Projektbericht

HanseAgro

Nachhaltige Reduzierung von Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*) durch regional angepasste Ackerbaustrategien in der Elbmarsch unter Berücksichtigung digitaler Instrumente

Dieses Versuchsprojekt wurde durch die

Stiftung Schleswig-Holsteinische Landschaft unterstützt.

Projekt 2021/57

Hanse Agrarforschung e.V.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Abbildungsverzeichnis 4
Tabellenverzeichnis 8
Abkürzungsverzeichnis 8
Einleitung 9
1 Material und Methoden 11
1.1 Standortbeschreibung 11
1.2 Witterungsverlauf 11
1.3 Versuchsfaktoren 24
1.4 Produktionstechnik 29
1.5 Bonituren 31
1.5.1 Zählungen 32
1.5.2 Drohnenbefliegungen 33
1.5.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 34
1.5.4 VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) 34
1.5.5 ExG (Excess Green Index) 35
1.5.6 KI-Auswertung 35
2 Ergebnisse 37
2.1 Ackerfuchsschwanz-Zählungen 37
2.2 Drohnenbefliegungen 53
2.3 KI-Auswertung 70
2.4 Ertrag 72
2.5 Resistenzuntersuchungen 75
3 Diskussion 78
3.1 Einfluss von Fruchtfolge und Bodenbearbeitung auf die Entwicklung der Ackerfuchsschwanzpopulation 78
3.2 Möglichkeiten und Grenzen der digitalen Ackerfuchsschwanz- Erfassung 85
3.3 Ertragliche Einordnung der Bodenbearbeitungsstrategien 90

© Hanse Agrarforschung e.V. 2026

3.4 Bedeutung der chemischen Ackerfuchsschwanzbekämpfung 92
3.5 Methodische Einordnung und Grenzen des Versuchs 95
3.6 Gesamtbewertung und Schlussfolgerung für die Praxis 97
Zusammenfassung 102
Literaturverzeichnis 104

© Hanse Agrarforschung e.V. 2026

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Witterungsverlauf im Jahr 2020 vom 01.07. bis zum 31.12.2020 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT). 13

Abbildung 2: Witterungsverlauf im Jahr 2021 vom 01.01. bis zum 31.12.2021 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT). 15

Abbildung 3: Witterungsverlauf im Jahr 2022 vom 01.01. bis zum 31.12.2022 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT). 17

Abbildung 4: Witterungsverlauf im Jahr 2023 vom 01.01. bis zum 31.12.2023 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT). 19

Abbildung 5: Witterungsverlauf im Jahr 2024 vom 01.01. bis zum 31.12.2024 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort auf-gestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT). 21

Abbildung 6: Witterungsverlauf von Januar 2020 bis Dezember 2024 als monatliche Zusammenfassung der Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation (i-Meteos 3.3, Pessl Instruments, Wien, AT). 23

Abbildung 7: Variantenplan und Versuchsplan mit eingemessenen Parzellengrößen. 26

Abbildung 8: Versuchsplan mit chronologischer Abfolge der Bodenbearbeitungsschritten und angebauten Kulturen. Zeitraum: 2020 bis 2024 28

Abbildung 9: Bearbeitungshorizonte der verschiedenen Schare und Scheiben. Von links nach rechts: LD-Schar, BM-Schar, Crosscutter Disc (Quelle: Väderstad, 2024). 30

Abbildung 10: Beispiel eines Zählpunktes von der Bonitur am 23.10.2023 in Variante 8 Zählpunkt 2. Links: vor der Zählung; Rechts: nach der Zählung inklusive Entfernung der AFu-Pflanzen aus dem Zählrahmen 32

Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung der Pufferzone (gelb) neben dem Zählrahmen zur Berechnung punktbezogener Zusammenhänge. 33

Abbildung 12: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählungen am 15.09.2020 und am 04.10.2020 unterteilt nach Varianten. Zusätzlich ist die Standardabweichung (n = 12) als Maß für die Streuung dargestellt..... 37

Abbildung 13: Schematische Skizze der Boniturpunkte im Jahr 2020 inklusive der Fahrgassen. 38

© Hanse Agrarforschung e.V. 2026

Abbildung 14: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 25.03.2022 dargestellt basierend auf 1-3 Zählrahmen pro Variante. 39

Abbildung 15: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 25.03.2022. 40

Abbildung 16: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 28.11.2022 dargestellt. Zusätzlich ist die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Werte dargestellt. An diesem Termin wurden nur die Varianten 1-4 bonitiert. 41

Abbildung 17: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 28.11.2022. 42

Abbildung 18: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 23.10.2023. Es wurden zwei Zählpunkte pro Variante bonitiert. Zusätzlich ist die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Werte dargestellt. 43

Abbildung 19: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 23.10.2023. 44

Abbildung 20: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 08.03.2024. Es wurden zwei Zählpunkte pro Variante bonitiert. Zusätzlich ist die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Werte dargestellt. 45

Abbildung 21: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 08.03.2024. 46

Abbildung 22: georeferenziert Boniturpunkte der vier Boniturtermine: 25.03.2022, 28.11.2022, 23.10.2023 und 08.03.2024, sowie die Boniturergebnisse dargestellt als Farbverlauf, von grün bis rot, in fünf Quantilen. 48

Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der absoluten Summe der Ackerfuchsschwanzpflanzen pro Variante für die Boniturtermine zwischen 2020 und 2024. 49

Abbildung 24: Entwicklung des Ackerfuchsschwanzbesatzes der acht Varianten über die fünf Boniturzeitpunkte. Dargestellt sind die beobachteten Werte der einzelnen Varianten (Punkte) sowie der Gesamttrend (Linie). Die vertikalen Abstände zwischen den beobachteten Werten und dem Gesamttrend entsprechen den jeweiligen Residuen. 50

Abbildung 25: Darstellung der im Mittel gezählten Ackerfuchsschwanzpflanzen aufgeteilt nach Fruchtfolge 1 (FF1; Variante 1-4) und Fruchtfolge 2 (FF2; Variante 5-8) pro Boniturtermin. Zusätzliche Darstellung einer Trendlinie inklusive Formel und Bestimmtheitsmaß. Anmerkung: Am 28.11.2022 wurden ausschließlich die Varianten 1-4 bonitiert. 51

Abbildung 26: Darstellung der im Mittel gezählten Ackerfuchsschwanzpflanzen aufgeteilt nach Bodenbearbeitungsverfahren pro Boniturtermin: misch (1,5), lockernd (2,6), misch + schein (3,7) und lockernd + schein (4,8) Zusätzliche Darstellung der Trendlinien inklusive Formel und Bestimmtheitsmaß. Anmerkung: Am 28.11.2022 wurden ausschließlich die Varianten 1-4 bonitiert. 52

Abbildung 27: Orthomosaike der Versuchsfläche vom 25.03.2022 dargestellt als von links nach rechts: RGB, VARI, ExG. 54

Abbildung 28: Zusammenhang zwischen dem relativen ExG und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 25.03.2022. Dargestellt sind die ExG-Werte im 2-

© Hanse Agrarforschung e.V. 2026

m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten ExG-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 55

Abbildung 29: Zusammenhang zwischen dem relativen VARI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 25.03.2022. Dargestellt sind die VARI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten VARI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 56

Abbildung 30: Beispielhafter Auszug aus dem Orthomosaik vom 19.05.2022. 56

Abbildung 31: Orthomosaik der Versuchsfläche im Ackerbohnenbestand durch den Überflug am 19.05.2022. 57

Abbildung 32: NDVI-Werte der Zwischenfrucht in den Varianten 5-8 am 08.02.2023. Dargestellt sind Mittelwerte sowie die Streuung. 58

Abbildung 33: Handyfoto vom 08.06.2023 von den Varianten 1 bis 4. 59

Abbildung 34: Orthomosaik der Versuchsfläche vor der Sommergerstenaussaat in den gewalzten Zwischenfruchtbestand durch den Überflug am 08.02.2023. Links: RGB, Rechts: NDVI inklusive Farbskala. 59

Abbildung 35: Orthomosaik der Versuchsfläche vom 07.06.2023. Variante 1-4: Winterweizen, Variante 5-8: Sommergerste 60

Abbildung 36: Orthomosaik der Versuchsfläche durch den Überflug am 23.10.2023 nach der Getreideernte. Von links nach rechts: RGB, VARI, ExG, NDVI 61

Abbildung 37: NDVI-Werte der nicht bestellten Fläche am 23.10.2023. Dargestellt sind Mittelwerte sowie die Streuung. 62

Abbildung 38: Zusammenhang zwischen dem relativen NDVI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 23.10.2023. Dargestellt sind die NDVI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten NDVI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 62

Abbildung 39: Zusammenhang zwischen dem relativen VARI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 23.10.2023. Dargestellt sind die VARI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten VARI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 63

Abbildung 40: Zusammenhang zwischen dem relativen ExG und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 23.10.2023. Dargestellt sind die ExG-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten ExG-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 63

© Hanse Agrarforschung e.V. 2026

Abbildung 41: Orthomosaike der verschiedenen Darstellungsweisen inkl. Legende für die Indizes vom 08.03.2024. Von links nach rechts: RGB, VARI, ExG, NDVI. 64

Abbildung 42: NDVI-Werte der Brache in den Varianten 1 bis 8 am 08.03.2024. Dargestellt sind Mittelwerte sowie die Streuung. 65

Abbildung 43: Zusammenhang zwischen dem relativen NDVI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 08.03.2024. Dargestellt sind die NDVI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten NDVI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 66

Abbildung 44: Zusammenhang zwischen dem relativen ExG und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 08.03.2024. Dargestellt sind die ExG-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten ExG-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 66

Abbildung 45: Zusammenhang zwischen dem relativen VARI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 08.03.2024. Dargestellt sind die VARI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten VARI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt. 67

Abbildung 46: Multispektrales Orthomosaik der Versuchsfläche interpretiert als NDVI erstellt durch den Überflug am 24.10.2024 im Winterraps. (M3M) 68

Abbildung 47: NDVI-Index-Vergleich zwischen der DJI Mavic 3M sowie der Phantom 4 Multispectral. Der Drohnenflug fand am 24.10.2024 statt, während Raps auf der Fläche wuchs. Hier werden speziell nur die Parzellenkerne betrachtet. Standardabweichung dargestellt. 69

Abbildung 48: Ergebnisse von CropUpAi. Schwarze Markierungen zeigen den berechneten Ackerfuchsschwanzbesatz. Links: 07.06.2023; Rechts: 24.06.2024. 71

Abbildung 49: Ertragsergebnisse des Winterweizens pro Parzelle im Jahr 2021. Hochgerechnet von den Parzellen auf t/ha. 72

Abbildung 50: Ertragsergebnisse der Sommergerste pro Parzelle im Jahr 2024. Hochgerechnet von den Parzellen auf t/ha. 73

Abbildung 51: Ertragsergebnisse des Winterrapses pro Parzelle im Jahr 2025. Hochgerechnet von den Parzellen auf t/ha. 74

Abbildung 52: Die vier Entnahmepunkte für die Resistenzproben am 23.07.2021. 76

© Hanse Agrarforschung e.V. 2026

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassende Witterungsdaten der Jahre 2020 bis 2024 in Elskop (Quelle: iMeteos 3.3, Pessl Instruments, Wien, AT). 22

Tabelle 2: Auflistung aller einheitlich über den jeweiligen Versuch gelaufenen produktionstechnischen Maßnahmen. 29

Tabelle 3: Bonituren über alle Versuchsglieder im Ackerfuchsschwanzversuch 2020-2024. 31

Tabelle 4: Variantenlegende mit Bodenbearbeitungsverfahren- und Fruchtfolgezuordnung 49

Tabelle 5: Übersicht über Termine an denen Indizes berechnet wurden inklusive der Kultur auf der Fläche zu dem Zeitpunkt. 53

Tabelle 6: Ergebnisse der Resistenzuntersuchung durch die Firma Agris24 der Ackerfuchsschwanzproben vom 23.07.2021. 75

Tabelle 7: Ergebnisse der Resistenzuntersuchung durch die Firma Agris24 der Ackerfuchsschwanzproben vom 28.08.2023. 77

Abkürzungsverzeichnis

AFu ..... Ackerfuchsschwanz
BM ..... break mix
ExG ..... Excess Green Index
GSD ..... Ground Sampling Distance
LD ..... low disturbance
M2P ..... Mavic 2 Pro
M3M ..... Mavic 3 Multispectral
NDVI ..... Normalized Difference Vegetation Index
NIR ..... Nahinfrarot
P4M ..... Phantom 4 Multispectral
RGB ..... Rot-Grün-Blau
UAS ..... Unmanned Aircraft System
VARI ..... Visible Atmospherically Resistant Index

© Hanse Agrarforschung e.V. 2026

Einleitung

Der Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* Huds.) zählt zu den bedeutendsten Ungräsern im mitteleuropäischen Ackerbau. Insbesondere in Wintergetreidebeständen verursacht er durch seine hohe Konkurrenzkraft gegenüber Kulturpflanzen erhebliche Ertragsverluste. Seine frühe Keimung, schnelle Jugendentwicklung sowie eine ausgeprägte Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Standortbedingungen begünstigen seine erfolgreiche Etablierung. Zusätzlich stellt die zunehmende Entwicklung von Herbizidresistenzen ein zentrales Problem für die nachhaltige Unkrautregulierung dar. Durch die schnelle Etablierung im Herbst wird er auch durch mechanische Bekämpfungsmaßnahmen wie das Striegeln im Frühjahr nicht erfasst (Moss, 2017; Chauvela, et al., 2008).

Vor diesem Hintergrund gewinnt ein integriertes Management des Ackerfuchsschwanzes, das chemische, mechanische und ackerbauliche Maßnahmen kombiniert, zunehmend an Bedeutung. Neben der Wahl geeigneter Fruchtfolgen und Saattermine spielt auch die Bodenbearbeitung eine entscheidende Rolle bei der Unterdrückung des Ungrases (Moss, 2017; Matthiesen, 2010; Voßheinrich, et al., 2018). Das hat zwei Ursachen: die primäre Keimruhe ist bei trockenen, warmen Bedingungen sehr kurz, wodurch Ackerfuchsschwanz sehr schnell wieder auskeimt. Bei kalten nassen Bedingungen wird die Keimruhe verlängert, wodurch zwischen Nacherntemanagement und Aussaat ein längerer Zeitraum abgewartet werden muss, um die Samen an der Bodenoberfläche zum Keimen zu bringen. Zum anderen ist die sekundäre Keimruhe bei Verschüttung durch Einarbeitung in den Boden ein Problem, da der Samen durch günstige Bedingungen im Boden sehr lange überdauern kann (Colbach, et al., 2002).

Ziel des vorliegenden Versuchs ist die Kontrolle des Ackerfuchsschwanzes durch ackerbauliche Maßnahmen. Die gewonnenen Ergebnisse sollen dazu beitragen, praxisnahe Empfehlungen für eine wirksame und zugleich nachhaltige Bekämpfungsstrategie abzuleiten. Im Zuge dessen wurde in einem über fünf Jahre durchgeführten Feldversuch der Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen in Kombination mit verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren auf die Minderung des Ackerfuchsschwanzdrucks an einem Marschstandort in Schleswig-Holstein untersucht. Denn die Ackerbauregion Marsch ist insbesondere, auch durch ihre Fruchtfolgen mit hohem Getreideanteil gefördert, von der Ackerfuchsschwanzproblematik betroffen.

Verschiedene Aspekte wurden untersucht. Unter anderem die potenzielle Reduktion des Ackerfuchsschwanzbefalles durch geeignete Bodenbearbeitungsstrategien, wie zum Beispiel eine lockernde und wenig mischende Bodenbearbeitung sowie dem Einfluss von Scheinsaaten. Außerdem eine angepasste Fruchtfolge mit einem höheren Anteil Sommerungen, wobei eine angepasste Fruchtfolge zusammen mit einer geeigneten Bodenbearbeitung die besten Ergebnisse liefern sollte. Zusätzlich wurde erforscht, wie Zwischenfrüchte in der Fruchtfolge

den Ackerfuchsschwanz beeinflussen. Als letzte Versuchsfrage wurde auch die Option von digitalen Hilfsmitteln, in diesem Fall Fernerkundung durch Drohnen, als Mittel zur flächigen Kartierung des Befallsdrucks und der Wachstumsunterschiede mit einbezogen. Hierbei wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Es wurden aus multispektralen und RGB-Daten (Rot-Grün-Blau) Indizes gerechnet, mit denen die Möglichkeit der quantitativen Feststellung der Ackerfuchsschwanzpflanzen erforscht werden sollte, sowie die Kartierung von Ackerfuchsschwanznestern. Dazu wurden auch KI-Modelle getestet. Das Ziel war es vor allem das Ausmaß des AFu-Besatzes zu quantifizieren, damit eine teilflächenspezifische Herbizidapplikation und gezieltere Bekämpfung potenziell zu ermöglichen.

1 Material und Methoden

Im Rahmen des ursprünglich auf drei Jahre angelegten Projektes wurde auf einem typischen Marschstandort in Schleswig-Holstein mit Ackerfuchsschwanzproblematik ein on-farm Versuch mit praxisüblichen Maschinen durchgeführt. Dem eigentlichen Projektzeitraum ging dabei ein einjähriger Vorversuch voraus. Aufgrund witterungsbedingter Anpassungen der geplanten Fruchtfolge wurde der Versuchszeitraum anschließend um ein weiteres Jahr verlängert, sodass sich die praktische Versuchsdurchführung insgesamt über fünf Jahre erstreckte. Ziel des Versuches war es, den Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen in Kombination mit verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren auf die Entwicklung und Minderung des Ackerfuchsschwanzdrucks zu untersuchen. Die weiteren Versuchsparameter werden in diesem Kapitel beschrieben.

1.1 Standortbeschreibung

Die Versuchsfläche liegt in Elskop im Kreis Steinburg in Schleswig-Holstein. Der Standort ist eine Kleimarsch (MN) aus Meeres-, Ästuar- und Küstenablagerungen mit 59 bis 76 Bodenpunkten. Der Oberboden besteht aus 25% Ton, 53% Schluff und 22% Sand, mit großer Schwankungsbreite von 17 bis 36% Ton zwischen und innerhalb der Feldstücke. Die Bodenart ist uL bis huL (LfU-SH, 2016). Die Fläche wurde von dem Ackerbaubetrieb Hansen in Elskop zur Verfügung gestellt. Der Betrieb bewirtschaftet seine Flächen, wie in der Region üblich, in einer Fruchtfolge mit Schwerpunkt auf Winterungen, insbesondere Druschfrüchten wie Winterweizen, Winterraps und Wintergerste.

1.2 Witterungsverlauf

Im Folgenden werden die Witterungsverläufe der Versuchsjahre 2020 bis 2024 beschrieben und vergleichend eingeordnet. Die Abbildungen zeigen jeweils den täglichen Niederschlag sowie die Tagesmitteltemperatur und die dazugehörigen täglichen Minimal- und Maximaltemperaturen. Für das Jahr 2020 wird dabei der Zeitraum von Juli bis Dezember betrachtet, während für die Jahre 2021 bis 2024 der gesamte Jahresverlauf dargestellt ist.

Im Jahr 2020 waren die Sommermonate Juli und August warm. Ab September setzte eine deutliche Abkühlung ein. Dabei sanken die Tagesmitteltemperaturen von 14,4 °C im September auf 10,9 °C im Oktober und 3,9 °C im Dezember. Erste leichte Frostereignisse traten bereits im Oktober auf, im November und Dezember wurden Tiefstwerte von -1,8 bzw. -2,6 °C erreicht. Auf niederschlagsreichere Sommermonate folgte im September eine trockene Phase, bevor die Niederschläge wieder zunahmen. (Abbildung 1)

Nach der Ernte am 02.09.2020 blieb es zunächst trocken. Bis zur Scheinsaat am 15.09. fielen insgesamt lediglich 26,6 mm Niederschlag, während die Temperaturen mit etwa 13–18 °C grundsätzlich günstige Bedingungen für die Keimung von Ackerfuchsschwanz boten. Die geringe Niederschlagsmenge und die daraus resultierende geringe Bodenfeuchte dürfte den Auflauf möglicherweise begrenzt haben. Auch nach der Scheinsaat blieb es bis zur weiteren Bodenbearbeitung Anfang Oktober mit nur 15,2 mm Niederschlag überwiegend trocken, während die Temperaturen weiter zurückgingen. Die Winterweizenaussaat erfolgte Anfang Oktober bei einer Tagesmitteltemperatur von 10,8 °C unter weiterhin trockenen Bedingungen. Kurz nach der Aussaat trat jedoch ein stärkeres Niederschlagsereignis auf. Dadurch verbesserten sich bei weiterhin geeigneten Temperaturen die Bedingungen für die Keimung und den Auflauf von Ackerfuchsschwanz deutlich. Damit lagen die für den weiteren Auflauf relevanten Bedingungen insbesondere nach der Aussaat des Winterweizens vor. Im weiteren Verlauf des Jahres sanken, die Temperaturen auf ein Niveau, welches keine Keimung des Ackerfuchsschwanzes mehr zu ließ.

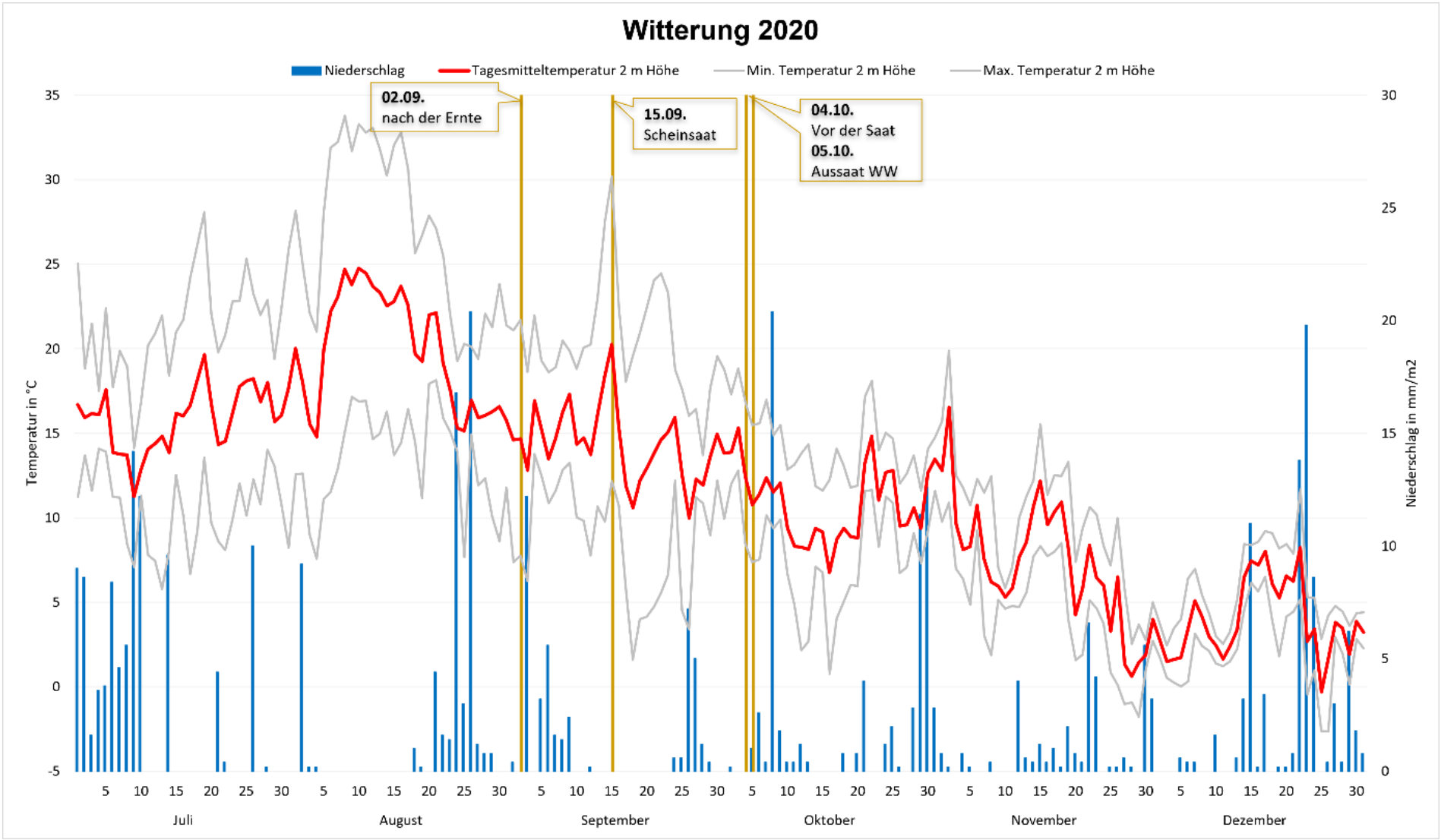


Abbildung 1: Witterungsverlauf im Jahr 2020 vom 01.07. bis zum 31.12.2020 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT).

Das Jahr 2021 begann mit einer ausgeprägten kalten Phase. Ab März stiegen die Temperaturen kontinuierlich an, wobei die wärmsten Monate Juni und Juli waren. Ab August und insbesondere ab September gingen die Temperaturen wieder zurück. Gleichzeitig nahmen die Niederschläge im Spätsommer und Herbst zu. Besonders der Mai und Oktober waren mit 112,8 bzw. 92,6 mm niederschlagsreich. Gegen Jahresende sanken die Temperaturen weiter ab, wobei ab November leichte Frostereignisse auftraten. (Abbildung 2)

Die Winterweizenernte am 12.08.2021 erfolgte bei einer Tagesmitteltemperatur von 19,3 °C und trockenem Wetter. In den darauffolgenden Tagen setzte jedoch eine niederschlagsreiche Phase ein, weshalb keine Zwischenfruchtaussaat möglich war. Zwischen der Ernte und der Scheinsaat am 04.09.2021 fielen insgesamt 58,6 mm Niederschlag. Die Temperaturen gingen während dieser Phase von zunächst knapp 20 °C auf etwa 15–16 °C zurück. Nach der Ernte verbesserten der kontinuierliche Niederschlag in Verbindung mit den weiterhin für die Keimung günstigen Temperaturen die Bedingungen für das Keimen von Ackerfuchsschwanz. Die Scheinsaat fiel somit in einen Zeitraum, in dem ein Auflaufen bodennaher Samen wahrscheinlich war. Auch nach der Scheinsaat bis zur weiteren Bodenbearbeitung am 02.10.2021 fielen nochmals 66,0 mm Niederschlag. Zudem lagen die Temperaturen Anfang Oktober noch bei etwa 14 °C. Somit herrschten weiterhin günstige Bedingungen für den Ackerfuchsschwanz. Zur letzten Bodenbearbeitung am 09.10.2021 war es dagegen deutlich kühler mit einer Tagesmitteltemperatur von 10,1 °C und nur geringen Niederschlägen in den vorausgegangenen Tagen.

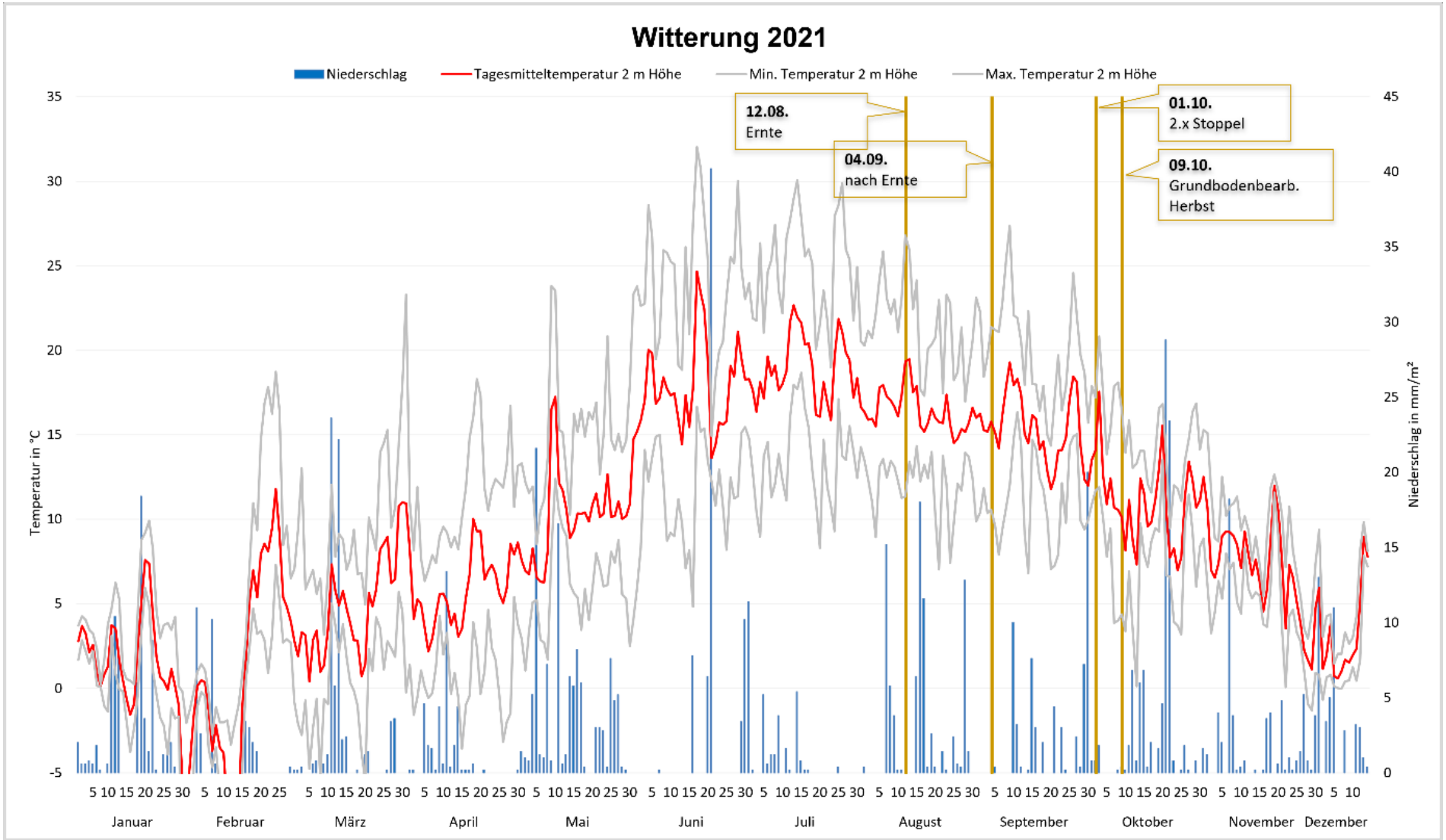


Abbildung 2: Witterungsverlauf im Jahr 2021 vom 01.01. bis zum 31.12.2021 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT).

Das Jahr 2022 begann mild und war insbesondere im Sommer durch warme und trockene Bedingungen geprägt. Im Juli fielen lediglich 32,0 mm Niederschlag, bevor die Temperaturen im August zurückgingen und die Niederschlagsmenge auf 115,6 mm anstieg. Der Herbst war insgesamt kühler und vergleichsweise trocken, bevor die Niederschläge im Dezember mit 116,0 mm nochmals deutlich zunahmen (Abbildung 3).

Die erste Bodenbearbeitung vor der Ackerbohnenaussaat erfolgte Ende Februar unter milden und überwiegend trockenen Bedingungen. Die Aussaat am 30.03.2022 erfolgte bei 8,9 °C und trockenem Wetter, auch in der Woche davor und danach fielen nur geringe Niederschlagsmengen. Die trockene Witterung dürfte die Keimung von Ackerfuchsschwanz zeitweise begrenzt haben.

Die Bedingungen zur Blüte der AFu-Pflanzen können die primäre Dormanz der AFu-Samen nachhaltig prägen. Dabei führen wärmere und trockenere Bedingungen im Juni zu einer kürzeren Dormanz (Swain, et al., 2006). Dies könnte in diesem Jahr 2022 der Fall sein, denn es fielen im gesamten Juni nur 57,2 mm Niederschlag und die maximal erreichte Temperatur lag bei 36,8 °C.

Die Ackerbohnenernte am 25.08.2022 erfolgte bei 10,5 °C nach dem warmen und trockenen Sommer. Bis zur Bodenbearbeitung am 30.08. fielen lediglich 13,2 mm Niederschlag. Anschließend setzte eine niederschlagsreichere Phase ein. Bis zur Zwischenfruchtaussaat auf der einen Hälfte der Versuchsfläche am 06.09. fielen wiederholt Niederschläge bei auf 8–13 °C zurückgehenden Temperaturen, wodurch günstige Bedingungen für den Auflauf von Ackerfuchsschwanz entstanden. Bis Anfang Oktober blieb es überwiegend trocken. Die anschließenden Bearbeitungsgänge und die Winterweizenaussaat auf der anderen Hälfte der Versuchsfläche am 13.10.2022 erfolgten bei etwa 12 °C und zunächst geringer Bodenfeuchte. Die herbstliche Auflaufperiode des Ackerfuchsschwanzes fiel damit teilweise in eine Phase begrenzter Bodenfeuchte.

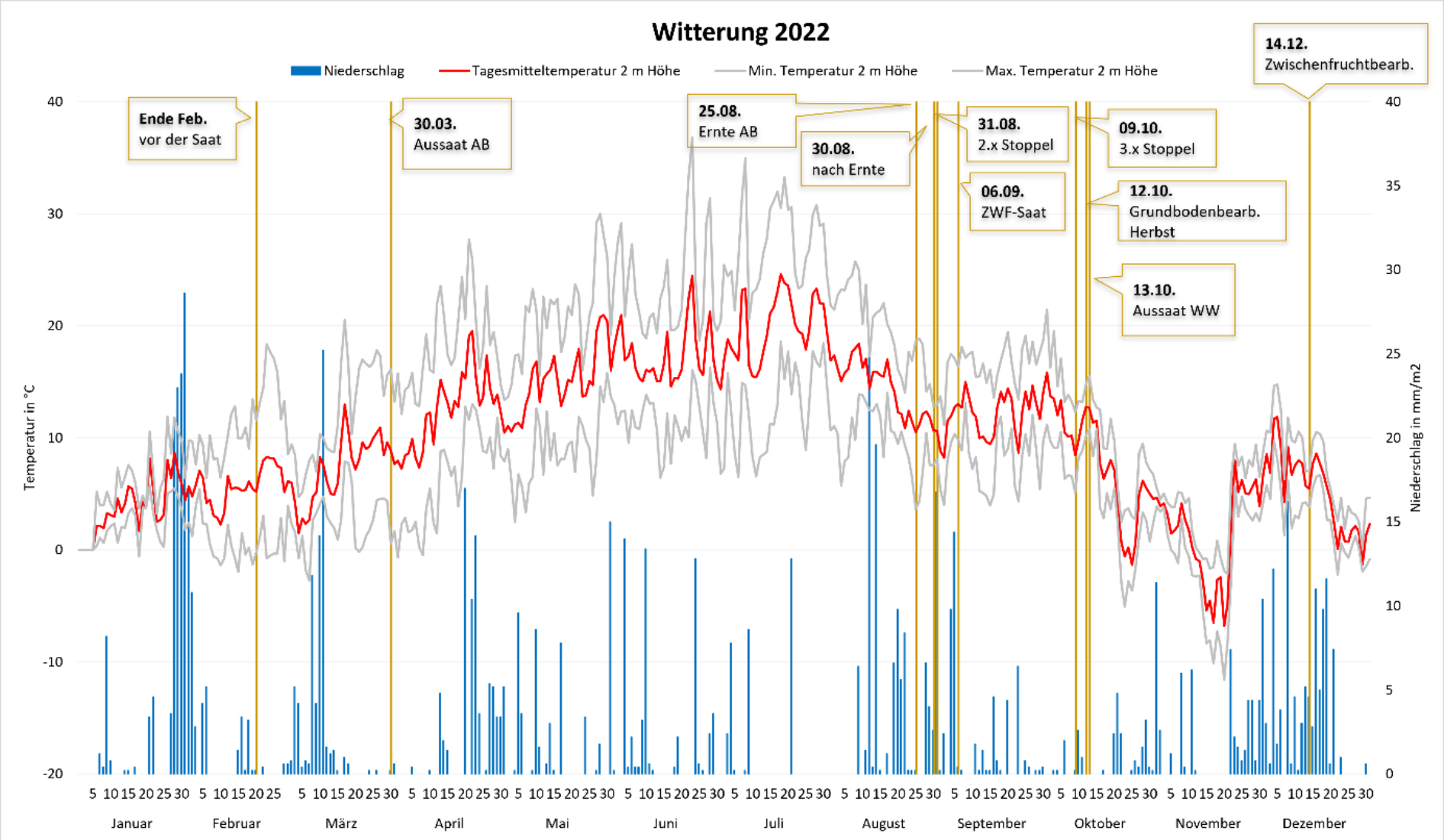


Abbildung 3: Witterungsverlauf im Jahr 2022 vom 01.01. bis zum 31.12.2022 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT).

Das Frühjahr 2023 war zunächst durch vergleichsweise trockene Bedingungen geprägt. Die Bodenbearbeitung vor der Aussaat der Sommergerste erfolgte Anfang Februar während einer kalten Phase. Auch die Aussaat am 03.05.2023 erfolgte nach einer längeren trockenen Phase bei zunächst geringen Niederschlägen. Diese trockenen Bedingungen könnten den Auflauf von Ackerfuchsschwanz sowohl vor als auch nach der Aussaat der Sommergerste begrenzt haben. Im April und Mai fielen lediglich 27,0 bzw. 19,0 mm Niederschlag. Erst ab Juni setzte die ausgeprägt niederschlagsreiche Phase des Jahres ein. (Abbildung 4)

Der Juni verzeichnete in Summe 131 mm Niederschlag und erreichte eine maximale Temperatur von 31,7 °C. Damit könnten diese Bedingungen zur Blüte des Ackerfuchsschwanzes, die Samen in eine längere primäre Dormanz gebracht haben.

Die Ernte des Winterweizens erfolgte am 15.08. und die Sommergerste wurde am 22.08.2023 geerntet. Zu diesem Zeitpunkt herrschten noch warme Bedingungen und es wurden die niederschlagsärmeren Tage zur Ernte genutzt. Denn nach der Ernte fielen wiederholt Niederschläge. Die Bearbeitung erfolgte damit nach mehreren Niederschlagsereignissen bei inzwischen auf etwa 13–17 °C gesunkenen Temperaturen. Damit herrschten grundsätzlich günstige Bedingungen für die Keimung und den herbstlichen Auflauf von Ackerfuchsschwanz. Bis zur Vorbereitung der Saat am 09.09.2023 fielen nochmals 30,6 mm Niederschlag. Die für die geplanten Herbstaussaat relevante Phase war durch weitere und teilweise starke Niederschlagsereignisse geprägt, dies erschwerte die Befahrbarkeit. Daher konnte die geplante Aussaat des Winterrapses nicht durchgeführt werden.

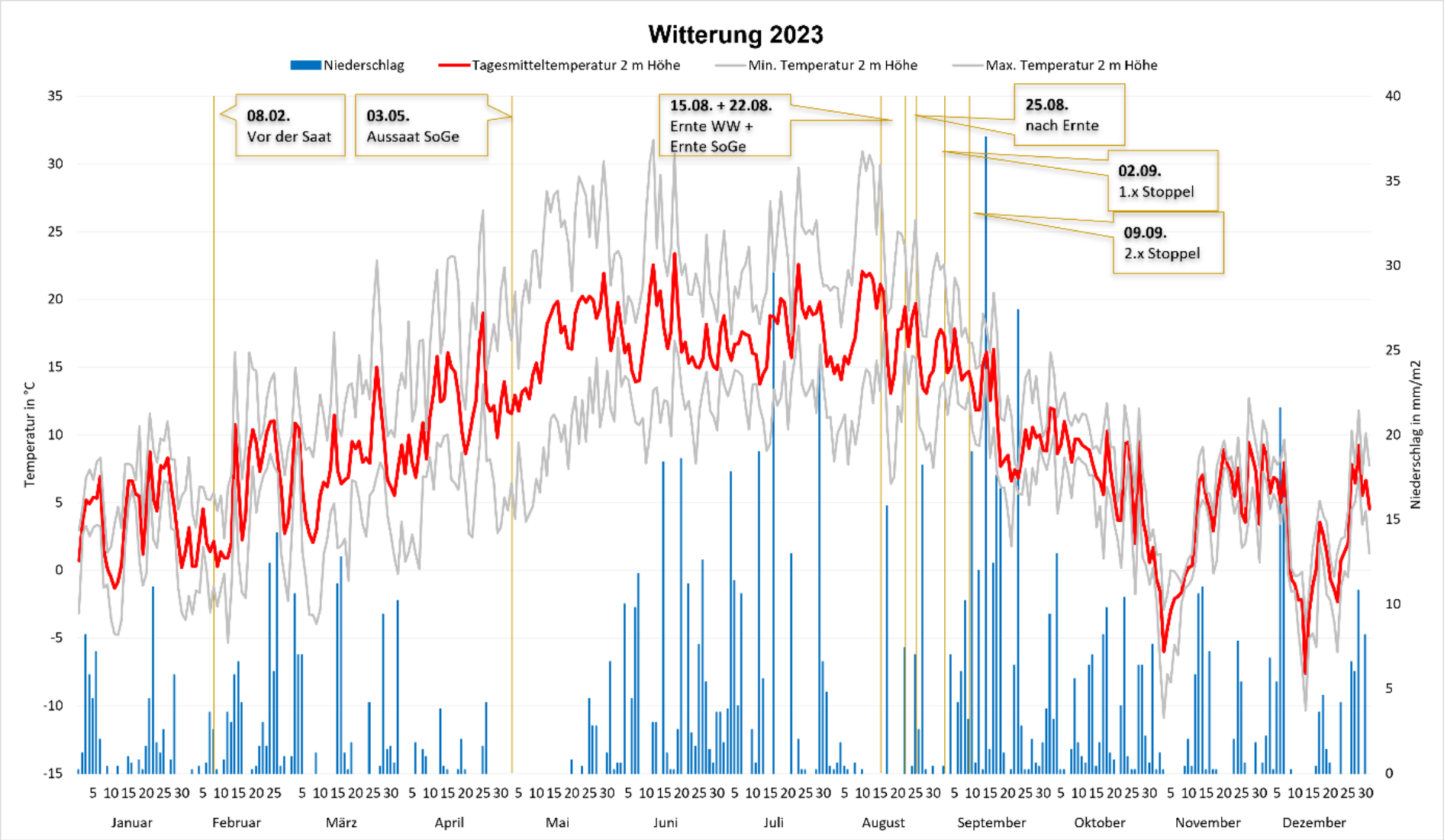


Abbildung 4: Witterungsverlauf im Jahr 2023 vom 01.01. bis zum 31.12.2023 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT).

Das Jahr 2024 war durch wiederholt hohe Niederschlagsmengen und insgesamt milde Temperaturen geprägt (Abbildung 5). Da im Herbst 2023 keine Winterrapsaussaat möglich war, wurde im Frühjahr 2024 Sommergerste gesät. Die dafür nötige Bodenbearbeitung fand am 01.05.2024 statt und die Aussaat am 02.05.2024. Dies fand in einer Phase mit wechselnden Bedingungen und kurz vor bzw. während einer niederschlagsreichen Periode statt. Bei einer Tagesmitteltemperatur von 14,7 °C zur Aussaat herrschten grundsätzlich günstige Temperaturbedingungen für die Keimung von Ackerfuchsschwanz. Die wiederkehrenden Niederschläge führten zudem zu einer guten Wasserversorgung des Bodens und konnten damit sowohl den Auflauf der Sommergerste als auch von Ackerfuchsschwanz begünstigen.

Der Sommer verlief warm und mit ausreichend Niederschlag. Nach der Ernte am 25.08.2024 blieb es zunächst trocken, sodass die erste Bearbeitung nach der Ernte unter vergleichsweise trockenen Bedingungen durchgeführt wurde. Unmittelbar anschließend setzte jedoch eine niederschlagsreichere Phase ein. Bis zur Aussaat Anfang September traten innerhalb weniger Tage wiederholt Niederschlagsereignisse auf, während die Temperaturen von etwa 15 °C auf rund 10 °C zurückgingen. Damit lagen nach der Ernte weiterhin Temperaturen vor, die grundsätzlich eine Keimung von Ackerfuchsschwanz ermöglichten. Gleichzeitig sorgten die wiederholten Niederschläge für eine ausreichende Bodenfeuchte. Die Bodenbearbeitung fiel somit in eine Phase, in der die Keimung und der Auflauf von Ackerfuchsschwanz begünstigt werden konnten.

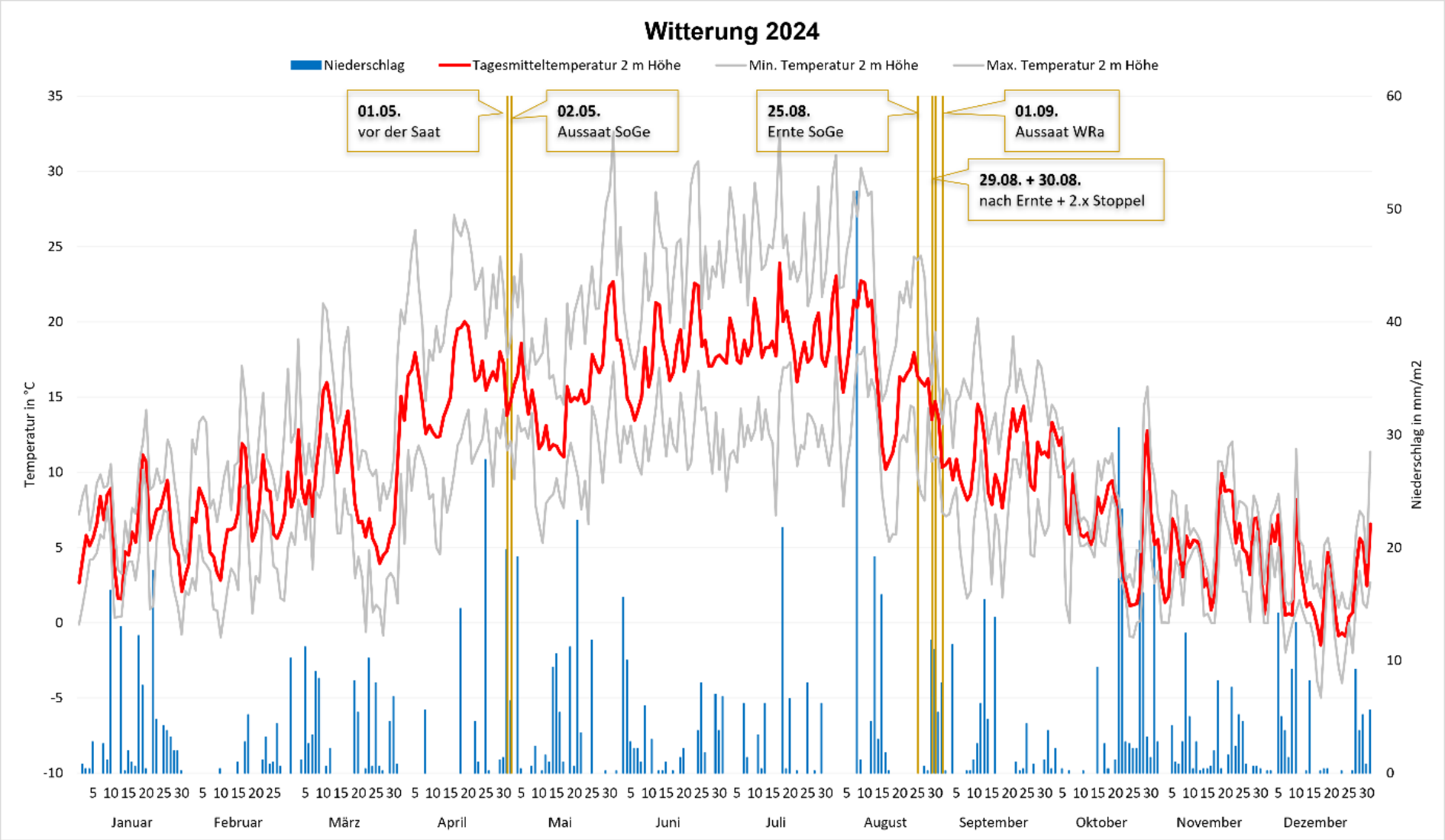


Abbildung 5: Witterungsverlauf im Jahr 2024 vom 01.01. bis zum 31.12.2024 inklusive Markierung der durchgeführten Arbeitsschritte. Daten der am Standort auf-gestellten Wetterstation iMeteos 3.3 (Pessl Instruments, Wien, AT).

Über die fünf Jahre hinweg zeigten sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Witterung, welche Einfluss auf den Versuchsaufbau hatten. Zusammenfassend waren die Jahre 2020 bis 2022 durch geringere Jahresniederschlagsmengen gekennzeichnet, während 2023 und 2024 deutlich niederschlagsreicher ausfielen. Hinsichtlich der Temperaturen zeigte sich kein vergleichbarer Trend, vielmehr variierten sowohl die mittleren als auch die extremen Temperaturen zwischen den Versuchsjahren. (Abbildung 6, Tabelle 1)

Tabelle 1: Zusammenfassende Witterungsdaten der Jahre 2020 bis 2024 in Elskop (Quelle: iMeteos 3.3, Pessl Instruments, Wien, AT).

Jahr	Jahresniederschläge [mm]	durchschnittliche Temperatur [°C]	Min. Temperatur [°C]	Max. Temperatur [°C]
2020	791,2	10,6	-3,9	33,8
2021	773,2	9,8	-18,3	32,0
2022	735,8	10,8	-11,5	36,8
2023	1064,4	10,4	-10,9	31,7
2024	1045,0	10,9	-10,4	32,7

Für die Entwicklung des Ackerfuchsschwanzes ergaben sich somit zwischen den Versuchsjahren unterschiedliche Bedingungen. Die zunächst trockenen Phasen in den Jahren 2020 und insbesondere 2022 den Auflauf zeitweise begrenzt haben dürften, führten die Niederschläge bei gleichzeitig milden Temperaturen im weiteren Herbst 2020 zu günstigeren Keimbedingungen. Besonders 2021 und 2024 wiesen, während der für den Auflauf relevanten Zeiträume wiederholt günstige Bedingungen aus ausreichender Bodenfeuchte und milden Temperaturen auf. Auch im Jahr 2023 bestanden grundsätzlich günstige Bedingungen für die Keimung und den Auflauf des Ackerfuchsschwanzes. Insgesamt zeigten sich die günstigsten Bedingungen für einen herbstlichen Auflauf in den Jahren 2021, 2023 und 2024, während 2020 und 2022 aufgrund längerer trockener Phasen vergleichsweise ungünstige Bedingungen aufwiesen.

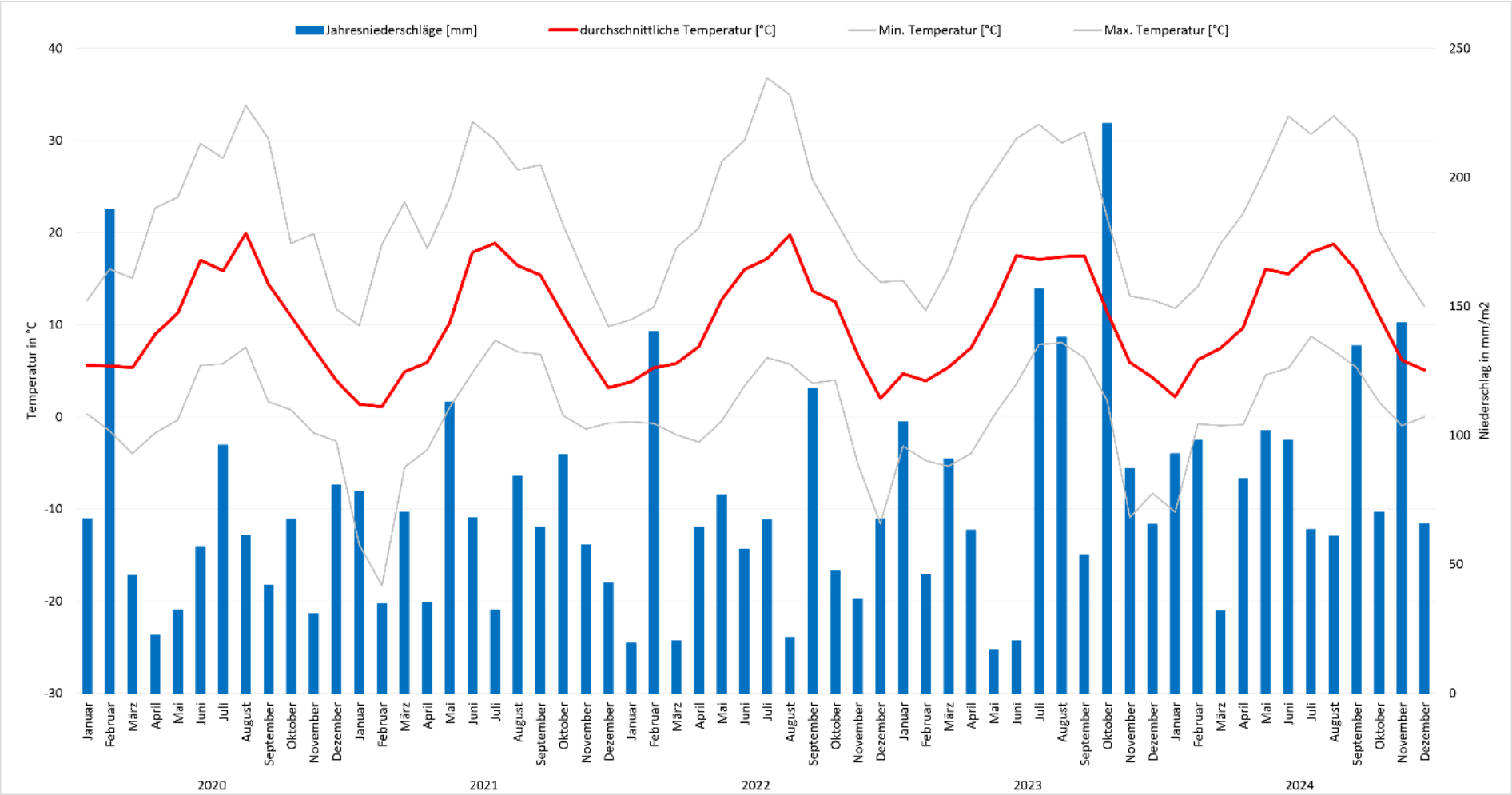


Abbildung 6: Witterungsverlauf von Januar 2020 bis Dezember 2024 als monatliche Zusammenfassung der Daten der am Standort aufgestellten Wetterstation (i-Meteos 3.3, Pessl Instruments, Wien, AT).

1.3 Versuchsfaktoren

In dem Versuch wurden unterschiedliche Faktoren getestet:

Zwei verschiedene Fruchtfolgen wurden auf der Fläche angelegt:

- WW – AB – WW – SoGe – WRa
- WW – AB – SoGe – SoGe – WRa

In beiden Fruchtfolgen wurde die Bodenbearbeitung in 4 Varianten aufgeteilt:

- Mischende Bodenbearbeitung
- Lockernde Bodenbearbeitung
- Mischende Bodenbearbeitung und Scheinbestellung
- Lockernde Bodenbearbeitung und Scheinbestellung

Bei den Fruchtfolgen wurde entschieden, dass eine reine Winterungsvariante aufgrund des Ausgangsdrucks mit Ackerfuchsschwanz nicht in Frage kommt. Der Fruchtfolgevergleich untersucht daher den Effekt einer unterschiedlichen Anzahl an Sommerungen innerhalb eines fünfjährigen Zeitraums, teilweise ergänzt durch den Anbau von Zwischenfrüchten. Der Anteil der Sommerungen stellt dabei einen wesentlichen Bestandteil des Fruchtfolgekonzepts dar und ermöglicht gleichzeitig weitere Möglichkeiten der Bodenbearbeitung. Daraus ergibt sich der zweite Faktor des Versuchs. Das erste Fruchtfolgeglied, der Winterweizen, ist dabei als Vorversuch zu werten. Der eigentliche Projektzeitraum begann mit der Bodenbearbeitung nach der Winterweizenernte. Dabei wurde die ursprünglich geplante Fruchtfolge im Laufe des Versuches insofern angepasst, dass aufgrund der beschriebenen Witterungsereignisse nach dem Anbau von Winterweizen und Sommergerste im Jahr 2023 und der daraus resultierenden eingeschränkten Befahrbarkeit kein Winterraps ausgesät werden konnte (Abbildung 4). Stattdessen wurde im Frühjahr 2024 Sommergerste angebaut. Nach deren Ernte wurde im Herbst 2024 der ursprünglich geplante Winterraps gesät (Abbildung 5). Mit dessen Anbau wurde der Versuch abgeschlossen. Die Zwischenfrüchte waren für den Herbst 2021 und 2022 geplant, auch hier konnte durch die Witterung nur die Zwischenfruchtaussaat im September 2022 realisiert werden (Abbildung 2, Abbildung 3). In dem Jahr folgte die Zwischenfrucht auf die Ackerbohne und war die Vorfrucht für die folgende Sommergerste.

Für die vier Bodenbearbeitungsverfahren wurden unterschiedliche Ansätze hinsichtlich Zeitpunkt, Intensität und Tiefe der Bodenbearbeitung gewählt. Ein wesentlicher Unterschied im Zeitpunkt der Bodenbearbeitung besteht dabei zwischen der Scheinbestellung und dem herkömmlichen Verfahren der Bodenbearbeitung und direkt darauffolgenden Aussaat, umgangssprachlich auch „rum und rein“ genannt. Bei der Scheinbestellung wird die Bodenbearbeitung

bereits etwa drei bis vier Wochen vor der Aussaat abgeschlossen. Der anschließend auflaufende Ackerfuchsschwanz (AFu) wird kurz vor der Aussaat mit Glyphosat bekämpft, bevor die Aussaat mit möglichst geringer Bodenbewegung erfolgt. Beim herkömmlichen Verfahren wurde die letzte Bodenbearbeitung dagegen erst unmittelbar vor der Aussaat durchgeführt. Dadurch unterscheiden sich die beiden Verfahren insbesondere hinsichtlich des Zeitpunkts der letzten Bodenbearbeitung vor Aussaat und des daraus resultierenden Zeitfensters für die Bekämpfung aufgelaufenen AFus.

Neben dem Zeitpunkt der Bodenbearbeitung ist auch die Tiefe des Eingriffs von Bedeutung. Für die Wahl und Bewertung der jeweiligen Maßnahme ist dabei das Wissen über die Entwicklung des AFu-Besatzes in den vergangenen Jahren relevant. Die Wirkung der Bodenbearbeitung hängt unter anderem davon ab, ob das vorhandene Samenpotenzial überwiegend aus älteren Samen besteht, die innerhalb der Bodenkrume verteilt sind, oder ob durch einen hohen AFu-Besatz in der Vorfrucht zusätzlich frische Samen auf die Bodenoberfläche geschüttet wurden. Eine intensivere und tiefere Bodenbearbeitung führte zu einer stärkeren Durchmischung des Bodens und konnte sowohl die Einarbeitung frisch abgelegter AFu-Samen als auch die Verlagerung älterer Samen aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche bewirken. Bei einer möglichst geringen Bodenbewegung sollte dagegen der vorhandene Samenvorrat im Boden möglichst wenig beeinflusst werden.

Diese unterschiedlichen Ansätze wurden in den vier Bodenbearbeitungsvarianten durch verschiedene Geräte und Bearbeitungsintensitäten umgesetzt. Zum Einsatz kamen vorwiegend unterschiedliche Grubber- und Scheibeneggenausstattungen, darunter die „Break Mix“- und „Low Disturbance“-Schare am Grubber sowie die CrossCutter Discs an der Kurzscheibenegge der Firma Väderstad (Werder, DE). Weitere Informationen zur eingesetzten Produktionstechnik sind in Kapitel 1.4 dargestellt. Die vier Bodenbearbeitungsvarianten unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Intensität der Bodenbewegung als auch hinsichtlich der damit verbundenen Zielsetzung. Die Varianten mit der mischenden Bodenbearbeitung erfuhren eine intensivere Durchmischung, durch die sowohl das Einarbeiten frisch abgelegter AFu-Samen als auch das Heraufholen älterer Samen aus tieferen Bodenschichten begünstigt werden kann, welche durch den Lichtreiz zum Keimen angeregt werden könnten. Zusätzlich wurde dieser Ansatz in einer Variante mit einer Scheinbestellung kombiniert, wodurch das Zeitfenster für die Bekämpfung des aufgelaufenen AFu erweitert wurde. In den anderen zwei Bodenbearbeitungsvarianten wurde dagegen eine möglichst geringe Bodenbewegung angestrebt. Dadurch soll vorwiegend das Auflaufen oberflächennah vorhandener, frischer AFu-Samen gefördert werden. Auch in diesem Fall werden in einer Variante diese aufgelaufenen Pflanzen anschließend im Rahmen der Scheinbestellung bekämpft. Der tiefer im Boden vorhandene Samenvorrat soll durch die geringe Bodenbewegung möglichst wenig beeinflusst werden.

Fruchtfolge 1 (betriebsüblich)			
1	**2**	**3**	**4**
mischende Bodenbearbeitung	lockernde Bodenbearbeitung	mischende Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung	lockernde Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung
Fruchtfolge 2 (angepasst)			
5	**6**	**7**	**8**
mischende Bodenbearbeitung	lockernde Bodenbearbeitung	mischende Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung	lockernde Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung



Abbildung 7: Variantenplan und Versuchsplan mit eingemessenen Parzellengrößen.

Aus diesen Versuchsfaktoren ergeben sich 8 Versuchsstreifen, denn die vier Bearbeitungsvarianten werden über die zwei Fruchtfolgen gespiegelt (Abbildung 7). Durch den begrenzten Platz auf der Fläche gab es keine Wiederholungen der Parzellen. Zur Begleitung des Versuches und zur Quantifizierung der Ackerfuchsschwanzpopulation wurde in den Parzellen der Ackerfuchsschwanzbesatz zu unterschiedlichen Zeitpunkten bonitiert (siehe Kapitel 1.5). Ein zusätzliches Ziel des Versuchs war es durch die Aufnahme von Drohnenbildern und Verrechnung zu Indizes die Möglichkeit der Schätzung von AFu-Befall zu erörtern. Dadurch würde die Möglichkeit bestehen nicht nur den tatsächlichen Besatz zu einem bestimmten Zeitpunkt zu bestimmen, sondern auch die Entwicklung über mehrere Anbaujahre zu beobachten. Dazu wurden am selben Tag der Ackerfuchsschwanzzählungen in den Zählrahmen auch Drohnenflüge absolviert.

Die über den gesamten Versuchszeitraum durchgeführten Bodenbearbeitungsmaßnahmen sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 8). Die Darstellung dient der Übersicht des zeitlichen Bearbeitungsverlaufs. Insgesamt sind acht Varianten dargestellt, die zwei unterschiedlichen Fruchtfolgen zugeordnet sind. Der dargestellte Zeitraum beginnt mit der Bodenbearbeitung nach der Ernte des Sommerweizens im Jahr 2020 und umfasst anschließend die Bearbeitungsschritte der jeweiligen Fruchtfolgeglieder und Varianten. Für die einzelnen Maßnahmen sind das Datum, die eingesetzte Maschine und die Bearbeitungstiefe angegeben. Die Aussaat- und Erntetermine der jeweiligen Kulturen sind zur besseren Orientierung farblich hervorgehoben. Der dargestellte Bearbeitungsverlauf endet mit der Aussaat des Winterrapses im Jahr 2024.

	Fruchtfolge 1: WW - AB - WW - WRa				Fruchtfolge 2: WW - AB - SoGe - WRa			
	1: Mischende Bodenbearbeitung	2: Lockernde Bodenbearbeitung	3: Mischende Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung	4: Lockernde Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung	5: Mischende Bodenbearbeitung	6: Lockernde Bodenbearbeitung	7: Mischende Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung	8: Lockernde Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung
	Vorfrucht SoW							
nach Ernte 02.09.2020	Crosscutter (2-3 cm)							
Scheinsaat 15.09.2020	Crosscutter (2-3 cm)	Crosscutter (2-3 cm)	Grubber BM (20-25cm)	Grubber LD (20-25 cm)	Crosscutter (2-3 cm)	Crosscutter (2-3 cm)	Grubber BM (20-25cm)	Grubber LD (20-25 cm)
vor der Saat 04.10.2020	Grubber BM (20-25 cm)	Grubber LD (20-25 cm)			Grubber BM (20-25 cm)	Grubber LD (20-25 cm)		
	Glyphosat (3l/ha)							
Saat 05.10.2020	**KE + Drille WW**							
Ernte 12.08.2021	**Ernte WW**							
nach Ernte 04.09.2021	Feingrubber diagonal							
2.x Stoppel 01.10.2021	Crosscutter diagonal							
Grundbodenbearb. Herbst 09.10.2021	Grubber BM (20-25 cm)	Grubber LD (20-25 cm)	Grubber BM (20-25 cm)	Grubber LD (20-25 cm)	Grubber BM (20-25 cm)	Grubber LD (20-25 cm)	Grubber BM (20-25 cm)	Grubber LD (20-25 cm)
vor der Saat Ende Feb. 2022	Feingrubber	Feingrubber	Glyphosat	Glyphosat	Feingrubber	Feingrubber	Glyphosat	Glyphosat
Saat 30.03.2022	**KE + Drille AB**							
Ernte 25.08.2022	**Ernte AB**							
nach Ernte 30.08.2022	KSE (5 cm)							
2.x Stoppel 31.08.2022			Grubber LD (25 cm)	Grubber BM (20 cm)	Grubber BM (15 cm)	Grubber LD (15 cm)	Grubber BM (15 cm)	Grubber LD (15 cm)
ZWF-Saat 06.09.2022					**ZWF-Saat**			
3.x Stoppel 09.10.2022	Glyphosat							
Grundbodenbearb. Herbst 12.10.2022	Grubber BM (20 cm)	Grubber LD (25 cm)						
Saat 13.10.2022	**KE + Drille WW**							
Zwischenfruchtbearb. 14.12.2022					Walzen			
vor der Saat 08.02.2023					Glyphosat			
Saat 03.05.2023					**KE + Drille SoGe**			
Ernte 15.08.2023	**Ernte WW**							
Ernte 22.08.2023					**Ernte SoGe**			
nach Ernte 25.08.2023	Striegel diagonal							
1.x Stoppel 02.09.2023	Feingrubber diagonal							
2.x Stoppel 02.09.2023	Grubber BM (30 cm)	Grubber LD (30 cm)	Grubber BM (30 cm)	Grubber LD (30 cm)	Grubber BM (30 cm)	Grubber LD (30 cm)	Grubber BM (30 cm)	Grubber LD (30 cm)
vor der Saat 09.09.2023					KSE			
vor der Saat 01.05.2024	Feingrubber diagonal							
Saat 02.05.2024	**KE + Drille SoGe**							
Ernte 25.08.2024	**Ernte SoGe**							
nach Ernte 29.08.2024	Feingrubber diagonal							
2.x Stoppel 30.08.2024	Kreiselegge							
Saat 01.09.2024	**KE + Drille WRa**							

Abbildung 8: Versuchsplan mit chronologischer Abfolge der Bodenbearbeitungsschritten und angebauten Kulturen. Zeitraum: 2020 bis 2024

1.4 Produktionstechnik

Die gesamte Produktionstechnik ist im Detail in Tabelle 2 aufgeführt.

Besonderer Fokus lag auf den eingesetzten Bodenbearbeitungsgeräten und deren unterschiedlicher Wirkung auf die Bodenstruktur und die Verteilung von Samen im Boden. Zum Einsatz kamen die Scheibenegge Carrier mit CrossCutter Disc (Väderstad, 2024) sowie der TopDown 400 Grubber der Väderstad GmbH (Werder, DE) mit den Grubberscharen „Break Mix“ (BM) und „Low Disturbance“ (LD) (Abbildung 9). Die Bodenbearbeitungsvarianten zwei und vier wurden überwiegend mit dem LD-Schar bearbeitet, während die Bearbeitungsvarianten eins und drei hingegen vorwiegend mit dem BM-Schar bearbeitet wurden. Das BM-Schar zeichnet sich durch ein intensives Mischverhalten des Bearbeitungshorizonts aus und führt dadurch zu einer stärkeren Umlagerung von Boden und Samen innerhalb des Bearbeitungsbereichs. Somit werden auch viele Samen im Bearbeitungsbereich an die Bodenoberfläche geholt. Mit seiner Breite von 80 mm, ist es auch breiter als das LD-Schar mit 50 mm. Das LD-Schar verfolgt damit einen Ansatz mit geringerer Bodenmischung und einer gezielten Lockerung beziehungsweise Brechung des Bodens (Väderstad, 2024). Dadurch wird eine geringere Verlagerung von Boden und Samen an die Oberfläche erwartet. Die Wahl der Scharvariante stellt somit einen wesentlichen Bestandteil der unterschiedlichen Bodenbearbeitungsstrategien dar.

Tabelle 2: Auflistung aller einheitlich über den jeweiligen Versuch gelaufenen produktionstechnischen Maßnahmen.

Bezeichnung	Maschinen/ Ausführungen
CrossCutter	Väderstad Carrier 500 mit CrossCutter-Scheiben
Grubber BM	Väderstad TopDown 400 mit Break Mix Schar (3,75 m)
Grubber LD	Väderstad TopDown 400 mit Low Disturbance Schar (3,75 m)
Feingrubber	Köckerling Allrounder
KSE	Kurzscheibenegge 5m, Väderstad Carrier 500
Striegel	Brix StrawMax-Pro (6m)
Säkombination (KE + Drille)	Amazone KG6002 mit Rowtec Scharen (6m Arbeitsbreite, 12,5 cm Scharabstand) Ackerbohnen: Väderstad Rapid (6m Arbeitsbreite)

Die mit CrossCutter Discs ausgestattete Scheibenegge ist für eine ultraflache Bodenbearbeitung („ultra shallow“) konzipiert und wurde im Feldversuch überwiegend als erster Bearbeitungsschritt nach der Ernte ganzflächig eingesetzt. In den Bodenbearbeitungsvarianten ohne Scheinbestellung, eins und zwei, kam sie zusätzlich als zweiter Bearbeitungsschritt zum Einsatz. Die sehr flache Bearbeitung zielt darauf ab, Erntereste sowie oberflächennah vorhandenes Samenpotenzial zu bearbeiten und dadurch die Keimung der Samen anzuregen. Gleichzeitig soll eine stärkere Durchmischung des Bodens vermieden werden, um Samen aus tieferen Bereichen der Krume nicht an die Bodenoberfläche zu verlagern und dort zur Keimung anzuregen.

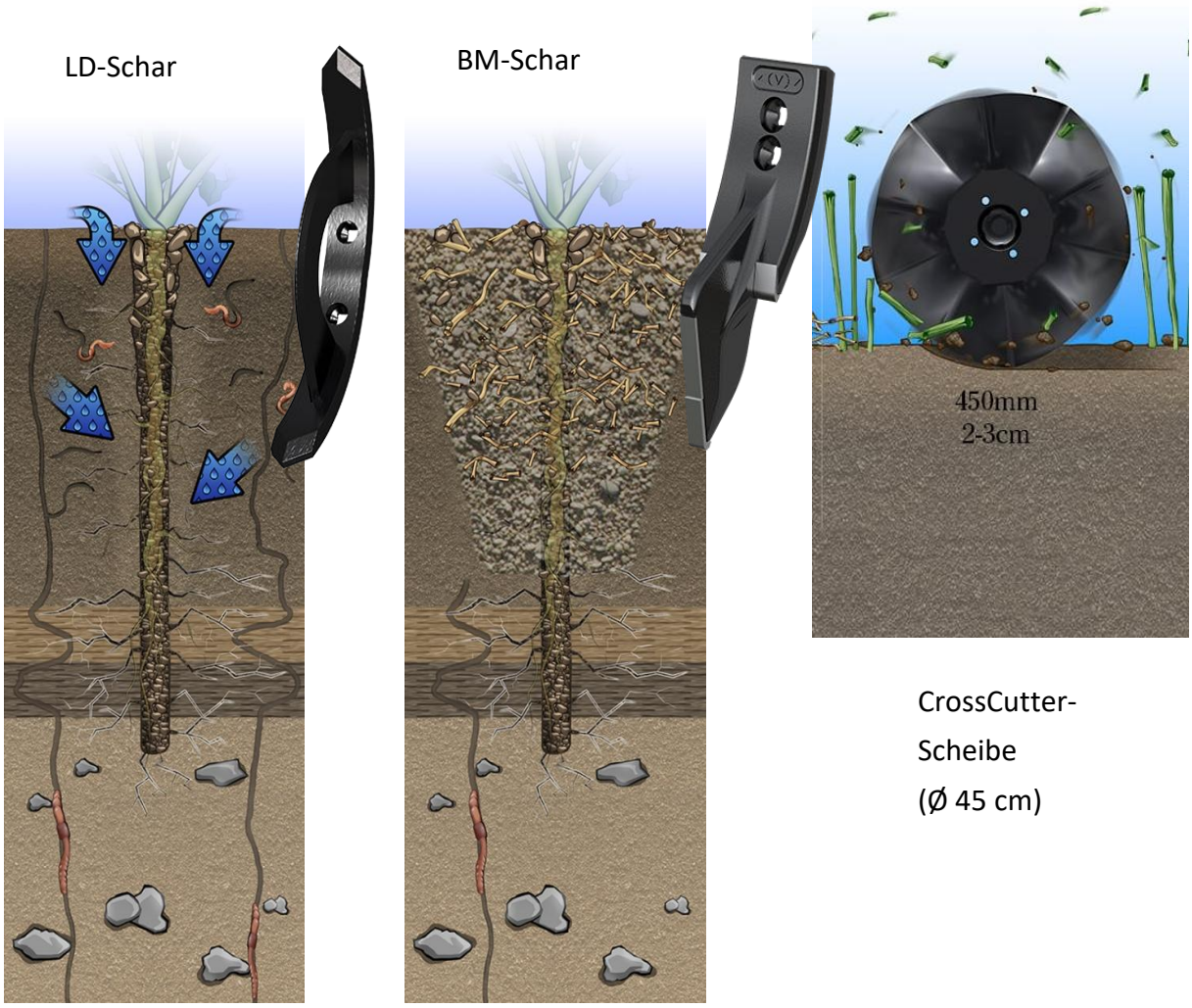


Abbildung 9: Bearbeitungshorizonte der verschiedenen Schare und Scheiben. Von links nach rechts: LD-Schar, BM-Schar, CrossCutter-Scheibe (Quelle: Väderstad, 2024).

1.5 Bonituren

Der Versuch wurde begleitet durch Zählungen von Ackerfuchsschwanz, UAS-Befliegungen (Unmanned Aircraft System) sowie Resistenzuntersuchungen.

Tabelle 3: Bonituren über alle Versuchsglieder im Ackerfuchsschwanzversuch 2020-2024.

Datum	Kultur	Bonitur		
		AFu-Bonitur	Drohnen-flug	Sonstiges
15.09.2020	Vor Scheinsaat	x		
04.10.2020	Nach Scheinsaat, vor Saatbettbereitung	x		
23.07.2021	WW			Probennahme: Resistenzuntersuchungen AFu
25.03.2022	Brache	x	x	
19.05.2022	AB		x	
30.08.2022	AB (nach Ernte)		x	
28.11.2022	WW (FF1), ZWF (FF2)	x	x	
08.02.2023	WW (FF1), ZWF (FF2)		x	
07.06.2023	WW (FF1), SoGe (FF2)		x	
28.08.2023	Brache			Probennahme: Resistenzuntersuchungen AFu
23.10.2023	Brache	x	x	
08.03.2024	Brache	x	x	
25.06.2024	SoGe		x	
24.10.2024	WRa		x	

Insgesamt wurde zu sechs Terminen Ackerfuchsschwanz gezählt, davon wurden die letzten vier Termine mit einem UAS begleitet. Zusätzlich wurde die Versuchsfläche noch zu sechs andere Termine beflogen, somit wurden unterschiedliche Bearbeitungszeitpunkte und unterschiedliche Wachstumsstadien der Kultur erfasst. (Tabelle 3)

Zusätzlich zu den genannten Bonituren und UAS-Flügen wurden auch Unkrautproben im Juli 2021 und August 2023 genommen und auf Herbizidresistenzen geprüft (Kapitel 2.5). Diese Prüfung übernahm jeweils Agris42 (Stuttgart, DE).

Die detaillierten Durchführungen sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

1.5.1 Zählungen

Im Rahmen des mehrjährigen on-farm Versuches erfolgte die Erhebung des Befallsdruckes von AFu in den Parzellen durch händische Zählung. Die Position der Zählstellen in der Versuchsfläche wurde unterschiedlich ausgewählt. Teilweise wurden die sichtbaren Regionen mit höherem Besatz ausgewählt, zu anderen Terminen wurden die Zählstellen quer über den Versuch gelegt. Durch einen Zählrahmen der Größe 0,25 m² wurde die Fläche der Zählung begrenzt. Für die weitere Auswertung wurden diese Ergebnisse auf 1 m² hochgerechnet. Während der Bonitur wurden die Pflanzen händisch aus dem Bestand selektiert und die genauen Standorte der Zählrahmen konnten in nachfolgenden Bonituren nicht wiederverwendet werden (Abbildung 10). Somit sind die Zählrahmen für jede Bonitur an unterschiedlichen Standorten angelegt worden. Die genaue Anzahl der Zählrahmen pro Varianten wird in den Ergebnissen dargestellt.



Abbildung 10: Beispiel eines Zählpunktes von der Bonitur am 23.10.2023 in Variante 8 Zählpunkt 2. Links: vor der Zählung; Rechts: nach der Zählung inklusive Entfernung der AFu-Pflanzen aus dem Zählrahmen

1.5.2 Drohnenbefliegungen

Die Befliegungen mit einem unbemannten Luftsystemen (UAS; im Folgenden als Drohnen bezeichnet) wurden zur Erprobung der Kartierung von Ackerfuchsschwanz mit RGB und Multispektralkameras durchgeführt. Genutzt wurde eine DJI Mavic 2 Pro (M2P) mit einer RGB-Kamera sowie eine DJI Mavic 3 Multispectral (M3M) und eine DJI Phantom 4 Multispectral (P4M), ausgestattet mit einer Multispektralkamera (DJI, Shenzhen, China). Dieses Modell verfügt über eine Kamera mit RGB-Sensor, sowie fünf Monochromsensoren für Multispektralaufnahmen. Hiermit wurden Daten generiert, die im Anschluss zur Verrechnung von Pflanzenwachstumsindizes aus Orthomosaiken genutzt wurden. In Abhängigkeit von den vorliegenden Daten wurde entweder der NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Kapitel 1.5.3), der VARI (Visible Atmospherically Resistant Index, Kapitel 1.5.4) oder der ExG (Excess Green Index, Kapitel 1.5.5) berechnet. Diese verschiedenen Wachstumsindizes wurden hinsichtlich ihres Zusammenhangs mit den gezählten AFu-Pflanzen untersucht, um die Möglichkeit einer Ableitung des Befallsdruckes zu erörtern.

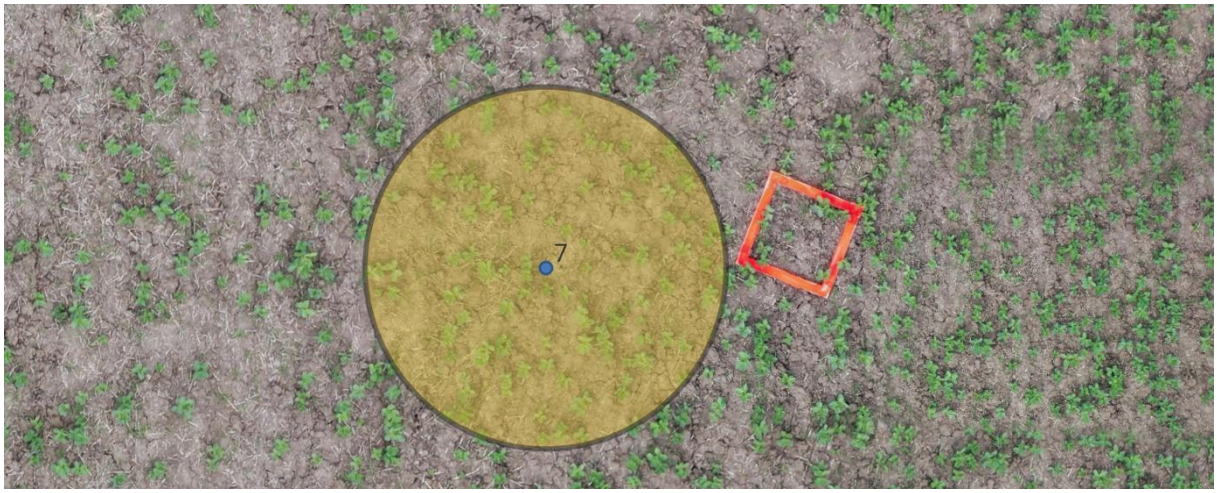


Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung der Pufferzone (gelb) neben dem Zählrahmen zur Berechnung punktbezogener Zusammenhänge.

Die aufgenommenen Einzelbilder wurden zunächst mithilfe von Pix4D (Lausanne, CH) zu georeferenzierten Orthomosaiken verarbeitet. Aus den Orthomosaiken wurden anschließend die für die jeweilige Aufnahme verfügbaren Spektralkanäle zur Berechnung der Vegetationsindizes NDVI, VARI und ExG herangezogen. Die Berechnung der Indizes erfolgte auch in Pix4D. Zur Quantifizierung der Vegetationsindizes wurde anschließend in QGIS (Version 4.2.0) eine zonale Statistik durchgeführt. Dabei wurde einerseits der mittlere Indexwert für die gesamte Versuchsparzelle ermittelt. Andererseits wurden um die einzelnen Boniturpunkte Pufferflächen definiert und der mittlere Indexwert innerhalb dieser Flächen berechnet. Dadurch konnten sowohl parzellenbezogene als auch punktbezogene Zusammenhänge zwischen den Vegetationsindizes und dem Ackerfuchsschwanzbesatz untersucht werden. Dabei wurde die

Pufferfläche so nah wie möglich an den Zählrahmen gelegt, ohne ihn mit einzubeziehen (Abbildung 11). Alle folgenden Darstellungen der aufgenommenen Daten als Orthomosaike wurden in QGIS erstellt.

Zusätzlich wurden verschiedene Ansätze zum Einsatz von KI zur Erkennung von Ackerfuchsschwanz im Bestand getestet (Kapitel 1.5.6).

1.5.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Zur Bewertung der Bestandsentwicklung und der räumlichen Variabilität innerhalb der Versuchsflächen wurden aus den multispektralen Orthomosaiken NDVI-Werte berechnet. Der NDVI ist ein spektraler Vegetationsindex, der auf der unterschiedlichen Reflexion von Pflanzengewebe im roten und nahinfraroten Wellenlängenbereich basiert. Während gesundes Pflanzengewebe aufgrund der Blattstruktur eine hohe Reflexion im nahinfraroten Bereich aufweist, wird rotes Licht durch Chlorophyll absorbiert. Der NDVI nutzt dieses Verhältnis, um Unterschiede in der Vegetationsaktivität und Bestandsentwicklung sichtbar zu machen.

Die Berechnung erfolgte nach folgender Formel: NDVI = (NIR − Red) / (NIR + Red)

Dabei stehen NIR (Nahinfrarot) für die Reflexion im nahinfraroten Bereich und Red für die Reflexion im roten Spektralbereich. Die resultierenden Werte liegen zwischen -1 und +1. Niedrige bzw. negative Werte weisen typischerweise auf vegetationsfreie Bereiche, Wasser oder Bodenbereiche hin, während höhere Werte eine stärkere Vegetationsaktivität und eine größere Blattbiomasse anzeigen. (Rouse, et al., 1974)

1.5.4 VARI (Visible Atmospherically Resistant Index)

Der VARI ist ein spektraler Vegetationsindex, der ausschließlich auf Informationen aus dem sichtbaren Spektralbereich basiert. Er wurde entwickelt, um den Einfluss atmosphärischer Bedingungen auf die Erfassung von Vegetation zu reduzieren und gleichzeitig den Anteil grüner Vegetation in RGB-Bilddaten hervorzuheben. Durch die Kombination der roten, grünen und blauen Spektralkanäle werden Unterschiede zwischen grüner Vegetation und nicht bewachsenen Bereichen sichtbar gemacht. Der VARI ermöglicht damit eine Bewertung der Vegetationsausprägung auch dann, wenn keine Informationen aus dem nahinfraroten Spektralbereich vorliegen.

Die Berechnung erfolgte nach folgender Formel: VARI = (Green − Red) / (Green + Red − Blue)

Dabei stehen Red, Green und Blue für die Reflexionswerte bzw. normierten Intensitäten des roten, grünen und blauen Spektralkanals. Höhere VARI-Werte weisen typischerweise auf einen höheren Anteil grüner Vegetation hin, während niedrigere Werte vermehrt bei Boden

oder nicht-grünen Bereichen auftreten. Im Gegensatz zum NDVI benötigt der VARI somit keinen nahinfraroten Spektralkanal und kann daher auch aus RGB-Daten berechnet werden. (Gitelson, et al., 2002)

1.5.5 ExG (Excess Green Index)

Der ExG eignet sich zur Bewertung der Vegetationsbedeckung auf Grundlage der spektralen Eigenschaften im sichtbaren Bereich. Der Index nutzt die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der roten, grünen und blauen Kanäle, wobei grünes Pflanzengewebe aufgrund seiner vergleichsweisen hohen Reflexion im grünen und geringeren Reflexion im roten und blauen Spektralbereich hervorgehoben wird. Dadurch können vegetationsbedeckte Bereiche gegenüber Boden und anderen nicht-grünen Bildbereichen abgegrenzt werden. Der ExG kann somit insbesondere zur Beurteilung der Grünbedeckung und der räumlichen Verteilung von Vegetation innerhalb der Versuchsflächen eingesetzt werden.

Die Berechnung erfolgte nach folgender Formel: $ExG = 2 \times Green - Red - Blue$

Dabei stehen Red, Green und Blue für die Reflexionswerte bzw. normierten Intensitäten des roten, grünen und blauen Spektralkanals. Höhere ExG-Werte weisen dabei auf eine stärkere Ausprägung grüner Vegetation hin, während niedrigere Werte typischerweise auf Boden, abgestorbenes Pflanzenmaterial oder andere nicht-grüne Bereiche hindeuten. Im Gegensatz zum VARI, der das Verhältnis der roten, grünen und blauen Spektralbereiche berücksichtigt, basiert der ExG ausschließlich auf der relativen Dominanz des Grünanteils gegenüber dem Rot- und Blauanteil. Dadurch wird ExG insbesondere zur Hervorhebung grüner Vegetation eingesetzt, während VARI zusätzlich Unterschiede in der atmosphärischen Beeinflussung der RGB-Aufnahmen berücksichtigen soll. (Woebbecke, et al., 1995)

1.5.6 KI-Auswertung

Zur Erprobung der Erkennung von Ackerfuchsschwanz mittels Fernerkundung in der Kultur wurde im Jahr 2024 die Firma CropUp.ai (Akson Robotics ApS, Aarhus, DK) beauftragt. Das von der Firma eingesetzte KI-Modell ist in der Lage, überständigen Ackerfuchsschwanz ab der Blüte in Getreidebeständen aus RGB-Orthomosaiken zu erkennen. Im Rahmen des Versuchs sollte geprüft werden, ob eine Erkennung bereits in niedrigeren BBCH-Stadien von Weizen und Gerste möglich ist.

Die Erkennung von Ackerfuchsschwanz in frühen Entwicklungsstadien stellt dabei eine besondere Herausforderung dar, da sowohl die Kulturpflanzen als auch Ackerfuchsschwanz zu den einkeimblättrigen Pflanzen (Monokotyledonen) gehören und sich in diesen Stadien nur schwer voneinander unterscheiden lassen. Eine zuverlässige Unterscheidung ließ sich bis jetzt

nur durch erfahrene Boniteure erreichen. Der Einsatz eines trainierten KI-Modells könnte eine automatisierte Erfassung ermöglichen, sofern das Modell über eine ausreichende Anzahl geeigneter Trainingsdaten verfügt.

Ziel war das Testen des Modells auf die Erkennung des AFu-Befalls im Versuch. Die Ergebnisse der Bonituren sollten potenziell als Referenz für die KI-basierte Erkennung dienen. Das KI-Modell liefert dabei keine Einzelpflanzenerfassung, sondern weist Pixel, die es als befallene Bereiche definiert, über die gesamte Versuchsfläche aus. Als Ergebnis der Auswertung wurden die durch das KI-Modell erkannten Befallsbereiche als Vektorlayer im Shapefile-Format bereitgestellt. Diese sind in der Darstellung als schwarze Flächen erkennbar und wurden über die jeweiligen RGB-Orthomosaike gelegt.

2 Ergebnisse

2.1 Ackerfuchsschwanz-Zählungen

Insgesamt wurden über den Verlauf des Versuchs zu sechs Zeitpunkten der Ackerfuchsschwanz gezählt, dazu wurden Zählrahmen der Größe 0,25 m² genutzt in denen die Anzahl der Ackerfuchsschwanzpflanzen gezählt wurde.

Die ersten zwei Bonituren fanden im Herbst 2020 statt. Am 15.09.2020 wurde vor der ersten Bodenbearbeitung der Ackerfuchsschwanz in 12 Zählrahmen pro Variante gezählt (Abbildung 13). Dabei wurden die Varianten 1, 2, 5 und 6 mit den CrossCutter-Scheiben flach bearbeitet, während der Grubber Variante 3 und 7 mit den BM-Scharen und Variante 4 und 8 mit den LD-Scharen bearbeitet wurden. Dieselben Zählpunkte wurden am 04.10.2020 wieder bonitiert, zu diesem Zeitpunkt stand in den Varianten 1 und 5 eine weitere Bodenbearbeitung mit dem BM-Schar an und in den Varianten 2 und 6 mit dem LD-Schar, zusätzlich wurde ganzflächig 3 l/ha Glyphosat appliziert.

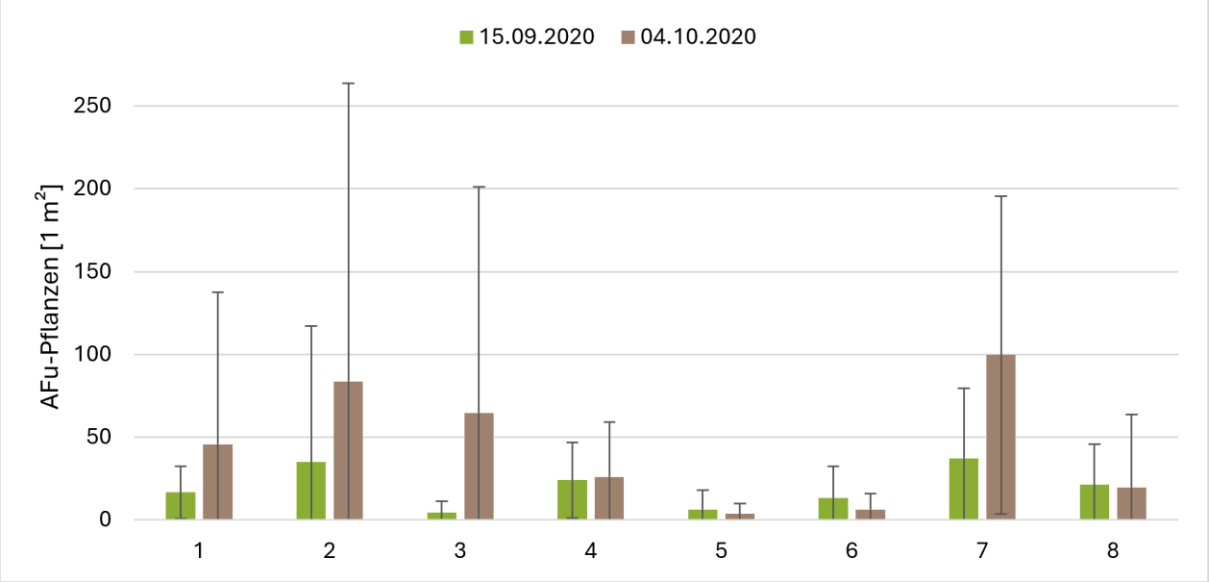


Abbildung 12: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählungen am 15.09.2020 und am 04.10.2020 unterteilt nach Varianten. Zusätzlich ist die Standardabweichung (n = 12) als Maß für die Streuung dargestellt.

Während der Bonitur am 15.09.2020 wurden im Schnitt zwischen einer und zwölf Ackerfuchsschwanzpflanzen in den Zählrahmen gefunden (Abbildung 12). Dabei zeigt sich bereits zu Beginn des Versuches ein unterschiedlicher Ackerfuchsschwanzbesatz zwischen den Varianten sowie auch innerhalb der Varianten, dies ist sichtbar bei Betrachtung der dargestellten Standardabweichung. Variante 2 wies den höchsten Ackerfuchsschwanzbesatz auf, gleichzeitig jedoch eine hohe Streuung zwischen den Boniturpunkten. Während teilweise keine Pflanzen erfasst wurden, lagen die Werte an anderen Punkten bei über 100 Pflanzen pro Quadratmeter.

Auch Variante 7 zeigte einen hohen Besatz, jedoch mit einer geringeren Streuung innerhalb der Variante. Variante 3 und 5 wiesen die niedrigste Anzahl von AFu-Pflanzen auf.

Die nächste Bonitur am 04.10.2020 wurde nach der Scheinsaat am 15.09.2020 an derselben Stelle durchgeführt, an diesem Tag wurde auch die letzte Bodenbearbeitung vor der Saat durchgeführt. Es zeigen sich Unterschiede zwischen den zwei Boniturterminen. Am 04.10.2020 lagen die Varianten zwischen im Schnitt vier AFu-Pflanzen und 100 AFu-Pflanzen pro m² (Abbildung 12). Den höchsten Besatz hatten, wie auch in der vorherigen Bonitur, die Varianten 2 und 7. Variante 5 und 6 verzeichneten den geringsten Besatz. In diesen zwei Varianten wurde keine Scheinsaat durchgeführt. Auffällig ist die starke Erhöhung des Besatzes in den Varianten 3 und 7, die mit einem stark mischenden Schar bearbeitet wurden, im Vergleich zu den Varianten 4 und 8, die mit einem vorwiegend lockernden Schar bearbeitet wurden.

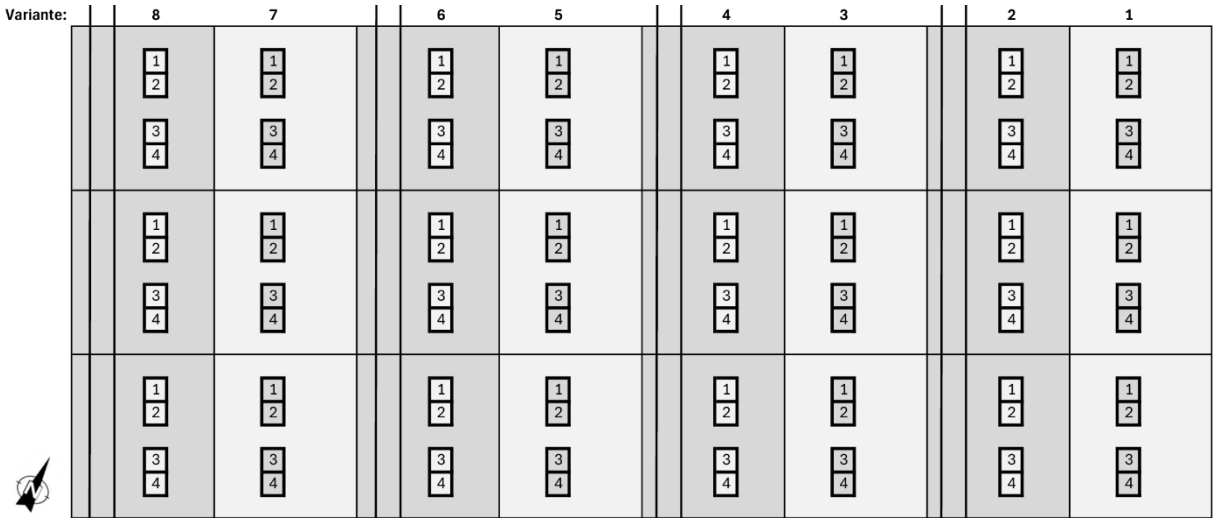


Abbildung 13: Schematische Skizze der Boniturpunkte im Jahr 2020 inklusive der Fahrgassen.

Im März 2022 wurde vor der Aussaat von den Ackerbohnen die Anzahl von Ackerfuchsschwanzpflanzen bonitiert. Zu diesem Zeitpunkt lag die Fläche brach. Danach wurde das nächste Mal am 28.11.2022 bonitiert, an diesem Termin war der Winterweizen in den Varianten 1 bis 4 bereits gesät, während in den anderen vier Varianten, keine Zählungen durchgeführt wurde, da dort ein etablierter Zwischenfruchtbestand stand.

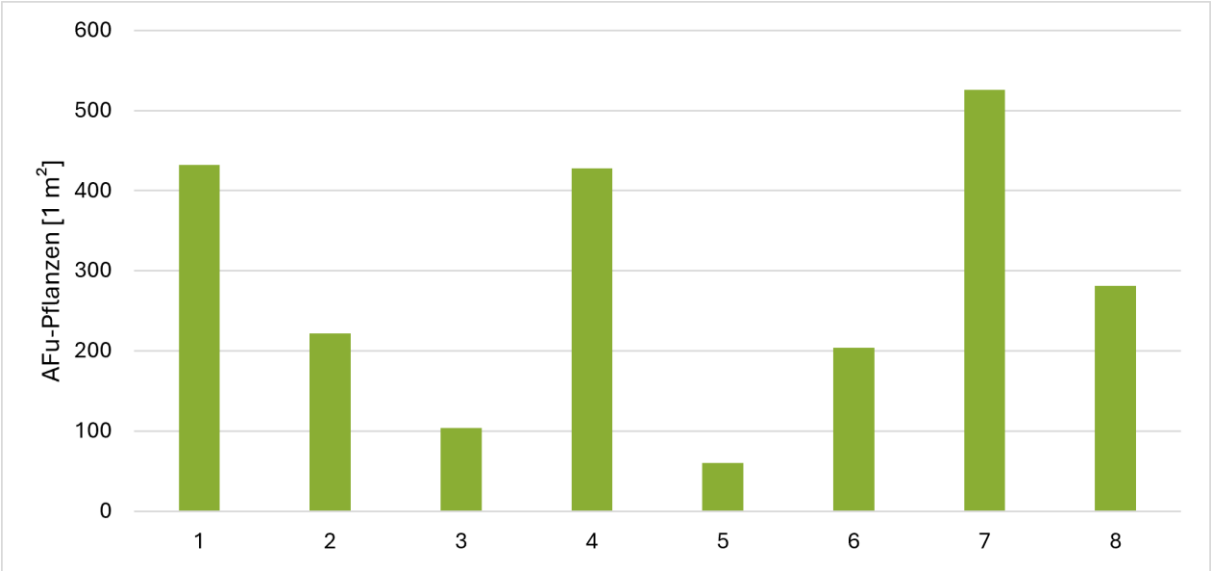


Abbildung 14: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 25.03.2022 dargestellt basierend auf 1-3 Zählrahmen pro Variante.

Am 25.03.2022 wurden in den Parzellen unterschiedlich häufig Zählrahmen ausgelegt, sodass diese Daten auf ein bis drei Zählrahmen pro Variante basieren (Abbildung 15). Auch in dieser Bonitur sind Unterschiede zwischen den Varianten sichtbar. Im Durchschnitt den höchsten Besatz hatte die Variante 7, gefolgt von Variante 1 und 4. Wobei die Variante 8 sehr große Schwankungen innerhalb der Variante zeigt (Abbildung 14). Auf einem Quadratmeter wurden 8, 148 und 688 AFu-Pflanzen gefunden. Die Variante 7 zeigte weniger Schwankung zwischen den zwei Zählpunkten mit einer Standardabweichung von 6,5. Der im Durchschnitt geringste AFu-Besatz wurde in Variante 5 gezählt. Dort wurden 15 Pflanzen gefunden. Jedoch wurden in jeweils einem Zählrahmen der Variante 3 und 8 weniger als 5 AFu-Pflanzen bonitiert. Dies zeigt die große Heterogenität über die Versuchsfläche. Im Vergleich zur vorherigen Bonitur weisen die Varianten 2, 4 und 7 weiterhin ein hohes Niveau des Ackerfuchsschwanzbesatzes auf.



Abbildung 15: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 25.03.2022.

In der Folgekultur Winterweizen wurde im November 2022 die Anzahl der AFu-Pflanzen bonitiert. Da zu diesem Zeitpunkt in den zwei Fruchtfolgen verschiedene Kulturen gesät wurden, wurde nur in den Varianten 1 bis 4 bonitiert (Abbildung 17). Auf der restlichen Versuchsfläche stand Zwischenfrucht, welche zu dicht gewachsen war, um AFu zu zählen. Dabei wurde im Durchschnitt über zwei Zählrahmen pro Variante in der Variante 1 die höchste Anzahl von AFu-Pflanzen gefunden, darauf folgte Variante 2. Der niedrigste Besatz wurde in Variante 3 festgestellt. In Variante 1 war die Schwankung zwischen den zwei Boniturpunkten jedoch groß (Abbildung 16). In einem Quadratmeter wurden 464 AFu-Pflanzen gefunden, in dem zweiten Zählrahmen waren es 172 AFu-Pflanzen. Im Gegenteil zu den vorherigen Bonituren zeigt Variante 1 hier einen deutlich höheren Besatz als Variante 2 und 4. Variante 3 gehörte bisher zu den Varianten mit dem niedrigsten Besatz. Somit wurde in den zwei Varianten mit der Scheinsaat die geringste Anzahl an AFu-Pflanzen bonitiert.

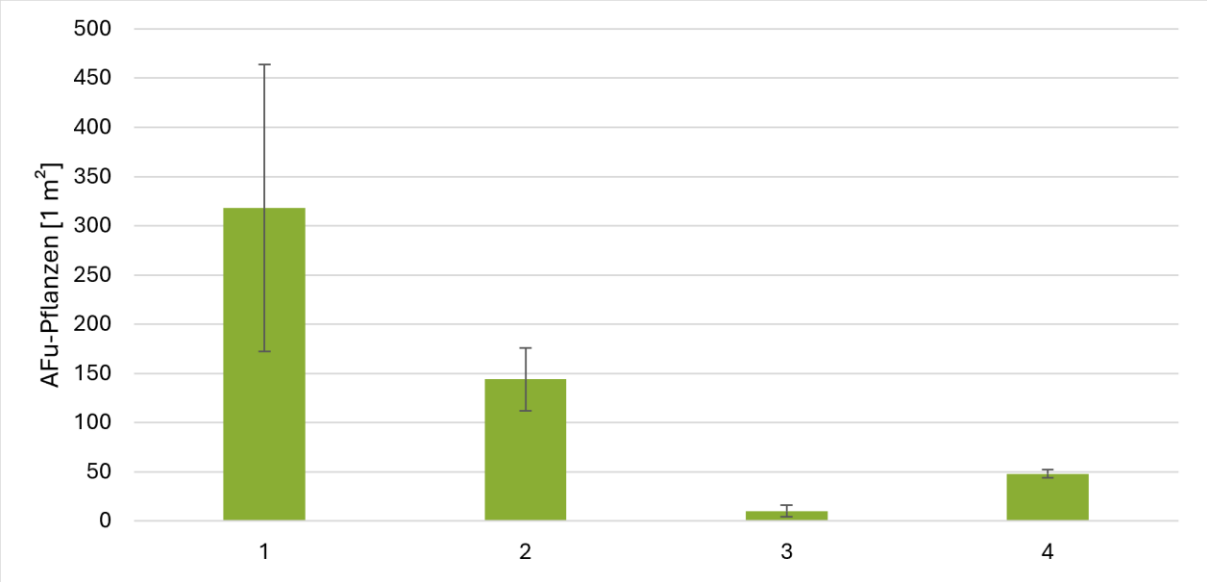


Abbildung 16: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 28.11.2022 dargestellt. Zusätzlich ist die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Werte dargestellt. An diesem Termin wurden nur die Varianten 1-4 bonitiert.

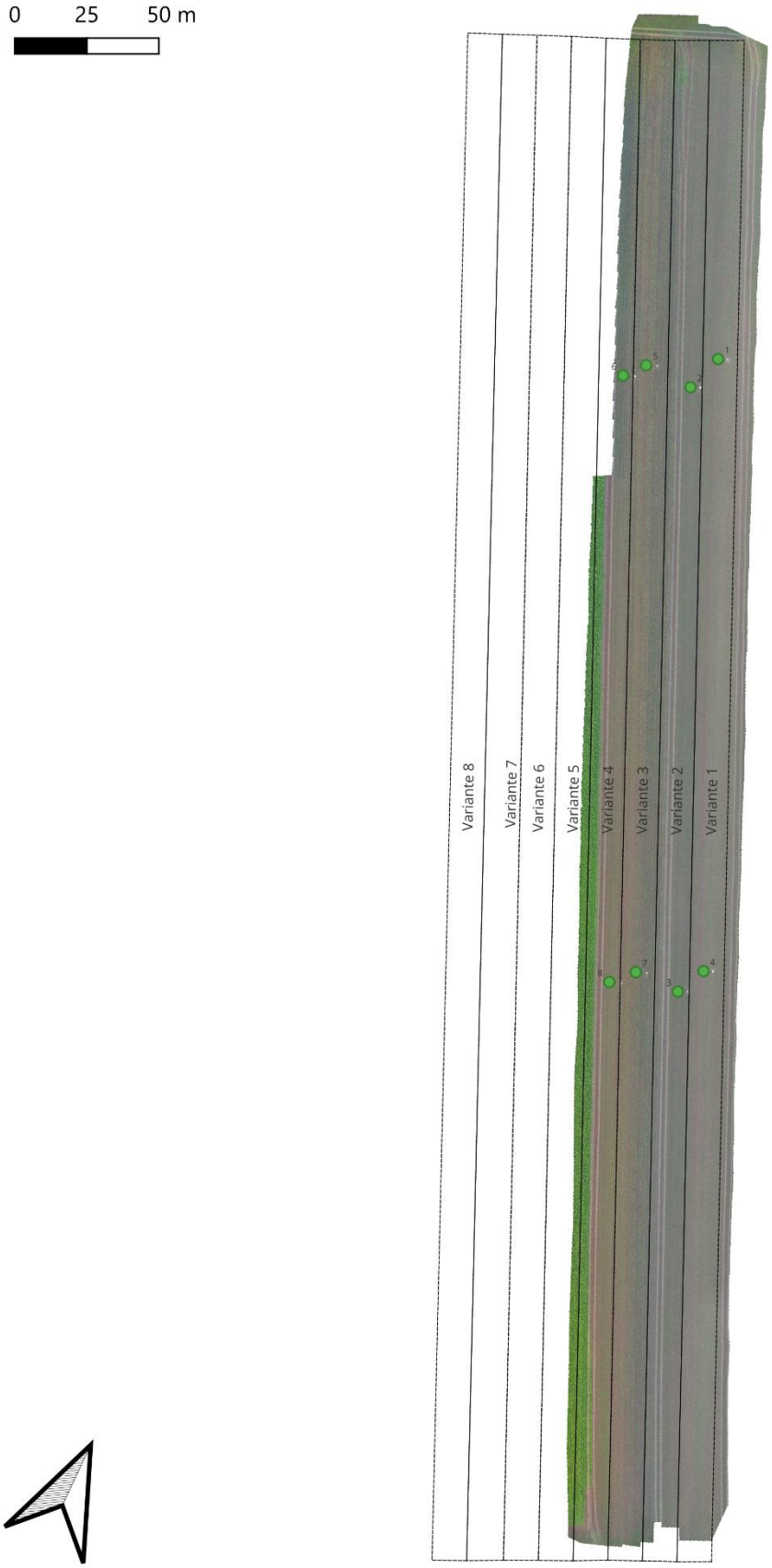


Abbildung 17: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 28.11.2022.

Im Jahr 2023 wurden eine Bonitur durchgeführt. Am 23.10.2023 wurde nach der Ernte der beiden Getreidefrüchte, Winterweizen und Sommergerste, in der Brache vor der Aussaat von der Folgekultur Sommergerste bonitiert.

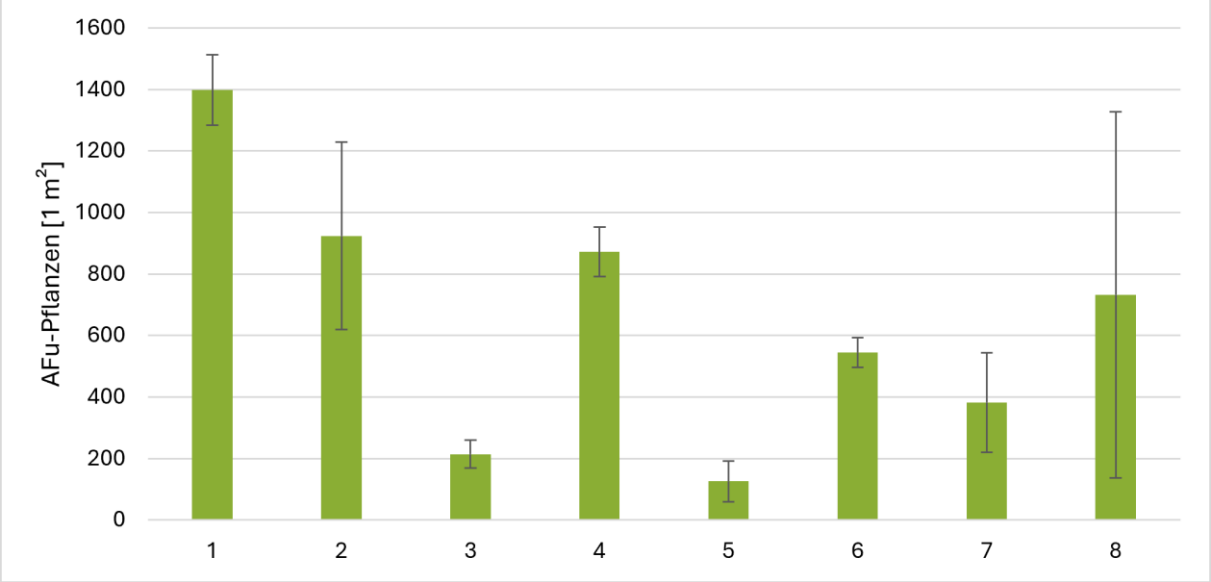


Abbildung 18: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 23.10.2023. Es wurden zwei Zählpunkte pro Variante bonitiert. Zusätzlich ist die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Werte dargestellt.

Zum Zeitpunkt der Bonitur am 23.10.2023 waren alle Bodenbearbeitungsschritte durchgeführt und die Fläche lag seit dem 09.09.2023 brach nach Winterweizen in den Varianten 1 bis 4 und Sommergerste in den Varianten 5 bis 8. Es wurden in jeder Variante zwei Zählpunkte bonitiert (Abbildung 19). Den höchsten AFu-Besatz im Durchschnitt hatte Variante 1 darauf folgte Variante 2 und 4. Variante 8 war auch auf einem hohen Niveau und zeigte große Schwankungen (Abbildung 18). Im Zählpunkt im Norden der Variante wurden auf 1 m² 136 AFu-Pflanzen gezählt, während weiter südlich in der Variante am zweiten Zählpunkt 1328 Pflanzen bonitiert wurden. Wie in vorherigen Bonituren zeigten die Varianten 1, 2, 4 und 8 besonders hohen AFu-Besatz während Varianten 3 und 5 auf einem geringen Niveau blieben.



Abbildung 19: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 23.10.2023.

Im folgenden Jahr 2024 wurden ein letztes Mal am 08.03.2024 die Ackerfuchsschwanzpflanzen bonitiert. Auch dies fand in der brachliegenden Fläche vor der Sommergerstenaussaat statt.

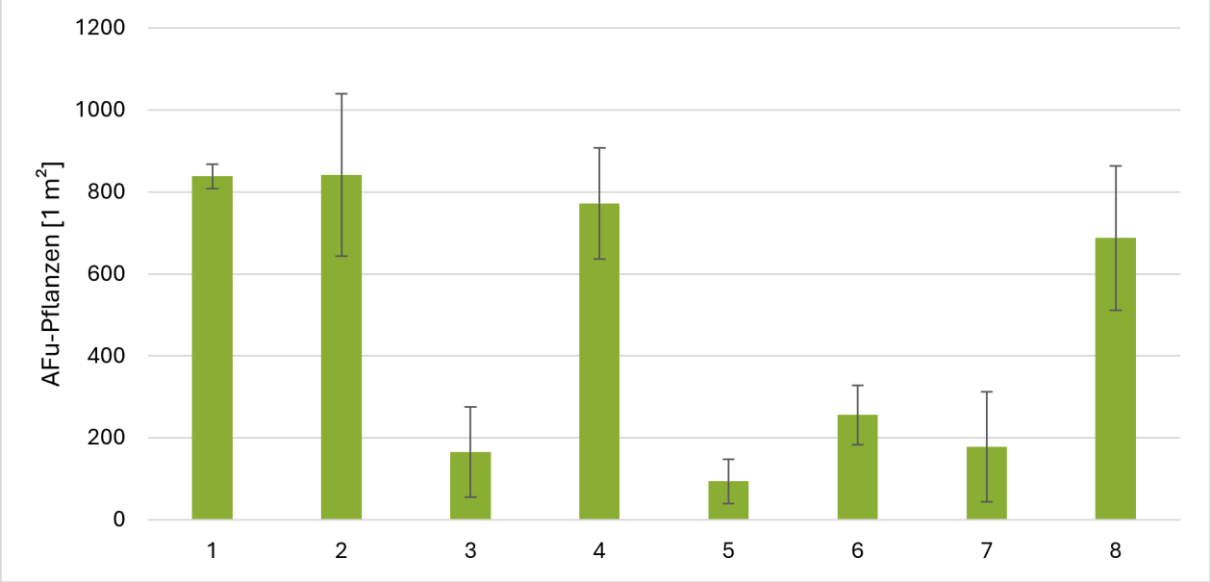


Abbildung 20: Ergebnisse der Ackerfuchsschwanzzählung am 08.03.2024. Es wurden zwei Zählpunkte pro Variante bonitiert. Zusätzlich ist die Standardabweichung als Maß für die Streuung der Werte dargestellt.

Es wurden zwei Zählpunkte pro Variante bonitiert (Abbildung 21), dabei lag die Fläche brach. Im Mai wurde in allen Varianten Sommergerste gesät. Die Varianten mit dem höchsten AFu-Besatz waren Varianten 1 und 2, dicht gefolgt von Variante 4 (Abbildung 20). Es gab innerhalb der Varianten einige Schwankungen in der Anzahl der AFu-Pflanzen. In Variante 2 wurden im ersten Zählpunkt auf 1m² 644 AFu-Pflanzen gezählt und im zweiten Zählpunkt 1040 AFu-Pflanzen. Ähnlich war es auch in Variante 8, dort wurden 512 und 864 AFu-Pflanzen gezählt. Somit wurden in beiden Varianten über 60% mehr AFu-Pflanzen an dem stärker betroffenen Zählpunkt gezählt.

Werden die Werte mit den ersten Zählungen im Herbst 2020 verglichen, fielen zu Beginn die Varianten 2, 4 und 7 am höchsten aus. Bis in das Frühjahr 2024 gilt dies weiterhin für die Varianten 2 und 4, während die Variante 7 einen deutlich reduzierten Besatz aufwies. Mit hohem Besatz sind die Verfahren 1 und 8 hinzugekommen, während die Varianten 3, 5 und mit Einschränkungen 6 auf niedrigerem Niveau verbleiben.



Abbildung 21: Boniturpunkte der Ackerfuchsschwanzzählung vom 08.03.2024.

Werden die Boniturpunkte der vier Boniturtermine, für die die Zählpunkte georeferenziell erfasst wurden, gemeinsam dargestellt und die an den jeweiligen Punkten gezählten AFu-Pflanzen anhand von Quantilen klassifiziert und farblich dargestellt, ergibt sich ein räumlich differenziertes Bild (Abbildung 22). Die Quantile wurden für jeden Befliegungstermin separat bestimmt, sodass die Boniturpunkte für jedes Datum entsprechend der jeweiligen Verteilung der gezählten AFu-Pflanzen erneut klassifiziert wurden. Dabei sind zwischen den Boniturterminen teilweise Übereinstimmungen in der Quantileinstufung der einzelnen Boniturpunkte erkennbar. Unterschiede zwischen den Quantileinstufungen machen relative Veränderungen des AFu-Besatzes zwischen den Boniturterminen sichtbar. Gleichbleibende Quantile weisen hingegen darauf hin, dass sich die relative Position der jeweiligen Boniturpunkte im Vergleich zu den übrigen Punkten nur wenig verändert hat.

Insbesondere im südlichen Bereich der Versuchsfläche weisen die Boniturergebnisse vom 23.10.2023 und 08.03.2024 eine ähnliche räumliche Verteilung der Quantile auf. In den Varianten 1 und 2 zeigen zudem die Boniturpunkte vom 28.11.2022 vergleichbare Quantileinstufungen. Damit weisen die entsprechenden Boniturpunkte über mehrere Boniturtermine hinweg eine ähnliche relative Einordnung hinsichtlich des AFu-Besatzes auf.

Im nördlichen Bereich der Versuchsfläche zeigt sich hingegen ein heterogeneres Muster. In den Varianten 1, 2, 5 und 6 weisen die Boniturpunkte der Termine 25.03.2022, 28.11.2022 und 23.10.2023 teilweise übereinstimmende Quantileinstufungen auf. Besonders in den Varianten 3 und 7 treten dagegen deutlichere Unterschiede zwischen den Quantileinstufungen der Boniturtermine 25.03.2022 und 23.10.2023 auf.

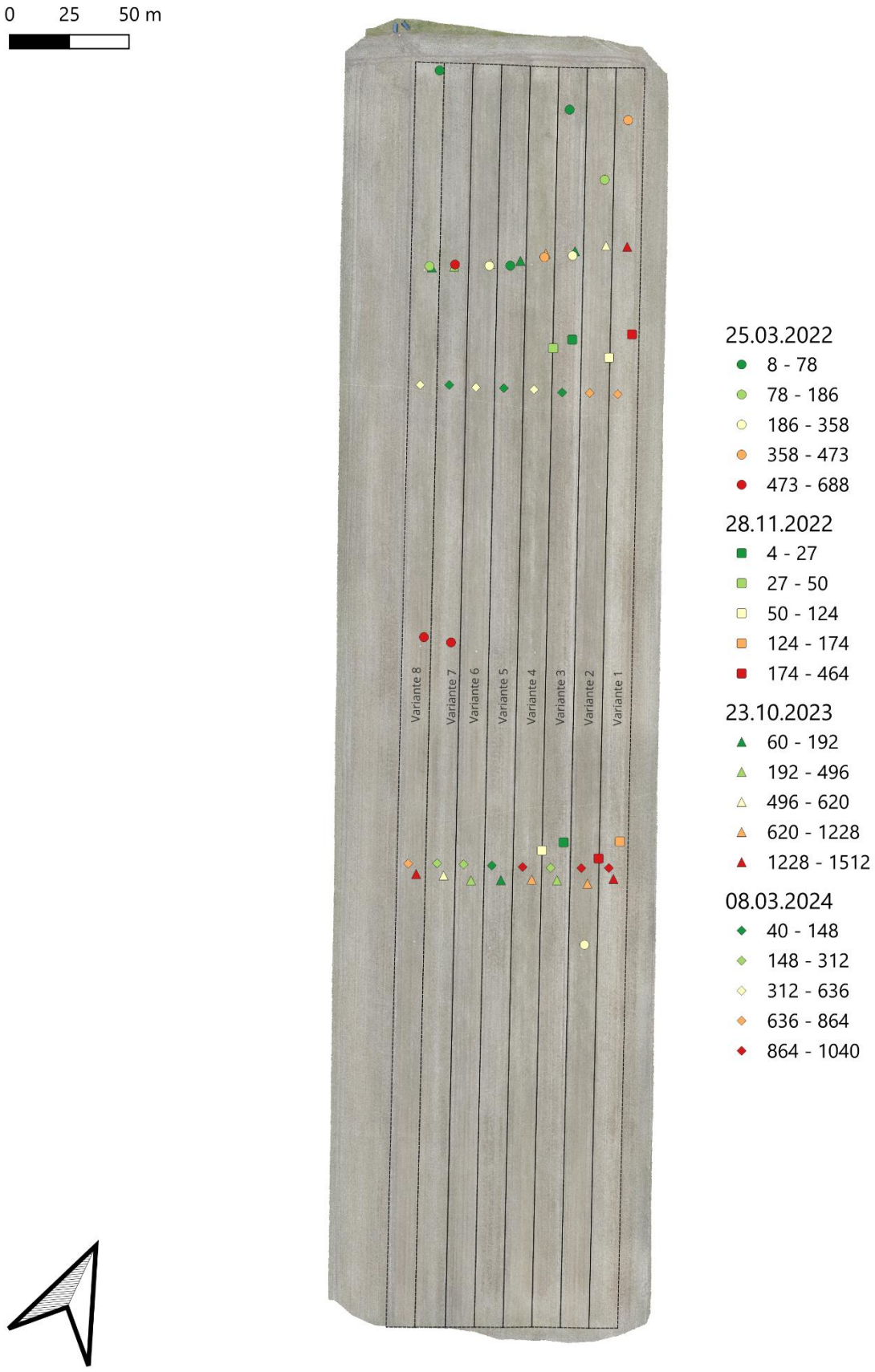


Abbildung 22: georeferenziert Boniturpunkte der vier Boniturtermine: 25.03.2022, 28.11.2022, 23.10.2023 und 08.03.2024, sowie die Boniturergebnisse dargestellt als Farbverlauf, von grün bis rot, in fünf Quantilen.

Tabelle 4: Variantenlegende mit Bodenbearbeitungsverfahren- und Fruchtfolgezuordnung

Fruchtfolge 1 (betriebsüblich)			
1	**2**	**3**	**4**
mischende Bodenbearbeitung	lockernde Bodenbearbeitung	mischende Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung	lockernde Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung
Fruchtfolge 2 (angepasst)			
5	**6**	**7**	**8**
mischende Bodenbearbeitung	lockernde Bodenbearbeitung	mischende Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung	lockernde Bodenbearbeitung u. Scheinbestellung

Im Folgenden werden die acht Varianten (Tabelle 4) unter verschiedenen Punkten über den Verlauf des Versuches betrachtet.

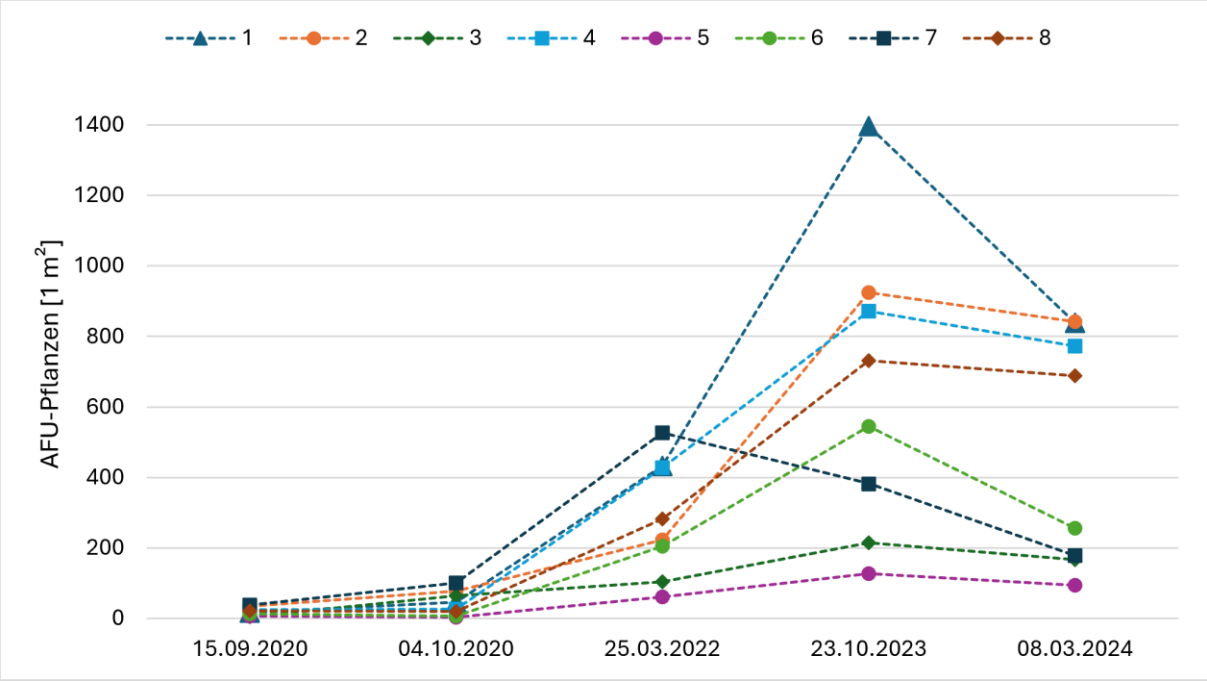


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der absoluten Summe der Ackerfuchsschwanzpflanzen pro Variante für die Boniturtermine zwischen 2020 und 2024.

Bei Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der gezählten AFu-Pflanzen über die fünf Boniturtermine, an denen alle Varianten erfasst wurden, zeigt sich insgesamt ein überwiegend steigender Trend (Abbildung 23). Über den gesamten Versuchszeitraum weisen die Varianten 1, 2, 4 und 8 tendenziell die höchsten AFu-Pflanzenzahlen auf, während in den Varianten 3 und 5 die geringsten Pflanzenzahlen gezählt wurden.

Besonders auffällig ist der Verlauf in Variante 7. Bis zum 25.03.2022 nahm die Anzahl der gezählten AFu-Pflanzen zunächst stetig zu und entwickelte sich dabei in ähnlichem Umfang wie in den Varianten 1 und 4. Ab Herbst 2023 konnte eine kontinuierliche Abnahme beobachtet werden. Bis zum letzten Boniturtermin sank die Variante dadurch auf die drittniedrigste AFu-Pflanzenzahl aller Varianten. Darüber hinaus zeigt sich zwischen dem 23.10.2023 und dem 08.03.2024 über alle Varianten hinweg eine Abnahme der gezählten AFu-Pflanzen.

Werden die Boniturergebnisse zusammen mit der Gesamttrendlinie der AFu-Zählungen dargestellt, wird die Differenzierung der einzelnen Varianten im zeitlichen Verlauf deutlich (Abbildung 24). Während die Boniturergebnisse der Varianten an den ersten beiden Boniturterminen zu Beginn des Versuchs im Herbst 2020 noch vergleichbar waren, nahmen die Unterschiede im weiteren Versuchsverlauf deutlich zu. Im Frühjahr 2022 wiesen lediglich die Varianten 4 und 7 einen höheren AFu-Besatz als die Gesamttrendlinie auf. Am folgenden Boniturtermin im Herbst 2023 zeigten die Varianten 1, 2, 4, 6 und 8 einen stärkeren AFu-Besatz, während für die Varianten 3, 5 und 7 einen AFu-Besatz unter der Gesamttrendlinie zeigten. Im Frühjahr 2024 blieb diese grundsätzliche Differenzierung bestehen. Die Varianten 1, 2, 4 und 8 wiesen weiterhin einen überdurchschnittlichen AFu-Besatz auf, während die übrigen Varianten unter dem Gesamttrend blieben.

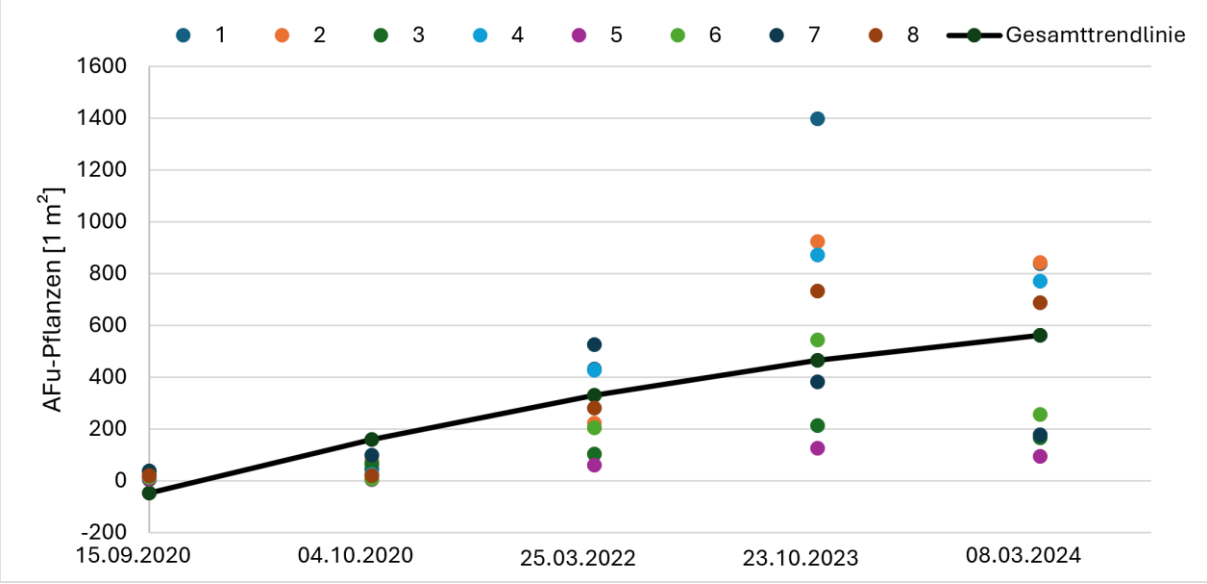


Abbildung 24: Entwicklung des Ackerfuchsschwanzbesatzes der acht Varianten über die fünf Boniturzeitpunkte. Dargestellt sind die beobachteten Werte der einzelnen Varianten (Punkte) sowie der Gesamttrend (Linie). Die vertikalen Abstände zwischen den beobachteten Werten und dem Gesamttrend entsprechen den jeweiligen Residuen.

Bei Betrachtung der allgemeinen Trends, die durch die Zusammenfassung der Ergebnisse nach Fruchtfolgen beziehungsweise Bodenbearbeitungsvarianten dargestellt werden, zeigen sich Unterschiede zwischen den untersuchten Versuchsfaktoren (Abbildung 25).Der lineare Trend der angepassten Fruchtfolge (FF2), die durch einen höheren Anteil an Sommerungen und den Einsatz von Zwischenfrüchten gekennzeichnet ist, weist einen fast um die Hälfte geringeren Anstieg der AFu-Pflanzenzahlen auf als die ortsübliche Fruchtfolge. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Trends sind zwischen beiden Fruchtfolgen mit etwa 0,7 vergleichbar.

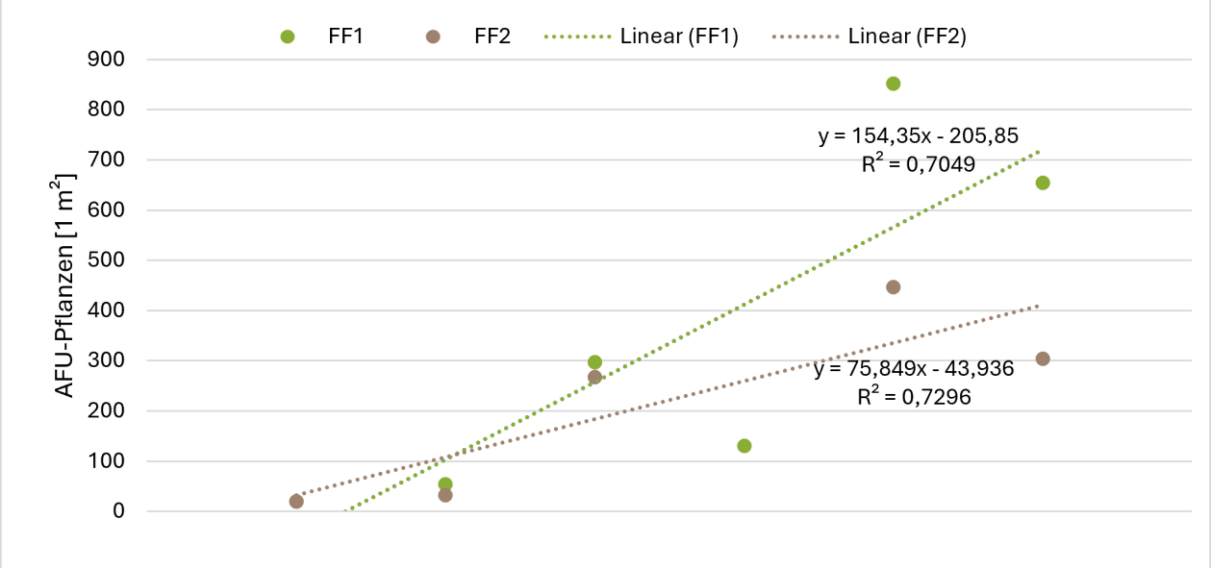


Abbildung 25: Darstellung der im Mittel gezählten Ackerfuchsschwanzpflanzen aufgeteilt nach Fruchtfolge 1 (FF1; Variante 1-4) und Fruchtfolge 2 (FF2; Variante 5-8) pro Boniturtermin. Zusätzliche Darstellung einer Trendlinie inklusive Formel und Bestimmtheitsmaß. Anmerkung: Am 28.11.2022 wurden ausschließlich die Varianten 1-4 bonitiert.

Bei einer Zusammenfassung der Bodenbearbeitungsvarianten über beide Fruchtfolgen hinweg zeigen sich dagegen geringere Unterschiede zwischen den Trendverläufen. Lediglich die mischende Bearbeitungsvariante mit der Scheinbestellung („misch + schein“) weist einen geringeren Anstieg auf. Gleichzeitig ist für diese Variante das Bestimmtheitsmaß geringer als für die übrigen Bodenbearbeitungsvarianten (Abbildung 26).

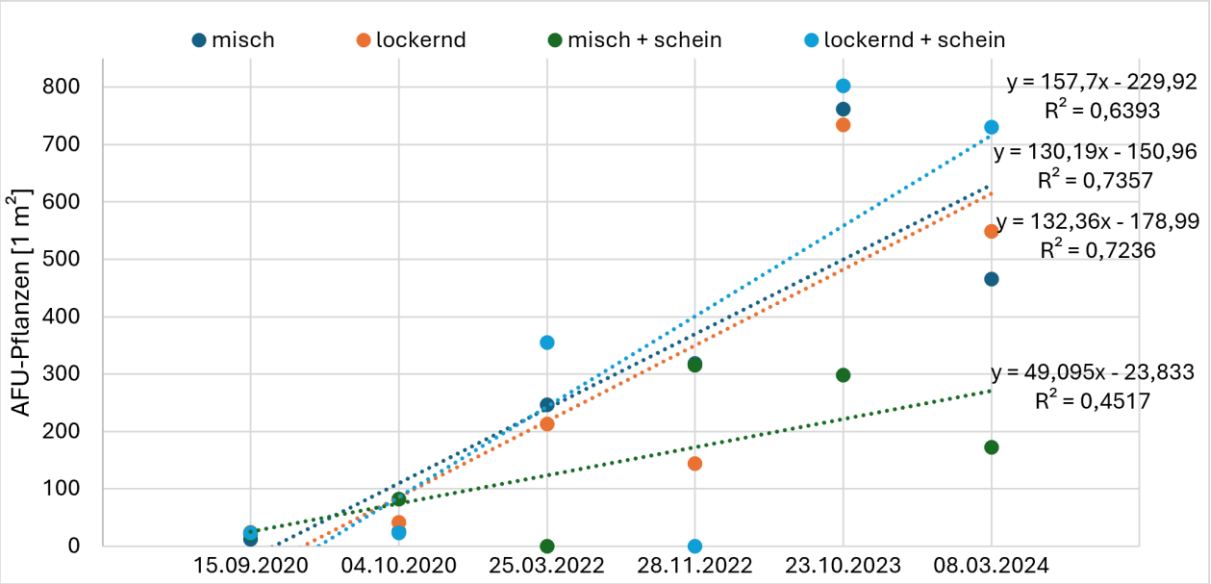


Abbildung 26: Darstellung der im Mittel gezählten Ackerfuchsschwanzpflanzen aufgeteilt nach Bodenbearbeitungsverfahren pro Boniturtermin: misch (1,5), lockernd (2,6), misch + schein (3,7) und lockernd + schein (4,8) Zusätzliche Darstellung der Trendlinien inklusive Formel und Bestimmtheitsmaß. Anmerkung: Am 28.11.2022 wurden ausschließlich die Varianten 1-4 bonitiert.

2.2 Drohnenbefliegungen

Über den gesamten Versuchszeitraum hinweg wurden zu verschiedenen Zeitpunkten Drohnenbefliegungen der Versuchsfläche durchgeführt. Die Aufnahmen erfolgten sowohl während etablierter Kulturen als auch zu Zeitpunkten ohne Kulturbestand beziehungsweise während oder nach der Bodenbearbeitung. Ziel der Befliegungen war es zum einen, einen räumlichen Überblick über die Versuchsfläche und die Bestandsentwicklung der Kulturen zu erhalten. Zum anderen sollte insbesondere zu Terminen, an denen parallel AFu-Bonituren durchgeführt wurden, untersucht werden, inwieweit sich der AFu-Besatz anhand fernerkundungstechnischer Aufnahmen kartieren beziehungsweise abschätzen lässt. Da die Auswertung innerhalb etablierter Kulturbestände aufgrund der geringen spektralen Unterschiede zwischen Kulturpflanzen und AFu nur eingeschränkt möglich war, liegt der Schwerpunkt der folgenden Auswertung auf Befliegungen der nicht bestellten beziehungsweise brachliegenden Fläche und auf Zeitpunkten während oder nach der Bodenbearbeitung (Tabelle 5).

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den fernerkundlichen Aufnahmen und den gezählten AFu-Pflanzen zu untersuchen, wurden die Indizes NDVI, VARI und ExG berechnet. Die NDVI-Ergebnisse geben Hinweise auf Unterschiede in der Vegetationsaktivität und der räumlichen Heterogenität der Bestände. Ein zunehmender NDVI kann auf eine höhere Vegetationsaktivität hinweisen. VARI und ExG basieren im Gegensatz zum NDVI ausschließlich auf Informationen aus dem sichtbaren Spektralbereich und heben grüne Vegetation gegenüber weniger stark oder nicht bewachsenen Bereichen hervor. Höhere Werte weisen dabei grundsätzlich auf eine stärkere Ausprägung grüner Vegetation hin. (Gitelson et al., 2002; Montero et al., 2023; Rouse et al., 1974; Woebbecke et al., 1995)

Tabelle 5: Übersicht über Termine an denen Indizes berechnet wurden inklusive der Kultur auf der Fläche zu dem Zeitpunkt.

Datum	Drohne	Kultur
25.03.2022	M2P	Vor AB-Aussaat
08.02.2023	M2P	ZWF (Variante 5-8)
23.10.2023	M2P und P4M	Brache nach SoGe und WW
08.03.2024	M2P	Brache nach SoGe und WW
24.10.2024	M3M + P4M	WRa

Die ersten Testflüge wurden am 16.06.21 durchgeführt und es wurden verschiedene Flughöhen und Aufnahmewinkel erprobt. Die Ackerfuchsschwanzähre ist dunkel verfärbt, insbesondere bei einer schrägen Betrachtung von der Seite ist dies erkennbar. Bei einer senkrechten Aufnahme von oben erscheint die Ähre eher bräunlich und ist schwer von der umgebenden Vegetation zu unterscheiden. Die sehr sonnigen Witterungsbedingungen in Kombination mit dem Kulturstadium BBCH 70–75 führten zu einer unzureichenden Differenzierung, sodass die photogrammetrische Weiterverarbeitung der Aufnahmen nicht durchgeführt werden konnte.

Im Jahr 2022 erfolgten weitere Befliegungen am 25.03., 19.05., 30.08. und 28.11.2022. Dabei wurden Aufnahmen vor der Aussaat der Ackerbohnen, während der Entwicklung des Ackerbohnenbestandes, nach der Ernte und während der anschließenden Etablierung der Folgekulturen durchgeführt. Die weiterführende Auswertung der Vegetationsindizes erfolgte insbesondere für den Termin am 25.03.2022. Dem folgt die Darstellung des Orthomosaiks vom 19.05. Die weiteren Befliegungstermine werden nicht dargestellt, sind jedoch im digitalen Anhang im QGIS-Projekt enthalten.

Am 25.03.2022 wurden die Vegetationsindizes VARI und ExG berechnet und der Zusammenhang mit den erfassten AFu-Pflanzenzahlen untersucht.



Abbildung 27: Orthomosaike der Versuchsfläche vom 25.03.2022 dargestellt als von links nach rechts: RGB, VARI, ExG.

Bei der visuellen Betrachtung der Aufnahmen waren weder im RGB-Orthomosaik noch in den aus den RGB-Aufnahmen berechneten VARI- und ExG-Orthomosaiken eindeutige Bereiche mit grünem Bewuchs erkennbar, die den erfassten AFu-Pflanzen eindeutig hätten zugeordnet werden können (Abbildung 27). Einzelne hellere Bereiche im ExG-Orthomosaik ließen bei genauerer Betrachtung keinen erkennbaren Pflanzenbewuchs erkennen und konnten daher nicht eindeutig AFu zugeordnet werden.

Zwischen den berechneten Indizes und den AFu-Zählungen zeigten sich Unterschiede in den linearen Zusammenhängen (Abbildung 28, Abbildung 29). Bei der Betrachtung der Indexwerte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte wies ExG mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}6358$ einen höheren Wert auf als der VARI mit $R^2 = 0{,}3881$. Die Auswertung auf Ebene der einzelnen Boniturpunkte beziehungsweise des 2-m-Umkreises zeigte dabei höhere Bestimmtheitsmaße als die Berechnung der Indizes über die gesamte Variante.

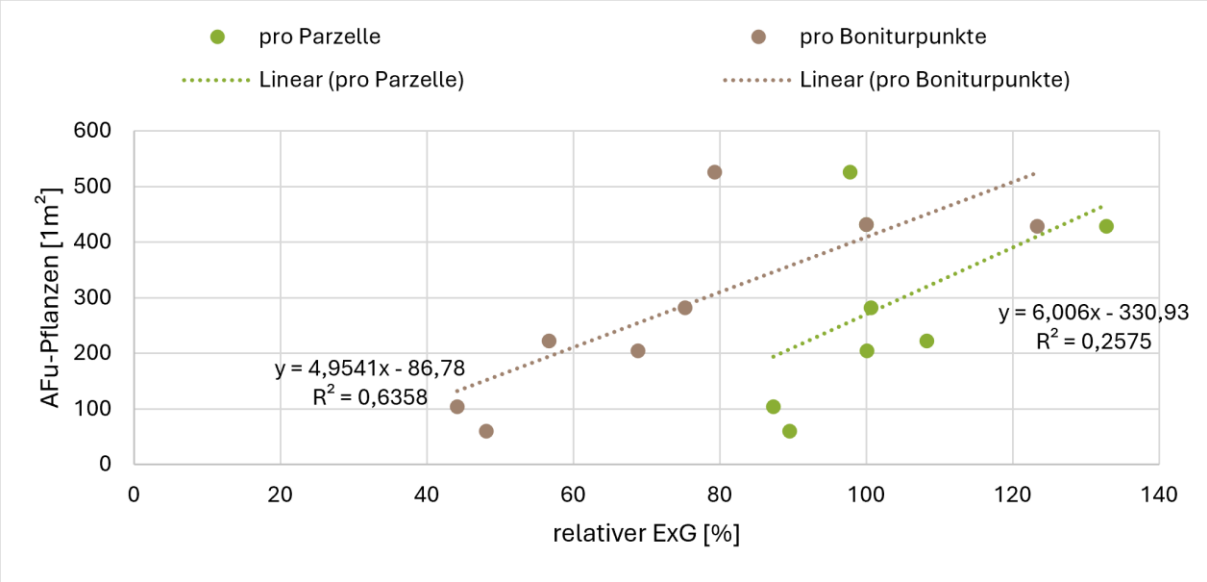


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen dem relativen ExG und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 25.03.2022. Dargestellt sind die ExG-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten ExG-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

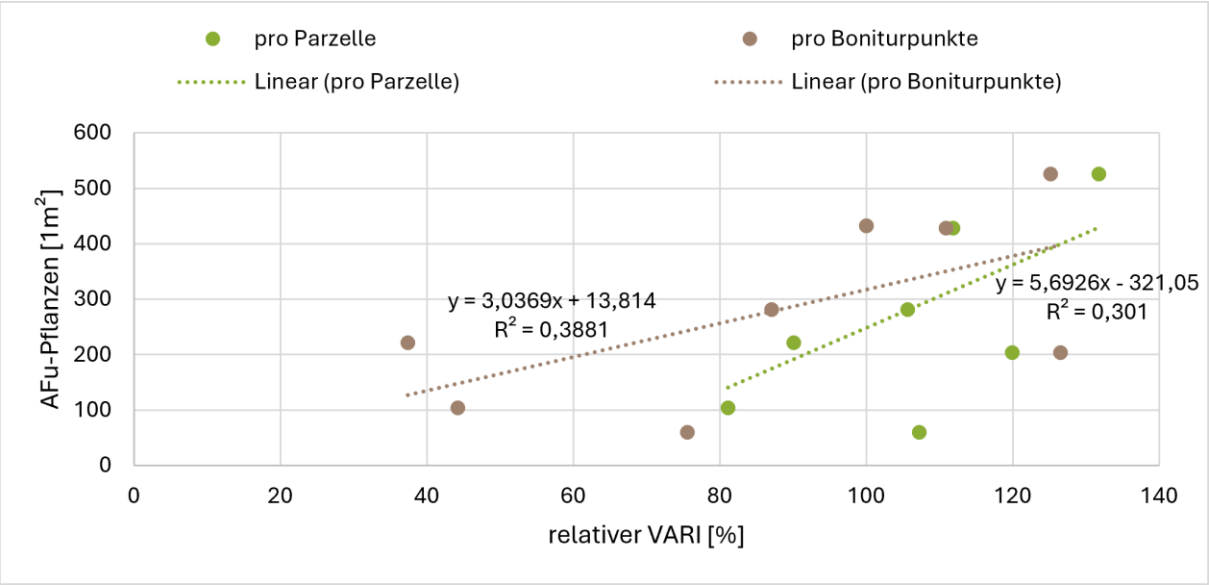


Abbildung 29: Zusammenhang zwischen dem relativen VARI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 25.03.2022. Dargestellt sind die VARI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten VARI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

Die Drohnenaufnahmen vom 19.05.2022 zeigen neben den Ackerbohnenpflanzen einen unterschiedlich stark ausgeprägten Unkrautbesatz (Abbildung 31). Dieser ist nicht durch Daten belegt, sondern nur visuell auf dem Orthomosaik festgestellt worden. Eine eindeutige Bestimmung der Unkraut/-Grasart ist anhand der Drohnenaufnahme nicht möglich. Die Betrachtung der Pflanzen aus der Vogelperspektive und die Auflösung reichen für eine sichere Artbestimmung nicht aus (Abbildung 30). Hierfür wäre eine genaue Betrachtung der Pflanzen direkt vor Ort durch Experten erforderlich.



Abbildung 30: Beispielhafter Auszug aus dem Orthomosaik vom 19.05.2022.



Abbildung 31: Orthomosaik der Versuchsfläche im Ackerbohnenbestand durch den Überflug am 19.05.2022.

Im Jahr 2023 wurden Drohnenbefliegungen am 08.02., 07.06. und 23.10.2023 durchgeführt. Im Februar und Oktober wurde die unbestellte Versuchsfläche erfasst, wobei im Februar noch die im Dezember gewalzte Zwischenfrucht sichtbar war, während im Oktober bereits erste Bodenbearbeitungsschritte nach der Getreideernte erfolgt waren. Die Aufnahme im Juni erfolgte dagegen innerhalb der etablierten Getreidebestände. Die weiterführende Auswertung konzentrierte sich daher auf die Befliegungen im Februar und Oktober.

Der Drohnenflug am 08.02.2023 lieferte sowohl eine RGB- als auch eine multispektrale Aufnahme, aus der der NDVI berechnet wurde. Die NDVI-Darstellung ermöglicht anhand der Farbskala eine räumliche Differenzierung der Vegetationsaktivität. Innerhalb der Versuchsfläche waren Bereiche mit unterschiedlich ausgeprägter Vegetationsaktivität erkennbar. In der NDVI-Darstellung werden diese Bereiche durch höhere bzw. hellere NDVI-Werte hervorgehoben. (Abbildung 34)

Vor der Aufnahme war auf der Fläche eine Zwischenfrucht etabliert, die im Dezember gewalzt worden war. Am Tag des Drohnenfluges erfolgte die Applikation von Glyphosat. Die im NDVI erkennbaren Bereiche mit erhöhter Vegetationsaktivität können daher auf noch vorhandene beziehungsweise nicht vollständig abgestorbene Zwischenfruchtbestände zurückzuführen sein. Aufgrund des bekannten hohen AFu-Besatzes auf der Versuchsfläche kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die erfasste Vegetationsaktivität teilweise auch durch AFu oder andere Ungräser verursacht wurde. Eine eindeutige Zuordnung der im NDVI erfassten Vegetation zu AFu war anhand der Aufnahme allein nicht möglich.

Die NDVI-Darstellung zeigt eine räumlich heterogene Bodenbedeckung innerhalb der Varianten 5 bis 8. Im nördlichen Bereich der Fläche waren insgesamt geringere Aktivität erkennbar, während insbesondere im mittleren und südlichen Bereich lokal deutlich höhere NDVI-Werte auftraten. Die Mittelwerte der NDVI-Werte der dargestellten Varianten wichen hingegen nur geringfügig voneinander ab (Abbildung 32). Damit war die mittlere Vegetationsaktivität zwischen den Varianten vergleichbar, obwohl innerhalb der Fläche deutliche räumliche Unterschiede erkennbar waren.

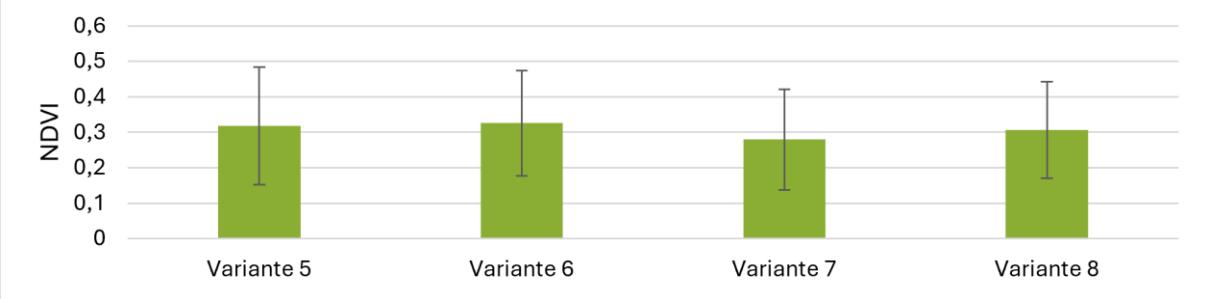


Abbildung 32: NDVI-Werte der Zwischenfrucht in den Varianten 5-8 am 08.02.2023. Dargestellt sind Mittelwerte sowie die Streuung.

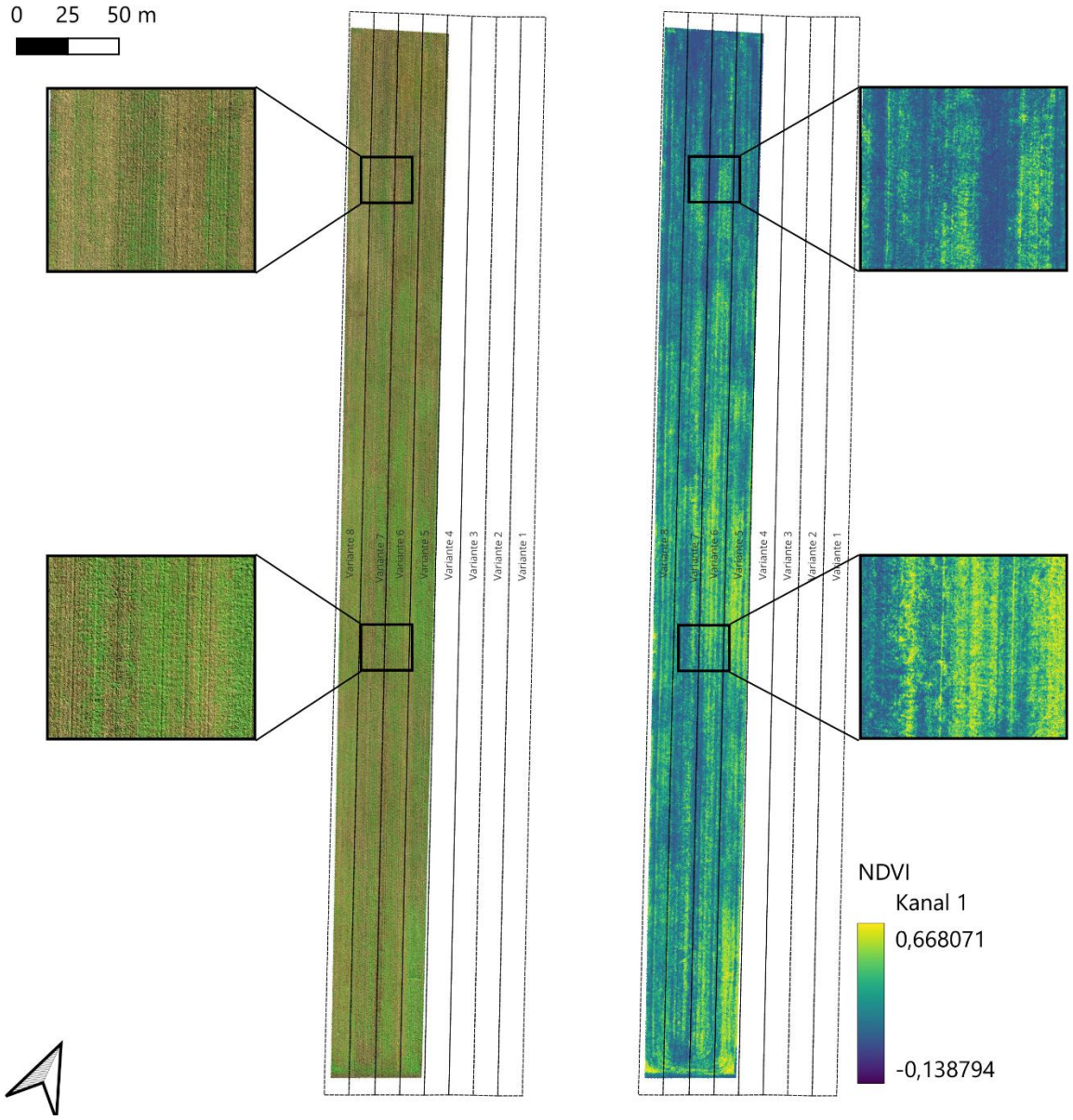


Abbildung 34: Orthomosaik der Versuchsfläche vor der Sommergerstenaussaat in den gewalzten Zwischenfruchtbestand durch den Überflug am 08.02.2023. Links: RGB, Rechts: NDVI inklusive Farbskala.

Zum Zeitpunkt der Aufnahme am 07.06.2023 war in den Varianten 1 bis 4 Winterweizen und in den Varianten 5 bis 8 Sommergerste etabliert. Im Winterweizen waren bei genauer Betrachtung vereinzelt über den Bestand hinausragende, bräunlich gefärbte Strukturen erkennbar, die möglicherweise überständigen AFu-Ähren zugeordnet werden können (Abbildung 35). Eine eindeutige Identifizierung anhand der Orthomosaikaufnahme war nicht möglich, aber am 08.06. wurde Abbildung 33 aufgenommen, welches die Ackerfuchsschwanzähren klar im Weizenbestand zeigt.



Abbildung 33: Handyfoto vom 08.06.2023 von den Varianten 1 bis 4.



Abbildung 35: Orthomosaik der Versuchsfläche vom 07.06.2023. Variante 1-4: Winterweizen, Variante 5-8: Sommergerste

Im Rahmen der Drohnenbefliegung der nicht bestellten Versuchsfläche am 23.10.2023 wurden der NDVI, der VARI sowie der ExG berechnet. Zu diesem Zeitpunkt wurde ein sehr hoher AFu-Besatz geschätzt. Anhand der dargestellten Indexkarten lassen sich visuelle Unterschiede zwischen den Varianten erkennen (Abbildung 36). Insbesondere die ExG- und NDVI-Werte weisen auf Unterschiede hinsichtlich der vorhandenen grünen beziehungsweise vegetationsaktiven Biomasse hin. Auffällig sind dabei höhere Indexwerte in den Varianten 6 bis 8 sowie niedrigere Werte insbesondere in Variante 5, aber auch in den Varianten 3 und 4. Die Varianten 1 und 2 weisen dagegen wieder höhere Indexwerte auf.

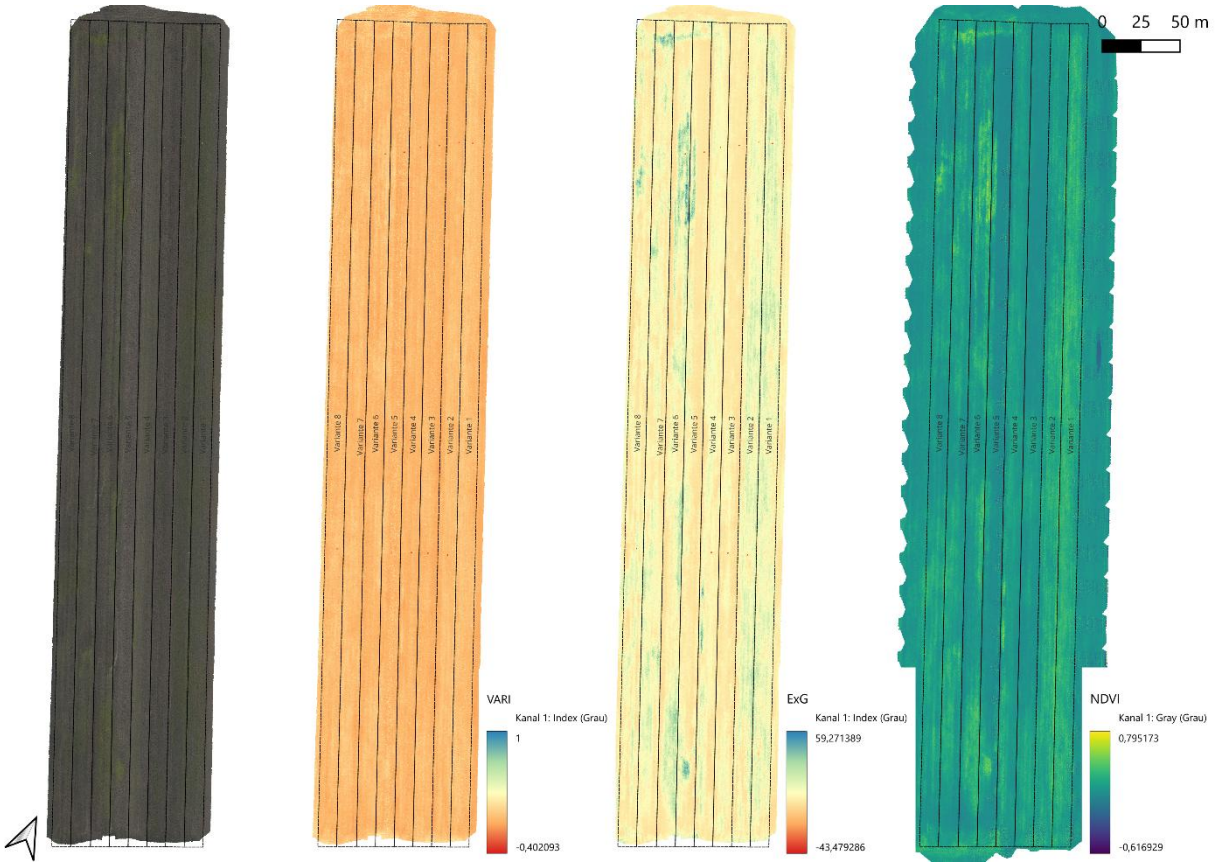


Abbildung 36: Orthomosaik der Versuchsfläche durch den Überflug am 23.10.2023 nach der Getreideernte. Von links nach rechts: RGB, VARI, ExG, NDVI

Werden die NDVI-Werte gemittelt pro Variante betrachtet zeigen sich Unterschiede (Abbildung 37). Die Werte schwanken zwischen 0,1 und 0,25. Dabei hat Variante 1 den höchsten NDVI und Variante 3 und 5 den geringsten.

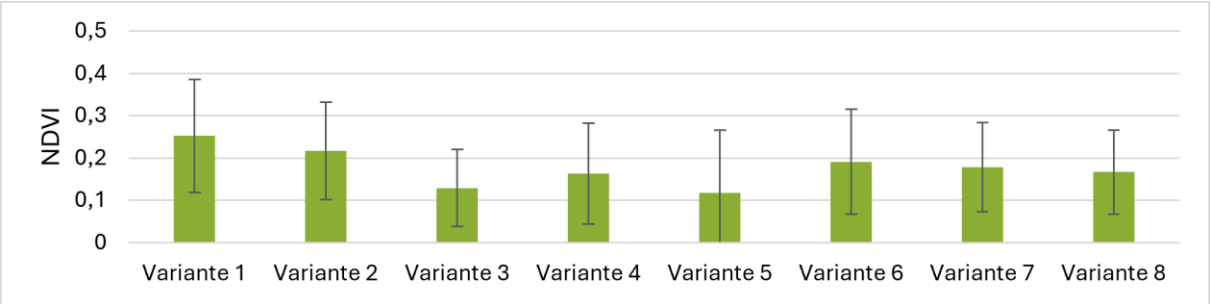


Abbildung 37: NDVI-Werte der nicht bestellten Fläche am 23.10.2023. Dargestellt sind Mittelwerte sowie die Streuung.

Der Zusammenhang zwischen den aus den Drohnenaufnahmen berechneten Vegetationsindizes und den bonitierten AFu-Pflanzenzahlen wird in den folgenden Abbildungen dargestellt (Abbildung 38, Abbildung 39, Abbildung 40). Hierfür wurden die Boniturdaten zum einen mit den Indexwerten innerhalb eines Radius von 2 m um den jeweiligen Boniturpunkt und zum anderen gemittelt mit den über die gesamte Variante gemittelten Indexwerten in Beziehung gesetzt. Über alle drei Indizes hinweg weisen die Zusammenhänge mit den gemittelten Variantenwerten höhere Bestimmtheitsmaße auf als die Betrachtung der spezifischen Boniturpunkte.

Beim Vergleich der drei Indizes weist der NDVI mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0{,}7652$ die stärkste lineare Beziehung zu den bonitierten AFu-Pflanzenzahlen auf. Der ExG weist mit $R^2 = 0{,}5529$ einen geringeren Zusammenhang auf, während für den VARI mit $R^2 = 0{,}373$ das geringste Bestimmtheitsmaß ermittelt wurde.

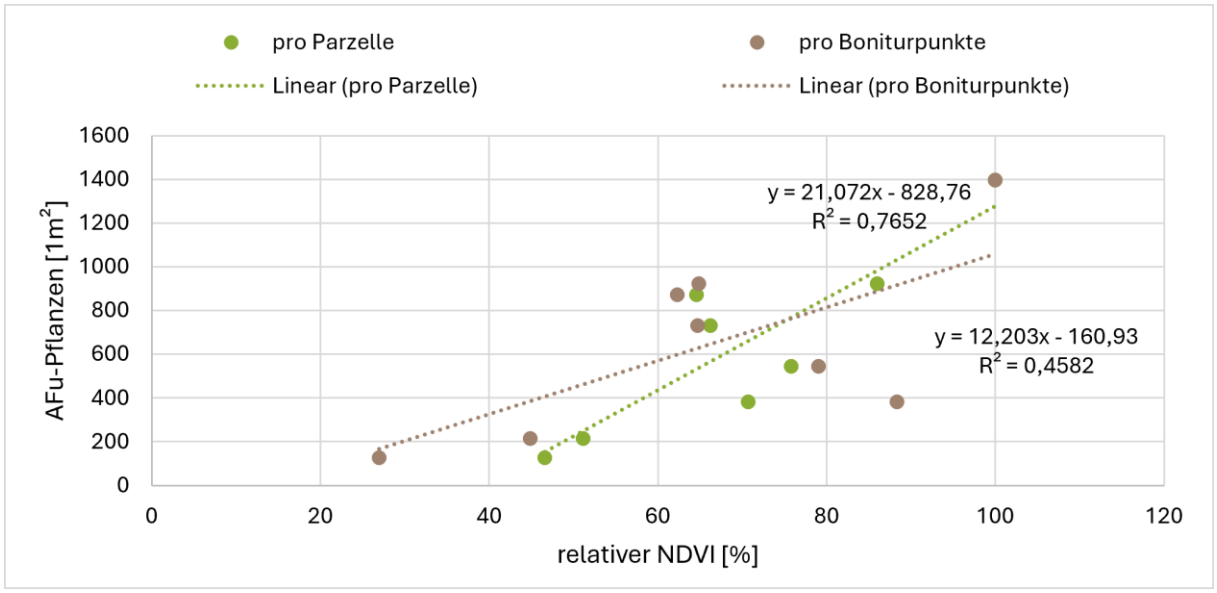


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen dem relativen NDVI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 23.10.2023. Dargestellt sind die NDVI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten NDVI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

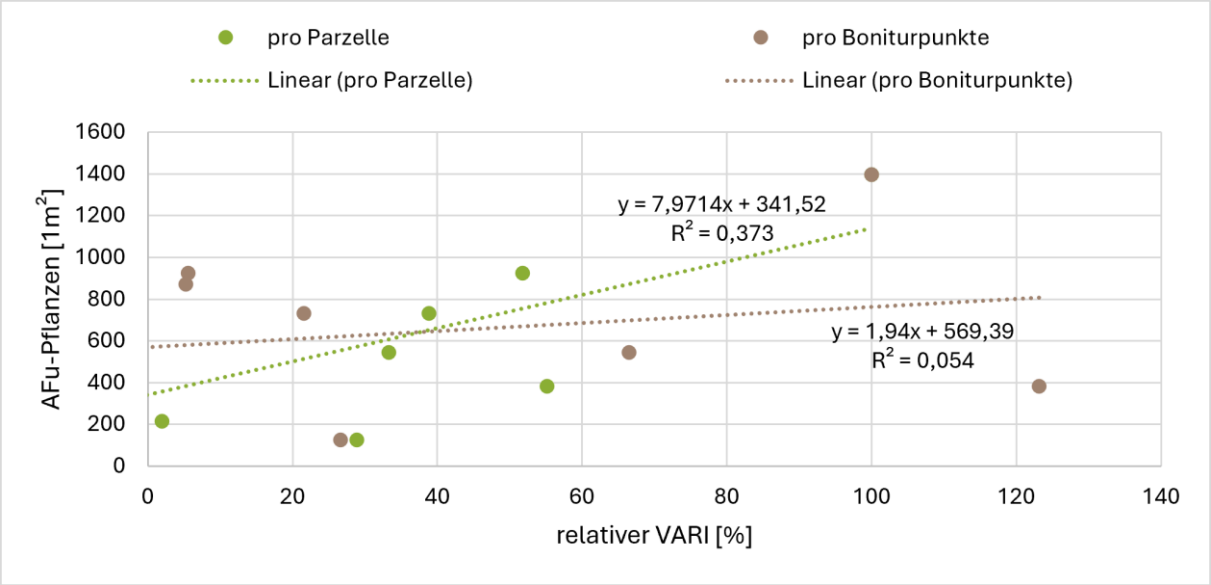


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen dem relativen VARI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 23.10.2023. Dargestellt sind die VARI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten VARI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

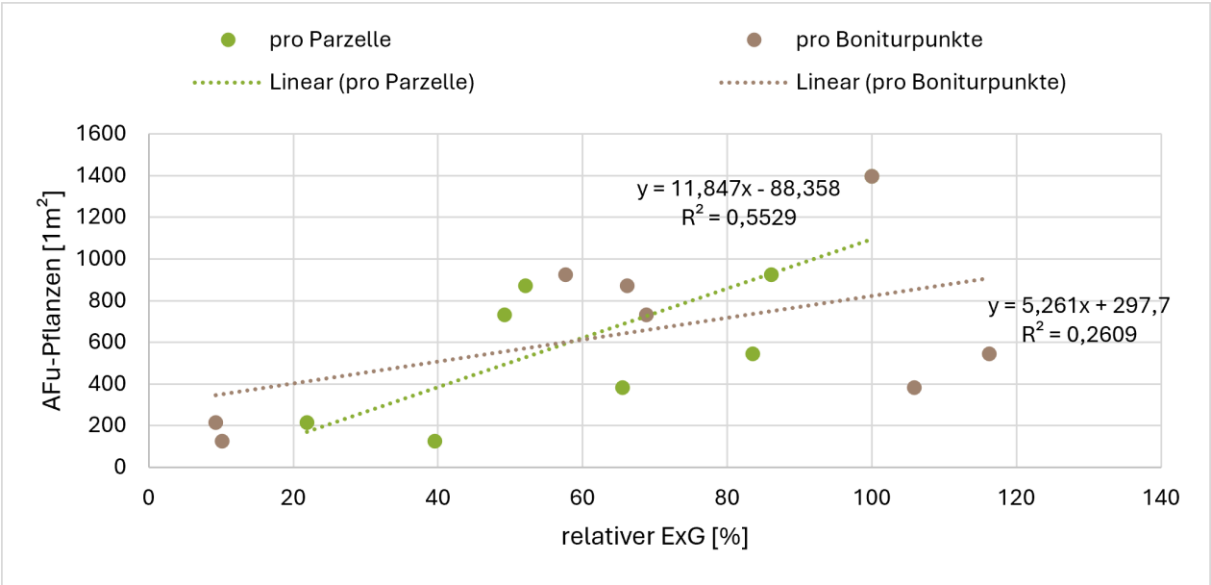


Abbildung 40: Zusammenhang zwischen dem relativen ExG und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 23.10.2023. Dargestellt sind die ExG-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten ExG-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

Im Jahr 2024 wurden drei weitere Drohnenflüge durchgeführt. Der erste Flug fand am 08.03.2024 statt. Zu diesem Zeitpunkt lag die Versuchsfläche brach. Nach der Aussaat der Sommergerste erfolgte im Juni 2024 ein weiterer Drohnenflug, welcher im Folgenden nicht dargestellt wird, da keine relevanten Werte hieraus gezogen werden konnten. Nach der Ernte der Sommergerste und der anschließenden Aussaat des Winterrapses wurde am 24.10.2024 ein letzter Flug durchgeführt.

Am 08.03.2024 wurden erneut die drei Vegetationsindizes NDVI, VARI und ExG berechnet und mit den Boniturdaten in Beziehung gesetzt. Die Darstellung der Indexwerte mittels Farbskalen in den Orthomosaiken zeigt sowohl zwischen als auch innerhalb der Parzellen Unterschiede (Abbildung 41). Insbesondere die NDVI-Werte weisen auf lokal unterschiedlich stark ausgeprägte grüne Vegetation hin, was teilweise mit Bereichen höherer ExG-Werte übereinstimmt. In Variante 3 zeigen sich insgesamt geringere Indexwerte, während die Varianten 2 und 4 über weite Bereiche erhöhte Indexwerte aufweisen. In kleineren Bereichen der Varianten 6 bis 8 treten ebenfalls höhere Werte auf. Die räumliche Verteilung der Indexwerte verdeutlicht die ausgeprägte Heterogenität der Vegetation auf der zu diesem Zeitpunkt brachliegenden Versuchsfläche.

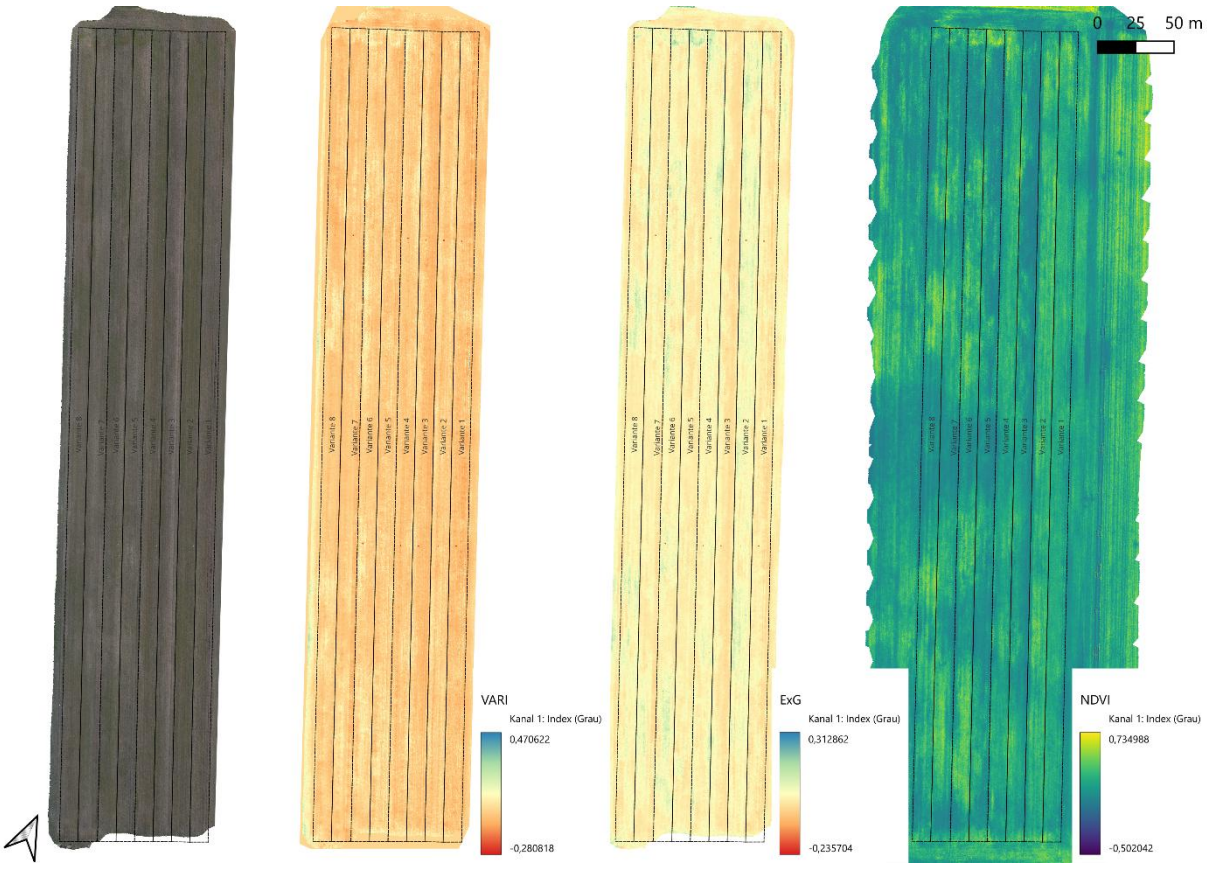


Abbildung 41: Orthomosaike der verschiedenen Darstellungsweisen inkl. Legende für die Indizes vom 08.03.2024. Von links nach rechts: RGB, VARI, ExG, NDVI.

Bei Betrachtung der über die jeweiligen Varianten gemittelten NDVI-Werte zeigen sich dagegen nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten (Abbildung 42). Gleichzeitig weisen die Werte eine breite Streuung auf, die durch die Standardabweichung dargestellt wird. Die kleinräumig heterogene Verteilung der NDVI-Werte entlang der einzelnen Varianten gleicht sich bei der Mittelwertbildung weitgehend aus, sodass auf Ebene der Varianten im Mittel nur geringe Unterschiede erkennbar sind.

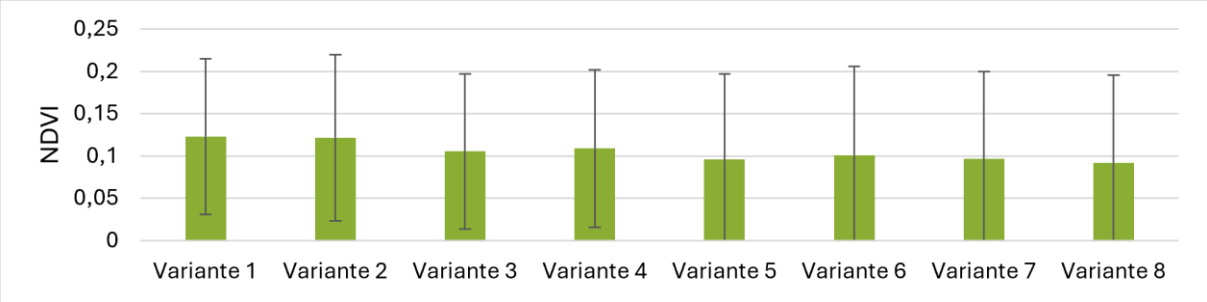


Abbildung 42: NDVI-Werte der Brache in den Varianten 1 bis 8 am 08.03.2024. Dargestellt sind Mittelwerte sowie die Streuung.

Werden die drei berechneten Indizes mit den Boniturdaten in Beziehung gesetzt, zeigen sich Unterschiede zwischen den beiden Betrachtungsebenen (Abbildung 43, Abbildung 44, Abbildung 45). Hierfür wurden die Boniturergebnisse zum einen mit den Indexwerten innerhalb eines Radius von 2 m um den jeweiligen Boniturpunkt und zum anderen mit den über die gesamte Parzelle gemittelten Indexwerten in Beziehung gesetzt. Für den NDVI und den ExG zeigt sich ein stärkerer Zusammenhang zwischen den Boniturdaten und den über die Parzelle gemittelten Indexwerten. Beim VARI ist dagegen der Zusammenhang zwischen den Indexwerten im 2-m-Radius um den Boniturpunkt und den Boniturergebnissen stärker. Insgesamt weist der NDVI auf Parzellenebene mit $R^2 = 0,5637$ das höchste Bestimmtheitsmaß auf. Es folgt der VARI auf Ebene der Boniturpunkte mit $R^2 = 0,3475$., während der ExG mit $R^2 = 0,1802$ das geringste Bestimmtheitsmaß aufweist.

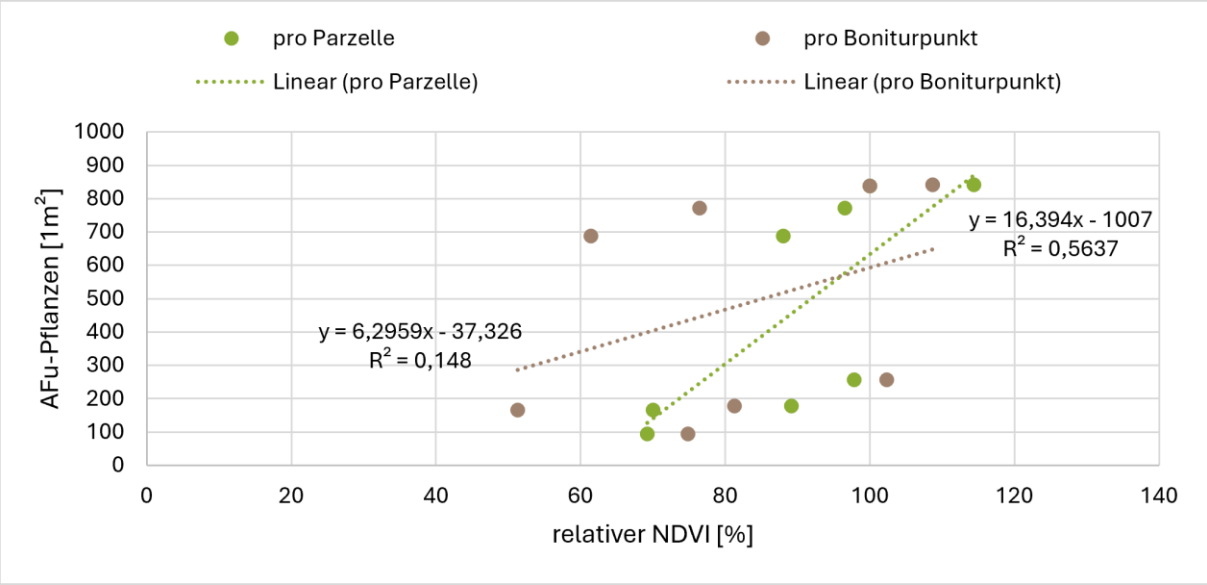


Abbildung 43: Zusammenhang zwischen dem relativen NDVI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 08.03.2024. Dargestellt sind die NDVI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten NDVI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

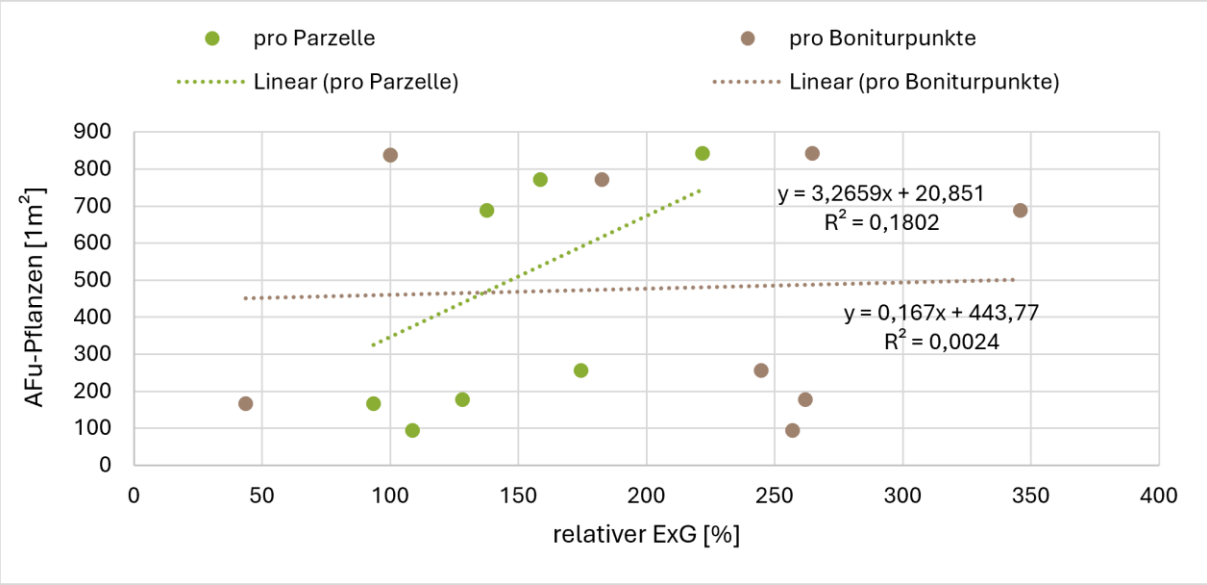


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen dem relativen ExG und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 08.03.2024. Dargestellt sind die ExG-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten ExG-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

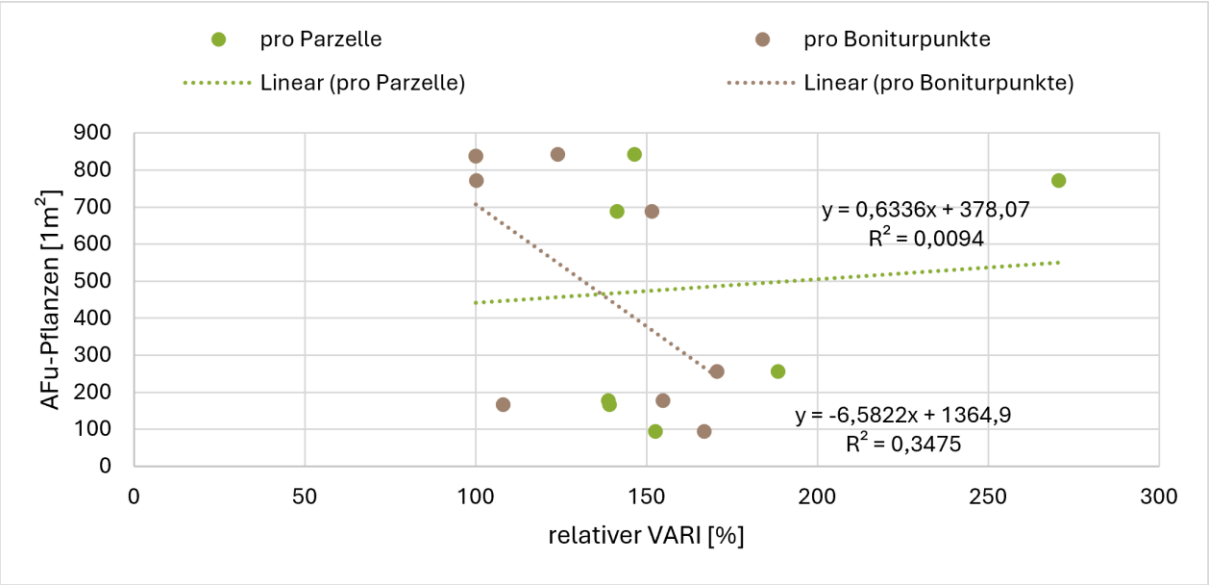


Abbildung 45: Zusammenhang zwischen dem relativen VARI und den absoluten AFU-Pflanzenzahlen am 08.03.2024. Dargestellt sind die VARI-Werte im 2-m-Umkreis der Boniturpunkte sowie die über die gesamte jeweilige Variante berechneten VARI-Werte, jeweils mit linearer Trendlinie und Bestimmtheitsmaß (R^2). Variante 1 wurde als Referenzwert von 100 % gesetzt.

Am 24.10.2024 wurde der aufgelaufene Winterraps mittels multispektraler Drohnenaufnahmen erfasst. Dabei zeigen sich sowohl zwischen als auch innerhalb der einzelnen Parzellen Unterschiede in den NDVI-Werten (Abbildung 46). Insbesondere Variante 5 weist niedrigere NDVI-Werte auf als die übrigen Varianten, während in Variante 4 vergleichsweise hohe Werte festgestellt wurden. Die übrigen Varianten weisen lediglich leichte räumliche Heterogenität auf und bewegen sich hinsichtlich ihrer NDVI-Werte zwischen den beiden genannten Varianten.

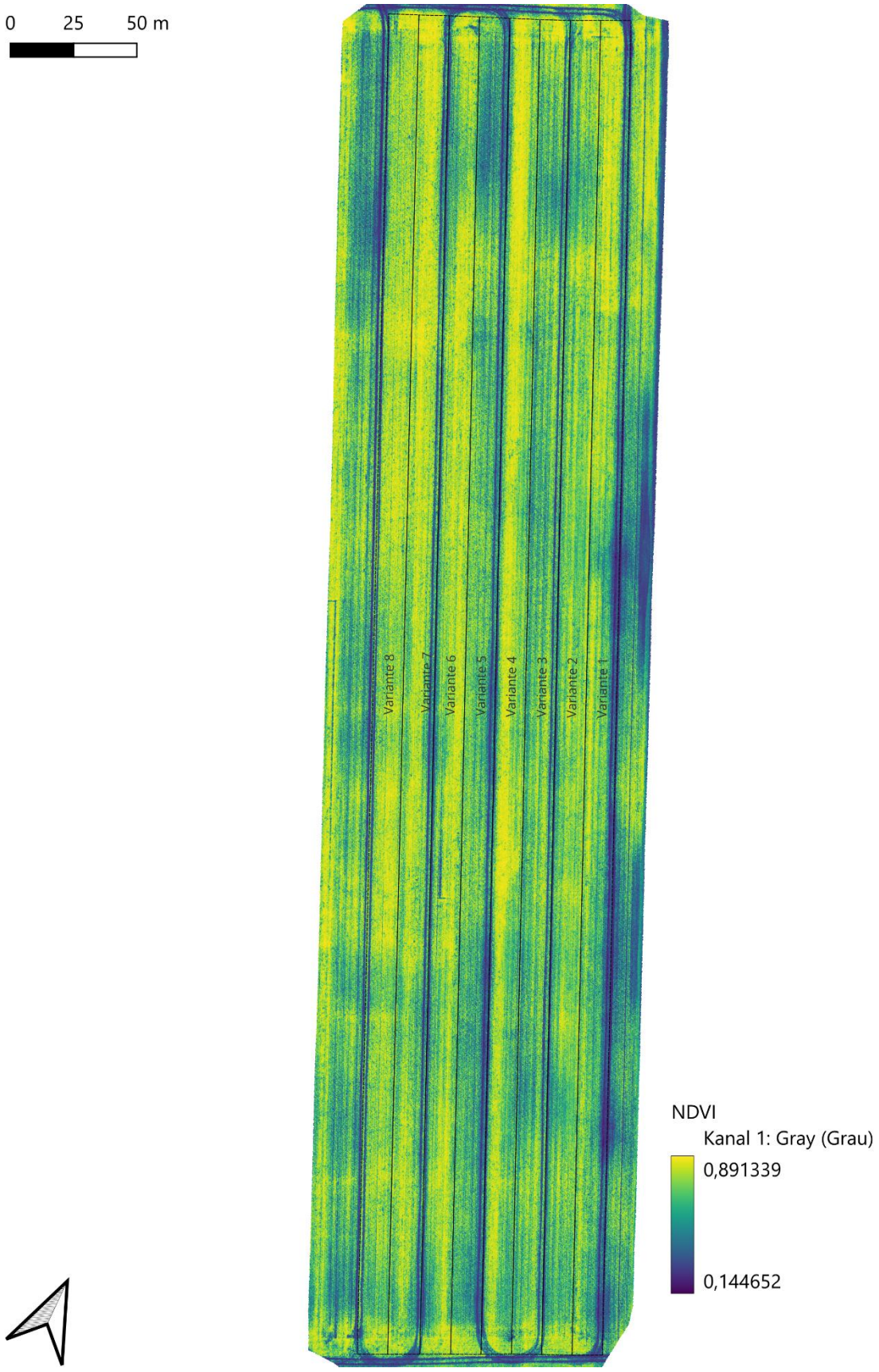


Abbildung 46: Multispektrales Orthomosaik der Versuchsfläche interpretiert als NDVI erstellt durch den Überflug am 24.10.2024 im Winterraps. (M3M)

Bei der Befliegung der Versuchsfläche im Oktober 2024 wurden neben der DJI Mavic 3M auch Aufnahmen mit der DJI Phantom 4 Multispectral durchgeführt. Da beide Drohnen multispektrale Aufnahmen liefern, wurde untersucht, inwieweit sich die aus den jeweiligen Kameradaten berechneten NDVI-Werte voneinander unterscheiden.

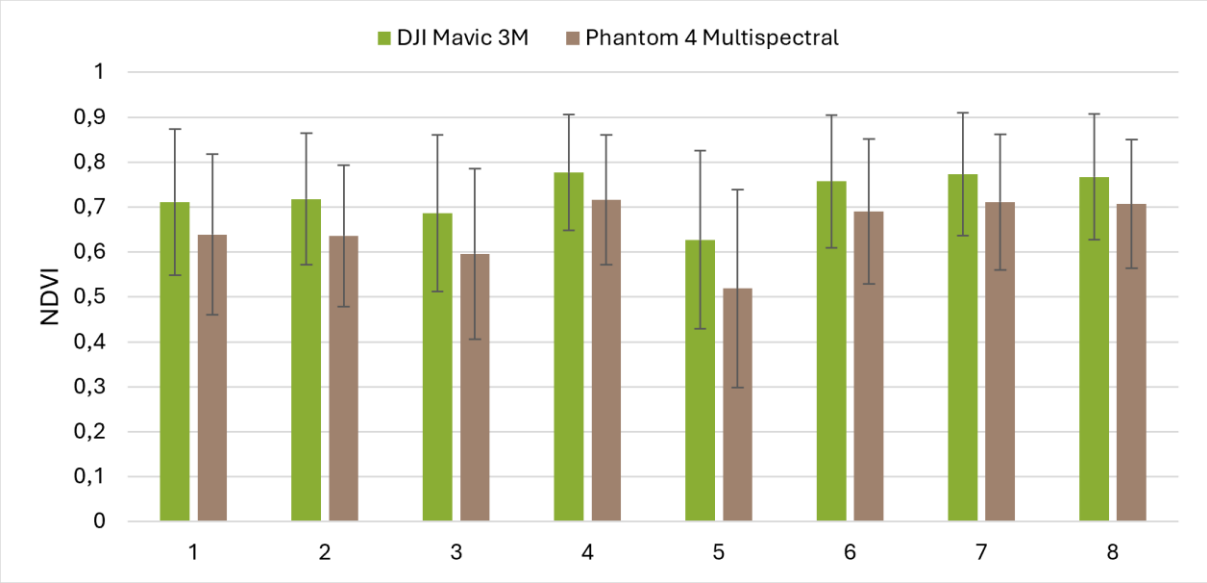


Abbildung 47: NDVI-Index-Vergleich zwischen der DJI Mavic 3M sowie der Phantom 4 Multispectral. Der Drohnenflug fand am 24.10.2024 statt, während Raps auf der Fläche wuchs. Hier werden speziell nur die Parzellenkerne betrachtet. Standardabweichung dargestellt.

Der Vergleich der beiden Kameras zeigt Unterschiede in den berechneten NDVI-Werten (Abbildung 47). Auf Grundlage der Aufnahmen der Mavic 3M wurden durchgehend höhere NDVI-Werte berechnet als auf Grundlage der Aufnahmen der Phantom 4 Multispectral. Die Differenzen liegen im Mittel bei 11,9% höheren Werten der M3M und schwanken zwischen 8,5% und 20,8%.

2.3 KI-Auswertung

Um die Möglichkeiten der Kartierung und Erkennung von AFu in der Kultur wurde CropUpAI im Jahr 2024 beauftragt. Dem Unternehmen wurden zwei Aufnahmen zur Verfügung gestellt. Eine Aufnahme stammt vom 07.06.2023, zu diesem Zeitpunkt wuchs Sommergerste auf der westlichen Hälfte der Versuchsfläche und Winterweizen auf der anderen Hälfte, während zum Zeitpunkt der zweiten Aufnahme am 24.06.2024 über alle Varianten Sommergerste angebaut wurde. Dabei sollte besonders die Erkennung in niedrigen BBCH-Stadien des Getreides in denen Getreide und AFu sich optisch ähneln untersucht werden.

Nach der Auswertung der beiden Jahre 2023 und 2024 durch das KI-Modell von CropUpAI konnte keine verlässliche Übereinstimmung mit den Ackerfuchsschwanzpflanzen festgestellt werden. In der Fläche wurde in den Bereichen mit sehr starkem Ackerfuchsschwanzbefall der AFu erkannt, besonders in dem Datensatz von 2023. Allerdings war diese Erkennung nicht zuverlässig, wie auf dem Datensatz von 2024 ersichtlich wurde, da dort teilweise auch die Fahrgassen miterkannt wurden. Außerdem ist ein Teil der Bereiche mit erkannten AFu-Pflanzen nur heller gefärbt und lassen visuell keine AFu-Pflanzen erkennen. (Abbildung 48)

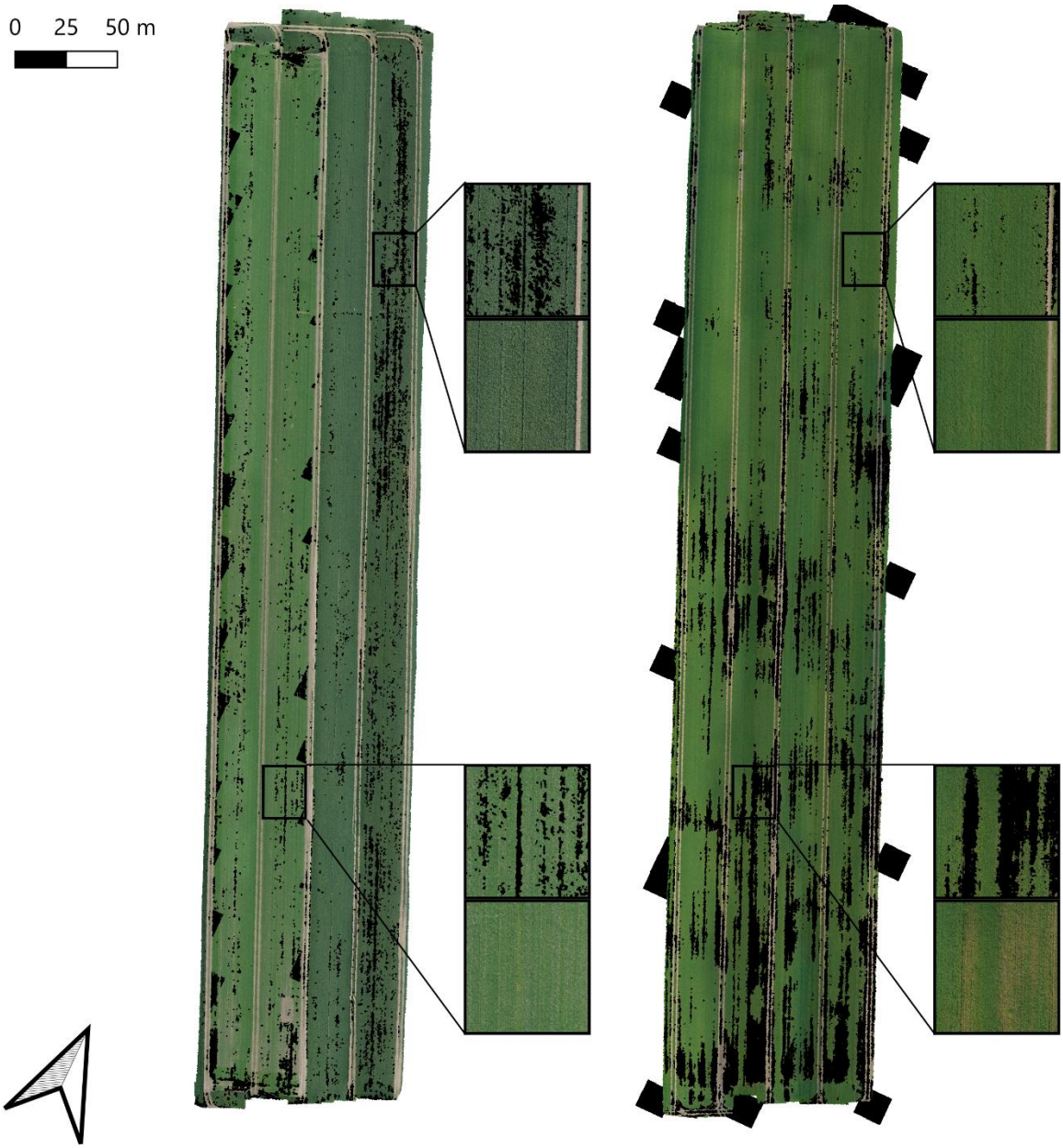


Abbildung 48: Ergebnisse von CropUpAi. Schwarze Markierungen zeigen den berechneten Ackerfuchsschwanzbesatz. Links: 07.06.2023; Rechts: 24.06.2024.

2.4 Ertrag

Die vorliegenden Ertragsergebnisse wurden erhoben, um eine zusätzliche Einschätzung zu ermöglichen. Im Folgenden werden die Ertragsdaten pro Parzelle beschrieben und in Zusammenhang mit der jeweiligen Bodenbearbeitung der Variante gebracht.

Bei der Ernte des Winterweizens 2021 lagen die Erträge der Varianten zwischen etwa 8,0 und 9,6 t/ha (Abbildung 49). Den höchsten Winterweizenertrag erreichte Variante 3 mit rund 9,6 t/ha, die eine mischende Bodenbearbeitung mit Scheinbestellung umfasste. Variante 1 mit mischender Bodenbearbeitung ohne Scheinbestellung erreichte etwa 9,1 t/ha Winterweizen. Den geringsten Ertrag erzielte Variante 8 mit rund 8,0 t/ha Winterweizen, die lockernd bearbeitet und mit einer Scheinbestellung geführt wurde.

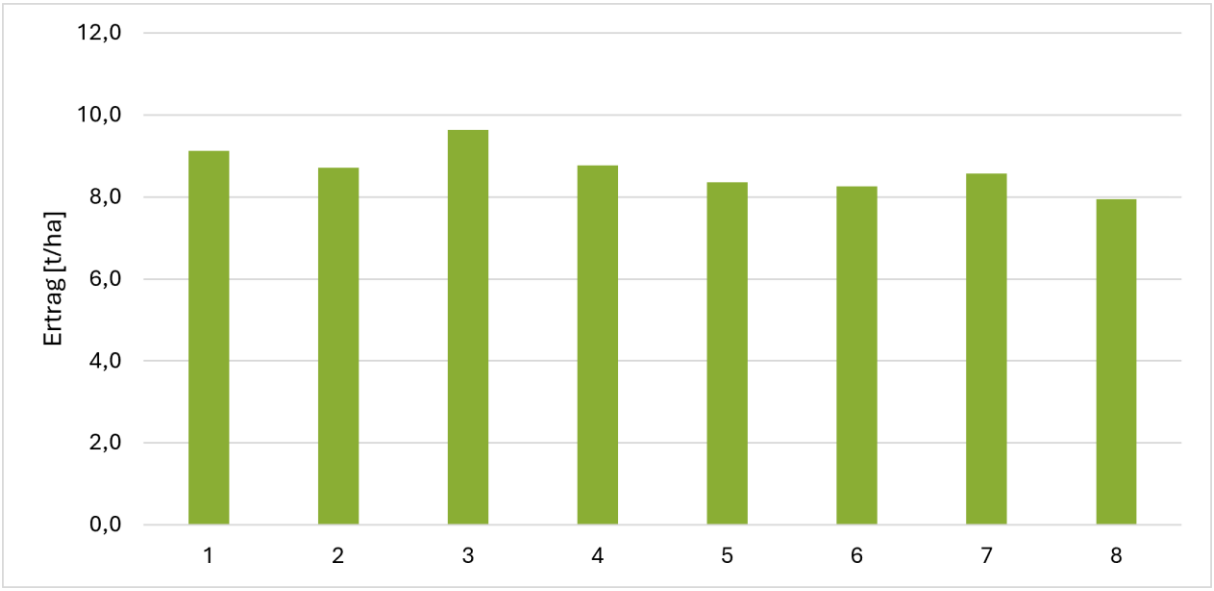


Abbildung 49: Ertragsergebnisse des Winterweizens pro Parzelle im Jahr 2021. Hochgerechnet von den Parzellen auf t/ha.

Auch bei der Ernte der Sommergerste 2024 zeigte sich keine einheitliche Rangfolge der Bodenbearbeitungsstrategien. Die Erträge lagen zwischen etwa 4,1 und 5,5 t/ha Sommergerste (Abbildung 50). Variante 4 mit lockernder Bodenbearbeitung und Scheinbestellung innerhalb der betriebsüblichen Fruchtfolge erreichte mit rund 5,5 t/ha Sommergerste den höchsten Ertrag. Variante 8, ebenfalls mit lockernder Bodenbearbeitung und Scheinbestellung, jedoch innerhalb der angepassten Fruchtfolge, erreichte etwa 5,1 t/ha Sommergerste. Demgegenüber lag Variante 3 mit einer mischenden Bodenbearbeitung und Scheinbestellung bei lediglich rund 4,1 t/ha Sommergerste.

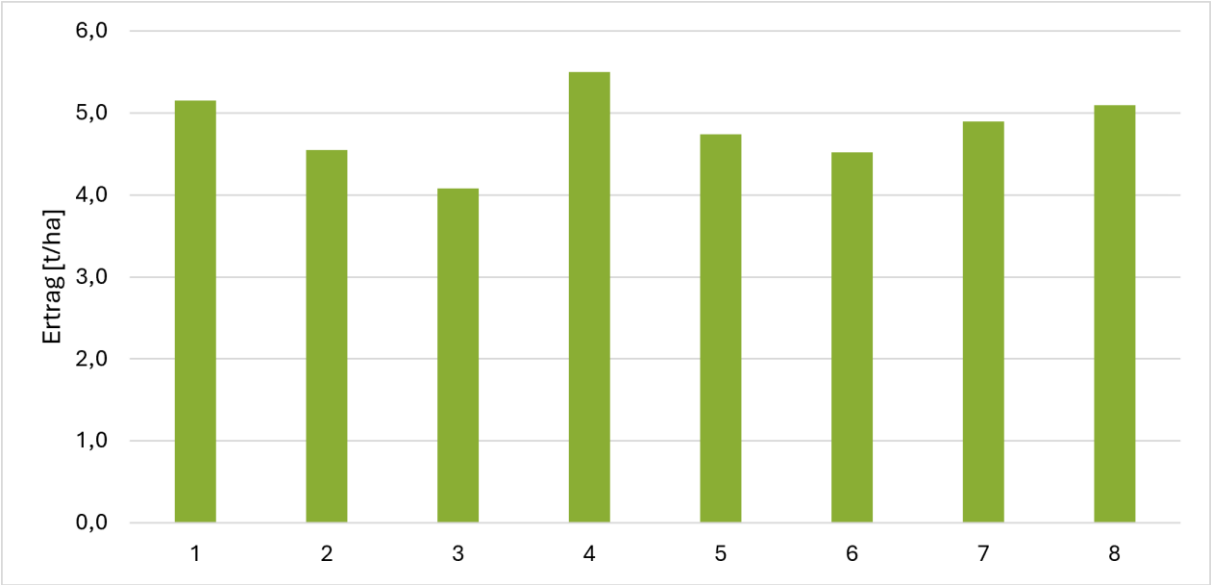


Abbildung 50: Ertragsergebnisse der Sommergerste pro Parzelle im Jahr 2024. Hochgerechnet von den Parzellen auf t/ha.

Bei der Ernte des Winterrapses 2025 bewegten sich die Erträge zwischen etwa 2,4 und 4,0 t/ha Winterraps (Abbildung 51). Zu den ertragsstärkeren Varianten gehörten Variante 4 und Variante 7 mit jeweils rund 4,0 t/ha Winterraps. Während Variante 4 der lockernden Bodenbearbeitung mit Scheinbestellung innerhalb der betriebsüblichen Fruchtfolge entsprach, wurde Variante 7 innerhalb der angepassten Fruchtfolge mischend bearbeitet und ebenfalls mit einer Scheinbestellung geführt. Variante 5 mit mischender Bodenbearbeitung ohne Scheinbestellung erreichte etwa 3,0 t/ha Winterraps, während Variante 8 mit lockernder Bodenbearbeitung und Scheinbestellung mit rund 2,4 t/ha Winterraps den geringsten Ertrag aufwies.

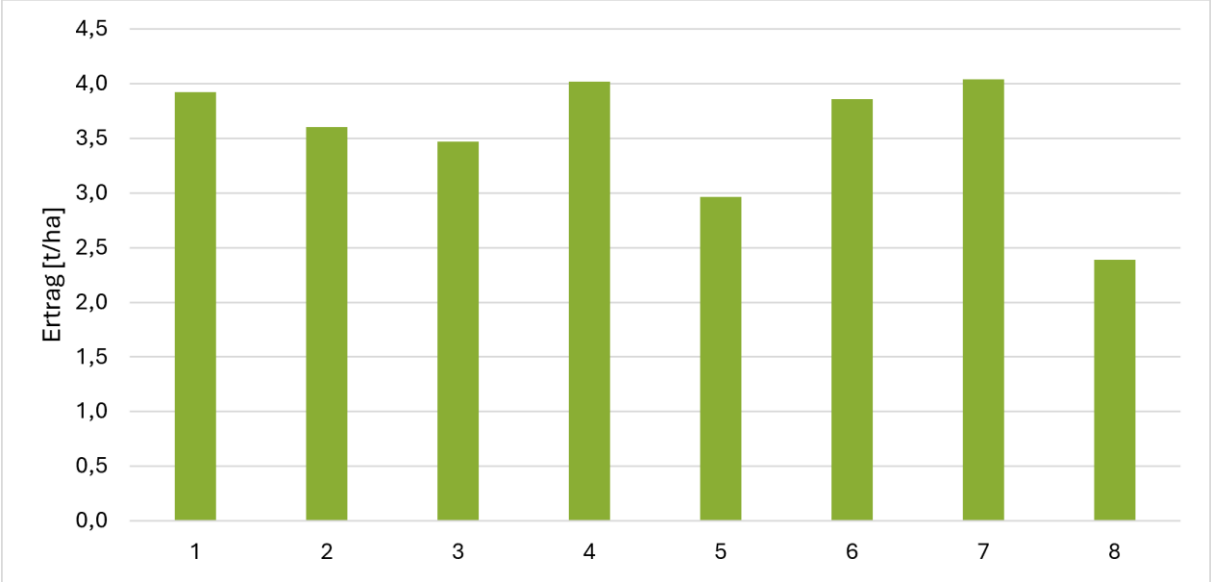


Abbildung 51: Ertragsergebnisse des Winterrapses pro Parzelle im Jahr 2025. Hochgerechnet von den Parzellen auf t/ha.

Über die betrachteten Versuchsjahre hinweg wechselte die ertragliche Rangfolge der Varianten deutlich. Besonders sichtbar wird dies bei Variante 3. Während diese Variante bei der Winterweizenernte 2021 mit rund 9,6 t/ha den höchsten Ertrag erzielte, lag sie bei der Sommergerstenernte 2024 mit etwa 4,1 t/ha am unteren Ende des Ertragsspektrums. Umgekehrt erreichte Variante 4 bei der Sommergerstenernte 2024 mit rund 5,5 t/ha sowie bei der Winterrapsernte 2025 mit etwa 4,0 t/ha jeweils ein vergleichsweise hohes Ertragsniveau.

2.5 Resistenzuntersuchungen

Im Rahmen des Versuchs wurden zu zwei Zeitpunkten AFu an verschiedenen Punkten der Fläche entnommen und auf Herbizidresistenzen getestet. Die ersten Proben wurden zu Beginn des Versuchs aus der Kultur Winterweizen am 23.07.2021 entnommen. Die zweiten Proben folgten am 28.08.2023, dies war kurz nach der Ernte des Winterweizens und der Sommergerste. Nachfolgenden sind die Ergebnisse der Tests aufgeführt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Resistenzuntersuchung durch die Firma Agris24 der Ackerfuchsschwanzproben vom 23.07.2021.

Pos.	Gruppe		Herbizid	Wirkung			
				1	2	3	4
A		Kontrolle	unbehandelt				
B	B1	275 g/ha	Broadway	35,0	10,0	35,0	10,0
C	B1	0,33 kg/ha	Atlantis Flex	40,0	0,0	35,0	30,0
D	B2	1,5 l/ha	Maister Power	87,5	55,0	96,0	75,0
E	A-DEN	1,2 l/ha	Axial 50	20,0	10,0	0,0	15,0
F	A-FOP	1,0 l/ha	Agil	60,0	50,0	35,0	62,5
G	A-DIM	0,5 l/ha	Select 240 Ec	96,0	96,0	98,0	98,0
H	A-FOP/DEN	1,2 l/ha	Traxos	40,0	25,0	-	20,0
I	A-DIM	2,5 l/ha	Focus Ultra	35,0	30,0	-	25,0
J	K3	0,3 l/ha	Cadou SC	80,0	82,5	87,5	87,5
K	K3	0,5 l/ha	Cadou SC	93,5	93,5	90,0	85,0

Die Proben im Jahr 2021 wurden aus vier verschiedenen Punkten der Versuchsfläche entnommen, die besonders starken Ackerfuchsschwanzbesatz aufwiesen (siehe Abbildung 52). Diese vier Proben zeigten nur in wenigen Herbiziden Unterschiede (Tabelle 6). Auffallend ist die Wirkung von Maister Power, welcher in drei von vier Proben keine vollkommene Wirkung zeigt, jedoch in Probe drei eine 96% Wirkung aufweist. Gegenteiliges ist in der Behandlung mit Agil sichtbar. In dieser Applikation ist die Wirkung auf Probe drei schlechter als in den anderen drei Proben. Eine weitere Differenz zeigte sich bei dem Herbizid Cadou SC in der Aufwandmenge 0,5 l/ha. Dort hat Probe vier eine verringerte Wirkung des Herbizids gezeigt, im Gegensatz zu

den anderen drei Proben. Der Vergleich zwischen den Aufwandmengen 0,3 l/ha und 0,5 l/ von Cadou SC zeigt, dass die niedrigere Aufwandmenge in drei von vier Proben eine geringere Wirkung hat als die höhere Aufwandmenge und in Probe vier einen vergleichbaren Wirkungsgrad erreicht. Hier ist die Populationsdynamik selbst innerhalb einer kleinen Fläche erkennbar. Es können Proben einzelner Pflanzen sensitiver als die anderen sein, denn bei dem durchgeführten Biotests werden die Wirkstoffe jeweils an einem Topf mit angezogenen Ungräsern geprüft.



Abbildung 52: Die vier Entnahmepunkte für die Resistenzproben am 23.07.2021.

Im Jahr 2023 wurden zwei Proben untersucht, diese zeigten verringerte Wirkungen der meisten Herbizide (Tabelle 7). Über beide Proben hinweg waren stark verringerte Wirkungen in den Herbiziden Broadway, Atlantis Flex, Axial 50, Agil, Traxos und Focus Ultra sichtbar sowie verringerte Wirkungen bei dem Herbizid Maister Power.

Unterschiede zeigten sich bei der Applikation von Select 240 EC, Probe drei zeigte eine vollständige Wirkung während bei Probe vier eine verringerte Wirkung sichtbar wurde. Ähnlich zeigte das Herbizid Nicogan keine Wirkung in Probe vier, während eine 75% Wirkung in Probe drei erzielt wurde.

Tabelle 7: Ergebnisse der Resistenzuntersuchung durch die Firma Agris24 der Ackerfuchsschwanzproben vom 28.08.2023.

Pos.	Gruppe		Herbizid	Wirkung			
				1	2	3	4
A		Kontrolle	unbehandelt				
B	B1	275 g/ha	Broadway	-	-	30,0	20,0
C	B1	0,33 kg/ha	Atlantis Flex	-	-	25,0	30,0
D	B2	1,5 l/ha	Maister Power	-	-	62,5	55,0
E	A-DEN	1,2 l/ha	Axial 50	-	-	10,0	20,0
F	A-FOP	1,0 l/ha	Agil	-	-	45,0	0,0
G	A-DIM	0,5 l/ha	Select 240 Ec	-	-	99,0	77,5
J	A-FOP/DEN	1,2 l/ha	Traxos	-	-	35,0	35,0
H	A-DIM	2,5 l/ha	Focus Ultra	-	-	45,0	35,0
I	B1	1 l/ha	Nicogan	-	-	75,0	0,0
K	A-FOP	0,25 l/ha	Sword	-	-	27,5	0,0

Die Gruppe der Sulfonylharnstoffe ist grundsätzlich von der Resistenz stark betroffen. Typischerweise ist das Präparat Maister Power geringer betroffen, verliert aber von ersten zum zweiten Beprobungszeitpunkt auch an Wirkung. Die Herbizide Agil und Select 240 EC verloren in der Probe vier von 2021 zu 2023 Wirkung, wobei Agil im Jahr 2023 keine Wirkung zeigte, nachdem 2021 noch 62,5% Wirkungserfolg verzeichnet wurden.

Die Resistenzuntersuchungen zeigen im Überblick, dass von nachlassender Wirkung in allen beprobten Herbiziden auszugehen ist. Wobei bereits im Jahr 2021 starke Resistenzen vorlagen. Zudem zeigen sich auch Differenzen innerhalb der Versuchsfläche in der Resistenzstärke des untersuchten Ackerfuchsschwanzes.

3 Diskussion

Im Rahmen eines Feldversuchs von 2020 bis 2024 wurde die Entwicklung der Ackerfuchsschwanzpopulation (AFu) unter verschiedenen ackerbaulichen Strategien untersucht. Im Mittelpunkt stand die Frage, inwieweit unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren und Fruchtfolgen den Populationsanstieg des Ackerfuchsschwanzes über mehrere Anbaujahre beeinflussen, beziehungsweise begrenzen können. Dabei wurde insbesondere betrachtet, wie sich die unterschiedlichen Maßnahmen und deren zeitliche Abfolge auf den Auflauf und die weitere Entwicklung des AFu-Besatzes auswirkten. Ergänzend wurde untersucht, inwieweit sich Unterschiede im AFu-Besatz mithilfe von Drohnenaufnahmen und daraus abgeleiteten Vegetationsindizes erfassen und räumliche Befallsstrukturen abbilden lassen.

Für die Interpretation der Ergebnisse stehen insbesondere folgende Hypothesen im Mittelpunkt:

- Eine lockernde und wenig mischende Bodenbearbeitung führt über mehrere Jahre zu einer Verringerung des AFu-Besatzes, während eine stärker mischende Bodenbearbeitung dagegen zu einer stärkeren Zunahme führt.
- Eine Scheinbestellung mit anschließender Bekämpfung aufgelaufener AFu-Pflanzen kann den AFu-Besatz langfristig reduzieren.
- Eine Fruchtfolge mit einem höheren Anteil an Sommerungen kann die Entwicklung des AFu-Besatzes gegenüber der ortsüblichen, stärker winterungsbetonten Fruchtfolge begrenzen.
- Eine Kombination aus angepasster Fruchtfolge und geeigneter Bodenbearbeitung sollte den stärksten Effekt auf die Begrenzung der AFu-Population haben.

Im Folgenden werden die Ergebnisse vor diesem Hintergrund diskutiert.

3.1 Einfluss von Fruchtfolge und Bodenbearbeitung auf die Entwicklung der Ackerfuchsschwanzpopulation

Über den gesamten Versuchszeitraum zeigte sich eine Zunahme des Besatzes von Ackerfuchsschwanz auf der Fläche. Die Stärke dieser Entwicklung unterschied sich jedoch deutlich. Bereits zu Beginn des Versuchs bestanden Unterschiede in der AFu-Belastung zwischen den Varianten. Am 15.09.2020 lagen die mittlere AFu-Pflanzenzahl zwischen 4,3 und 37,3 Pflanzen pro m². Diese Zählung ist allerdings mit Vorsicht zu interpretieren, weil sie am Anfang der Hauptkeimphase des AFus liegt und sehr wahrscheinlich noch nicht das komplette Ausgangpotenzial des AFus aufgelaufen gewesen ist. Dieses Potenzial lässt sich in der Zählung vom 04.10.2020 deutlicher erkennen. Diese Unterschiede in den Zeitpunkten aber auch zwischen

den Varianten sind bei der Interpretation der weiteren Entwicklung zu berücksichtigen und werden im Rahmen der methodischen Einordnung nochmals ausführlicher betrachtet (Kapitel 3.5).

Die Betrachtung des Gesamttrends und der Residuen zeigt, dass insbesondere die Varianten 3, 5, 6 und 7 einen geringeren Anstieg des AFu-Besatzes aufwiesen, als anhand der allgemeinen Entwicklung über den Versuchszeitraum zu erwarten gewesen wäre. Da sich diese Varianten sowohl hinsichtlich ihrer Ausgangsbelastung als auch hinsichtlich Fruchtfolge und Bodenbearbeitung unterschieden, ließ sich diese Entwicklung jedoch nicht auf eine einzelne der untersuchten Faktoren zurückführen.

Bei den Varianten 5 und 6, welche jeweils mischend bzw. lockernd bearbeitet ohne eine Scheinbestellung wurden, ist die vergleichsweise günstige Entwicklung zunächst vor dem Hintergrund der bereits zu Versuchsbeginn geringeren AFu-Belastung zu betrachten. Auch die einzelnen Boniturpunkte lagen über den Versuchszeitraum überwiegend in vergleichbaren, niedrigeren Quantilen. Die geringere Belastung kann daher nicht eindeutig, als Effekt der dort umgesetzten Fruchtfolge- und Bodenbearbeitungsstrategie interpretiert werden, sondern ist mit dem geringen AFu-Besatz in der Parzelle zu begründen. Gleichzeitig standen den beiden Varianten durch die zusätzliche Sommerung und die Zwischenfrucht der Fruchtfolge 2 andere Bearbeitungs- und Bekämpfungszeitfenster zur Verfügung, die grundsätzlich eine Begrenzung des weiteren Populationsaufbaus ermöglichten. Welchen Anteil diese Maßnahmen an der vergleichsweisen günstigen Entwicklung hatten, lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Ausgangssituation jedoch nicht eindeutig bestimmen.

Bei den Varianten 3 und 7, welche beide mischend mit Scheinbestellung bearbeitet wurden, lässt sich die im Verhältnis zum Gesamttrend günstigere Entwicklung dagegen nicht in gleicher Weise durch eine bereits zu Versuchsbeginn geringe Belastung erklären. Insbesondere die Verschiebung der Boniturpunkte hin zu niedrigeren Quantilen wirft daher die Frage auf, inwieweit die dort umgesetzten Bodenbearbeitungs- und Scheinbestellungsstrategien zur Begrenzung des weiteren Populationsanstiegs beigetragen haben könnten. Denn bei Betrachtung der Boniturpunkte über den gesamten Versuch zeigt sich, dass Bereich mit hohem Befall wiederholt an ähnlichen Positionen auftraten, welches auf eine räumliche Persistenz der AFu-Nester hindeuten könnte. Somit ließen sich AFu-Nester nur bedingt reduzieren, aber eine Verringerung des Populationsanstiegs und eine Begrenzung der Ausbreitung erscheint in diesen Varianten möglich gewesen zu sein.

Vor diesem Hintergrund ist zunächst zu betrachten, welchen Einfluss die unterschiedliche Intensität der Bodenmischung auf das vorhandene AFu-Samenpotenzial des Bodens und dessen Keimung gehabt haben könnte. Im Jahr 2020 zeigten die mit BM-Scharen bearbeiteten

Varianten 3 und 7 nach der Scheinbestellung eine deutliche Zunahme des AFu-Auflaufs, während Variante 4 trotz Grubberbearbeitung mit LD-Scharen keine vergleichbare Zunahme zeigte.

Zusätzlich wurde im Jahr 2020 nach der ganzflächigen Bearbeitung mit den CrossCutter-Scheiben eine spezifische Bearbeitung der Varianten durchgeführt. Dabei wurden die Varianten ohne Scheinbestellung (1, 2, 5 und 6) erneut mit den CrossCutter-Scheiben bearbeitet, während die übrigen Varianten im Rahmen der Scheinbestellung mit den jeweiligen Grubberscharen bearbeitet wurden. Anhand der erhobenen AFu-Pflanzenzahlen vom 04.10.2020 lässt sich im Vergleich zur Erhebung vom 15.09.2020 eine unterschiedliche Entwicklung der Varianten beobachten. Während sich die Anzahl der AFu-Pflanzen in den Varianten 1 und 2 mehr als verdoppelte, wiesen die gleich bearbeiteten Varianten 5 und 6, etwa die Hälfte der zuvor erfassten Pflanzen auf. Die unterschiedliche Entwicklung der Varianten könnte dabei unter anderem durch den jeweiligen Ausgangsbesatz beeinflusst worden sein. Bei einem hohen Ausgangsbesatz ist von einer entsprechend höheren Anzahl an AFu-Samen auf der Fläche auszugehen, die durch die Bodenbearbeitung zur Keimung angeregt wurden. Dies könnte insbesondere die Zunahme der AFu-Pflanzen in den Varianten 1 und 2 erklären. In den Varianten 5 und 6 war der Ausgangsbesatz dagegen geringer, sodass möglicherweise weniger keimfähige Samen vorhanden waren, die durch die erneute Bearbeitung mit den CrossCutter-Scheiben zur Keimung angeregt werden konnten. Die Unterschiede zwischen den Varianten zeigen somit, dass die Wirkung einer Bearbeitung nicht unabhängig vom vorhandenen Ausgangsbesatz betrachtet werden kann. Dies zeigt sich auch in der weiteren Entwicklung. Trotz einer 25,6- bzw. 40,4-fachen Zunahme in den Varianten 5 und 6 bis zum 08.03.2024 lagen deren absolute AFu-Zahlen mit 94 bzw. 256 Pflanzen/m² weiterhin deutlich unter denen der Varianten 1 und 2 mit 838 bzw. 842 Pflanzen/m², welche um das 18,3- bzw. 10,9-fache anstiegen. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch in einem Versuch von D. Dölger im Herbst 2018 beobachtet (persönliche Kommunikation). Nach einer Sommerung, bei der keine AFu-Samenschüttung erfolgte, wies die mit CrossCutter-Scheiben bearbeitete Variante signifikant weniger AFu-Pflanzen auf als die mit dem Grubber bearbeitete Variante.

Eine mögliche Erklärung ist, dass die stärkere Bodenmischung durch die BM-Scharen zusätzliches, im Boden vorhandenes AFu-Samenpotenzial in die keimungsrelevanten Bereiche verlagert und dadurch einen stärkeren Auflauf ausgelöst haben könnte. Während die lockernde, weniger mischende Bearbeitung demgegenüber vor allem die Keimung oberflächennah vorhandenen bzw. frisch ausgefallenen Samen fördern könnte, ohne zusätzliches Samenpotenzial aus tieferen Bodenschichten zu mobilisieren. Die Ergebnisse können somit als Hinweis darauf verstanden werden, dass eine intensivere Durchmischung insbesondere auf Flächen mit vorhandenem Samenpotenzial im Boden zu einem stärkeren Auflaufen von AFu führen kann. Ein

direkter Nachweis einer Verlagerung von Samen aus tieferen Bodenschichten ist anhand der erhobenen Pflanzenzahlen allerdings nicht möglich.

Der Vergleich der Varianten innerhalb derselben Fruchtfolge zeigt jedoch, dass die Wahl der Bodenbearbeitungsstrategie allein keine eindeutige Erklärung für die mehrjährige Entwicklung liefert. Werden die Varianten ohne Scheinbestellung betrachtet zeigt sich, dass in den Varianten mit der wenig mischenden Bodenbearbeitung nicht in jedem Fall ein niedrigerer AFu-Besatz erfasst wurde. Variante 2, als lockernde Bearbeitungsvariante, zeigte zu Beginn des Versuchs einen höheren Besatz auf, während Variante 1, als mischende Variante, ab Frühjahr 2022 bis Herbst 2023 teilweise höhere Pflanzenzahlen zeigte. Im Frühjahr 2024 lagen beide Varianten wieder auf einem ähnlichen Niveau. Zwischen den Varianten 5 und 6 zeigte sich kein vergleichbarer Effekt der Bodenbearbeitung. Es müssen die jeweiligen Jahreseffekte des Ungrasaufkommens in die Betrachtung einbezogen werden. Variante 6 mit der nicht mischenden Bodenbearbeitung wies bereits zu Beginn höhere Pflanzenzahlen auf und blieb über den weiteren Versuchsverlauf hinweg stärker belastet als Variante 5, welche mit dem BM-Schar bearbeitet wurde. Dabei wurde bei beiden ohne Scheinbestellung gearbeitet, was einen direkten Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten ermöglicht.

Die unterschiedlichen Entwicklungen innerhalb einer Fruchtfolge sprechen daher nicht für eine grundsätzliche Überlegenheit einer stärker oder weniger mischenden Bodenbearbeitung. Vielmehr deutet sich an, dass die Bodenmischung den kurzfristigen Auflauf beeinflussen kann, die langfristige Populationsentwicklung jedoch von der Integrierung dieses Bearbeitungsschrittes in die Scheinbestellung und damit Bekämpfung des zusätzlich aufgelaufenen AFus abhängt. Damit verschiebt sich auch die Bewertung des unmittelbaren Erfolgs einer Scheinbestellung. Eine hohe Pflanzenzahl nach der Bearbeitung ist zunächst als Erfolg zu interpretieren, sofern der erzeugte Auflauf anschließend vollständig beseitigt wird. Für die langfristige Bewertung wäre vielmehr entscheidend, ob es durch wiederholte Scheinbestellungen gelingt das Samenpotenzial gerade in hoch belasteten Bereichen eines Schlages über mehrere Jahre zu reduzieren.

Für die längerfristige Populationsentwicklung ist somit weniger der unmittelbar nach der Bodenbearbeitung festgestellte Pflanzenbesatz als vielmehr die weitere Entwicklung dieser Pflanzen bis zur möglichen Samenproduktion entscheidend. Bodenbearbeitungsmaßnahmen können zunächst zu einem erhöhten Auflauf führen, ohne dass dies zwangsläufig mit einer langfristigen Zunahme der Population verbunden sein muss. Werden die aufgelaufenen Pflanzen vor der Samenreife wirksam beseitigt, kann der induzierte Auflauf vielmehr dazu beitragen, einen Teil des keimfähigen Samenpotenzials des Bodens zu erfassen und nachhaltig zu reduzieren. Umgekehrt können bereits wenige überlebende Pflanzen bei erfolgreicher

Samenproduktion erneut zum Aufbau des Samenpotenzials beitragen. Die Wirkung einer Bodenbearbeitungsstrategie sollte daher nicht ausschließlich anhand der nachfolgenden Pflanzenzahl, sondern im Zusammenhang mit der Verhinderung einer erneuten Samenrückführung bewertet werden.

Vor diesem Hintergrund ist insbesondere die Entwicklung der Varianten 3 und 7 von Interesse. Für diese beiden Varianten ergibt sich, dass die stärkere Bodenmischung zwar einen erhöhten Auflauf ausgelöst haben könnte, dieser jedoch durch die anschließende Beseitigung der Pflanzen möglicherweise in einen regulierenden Effekt überführt wurde. Die günstigere Entwicklung wäre damit eher als Ergebnis der Kombination aus Bodenmischung, Scheinbestellung und anschließender Bekämpfung zu verstehen statt als Folge der stärkeren Bodenmischung allein. Eine Verringerung des Samenpotenzials im Boden wurde allerdings nicht direkt untersucht.

Auch die Entwicklung der Varianten 4 und 8 verdeutlicht, dass einzelne Bodenbearbeitungsgänge nicht unabhängig von ihrer zeitlichen Abfolge betrachtet werden können. Beide Varianten wurden lockernd mit einer Scheinbestellung bearbeitet und wiesen über mehrere Boniturtermine hinweg teilweise vergleichsweise geringe AFu-Pflanzenzahlen auf, gehörten im letzten Versuchsjahr jedoch zu den stärker belasteten Varianten. Eine mögliche Erklärung könnte in den unterschiedlichen Bodenbearbeitungsgängen und deren zeitlicher Abfolge liegen. Durch die zuvor weniger mischende Bodenbearbeitung mit Scheinsaat könnten über Jahre nur die frischen Samen auf der Bodenoberfläche zum Keimen angeregt worden sein. Die im Jahr 2023 über alle Varianten diagonal durchgeführte Bearbeitung mit dem Feingrubber könnte anschließend keimfähiges Samenpotenzial aus den mittleren Bodenschichten in keimungsrelevante Bereiche verlagert haben. Ob dies tatsächlich die Ursache für den späteren Anstieg des AFu-Besatzes in den Varianten 4 und 8 war, lässt sich anhand der vorliegenden Daten jedoch nicht eindeutig nachweisen. Zumindest bleibt aber festzuhalten, dass ein mischender Eingriff in den Boden einen Einfluss hat.

Neben der mechanischen Bearbeitung ist auch die anschließende chemische Bekämpfung als Bestandteil der Scheinbestellung zu berücksichtigen. Der starke Rückgang des AFu-Besatzes in der lockernd-bearbeiteten Scheinsaat-Variante 4 im Herbst 2022 im Vergleich zum Frühjahr 2022 könnte mit der zuvor erfolgten flächigen Glyphosatbehandlung zusammenhängen. Da Variante 4 zuvor auf einem ähnlichen Befallsniveau wie Variante 1 lag, welche anschließend nochmals mechanisch bearbeitet wurde und im Herbst ein 6,6-fach höheren Besatz zeigte als Variante 4, zeigt dies den potenziellen Vorteil einer Scheinsaat mit erfolgreicher Bekämpfung im Gegensatz zur intensiven Bodenbearbeitung kurz vor der Aussaat.

Die Bedeutung der Bodenbearbeitung lässt sich jedoch nur im Kontext der jeweiligen Fruchtfolge bewerten, da diese die zeitliche Abfolge von Aussaat, Ernte, Bodenbearbeitung und

Bekämpfung bestimmt. Dies wird beim Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten ohne Scheinbestellung deutlich. Variante 1 und 2 gehörten zur betriebsüblichen Fruchtfolge, während die Varianten 5 und 6 eine zusätzliche Sommerung und Zwischenfrucht in der Fruchtfolge enthielten.

So wurden die Varianten 5 und 6 nach der Ernte der Ackerbohnen im August 2022 bereits Ende August mit dem Grubber bearbeitet und anschließend mit einer Zwischenfrucht bestellt. In den Varianten 1 und 2 erfolgte die entsprechende Bearbeitung erst zu einem späteren Zeitpunkt. Nach der ersten Bodenbearbeitung herrschten im Jahr 2022 zunächst günstige Bedingungen für den AFu-Auflauf. Die anschließende überwiegend trockene Phase bis zur Aussaat des Winterweizens könnte jedoch dazu beigetragen haben, dass sich die Auflaufbedingungen erneut verschlechterten. Dass in den Varianten 1 bis 4 zu diesem späteren Zeitpunkt weniger AFu-Pflanzen festgestellt wurden als im Frühjahr 2022, obwohl AFu überwiegend im Herbst keimt, zeigt, dass die Witterung hier einen entscheidenden Effekt gehabt hat.

Die Wirkung einer veränderten Fruchtfolge ergibt sich somit daraus, dass die zeitliche Abfolge innerhalb der Fruchtfolge verändert wird und dadurch zusätzliche Zeiträume für Bodenbearbeitung und Bekämpfung entstehen können. Zusätzlich ermöglicht eine vielfältigere Fruchtfolge insbesondere mit mehr Sommerungen den Einsatz verschiedener bzw. den Verzicht auf den Einsatz von gräserwirksamen Herbiziden, beispielsweise in Leguminosen. Zudem kann eine Sommerung den Vorteil besserer Konkurrenzkraft und Vitalität direkt nach der Aussaat mit sich bringen, da der AFu vorwiegend im Herbst keimt und dort eine höhere Konkurrenzkraft hat als im Frühjahr. Dadurch können die anderen Saat- und Erntezeitpunkte einer Sommerung zu einer Unterbrechung des Lebenszyklus des Ackerfuchsschwanzes führen.

Die Witterung hat jedoch auch einen entscheidenden Einfluss auf den Lebenszyklus und die Effektivität der Bekämpfung des AFus. Das Zusammenspiel von Witterung und Bodenbearbeitung wird beispielsweise im Jahr 2020 deutlich. Nach der Ernte herrschten zunächst trockene Bedingungen, sodass trotz der Scheinbestellung im September nur ein begrenzter Auflauf möglich war. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass ein Großteil der geschütteten Samen noch in der primären Dormanz waren und somit nicht keimten. Erst mit den folgenden Niederschlägen verbesserten sich die Auflaufbedingungen. Da die Wirkung der Scheinbestellung auf die Samenfrachten begrenzt gewesen ist und die frisch geschütteten Samen erst nach der Saat aus der Keimruhe heraus zeitlich verzögert gekeimt haben. Ein gegensätzliches Beispiel bietet das Jahr 2023. Nach der Ernte herrschten bei wiederholten Niederschlägen und milden Temperaturen grundsätzlich günstige Bedingungen für die Keimung und das Auflaufen von AFu. Gleichzeitig führten die hohen Niederschlagsmengen dazu, dass die Befahrbarkeit der Fläche zunehmend eingeschränkt war und die geplante Aussaat der Winterrapsbestände nicht

durchgeführt werden konnte. Damit zeigt sich, dass günstige Bedingungen für den Auflauf allein nicht ausreichen, um eine Scheinbestellung erfolgreich zur Populationsregulierung zu nutzen. Entscheidend ist vielmehr, dass aufgelaufene AFu-Pflanzen anschließend auch bekämpft werden können.

Die primäre Dormanz könnte nicht nur am frühen Boniturtermin im Jahr 2020 eine Rolle gespielt haben. Während der Blüte der AFu-Pflanzen können die Witterungsbedingungen die Ausprägung der primären Dormanz beeinflussen. Unter trockeneren und höheren Temperaturen kann sich die Dauer der Dormanz verkürzen (Swain, et al., 2006). Ein möglicher Einfluss dieser Bedingungen zeigt sich beim Vergleich der Jahre 2022 und 2023. Der Hauptmonat der Blüte des AFus ist der Juni, welcher 2022 wenig Niederschlag und höhere Temperaturen erfuhr als der Juni im Jahr 2023, in welchem mehr als doppelt so viel Niederschlag gemessen wurde. Somit war vermutlich die primäre Dormanz 2022 kürzer als 2023. Im Jahr 2022 könnte dies dann dazu geführt haben, dass bis zum Boniturtermin im November ein größerer Anteil der AFu-Pflanzen bereits gekeimt war und die daraus hervorgegangen Pflanzen in den vorherigen Arbeitsschritten beseitigt wurden. Dies könnte ein weiterer Grund dafür sein, dass weniger AFu-Pflanzen gezählt wurden als im Oktober 2023. Aufgrund der möglicherweise verlängerten Dormanz durch die Witterungsbedingungen im Juni 2023, könnte die Keimung eines Großteils der Samen verzögert worden sein. Dadurch könnten weniger AFu-Pflanzen durch die Bearbeitungsschritte bekämpft worden sein, bevor sie nach der letzten Bearbeitung Anfang September unter günstigen Wetterbedingungen keimen konnten.

Über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet ergibt sich damit eine Wirkungskette aus vorhandenem Samenpotenzial, Bodenbearbeitung, Keimung und Auflauf, anschließender Bekämpfung sowie einer möglichen erneuten Samenproduktion. Jeder einzelne Schritt beeinflusst die Ausgangssituation des folgenden Anbaujahres. Gerade bei einem mehrjährigen Versuch ist daher zu berücksichtigen, dass die in einem Jahr erfassten AFu-Pflanzen nicht ausschließlich das Ergebnis der unmittelbar vorausgegangenen Maßnahme darstellen, sondern zugleich Ausdruck der Populationsentwicklung der Vorjahre sein können.

Die Ergebnisse verdeutlichen das Zusammenwirken mehrerer Faktoren. Die Art und Intensität der Bodenbearbeitung kann beeinflussen, welche Samen zur Keimung angeregt werden, während die Scheinbestellung diesen Mechanismus gezielt nutzen kann. Ihre Wirksamkeit ist jedoch maßgeblich von geeigneten Witterungsbedingungen und der anschließenden Möglichkeit zur Bekämpfung der AFu-Keimlinge abhängig. Gleichzeitig bestimmt die Fruchtfolge die Anzahl und den Zeitpunkt der verfügbaren Bearbeitungs- und Bekämpfungsfenster. Die unterschiedlichen Entwicklungen der Varianten sind daher weniger als Folge eines einzelnen Bodenbearbeitungsverfahrens zu verstehen, sondern vielmehr als Ergebnis des

Zusammenwirkens von Bodenbearbeitung, Scheinbestellung, Fruchtfolge, Witterung und den verfügbaren Bekämpfungsmöglichkeiten. Für die praktische Regulierung von AFu erscheint damit insbesondere die zeitliche und inhaltliche Abstimmung dieser Maßnahmen über die gesamte Fruchtfolge relevant.

3.2 Möglichkeiten und Grenzen der digitalen Ackerfuchsschwanz-Erfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass die drohnengestützte Erfassung von Ackerfuchsschwanz unter den Bedingungen des Versuchs grundsätzlich Potenzial besitzt, eine zuverlässige quantitative Erfassung jedoch noch nicht erreicht wurde. Ein möglicher praktischer Mehrwert könnte insbesondere in der flächigen Erfassung räumlicher Befallsstrukturen liegen. Dabei unterschieden sich die Möglichkeiten der indexbasierten Auswertung und der KI-basierten Erkennung. Während die Vegetationsindizes nur an einzelnen Terminen stärkere Zusammenhänge mit den Boniturdaten zeigten, konnte die KI-basierte Erkennung AFu insbesondere bei deutlich über den Kulturpflanzenbestand hinausragenden Ähren erfassen.

Der NDVI zeigte an den beiden verfügbaren Terminen auf weitgehend unbewachsenen Flächen die stärksten Zusammenhänge mit den Boniturdaten. Damit deutet sich an, dass die multispektrale Erfassung zu Zeitpunkten mit höheren Bodenanteilen Vorteile gegenüber den untersuchten RGB-basierten Indizes VARI und ExG bieten kann (Torres-Sanchez, et al., 2013). Aufgrund der geringen Zahl vergleichbarer Aufnahmen und der unterschiedlichen Aufnahmebedingungen ist dieser Befund aus den Daten des Versuches heraus jedoch als Hinweis und nicht als allgemeingültiger Vorteil des NDVI zu bewerten.

Ein wesentlicher Grund für die begrenzte Übereinstimmung zwischen Bilddaten und Bonitur dürfte in der ausgeprägten räumlichen Heterogenität des AFu-Besatzes liegen. Insbesondere das nesterförmige Auftreten erschwert den Vergleich, da ein einzelner Boniturpunkt nicht zwangsläufig repräsentativ für die umliegende Fläche oder die gesamte Parzelle ist. Ein Boniturpunkt kann beispielsweise innerhalb eines Befallsnestes liegen, während die umgebenden Bilddaten einen deutlich geringeren mittleren AFu-Besatz abbilden. Abweichungen zwischen Indexwerten und Boniturdaten sind daher nicht allein als Schwäche des jeweiligen Index zu interpretieren, sondern können auch aus der unterschiedlichen räumlichen Auflösung von Referenzmessung und Fernerkundungsdaten resultieren. Deswegen wurde in der Auswertung der Daten auch in eine Betrachtung der Pufferzonen an den Zählpunkten und in die Betrachtung der Durchschnittswerte der ganzen Variante unterschieden.

Zusätzlich unterschieden sich die räumlichen Auflösungen der einzelnen Befliegungen. Die Ground Sampling Distance (GSD) lag dabei zwischen 0,5 und 2 cm pro Pixel. Für eine zuverlässige Erkennung von Einzelpflanzen ist es erforderlich, dass eine Pflanze durch mehrere Pixel abgebildet wird. Ist die räumliche Auflösung hingegen zu gering oder die Pflanze im Verhältnis zur Pixelgröße zu klein, können Mischpixel entstehen. Dabei werden die spektralen beziehungsweise farblichen Eigenschaften der Pflanze und des umgebenden Bodens oder anderer Vegetation innerhalb eines Pixels zusammengefasst. Dies erschwert eine eindeutige Abgrenzung einzelner Pflanzen und kann deren Erkennung beeinträchtigen. Zu erkennen ist dies in der Abbildung 30. Für die Erfassung von Ackerfuchsschwanz ist dieser Aspekt von besonderer Bedeutung, da die Pflanzen insbesondere in frühen Entwicklungsstadien nur wenige Zentimeter Durchmesser aufweisen können. Unter Anwendung der Erfahrungswerte der Hanse-Agro zur Abschätzung der erforderlichen räumlichen Auflösung (Pflanzendurchmesser × 30 = GSD) entspräche eine GSD von 0,5 cm pro Pixel beispielsweise einem erforderlichen Pflanzendurchmesser von etwa 15 cm. Kleinere Ackerfuchsschwanzpflanzen würden bei gleicher Auflösung entsprechend durch weniger Pixel abgebildet, wodurch eine zuverlässige Einzelpflanzenerkennung erschwert wird.

Die Wahl des Auswertungsmaßstabs beeinflusst diese Beziehung zusätzlich. Die häufig stärkeren Zusammenhänge der Parzellenmittelwerte können dadurch erklärt werden, dass kleinräumige Abweichungen zwischen Boniturpunkt und Bilddaten bei einer Aggregation teilweise ausgeglichen werden. Gleichzeitig kann die Mittelwertbildung einzelne AFu-Nester glätten. Eine kleinräumige Auswertung kann dagegen die tatsächliche räumliche Struktur besser abbilden, wie beispielsweise im Frühjahr 2022 bei der Betrachtung der Pufferzonen um die Boniturpunkte deutlich wurde. Die Wahl des räumlichen Auswertungsmaßstabes sollte daher an der jeweiligen Zielsetzung ausgerichtet werden. Eine Mittelwertbildung über größere Flächen kann kleinräumige Zufallseffekte reduzieren und dadurch den statistischen Zusammenhang mit aggregierten Boniturdaten verbessern. Eine kleinräumige Auswertung kann dagegen die tatsächliche räumliche Struktur des AFu-Besatzes besser abbilden. Insbesondere im Hinblick auf eine mögliche praktische Nutzung der Daten, beispielsweise für teilflächenspezifische Applikationskarten, ist daher nicht allein die quantitative Schätzung der AFu-Pflanzenzahl von Bedeutung. Auch die zuverlässige Identifikation und Abgrenzung räumlicher Befallsstrukturen kann einen praktischen Mehrwert darstellen.

Ein hoher statistischer Zusammenhang mit punktuell erhobenen Boniturdaten ist dabei nicht zwangsläufig gleichbedeutend mit einer guten räumlichen Abbildung des AFu-Besatzes. Umgekehrt kann eine räumlich plausible Darstellung von Befallsnestern vorliegen, obwohl der statistische Zusammenhang mit den Boniturpunkten gering ausfällt.

Damit hängt die Bewertung der digitalen Verfahren wesentlich von der Zielsetzung der jeweiligen Bonitur ab. Soll die Anzahl der AFu-Pflanzen je Quadratmeter möglichst exakt bestimmt werden, stellen die teilweise schwachen Zusammenhänge mit den Boniturdaten eine deutliche Einschränkung dar. Liegt das Ziel dagegen in der Identifikation von Befallsschwerpunkten und deren räumlicher Abgrenzung, kann auch eine Kartierung mit begrenzter Übereinstimmung zu einzelnen Boniturpunkten einen praktischen Informationsgewinn liefern. Gerade vor dem Hintergrund des im Versuch beobachteten wiederholten Auftretens hoher AFu-Besätze an ähnlichen Positionen erscheint diese zweite Zielsetzung für eine praktische Anwendung relevant. So kann eine Drohnenbefliegung zum richtigen Zeitpunkt mit einer anschließenden Auswertung des NDVI, Informationen generieren, die mehrjährig und damit nachhaltig in eine integrierte Bekämpfungsstrategie einfließen. Allerdings sind auch die Erkennung und Abgrenzung von AFu-Nestern stark vom Zeitpunkt der Aufnahme abhängig. Ackerfuchsschwanz ist insbesondere in Getreidebeständen über längere Entwicklungsabschnitte nur schwer von der Kultur zu unterscheiden, da sich die Pflanzen hinsichtlich ihrer Struktur und Farbgebung nur geringfügig unterscheiden. Dies erschwert die Kartierung, da die verwendeten Vegetationsindizes auf Unterschiede zwischen den Pflanzen angewiesen sind. Durch eine geeignete Wahl des Aufnahmezeitpunkts kann sich dieses Verhältnis jedoch verändern. So konnte beispielsweise bei der Befliegung am 07.06.2023 (Abbildung 35) ein Entwicklungsstadium erfasst werden, in dem sich Ackerfuchsschwanz und Kulturpflanzen hinsichtlich ihrer farblichen Eigenschaften deutlicher voneinander unterschieden. Dadurch ergab sich eine bessere Voraussetzung für die räumliche Abgrenzung des AFu-Besatzes. Diesem Aspekt muss immer dann Rechnung getragen werden, wenn die GSD begrenzt ist. Sobald die Einzelpflanze nicht mehr sicher unterschieden werden kann, ist eine Auswertung der Pixel auf Reflektionsebene notwendig. In diese gehen immer mehrere Informationen ein, die durch ein Farbmodell sichtbar gemacht werden. Diese grundsätzliche Unschärfe ist bei den Auswertungen, aber auch bei der Planung von Bonituren zu beachten und findet sich auch in den vorliegenden Ergebnissen wieder.

Neben der räumlichen Heterogenität dürften die unterschiedlichen Aufnahmebedingungen zur Streuung der Ergebnisse beigetragen haben. Dies ist insbesondere bei den Aufnahmen auf weitgehend unbewachsenen Flächen relevant, da dort die spektralen Signale stärker durch Bodenfarbe, Bodenfeuchte und Schatten beeinflusst werden können. Das kann die Unterscheidung zwischen AFu und Boden erschweren. Unterschiede in Beleuchtung und Oberflächenbedingungen erschweren damit die Vergleichbarkeit der Bilddaten zwischen den Aufnahmeterminen und könnten zu einem Teil der beobachteten Schwankungen in den Zusammenhängen beigetragen haben.

Für die Aufnahme von RGB- und multispektralen Daten sind daher möglichst konstante und diffuse Lichtbedingungen vorteilhaft. Die wechselnden Licht- und Witterungsbedingungen

erschwerten zudem eine standardisierte Erfassung. Denn die Kameraeinstellungen müssen an die jeweiligen Lichtverhältnisse angepasst werden. Insbesondere bei RGB-Aufnahmen können Unterschiede in Belichtung, Schatten und Bewegungsunschärfe die Vergleichbarkeit der Bilddaten beeinträchtigen.

Eine zusätzliche Einschränkung ergibt sich aus der begrenzten Flexibilität beim Befliegungstermin. Für eine erfolgreiche AFu-Erfassung müssen ausreichender AFu-Besatz und eine gute Unterscheidbarkeit vom Boden beziehungsweise der Kulturpflanze gleichzeitig mit geeigneten Witterungsbedingungen zusammentreffen. Da relevante Entwicklungsstadien insbesondere im Herbst und Frühjahr auftraten, war dies nicht bei allen Befliegungen gegeben. Die unterschiedlichen Aufnahmebedingungen zwischen den Terminen stellen daher eine plausible Ursache für einen Teil der Schwankungen in den beobachteten Zusammenhängen dar.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Aufnahmebedingungen nicht ausschließlich zu einer Verbesserung oder Verschlechterung der statistischen Zusammenhänge führen müssen. Eine durch Aufnahmebedingungen oder Verarbeitung hervorgerufene Glättung kleinräumiger Unterschiede kann beispielsweise zufällige Abweichungen zwischen Boniturpunkt und Bilddaten reduzieren und dadurch einen statistischen Zusammenhang erhöhen. Gleichzeitig können tatsächlich vorhandene AFu-Nester weniger deutlich abgegrenzt werden. Die zwischen den Terminen stark schwankenden Bestimmtheitsmaße sind folglich nicht allein als Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der untersuchten Indizes zu interpretieren.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich aus der Verwendung unterschiedlicher Kameras beziehungsweise Drohnen. Besonders bei multispektralen Sensoren können sich die spektralen Eigenschaften und betrachteten Bandbereiche zwischen verschiedenen Kameramodellen unterscheiden. Der Kameravergleich vom 24.10.2024 (Abbildung 47) zeigte über die Fläche relativ konstante Unterschiede, dennoch können systematische sensorbedingte Abweichungen die Vergleichbarkeit von Indexwerten zwischen Terminen beeinflussen. Insbesondere bei der Interpretation von Zeitreihen sollte daher berücksichtigt werden, dass Veränderungen der Indexwerte nicht ausschließlich auf Veränderungen des AFu-Besatzes zurückzuführen sein müssen. Für zukünftige Untersuchungen sollte die Vergleichbarkeit der Aufnahmen durch eine möglichst konsistente Sensorik und standardisierte Aufnahmebedingungen verbessert werden. Insbesondere bei multispektralen Daten ist eine radiometrische Kalibrierung zu empfehlen, um Beleuchtungseinflüsse zu reduzieren und belastbarere Vergleiche zwischen Terminen zu ermöglichen.

Zusammenfassend erwies sich die indexbasierte Auswertung unter den vorliegenden Bedingungen nicht als ausreichend belastbar, um die Bonitur quantitativ zu ersetzen. Der NDVI zeigte zwar die stärksten Zusammenhänge, diese waren jedoch nicht über die verfügbaren

Termine hinweg eindeutig und sind aufgrund der unterschiedlichen Aufnahme- und Referenzbedingungen vorsichtig zu bewerten. Für die weitere Bewertung ist daher insbesondere relevant, ob eine automatisierte Bildanalyse die räumlichen Befallsstrukturen unabhängig von einer direkten quantitativen Schätzung des Besatzes erfassen kann.

Die KI-basierte Auswertung zeigte ein anderes Potenzial als die indexbasierte Analyse. AFu konnte insbesondere dann erkannt und kartiert werden, wenn die Ähren deutlich über den Winterweizenbestand hinausragten. Die Erkennbarkeit war damit stark vom Entwicklungsstadium und der visuellen Abgrenzbarkeit des AFu abhängig. Für frühe Entwicklungsstadien standen dagegen keine ausreichend trainierten Modelle zur Verfügung. Eine zuverlässige Erkennung in diesen Stadien würde entsprechend umfangreiche Trainingsdatensätze erfordern, in denen sowohl AFu als auch die jeweiligen Kulturpflanzen in verschiedenen Bestandsdichten und Aufnahmebedingungen eindeutig annotiert sind. Somit erscheint die derzeitige Anwendung vor allem für deutlich sichtbare AFu-Pflanzen in einem späten Entwicklungsstadium von AFu und damit auch der Kulturpflanze geeignet. Die Herausforderung ist dabei, dass in dem jeweiligen Anbaujahr zu dem Zeitpunkt keine produktionstechnische Maßnahme mehr umgesetzt werden kann, denn der AFu ist dann zu groß und die neuen Samen sind bereits gebildet. Die fehlende Erkennung in frühen Entwicklungsstadien ist dabei nicht zwingend als grundsätzliche Grenze KI-basierter Verfahren zu verstehen. Deswegen wurde die Unterstützung von externen Dienstleistern und deren Expertise in Form von verfügbaren Algorithmen getestet.

Die Ergebnisse dieser KI-basierten Kartierung zeigten, dass Fehlklassifikationen passierten. Diese Fehlklassifikationen deuten darauf hin, dass das Modell möglicherweise auch nicht artspezifische Merkmale nutzt. Bei einem der untersuchten Termine wurden beispielsweise Bereiche kartiert, die vermutlich aufgrund abweichender Farbe oder Struktur als AFu interpretiert wurden. Allerdings stand in diesen Bereichen kein AFu. Dabei handelte es sich unter anderem um Streifen mit vermutlich zeitweise vorhandener Staunässe und entsprechend schwächerem Kulturpflanzenbestand. Dies verdeutlicht, dass ein Modell neben den gewünschten Pflanzenmerkmalen auch Unterschiede in Bodenfarbe, Bestandsdichte oder anderen Umweltbedingungen als Erkennungsmerkmale nutzen kann. Für die Beurteilung der Modellgüte ist daher eine ausreichend umfangreiche und repräsentative Validierung erforderlich. Dies ist insbesondere dann relevant, wenn die Kartierung perspektivisch als Grundlage für teilflächenspezifische Bekämpfungsmaßnahmen genutzt werden soll, da Fehlklassifikationen zu einer fehlerhaften räumlichen Zuordnung des AFu-Besatzes führen können. Auch künstliche Bildmerkmale wie die zur Kennzeichnung der Boniturpunkte eingesetzten Rahmen können Fehlklassifikationen begünstigen. Für zukünftige Untersuchungen sollten die Boniturpunkte daher möglichst unauffällig markiert und unabhängig davon georeferenziert werden.

Zusammenfassend resultieren die Grenzen der digitalen AFu-Erfassung aus dem Zusammenspiel von Erkennbarkeit des AFu, räumlicher Heterogenität, Referenzdaten sowie technischen und witterungsbedingten Bedingungen. Besonders die frühe Erkennung stellt dabei eine Herausforderung dar, da sich AFu in diesen Entwicklungsstadien nur begrenzt von Kulturpflanzen und Boden unterscheiden lässt. Trotz dieser Einschränkungen zeigen die Indexauswertung als auch die KI-basierte Kartierung ein grundsätzliches Potenzial für die Weiterentwicklung der drohnengestützten AFu-Erfassung. Dies wird durch die zunehmende Entwicklung der Kameratechnik und automatisierter Bildanalyseverfahren unterstützt. Neben der Gestaltung der spektralen Kanäle ist hier die Auflösung zu nennen, welche dann die GSD erhöht und somit eine Ansprache von mehr Details bis hin zu einzelnen Pflanzen ermöglichen könnte. Die spektralen Kanäle könnten wiederrum in direkte Kalibriemodelle oder in die Indexbildung einfließen.

Unter den Bedingungen des vorliegenden Versuchs konnte die drohnengestützte Erfassung die händische Bonitur noch nicht zuverlässig ersetzen, selbst eine Ergänzung unterliegt teilweise deutlichen Grenzen. Gleichzeitig stellt sich die Frage, inwieweit die händische Bonitur den tatsächlichen AFu-Besatz über die gesamte Versuchsfläche adäquat widerspiegeln kann. Während bei der händischen Bonitur einzelne Bereiche der Versuchsfläche erfasst und die Ergebnisse auf die jeweilige Variante übertragen werden, ermöglichen Drohnenbefliegungen grundsätzlich eine flächige Erfassung der Vegetationsstruktur. Das Potenzial der drohnengestützten Erfassung liegt daher nicht ausschließlich in einer exakten quantitativen Bestimmung der AFu-Pflanzenzahl. Insbesondere die flächige Erfassung und Abgrenzung räumlicher Befallsstrukturen, die Klassifizierung der Fläche, könnte einen Mehrwert gegenüber punktuellen Bonituren bieten. Eine ausreichend zuverlässige Kartierung solcher AFu-Nester könnte perspektivisch dazu beitragen, Befallsschwerpunkte innerhalb eines Schlages zu identifizieren und als Datengrundlage für teilflächenspezifische Bekämpfungsstrategien zu nutzen.

3.3 Ertragliche Einordnung der Bodenbearbeitungsstrategien

Neben der Entwicklung des Ackerfuchsschwanzbesatzes ist für die praktische Bewertung der untersuchten Ackerbaustrategien auch deren Einfluss auf die Ertragsleistung von Bedeutung. Die vorliegenden Ertragsergebnisse ermöglichen hierzu eine ergänzende Betrachtung ausgewählter Versuchsjahre und Kulturen. Die Ertragsergebnisse zeigen über die betrachteten Kulturen und Jahre keine einheitliche Überlegenheit einer bestimmten Bodenbearbeitungsstrategie oder Fruchtfolge. Die Rangfolge der Varianten wechselte vielmehr deutlich zwischen den Kulturen und Versuchsjahren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ertragsbildung neben dem Ackerfuchsschwanzbesatz wesentlich von der Kulturart, dem Witterungsverlauf, der

Bestandesentwicklung sowie den jeweiligen Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen beeinflusst wird.

Besonders deutlich wird die fehlende Stabilität der Ertragsunterschiede am Beispiel der Varianten 3 und 4. Variante 3, welche mischend inklusive Scheinbestellungen bearbeitet wurde, erreichte bei der Winterweizenernte 2021 den höchsten Ertrag aller Varianten, gehörte bei der Sommergerstenernte 2024 jedoch zu den ertragsschwächeren Varianten. Während die lockernd bearbeitete Variante 4 mit Scheinbestellungen dagegen sowohl bei der Sommergerste 2024 als auch beim Winterraps 2025 ein hohes Ertragsniveau zeigte. Die wechselnden Rangfolgen verdeutlichen, dass sich ein möglicher Ertragsvorteil einzelner Bearbeitungsstrategien nicht unabhängig von Kultur und Anbaujahr bewerten lässt.

Auch ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem bonitierten AFu-Besatz und der Ertragsleistung zeigte sich nicht. Variante 4 verzeichnete einen Anstieg des AFu-Besatzes und gehörte 2023 und 2024 zu den Varianten mit den höchsten AFu-Pflanzenzahlen, wies jedoch gleichzeitig ein hohes Ertragsniveau auf. Variante 3 zeigte dagegen eine stärkere relative Zunahme des AFu-Besatzes, bei gleichzeitig absolut geringerer AFu-Pflanzenzahl, und verzeichnete ein geringeres Ertragsniveau als Variante 4. Ein geringerer AFu-Besatz war somit nicht zwangsläufig mit einem höheren Ertrag der jeweiligen Kultur verbunden.

Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass der AFu-Besatz ohne ertragliche Bedeutung war. Die Konkurrenzwirkung von Ackerfuchsschwanz hängt neben der reinen Pflanzenzahl unter anderem vom Zeitpunkt der Etablierung, der Entwicklung und Konkurrenzkraft der Kultur sowie der räumlichen Verteilung des Besatzes ab. Insbesondere ein nesterförmiger hoher Besatz kann lokal zu deutlicher Konkurrenz führen, ohne dass sich dieser Effekt gleichermaßen im Ertrag einer gesamten Variante widerspiegeln muss. Gleichzeitig können günstige Wachstumsbedingungen und ein leistungsfähiger Kulturpflanzenbestand einen Teil der Konkurrenzwirkung kompensieren.

Für die langfristige Bewertung ist darüber hinaus zwischen der unmittelbaren Ertragswirkung und der populationsbiologischen Bedeutung des AFu-Besatzes zu unterscheiden. Auch wenn ein vorhandener Besatz in einem einzelnen Versuchsjahr nicht mit einem erkennbaren Ertragsrückgang verbunden ist, können überlebende und samenbildende AFu-Pflanzen das Samenpotenzial für die Folgejahre erhöhen, was dann zwangsläufig zu wesentlichen Etablierungsproblemen bei den Winterungen führt. Ein fehlender unmittelbarer Zusammenhang zwischen AFu-Besatz und Ertrag ist daher nicht mit einer fehlenden langfristigen Relevanz des AFu-Besatzes gleichzusetzen.

Dies deutet darauf hin, dass die Ertragswirkung der untersuchten Ackerbaustrategien nicht isoliert anhand des AFu-Besatzes bewertet werden kann. Vielmehr ist sie im Zusammenhang mit der jeweiligen Kultur und den Bedingungen des Anbaujahres zu betrachten. Eine Strategie, die unter bestimmten Witterungs- und Bestandesbedingungen zu einem hohen Ertrag führt, muss unter anderen Bedingungen daher nicht zwangsläufig denselben Vorteil aufweisen. Für die praktische Bewertung der untersuchten Ackerbaustrategien ist daher weniger die kurzfristige Ertragswirkung einzelner Jahre als vielmehr die Entwicklung des Gesamtsystems über einen längeren Zeitraum relevant. Entscheidend ist dabei, ob der AFu-Besatz langfristig begrenzt werden kann, ohne die Ertragsfähigkeit der angebauten Kulturen nachhaltig zu beeinträchtigen. Insgesamt zeigen die Ertragsergebnisse somit weder einen eindeutigen langfristigen Ertragsvorteil noch eine klare Benachteiligung einer der untersuchten Strategien. Die Ertragsdaten sprechen damit gegen eine isolierte Bewertung einzelner Bearbeitungsmaßnahmen und unterstreichen die Bedeutung einer längerfristigen Betrachtung des gesamten Ackerbausystems.

3.4 Bedeutung der chemischen Ackerfuchsschwanzbekämpfung

Die chemische Bekämpfung stellt einen wichtigen Bestandteil der Ackerfuchsschwanzregulierung dar, ihre langfristige Wirksamkeit wird jedoch durch die Entwicklung von Herbizidresistenzen eingeschränkt werden. Insbesondere getreidereiche Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil an Winterungen können durch die wiederholte Anwendung gleicher Wirkmechanismen einen hohen Selektionsdruck auf Ackerfuchsschwanzpopulationen ausüben. Gleichzeitig ist die Zahl verfügbarer Wirkstoffgruppen zur Bekämpfung von Ackerfuchsschwanz begrenzt. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Kombination chemischer und pflanzenbaulicher Maßnahmen für eine langfristig wirksame Regulierung an Bedeutung.

Auch auf der Versuchsfläche wurden im Rahmen der Resistenzuntersuchungen Hinweise auf eine eingeschränkte und räumlich unterschiedliche Herbizidwirkung festgestellt. Die Untersuchungen der Jahre 2021 und 2023 zeigten Unterschiede sowohl zwischen den untersuchten Herbiziden als auch zwischen den Proben. Besonders deutlich wurde dies bei Select 240 EC. Während bei einer Untersuchung aus dem Jahr 2021 bei einer Aufwandmenge von 0,5 l/ha noch ein Wirkungsgrad von über 96 % erreicht wurde, lag dieser bei einer Probe aus dem Jahr 2023 bei lediglich 77,5 %. Eine weitere Probe aus dem Jahr 2023 erreichte dagegen einen Wirkungsgrad von 99 %. Select 240 EC enthält den Wirkstoff Clethodim und gehört zu den ACCase-Hemmern der HRAC-Gruppe A. Der Wirkstoff stellt insbesondere in Kulturen außerhalb des Getreidebaus, beispielsweise in Winterraps und Ackerbohne, eine zusätzliche Möglichkeit zur

Ungrasbekämpfung dar. Eine eingeschränkte Wirkung gegenüber Clethodim würde somit die verfügbaren chemischen Bekämpfungsoptionen insbesondere in diesen Kulturen weiter reduzieren. Vor dem Hintergrund bereits bestehender Resistenzen gegenüber verschiedenen Wirkmechanismen ist die Erhaltung der Wirksamkeit verfügbarer Herbizide daher von besonderer Bedeutung.

Die unterschiedlichen Ergebnisse innerhalb desselben Untersuchungsjahres sind für die Interpretation der Resistenzuntersuchungen von besonderer Bedeutung. Sie zeigen, dass innerhalb derselben Ackerfuchsschwanzpopulationen Pflanzen mit unterschiedlicher Herbizidsensitivität vorkommen können. In Verbindung mit dem nesterförmigen Auftreten des AFu unterstreicht somit, dass nicht nur die Besatzdichte, sondern möglicherweise auch die Herbizidsensitivität innerhalb eines Schlages räumlich heterogen ausgeprägt sein kann. Zu erkennen ist dieser Aspekt, wenn die Wirkung von Cadou SC im Jahr 2021 betrachtet wird (Tabelle 6). Eine höhere Aufwandmenge führt in den meisten Fällen dazu, dass ein höherer Wirkungsgrad erreicht wird. Der Resistenztest zeigte jedoch, dass nur in drei von vier Proben 0,5 l/ha Cadou SC einen höheren Wirkungsgrad hatten als 0,3 l/ha Aufwandmenge. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass für die Resistenztests aus den gesammelten Samen jeweils eine Stichprobe für das entsprechende Testglied entnommen wurde. Durch die zufällige Zusammensetzung dieser Stichproben könnten Unterschiede in der Herbizidsensitivität zu den beobachteten Abweichungen zwischen den Aufwandmengen beigetragen haben. In dem durchgeführten Biotest werden AFu-Samen aus der Probe in Töpfen angezogen und dann mit Herbiziden behandelt. Das heißt jede angezogene Pflanze kann nur mit einem Prüfglied untersucht werden. Dies könnte ein weiterer Hinweis darauf sein, dass selbst innerhalb eines Probenpunktes bzw. AFu-Nestes die Heterogenität der Herbizidwirkung sehr hoch ist. Veränderungen der gemessenen Wirkungsgrade zwischen einzelnen Untersuchungsjahren können daher nicht ohne Weiteres als zeitliche Zu- oder Abnahme einer Resistenz interpretiert werden, da auch die räumliche Herkunft der untersuchten Pflanzen beziehungsweise Samen das Ergebnis beeinflussen kann. Eine Bewertung der Herbizidwirkung der gesamten Versuchsfläche anhand einzelner Proben ist daher nur eingeschränkt möglich.

Die innerhalb der Versuchsfläche festgestellten Unterschiede in der Herbizidwirkung erhöhen damit zugleich die Bedeutung ergänzender pflanzenbaulicher Maßnahmen. Wenn die Wirksamkeit eines Herbizids innerhalb eines Schlages nicht überall gleichermaßen gegeben ist, kann eine allein auf chemischen Maßnahmen beruhende Strategie nicht in jedem Fall eine gleichmäßig hohe Wirkung über die gesamte Fläche gewährleisten. Maßnahmen, die zusätzliche Bekämpfungsfenster schaffen oder eine erneute Samenproduktion verhindern, gewinnen unter diesen Bedingungen an Bedeutung. Die Resistenzuntersuchungen liefern damit einen wichtigen Hintergrund für die Bewertung der im Versuch untersuchten Strategien.

Neben selektiven Herbiziden wurde im Versuchszeitraum auch Glyphosat eingesetzt, um im Rahmen der Scheinbestellung aufgelaufene AFu-Pflanzen vor der Aussaat der Folgekultur zu beseitigen. Damit erfüllte die chemische Maßnahme innerhalb der Scheinbestellung eine ergänzende Funktion zur vorausgegangenen Bodenbearbeitung. Der durch die Bearbeitung angeregte AFu-Auflauf sollte vor der Etablierung der Folgekultur beseitigt werden. Die später erneut hohen AFu-Pflanzenzahlen verdeutlichen jedoch die grundsätzliche Begrenzung einer solchen Einzelmaßnahme. Glyphosat kann die zum Zeitpunkt der Anwendung vorhandenen Pflanzen erfassen, beeinflusst jedoch nicht unmittelbar das im Boden vorhandene Samenpotenzial. Nach der Behandlung können daher weitere AFu-Samen keimen und neue Pflanzen auflaufen. Ein hoher AFu-Besatz zu einem späteren Boniturtermin kann somit trotz einer erfolgreichen Bekämpfung des ursprünglichen Auflaufs durch erneute Keimung aus dem vorhandenen Samenpotenzial entstehen. Ein hoher Wirkungsgrad gegenüber den zum Applikationszeitpunkt vorhandenen Pflanzen ist daher nicht zwangsläufig mit einer langfristigen Verringerung des AFu-Besatzes gleichzusetzen.

Gerade im Zusammenhang mit der Scheinbestellung wird deutlich, dass chemische und ackerbauliche Maßnahmen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden sollten. Die Bodenbearbeitung kann den AFu-Auflauf gezielt fördern, während die anschließende chemische Bekämpfung dazu dient, die aufgelaufenen Pflanzen vor einer erneuten Samenproduktion zu beseitigen. Der Nutzen der chemischen Maßnahme ergibt sich somit wesentlich aus ihrer Einbindung in die zeitliche Abfolge der Bewirtschaftung. Die Wirkung einer einzelnen Maßnahme kann daher nicht unabhängig von den vorausgehenden und nachfolgenden Arbeitsschritten bewertet werden. Die Ergebnisse des Versuchs unterstützen damit die Bedeutung eines integrierten Bekämpfungsansatzes. Vor dem Hintergrund eingeschränkter Herbizidwirkung und der begrenzten Zahl verfügbarer Wirkmechanismen kann eine langfristige Regulierung des Ackerfuchsschwanzes nicht allein auf wiederholten chemischen Maßnahmen beruhen. Vielmehr sollten Herbizidmaßnahmen mit pflanzenbaulichen Strategien kombiniert werden.

Die chemische Bekämpfung verliert damit nicht grundsätzlich an Bedeutung, ihre Funktion innerhalb des AFu-Managements, ist jedoch als Bestandteil einer abgestimmten Maßnahmenfolge zu betrachten. Während Fruchtfolge und Bodenbearbeitung die Bedingungen für Auflauf, Etablierung und Samenproduktion beeinflussen, können Herbizide dazu beitragen, den vorhandenen AFu-Besatz zu geeigneten Zeitpunkten zu reduzieren und eine weitere Samenproduktion zu verhindern. Die innerhalb der Versuchsfläche beobachtete unterschiedliche Herbizidwirkung unterstreicht dabei, dass eine langfristige Begrenzung des AFu-Besatzes auf die Kombination verschiedener pflanzenbaulicher und chemischer Maßnahmen angewiesen ist.

3.5 Methodische Einordnung und Grenzen des Versuchs

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass es sich um einen praxisnahen Langzeitversuch und nicht um einen vollständig randomisierten und wiederholten Parzellenversuch handelte. Die untersuchten Ackerbaustrategien wurden unter betrieblichen Bedingungen über mehrere Jahre umgesetzt. Dadurch konnten langfristige Entwicklungen unter praxisnahen Bedingungen betrachtet werden. Gleichzeitig schränkt die Versuchsanlage die Möglichkeit ein, beobachtete Unterschiede eindeutig einzelnen Maßnahmen oder deren isolierten Wirkungen zuzuordnen.

Eine wesentliche Einschränkung ergibt sich aus den bereits zu Versuchsbeginn vorhandenen Unterschieden im AFu-Besatz zwischen den Varianten. Diese unterschiedlichen Ausgangsniveaus sind bei der Interpretation der weiteren Populationsentwicklung zu berücksichtigen. Varianten mit einem höheren Ausgangsbesatz konnten aufgrund des bereits vorhandenen Besatzes grundsätzlich ein höheres Potenzial für eine weitere Samenproduktion aufweisen. Ein hoher AFu-Besatz zu einem späteren Boniturtermin kann daher nicht ausschließlich als unmittelbare Folge der zuletzt durchgeführten Maßnahme interpretiert werden, sondern kann auch durch die Ausgangssituation und die räumliche Verteilung des AFu beeinflusst sein.

Hinzu kommt die räumliche Heterogenität des AFu-Besatzes innerhalb der Varianten. Die Betrachtung der Boniturpunkte über den gesamten Versuchszeitraum zeigte, dass Bereiche mit hohem Befall teilweise über längere Zeit an ähnlichen Positionen auftraten. Aufgrund des nesterförmigen Auftretens bilden die an einzelnen Boniturpunkten erhobenen Pflanzenzahlen daher nicht zwangsläufig den AFu-Besatz der gesamten Variante ab. Kleinräumige Unterschiede können dadurch einen großen Einfluss auf die erfassten Pflanzenzahlen haben.

Eine weitere wesentliche Einschränkung ergibt sich aus der fehlenden echten Wiederholung der Varianten. Die einzelnen Ackerbaustrategien wurden nicht in mehreren unabhängig randomisierten Wiederholungen angelegt, sodass Unterschiede zwischen den Varianten neben den durchgeführten Maßnahmen auch durch räumliche Standortunterschiede innerhalb der Versuchsfläche beeinflusst worden sein können. Die Ergebnisse eignen sich daher vor allem zur Beschreibung von Entwicklungen und langfristigen Trends, erlauben jedoch keinen statistischen Nachweis isolierter Effekte einzelner Ackerbaumaßnahmen. Die Betrachtung des Gesamttrends und der Residuen ermöglicht dennoch eine relative Einordnung der Variantenentwicklung über den Versuchszeitraum. Einzelne Varianten zeigten einen geringeren beziehungsweise stärkeren Anstieg des AFu-Besatzes, als anhand der allgemeinen Entwicklung der Versuchsfläche zu erwarten gewesen wäre. Die Residuen sind dabei nicht als Nachweis eines Maßnahmeneffektes zu verstehen, sondern ermöglichen eine deskriptive Einordnung, ob sich

einzelne Varianten im Verhältnis zur allgemeinen Entwicklung der Versuchsfläche günstiger oder ungünstiger entwickelten.

Die untersuchten Einflussfaktoren konnten darüber hinaus nicht vollständig voneinander getrennt werden. Fruchtfolge, Bodenbearbeitungsintensität, Scheinbestellung, Bearbeitungszeitpunkt und chemische Bekämpfung unterschieden sich teilweise zum selben Zeitpunkt beziehungsweise bauten zeitlich aufeinander auf. Zusätzlich beeinflussten die jeweiligen Witterungsbedingungen sowohl den AFu-Auflauf als auch die praktische Durchführbarkeit einzelner Maßnahmen. Ein beobachteter Unterschied zwischen zwei Varianten kann daher nicht zwangsläufig einem einzelnen Bearbeitungsschritt zugeschrieben werden. Die Entwicklung des AFu-Besatzes ist vielmehr als Ergebnis der jeweiligen Maßnahmenabfolge unter den Bedingungen des jeweiligen Anbaujahres zu betrachten.

Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass das im Boden vorhandene AFu-Samenpotenzial nicht direkt erfasst wurde. Die in der Diskussion beschriebenen möglichen Zusammenhänge zwischen Bodenbearbeitung, Samenmobilisierung und späterem AFu-Auflauf stellen daher methodische Erklärungsansätze auf Grundlage der beobachteten Pflanzenzahlen dar. Ob und in welchem Umfang Samen tatsächlich innerhalb des Bodenprofils verlagert oder das Samenpotenzial über den Versuchszeitraum reduziert wurde, lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht unmittelbar nachweisen. Das tatsächliche Samenpotenzial des Standortes lässt sich durch praktikable Messmethoden nicht konkret quantifizieren.

Auch die Resistenzuntersuchungen bilden jeweils nur einen Ausschnitt der Herbizidwirkung innerhalb der Versuchsfläche ab. Die deutlichen Unterschiede zwischen einzelnen Proben zeigen, dass die Wirkung kleinräumig stark variieren kann. Aussagen aus einzelnen Resistenzproben sind daher nur eingeschränkt auf die gesamte Versuchsfläche oder auf Veränderungen zwischen Untersuchungsjahren übertragbar.

Für die digitale AFu-Erfassung kommt hinzu, dass die punktuellen Bonituren aufgrund des nesterförmigen AFu-Besatzes keine vollständig flächige Referenz für die Drohnendaten darstellen. Unterschiede zwischen den Boniturpunkten und der flächigen Bildinformation können dadurch die beobachteten Zusammenhänge beeinflussen. Daher sollte für weitere Versuche geprüft werden, inwieweit die Boniturmethode angepasst werden kann, um größere Flächen zu erfassen und die räumlichen Gegebenheiten innerhalb einer Variante besser abzubilden. Eine mögliche Alternative könnte dabei die Schätzung des AFu-Besatzes darstellen. Dadurch ließen sich möglicherweise größere Flächen effizienter erfassen. Eine verlässliche Schätzung setzt jedoch umfangreiche Erfahrung in der Beurteilung des AFu-Besatzes voraus.

Selbst in Parzellenversuchen, wo übliche Größen bei ca. 25qm Fläche je Parzelle liegen, wird der AFu-Besatz geschätzt, weil die Verteilung selbst auf dieser kleinen Fläche variiert und eine Zählung von beispielsweise einem Viertelquadratmeter für die Quantifizierung allein nicht ausreichend ist. Für diese Bonituren müssen die durchführenden Personen über mehrere Jahre Erfahrungen sammeln. Es wäre denkbar, dieser Erfahrungen zu nutzen, um durch RGB-Orthomosaike aus Drohnendaten den AFu-Besatz für die Flächen zu schätzen. Damit wäre es möglich eine quantitative Unterscheidung zwischen Versuchsvarianten zu erhalten und auf der anderen Seite Erfahrungen für die quantitative Einschätzung von AFu-Besatzstärken von Praxisschlägen zu erarbeiten.

Wechselnde Aufnahmebedingungen, unterschiedliche Sensorsysteme und die begrenzte Anzahl geeigneter Befliegungstermine schränken zudem die Vergleichbarkeit der digitalen Daten zwischen den Jahren ein. Die Ergebnisse der Fernerkundung sind daher ebenfalls vor dem Hintergrund dieser methodischen Rahmenbedingungen zu bewerten.

Trotz der vorliegenden Einschränkungen stellt der mehrjährige Versuchszeitraum eine wesentliche Stärke des Versuchs dar. Die langfristige Umsetzung unter Praxisbedingungen ermöglichte es, die Entwicklung des AFu-Besatzes im Zusammenhang mit wechselnden Kulturen, Witterungsbedingungen und aufeinanderfolgenden Bewirtschaftungsmaßnahmen zu betrachten. Die Ergebnisse sind daher weniger als Nachweis isolierter Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu verstehen, sondern vielmehr als Hinweise auf langfristige Entwicklungen und das Zusammenspiel verschiedener ackerbaulicher und chemischer Maßnahmen. Gerade für die Bewertung eines integrierten AFu-Managements ist diese mehrjährige Betrachtung relevant, da die Populationsentwicklung nicht durch eine einzelne Maßnahme oder ein einzelnes Anbaujahr bestimmt wird.

3.6 Gesamtbewertung und Schlussfolgerung für die Praxis

Der mehrjährige Versuch verdeutlicht die Komplexität der Ackerfuchsschwanzregulierung unter Praxisbedingungen. Der Erfolg einer Maßnahme hängt nicht ausschließlich von ihrer grundsätzlichen Wirksamkeit ab, sondern auch davon, ob sie zum geeigneten Zeitpunkt und unter geeigneten Bedingungen umgesetzt werden kann. Im Versuchsverlauf zeigte sich, dass eine theoretisch geeignete Strategie aufgrund von Witterung, Befahrbarkeit, betrieblichen Abläufen oder Vermarktungsmöglichkeiten nicht immer wie geplant umgesetzt werden kann. Für die Praxis ist nicht nur die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen relevant, sondern deren Umsetzbarkeit und Einbindung in das jeweilige Betriebssystem. Dennoch lassen sich aus den Ergebnissen relevante Hinweise für die Praxis ableiten.

Über die betrachteten Kulturen und Jahre ließ sich im Versuch dabei keine konsistente ertragliche Überlegenheit einer der untersuchten Strategien feststellen. Eine erfolgreiche AFu-Regulierung sollte daher nicht allein anhand kurzfristiger Veränderungen des Pflanzenbesatzes oder einzelner Ertragsjahre bewertet werden. Entscheidend ist vielmehr die langfristige Entwicklung des Gesamtsystems und die Frage, ob es gelingt, den weiteren Populationsaufbau zu begrenzen, ohne die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Fruchtfolge zu beeinträchtigen.

Der erste entscheidende Ansatz liegt in der Gestaltung der Fruchtfolge. Unterschiedliche Kulturen in der Fruchtfolge führen zu verschiedenen Aussaat- und Erntezeitpunkten, verschiedenen verfügbaren Herbizidwirkstoffen sowie durch die Biologie der Kultur eine unterschiedliche Stärke der Unterdrückung des AFus. Dadurch kann der Lebenszyklus von AFu unterbrochen werden. Zusätzlich kann der Einbau von Sommerungen weitere Zeitfenster für die Regulierung von Ackerfuchsschwanz schaffen. Damit kommt als zweiter Faktor die Bodenbearbeitung ins Spiel. Diese sollte situationsabhängig an die jeweilige Ausgangssituation angepasst werden. Eine gezielte Bodenbearbeitung kann das Auflaufen von AFu beeinflussen und damit Teil einer abgestimmten Maßnahmenfolge sein

Beide Faktoren, Fruchtfolge und Bodenbearbeitung, greifen dabei ineinander, müssen jedoch im Gegensatz zu dem statischen Ansatz eines Versuchs dynamisch gehandhabt werden. Denn insbesondere an Küstenstandorten wie Elskop können zwischen den Jahren erhebliche Witterungsunterschiede auftreten, die eine flexible Anpassung der Bodenbearbeitung und der Fruchtfolgeglieder erfordern, wie auch im Versuch deutlich wurde (Tabelle 1). Neben den Witterungsbedingungen hat zudem die Entwicklung des AFu in der Vorfrucht einen entscheidenden Einfluss auf den Erfolg der Maßnahmen zur Reduzierung des AFu-Besatzes. Dabei ist zu unterscheiden, ob

- der AFu-Besatz ausschließlich aus dem bereits vorhandenen Samenpotenzial im Boden hervorgeht
  oder
- durch die Vorfrucht zusätzlich eine Samenschüttung stattgefunden hat.

Diese Unterscheidung ist für die weitere Strategie entscheidend, da bei wiederholt ausbleibender Samenschüttung das Samenpotenzial im Boden kontinuierlich reduziert werden kann. Somit sind das Auftreten einer Samenschüttung in der Vorfrucht sowie die durch Ernte- und Aussaatzeitpunkt vorgegebenen Bearbeitungszeitfenster entscheidungsrelevant für die Intensität der Bodenbearbeitung und die Auswahl der Folgefrucht.

Bei einer starken Samenschüttung infolge einer späten Ernte der Winterung sollte daher zunächst geprüft werden, ob das verbleibende Zeitfenster eine Scheinsaat ermöglicht. Abhängig

von deren Erfolg und der verbleibenden Vegetationszeit ist dabei insbesondere eine Sommerung als Folgefrucht zu bevorzugen, da frisch geschüttete AFu-Samen eine primäre Dormanz von bis zu acht Wochen aufweisen können (Colbach, et al., 2002; Swain, et al., 2006). Bei einer anschließenden Winterung könnten dadurch AFu-Samen gemeinsam mit der Kultur auflaufen, welches insbesondere aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten zur Bekämpfung von AFu im Winterweizen problematisch sein kann. Durch den Anbau einer Sommerung ergibt sich hingegen ein zusätzliches Bekämpfungsfenster im Frühjahr, in dem durch eine Grundbodenbearbeitung im Herbst weiteres Samenpotenzial zur Keimung angeregt und der anschließend auflaufende AFu vor der Aussaat der Sommerung bekämpft werden kann. Liegt hingegen keine oder nur eine geringe Neuschüttung vor, kann der Fokus auf der Reduzierung des bereits im Boden vorhandenen Samenpotenzials liegen, wobei hierfür ausreichend Zeit eingeplant werden sollte. Bei einer folgenden Winterung ist das verfügbare Zeitfenster hierfür begrenzt, sodass wiederholte flache und wenig mischende Bearbeitungsschritte zu bevorzugen sind, durch die ein Teil des vorhandenen Samenpotenzials zur Keimung angeregt wird. Der aufgelaufene AFu sollte vor der Aussaat chemisch oder durch eine weitere Bearbeitung bekämpft werden, wobei die anschließende Aussaat mit möglichst geringer Bodenbewegung erfolgen sollte, um nicht erneut Samen zum Keimen anzuregen. Eine solche Vorgehensweise bietet sich beispielsweise nach einer im August geernteten Winterung ohne AFu-Neuschüttung und einer geplanten Winterweizenaussaat Anfang Oktober an. Unabhängig von der gewählten Strategie ist die erfolgreiche Bekämpfung des auflaufenden AFu entscheidend, wobei ergänzend auch chemische Maßnahmen zum Einsatz kommen können.

Die chemische Bekämpfung bleibt somit ein wichtiger Bestandteil der AFU-Regulierung. Die innerhalb der Versuchsfläche festgestellten Unterschiede in der Herbizidwirkung verdeutlichen jedoch die Bedeutung eines vielseitigen Bekämpfungsansatzes. Herbizide sollten daher gezielt in eine Maßnahmenfolge eingebunden und nicht als alleinige Grundlage der langfristigen AFU-Regulierung betrachtet werden. Die Kombination mit pflanzenbaulichen Maßnahmen kann dazu beitragen, den Selektionsdruck auf einzelne Wirkmechanismen zu begrenzen und die verfügbaren Bekämpfungsmöglichkeiten langfristig zu erhalten.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen an eine auswertbare Drohnenaufnahme ließe sich auf dieser Grundlage grundsätzlich eine teilflächenspezifische Applikationskarte erstellen. Die im Versuchszeitraum beobachtete Persistenz der AFu-Nester könnte dabei einen Ansatz bieten, die Schwierigkeit der Erkennung von Ackerfuchsschwanz in frühen Wachstumsstadien zu umgehen. So könnte beispielsweise eine in der Vorfrucht erstellte Kartierung der AFu-Nester, bei der sich der Ackerfuchsschwanz aufgrund seiner Ähren zum Aufnahmezeitpunkt eindeutig erfassen lässt, als Grundlage für die Erstellung einer Applikationskarte in der nachfolgenden Kultur dienen. Voraussetzung hierfür wäre jedoch, dass die räumliche Lage der AFu-Nester

über die Kulturen bzw. Jahre hinweg hinreichend stabil bleibt. Dies muss aus der Erfahrung heraus adäquat interpretiert und eingeschätzt werden und weiterhin durch ein konsequentes Monitoring anhand regelmäßiger Drohnenbefliegungen begleitet werden. Damit wird die Persistenz der AFu-Nester überprüft und Veränderungen in ihrer räumlichen Ausdehnung erfasst.

Aus dem mehrjährigen Feldversuch kann somit kein allgemeingültiger Maßnahmenablauf abgeleitet werden. Die Ergebnisse liefern jedoch Hinweise darauf, dass eine angepasste Fruchtfolge in Kombination mit einer situationsabhängigen Bodenbearbeitung und einer gezielten Nutzung von Scheinbestellungen zur Begrenzung des weiteren AFu-Populationsaufbaus beitragen kann. Welche Maßnahmenkombination unter diesen Bedingungen sinnvoll ist, muss jedoch an Samenschüttung in der Vorfrucht, Boden, Witterung, verfügbare Zeitfenster und betriebliche beziehungsweise wirtschaftliche Rahmenbedingungen im jeweiligen Anbaujahr angepasst werden.

Bezogen auf die zu Beginn formulierten Hypothesen ergibt sich ein differenziertes Bild. Die Hypothese, dass eine lockernde und wenig mischende Bodenbearbeitung über mehrere Jahre zu einer Verringerung des AFu-Besatzes führt, während eine stärker mischende Bodenbearbeitung eine stärkere Zunahme verursacht, konnte anhand der Boniturergebnisse nicht bestätigt werden. Über den Versuchszeitraum zeigte sich kein einheitlicher Vorteil der lockernden gegenüber der mischenden Bodenbearbeitung. Dies wird insbesondere im Vergleich der Varianten 1 und 2 deutlich, die beide ohne Scheinbestellung geführt wurden und trotz unterschiedlicher Bodenbearbeitung keinen eindeutigen Unterschied in der Entwicklung des AFu-Besatzes zeigten. Auch die stärker mischenden Varianten entwickelten sich nicht einheitlich, sodass sich kein isolierter Effekt der Bodenbearbeitungsintensität ableiten lässt.

Für die Hypothese zur Scheinbestellung ergaben sich dagegen Hinweise auf einen positiven Effekt, sofern der durch die vorzeitige Bodenbearbeitung angeregte AFu-Auflauf des Samenpotenzials aus dem Boden anschließend wirksam beseitigt werden konnte. So zeigte Variante 7, die eine mischende Bodenbearbeitung mit Scheinbestellung und die angepasste Fruchtfolge mit einem höheren Anteil an Sommerungen kombinierte, über den Versuchszeitraum den geringsten Anstieg des AFu-Besatzes. Auch die Entwicklung der übrigen Varianten mit Scheinbestellung deutet darauf hin, dass deren Wirkung wesentlich von den jeweiligen Bedingungen abhing. Insbesondere die Witterung beeinflusste, ob nach der Bodenbearbeitung ausreichend AFu auflief und die aufgelaufenen Pflanzen anschließend beseitigt werden konnten. Damit stützen die Ergebnisse die Hypothese, dass der wiederkehrende Einsatz einer Scheinbestellung zur Begrenzung des AFu-Besatzes beitragen, ihre Wirkung jedoch nicht unabhängig von den nachfolgenden Bekämpfungsmöglichkeiten betrachtet werden kann.

Auch für die Hypothese zum höheren Anteil an Sommerungen in der Fruchtfolge ergeben sich aus dem Versuch Hinweise auf eine Begrenzung der AFu-Entwicklung. Bei der Betrachtung der über die Fruchtfolgen gemittelten AFu-Pflanzenzahlen zeigte die angepasste Fruchtfolge eine günstigere Entwicklung als die stärker winterungsbetonte Fruchtfolge. Ein isolierter Effekt der Fruchtfolge konnte aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsbelastungen der Varianten jedoch nicht eindeutig quantifiziert werden.

Die Entwicklung der Variante 7 verdeutlicht jedoch das mögliche Zusammenwirken beider Faktoren: In Verbindung mit einer mischenden Bodenbearbeitung und einer Scheinbestellung zeigte die angepasste Fruchtfolge mit zunehmendem Anteil an Sommerungen den geringsten Anstieg des AFu-Besatzes. Damit stützen die Versuchsergebnisse auch die Hypothese, dass die Kombination aus angepasster Fruchtfolge und geeigneter Bodenbearbeitung einen stärkeren Beitrag zur Begrenzung der AFu-Population leisten kann als die Betrachtung einzelner Maßnahmen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse des fünfjährigen Versuchs in Elskop, dass die Entwicklung des AFu-Besatzes nicht durch einzelne Faktoren eindeutig gesteuert werden konnte. Vielmehr erwies sich das Zusammenspiel von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Scheinbestellung und der anschließenden Bekämpfung aufgelaufener AFu-Pflanzen als entscheidend. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Wirksamkeit dieser Maßnahmen stark von den jeweiligen Jahresbedingungen und den dadurch möglichen Bearbeitungszeiträumen abhängig war. Für die Praxis bedeutet dies, dass eine erfolgreiche langfristige AFu-Regulierung insbesondere eine flexible Anpassung der Maßnahmen an Witterung, Auflaufbedingungen und Fruchtfolge erfordert. Der Versuch liefert damit Hinweise darauf, dass nicht die konsequente Anwendung einer einzelnen Maßnahme, sondern die aufeinander abgestimmte Kombination verschiedener ackerbaulicher Maßnahmen das größere Potenzial zur Begrenzung des AFu-Besatzes bietet.

Zusammenfassung

Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* Huds.) stellt insbesondere in getreidebetonten Fruchtfolgen eine zunehmende Herausforderung für den Ackerbau dar. Ziel des mehrjährigen Praxisversuchs auf einem Marschstandort in Schleswig-Holstein war es, den Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungsstrategien und Fruchtfolgen auf die Entwicklung des Ackerfuchsschwanzbesatzes unter Praxisbedingungen zu untersuchen. Ergänzend wurde die Eignung von Drohnenaufnahmen zur Erfassung von Ackerfuchsschwanz untersucht.

Über den Versuchszeitraum nahm der Ackerfuchsschwanzbesatz insgesamt zu, wobei sich die Entwicklung zwischen den Varianten deutlich unterschied. Eine eindeutig überlegene Bodenbearbeitungsstrategie konnte nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass die Intensität der Bodenbearbeitung beeinflussen kann, welches im Boden vorhandene Samenpotenzial zur Keimung angeregt wird. In Verbindung mit einer anschließenden Scheinbestellung kann dieser Effekt gezielt genutzt werden, sofern aufgelaufene Pflanzen zuverlässig vor der Samenbildung beseitigt werden. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen war jedoch eng an die Witterungsbedingungen geknüpft. Insbesondere die Bodenfeuchte beeinflusste, ob nach einer Bodenbearbeitung ein ausreichender Auflauf erreicht wurde und damit eine anschließende Bekämpfung möglich war. Neben der Bodenbearbeitung zeigte auch die Fruchtfolge einen Einfluss auf die Entwicklung des Ackerfuchsschwanzbesatzes. Sommerungen und Zwischenfrüchte können ein Baustein in der AFu-Bekämpfung sein, denn sie führen zu weiteren Zeitfenstern zur Bekämpfung. Diese können jedoch nur genutzt werden, wenn geeignete Bedingungen für Keimung, Auflauf und anschließende Bekämpfung bestehen. Damit stellt die Witterung einen entscheidenden Rahmenfaktor dar. Trockene Bedingungen nach der Ernte können den Auflauf trotz erfolgter Bodenbearbeitung begrenzen, während ausreichende Bodenfeuchte zwar den Auflauf begünstigen, zugleich aber die Befahrbarkeit und damit die rechtzeitige Bekämpfung einschränken können.

Die Resistenzuntersuchungen zeigten eine heterogene Herbizidsensitivität innerhalb der Versuchsfläche. Dies verdeutlicht die Bedeutung einer integrierten Regulierung, bei der chemische Maßnahmen mit pflanzenbaulichen Strategien kombiniert werden. Die durch die Drohnendaten erhobenen Vegetationsindizes lieferten jedoch unterschiedliche Ergebnisse. Eine zuverlässige automatisierte Erkennung einzelner Pflanzen oder Nester in frühen Entwicklungsstadien war unter den gegebenen Bedingungen noch nicht möglich.

Insgesamt verdeutlicht der Praxisversuch die Komplexität der Ackerfuchsschwanzregulierung unter Praxisbedingungen. Keine der untersuchten Einzelmaßnahmen erwies sich als überlegen. Vielmehr erscheint eine situationsabhängige Kombination aus angepasster Fruchtfolge, gezielter Bodenbearbeitung und chemischer Bekämpfung sinnvoll, um den weiteren

Populationsaufbau zu begrenzen. Dabei müssen insbesondere Witterung, betriebliche Möglichkeiten und die verfügbaren Zeitfenster berücksichtigt werden. Der Versuch zeigt damit, dass eine erfolgreiche Ackerfuchsschwanzregulierung weniger auf einer einzelnen optimalen Maßnahme als auf der abgestimmten Umsetzung verschiedener Maßnahmen über die gesamte Fruchtfolge beruht.

Literaturverzeichnis

Chauvela, B., Guilleminb, J.-P. & Colbacha, N., 2008. Evolution of a herbicide-resistant population of Alopecurus myosuroides Huds. in a long-term cropping system experiment. *Crop Protection,* pp. 343-349.

Colbach, N., Dürr, C., Chauvel, B. & Richard, G., 2002. Effect of environmental conditions on Alopecurus myosuroides germination.. *Weed Research,* Band 42, pp. 210-230.

Gitelson, A., Kaufman, Y., Stark, R. & Rundquist, D., 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment,* pp. 76-87.

LfU-SH, 2016. *Umweltportal Schleswig-Holstein*. [Online]
Verfügbar unter: https://umweltportal.schleswig-holstein.de/trefferanzeige?docuuid=607bf850-84c1-46c5-ae1d-f8d05326cc28
[Zugriff am 20 08 2026].

Matthiesen, S., 2010. *Ackerbauliche Maßnahmen gegen Ackerfuchsschwanz (Alopecurus myosuroides Huds.),* s.l.: s.n.

Montero, D. et al., 2023. A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research. *Sci Data*.

Moss, S., 2017. Black-grass (Alopecurus myosuroides): Why has this weed become such a problem in Western Europe and what are the solutions?. *Outlooks on Pest Management,* pp. 207-212.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W., 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. s.l., s.n., pp. 309-317.

Swain, A., Hughes, Z., Cook, S. & Moss, S., 2006. Quantifying the dormancy of Alopecurus myosuroides seeds produced by plants exposed to different soil moisture and temperature regimes. *Weed Research,* Band 46, pp. 470-479.

Torres-Sanchez, J., Lopez-Granados, F., De Castro, A. I. & Pena-Barragan, J. M., 2013. Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management. *PLOS ONE*.

Väderstad, 2024. [Online]
Verfügbar unter: https://www.vaderstad.com/de/produkte/crosscutter-disc-
[Zugriff am 16 07 2026].

Väderstad, 2024. [Online]
Verfügbar unter: https://www.vaderstad.com/de/produkte/konfigurator
[Zugriff am 16 07 2026].

Voßheinrich, H.-H.et al., 2018. Entwicklung nachhaltig wirkender Methoden zur Ackerfuchsschwanzbekämpfung. *Thünen Working Paper*.

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,* pp. 259-269.