und Altverunkrautung sowie die Konservierung der Bodenfeuchtigkeit (siehe Abbildung 6.11).

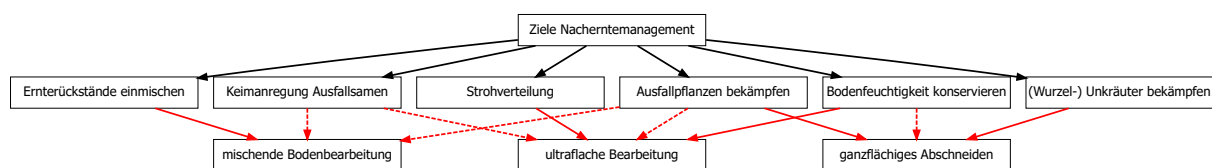


Abbildung 6.11: Entscheidungsbaum Nacherntemanagement; durchgehende rote Pfeile zeigen ideale Maßnahme an, gestrichelte rote Pfeile zeigen Alternativen, schwarze Pfeile verweisen auf Ziele des Nacherntemanagements

Die Vielfalt möglicher Ziele und Szenarien sowie die Vielzahl denkbarer Strategien zur Stoppelbearbeitung erschweren die Auswahl eines geeigneten Verfahrens. Daher ist es sinnvoll und notwendig, die Szenarien und Ausgangsbedingungen systematisch zu charakterisieren und darauf abgestimmte Strategien zu entwickeln. Für die Ausarbeitung einer passenden Strategie sind grundlegende Informationen über die Fruchtfolge, den Standort, das Wetter und den Zustand der Fläche nach der Ernte erforderlich (weitere Beispiele finden Sie in Unterabschnitt 6.2.1).

Um die Stoppelbearbeitung effizient und mit möglichst wenigen Arbeitsgängen durchzuführen, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Bereits bei der Grundbodenbearbeitung und der Aussaat der Vorfrucht sollte die Stoppelbearbeitung berücksichtigt und der Acker möglichst eben hinterlassen werden. Eine gleichmäßige Bearbeitung des Bodens ist essenziell und wird durch die konstante Einhaltung der Ziellarbeitstiefe gewährleistet. Viele Bodenbearbeitungsgeräte nutzen Stützräder oder Nachlaufwalzen zur Tiefenführung in Segmenten von 1,5 m bis 4 m Breite. Auf unebenen Flächen kann es jedoch vorkommen, dass einzelne Bereiche zu tief, zu flach oder bei größeren Unebenheiten gar nicht bearbeitet werden.

Auch die Qualität des Ernteprozesses beeinflusst die folgende Stoppelbearbeitung. Bei der Einstellung des Mähdreschers ist auf eine geringe, gleichmäßige Schnitthöhe zu achten. Insbesondere lange Getreidestoppeln sind bei der Stoppelbearbeitung schwieriger zu verarbeiten, als gleichmäßige, kurze Getreidestoppeln. Auch der Termin kann insbesondere in Bezug auf Ausfall- und Durchwuchsrap von entscheidender Bedeutung sein. Empfohlen wird daher die Ernte von Beständen mit gut abgereiftem Korn und Stroh, um Verluste zu vermeiden (Henne, 2015).

Die Drusch- und Reinigungsorgane des Mähdreschers müssen so eingestellt werden, dass sie eine hohe Kornqualität ohne Bruchkorn gewährleisten und gleichzeitig sauber sowie verlustarm arbeiten. Ein vollständiger Ausdrusch der Getreideähren und Rapsschoten minimiert Kornverluste. Nicht ausgedroschene Ähren und Schoten lassen sich je nach Witterungsbedingungen oft nur schwer durch Bodenbearbeitung auflösen. Dies kann zu unerwünschtem Auftreten von Ausfallgetreide oder Ausfallrap zu späteren, ungünstigen Zeitpunkten führen.

Auch hohe Kornverluste gilt es zu vermeiden. Bereits geringe Verluste können erhebliche Auswirkungen haben: Bei einem Weizenertrag von 8 t/ha

führt ein Anstieg der Kornverluste von 1 % auf 1,5 % dazu, dass die Menge an verlorenem Weizen von 80 auf 120 kg/ha steigt. Dies entspricht bei einem durchschnittlichen Tausendkorngewicht einem Samenpotenzial von etwa 200 bis 300 Körnern pro m^2 – vergleichbar mit der Reinsaatstärke. Im Fall von Winterraps, der ein deutlich geringeres Tausendkorngewicht als Weizen hat, können Verluste von 1 % bei einem Ertrag von 4 t/ha bereits 400 bis über 2.000 Ausfallrapssamen pro m^2 bedeuten. Dieses Samenpotenzial liegt um ein Vielfaches über der üblichen Reinsaatstärke.

Unabhängig davon, ob das Stroh gehäckselt oder geborgen wird, spielt die Streu- und Spreuverteilung eine entscheidende Rolle für die Verteilung der Verlustkörner. Fehlt beim Mähdrescher beispielsweise der Spreuverteiler, steigt bei einem 6 m breiten Schneidwerk die Anzahl der Verlustkörner pro Quadratmeter etwa um das Sechsfache, da diese nur im etwa 1 m breiten Strohschwad abgelegt werden.

Die Arbeitsqualität des Strohhäckslers setzt sich aus der Zerkleinerungsleistung und der anschließenden Strohverteilung zusammen. Für die Zerkleinerung sind scharfe Häckslermesser und eine funktionierende Gegenschneide erforderlich. Trockenes Material lässt sich leichter zerkleinern, was den Einfluss des Erntetermins auf die Strohzerkleinerung und -verteilung verstärkt. Besonders herausfordernd wird die Strohverteilung bei ungünstigen Bedingungen wie nassem Stroh und starkem Seitenwind. Neuere Mähdrescher bieten hier eine aktiv gesteuerte Strohverteilung, die Seitenwind oder Hangneigung zumindest teilweise kompensieren kann. Fehlt diese Technik, sollte bei der ersten Stoppelbearbeitung besonders auf die Strohverteilung geachtet werden.

Im ersten Schritt lässt sich der Zeitraum für Stoppel-, Grundboden- und Saatbettbereitung anhand der Fruchtfolge, des Erntezeitpunkts und des anvisierten Saattermins der Folgekultur bestimmen. Im zweiten Schritt sollte unmittelbar nach der Ernte eine Nacherntebonitur durchgeführt werden. Hierbei stellt sich zunächst die Frage nach vorhandener Altverunkrautung. Bei starkem Niederschlag oder Hagel vor der Ernte kann es zu Durchwuchs kommen. Bei kleinen Schlaggrößen ist es sinnvoll, die Bonitur durch eine Begehung der Fläche vorzunehmen. Die Aufnahme von Fotos mit Kamera oder Smartphone erleichtert die Dokumentation und ermöglicht es, Entscheidungen zu einem späteren Zeitpunkt nachzuvollziehen. Zusätzlich kann der Einsatz eines UAV mit Kamera hilfreich sein. Luftaufnahmen machen Unkraut- oder Ungrasnester gut sichtbar, sodass diese gezielt bear-

beitet werden können.

Neben dem möglicherweise vorhandenen Pflanzenbestand sind auch die Art und Menge der Ernterückstände sowie deren Verteilung entscheidend für die Stoppelbearbeitungsstrategie. Wird das Stroh geborgen und abgefahren, ist besonders auf Strohhaufen zu achten, die von der Pick-up der Presse nicht erfasst wurden, etwa im Wendebereich des Mähdreschers. Wenn die Ernterückstände auf dem Acker verbleiben, entstehen vor allem am Vorgewende und im Übergangsbereich zwischen Vorgewende und restlicher Fläche Strohhaufen. Auch Lagerstellen stellen eine besondere Herausforderung dar, wenn diese nicht vom Mähdrescher aufgenommen werden konnten oder dieser aufgrund der reduzierten Fahrgeschwindigkeit Strohhaufen hinterlässt.

Für die Bekämpfung von Ausfallsamen sowie von Samenunkräutern und -unkräutern ist die Bodenfeuchtigkeit von zentraler Bedeutung. Ist die Bodenfeuchtigkeit nicht ausreichend für die Keimung und es ist unklar, ob mit einer Stoppelbearbeitungsmaßnahme genügend Feuchtigkeit in den Bearbeitungshorizont gelangt, kann es sinnvoll sein, zunächst auf eine Bodenbearbeitung zu verzichten. Auch die Wetterprognose für die kommenden Tage sollte in die Entscheidungsfindung einbezogen werden. Abhängig von zu erwartenden Niederschlägen und der Entwicklung der Lufttemperatur können sich die Entscheidungen für oder gegen eine Bodenbearbeitung sowie die Intensität und Tiefe der Bearbeitung ändern.

Zur Bestimmung der Bearbeitungsintensität sollte der Bodenzustand nach der Ernte überprüft werden. Mit einer Bodensonde können Bearbeitungs- und Verdichtungshorizonte erfasst werden, während eine Spatendiagnose Aufschluss über die Bodenstruktur gibt (Beste, 2003). Die Ergebnisse dieser Diagnosen helfen dabei, zu entscheiden, welche weiteren Maßnahmen notwendig sind. So kann bei ungünstiger Bodenstruktur neben der Bodenbearbeitung auch der Anbau von Zwischenfrüchten sinnvoll sein.

Unterschiedliche Nachfrüchte stellen teils sehr unterschiedliche Anforderungen an den Bodenzustand und das Saatbett. Je nach Saattermin ergeben sich zudem unterschiedliche Zeiträume für Bodenbearbeitungsmaßnahmen. Auch die Art und Menge der Ernterückstände beeinflussen die Notwendigkeit und Intensität der Stoppelbearbeitung. Besonders anspruchsvoll ist die Bearbeitung von zähen, langen oder großen Mengen an Ernterückständen, die zum Beispiel auftreten können, wenn nach der Getrei-

deernte keine Strohabfuhr durchgeführt wurde und Lagerstellen zu einer ungleichmäßigen Strohverteilung führen. Lange Stoppeln und ungünstige, feuchte Witterungsbedingungen erschweren die Stoppelbearbeitung zudem aus technischer Sicht. Im Folgenden werden daher verschiedene Hauptkulturen anhand ihrer Saattermine und ihrer Stellung in der Fruchtfolge charakterisiert. Auch die Düngung spielt eine wichtige Rolle in der Planung, insbesondere wenn organische Düngemittel eingesetzt werden, da in Deutschland deren Einarbeitung in den Boden oder die Ausbringung in wachsende Bestände gesetzlich vorgeschrieben ist (Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft et al., 2017; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 09.01.2009).

6.3.1 Charakterisierung und Anforderungen wichtiger Kulturen

Zielkonflikte im Nacherntemanagement und Entscheidungsprozesse bei der Planung der Stoppelbearbeitung wurden bereits thematisiert. Um zu verstehen und zu klären, auf welcher Basis Entscheidungen für oder gegen bestimmte Maßnahmen getroffen werden, ist es wichtig, die Anforderungen von Drusch- und Hackfrüchten an Saatsbett, Saattermin, Vorfrucht und Fruchtfolge zu analysieren. Sofern nicht anders angegeben, stammen die Informationen in diesem Abschnitt aus (Diepenbrock et al., 2005; Freyer & Axmann, 2016; Kaul et al., 2022; Lütke Entrup & Oehmichen, 2000).

Frühe Winterung: Winterraps Im Spätsommer bzw. Frühherbst steht, abgesehen von Zwischenfrüchten, zunächst die Aussaat von Winterraps an, die je nach Region zwischen dem 15. August und dem 15. September erfolgt. In der Regel ist Wintergetreide die Vorfrucht, jedoch sind auch Körnerleguminosen und Klee gras als geeignete Vorfrüchte anzusehen. Bei einer frühen Ernte kann zudem Silomais als Vorfrucht dienen, wobei in diesem Fall besonders auf Herbizidrückstände geachtet werden muss, da diese den Winterraps schädigen und sogar zu einem Totalausfall führen können. Winterraps reagiert positiv auf Bodenlockerung und einen sauberen Saathorizont ohne Ernterückstände. Eine Herstdüngung ist mit maximal 60 kg/ha Gesamtstickstoff bzw. 30 kg/ha Ammoniumstickstoff zulässig, ausgenommen sind rote Gebiete, in denen eine Düngung nur bei Nmin-Werten unter 45 kg pro Hektar erlaubt ist (Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft et al., 2017; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 09.01.2009).

Frühe Saattermine fördern die Herbstentwicklung von Winterraps, der bis Vegetationsende 8 bis 12 Blätter und eine tiefreichende Pfahlwurzel gebildet haben sollte. Ab 12 Blättern und mit dem Übergang in den Langtag steigt jedoch das Risiko, dass der Winterraps zu schossen beginnt und anfälliger für Frostschäden wird. Eine zu frühe Aussaat begünstigt zudem den Befall mit Rapserrdfloh (*Psylliodes chrysocephalus*) und erhöht das Risiko für Krankheiten wie die Wurzelhals- und Stängelfäule (*Leptosphaeria maculans*, anamorph *Phoma lingam*). Daher ist eine zu frühe Aussaat zu vermeiden. Je nach Standort, Wetter, Vorfrucht und geplanter Düngung variiert das Zeitfenster für die Stoppelbearbeitung.

Späte Winterung: Wintergetreide und Winterkörnerleguminosen Wintergerste ist auf vielen Standorten mit Aussaatterminen ab Mitte September die Wintergetreideart mit dem frühesten Aussaatzeitpunkt. Sie reagiert positiv auf Körnerleguminosen oder Blattfrüchte als Vorfrucht, wobei auch Silomais als Vorfrucht in Betracht gezogen werden kann. Auf vielen Betrieben wird Winterweizen vor Wintergerste als Vorfrucht angebaut, wobei Weizendurchwuchs ein potenzielles Problem darstellen kann. Getreideblattläuse (*Sitobion avenae*) und Wandersandzirpen (*Psammotettix alienus*) übertragen das Gerstengelbverzweigungsvirus (Barley yellow dwarf virus (BYDV)) und das Weizenverzweigungsvirus (Wheat dwarf virus (WDV)). Um Infektionen vorzubeugen, sollten Wegränder gemulcht und Ausfallgetreide bekämpft werden. Da das Infektionsrisiko mit späteren Aussaaten sinkt, sollte Wintergerste nicht zu früh gesät werden. Spätere Saattermine erfordern jedoch höhere Saatgutmengen und können unter ungünstigen Bedingungen das Risiko für eine unzureichende Etablierung des Pflanzenbestandes erhöhen.

Während bei Winterraps im Herbst vor allem Schädlinge und phytopathogene Erreger problematisch sein können, stellen Ungräser, insbesondere Ackerfuchsschwanz, in Wintergetreide auf vielen Standorten das größere Ertragsrisiko dar. Auf Standorten mit hohem Ungrasdruck dient die späte Aussaat daher als wichtiger Faktor zur Reduktion dieses Risikos. Winterweizen, Winterroggen und weitere Wintergetreidearten sowie Winterkörnerleguminosen können je nach Standort und Witterung ebenfalls ab Ende September gesät werden. Wintergetreide stellt insgesamt weniger anspruchsvolle Anforderungen an die Fruchtfolge, Anbauabstände und Vorfrüchte als Winterraps oder Körnerleguminosen. Allerdings sollte das Risiko von Fruchtfolgekrankheiten sowie Fuß- und Halmkrankheiten, die zu Mindererträgen führen können, insbesondere beim Anbau von Stoppel-

weizen, bei der Anbauplanung berücksichtigt werden.

Frühe Sommerung: Sommergetreide, Sommerkörnerleguminose, Zuckerrübe Nach dem Winter beginnt die Aussaat der frühen Sommerungen, zu denen Sommergetreide, Sommerkörnerleguminosen und Zuckerrüben zählen. Sommerackerbohnen oder Sommerweizen können bei frostfreien oder trockenen Bedingungen bereits ab Februar gesät werden. Der Boden muss daher durch Zwischenfrüchte oder Bodenbearbeitungsmaßnahmen entsprechend vorbereitet werden. Eine frühe Aussaat ermöglicht eine bessere Nutzung der Winterfeuchte. Insbesondere Körnerleguminosen, die während der Blüte ausreichend Wasser für die Ertragsbildung benötigen, profitieren von einer frühen Aussaat und der raschen Entwicklung eines tiefreichenden Wurzelsystems.

Für die Bodenbearbeitung im Frühjahr gibt es verschiedene Szenarien. Aufgrund der hohen Stickstoffauswaschung im Winter und der damit verbundenen Erosionsgefahr tritt die Winterfurche zunehmend in den Hintergrund. Stattdessen gewinnen Mulch- und Direktsaatverfahren, sowie der Anbau von abfrierenden Zwischenfrüchten, an Bedeutung. In Bezug auf die Unkraut- und Ungrasregulierung führt der Pflugverzicht jedoch zu einem höheren Managementaufwand, was sich auch in erhöhten Anforderungen an die Stoppelbearbeitung widerspiegelt.

Späte Sommerung: Mais, Soja, Sonnenblume, Hirse Die Frühjahrsaussaat wird mit Silo- bzw. Körnermais, Soja und Sonnenblumen abgeschlossen, sobald die erforderlichen Boden- und Lufttemperaturen erreicht sind. Neben der Frühjahrsfurche stehen diese Kulturen häufig nach abfrierenden oder winterharten Zwischenfrüchten, die teils im Frühjahr noch abgeerntet werden können. Insbesondere Silomais wird in Regionen mit hoher Viehdichte auch nach Ackerfutter oder Grünschnitttroggen angebaut. Das Zeitfenster zwischen der Getreideernte und der Aussaat dieser späten Sommerungen ist im Vergleich am größten, was zahlreiche Optionen bietet, um beispielsweise Problemunkräuter zu bekämpfen oder durch Bodenbearbeitung Schadverdichtungen zu beseitigen.

Für die Bearbeitung gibt es unterschiedliche Verfahren: Einerseits können extensive Verfahrensketten angewendet werden, die mit der Direktsaat einer Zwischenfrucht unmittelbar nach der Ernte beginnen, gefolgt von der Direktsaat oder Streifensaat der Hauptkultur im Frühjahr. Inten-

sivere Verfahren beinhalten Stoppel- und Grundbodenbearbeitung vor der Zwischenfruchtaussaat im Herbst oder die Anlage einer Winterfurche. Alternativ können Bodenbearbeitungsmaßnahmen auch im Frühjahr erfolgen, nachdem im Sommer oder Herbst Zwischenfrüchte angebaut oder Stoppeln brach belassen wurden.

Zwischenfazit Zusammenfassend lassen sich die Kulturen anhand ihrer Saattermine in frühe und späte Winterungen sowie frühe und späte Sommerungen kategorisieren. Diese bestimmen die verfügbaren Zeitfenster für Stoppel-, Grundboden- und Saatbettbereitung sowie für Düngungsmaßnahmen. Die Zeitfenster orientieren sich dabei auch an den jeweiligen Bedingungen auf dem Acker, da beispielsweise bei verstärktem Auftreten von Wurzelunkräutern oder Ungräsern zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein können.

6.3.2 Beispiele für die Stoppelbearbeitung zwischen ausgewählten Fruchtfolgegliedern

Basierend auf der Stellung einer Hauptkultur in der Fruchtfolge ergeben sich aufgrund der großen Variationen zwischen verschiedenen Standorten und Jahren zahlreiche Möglichkeiten zur Gestaltung der Stoppelbearbeitung, der Grundbodenbearbeitung und der Saatbettbereitung. Im folgenden Abschnitt werden fünf beispielhafte Szenarien vorgestellt und die Stoppelbearbeitung am Versuchsstandort Daseburg erläutert. Es wird angenommen, dass die Ernterückstände auf der Fläche verbleiben.

Vor der Aussaat der Winterungen und Zwischenfrüchte erfolgt eine Grundbodenbearbeitung mit einem dreibalkigen Mulchsaatgrubber. Der Umbruch der Zwischenfrüchte wird mit einer Kurzscheibenegge durchgeführt. Für die Zuckerrüben erfolgt die Saatbettbereitung mit einer Kreiselegge, bevor die Aussaat mit einer Einzelkornsämaschine vorgenommen wird. Die Aussaat aller anderen Hauptkulturen erfolgt mit einer Kombination aus Kreiselegge und einer Drillmaschine, ausgestattet mit einem für die Mulchsaat geeigneten Einscheibenschar.

Das Ertragsniveau wird anhand des fünfjährigen Mittelwerts ermittelt, der am Versuchsbetrieb zur Düngebedarfsermittlung herangezogen wird. Die Ernte- und Aussaattermine basieren auf den tatsächlichen Daten des Versuchsbetriebs in Daseburg aus den Jahren 2010 bis 2023 (siehe Tabelle 8.2).

Da für Sommerackerbohnen am Betrieb noch keine Daten vorliegen, werden Erfahrungswerte der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft verwendet (Doleschel & Hartl, 2024).

Tabelle 6.3: Saatzeiträume und Ertragsniveau von Winterraps, Winterweizen, Sommerackerbohne und Zuckerrübe sowie Erntezeiträume und Ertragsniveau der Vorfrüchte Wintergerste, Winterweizen und Winterraps. Saat- und Erntetermine basieren auf dem Zeitraum der Erntejahre 2010 bis 2023. Das Ertragsniveau basiert auf den durchschnittlichen Erträgen von 2018 bis 2022. Saat- und Erntetermin sowie das Ertragsniveau der Sommerackerbohne basieren auf Richtwerten der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Doleschel & Hartl, 2024)

Kultur	Saatzeitraum	Ertragsniveau (dt/ha)	Vorfrucht	Erntezeitraum	Ertragsniveau (dt/ha)
Winterraps	26.08. bis 06.09.	36	Wintergerste	02.07. bis 01.08.	95
Winterraps	26.08. bis 06.09.	36	Winterweizen	24.07. bis 22.08.	94
Winterweizen	05.10. bis 30.10.	94	Winterraps	15.07. bis 15.08.	36
Sommerackerbohne	15.03. bis 15.04.	45	Winterweizen	10.08. bis 20.09.	94
Zuckerrübe	24.03. bis 19.04.	893	Wintergerste	02.07. bis 01.08.	95

Winterraps nach Wintergerste Winterraps wird auf dem Versuchsbetrieb in der Regel nach Wintergerste angebaut, die üblicherweise Mitte Juli gedroschen wird. Im Zeitraum von 2010 bis 2023 lag die Ernte zwischen dem 2. Juli und dem 1. August, mit einer Tendenz, dass die Wintergerstenernte zunehmend in der ersten Julihälfte stattfindet. Winterraps wird auf diesem Standort zwischen dem 26. August und dem 6. September gesät. Das rechnerische Zeitfenster zwischen Ernte und Aussaat beträgt daher zwischen 25 und 66 Tagen (siehe Tabelle 6.3).

Mit einem durchschnittlichen Ertrag von 95 dt/ha ergibt sich in Bezug auf die Rapsbestellung eine doppelte Herausforderung: Bei einem angenommenen Korn-Stroh-Verhältnis von 1:0,8 verbleiben mit etwa 76 dt/ha erhebliche Mengen an Ernterückständen auf dem Acker, die bei höheren Erträgen auf den besten Flächen des Versuchsbetriebs noch größer ausfallen können. Zudem müssen bei angenommenen Gesamternteverlusten von 1,5 % rund 140 bis 150 kg Ausfallgetreide pro Hektar einkalkuliert werden. Je nach Tausendkorngewicht entspricht dies der standorttypischen Reinsaatstärke von 280 bis 300 Körnern pro Quadratmeter. Die Stoppelbearbeitung verfolgt daher das Ziel, die Ausfallgerste effektiv zu beseitigen und gleichzeitig die großen Strohmenen zu zerkleinern und zur Rotte zu bringen. Dabei soll einerseits ein maximaler Anteil an Ernterückständen als Erosions- und Verdunstungsschutz an der Bodenoberfläche verbleiben, andererseits aber auch eine optimale Saatguteinbettung bei der Winterrapsaussaat sichergestellt werden.

Eine genauere Betrachtung der Versuchsergebnisse zeigt, dass Ausfallgetreide besser zur Keimung angeregt werden kann, wenn es auf 3 bis 5 cm in den Boden eingearbeitet wird. Für die Stoppelbearbeitung sollten daher Kurzscheibeneggen, Großfederzinkeneggen oder Mulchsaatgrubber eingesetzt werden. Eine Ausnahme bildet der erste Arbeitsgang nach der Ernte, wenn das Stroh nachverteilt werden muss. In diesem Fall kann der ein- bis zweimalige diagonale Einsatz eines Strohstriegels die Strohverteilung verbessern. Alternativ kann auch auf Zinkengeräte zurückgegriffen werden. Mulchsaatgrubber oder Großfederzinkeneggen können bei flacher Arbeit diagonal zur Saatrichtung ebenfalls zur Strohverteilung beitragen.

Winterraps nach Winterweizen Die Herausforderungen nach der Winterweizenernte ähneln denen nach der Wintergerstenernte. Mit einem Ertrag von 94 dt/ha ist das Niveau vergleichbar mit dem der Wintergerste, sodass auch die Mengen an Stroh und Ausfallgetreide ähnlich ausfallen. Da Winterweizen jedoch erst zwischen dem 24. Juli und dem 22. August geerntet wird, verkürzt sich das Zeitfenster zwischen Ernte und Aussaat auf 4 bis 44 Tage (siehe Tabelle 6.3).

Bei nur vier Tagen zwischen Winterweizenernte und Winterrapsaussaat bleibt zu wenig Zeit für eine mehrfache Stoppelbearbeitung. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, die Ernterückstände flach einzumischen und anschließend eine Grundbodenbearbeitung durchzuführen, um diese weiter im Boden zu verteilen. Dies ist besonders wichtig beim Einsatz von Scheibenscharen an der Drillmaschine, da hier die Gefahr des Hairpinnings besteht, wodurch Stroh in der Saatrille verbleiben könnte.

Wird die Winterweizenernte hingegen früher durchgeführt, bleibt ausreichend Zeit für eine mehrfache Stoppelbearbeitung. Analog zur Winterrapsaussaat nach Wintergerste (siehe Unterunterabschnitt 6.3.2) liegt der Fokus nicht nur auf der Bekämpfung von Ausfallweizen, sondern auch auf dem Management der Ernterückstände.

Winterweizen nach Winterraps Nach der Winterrapsernte, die zwischen dem 15. Juli und 15. August stattfindet, bleibt bis zur Weizenaussaat ein Zeitfenster von 51 bis 107 Tagen. Der durchschnittliche Rapsertrag liegt mit 36 dt/ha eher im unteren Bereich (siehe Tabelle 6.3), wobei auf diesem Standort auch Erträge von bis zu 50 dt/ha möglich sind. Besonders in den

trockenen Sommern 2018, 2019 und 2020 kam es zu einer späten Aussaat unter ungünstigen Bedingungen, was dazu führte, dass der Winterraps ungleichmäßig aufief. Die schlechte Herbstentwicklung in Kombination mit einer ausgeprägten Frühsommertrockenheit sowie Schäden durch den Raps-erdflö, Frostereignisse während der Blüte und die sogenannte physiologische Knospenwelke gehören zu den Hauptursachen für die stagnierenden, niedrigen Erträge im Winterraps.

Für Winterraps wird ein Ernteverlust von 1,5 % angenommen, was einem Verlust von etwa 54 kg/ha entspricht. Je nach Tausendkorngewicht bedeutet dies mehr als 2000 Körner Ausfallraps pro Quadratmeter, was das Vielfache der üblichen Aussaatstärke von 25 bis 50 Körnern pro m² darstellt. Dies führt zu einem extrem hohen Samenvorkommen, das dringend reduziert werden muss. Auf Basis der Versuchsergebnisse empfiehlt sich eine mehrfache, ultraflache Stoppelbearbeitung mit Strohstriegel oder Rotationsschleifer, um möglichst viel Ausfallraps zur Keimung zu bringen. Da diese Geräte, wie in Kapitel 5 dargestellt, Ausfallraps nicht vollständig und gleichmäßig bekämpfen können, muss vor der Aussaat entweder ein Totalherbizid eingesetzt oder ein tieferer Arbeitsgang mit geeigneter Technik durchgeführt werden.

Sommerackerbohnen nach Winterweizen und abfrierender Zwischenfrucht Der lange Zeitraum zwischen der Winterweizenernte und der Aussaat der Sommerackerbohnen von 176 bis 248 Tagen (siehe Tabelle 6.3) bietet mehrere Optionen: Neben der Stoppelbrache sind sowohl eine mehrfache Stoppelbearbeitung mit anschließender Winterfurche als auch der Anbau einer Zwischenfrucht über Winter möglich. Letzteres wird aus verschiedenen Gründen bevorzugt und ist in einigen Fällen gemäß GAP sogar vorgeschrieben. Daher wird dieser Fall im Folgenden näher betrachtet.

Für die Etablierung der Zwischenfrucht gibt es verschiedene Möglichkeiten (siehe Unterabschnitt 6.2.3). Auf einem vegetationsfreien Acker mit guter Bodenstruktur und ohne Schadverdichtungen kann die Zwischenfrucht als Direktsaat ausgesät werden. Bei Vorkommen von Wurzelunkräutern, Ungräsern oder Durchwuchs sind entweder der Einsatz eines Totalherbizids oder eine mehrfache Stoppelbearbeitung erforderlich. Das Vorgehen sollte ähnlich wie nach Winterweizen zur Winterrapsaussaat erfolgen: Zunächst wird das Stroh und die Ernterückstände mit einem Strohstriegel verteilt. Bestehende Pflanzen können dann mit einer Kurzscheibenegge, ei-

nem Mulchsaatgrubber oder – bei geringen Strohmenngen – mit einer Großfederzinkenegge abgeschnitten und abgetötet werden. In den Feldversuchen zeigte sich, dass diese Maßnahme auch Ausfallweizen zur Keimung anregt. Ein weiterer Arbeitsgang dient der Bekämpfung des gekeimten Ausfallweizens, bevor die Grundbodenbearbeitung und die Aussaat der Zwischenfrucht erfolgen.

Zuckerrüben nach Wintergerste Analog zur Aussaat von Sommerackerbohnen nach Winterweizen ermöglicht die lange Zeitspanne von 235 bis maximal 291 Tagen (siehe Tabelle 6.3) ausreichend Raum für den Anbau einer Zwischenfrucht über Winter. Das Vorgehen entspricht grundsätzlich dem der Sommerackerbohnen nach Winterweizen. Durch das erweiterte Zeitfenster und die Ernte der Wintergerste bereits in der ersten Juliwoche kann jedoch der Zeitraum zwischen dem Einsatz des Strohstriegels zur Strohverteilung und dem ersten Arbeitsgang mit Kurzscheibenegge, Großfederzinkenegge oder Mulchsaatgrubber verlängert werden. Besonders in den heißen Sommermonaten kann eine ultraflache Stoppelbearbeitung mit Strohstriegel oder Rotationsschleifer helfen, die Bodentemperatur zu senken und Wasser zu sparen, das für die folgende Zwischenfrucht benötigt wird.

6.3.3 Zwischenfazit

Ob und in welchem Umfang eine Stoppelbearbeitung sinnvoll und notwendig ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Neben dem Zeitraum zwischen Ernte und Aussaat der Folgefrucht spielen insbesondere die vorhandene Begleitvegetation, die Art der Ausfallsamen sowie die Art und Menge der Ernterückstände eine wesentliche Rolle. Eine ultraflache Stoppelbearbeitung mit Strohstriegel oder Rotationsschleifer eignet sich vor allem nach der Winterrapsernte und bei Wintergetreide, wenn Ernterückstände nachverteilt werden müssen. Basierend auf den Ergebnissen der Feldversuche ist nach Wintergetreide der Einsatz von Bodenbearbeitungsgeräten, die eine 3 bis 5 cm tiefe Stoppelbearbeitung ermöglichen, effektiver als eine Verfahrenskette mit ausschließlich ultraflacher Bodenbearbeitung.

6.4 Diskussion der in den pflanzenbaulichen Feldversuchen eingesetzten Methoden

Zur Auswertung der pflanzenbaulichen Feldversuche sind verschiedene Methoden eingesetzt worden, die in diesem Kapitel evaluiert werden.

6.4.1 Bestimmung der Anzahl Pflanzen pro m²

Das Auszählen der Einzelpflanzen ist vor allem aufgrund des hohen Zeitaufwands auf dem Versuchsfeld eine Herausforderung. Insbesondere bei hohen Keimraten von Ausfallgetreide und Ausfallraps erfordert das Zählen in einem 1 m² Schätzrahmen bis zu 5 Minuten pro Boniturstelle. Bei bestocktem Ausfallgetreide ab BBCH 21 besteht zudem die Gefahr, dass nicht mehr einzelne Pflanzen, sondern Triebe gezählt werden. Unberücksichtigte oder doppelt gezählte Pflanzen können ebenfalls zu Fehlerquellen führen.

Eine Alternative ist die Aufnahme von Fotos der Bodenoberfläche, die später ausgewertet werden. Diese Methode reduziert den Zeitaufwand auf dem Versuchsfeld erheblich. Das manuelle Zählen kann zu einem späteren Zeitpunkt anhand der Aufnahmen erfolgen. Auch hier besteht jedoch das Risiko, dass statt Pflanzen Triebe gezählt oder einzelne Pflanzen übersehen bzw. doppelt erfasst werden. Eine Auswertung der Bilder mit geeigneter Software kann diese Fehlerquellen minimieren, da sichergestellt wird, dass keine Pflanze doppelt erfasst wird. Allerdings bleibt auch hier die Gefahr, dass Triebe anstelle von Pflanzen gezählt werden. Eine weitere Fehlerreduktion lässt sich durch das Herausreißen der gezählten Pflanzen aus dem Versuchsplot erreichen. Dadurch wird verhindert, dass Pflanzen doppelt erfasst werden, und es werden tatsächlich Pflanzen und nicht die Triebe gezählt. Der Nachteil dieser Methode ist der nochmals höhere Zeitaufwand. Die Bestimmung der Einzelpflanzen pro m² stellt eine wichtige Methode in der Ermittlung des Wirkungsgrades einer Stoppelbearbeitungsmaßnahme dar. Zur Optimierung denkbar wäre die Aufnahme georeferenzierter, hochauflösender RGB- und Multispektralaufnahmen mit einem UAV und anschließender Auswertung der Fotos mittels geeigneter Software. Diese müsste jedoch Pflanzen und Triebe unterscheiden können, damit bestimmt werden kann, ob eine Pflanze z.B. nach einer Bodenbearbeitung erst gekeimt ist oder ob die Pflanze nicht durch die Bodenbearbeitung bekämpft werden konnte. Durch die Nutzung aktueller Drohnen könnte der Zeitaufwand für die Befliegung weiter reduziert werden, wodurch engmaschigere Bonituren möglich werden.

6.4.2 Vegetations- und Mulchdeckungsgrad

Die Ermittlung des Vegetations- und Mulchdeckungsgrades erfolgt mit den Tools Canopeo und SoilCover, beginnend mit der Aufnahme geeigneter Fo-

tos auf dem Versuchsacker. Dabei ist es entscheidend, das richtige Objektiv bzw. die passende Brennweite zu wählen und die Blende korrekt einzustellen, um scharfe, verzerrungsfreie Aufnahmen im Randbereich zu gewährleisten. Der Einsatz eines Stativs ist empfehlenswert, um einen konstanten Bildausschnitt in allen Aufnahmen sicherzustellen. Zudem sorgt das Stativ dafür, dass die Fotos exakt senkrecht von oben aufgenommen werden, was Fehler in der Bildanalyse verhindert. Abweichungen im Kamerawinkel zum Boden können den Bildausschnitt verändern und Verzerrungen verursachen (siehe Abbildung 6.12).

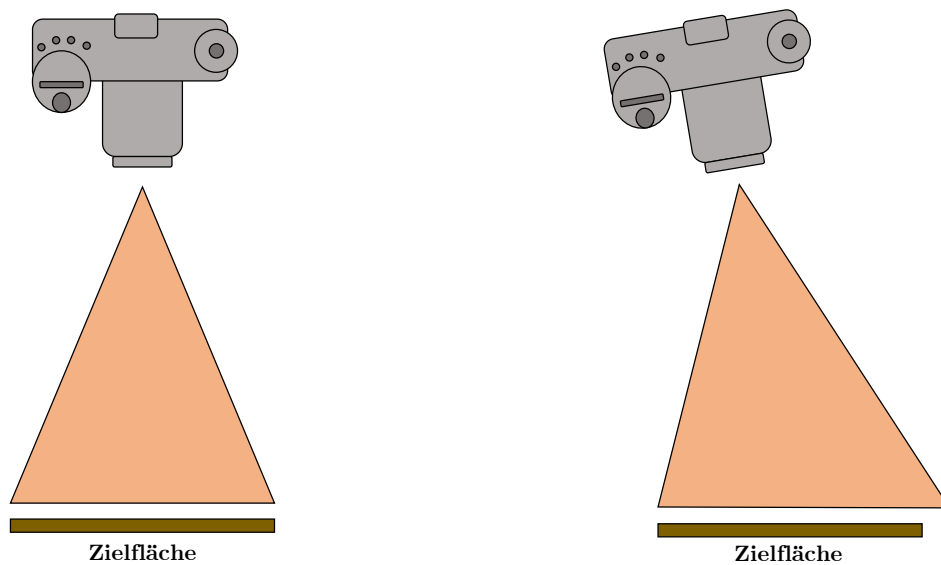


Abbildung 6.12: Eine Veränderung des Winkels zwischen Kamera und Boden führt auch zu einem veränderten Bildausschnitt.

Die Validierung von Canopeo durch die Entwickler zeigt, dass 91 % der grünen Pixel und 89 % der nicht-grünen Pixel korrekt erkannt werden, so dass die Genauigkeit der Vegetationserkennung insgesamt bei 90 % liegt (Patrignani & Ochsner, 2015). Für den Mulchdeckungsgrad ermittelte Soil-Cover ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,84$, wobei die Fehlerquote bei der Mulcherkennung bei 8 % lag (Riegler-Nurscher et al., 2016, 2018).

Ein wesentlicher Vorteil der Bildanalyse gegenüber der manuellen Bestimmung der Deckungsgrade ist der geringere Zeitaufwand (Bauer & Strauss, 2014). Bei manuellen Verfahren können insbesondere unterschiedliche Personen oder die Ermüdung der Feldarbeit zu Fehlern führen. Diese Fehlerquellen werden bei der softwaregestützten Bildanalyse ausgeschlossen, was

eine gleichbleibend hohe Qualität der Datenerhebung sicherstellt. Potenzielle Fehlerquellen liegen jedoch in der korrekten Einstellung der Softwareparameter sowie in der Bildqualität und -aufnahme.

Optimierungspotential bietet die Aufnahme der Fotos. Eine georeferenzierte Bildaufnahme ermöglicht die Beobachtung des Vegetationsdeckungsgrades und der Bodenbedeckung mit Ernterückständen auf identischen Flächen bzw. Parzellen. Dadurch kann der Effekt einer Bodenbearbeitungsmaßnahme z.B. auf den Vegetationsdeckungsgrad genauer bestimmt werden. Auch die Ermittlung des Wirkungsgrades einer Bodenbearbeitungsmaßnahme würde durch die georeferenzierte Bildaufnahme hinsichtlich der Genauigkeit der Datenerfassung profitieren.

6.4.3 Bestimmung des NVDI

Die Kameraaufnahmen wurden bei jedem Termin an unterschiedlichen Boniturstellen erstellt, da ein exaktes Wiederauffinden der Positionen mit den verfügbaren Mitteln nicht möglich war. Um dennoch definierte Bereiche hinsichtlich der Entwicklung von Ausfallgetreide und Ausfallraps im Zeitverlauf untersuchen zu können, wurden georeferenzierte Multispektralaufnahmen mit einem UAV durchgeführt. Als Vegetationsindex wurde der NDVI gewählt, da dieser gut mit dem Vegetationsdeckungsgrad korreliert, besonders bei hohen Deckungsgraden. Bei niedrigem Vegetationsdeckungsgrad empfehlen Purevdorj et al. (1998) jedoch die Verwendung anderer Vegetationsindices.

In den Feldversuchen (siehe Kapitel 5) wurden nach Wintergerste und Winterweizen nur geringe Vegetationsdeckungsgrade ermittelt. Der Vergleich zwischen NDVI und Vegetationsdeckungsgrad zeigt über die Zeit unterschiedliche Verlaufsmuster. So war der Vegetationsdeckungsgrad am 02.08.2022 für die Verfahrenskette KSE auf der Fläche Kötterbreite signifikant höher als der der anderen Verfahrensketten (siehe Abbildung 5.5), während der NDVI am gleichen Termin tendenziell niedriger ausfiel (siehe Abbildung 5.6). Angesichts des niedrigen Vegetationsdeckungsgrades von weniger als 2 % lässt sich schließen, dass der NDVI, wie von Purevdorj et al. (1998) beschrieben, bei niedrigen Vegetationsdeckungsgraden nur schwach mit dem tatsächlichen Deckungsgrad korreliert.

Nach Winterraps konnten deutlich höhere Vegetationsdeckungsgrade ermittelt werden, die teilweise über 50 % lagen (siehe Abbildung 5.25). In

diesem Fall zeigte der NDVI eine deutlich bessere Übereinstimmung mit dem gemessenen Vegetationsdeckungsgrad, was auf eine stärkere Korrelation hinweist.

Die Korrelation zwischen Vegetationsdeckungsgrad und NDVI wurde bewusst nicht berechnet, da die Kamera- und Multispektralaufnahmen nicht immer am gleichen Termin durchgeführt wurden. Zudem wurde mit dem UAV eine größere bzw. andere Fläche innerhalb der Parzellen bonitiert als mit der DSLR-Kamera, wodurch ein direkter Vergleich der Methoden per Korrelationskoeffizient nicht sinnvoll ist. In zukünftigen Versuchsreihen zur Stoppelbearbeitung und Entwicklung von Ausfallgetreide und Ausfallraps sollten RGB- und Multispektralaufnahmen mit identischen Bildausschnitten erstellt werden, um die Korrelation zwischen NDVI und Vegetationsdeckungsgrad als statistisches Maß für den Zusammenhang sinnvoll berechnen zu können.

Die Flugroutenplanung muss für jede Fläche nur einmal erfolgen und wird mit der DJI Ground Station Pro App durchgeführt. Auch die Erstellung der Parzellen in QGIS ist nur einmalig erforderlich, erfordert jedoch deutlich mehr Zeit als die Flugroutenplanung. Letztere erfordert Erfahrung, sodass die Befliegung nur von geschultem Personal mit gültigem EU Drohnenführerschein durchgeführt werden kann. Vor jeder Befliegung müssen iPad, Funkfernsteuerung und die UAV-Batterien überprüft und gegebenenfalls aufgeladen werden. Der gesamte Zeitaufwand für eine Befliegung, einschließlich An- und Abfahrt, Vorbereitung der Drohne, Flug und Batteriewechsel, sowie der Abbau der Drohne, betrug in den Versuchen etwa 120 Minuten pro Fläche. Die Datenaufbereitung einschließlich der statistischen Auswertung nimmt ca. 180 Minuten in Anspruch, sodass der Gesamtzeitaufwand für die Bonitur einer Fläche bei etwa 300 Minuten bzw. 5 Stunden liegt. Aufgrund des hohen Zeitaufwands und der ebenfalls hohen Anschaffungskosten für das UAV sowie der Notwendigkeit, eine Softwarelizenz für Pix4Dfields zu erwerben, sind die Gesamtkosten sehr hoch.

Da die erhobenen Daten nicht immer plausibel sind, sollte diese Methode zur Bestimmung des Vegetationsdeckungsgrades in Versuchen zur Stoppel- und Bodenbearbeitung hinsichtlich der Genauigkeit der Datenerhebung, Anwendbarkeit, Benutzerfreundlichkeit, Zeitaufwand und Kosten optimiert werden. Eine mögliche Optimierung besteht in der Nutzung weiterer Vegetationsindices, die auch bei geringeren Vegetationsdeckungsgraden zuverlässig und valide Informationen liefern. Der Zeitaufwand könnte durch den

Einsatz moderner Drohnen reduziert werden, die längere Batterielaufzeiten und höhere Fluggeschwindigkeiten bieten, sodass weniger Zeit für die Bearbeitung der gleichen Fläche benötigt wird. Kameras mit höherer Auflösung ermöglichen es zudem, bei gleicher Bildqualität eine größere Flughöhe zu erreichen oder die Bildqualität bei gleicher Flughöhe zu verbessern. Allerdings gehen diese Vorteile mit höheren Anschaffungskosten einher, sodass die Wirtschaftlichkeit individuell geprüft werden sollte.

6.4.4 Statistik

Ein auffälliges Ergebnis der statistischen Auswertung ist die hohe Streuung der Daten. Die Datensätze weisen Varianzheterogenität und fehlende Normalverteilung auf, was die statistische Analyse und die anschließende Interpretation erschwert. Diese hohe Datenstreuung lässt sich durch die großen Versuchsparzellen erklären: Bodenheterogenität, die ungleichmäßige Arbeitsweise des Mähdreschers während der Getreideernte und die daraus resultierende heterogene Verteilung von Ausfallsamen und Ernterückständen tragen maßgeblich dazu bei.

Ein angepasstes Versuchsdesign könnte hier Abhilfe schaffen. Die Verkleinerung der Parzellen würde die Wahrscheinlichkeit verringern, dass Bodenheterogenität die erhobenen Daten beeinflusst. Da jedoch praxisübliche Bodenbearbeitungsgeräte wie Kurzscheibenegge, Rotationsschleifer und Strohstriegel eingesetzt wurden, war eine deutliche Reduzierung der Parzellengröße kaum umsetzbar. Diese Geräte benötigen eine bestimmte Fahrgeschwindigkeit für eine effektive Bearbeitung, und der notwendige Beschleunigungsweg des Traktors zur Erreichung der Zielgeschwindigkeit macht eine homogene Bearbeitung kleiner Parzellen, beispielsweise mit einer Länge von 15 m, nahezu unmöglich. Die Parzellenlänge kann daher nicht beliebig verkleinert werden.

Die Vergrößerung der Stichprobenanzahl trägt ebenfalls dazu bei, dass die Varianz kleiner wird. Mit zunehmender Stichprobengröße umfasst der Mittelwert mehr Datenpunkte, wodurch Ausreißer und extreme Werte weniger Einfluss haben. Für die durchgeführten Versuche würde dies jedoch eine Anpassung der Messmethoden und Messtechnik erfordern. Eine höhere Anzahl an Wiederholungen führt zu einem höheren Flächenbedarf oder zu einer Anpassung des Versuchsdesigns. Naheliegender ist daher die Erhöhung der Anzahl Messpunkte. Für die Bestimmung der Vegetations- und Mulchdeckungsgrade bedeutet dies beispielsweise die Aufnahme weiterer Bilder pro Parzelle.

Ein weiteres Problem stellt die Ernte selbst dar, insbesondere die ungleichmäßige Verteilung von Ausfallsamen und Ernterückständen. Um diesen Einfluss zu minimieren, wurden die Versuche bewusst in einem Winkel von 5 Grad quer zur Saat- und Druschrichtung angelegt, um die Auswirkungen von Fahrgassen, Fahrspuren und Mähdrescherarbeit auf mehrere Parzellen zu verteilen.

Für zukünftige Versuche ergeben sich drei potenzielle Lösungsansätze, um die Beeinflussung der Ergebnisse durch die Ernte weiter zu reduzieren:

1. Vollständige Entfernung des Ernteguts und der Ernterückstände aus den Versuchsflächen
2. Anpassung der Arbeitsbreite des Mähdreschers an die Größe der Parzellen, um eine gleichmäßige Bearbeitung sicherzustellen
3. Georeferenzierte Erfassung aller relevanten Parameter zur präzisen Datenanalyse und besseren Vergleichbarkeit

Bei der vollständigen Abfuhr des Ernteguts und der Ernterückstände wird der reife Getreide- oder Rapsbestand mit einem Feldhäcksler geerntet, wodurch die gesamte oberirdische Biomasse entfernt werden kann. Anschließend könnten die Ausfallsamen und Ernterückstände gleichmäßig auf der Fläche verteilt werden. Für die Verteilung der Ausfallsamen könnte praxisübliche Sätechnik eingesetzt werden, bei der die Schare oberhalb der Bodenoberfläche die Samen ausstreuen. Die Ernterückstände, insbesondere das Stroh, müssten anschließend mit Geräten wie einem Festmiststreuer breitflächig appliziert werden.

Dieses Verfahren wäre jedoch mit erheblich höheren Kosten verbunden. Zusätzlich besteht das Risiko, dass in den Ernterückständen oder im Stroh weitere Ausfallsamen enthalten sind, die die Ergebnisse verfälschen könnten. Zudem entspricht die Fraktionierung der Ernterückstände nach der Ernte mit einem Feldhäcksler nicht der Zerkleinerung durch den Strohhäcksler eines Mähdreschers, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zur Praxis erschwert.

Auch wenn dieses Verfahren die Verteilung von Ernterückständen und Ausfallsamen deutlich gleichmäßiger gestalten könnte, weicht es erheblich von den Bedingungen in der landwirtschaftlichen Praxis ab. Weiterhin bleibt unklar, wie sich die Ausfallsamen in Bezug auf ihre Keimruhe verhalten und ob sie möglicherweise zu anderen Zeitpunkten keimen würden als unter

realistischen Bedingungen. Angesichts dieser Einschränkungen stellt dieses Verfahren derzeit keine praktikable Alternative dar.

Die Anpassung der Arbeitsbreite des Mähdreschers an die Parzellenbreite setzt voraus, dass die Maschinenbreite exakt auf die Parzellen abgestimmt wird. Darüber hinaus ist es notwendig, sowohl die Ernte als auch die Bodenbearbeitung mithilfe eines automatischen Lenksystems mit RTK-Korrektursignal durchzuführen. Dies ermöglicht dem Mähdrescher die exakte Ernte der späteren Versuchsparzellen. Anschließend erfolgt die Bodenbearbeitung genau in den ausgedroschenen Parzellen, wodurch der Einfluss des Mähdreschers auf die Ergebnisse reduziert wird. Zwar wird dadurch der Einfluss der Bodenheterogenität nicht verringert, der Einfluss der Getreideernte auf die Versuchsergebnisse kann jedoch deutlich reduziert werden.

Ein weiterer Lösungsansatz ist die vollständig georeferenzierte Erfassung aller relevanten Parameter. Dabei wird für jede Position der Datenaufnahme der Ausgangszustand nach der Ernte dokumentiert, sodass die Entwicklung während der Versuchsdurchführung für jeden spezifischen Ort nachvollzogen werden kann. Dieses Verfahren erlaubt es zudem, Bodenproben gezielt an den Datenaufnahmeorten zu entnehmen. Dadurch können Rückschlüsse auf wichtige Bodenparameter wie Korngrößenverteilung, Humusgehalt oder pH-Wert und deren Einfluss auf die Keimung und Entwicklung von Ausfallgetreide und Ausfallraps gezogen werden. Dieses Vorgehen erfordert jedoch spezielle, teils kostenintensive Technik, um die Datenaufnahmeorte innerhalb der Parzellen exakt anzulegen und zu dokumentieren.

6.4.5 Zwischenfazit

Die eingesetzten Methoden unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der Genauigkeit, Praktikabilität und dem Kosten-Nutzen-Verhältnis (siehe Tabelle 6.4). Das manuelle Auszählen der Ausfallpflanzen funktioniert gut bei Wintergerste und Winterweizen, wurde aber in diesen Versuchen aufgrund des nochmals höheren Zeitaufwandes nach Winterraps nicht durchgeführt. Positiv bei dieser Methode ist zudem das gute Kosten-Nutzen-Verhältnis, da die Daten plausibel und relativ genau sind und wenig Material benötigt wird.

Die Ermittlung des Vegetationsdeckungsgrades mit Canopeo sowie die Ermittlung des Mulchdeckungsgrades mit SoilCover stechen durch hohe Genauigkeit, hohe Flexibilität und einen geringen Zeitaufwand bei der Da-

tenerhebung hervor. Canopeo ermöglicht zudem eine schnelle Datenverarbeitung und -analyse. SoilCover ist bisher nicht als Software verfügbar, sodass die Bildauswertung durch einen Dienstleister erfolgt. Die Auswertung nimmt daher deutlich mehr Zeit in Anspruch und ist weniger flexibel gestaltbar. Gleichzeitig sind die Kosten höher als bei Canopeo. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist bei SoilCover daher trotz guter Methodik nur durchschnittlich.

Die Ermittlung des NDVI mittels UAV, Pix4Dfields und QGIS kennzeichnet sich durch hohe Flächenleistung und gute Skalierbarkeit. Als einzige Methode erlaubt es die georeferenzierte Datenaufnahme. Die Daten waren jedoch nur nach Winterraps plausibel und sinnvoll zu interpretieren. Weiterhin sind die Kosten für die Anschaffung der Drohne sowie der Softwarelizenzen verhältnismäßig hoch.

Tabelle 6.4: Bewertung der eingesetzten Methoden zur Datenaufnahme und -analyse

Parameter	Anzahl Einzelpflanzen	Canopeo	SoilCover	NDVI
Genauigkeit	0 bis +	+	+	- bis 0
Skalierbarkeit	-	0	0	+
Handhabung	+	0	-	-
Witterungseinfluss	0	-	-	-
Zeitaufwand				
<i>Datenerhebung</i>	-	+	+	0 bis +
<i>Datenverarbeitung</i>	+	+	-	- bis 0
georeferenzierte Datenaufnahme	-	-	-	+
Kosten- Nutzen- Verhältnis	+	+	0	-

7 Fazit

Die vorliegende Arbeit verfolgt zwei zentrale Ziele: Zum einen soll der Rotationsschleifer als innovatives Bodenbearbeitungsgerät für die ultraflache Stoppel- und Bodenbearbeitung in umfangreichen Feldversuchen mit konventionellen Techniken verglichen werden. Zum anderen wurde die Stoppelbearbeitung als Gesamtsystem untersucht, um anschließend Chancen und Grenzen der ultraflachen Bearbeitung aufzuzeigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Rotationsschleifer nicht unter allen Bedingungen effektiv einsetzbar ist. Während das Gerät nach Winterraps ein hohes Potenzial zeigte, konnten die angestrebten Ziele nach Wintergetreide nicht vollständig erreicht werden. Insbesondere nach Wintergetreide erwies sich die tiefere Bearbeitung mit der Kurzscheibenegge als vorteilhaft, vor allem in der Bekämpfung von Ausfallgetreide. Dennoch sprechen günstige Verfahrenskosten und der Erhalt der Mulchauflage für den Einsatz des Rotationsschleifers.

Optimierungspotenziale liegen in der Gestaltung der Werkzeuge und der Anordnung der Rotoren auf den zwei Balken. Eine gezielte Weiterentwicklung könnte sowohl den Durchfluss von Ernterückständen und organischem Material verbessern als auch eine ganzflächige Bearbeitung bis maximal 2 cm Tiefe selbst unter schwierigen Bedingungen ermöglichen.

Zu Beginn der Versuchsreihe wurden vier Hypothesen aufgestellt:

1. Im Vergleich zu bisherigen Techniken der flachen Bodenbearbeitung ermöglicht der Rotationsschleifer eine konstant ganzflächige Bearbeitung mit einer deutlich geringeren Arbeitstiefe von maximal 2 cm.
2. Durch die ultraflache Bearbeitung mit dem Rotationsschleifer kann der Besatz von Ausfallsamen und Ausfallpflanzen im Vergleich zu bisherigen Stoppelbearbeitungsverfahren zum Zeitpunkt der Aussaat der Folgekultur oder der Grundbodenbearbeitung reduziert werden.
3. Nach einer ultraflachen Bearbeitung verbleiben mehr Ernte- und Pflanzenrückstände auf der Bodenoberfläche als nach einer flachen Bearbei-

tung mit einer Kurzscheibenegge oder Großfederzinkenegge.

4. Der Kraftstoffverbrauch beim Einsatz des Rotationsschleifers ist im Vergleich zum Status quo Kurzscheibenegge geringer.

Abschließend müssen die Hypothesen 1 und 2 verworfen werden. Die Hypothesen 3 und 4 können hingegen bestätigt werden.

Trotz ihrer potenziellen Vorteile, wie der Bekämpfung von Ausfallgetreide, Unkräutern und der Einmischung von Ernterückständen, ist die Stoppelbearbeitung nicht unter allen Bedingungen praktikabel. Zielkonflikte und veränderte Rahmenbedingungen schränken ihre Anwendung ein. Die ultraflache Bearbeitung erweist sich ebenfalls nur bedingt als zielführende Alternative. Für eine nachhaltige Landbewirtschaftung sollte daher eine Kombination verschiedener Ansätze in Betracht gezogen werden. Neben konventioneller und ultraflacher Stoppelbearbeitung könnten intensiver Zwischenfruchtanbau und konservierende Landwirtschaft als Gesamtsysteme wichtige Beiträge leisten.

Die wissenschaftliche Literatur bietet zahlreiche Studien zur Stoppelbearbeitung, jedoch erschwert die ungenaue Beschreibung der Versuchsdurchführungen insbesondere hinsichtlich der eingesetzten Bodenbearbeitungsgeräte den Vergleich und die Einordnung der Ergebnisse. Zukünftig sollte verstärkt auf eine präzise Dokumentation der eingesetzten Technik geachtet werden, um Forschungsergebnisse besser vergleichen und bewerten zu können.

Ein weiterer Schwachpunkt ist das Fehlen klarer Zielkriterien, die eine gezielte und begründete Durchführung von Bodenbearbeitungsmaßnahmen ermöglichen. Eine sinnvolle Lösung könnte der Einsatz von Schwellenwerten zur Bekämpfung von Ausfallgetreide oder Ausfallraps sein, beispielsweise basierend auf Entwicklungsstadien der Pflanzen oder unter Berücksichtigung von Wetterprognosen. Dies würde nicht nur die Vergleichbarkeit der Forschungsergebnisse verbessern, sondern auch die Entwicklung von Modellen und Werkzeugen fördern, die die Entscheidungsfindung im Nachertemanagement unterstützen und optimieren könnten.

Da der Rotationsschleifer nach Wintergetreide keine ganzflächige Bodenbearbeitung erzielte, bleibt die Frage offen, wie sich eine vollständige ultraflache Bodenbearbeitung mit maximal 2 cm Arbeitstiefe nach Wintergetreide

auf den Mulchdeckungsgrad und die Bekämpfung von Ausfallgetreide auswirkt. Angesichts der Einführung neuer Geräte für ultraflache Bodenbearbeitung, wie etwa des 4Disc ActiCut, könnte ein Vergleich dieser Geräte mit dem Rotationsschleifer GrindStar wertvolle neue Erkenntnisse liefern.

Neben der Stoppelbearbeitung nach Wintergetreide und Winterraps bietet die ultraflache Bodenbearbeitung auch Potenzial in anderen Anwendungsbereichen wie der Maisstoppelbearbeitung, dem Zwischenfruchtumbruch oder der Saatbettbereitung. Um mögliche Vorteile gegenüber etablierten Verfahren zu prüfen, sollten weitere gezielte Versuchsreihen durchgeführt werden.

Unklar ist bislang ebenfalls, ob die ultraflache Bodenbearbeitung gezielt zur nachhaltigen Bekämpfung von Ungräsern wie Ackerfuchsschwanz oder Windhalm eingesetzt werden kann. Mehrjährige Untersuchungen an unterschiedlichen Standorten sind notwendig, um belastbare Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen zu bekommen.

8 Anhang

Tabelle 8.1: Übersicht über die Regularien zum Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in Deutschland und der EU

Verordnung / Gesetz	Geltungsbereich
Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln	EU
Verordnung (EG) Nr. 396/2005 über Höchstgehalte an Pestizidrückständen in oder auf Lebens- und Futtermitteln pflanzlichen und tierischen Ursprungs	EU
Richtlinie 2009/128/EG über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden	EU
Richtlinie 2009/127/EG betreffend Maschine zur Ausbringung von Pestiziden	EU
CLP-Verordnung (EG) Nr. 1272/2008	EU
REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006	EU
[10pt]Pflanzenschutzgesetz (PflSchG)	Deutschland
Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung (PflSchAnwV)	Deutschland
Pflanzenschutzmittel-Verordnung (PflSchMV)	Deutschland
Pflanzenschutz-Geräteverordnung (PflSchGerätV)	Deutschland
Pflanzenschutz-Sachkundeverordnung (PflSchSachkV)	Deutschland
Bienenschutzverordnung (BienSchV)	Deutschland
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	Deutschland
Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)	Deutschland
Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)	Deutschland
Trinkwasserverordnung (TrinkwV)	Deutschland
Rückstands-Höchstmengenverordnung (RHmV)	Deutschland
Chemikalien-Verbotsverordnung (ChemVerbotsV)	Deutschland
Chemikaliengesetz (ChemG)	Deutschland
Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)	Deutschland

Tabelle 8.2: Saat- und Erntetermine für die Szenarioanalyse zur Stoppelbearbeitung

Aussaatdatum			Erntedatum		
Winterweizen	Winterraps	Zuckerrübe	Wintergerste	Winterweizen	Winterraps
05.10.2009	28.08.2009	09.04.2010	16.07.2010	20.08.2010	07.08.2010
06.10.2010	03.09.2010	29.03.2011	11.07.2011	17.08.2011	
19.10.2011	31.08.2011	27.03.2012	25.07.2012	Auswinterung	
09.10.2012	28.08.2012	17.04.2013	01.08.2013	22.08.2012	15.08.2013
09.10.2013	26.08.2013	28.03.2014		02.08.2013	27.07.2014
20.10.2014	03.09.2014	25.03.2015	16.07.2015	08.08.2014	01.08.2015
13.10.2015	27.08.2015	09.04.2016	12.07.2016	11.08.2015	26.07.2016
06.10.2016	30.08.2016				
20.10.2017			02.07.2018	24.07.2018	15.07.2018
12.10.2018		01.04.2019	09.07.2019	09.08.2019	22.07.2019
14.10.2019		28.03.2020	12.07.2020	07.08.2020	18.07.2020
20.10.2020		20.04.2021	20.07.2021	31.07.2021	01.08.2021
20.10.2021	06.09.2021	24.03.2022	05.07.2022	27.07.2022	24.07.2022
30.10.2022	05.09.2022	19.04.2023	09.07.2023	21.08.2023	10.08.2023

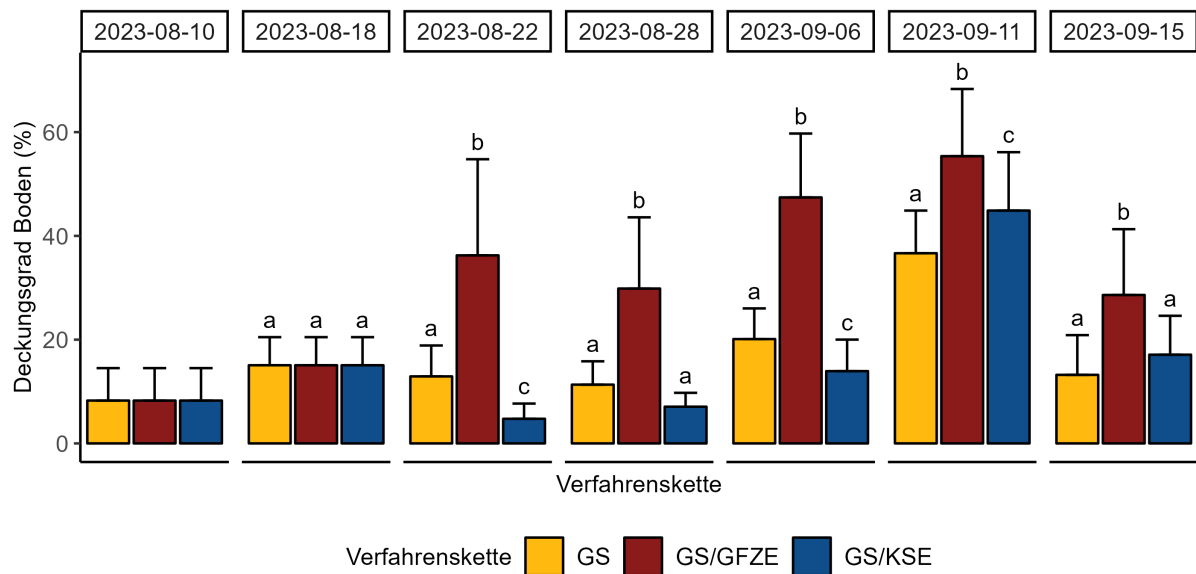


Abbildung 8.1: Deckungsgrad unbedeckter und unbewachsener Boden Winterraps Höte Menne Garten 2023. Die Balken repräsentieren den Mittelwert für jede Verfahrenskette, wobei die Fehlerbalken die Standardabweichung anzeigen. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Verfahrensketten basierend auf dem Tukey-Test ($p < 0,05$). Die Analyse wurde unter Verwendung eines generalisierten linearen Modells durchgeführt.

Literatur

- 4 per 1000 initiative. (2024). The international 4 per 1000 initiative. <https://4p1000.org/?lang=en>
- 4Disc GmbH. (2024). Acticut: Der innovative Schneidgrubber Ultraflach und ganzflächig: Die Min-Till Innovation durch den aktiven Schnitt (F. Mertin & A. Ladwig, Hrsg.). Verfügbar 4. Januar 2024 unter <https://www.4disc.de/ackerbau/acticut/>
- Aase, J. K., & Siddoway, F. H. (1980). Stubble height effects on seasonal microclimate, water balance, and plant development of no-till winter wheat. *Agricultural Meteorology*, 21(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(80\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0002-1571(80)90065-5)
- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R. M., & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology*, 25(8), 2530–2543.
- Agomoh, I. V., Drury, C. F., Yang, X., Phillips, L. A., & Reynolds, W. D. (2021). Crop rotation enhances soybean yields and soil health indicators. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), 1185–1195.
- Albrecht, M., Michael, T., Reitmeier, I., Richter, B., Schlimm, R., Wölbling, J., Braune, E., & Strübing, J. (2023). Diercke - Weltatlas.
- Al-Kaisi, M., & Licht, M. A. (2004). Effect of strip tillage on corn nitrogen uptake and residual soil nitrate accumulation compared with no-tillage and chisel plow. *Agronomy Journal*, 96(4), 1164–1171.
- Al-Kaisi, M., & Licht, M. A. (2005). Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 80(1-2), 233–249.
- Allmaras, R. R., Kraft, J. M., & Miller, D. E. (1988). Effects of soil compaction and incorporated crop residue on root health. *Annual Review of Phytopathology*, 26(1), 219–243.
- Almeida, Á. M. R., Saraiva, O. F., Farias, J. R. B., Gaudêncio, C. A., & Torres, E. (2001). Survival of pathogens on soybean debris under no-tillage and conventional tillage systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36, 1231–1238.
- Alonso-Ayuso, M., Gabriel, J. L., Hontoria, C., Ibáñez, M. Á., & Quemada, M. (2020). The cover crop termination choice to designing sustainable cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 114, 126000.

- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. In *Invertebrate biodiversity as bioindicators of sustainable landscapes* (S. 19–31). Elsevier.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869–890.
- Amazonen-Werke H. Dreyer SE & Co. KG. (2024). X-Cutter-Disc. Verfügbar 10. Oktober 2024 unter <https://amazone.de/de-de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/bodenbearbeitung/kompaktscheibeneggen/x-cutter-disc-1297516>
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>
- Anderson, R. L. (2015). Integrating a complex rotation with no-till improves weed management in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 967–974.
- Andersson, L., & Åkerblom Espeby, L. (2009). Variation in seed dormancy and light sensitivity in *Alopecurus myosuroides* and *Apera spica-venti*. *Weed Research*, 49(3), 261–270.
- Angers, D. A., & Recous, S. (1997). Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. *Plant and soil*, 189, 197–203.
- Anugroho, F., Kitou, M., Nagumo, F., Kinjo, K., & Tokashiki, Y. (2009). Growth, nitrogen fixation, and nutrient uptake of hairy vetch as a cover crop in a subtropical region. *Weed Biology and Management*, 9(1), 63–71.
- Appel, T., Kaiser, C., & Emmerling, C. (2013). Abundanz, Masse und Artenspektrum der Regenwürmer im Boden in Abhängigkeit von der Grundbodenbearbeitung und dem Bodentyp. In Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (Hrsg.), *DGB-Jahrestagung 2013*.
- Araya, S. N., Mitchell, J. P., Hopmans, J. W., & Ghezzehei, T. A. (2022). Long-term impact of cover crop and reduced disturbance tillage on soil pore size distribution and soil water storage. *Soil*, 8(1), 177–198.
- Archer, D. W., & Reicosky, D. C. (2009). Economic performance of alternative tillage systems in the northern Corn Belt. *Agronomy Journal*, 101(2), 296–304.
- Auernhammer, H., Bauer, R., Boxberger, J., Demmel, M., Estler, M., Gronauer, A., Haidn, B., Meyer, J., Pirkelmann, H., Schön, H., Strehler, A., & Widmann, B. (1998). *Landtechnik, Bauwesen: Verfahrenstechnik, Arbeit, Gebäude, Umwelt* (9., völlig neubearb. und erw. Aufl., Bd. Bd. 3). BLV-Verl.-Ges.
- Autret, B., Guillier, H., Pouteau, V., Mary, B., & Chenu, C. (2020). Similar specific mineralization rates of organic carbon and nitrogen in incubated soils under contrasted arable cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 204, 104712.

- Azcón-Aguilar, C., & Barea, J. M. (1997). Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens—an overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza*, 6, 457–464.
- Baeumer, K. (1992). *Allgemeiner Pflanzenbau: 87 Tabellen* (3., überarb. und erw. Aufl., Bd. 18). Ulmer.
- Baker, C. J., Saxton, K. E., Ritchie, W. R., Chamen, W. C., Reicosky, D. C., Ribeiro, M. F., Justice, S. E., & Hobbs, P. R. (2007). *No-tillage seeding in conservation agriculture* (2. Auflage). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Barberi, P., & Lo Cascio, B. (2001). Long-term tillage and crop rotation effects on weed seedbank size and composition. *Weed Research*, 41(4), 325–340.
- Barberi, P., Burgio, G., Dinelli, G., Moonen, A. C., Otto, S., Vazzana, C., & Zanin, G. (2010). Functional biodiversity in the agricultural landscape: relationships between weeds and arthropod fauna. *Weed Research*, 50(5), 388–401.
- Barracough, P. B., Kuhlmann, H., & Weir, A. H. (1989). The effects of prolonged drought and nitrogen fertilizer on root and shoot growth and water uptake by winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 163(5), 352–360.
- Barracough, P. (1989). Root growth, macro-nutrient uptake dynamics and soil fertility requirements of a high-yielding winter oilseed rape crop. *Plant and soil*, 119, 59–70.
- Basche, A. D., Kaspar, T. C., Archontoulis, S. V., Jaynes, D. B., Sauer, T. J., Parkin, T. B., & Miguez, F. E. (2016). Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40–50.
- Bauer, T., & Strauss, P. (2014). A rule-based image analysis approach for calculating residues and vegetation cover under field conditions. *Catena*, 113, 363–369. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.022>
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2023). Glyphosat: Stoppel-/Nacherntebehandlung (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Hrsg.). Verfügbar 24. April 2024 unter <https://www.lfl.bayern.de/ips/unkraut/190990/index.php>
- Begerow, D. (2021). Glomeromycota: Arbuskuläre Mykorrhiza ist eine essenzielle Grundlage terrestrischer Ökosysteme. In J. Boenigk (Hrsg.), *Boenigk, Biologie* (S. 806–808). Springer Berlin Heidelberg.
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., & Makowski, D. (2021). Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology*, 27(19), 4697–4710.
- Benvenuti, S., Macchia, M., & Miele, S. (2001). Quantitative analysis of emergence of seedlings from buried weed seeds with increasing soil depth. *Weed Science*, 49(4), 528–535.
- Beste, A. (2003). *Erweiterte Spatendiagnose: Weiterentwicklung einer Feldmethode zur Bodenbeurteilung* (1. Aufl., Bd. 11). Köster.

- Bianchi, F. J., Booij, C. J., & Tschardtke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273(1595), 1715–1727.
- Bischoff, J., Grosa, A., Grube, J., & Meinel, T. (2018). *Praxishandbuch Bodenbearbeitung und Aussaat: Grundlagen, Technik, Verfahren, Bewertung* (1. Auflage). AgriMedia.
- Bischoff, J., Tauchnitz, N., & Schrödter, M. (2014). Bio-Strip-Till: Streifenbearbeitung kombiniert mit Zwischenfruchtanbau und platzierter Gülle-Depot-Düngung zur Verbesserung von Nährstoffeffizienz und Bodenstruktur. In *Tagungsband Technik in der Pflanzenproduktion* (S. 20–21). Verlag Liddy Halm.
- Bista, P., Machado, S., Ghimire, R., Yorgey, G., & Wysocki, D. (2017). Conservation tillage systems. *Advances in Dryland Farming in the Inland Pacific Northwest*. (Eds G Yorgey, C Kruger) pp, 99–124.
- Blanco, H., & Lal, R. (2023). *Soil Conservation and Management*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-30341-8>
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., Post, W. M., Izaurralde, R. C., & Owens, L. B. (2006). Soil structural parameters and organic carbon in no-till corn with variable stover retention rates. *Soil Sci*, 171, 468–482.
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 72(3), 693–701.
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2009). Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality. *Critical reviews in plant science*, 28(3), 139–163.
- Blubaugh, C. K., & Kaplan, I. (2015). Tillage compromises weed seed predator activity across developmental stages. *Biological Control*, 81, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.11.007>
- Bodner, G., LIEBHARD, P., & Jud, R. (2002). Auswirkungen von Zwischenfrucht-Begrünungen auf den Ertrag der Folgefrucht und vorläufige Ergebnisse auf die Beeinflussung des Humushaushaltes. *Arbeitsgemeinschaft landwirtschaftlicher Versuchsanstalten, Jahrestagung*, 135–137.
- Bolanos-Carriel, C., Wegulo, S. N., Baenziger, P. S., Funnell-Harris, D., Hallen-Adams, H. E., & Eskridge, K. M. (2020). Effects of fungicide chemical class, fungicide application timing, and environment on Fusarium head blight in winter wheat. *European Journal of Plant Pathology*, 158, 667–679.
- Bomford Turner Ltd. (2024). Dyna-Drive: Simple and effective ground driven cultivator, for use on all types of soil at high speed. Verfügbar 19. Dezember 2024 unter <https://www.bomford-turner.com/product/dyna-drive/>
- Börner, H. (2009). *Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*. Springer-Verlag.
- Borowicz, V. A. (2001). Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant-pathogen relations? *Ecology*, 82(11), 3057–3068.

- Boselli, R., Fiorini, A., Santelli, S., Ardeni, F., Capra, F., Maris, S. C., & Tabaglio, V. (2020). Cover crops during transition to no-till maintain yield and enhance soil fertility in intensive agro-ecosystems. *Field Crops Research*, 255, 107871.
- Boström, U., Hansson, M., & Fogelfors, H. (2000). Weeds and yields of spring cereals as influenced by stubble-cultivation and reduced doses of herbicides in five long-term trials. *The Journal of Agricultural Science*, 134(3), 237–244.
- Boström, U., & Fogelfors, H. (1999). Type and time of autumn tillage with and without herbicides at reduced rates in southern Sweden: 2. Weed flora and diversity. *Soil and Tillage Research*, 50(3-4), 283–293.
- Bradford, J. M., & Huang, C.-h. (1994). Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil and Tillage Research*, 31(4), 353–361.
- Bradley, C. A., Lamey, H. A., Endres, G. J., Henson, R. A., Hanson, B. K., McKay, K. R., Halvorson, M., LeGare, D. G., & Porter, P. M. (2006). Efficacy of fungicides for control of Sclerotinia stem rot of canola. *Plant disease*, 90(9), 1129–1134.
- Brandi-Dohrn, F. M., Hess, M., Selker, J. S., Dick, R. P., Kauffman, S. M., & Hemphill Jr, D. D. (1997). Nitrate leaching under a cereal rye cover crop.
- Brandsæter, L. O., Mangerud, K., Helgheim, M., & Berge, T. W. (2017). Control of perennial weeds in spring cereals through stubble cultivation and mouldboard ploughing during autumn or spring. *Crop Protection*, 98, 16–23.
- Brant, V., Neckář, K., Pivec, J., Duchoslav, M., Holec, J., Fuksa, P., & Venclová, V. (2009). Competition of some summer catch crops and volunteer cereals in the areas with limited precipitation. *Plant, Soil and Environment*, 55(1), 17–24.
- Brathuhn, A., & Petersen, J. (2016). Einfluss der Herbizidaufwandmenge auf Wirkungsgrad und Erträge in Wintergetreide am Beispiel von Ackerfuchsschwanz und Windhalm. *Julius-Kühn-Archiv*, (452), 187.
- Bruns, C. (2016). Pflanzengesundheit und Pflanzenschutz. In B. Freyer & P. Axmann (Hrsg.), *Ökologischer Landbau* (S. 502–524). Haupt Verlag.
- Bucher, M. (2007). Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. *New Phytologist*, 173(1), 11–26.
- Buchner, W., & Köller, K. (1990). *Integrierte Bodenbearbeitung: 13 Tab.* Ulmer.
- Bundeministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Gesundheit & Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (27.06.2023). Pflanzenschutz-Sachkundeverordnung: PflSchSachkV 2013. Verfügbar 15. Januar 2024 unter https://www.gesetze-im-internet.de/pflschsachkv_2013/PflSchSachkV_2013.pdf
- Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2024). Integrierter Pflanzenschutz (Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Hrsg.). Verfügbar 8. Mai 2024 unter <https://www.nap-pflanzenschutz.de/integrierter-pflanzenschutz>

- Bundeministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit & Bundesministerium der Finanzen. (2017). Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen: Düngeverordnung (DüV). Verfügbar 15. Januar 2024 unter https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/D%C3%BCV.pdf
- Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. (2023). Absatz an Pflanzenschutzmitteln in der Bundesrepublik Deutschland: Ergebnisse der Meldungen gemäß § 64 Pflanzenschutzgesetz für das Jahr 2022 (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Hrsg.). Verfügbar 15. Januar 2024 unter https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_meldungen_par_64/meld_par_64_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. (04.12.2019). Widerruf der Zulassung von Pflanzenschutzmitteln mit dem Wirkstoff Desmedipham zum 1. Januar 2020. Verfügbar 31. Oktober 2024 unter https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Fachmeldungen/04_pflanzenschutzmittel/2019/2019_12_04_Fa_Widerruf_Desmedipham.html
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bundesministerium für Wirtschaft, Bundesministerium für Gesundheit & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (10.11.1992). Verordnung über Anwendungsverbote für Pflanzenschutzmittel: Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung (PflSchAnwV 1992). Verfügbar 15. Januar 2024 unter https://www.gesetze-im-internet.de/pflschanvw_1992/PflSchAnwV_1992.pdf
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2023a). GAP-Strategieplan für die Bundesrepublik Deutschland. Verfügbar 3. August 2023 unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/gap/gap-strategieplan.html>
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (2023b, 20. März). Den Wandel gestalten! Zusammenfassung zum GAP-Strategieplan 2023 - 2027. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/EU-Agrarpolitik-Foerderung/gap-strategieplan-kurzueberblick.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (09.01.2009). Düngegesetz: DüngG. Verfügbar 15. Januar 2024 unter https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/D%C3%BCngG.pdf
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (06.02.2012). Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen: Pflanzenschutzgesetz (PflSchG). Verfügbar 15. Januar 2024 unter https://www.gesetze-im-internet.de/pflschg_2012/PflSchG.pdf
- BUSA Bt. (2023). BUSA Rotor. Verfügbar 19. Dezember 2024 unter <https://www.busabt.hu/de/kb/busarotor/>
- Bushong, J., Peeper, T., Boyles, M., & Stone, A. (2011). Italian ryegrass (*Lolium perenne*), feral cereal rye (*Secale cereale*), and volunteer wheat (*Triticum aestivum*) control in winter canola. *Weed Technology*, 25(3), 344–349.

- Canon Deutschland GmbH. (2024). Canon EOS 90D Technische Daten. Verfügbar 4. Juli 2024 unter <https://www.canon.de/cameras/eos-90d/specifications/>
- Cao, J., Liu, C., Zhang, W., & Guo, Y. (2012). Effect of integrating straw into agricultural soils on soil infiltration and evaporation. *Water Science and Technology*, 65(12), 2213–2218. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.140>
- Cárceles Rodríguez, B., Durán-Zuazo, V. H., Soriano Rodríguez, M., García-Tejero, I. F., Gálvez Ruiz, B., & Cuadros Tavira, S. (2022). Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: A review. *Soil Systems*, 6(4), 87.
- Cardina, J., Herms, C. P., & Doohan, D. J. (2002). Crop rotation and tillage system effects on weed seedbanks. *Weed Science*, 50(4), 448–460.
- Carretta, L., Tarolli, P., Cardinali, A., Nasta, P., Romano, N., & Masin, R. (2021). Evaluation of runoff and soil erosion under conventional tillage and no-till management: A case study in northeast Italy. *Catena*, 197, 104972.
- Carter & Johnston, H. W. (1989). Association of soil macroporosity and relative saturation with root rot severity of spring cereals. *Plant and soil*, 120, 149–152.
- Cassel, D. K., Raczowski, C. W., & Denton, H. P. (1995). Tillage effects on corn production and soil physical conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 59(5), 1436–1443.
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature climate change*, 4(4), 287–291.
- Chauhan, B. S., Gill, G. S., & Preston, C. (2006). Tillage system effects on weed ecology, herbicide activity and persistence: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(12), 1557–1570.
- Choudhary, M., Ghasal, P. C., Kumar, S., Yadav, R. P., Singh, S., Meena, V. S., & Bisht, J. K. (2016). Conservation agriculture and climate change: an overview. *Conservation agriculture: an approach to combat climate change in Indian Himalaya*, 1–37.
- Clough, Y., Kirchweger, S., & Kantelhardt, J. (2020). Field sizes and the future of farmland biodiversity in European landscapes. *Conservation letters*, 13(6), e12752.
- Colbach, N., Chauvel, B., Dürr, C., & Richard, G. (2002). Effect of environmental conditions on *Alopecurus myosuroides* germination. I. Effect of temperature and light. *Weed Research*, 42(3), 210–221.
- Colbach, N., & Cordeau, S. (2022). Are no-till herbicide-free systems possible? A simulation study. *Frontiers in Agronomy*, 4, 823069.
- Congreves, K. A., Hayes, A., Verhallen, E. A., & van Eerd, L. L. (2015). Long-term impact of tillage and crop rotation on soil health at four temperate agroecosystems. *Soil and Tillage Research*, 152, 17–28.

- Cordeau, S., Guillemain, J.-P., Reibel, C., & Chauvel, B. (2015). Weed species differ in their ability to emerge in no-till systems that include cover crops. *Annals of Applied Biology*, 166(3), 444–455.
- Cotten, T. K., & Munkvold, G. P. (1998). Survival of *Fusarium moniliforme*, *F. proliferatum*, and *F. subglutinans* in maize stalk residue. *Phytopathology*, 88(6), 550–555.
- Crotty, F. V., & Stoate, C. (2019). The legacy of cover crops on the soil habitat and ecosystem services in a heavy clay, minimum tillage rotation. *Food and Energy Security*, 8(3), e00169.
- Curl, E. A. (1963). Control of plant diseases by crop rotation. *The Botanical Review*, 29, 413–479.
- Curran, W. S. (2016). Persistence of herbicides in soil. *Crops & Soils*, 49(5), 16–21.
- Cussans, G. W., Raudonius, S., Brain, P., & Cumberworth, S. (1996). Effects of depth of seed burial and soil aggregate size on seedling emergence of *Alopecurus myosuroides*, *Galium aparine*, *Stellaria media* and wheat. *Weed Research*, 36(2), 133–141.
- Da Jasper, Abbott, L. K., & Robson, A. D. (1991). The effect of soil disturbance on vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi in soils from different vegetation types. *New Phytologist*, 118(3), 471–476.
- Dämmgen, U. (Hrsg.). (2005). *Nationaler Inventarbericht 2006 - Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft*. FAL. Verfügbar 17. August 2023 unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/zi039211.pdf
- Dang, Y. P., Dalal, R. C., & Menzies, N. W. (Hrsg.). (2020). *No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture: Challenges and Opportunities* (1st ed. 2020). Springer International Publishing; Imprint Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46409-7>
- Daouti, E., Jonsson, M., Vico, G., & Menegat, A. (2022). Seed predation is key to preventing population growth of the weed *Alopecurus myosuroides*. *Journal of Applied Ecology*, 59(2), 471–482. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14064>
- Dauber, J., Hirsch, M., Simmering, D., Waldhardt, R., Otte, A., & Wolters, V. (2003). Landscape structure as an indicator of biodiversity: matrix effects on species richness. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98(1-3), 321–329.
- David, F. (16.02.2021). *Ultraflache Bodenbearbeitung - die Alternative zu Glyphosat?* [Bachelorarbeit]. Hochschule Neubrandenburg. Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften; Fachgebiet Landtechnik. Verfügbar 8. August 2023 unter https://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb_thesis_0000002535/dbhsnb_derivate_0000003156/Bachelorarbeit-David-2021.pdf
- Davis, A. S. (2010). Cover-crop roller-crimper contributes to weed management in no-till soybean. *Weed Science*, 58(3), 300–309.

- de Almeida, W. S., Panachuki, E., de Oliveira, P. T. S., Da Silva Menezes, R., Sobrinho, T. A., & de Carvalho, D. F. (2018). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175, 130–138.
- de Baets, S., Poesen, J., Meersmans, J., & Serlet, L. (2011). Cover crops and their erosion-reducing effects during concentrated flow erosion. *Catena*, 85(3), 237–244.
- de Faccio Carvalho, P. C., Anghinoni, I., de Moraes, A., de Souza, E. D., Sulc, R. M., Lang, C. R., Flores, J. P. C., Terra Lopes, M. L., Da Silva, J. L. S., & Conte, O. (2010). Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88, 259–273.
- Demmel, M., & Kreitmayr, J. (2014). *Landwirtschaftlicher Pflanzenbau: Grundlagen des Acker- und Pflanzenbaus, der guten fachlichen Praxis, der Verfahrenstechnik sowie der Agrarmeteorologie und des Klimawandels, Produktions- und Verfahrenstechnik der Kulturpflanzen, Dauergrünland, Sonderkulturen, nachwachsende Rohstoffe, ökologischer Landbau, Naturschutz und Landschaftspflege, Feldversuchswesen, Waldbewirtschaftung* (Dreizehnte, völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Bd. 1). BLV Buchverlag GmbH & Co. KG; Landwirtschaftsverlag GmbH.
- Derksen, D. A., Thomas, A. G., Lafond, G. P., Loeppky, H. A., & Swanton, C. J. (1995). Impact of post-emergence herbicides on weed community diversity within conservation-tillage systems. *Weed Research*, 35(4), 311–320.
- Derpsch, R. (2003). Conservation tillage, no-tillage and related technologies. In *Conservation agriculture: environment, farmers experiences, innovations, socio-economy, policy* (S. 181–190). Springer.
- Deutscher Wetterdienst. (2024). Wetterdaten Climate Data Center (CDC).
- Dias, T., Dukes, A., & Antunes, P. M. (2015). Accounting for soil biotic effects on soil health and crop productivity in the design of crop rotations. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(3), 447–454.
- Dicke, D., Henschke, C., Petersen, J., & Gerhards, R. (2016). Untersuchungen zur Resistenz von *Apera spica-venti* (L.) P. Beauv. (Gemeiner Windhalm) gegenüber Herbiziden unterschiedlicher HRAC-Klassen in Hessen. *Julius-Kühn-Archiv*, (452).
- Dicke, D., Wagner, J., Cramer, E., & Kirchner, M. (2014). Erstnachweis einer Wirkortresistenz von Tauber Trespe (*Bromus sterilis*) gegenüber ACCase-Hemmern. *Julius-Kühn-Archiv*, (443), 304.
- Dickeduisberg, M., Steinmann, H.-H., & Theuvsen, L. (2012). A survey on the use of glyphosate in German arable farming.
- Diepenbrock, W., Ellmer, F., & Léon, J. (2005). *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung: 101 Tabellen* (Bd. 2629). Ulmer.
- Dierauer Hansueli & Lefebvre Nicolas. (2022). Creeping thistle. Successful control in organic farming. (1716). <https://doi.org/10.5281/zenodo.6542602>

- Dik, A. J. (1991). Interactions among fungicides, pathogens, yeasts, and nutrients in the phyllosphere. In *Microbial ecology of leaves* (S. 412–429). Springer.
- Ding, G., Liu, X., Herbert, S., Novak, J., Amarasiriwardena, D., & Xing, B. (2006). Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma*, 130(3-4), 229–239.
- Dittmann, B. (2012). Abschließende Ergebnisse zur Wirkung von langjährig pflugloser Bodenbearbeitung auf die Verunkrautung in der ökologischen Fruchtfolge Güterfelde. *Julius-Kühn-Archiv*, (434), 708.
- Doleschel, P., & Hartl, L. (2024). Ackerbohne - heimischer Eiweiß- und Stärkelieferant: Ackerbohne - Saat (Freistaat Bayern & Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Hrsg.). Verfügbar 22. April 2024 unter <https://www.lfl.bayern.de/ipz/oelfruechte/068567/index.php>
- Dormann, C. F. (2012, 16. Februar). Parametrische Statistik für Ökologen: Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R.
- dos Santos Soares, D., Ramos, M. L. G., Marchao, R. L., Maciel, G. A., de Oliveira, A. D., Malaquias, J. V., & de Carvalho, A. M. (2019). How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. *Soil and Tillage Research*, 194, 104316.
- Drews, S., Neuhoﬀ, D., & Köpke, U. (2009). Weed suppression ability of three winter wheat varieties at different row spacing under organic farming conditions. *Weed Research*, 49(5), 526–533.
- Du, C. L., Li, L. L., Effah, Z., Xu, J., Xie, J. H., Luo, Z. Z., Wang, L. L., Zhang, J., & Kang, Y. Q. (2023). Different tillage and stubble management practices affect root growth and wheat production in a semi-arid area. *Plant and soil*, 1–15.
- Du, Z., Angers, D. A., Ren, T., Zhang, Q., & Li, G. (2017). The effect of no-till on organic C storage in Chinese soils should not be overemphasized: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 1–11.
- Duczek, L. J., Sutherland, K. A., Reed, S. L., Bailey, K. L., & Lafond, G. P. (1999). Survival of leaf spot pathogens on crop residues of wheat and barley in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 21(2), 165–173.
- Dumanski, J., Peiretti, R., Benites, McGarry, D., & Pieri, C. (2006). The paradigm of conservation agriculture. *Proceedings of world association of soil and water conservation*, 1(2006), 58–64.
- Ehrecke, W. (15.09.2022). Ultraflache Bodenbearbeitung schützt Wasservorräte im Boden: Ackerbau in Zeiten des Klimawandels: Landwirtschaftskammer Niedersachsen zeigt Maschinen für bodenschonende und wirtschaftliche Stoppelbearbeitung und Aussaat. Verfügbar 8. August 2023 unter https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/39692_Ultraflache_Bodenbearbeitung_schuetzt_Wasservorraete_im_Boden

- Eiland, F., Klamer, M., Lind, A.-M., Leth, M., & Bååth, E. (2001). Influence of initial C/N ratio on chemical and microbial composition during long term composting of straw. *Microbial ecology*, 272–280.
- Ellenberg, H. (1996). *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht* (5., stark veränd. und verb. Aufl., Bd. 8104). Ulmer.
- Emmerling, C. (2001). Response of earthworm communities to different types of soil tillage. *Applied Soil Ecology*, 17(1), 91–96.
- Emmerling, C. (2002). Einfluss reduzierter Grundbodenbearbeitung im ökologischen Landbau auf bodenökologische Eigenschaften. In *Bodenbearbeitung und Bodengesundheit: Zwischenergebnisse im Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung in Wörrstadt-Rommersheim (Rheinhessen, Rheinland-Pfalz)* (S. 25–46). Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Mainz und Stiftung ...
- Ernst, O. R., Kemanian, A. R., Mazzilli, S., Siri-Prieto, G., & Dogliotti, S. (2020). The dos and don'ts of no-till continuous cropping: Evidence from wheat yield and nitrogen use efficiency. *Field Crops Research*, 257, 107934. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107934>
- Esposito, M., Westbrook, A. S., Maggio, A., Cirillo, V., & DiTommaso, A. (2023). Neutral weed communities: The intersection between crop productivity, biodiversity, and weed ecosystem services. *Weed Science*, 71(4), 301–311.
- Estler, M., & Knittel, H. (1996). *Praktische Bodenbearbeitung: Grundlagen, Gerätetechnik, Verfahren, Bewertung* (2., völlig neu überarb. Aufl.). DLG-Verl.; BLV-Verl.-Ges.
- Europäische Kommission. (2023a). Europäischer Grüner Deal: Erster klimaneutraler Kontinent werden (Europäische Kommission, Hrsg.). Verfügbar 3. August 2023 unter https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- Europäische Kommission. (2023b). Farm to Fork targets - Progress (Europäische Kommission, Hrsg.). Verfügbar 3. August 2023 unter https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/sustainable-use-pesticides/farm-fork-targets-progress_en
- Europäische Kommission. (2023-07-05). Europäischer Grüner Deal: nachhaltigere Nutzung der natürlichen Pflanzen- und Bodenressourcen. Verfügbar 3. August 2023 unter file:///C:/Users/Phillip%20M%C3%BCller/Downloads/Europ%C3%BCischer_Gr%C3%BCner_Deal_nachhaltigere_Nutzung_der_nat%C3%BCrlichen_Pflanzen-_und_Bodenressourcen.pdf
- Europäisches Parlament & Europarat. (08.11.2023). Durchführungsverordnung (EU) 2023/2660 der Kommission vom 28. November 2023. Verfügbar 24. April 2024 unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302660
- Fahrig, L., Girard, J., Duro, D., Pasher, J., Smith, A., Javorek, S., King, D., Lindsay, K. F., Mitchell, S., & Tischendorf, L. (2015). Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 219–234.

- Farmaha, B. S., Fernández, F. G., & Nafziger, E. D. (2011). No-till and strip-till soybean production with surface and subsurface phosphorus and potassium fertilization. *Agronomy Journal*, 103(6), 1862–1869.
- Fehr, A., Fleischlin, S., Friese-Tapmeyer, J., Friske, R., Ganzmann, H., Huber, G., van Huet, A., Keil, W., Lohuis, R., Mann, J., Petersen, M., & Wimmer, A. (2019). *Fachkunde Land- und Baumaschinentechnik* (2. Auflage). Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG.
- Feike, T., Riedesel Freiherr zu Eisenbach, Ludwig, Lieb, R., Gabriel, D., Sabboura, D., Shawon, A. R., Wetzel, M., Klocke, B., Krenzel-Horney, S., & Schwarz, J. (2020). Einfluss von Pflanzenschutzstrategie und Bodenbearbeitung auf den CO₂-Fußabdruck von Weizen: 311-326 Seiten / Journal für Kulturpflanzen, Bd. 72 Nr. 7 (2020): Themenheft Dauerfeldversuche: Grundlage für die Landwirtschaft der Zukunft – 25 Jahre Dahnsdorf. <https://doi.org/10.5073/JfK.2020.07.08>
- Fernández, F. G., & White, C. (2012). No-till and strip-till corn production with broadcast and subsurface-band phosphorus and potassium. *Agronomy Journal*, 104(4), 996–1005.
- Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage publications limited.
- Fitchett, J. M., Grab, S. W., & Thompson, D. I. (2015). Plant phenology and climate change: Progress in methodological approaches and application. *Progress in Physical Geography*, 39(4), 460–482.
- Flessner, M. L., Burke, I. C., Dille, J. A., Everman, W. J., VanGessel, M. J., Tidemann, B., Manuchehri, M. R., Soltani, N., & Sikkema, P. H. (2021). Potential wheat yield loss due to weeds in the United States and Canada. *Weed Technology*, 35(6), 916–923.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations. (2023). Conservation Agriculture: Three principles of Conservation Agriculture (Food and Agricultural Organization of the United Nations, Hrsg.). Verfügbar 8. August 2023 unter <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>
- Freier, B., Wendt, C., & Neukampf, R. (2015). Zur Befallssituation des Maiszünslers (*Ostrinia nubilalis*) und Westlichen Maiswurzelbohrers (*Diabrotica virgifera virgifera*) in Deutschland und deren Bekämpfung. *Journal of Cultivated Plants/Journal für Kulturpflanzen*, 67(4).
- Freyer, B., & Axmann, P. (Hrsg.). (2016). *Ökologischer Landbau: Grundlagen, Wissensstand und Herausforderungen* (1. Auflage, Bd. 4639). Haupt Verlag.
- Fricke, C., & Leymann, C. (2022). Wasser sparen: Ultraflache Bodenbearbeitung im Fokus: Bei der Vorführung der LWK Niedersachsen in Sehnde werden verschiedene Landmaschinenhersteller über 40 Geräte für die ultraflache Bodenbearbeitung und Aussaat vorstellen (Land&Forst, Hrsg.). Verfügbar 8. August 2023 unter <https://www.landundforst.de/landwirtschaft/landtechnik/wasser-sparen-ultraflache-bodenbearbeitung-fokus-568078>

- Frøslev, T. G., Nielsen, I. B., Santos, S. S., Barnes, C. J., Bruun, H. H., & Ejrnæs, R. (2022). The biodiversity effect of reduced tillage on soil microbiota. *Ambio*, 51(4), 1022–1033.
- Froud-Williams, R. J. (1981). Germination behaviour of *Bromus* species and *Alopecurus myosuroides*.
- Froud-Williams, R. J., Chancellor, R. J., & Drennan, D. S. (1984). The effects of seed burial and soil disturbance on emergence and survival of arable weeds in relation to minimal cultivation. *Journal of Applied Ecology*, 629–641.
- Froud-Williams, R. J., Drennan, D. S., & Chancellor, R. J. (1984). The influence of burial and dry-storage upon cyclic changes in dormancy, germination and response to light in seeds of various arable weeds. *New Phytologist*, 96(3), 473–481.
- Gajda & Przewloka, B. (2012). Soil biological activity as affected by tillage intensity. *International Agrophysics*, 26(1).
- Gan, Y. T., Campbell, C. A., Janzen, H. H., Lemke, R., Liu, L. P., Basnyat, P., & McDonald, C. L. (2009). Root mass for oilseed and pulse crops: growth and distribution in the soil profile. *Canadian Journal of Plant Science*, 89(5), 883–893.
- Garcia, J. P., Wortmann, C. S., Mamo, M., Drijber, R., & Tarkalson, D. (2007). One-time tillage of no-till: Effects on nutrients, mycorrhizae, and phosphorus uptake. *Agronomy Journal*, 99(4), 1093–1103.
- Garrett, K. A., Nita, M., de Wolf, E. D., Esker, P. D., Gomez-Montano, L., & Sparks, A. H. (2021). Plant pathogens as indicators of climate change. In *Climate change* (S. 499–513). Elsevier.
- Gathmann, A., & Rothmeier, I. (2005). Die Ausbreitung des Maiszünslers (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) im Rheinland–Ergebnisse der Feldbonituren 2002 und 2003/Dispersal of the European Corn Borer (*Ostrinia nubilalis* Hbn.) in southern Rhineland–Results of the infestation assessment 2002 and 2003. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz/Journal of Plant Diseases and Protection*, 200–203.
- Geddes, C. M., Tidemann, B. D., Ikley, J. T., Dille, J. A., Soltani, N., & Sikkema, P. H. (2022). Potential spring canola yield losses due to weeds in Canada and the United States. *Weed Technology*, 36(6), 884–890.
- Gehring, K., & Thyssen, S. (2022). Chemische Regulierung von Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) in der Wintergerste-Erfahrungen aus einer 30-jährigen Versuchsserie. *Julius-Kühn-Archiv*, (468).
- Gehring, K., Thyssen, S., & Festner, T. (2012). Möglichkeiten der Kontrolle von Storchschnabel-Arten (*Geranium* spp.) mit Herbiziden im Ackerbau. *Julius-Kühn-Archiv*, (434), 671.
- Gehring, K., Thyssen, S., & Festner, T. (2018). Stand und Entwicklung der Herbizidresistenz bei Acker-Fuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) in Bayern. *Julius-Kühn-Archiv*, (458).

- Generaldirektion Landwirtschaft und ländliche Entwicklung. (2023). Die Gemeinsame Agrarpolitik auf einen Blick. Verfügbar 3. August 2023 unter https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-glance_de
- Gerhards, R., Dentler, J., Gutjahr, C., Auburger, S., & Bahrs, E. (2016). An approach to investigate the costs of herbicide-resistant *Alopecurus myosuroides*. *Weed Research*, 56(6), 407–414.
- Gerhards, R., Messelhäuser, M. H., & Sievernich, B. (2022). Suppressing *Alopecurus myosuroides* in winter cereals by delayed sowing and pre-emergence herbicides. *Plant, Soil & Environment*, 68(6).
- Gerhards, R., Weber, J. F., & Kunz, C. (2020). Evaluation of weed control efficacy and yield response of inter-row and intra-row hoeing technologies in maize, sugar beet and soybean. *Landtechnik*, 75(4), 247–260.
- Gerowitt, B. (2016). Zum Nutzen von Artenvielfalt bei Ackerunkräutern für das Unkrautmanagement. *Julius-Kühn-Archiv*, (452).
- Gharde, Y., Singh, P. K., Dubey, R. P., & Gupta, P. K. (2018). Assessment of yield and economic losses in agriculture due to weeds in India. *Crop Protection*, 107, 12–18.
- Gholami, L., Sadeghi, S. H., & Homaei, M. (2013). Straw Mulching Effect on Splash Erosion, Runoff, and Sediment Yield from Eroded Plots. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1), 268–278. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0271>
- Gómez, J. A., Campos, M., Guzmán, G., Castillo-Llanque, F., Vanwalleghe, T., Lora, Á., & Giráldez, J. V. (2018). Soil erosion control, plant diversity, and arthropod communities under heterogeneous cover crops in an olive orchard. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 977–989.
- Gordo, O., & Sanz, J. J. (2010). Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Global Change Biology*, 16(3), 1082–1106.
- Górski, D., Gaj, R., Ulatowska, A., & Miziniak, W. (2022). Effect of strip-till and variety on yield and quality of sugar beet against conventional tillage. *Agriculture*, 12(2), 166.
- Gristina, L., Keesstra, S., & Novara, A. (2018). No-till durum wheat yield success probability in semi arid climate: A methodological framework. *Soil and Tillage Research*, 181, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.002>
- Gronle, A., & Böhm, H. (2011). Vergleich von flach-und tiefenwendender Bodenbearbeitung beim Anbau von Sommererbsen in Reinsaat und im Gemenge mit Hafer. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 23, 71–72.
- Grosa, A., Bögel, T., & Planitz, Bruno, Edler von der. (2016). Mulchen von Maisstopeln: Optimierung des Mulchereinsatzes zur wirksamen Bekämpfung von Fusariumkrankheiten und Maiszünslerbefall im pfluglosen Ackerbau. *Schriftenreihe des LfULG*, 2016(15). Verfügbar 29. Oktober 2024 unter <https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A7821/attachment/ATT-0/>

- Gruber, S., Bühler, A., Möhring, J., & Claupein, W. (2010). Sleepers in the soil—Vertical distribution by tillage and long-term survival of oilseed rape seeds compared with plastic pellets. *European Journal of Agronomy*, 33(2), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.03.003>
- Gruber, S., & Claupein, W. (2009). Bodensamenvorrat, quo vadis? Verbleib von Samen (Raps, *Brassica napus*) und Plastikpellets bei langjährig unterschiedlich intensiver Bodenbearbeitung. In *Tagungsband Pflanzenbauwissenschaften - Systembezug und Modellierung* (S. 91–92). Verlag Liddy Halm.
- Gruber, S., Pekrun, C., Möhring, J., & Claupein, W. (2012). Long-term yield and weed response to conservation and stubble tillage in SW Germany. *Soil and Tillage Research*, 121, 49–56.
- Grundy, A. C., Mead, A., Bond, W., Clark, G., & Burston, S. (2011). The impact of herbicide management on long-term changes in the diversity and species composition of weed populations. *Weed Research*, 51(2), 187–200.
- Guddat, C., Degner, J., Marschall, K., Zorn, W., & Götz, R. (2015). Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Wintergerste (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Hrsg.; 8. Auflage). Verfügbar 21. Oktober 2024 unter https://www.tll.de/www/daten/publikationen/leitlinien/ll_wg.pdf
- Häberle, A. (2006). *Die Auswirkungen einer einmalig variierten Bodenbearbeitung auf Ertragsbildung, Verunkrautung und Bodennitratgehalt unter ökologischen Produktionsbedingungen* [Dissertation]. Universität Hohenheim. Fakultät für Agrarwissenschaften. Verfügbar 1. November 2023 unter http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2007/198/pdf/Dis_A.Haeberle.pdf
- Hadas, A., Kautsky, L., Goek, M., & Kara, E. E. (2004). Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil biology and biochemistry*, 36(2), 255–266.
- Hage-Ahmed, K., Rosner, K., & Steinkellner, S. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi and their response to pesticides. *Pest Management Science: Formerly Pesticide Science*, 75(3), 583–590.
- Håkansson, I., Arvidsson, J., Keller, T., & Rydberg, T. (2011). Effects of seedbed properties on crop emergence: 1. Temporal effects of temperature and sowing depth in seedbeds with favourable properties. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 61(5), 458–468.
- Hallmann, J., Quadts-Hallmann, A., & von Tiedemann, A. (2009). *Phytomedizin: Grundwissen Bachelor* ; 77 Tabellen (2., überarb. Aufl., Bd. 2863). Ulmer.
- Handl, A., & Kühlenkasper, T. (2018). *Einführung in die Statistik: Theorie und Praxis mit R*. Springer Spektrum.
- Hante, C. (06.12.2023). Möglichkeiten und Grenzen der Datennutzung in der Landtechnik - Wo hakt es?

- Hanzlik, K., & Gerowitt, B. (2010). Verändern pfluglose Bodenbearbeitung und Fröhsaa-
ten die Unkrautvegetation im Winterraps? *Gesunde Pflanzen*, 62(1), 1–9.
- Haramoto, E. R. (2019). Species, seeding rate, and planting method influence cover crop
services prior to soybean. *Agronomy Journal*, 111(3), 1068–1078.
- Haramoto, E. R., & Gallandt, E. R. (2004). Brassica cover cropping for weed management:
A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 19(4), 187–198.
- Haruna, S. I., Nkongolo, N. V., Anderson, S. H., Eivazi, F., & Zaibon, S. (2018). In situ
infiltration as influenced by cover crop and tillage management. *Journal of Soil
and Water Conservation*, 73(2), 164–172.
- He, Y., Revell, B. J., Leng, B., & Feng, Z. (2017). The effects of weather on oilseed rape
(OSR) yield in China: future implications of climate change. *Sustainability*, 9(3),
418.
- Heap, I. (2014). Global perspective of herbicide-resistant weeds. *Pest Management Science:
Formerly Pesticide Science*, 70(9), 1306–1315.
- Hedderich, J., & Sachs, L. (2018). *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R* (16.,
überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer Spektrum.
- Heick, T. M., Hansen, A. L., Munk, L., Labouriau, R., Wu, K., & Jørgensen, L. N. (2020).
The effect of fungicide sprays on powdery mildew and rust and yield of sugar beet
in Denmark. *Crop Protection*, 135, 105199.
- Heidel, W. (2015). Der Maiszünsler in Mecklenburg-Vorpommern–Befallsausbreitung und
Bekämpfungsstrategien. *Nachrichtenblatt des deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 59(11),
270.
- Helmecke, K., Hickisch, B., Mahn, E.-G., Prasse, Joachim & Sternkopf, G. (1977). Beiträ-
ge zur Wirkung des Herbizideinsatzes auf Struktur und Stoffhaushalt von Agro-
Ökosystemen: I. Zur Beeinflussung von Phytozönose und Bodenorganismengemein-
schaften nach mehrjährigem Herbizideinsatz. *Hercynia N.F.*, 375–398. Verfügbar
5. November 2024 unter [https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/
94732/1/hercynia_volume_14_2301.pdf](https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/94732/1/hercynia_volume_14_2301.pdf)
- Henke, J., Böttcher, U., Neukam, D., Sieling, K., & Kage, H. (2008). Evaluation of different
agronomic strategies to reduce nitrate leaching after winter oilseed rape (*Brassica
napus* L.) using a simulation model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 82, 299–
314.
- Henne, U. (2015). Der Vorrat im Boden wächst. *DLG-Mitteilungen*, (07/2015), 20–21.
- Henriksen, B., & Elen, O. (2005). Natural *Fusarium* grain infection level in wheat, barley
and oat after early application of fungicides and herbicides. *Journal of phytopa-
thology*, 153(4), 214–220.
- Hiltbrunner, J., Liedgens, M., Stamp, P., & Streit, B. (2005). Effects of row spacing
and liquid manure on directly drilled winter wheat in organic farming. *European
Journal of Agronomy*, 22(4), 441–447.

- Hobbs, P. R. (2007). Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production? *The Journal of Agricultural Science*, 145(2), 127.
- Hobbs, P. R., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543–555.
- Hofgaard, I. S., Seehusen, T., Aamot, H. U., Riley, H., Razzaghian, J., Le, V. H., Hjelkrem, A.-G. R., Dill-Macky, R., & Brodal, G. (2016). Inoculum potential of *Fusarium* spp. relates to tillage and straw management in Norwegian fields of spring oats. *Frontiers in Microbiology*, 7, 556.
- Holka, M., & Bieńkowski, J. (2020). Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and non-inversion tillage systems. *Agronomy*, 10(12), 1877.
- Holloway, T., Pérez, M., Chandler, J. O., Venceslai, N., Garcia, L., Cohn, J., Schilling, K., Seville, A., Leubner-Metzger, G., & Nakabayashi, K. (2024). Mechanisms of seed persistence in blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) *Weed Research*, 64(3), 237–250.
- Huber, D. G., & Gullede, J. (2011). Extreme weather and climate change: Understanding the link and managing the risk. Science and Impacts Program. *Center for Climate and Energy Solutions*. <http://www.c2es.org/publications/extremeweather-and-climate-change.pdf>.
- Hunger, S., Pekrun, C., & Claupein, W. (2001). Der Stoppelhobel - Eine Alternative zu herkömmlichen Geräten der Stoppelbearbeitung im Ökologischen Landbau? *Von Leit-Bildern zu Leit-Linien: Beiträge zur 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau*, 357–360.
- Hunger, S., Pekrun, C., Claupein, W., & Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. (2001). Unkrautbekämpfung durch Stoppelbearbeitung – Ergebnisse aus zwei Jahren Praxisversuche im Ökologischen Landbau. 44. Jahrestagung (27.-29.09.) : Kurzfassungen der Vorträge und Poster. <https://orgprints.org/8988/>
- Hunter, J. H. (1996). Control of Canada thistle (*Cirsium arvense*) with glyphosate applied at the bud vs rosette stage. *Weed Science*, 44(4), 934–938.
- Im Young & Ritz, K. (2000). Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research*, 53(3-4), 201–213.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- Jacobs, A., Flessa, H., Don, A., Heidkamp, A., Prietz, R., Dechow, R., Gensior, A., Poeplau, C., Riggers, C., Schneider, F., Tiemeyer, B., Vos, C., Wittnebel, M., Müller, T., Säurich, A., Fahrion-Nitschke, A., Gebbert, S., Hopfstock, R., Jaconi,

- A., ... Freibauer, A. (2018). *Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung* (Bd. 64). Johann Heinrich von Thünen-Institut. <https://doi.org/10.3220/REP1542818391000>
- Jankowski, K. J., Sokólski, M., & Załuski, D. (2023). Winter oilseed rape: Agronomic management in different tillage systems and energy balance. *Energy*, 277, 127590.
- Jansa, J., Mozafar, A., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I., & Frossard, E. (2002). Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza*, 12, 225–234.
- Jansa, J., Mozafar, A., Kuhn, G., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I. R., & Frossard, E. (2003). Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecological Applications*, 13(4), 1164–1176.
- Jaskulska, I., Jaskulski, D., Kamieniarz, J., Radziemska, M., Brtnický, M., & Różniak, E. (2023). Effect of Fungicide Protection of Sugar Beet Leaves (*Beta vulgaris* L.): Results of Many Years Experiments. *Agronomy*, 13(2), 346.
- Jaskulska, I., Romaneckas, K., Jaskulski, D., & Wojewódzki, P. (2020). A strip-till one-pass system as a component of conservation agriculture. *Agronomy*, 10(12), 2015.
- Jensen, P. K. (2019). Longevity of seeds of blackgrass following different stubble cultivation treatments. In *Applied Crop Protection 2018* (S. 98–102). Aarhus Universitet-DCA-Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Jentsch, A., & Beierkuhnlein, C. (2008). Research frontiers in climate change: effects of extreme meteorological events on ecosystems. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9–10), 621–628.
- Ji, S., & Unger, P. W. (2001). Soil Water Accumulation under Different Precipitation, Potential Evaporation, and Straw Mulch Conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 442–448. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652442x>
- Jin, H., Germida, J. J., & Walley, F. L. (2013). Suppressive effects of seed-applied fungicides on arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) differ with fungicide mode of action and AMF species. *Applied Soil Ecology*, 72, 22–30.
- Johnson-Maynard, J. L., Umiker, K. J., & Guy, S. O. (2007). Earthworm dynamics and soil physical properties in the first three years of no-till management. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 338–345.
- Jones, R. K. (2000). Assessments of Fusarium head blight of wheat and barley in response to fungicide treatment. *Plant disease*, 84(9), 1021–1030.
- Jung, R., & Rauber, R. (2016). Einfluss von reduzierter Bodenbearbeitung und Direktsaat auf die Segetalvegetation in ökologisch produzierten Ackerbohnen: P. 457-461 / Julius-Kühn-Archiv, Nr. 452 (2016): Tagungsband 27. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung / Julius-Kühn-Archiv, Nr. 452 (2016): Tagungsband 27. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der

- Unkrautbiologie und -bekämpfung. *Julius-Kühn-Archiv*, 452. <https://doi.org/10.5073/jka.2016.452.061>
- Kah, M., Beulke, S., & Brown, C. D. (2007). Factors influencing degradation of pesticides in soil. *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(11), 4487–4492.
- Kahnt, G. (1976). *Ackerbau ohne Pflug: Voraussetzungen, Verfahren und Grenzen der Direktsaat im Körnerfruchtanbau; 54 Tabellen*. Ulmer.
- Kahnt, G. (1995). *Minimal-Bodenbearbeitung: 52 Tabellen*. Ulmer.
- Kan, Z.-R., Liu, W.-X., Liu, W.-S., Lal, R., Dang, Y. P., Zhao, X., & Zhang, H.-L. (2022). Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective. *Global Change Biology*, 28(3), 693–710.
- Kan, Z.-R., Virk, A. L., Wu, G., Qi, J.-Y., Ma, S.-T., Wang, X., Zhao, X., Lal, R., & Zhang, H.-L. (2020). Priming effect intensity of soil organic carbon mineralization under no-till and residue retention. *Applied Soil Ecology*, 147, 103445.
- Kandeler, E., Tscherko, D., & Spiegel, H. (1999). Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biology and fertility of soils*, 28, 343–351.
- Karlen, D. L., Wollenhaupt, N. C., Erbach, D. C., Berry, E. C., Swan, J. B., Eash, N. S., & Jordahl, J. L. (1994). Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil and Tillage Research*, 31(2-3), 149–167.
- Karlsson, I., Friberg, H., Steinberg, C., & Persson, P. (2014). Fungicide effects on fungal community composition in the wheat phyllosphere. *PloS one*, 9(11), e111786.
- Kaspar, F., Imbery, F., Friedrich, K., Böttcher, F., Herbst, M., Deutschlänger, T., Friedrich, A., & Tinz, B. (2021). Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen: Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland (Deutscher Wetterdienst & Extremwetterkongress Hamburg, Hrsg.). Verfügbar 28. Februar 2024 unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/210922/Faktenpapier-Extremwetterkongress_download.pdf;jsessionid=9C9D5E6B7842A0730B84433BE3A85728.live21063?__blob=publicationFile&v=1
- Kasper, M., Buchan, G. D., Mentler, A., & Blum, W. E. (2009). Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil and Tillage Research*, 105(2), 192–199.
- Kaul, H.-P., Kautz, T., & Léon, J. (2022). *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung* (5. vollst. überarb. Aufl.). utb GmbH. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:24-epflicht-2034947>
- Kayode, J., & Ayeni, J. M. (2009). Allelopathic effects of some crop residues on the germination and growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) *Ethnobotanical Leaflets*, 2009(2), 10.

- Kelley, K. W. (2001). Planting date and foliar fungicide effects on yield components and grain traits of winter wheat. *Agronomy Journal*, 93(2), 380–389.
- Kemper, R., Bublitz, T. A., Müller, P., Kautz, T., Döring, T. F., & Athmann, M. (2020). Vertical root distribution of different cover crops determined with the profile wall method. *Agriculture*, 10(11), 503.
- Kladivko, E. J. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil and Tillage Research*, 61(1-2), 61–76. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(01\)00179-9](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(01)00179-9)
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G., & Nachtergaele, J. (2007). Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 80(1-2), 75–109.
- Knechtges, H. J., Koch, F., Meyer, T., & Scheit, S. (2010). Stoppelbearbeitung mit Grubber oder Kurzscheibenegge im Vergleich. *agricultural engineering. eu*, 65(1), 51â“53–51â“53.
- Knoche Maschinenbau GmbH. (2023). So flach wie möglich und so tief wie nötig - auf die richtige Rapsstoppelbearbeitung kommt es an! Verfügbar 8. August 2023 unter <https://knoche-maschinenbau.de/tag/ultraflache-bodenbearbeitung/>
- Koch, H.-J., & Stockfish, N. (2006). Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 86(1), 73–83.
- Köhl, J., Vlaswinkel, M., Groenenboom–de Haas, B. H., Kastelein, P., van Hoof, R. A., van der Wolf, J. M., & Krijger, M. (2011). Survival of pathogens of Brussels sprouts (*Brassica oleracea* Gemmifera Group) in crop residues. *Plant pathology*, 60(4), 661–670.
- Köhler, W., Schachtel, G., & Voleske, P. (2012). *Biostatistik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29271-2>
- Kolbe, H. (2007). Zwischenfrüchte als Vorfrüchte für die Ertrags- und Qualitätsleistung von Mais und Kartoffeln: Proceeding catch crop effects on yield and quality of maize and potato. In *Zwischen Tradition und Globalisierung*. Köster.
- Köller, K. (1981). *Bodenbearbeitung ohne Pflug: Ergebnisse mehrjähriger Vergleichsuntersuchungen verschiedener Geräte und Verfahren auf vier Standorten: Zugl.: Hohenheim, Univ., Fak. 04 - Agrarwiss. II (Agrarökonomie, Agrartechnik u. Tierproduktion), Diss. : 1980* (Bd. 112). Ulmer.
- Köller, K., & Hensel, O. (Hrsg.). (2019). *Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion* (Bd. 5198). Verlag Eugen Ulmer.
- Koocheki, A., Nassiri, M., Alimoradi, L., & Ghorbani, R. (2009). Effect of cropping systems and crop rotations on weeds. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 401–408.

- Kornecki, T. S., Price, A. J., Raper, R. L., & Arriaga, F. J. (2009). New roller crimper concepts for mechanical termination of cover crops in conservation agriculture. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24(3), 165–173.
- Kornecki, T. S., & Price, A. J. (2010). Effects of different roller/crimper designs and rolling speed on rye cover crop termination and seedcotton yield in a no-till system. 1524-3303.
- Kumar, R., Samaniego, L., & Attinger, S. (2013). Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations. *Water Resources Research*, 49(1), 360–379. <https://doi.org/10.1029/2012WR012195>
- Kunz, C., Weber, J. F., & Gerhards, R. (2015). Benefits of precision farming technologies for mechanical weed control in soybean and sugar beet—comparison of precision hoeing with conventional mechanical weed control. *Agronomy*, 5(2), 130–142.
- Kunz, C., Weber, J. F., & Gerhards, R. (2016). Comparison of different mechanical weed control strategies in sugar beets.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. (1998). Bodenbearbeitung und Bodenschutz: Schlußfolgerungen für gute fachliche Praxis.
- Lafond, G. P. (1994). Effects of row spacing, seeding rate and nitrogen on yield of barley and wheat under zero-till management. *Canadian Journal of Plant Science*, 74(4), 703–711.
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24(8), 3285–3301.
- Landschreiber, M. (2014). Untersuchungen zum Auflaufverhalten von Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* Huds.) in Abhängigkeit des Aussaattermins und der Winterweizensorte in Norddeutschland. *Julius-Kühn-Archiv*, 443. <https://doi.org/10.5073/jka.2014.443.042>
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. (2023). Übersicht zu den wichtigsten Neuerungen im Kontrolljahr 2023. Verfügbar 3. August 2023 unter <https://www.landwirtschaftskammer.de/foerderung/konditionalitaet/aenderungen-2023.htm>
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. (2024). Neue Pflanzenschutz Anwendungsverordnung in Kraft. Verfügbar 29. November 2024 unter <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/pflanzenschutz/genuehmigungen/pflschanw-verordnung.htm>
- Langdale, G. W., Barnett, A. P., Leonard, R. A., & Fleming, W. G. (1979). Reduction of soil erosion by the no-till system in the Southern Piedmont. *Transactions of the ASAE*, 22(1), 82–0086.
- Langdale, G. W., Blevins, R. L., Karlen, D. L., McCool, D. K., Nearing, M. A., Skidmore, E. L., Thomas, A. W., Tyler, D. D., & Williams. (1991). Cover crop effects on soil erosion by wind and water. *Cover crops for clean water*, 15–22.

- Larney, F. J., Ren, T., McGinn, S. M., Lindwall, C. W., & Izaurralde, R. C. (2003). The influence of rotation, tillage and row spacing on near-surface soil temperature for winter wheat in southern Alberta. *Canadian journal of soil science*, 83(1), 89–98.
- Laufer, D., & Ladewig, E. (2020). Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben ohne die Wirkstoffe Desmedipham und Phenmedipham. *Julius-Kühn-Archiv*, (464).
- Lawson, A., Cogger, C., Bary, A., & Fortuna, A.-M. (2015). Influence of seeding ratio, planting date, and termination date on rye-hairy vetch cover crop mixture performance under organic management. *PloS one*, 10(6), e0129597.
- Lehnert, S., & Watzka, A. (2020). Stoppelbearbeitung: Alles auf einmal geht nicht. *Top Agrar*.
- Li, M., Guo, J., Ren, T., Luo, G., Shen, Q., Lu, J., Guo, S., & Ling, N. (2021). Crop rotation history constrains soil biodiversity and multifunctionality relationships. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319, 107550.
- Lichtenegger, E., Kutschera, L., Sobotik, M., & Haas, D. (2018). *Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues* (2. Auflage, Bd. 7. Band). DLG-Verlag.
- Lobell, D. B., & Gourdji, S. M. (2012). The influence of climate change on global crop productivity. *Plant physiology*, 160(4), 1686–1697.
- Loibl, B. (2006). Einteilung der Bodenbearbeitungssysteme unter Berücksichtigung der Bodenbedeckung: 302–303 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 61 Nr. SH (2006): Sonderheft (2006). <https://doi.org/10.15150/LT.2006.2045>
- Lollato, R. P., Patrignani, A., Ochsner, T., Rocateli, A., Tomlinson, P., & Edwards, J. (2016). Dual-purpose wheat: improving grazing management using a smartphone app.
- Lori, G. A., Sisterna, M. N., Sarandón, S. J., Rizzo, I., & Chidichimo, H. (2009). Fusarium head blight in wheat: impact of tillage and other agronomic practices under natural infection. *Crop Protection*, 28(6), 495–502.
- Lucas, J. A., Hawkins, N. J., & Fraaije, B. A. (2015). The evolution of fungicide resistance. *Advances in applied microbiology*, 90, 29–92.
- Lukashyk, P., Berg, M., & Köpke, U. (2008). Strategies to control Canada thistle (*Cirsium arvense*) under organic farming conditions. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(1), 13–18.
- Lundin, O. (2019). No-till protects spring oilseed rape (*Brassica napus* L.) against crop damage by flea beetles (*Phyllotreta* spp.) *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 278, 1–5.
- Lüpsen, H. (2021, 12. Mai). Varianzanalysen: Prüfen der Voraussetzungen und nichtparametrische Methoden sowie praktische Anwendungen mit R und SPSS.

- Lütke Entrup, N., & Oehmichen, J. (Hrsg.). (2000). *Lehrbuch des Pflanzenbaues* (2., erw. Aufl.). Mann.
- Lutman, P. J., Freeman, S. E., & Pekrun, C. (2003). The long-term persistence of seeds of oilseed rape (*Brassica napus*) in arable fields. *The Journal of Agricultural Science*, 141(2), 231–240.
- Lutman, P. J., Moss, Cook, S., & Welham, S. J. (2013). A review of the effects of crop agronomy on the management of *Alopecurus myosuroides*. *Weed Research*, 53(5), 299–313.
- MacLaren, C., Swanepoel, P., Bennett, J., Wright, J., & Dehnen-Schmutz, K. (2019). Cover crop biomass production is more important than diversity for weed suppression. *Crop Science*, 59(2), 733–748.
- Maiorano, A., Blandino, M., Reyneri, A., & Vanara, F. (2008). Effects of maize residues on the *Fusarium* spp. infection and deoxynivalenol (DON) contamination of wheat grain. *Crop Protection*, 27(2), 182–188.
- Malagoli, P., Laine, P., Rossato, L., & Ourry, A. (2005). Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest: I. Global N flows between vegetative and reproductive tissues in relation to leaf fall and their residual N. *Annals of botany*, 95(5), 853–861.
- Marschner, H., & Dell, B. (1994). Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and soil*, 159, 89–102.
- Marshall, J., Brown, V., Boatman, N., Lutman, P., & Squire, G. (2001). The impact of herbicides on weed abundance and biodiversity PN0940. *A Report for the UK Pesticides Safety Directorate. IACR-Long Ashton Research Station*. Verfügbar 5. November 2024 unter https://scri.webarchive.hutton.ac.uk/scri/file/EPI/Impact_of_herbicides_on_weed_abundance_and_biodiversity_PN094.pdf
- Martin Hänsel, Ellen Müller & Walter Schmidt. (2014). *Optimierung der Stoppelbearbeitung* (Bd. 19/2013). Verfügbar 26. Juli 2024 unter <https://slub.qucosa.de/id/qucosa:4142>
- Marx, A. (2023). Dürren in Deutschland (Helmholtz-Zentrum für Umweltfolgenforschung GmbH - UFZ, Hrsg.). Verfügbar 28. Februar 2024 unter <https://www.ufz.de/index.php?de=47252>
- Marx, A., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., & Zink, M. (2016). Der Dürremonitor - Aktuelle Informationen zur Bodenfeuchte in Deutschland. In Hochschule Koblenz & Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.), *Wasserressourcen - Wissen in Flussgebieten vernetzen* (S. 131–142).
- Masilionyte, L., Maiksteniene, S., Kriauciuniene, Z., Jablonskyte-Rasce, D., Zou, L., & Sarauskis, E. (2017). Effect of cover crops in smothering weeds and volunteer plants in alternative farming systems. *Crop Protection*, 91, 74–81.

- Maskina, M. S., Power, J. F., Doran, J. W., & Wilhelm, W. W. (1993). Residual effects of no-till crop residues on corn yield and nitrogen uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 57(6), 1555–1560.
- Massucati, L. F. P., & Köpke, U. (2014). Auswirkung der Mulchmasse der Vorfrucht Hafer auf die Unkrautflora bei Direktsaat von Ackerbohnen im Ökologischen Landbau. *Julius-Kühn-Archiv*, 443. <https://doi.org/10.5073/JKA.2014.443.060>
- Mathew, R. P., Feng, Y., Githinji, L., Ankumah, R., & Balkcom, K. S. (2012). Impact of no-tillage and conventional tillage systems on soil microbial communities. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012.
- Maurer, C., Ruedy, M., Chervet, A., Sturny, W. G., Flisch, R., & Oehl, F. (2014). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in field crops using no-till and conventional tillage practices. *Agrarforschung Schweiz*, 5(10), 398–405.
- Maurer-Troxler, C., Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G., & Oberholzer, H. R. (2005). Bodenbiologie nach zehn Jahren Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung*, 12(10), 460–465.
- McBean, G. (2004). Climate change and extreme weather: a basis for action. *Natural Hazards*, 31, 177–190.
- McCool, C., Beattie, J., Firn, J., Lehnert, C., Kulk, J., Bawden, O., Russell, R., & Perez, T. (2018). Efficacy of mechanical weeding tools: A study into alternative weed management strategies enabled by robotics. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(2), 1184–1190.
- McIsaac, G. F., Siemens, J. C., Hummel, J. W., & Tyrrell, A. T. (1990). Economic comparisons of six corn and soybean tillage systems, two soybean row spacings on three farm sizes. *Applied engineering in agriculture*, 6(5), 557–564.
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L., & Whetton, P. (2000). Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 427–436.
- Meister, M., Epperlein, J., Niedermüller, H., & Groß, U. (2025). Gesundere Böden, geringere Kosten, nachhaltige Erträge: Wie Konservierende Landwirtschaft Vorteile erntet. (Naturschutzbund Deutschland e.V., Hrsg.). Verfügbar 31. März 2025 unter <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/landwirtschaft/250325-nabugkb-studie-konservierende-landwirtschaft.pdf>
- Menegat, A. (2023). Minimal soil disturbance combined with spring cropping can halt soil seedbank accumulation of *Alopecurus myosuroides*. *Weed Research*, 63(2), 115–122.
- Menegat, A., Milberg, P., Nilsson, A. T. S., Andersson, L., & Vico, G. (2018). Soil water potential and temperature sum during reproductive growth control seed dormancy in *Alopecurus myosuroides* Huds. *Ecology and evolution*, 8(14), 7186–7194.

- Mennan, H., Jabran, K., Zandstra, B. H., & Pala, F. (2020). Non-chemical weed management in vegetables by using cover crops: A review. *Agronomy*, 10(2), 257.
- Merten, G. H., Araújo, AG, Biscaia, R. C., Barbosa, G. M., & Conte, O. (2015). No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 152, 85–93.
- Messelhäuser, M. H., Saile, M., Sievernich, B., & Gerhards, R. (2022). Exploring the Effects of Different Stubble Tillage Practices and Glyphosate Application Combined with the New Soil Residual Herbicide Cinmethylin against *Alopecurus myosuroides* Huds. in Winter Wheat. *Agronomy*, 12(1), 167.
- Mestelan, S. A. (2008). *Impact of long-term no till and plow till on soil properties and soil nutrient cycling* [Dissertation]. The Ohio State University.
- Metzke, M., Potthoff, M., Quintern, M., Heß, J., & Joergensen, R. G. (2007). Effect of reduced tillage systems on earthworm communities in a 6-year organic rotation. *European Journal of Soil Biology*, 43, S209–S215.
- Meyer, T. (2023). Ultraflache Bodenbearbeitung: Alles Einstellungssache: Aktionstag zu klimaangepasster Landwirtschaft: Durch ultraflache Bodenbearbeitung sollen Unkraut und gekeimtes Ausfallgetreide reguliert, Humus gebildet und vor allem Wasser im Boden gehalten werden. (Bauernzeitung, Hrsg.). Verfügbar 8. August 2023 unter <https://www.bauernzeitung.de/agrarpraxis/ackerbau/ultraflache-bodenbearbeitung-alles-einstellungssache/>
- Milberg, P., & Hallgren, E. (2004). Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research*, 86(2-3), 199–209.
- Miller, D., Culley, J., Fraser, K., Hubbard, S., Meloche, F., Ouellet, T., Seamanm, W. L., Seifert, K. A., Turkington, K., & Voldeng, H. (1998). Effect of tillage practice on Fusarium head blight of wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 20(1), 95–103.
- Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg. (2023). Erweiterte Konditionalität. Verfügbar 3. August 2023 unter <https://foerderung.landwirtschaft-bw.de/pb/,Lde/Startseite/Agrarpolitik/Konditionalitaet>
- Mirsky, S. B., Curran, W. S., Mortensen, D. M., Ryany & Shumway, D. L. (2011). Timing of cover-crop management effects on weed suppression in no-till planted soybean using a roller-crimper. *Weed Science*, 59(3), 380–389.
- Mirsky, S. B., Curran, W. S., Mortensen, D. A., Ryan, M. R., & Shumway, D. L. (2009). Control of cereal rye with a roller/crimper as influenced by cover crop phenology. *Agronomy Journal*, 101(6), 1589–1596.
- Mirsky, S. B., Ryan, M. R., Teasdale, J. R., Curran, W. S., Reberg-Horton, C. S., Spargo, J. T., Wells, M. S., Keene, C. L., & Moyer, J. W. (2013). Overcoming weed management challenges in cover crop-based organic rotational no-till soybean production in the eastern United States. *Weed Technology*, 27(1), 193–203.

- Moos, J. H., Schrader, S., & Paulsen, H. M. (2017). Reduced tillage enhances earthworm abundance and biomass in organic farming: A meta-analysis. *Landbauforschung*, 67.
- Morrison, J. E. (2002). Strip tillage for “no-till” row crop production. *Applied engineering in agriculture*, 18(3), 277.
- Müller, H., & Bischoff, L. (2001). Untersuchungen zur Strohverteilung durch den Strohhäcksler am Mähdrescher: 458–459 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 56 Nr. SH2 (2001): Sonderheft (2/2001). <https://doi.org/10.15150/LT.2001.2129>
- Müller, M., Schafflützel, R., Chervet, A., Sturny, W. G., Zihlmann, U., & Weisskopf, P. (2007). Humusgehalte nach 11 Jahren Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* 14 (09), 39.
- Müller, P., Neuhoﬀ, D., Nabel, M., Schiﬀers, K., & Döring, T. F. (2022). Tillage effects on ground beetles in temperate climates: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), 65.
- Mund, F., & Hogrefe, G. (2024). Stoppelbearbeitung: So verteilen Sie das Stroh richtig. *Top Agrar*.
- Murer, E. (2013). Bodenphysikalische Kennwerte der Pflugsohle aus dem Hauptproduktionsgebiet Alpenvorland, Österreichs. 15. *Gumpensteiner Lysimetertagung*, 141.
- Murphy, S. D., Clements, D. R., Belaoussoﬀ, S., Kevan, P. G., & Swanton, C. J. (2006). Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation. *Weed Science*, 54(1), 69–77.
- Murrell, E. G., Schipanski, M. E., Finney, D. M., Hunter, M. C., Burgess, M., LaChance, J. C., Baraibar, B., White, C. M., Mortensen, D. A., & Kaye, J. P. (2017). Achieving diverse cover crop mixtures: Effects of planting date and seeding rate. *Agronomy Journal*, 109(1), 259–271.
- Naruhn, G.-P., Peteinatos, G. G., Butz, A. F., Möller, K., & Gerhards, R. (2021). Efficacy of various mechanical weeding methods—Single and in combination—In terms of different field conditions and weed densities. *Agronomy*, 11(10), 2084.
- National Resources Conservation Service. (2016). Conservation practice standard: Residue and tillage management, no till: Code 329 (National Resources Conservation Service, Hrsg.). Verfügbar 9. August 2023 unter https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/Residue__And__Tillage__Management__No__Till__329__CPS_0.pdf
- Neve, P., & Powles, S. (2005). Recurrent selection with reduced herbicide rates results in the rapid evolution of herbicide resistance in *Lolium rigidum*. *Theoretical and Applied Genetics*, 110, 1154–1166.
- Norris, R. F., & Kogan, M. (2000). Interactions between weeds, arthropod pests, and their natural enemies in managed ecosystems. *Weed Science*, 48(1), 94–158.

- Norris, R. F., & Kogan, M. (2005). Ecology of interactions between weeds and arthropods. *Annu. Rev. Entomol.*, 50(1), 479–503.
- Nouri, A., Lukas, S., Singh, S., Singh, S., & Machado, S. (2022). When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(15), 4736–4749.
- Nunes, M. R., Karlen, D. L., Veum, K. S., Moorman, T. B., & Cambardella, C. A. (2020). Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. *Geoderma*, 369, 114335.
- Oehl, F., Jansa, J., Ineichen, K., Mäder, P., & van der Heijden, M. (2011). Arbuskuläre Mykorrhizapilze als Bioindikatoren in Schweizer Landwirtschaftsböden. *Agrarforschung Schweiz*, 2(7-8), 304–311.
- Oehl, F., Laczko, E., Bogenrieder, A., Stahr, K., Bösch, R., van der Heijden, M., & Sieverding, E. (2010). Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil biology and biochemistry*, 42(5), 724–738.
- Oehl, F., Sieverding, E., Ineichen, K., Ris, E.-A., Boller, T., & Wiemken, A. (2005). Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New Phytologist*, 165(1), 273–283.
- Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., & Wiemken, A. (2004). Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, 138, 574–583.
- Oerke, E.-C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43.
- Oerke, E.-C., & Dehne, H.-W. (2004). Safeguarding production—losses in major crops and the role of crop protection. *Crop Protection*, 23(4), 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.001>
- Ogg, A. G., & Parker, R. (2000). Control of volunteer crop plants.
- Oldfield, E. E., Bradford, M. A., & Wood, S. A. (2019). Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, 5(1), 15–32.
- Orlowsky, B., & Seneviratne, S. I. (2012). Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, 110(3-4), 669–696. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>
- Osipitan, O. A., Dille, J. A., Assefa, Y., & Knezevic, S. Z. (2018). Cover crop for early season weed suppression in crops: Systematic review and meta-analysis. *Agronomy Journal*, 110(6), 2211–2221.
- Osipitan, O. A., Dille, J. A., Assefa, Y., Radicetti, E., Ayeni, A., & Knezevic, S. Z. (2019). Impact of cover crop management on level of weed suppression: a meta-analysis. *Crop Science*, 59(3), 833–842.

- Osman, M. G. A., Szalai, M., Zalai, M., Dorner, Z., & Kiss, J. (2022). Assessing the Importance of Natural Regulating Mechanisms in Weed Management: The Case of Weed Seed Predation in a Winter Wheat Field and in Adjacent Semi-Natural Habitat in Northern Hungary. *Agronomy*, 12(11), 2666. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112666>
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 187, 87–105.
- Paruelo, J. M., Lauenroth, W. K., & Roset, P. A. (2000). Estimating aboveground plant biomass using a photographic technique. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 53(2), 190–193.
- Patrignani, A., & Ochsner, T. E. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312–2320.
- Paudel, K. P., & Hatch, L. U. (2012). Global warming, impact on agriculture and adaptation strategy. *Natural Resource Modeling*, 25(3), 456–481.
- Paul, B. K., Vanlauwe, B., Ayuke, F., Gassner, A., Hoogmoed, M., Hurisso, T. T., Koala, S., Lelei, D., Ndabamenye, T., & Six, J. (2013). Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 14–22.
- Paulitz, T. C., Schroeder, K. L., & Schillinger, W. F. (2010). Soilborne pathogens of cereals in an irrigated cropping system: Effects of tillage, residue management, and crop rotation. *Plant disease*, 94(1), 61–68.
- Peigné, J., Cannavaciolo, M., Gautronneau, Y., Aveline, A., Giteau, J.-L., & Cluzeau, D. (2009). Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 104(2), 207–214.
- Pekrun, C., & Claupein, W. (2001). Einfluß der Stoppelbearbeitung auf Ertragsbildung und Unkrautauflkommen unter den Produktionsbedingungen des Ökologischen Landbaus unter besonderer Berücksichtigung der Wirkung des Stoppelhobels. *Von Leit-Bildern zu Leit-Linien: 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau*, 203–206.
- Pekrun, C., & Claupein, W. (2003). Unkrautmanagement durch Bodenbearbeitung und andere Maßnahmen indirekter Unkrautkontrolle im ökologischen Landbau.
- Pekrun, C., & Claupein, W. (2006). The implication of stubble tillage for weed population dynamics in organic farming. *Weed Research*, 46(5), 414–423.
- Pekrun, C., Claupein, W., Heß, J., & Rahmann, G. (2005). Bedeutung der Stoppelbearbeitung für die Unkrautkontrolle im Ökologischen Landbau. *Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*. <https://orprints.org/3206/>

- Pekrun, C., Häberle, A., & Claupein, W. (2003). Bedeutung von Grund-und Stoppelbearbeitung für die Kontrolle der Ackerkratzdistel (*Cirsium arvense*) im ökologischen Landbau. *Landbauforschung Völkenrode*, 29–34.
- Pekrun, C., Häuser, I., & Claupein, W. (2002). Einfluß dreijährig variiertes Stoppelbearbeitung auf den Bodensamenvorrat unter den Produktionsbedingungen des Ökologischen Landbaus. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 14, 193–194.
- Pekrun, C., Hubert, S., & Knechtges, H. (2014). Wirkung differenzierter Stoppelbearbeitung auf die Ertragsbildung–Ergebnisse aus sechs Versuchsjahren in Südwestdeutschland. In *Tagungsband Technik in der Pflanzenproduktion* (S. 236–237, Bd. 26). Verlag Liddy Halm.
- Pekrun, C., Pflaum, S., & Henne, U. (2011). Was ist über die Wirkung der Stoppelbearbeitung bekannt—wo fehlt es an Daten. *Landtechnik*, 66(2), 108–112.
- Perrone, S., Grossman, J., Liebman, A., Sooksa-Nguan, T., & Gutknecht, J. (2020). Nitrogen fixation and productivity of winter annual legume cover crops in Upper Midwest organic cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 117, 61–76.
- Petit, S., Trichard, A., Biju-Duval, L., McLaughlin, Ó., & Bohan, D. A. (2017). Interactions between conservation agricultural practice and landscape composition promote weed seed predation by invertebrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 240, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.014>
- Photiades, I., & Hadjichristodoulou, A. (1984). Sowing date, sowing depth, seed rate and row spacing of wheat and barley under dryland conditions. *Field Crops Research*, 9, 151–162.
- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I. A., Fu, Y., Dai, J., Liu, L., Lian, X. U., Shen, M., & Zhu, X. (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6), 1922–1940.
- Piepenbring, M. (2022). *Mykologie*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65075-2>
- Pietola, L., & Alakukku, L. (2005). Root growth dynamics and biomass input by Nordic annual field crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 108(2), 135–144.
- Pittelkow, C. M., Linquist, B. A., Lundy, M. E., Liang, X., van Groenigen, K. J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R. T., & van Kessel, C. (2015). When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Potratz, D. J., Mourtzinis, S., Gaska, J., Lauer, J., Arriaga, F. J., & Conley, S. P. (2020). Strip-till, other management strategies, and their interactive effects on corn grain and soybean seed yield. *Agronomy Journal*, 112(1), 72–80.

- Powlson, D. S., Bhogal, A., Chambers, B. J., Coleman, K., Macdonald, A. J., Goulding, K., & Whitmore, A. P. (2012). The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: A case study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146(1), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.004>
- Purevdorj, T. S., Tateishi, R., Ishiyama, T., & Honda, Y. (1998). Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International journal of remote sensing*, 19(18), 3519–3535.
- Rademacher, T. (2019). Druschfrucht-Erntetechnik. In K. Köller & O. Hensel (Hrsg.), *Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion* (S. 205–242). Verlag Eugen Ulmer.
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature communications*, 6(1), 5989.
- Raza, M. M., & Bebbber, D. P. (2022). Climate change and plant pathogens. *Current Opinion in Microbiology*, 70, 102233.
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, 2(1), 21–33.
- Reeves, D. W. (2018). Cover crops and rotations. *Crops residue management*, 125–172.
- Report of the United Nations Conference on Environment and Development: Rio de Janeiro, 3 - 14 June 1992. (1993).
- Richardson, A. D., Keenan, T. F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., & Toomey, M. (2013). Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 156–173.
- Richter, G. (Hrsg.). (1998). *Bodenerosion: Analyse und Bilanz eines Umweltproblems ; mit 38 Tabellen*. Wiss. Buchges.
- Riegler-Nurscher, P., Prankl, J., Bauer, T., Strauss, P., & Prankl, H. (2016). An Integrated Image Analysis System for the Estimation of Soil Cover. In CIGR International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (Hrsg.), *International Conference of Agricultural Engineering CIGR-AgEng 2016*. Verfügbar 8. Januar 2024 unter https://www.baw.at/dam/jcr:8e2cd357-9acb-462f-a88a-d1ec8e4e1192/V_533.pdf
- Riegler-Nurscher, P., Prankl, J., Bauer, T., Strauss, P., & Prankl, H. (2018). A machine learning approach for pixel wise classification of residue and vegetation cover under field conditions. *Biosystems Engineering*, 169, 188–198.
- Rochette, P. (2008). No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil and Tillage Research*, 101(1-2), 97–100. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.011>
- Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., & Richard, G. (2010). Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 111(1), 33–40.

- Rose, M. T., Cavagnaro, T. R., Scanlan, C. A., Rose, T. J., Vancov, T., Kimber, S., Kennedy, I. R., Kookana, R. S., & van Zwieten, L. (2016). Impact of herbicides on soil biology and function. *Advances in agronomy*, 136, 133–220.
- Röseler, M., Graeff, S., Hermann, W., & Claupein, W. (2010). Strip-Till-Verfahren in Zuckerrüben und Mais. *Precision Agriculture Reloaded—Informationsgestützte Landwirtschaft*.
- Rosner, J., & Klik, A. (2001). Wirkstoffabtrag bei konventionell, konservierend und direkt bewirtschafteten Ackerflächen Pesticide loss in conventional, mulch and direct drilling systems. 9. *Gumpensteiner Lysimetertagung*, 219–220.
- Rothrock, C. S. (1987). Take-all of wheat as affected by tillage and wheat-soybean double-cropping. *Soil biology and biochemistry*, 19(3), 307–311.
- Rothrock, C. S. (1992). Tillage systems and plant disease. *Soil Science*, 154(4), 308–315.
- Ruan, H., Ahuja, L. R., Green, T. R., & Benjamin, J. G. (2001). Residue cover and surface-sealing effects on infiltration: Numerical simulations for field applications. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 853–861.
- Ruisi, P., Frangipane, B., Amato, G., Badagliacca, G., Di Miceli, G., Plaia, A., & Giambalvo, D. (2015). Weed seedbank size and composition in a long-term tillage and crop sequence experiment. *Weed Research*, 55(3), 320–328.
- Rusu, T. (2014). Energy efficiency and soil conservation in conventional, minimum tillage and no-tillage. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(4), 42–49.
- Samaniego, L., Kumar, R., & Attinger, S. (2010). Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5). <https://doi.org/10.1029/2008WR007327>
- Samaniego, L., Kumar, R., & Zink, M. (2013). Implications of Parameter Uncertainty on Soil Moisture Drought Analysis in Germany. *Journal of Hydrometeorology*, 14(1), 47–68. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-075.1>
- Sarauskis, E., Buragiene, S., Romaneckas, K., Sakalauskas, A., Jasinskas, A., Vaiciukevicius, E., & Karayel, D. (2012). Working time, fuel consumption and economic analysis of different tillage and sowing systems in Lithuania. *Eng. Rural Dev*, 11, 52–59.
- Schaafsma, A. W., Ilinic, L. T., Miller, J. D., & Hooker, D. C. (2001). Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 23(3), 279–285.
- Schaafsma, A. W., Meloche, F., & Pitblado, R. E. (1996). Effect of mowing corn stalks and tillage on overwintering mortality of European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) in field corn. *Journal of economic entomology*, 89(6), 1587–1592.
- Schappert, A., Messelhäuser, M. H., Saile, M., Peteinatos, G. G., & Gerhards, R. (2018). Weed suppressive ability of cover crop mixtures compared to repeated stubble tillage and glyphosate treatments. *Agriculture*, 8(9), 144.

- Schmidt, J. H., Hallmann, J., & Finckh, M. R. (2020). Bacterivorous Nematodes Correlate with Soil Fertility and Improved Crop Production in an Organic Minimum Tillage System. *Sustainability*, 12(17), 6730. <https://doi.org/10.3390/su12176730>
- Schubert, T. (2016). Bodenatlas Deutschland: Böden in thematischen Karten.
- Schulz, F., Brock, C., & Leithold, G. (2009). Effekte unterschiedlicher Systeme der Grundbodenbearbeitung auf Erträge und Beikraut im Dauerfeldversuch Gladbacherhof.
- Schulz, M., Schwager, F., & Strehlow, B. (2020). Vergleich zweier Zwischenfrucht Anbauverfahren von Zuckerrüben im Praxisversuch, unter Berücksichtigung verschiedener Herbizidwirkstoffe. *Julius-Kühn-Archiv*, (464).
- Schulze Lammers, P., & Schmittmann, O. (2014). Schlitzsägerät für die einphasige Aussaat von Zuckerrüben. *Landtechnik*, 69(3), 139–142–139–142.
- Schürch, S., Frei, P., Frey, R., Wullschleger, J., & Sierotzki, H. (2009). Fungizidresistenz bei der Septoria-Blattdürre des Weizens in der Schweiz. *Agrarforschung Schweiz*, 420–424.
- Schwartz, R. C., Baumhardt, R. L., & Evett. (2010). Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. *Soil and Tillage Research*, 110(2), 221–229.
- Schwarz, J. (2013). Energetische Betrachtung zum Einsatz von Herbiziden und Bodenbearbeitung. *Gesunde Pflanzen*, 65(1), 33–37. <https://doi.org/10.1007/s10343-013-0295-4>
- Schwarz, J., & Pallutt, B. (2014). Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Entwicklung der Verunkrautung in einem Dauerfeldversuch. *Julius-Kühn-Archiv*, (443), 141.
- Seitz, S., Goebes, P., Puerta, V. L., Pereira, E. I. P., Wittwer, R., Six, J., van der Heijden, M. G. A., & Scholten, T. (2019). Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 1–10.
- Selim, M. (2019). A review of advantages, disadvantages and challenges of crop rotations. *Egyptian Journal of Agronomy*, 41(1), 1–10.
- Shah, K. K., Modi, B., Pandey, H. P., Subedi, A., Aryal, G., Pandey, M., & Shrestha, J. (2021). Diversified crop rotation: an approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*, 2021, 1–9.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591–611.
- Shcherbak, I., Millar, N., & Robertson, G. P. (2014). Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25), 9199–9204.
- Shearin, A. F., Reberg-Horton, S. C., & Gallandt, E. R. (2007). Direct Effects of Tillage on the Activity Density of Ground Beetle (Coleoptera: Carabidae) Weed Seed

- Predators. *Environmental Entomology*, 36(5), 1140–1146. [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[1140:DEOTOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[1140:DEOTOT]2.0.CO;2)
- Shepherd, M. A., & Sylvester-Bradley, R. (1996). Effect of nitrogen fertilizer applied to winter oilseed rape (*Brassica napus*) on soil mineral nitrogen after harvest and on the response of a succeeding crop of winter wheat to nitrogen fertilizer. *The Journal of Agricultural Science*, 126(1), 63–74.
- Sieling, K., & Kage, H. (2010). Efficient N management using winter oilseed rape. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 271–279.
- Sijtsma, C. H., Campbell, A. J., McLaughlin, N. B., & Carter. (1998). Comparative tillage costs for crop rotations utilizing minimum tillage on a farm scale. *Soil and Tillage Research*, 49(3), 223–231.
- Sikes, B. A. (2010). When do arbuscular mycorrhizal fungi protect plant roots from pathogens? *Plant signaling & behavior*, 5(6), 763–765.
- Sikes, B. A., Cottenie, K., & Klironomos, J. N. (2009). Plant and fungal identity determines pathogen protection of plant roots by arbuscular mycorrhizas. *Journal of Ecology*, 97(6), 1274–1280.
- Silva, E. M. (2014). Screening five fall-sown cover crops for use in organic no-till crop production in the Upper Midwest. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(7), 748–763.
- Simpfendorfer, S., Heenan, D. P., Kirkegaard, J. A., Lindbeck, K. D., & Murray, G. M. (2004). Impact of tillage on lupin growth and the incidence of pathogenic fungi in southern New South Wales. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44(1), 53–56.
- Singh, S., Kumar, V., Chauhan, A., Datta, S., Wani, A. B., Singh, N., & Singh, J. (2018). Toxicity, degradation and analysis of the herbicide atrazine. *Environmental chemistry letters*, 16, 211–237.
- Singh, S. (2003). Role of mycorrhiza in disturbed lands. Part II. Soil compaction, soil erosion, soil aggregation, and volcanic eruptions. *Mycorrhiza News*, 15(2), 2–11.
- Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant physiology*, 156(3), 1050–1057.
- Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66–87.
- Sokólski, M., Jankowski, K. J., & Dubis, B. (2018). The effects of different tillage me-

- thods and weed control strategies on the yield of winter oilseed rape. In *Sborník z konference „Prosperující olejniny* (S. 39–43).
- Soltani, N., Dille, J. A., Burke, I. C., Everman, W. J., VanGessel, M. J., Davis, V. M., & Sikkema, P. H. (2016). Potential corn yield losses from weeds in North America. *Weed Technology*, 30(4), 979–984.
- Soltani, N., Dille, J. A., Burke, I. C., Everman, W. J., VanGessel, M. J., Davis, V. M., & Sikkema, P. H. (2017). Perspectives on potential soybean yield losses from weeds in North America. *Weed Technology*, 31(1), 148–154.
- Song, K., Zheng, X., Lv, W., Qin, Q., Sun, L., Zhang, H., & Xue, Y. (2019). Effects of tillage and straw return on water-stable aggregates, carbon stabilization and crop yield in an estuarine alluvial soil. *Scientific Reports*, 9(1), 4586.
- Sørensen, C. G., & Nielsen, V. (2005). Operational analyses and model comparison of machinery systems for reduced tillage. *Biosystems Engineering*, 92(2), 143–155.
- Spaeth, M., Machleb, J., Peteinatos, G. G., Saile, M., & Gerhards, R. (2020). Smart harrowing—Adjusting the treatment intensity based on machine vision to achieve a uniform weed control selectivity under heterogeneous field conditions. *Agronomy*, 10(12), 1925.
- Spektrum Akademischer Verlag. (1999). Herbizide. In *Lexikon der Biologie*. Verfügbar 30. Oktober 2024 unter <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/herbizide/31406>
- Spektrum Akademischer Verlag. (2000). Ernterückstände. In *Lexikon der Geowissenschaften*. Verfügbar 30. Oktober 2024 unter <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/ernterueckstaende/4303>
- Spiess, E., Prasuhn, V., & Humphrys, C. (2015). Einfluss des Umbruchtermins einer Zwischenfrucht auf die Nitratauswaschung. *Bericht über die*, 16, 171–174.
- Stanger, T. F., & Lauer, J. G. (2008). Corn grain yield response to crop rotation and nitrogen over 35 years. *Agronomy Journal*, 100(3), 643–650.
- Statistisches Bundesamt. (25.11.2024). Bei der Bodenbearbeitung dominiert der Pflug. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/aktuell-bodenbearbeitung.html>
- Statistisches Bundesamt. (07.12.2024). Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Feldfrüchte und Grünland. Verfügbar 7. Dezember 2024 unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/_inhalt.html
- Statistisches Bundesamt. (29.05.2024). Pflugeinsatz verliert in der Landwirtschaft an Bedeutung: Pressemitteilung Nr. 212 vom 29. Mai 2024. Verfügbar 25. November 2024 unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/05/PD24_212_41.html

- Steiner, H. (1968). Das Prinzip des integrierten Pflanzenschutzes. *Anzeiger für Schädlingskunde*, 41, 129–131.
- Steinkellner, S., & Langer, I. (2004). Impact of tillage on the incidence of *Fusarium* spp. in soil. *Plant and soil*, 267, 13–22.
- Steinsiek, J. W., Oliver, L. R., & Collins, F. C. (1982). Allelopathic potential of wheat (*Triticum aestivum*) straw on selected weed species. *Weed Science*, 30(5), 495–497.
- Stevens, A. W. (2018). Review: The economics of soil health. *Food Policy*, 80, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.08.005>
- Stewart, C. E., Moturi, P., Follett, R. F., & Halvorson, A. D. (2015). Lignin biochemistry and soil N determine crop residue decomposition and soil priming. *Biogeochemistry*, 124, 335–351.
- Stieber, J., & Schmidtke, K. (2011). Einfluss einer differenzierten Grundbodenbearbeitung auf die Ertragsbildung im Fruchtfolgeglied Erbse-Winterweizen. *Deutsche Gesellschaft für Pflanzenernährung e. V. Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V.*, (23), 77.
- Stipičević, S., Galzina, N., Udiković-Kolić, N., Jurina, T., Mendaš, G., Dvorščak, M., Petrić, I., Barić, K., & Drevenkar, V. (2015). Distribution of terbuthylazine and atrazine residues in crop-cultivated soil: The effect of herbicide application rate on herbicide persistence. *Geoderma*, 259, 300–309.
- Storkey, J., & Westbury, D. B. (2007). Managing arable weeds for biodiversity. *Pest Management Science: Formerly Pesticide Science*, 63(6), 517–523.
- Sturny, W. G., Chervet, A., Maurer-Troxler, C., Ramseier, L., Müller, M., Schafflützel, R., Richner, W., Streit, B., Weisskopf, P., & Zihlmann, U. (2007). Direktsaat und Pflug im Systemvergleich—eine Synthese. *Agrarforschung*, 14(8), 350–357.
- Sturz, A. V., Carter, M. R., & Johnston, H. W. (1997). A review of plant disease, pathogen interactions and microbial antagonism under conservation tillage in temperate humid agriculture. *Soil and Tillage Research*, 41(3-4), 169–189. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(96\)01095-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01095-1)
- Sumner, D. R., Doupnik Jr, B., & Boosalis, M. G. (1981). Effects of reduced tillage and multiple cropping on plant diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 19(1), 167–187.
- Swain, A. J., Hughes, Z. S., Cook, S. K., & Moss. (2006). Quantifying the dormancy of *Alopecurus myosuroides* seeds produced by plants exposed to different soil moisture and temperature regimes. *Weed Research*, 46(6), 470–479.
- Szalay, T., Moitzi, G., Liebhard, P., & Weingartmann, H. (2015). Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf Kraftstoffverbrauch und Arbeitszeitbedarf für den Winterweizenanbau im semiariden Produktionsbetrieb. *Die Bodenkultur*, 39(66), 1–2.

- Szatkowski, A., Sokółski, M., Załuski, D., & Jankowski, K. J. (2023). The Effects of Agronomic Management in Different Tillage Systems on the Fall Growth of Winter Oilseed Rape. *Agriculture*, 13(2), 440.
- Tabatabaeefar, A., Emamzadeh, H., Varnamkhasti, M. G., Rahimizadeh, R., & Karimi, M. (2009). Comparison of energy of tillage systems in wheat production. *Energy*, 34(1), 41–45.
- Tarafdar, J. C., Meena, S. C., & Kathju, S. (2001). Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition. *European Journal of Soil Biology*, 37(3), 157–160.
- Tastowe, F. (2023). Wie flach arbeiten? Für die Beikrautbekämpfung und den wassersparenden Stoppelsturz ist die flache Arbeit im Trend. In einer Expertenrunde mit fünf Herstellern haben wir diskutiert, was es braucht, um präzise flach zu arbeiten - und was flach eigentlich meint. *Top Agrar*, (04/2023), 116–119.
- Tauchnitz, N., Bischoff, J., Schrödter, M., Rupp, H., & Meissner, R. (2015). Einfluss legumer Zwischenfrüchte in Maisfruchtfolgen auf die Sickerwassermenge und die Nitratauswaschung anhand von Lysimeteruntersuchungen. 16. *Gumpensteiner Lysimetertagung. HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning*, 51–56.
- Teasdale, J. R. (1996). Contribution of cover crops to weed management in sustainable agricultural systems. *Journal of production agriculture*, 9(4), 475–479.
- Teasdale, Lo Brandsaeter, Calegari, A., Neto, F. S., Upadhyaya, M. K., & Blackshaw, R. E. (2007). Cover crops and weed management. *Non-chemical weed management: principles, concepts and technology*, 49–64.
- Thomas, E. (2006). *Feldversuchswesen: 196 Tabellen* (Bd. 8319). Verlag Eugen Ulmer.
- Thomas, G. A., Dalal, R. C., & Standley, J. (2007). No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 295–304.
- Trappe, J. M., Molina, R., & Castellano, M. (1984). Reactions of mycorrhizal fungi and mycorrhiza formation to pesticides. *Annual Review of Phytopathology*, 22(1), 331–359.
- Turkington, T. K., Clear, R. M., Demeke, T., Lange, R., Xi, K., & Kumar, K. (2011). Isolation of *Fusarium graminearum* from cereal, grass and corn residues from Alberta, 2001–2003. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 33(2), 179–186.
- Unger, P. W. (1990). Conservation tillage systems. *Advances in Soil Science: Dryland Agriculture: Strategies for Sustainability Volume 13*, 27–68.
- Unger, P. W., Langdale, G. W., & Papendick, R. I. (1988). Role of crop residues—improving water conservation and use. *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*, 51, 69–100.

- Unger, P. W., & McCalla, T. M. (1980). Conservation tillage systems. *Advances in agronomy*, 33, 1–58.
- United Nations Organization (Hrsg.). (1992). *Convention on biological diversity*. Verfügbar 13. Oktober 2024 unter <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>
- Väderstad GmbH. (2023). Ultraflache Bodenbearbeitung. Verfügbar 8. August 2023 unter <https://www.vaderstad.com/de/know-how/bodenbearbeitungsverfahren/ultraflache-bodenbearbeitung/>
- Väderstad GmbH. (2024). Ultraflache Bodenbearbeitung mit der CrossCutter Disc. Verfügbar 10. Oktober 2024 unter <https://www.vaderstad.com/de/produkte/crosscutter-disc/>
- Vakali, C., Köpke, U., & Franken, H. (2001). Einfluß der Grundbodenbearbeitung auf bodenphysikalische Eigenschaften und Wurzelwachstum von Sommergerste im Ökologischen Landbau. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 13, 254–255.
- van Bruggen, A. H. C., He, M. M., Shin, K., Mai, V., Jeong, K. C., Finckh & Morris Jr, J. G. (2018). Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Science of the total environment*, 616, 255–268.
- van Doren Jr, D. M., & Allmaras, R. R. (1978). Effect of residue management practices on the soil physical environment, microclimate, and plant growth. *Crop residue management systems*, 31, 49–83.
- van Elsas, J. D., Garbeva, P., & Salles, J. (2002). Effects of agronomical measures on the microbial diversity of soils as related to the suppression of soil-borne plant pathogens. *Biodegradation*, 13(1), 29–40.
- van Elsen, T. (2011). 1.2 Beikräuter, Ackerwildkräuter, Unkräuter? Ein Plädoyer für die Relativierung von Feinbildern. In B. Wilhelm & O. Hensel (Hrsg.), *Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau* (S. 21–26). DITSL GmbH.
- van Oost, K., Govers, G. d., de Alba, S., & Quine, T. A. (2006). Tillage erosion: a review of controlling factors and implications for soil quality. *Progress in Physical Geography*, 30(4), 443–466.
- VDLUFA (Hrsg.). (2012). *Die Untersuchung von Böden* (4., neubearb. u. erw. Aufl., Bd. Bd. 1,1). VDLUFA-Verl.
- Venter, Z. S., Jacobs, K., & Hawkins, H.-J. (2016). The impact of crop rotation on soil microbial diversity: A meta-analysis. *Pedobiologia*, 59(4), 215–223.
- Verschwele, A. (2014). Unkrautunterdrückung und Unkrauttoleranz bei Weizensorten-relevante Eigenschaften für den integrierten Pflanzenschutz. *Julius-Kühn-Archiv*, (443), 465.
- Voßhenrich, H.-H. (1999). Strohverteilung und Häckselqualität auf Praxisflächen. *Landtechnik*, 54(5), 306–308–306–308.

- Wang, L., Zhao, Y., Al-Kaisi, M., Yang, J., Chen, Y., & Sui, P. (2020). Effects of seven diversified crop rotations on selected soil health indicators and wheat productivity. *Agronomy*, 10(2), 235.
- Weber, E. A., Frick, K., Gruber, S., & Claupein, W. (2009). Entwicklung eines Schätzrahmens für Durchwuchsraps auf Praxisflächen - Erste Ergebnisse zu Ausfallverlusten und Bodensamenvorrat. In *Tagungsband Pflanzenbauwissenschaften - Systembezug und Modellierung* (S. 227–228). Verlag Liddy Halm.
- Wegener, J. K., & von Hörsten, D. (2019). Pflanzenschutz. In K. Köller & O. Hensel (Hrsg.), *Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion* (S. 126–156). Verlag Eugen Ulmer.
- Wegulo, S. N., Zwingman, M. V., Breathnach, J. A., & Baenziger, P. S. (2011). Economic returns from fungicide application to control foliar fungal diseases in winter wheat. *Crop Protection*, 30(6), 685–692.
- Wendling, M., Charles, R., Herrera, J., Amossé, C., Jeangros, B., Walter, A., & Büchi, L. (2019). Effect of species identity and diversity on biomass production and its stability in cover crop mixtures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 281, 81–91.
- Wennemann, L. (2002). Pflanzenschutz im Sinne der Agenda 21. *Gesunde Pflanzen*, 54(1), 16–22. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0345.2002.01125.x>
- White, C. A., Sylvester-Bradley, R., & Berry, P. M. (2015). Root length densities of UK wheat and oilseed rape crops with implications for water capture and yield. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), 2293–2303.
- Wiese, A., Schulte, M., Theuvsen, L., & Steinmann, H.-H. (2017). Anwendungen von Glyphosat im deutschen Ackerbau–Betriebliche Aspekte. *Ökonomische Fragestellungen der Pflanzenproduktion: Glyphosateinsatz–Marktanalysen–Sonderkulturanbau*, 21.
- Wiik, L., & Rosenqvist, H. (2010). The economics of fungicide use in winter wheat in southern Sweden. *Crop Protection*, 29(1), 11–19.
- Wilhelm, B. (2010). *Konservierende Bodenbearbeitung im Ökolandbau - Analyse einer Verfahrenstechnik im Kontext der Bodenfruchtbarkeit: Konservierende Bodenbearbeitung im Ökolandbau - Analyse einer Verfahrenstechnik im Kontext der Bodenfruchtbarkeit* [Dissertation]. Universität Kassel/Witzenhausen. Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften; Fachbereich Agrartechnik. Verfügbar 9. August 2023 unter <https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/2010092934655>
- Wilhelm, B. (2016). Funktionen und Regulierung von Ackerwildkräutern. In B. Freyer & P. Axmann (Hrsg.), *Ökologischer Landbau* (S. 486–501). Haupt Verlag.
- Williams, J. D., Gollany, H. T., Siemens, M. C., Wuest, S. B., & Long, D. S. (2009). Comparison of runoff, soil erosion, and winter wheat yields from no-till and inversion tillage production systems in northeastern Oregon. *Journal of Soil and Water Conservation*, 64(1), 43–52.

- Williams, M. M., Mortensen, D. A., & Doran, J. W. (1998). Assessment of weed and crop fitness in cover crop residues for integrated weed management. *Weed Science*, 46(5), 595–603.
- Wilson, G. C., Soltani, N., Tardif, F. J., Swanton, C. J., & Sikkema, P. H. (2010). Control of volunteer cereals with post-emergence herbicides in maize (*Zea mays* L.) *Crop Protection*, 29(12), 1389–1395.
- Wilson, R. G. (1999). Response of nine sugarbeet (*Beta vulgaris*) cultivars to postemergence herbicide applications. *Weed Technology*, 13(1), 25–29.
- Winter, S. R., & Wiese, A. F. (1978). Phytotoxicity and yield response of sugarbeets (*Beta vulgaris*) to a mixture of phenmedipham and desmedipham. *Weed Science*, 26(1), 1–4.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995). Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, 38(1), 259–269.
- Wuest, S. B., Albrecht, S. L., & Skirvin, K. W. (2000). Crop residue position and interference with wheat seedling development. *Soil and Tillage Research*, 55(3-4), 175–182.
- Xin, S. H., ZHU, A.-n., ZHANG, J.-b., YANG, W.-l., XIN, X.-l., & ZHANG, X.-f. (2015). Changes in soil organic carbon and aggregate stability after conversion to conservation tillage for seven years in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(6), 1202–1211.
- Yu, L., van Eerd, L. L., O'Halloran, I., Sikkema, P. H., & Robinson, D. E. (2015). Response of four spring-seeded cover crops to residues of selected herbicides. *Canadian Journal of Plant Science*, 95(2), 303–313.
- Zeller, A. K., Zeller, Y. I., & Gerhards, R. (2021). A long-term study of crop rotations, herbicide strategies and tillage practices: Effects on *Alopecurus myosuroides* Huds. Abundance and contribution margins of the cropping systems. *Crop Protection*, 145, 105613.
- Zhai, R., Kachanoski, R. G., & Voroney, R. P. (1990). Tillage effects on the spatial and temporal variations of soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 54(1), 186–192.
- Zhang, J. X., Fernando, W. G., & Xue, AG. (2005). Effect of residue type and burial depth on survival of *Mycosphaerella pinodes* in Manitoba. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 27(1), 132–136.