



Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang Agrarwirtschaft M.Sc.

Masterthesis

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

Nutzung von Satellitendaten für den Standort-spezifischen
Pflanzenbau am Beispiel der Talking Fields Basiskarte
für den Winterrapsanbau im Anbaujahr 2018/2019

vorgelegt von
Friederike Kunkel

Erstprüfer: Prof. Dr. Eike Stefan Dobers
Zweitprüfer: Prof. Dr. Bernhard Seggeiß

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2019-0542-8

Neubrandenburg
Januar 2020

„Wer die Perspektive ändert, sieht die Dinge in einem ganz anderen Licht.“

Engelbert Schinkel

Abstract

The aim of the present study was to determine the added value of information about the growth of winter oilseed rape, that can be achieved by using the geodata sources Talking Fields basemap, Sentinel-2 satellite data, GreenSeeker-measurements and relative yield data for the site-specific crop production.

For this purpose the growth of rapeseed was monitored on a field plot near Neubrandenburg in Mecklenburg-Vorpommern over the growing year 2018/2019. The growth parameters of rapeseed, measured at 18 points, were examined for correlations with the relative biomass deviation, taken from the Talking Fields basemap, the vegetation index NDVI, which was determined on the basis of Sentinel-2 satellite images and measurements of the GreenSeeker, as well as relative yields of the examined field for the years 2003 - 2015.

The investigations showed that the Talking Fields basemap allowed conclusions on rapeseed growth before winter, but none on the yield of rapeseed. Sentinel-2 satellite scenes and the NDVI, calculated from it, were used to gain a comprehensive overview of the growth of the plants on the examined field and to draw conclusions on the pre-winter crop growth and the yield of rapeseed. The NDVI, measured by the GreenSeeker at the time of the pre-winter data collection, also allowed conclusions on the growth and the yield of rapeseed. Based on the relative yields and visual evaluation of the relative yield maps, there was no additional information on growth of rapeseed and the yield of it.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
1 Problemstellung.....	6
2 Stand des Wissens.....	8
2.1 Ertragsbildung bei Winterraps	8
2.2 Grundlagen der Fernerkundung	11
2.3 Sentinel-2 -Satelliten	12
2.4 Talking Fields	13
2.5 Normalized Difference Vegetation Index	15
3 Material und Methoden.....	18
3.1 Untersuchungsregion und Versuchsfeld.....	18
3.2 Talking Fields Basiskarte.....	21
3.3 Auswahl der Messpunkte	23
3.4 Bestandesentwicklung und Pflanzenprobenahme	25
3.5 Geodaten als Referenzdatenquelle	28
3.5.1 Sentinel-2-Satellitenbilder	28
3.5.2 GreenSeeker-Messungen von Winterweizen und Winterraps.....	29
3.5.3 Ertragsdaten und Relativvertragskarten	30
3.6 Statistische Datenauswertung	32
4 Ergebnisse	33
4.1 Pflanzenentwicklung vor Winter.....	33
4.2 Kornertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019	39
4.3 Geodaten als Referenzdatenquelle	44
4.3.1 Sentinel-2-Satellitenbilder	44
4.3.2 GreenSeeker-Messungen von Winterweizen und Winterraps.....	52
4.3.3 Relativvertragskarten	55
4.4 Satellitendaten in der praktischen Landwirtschaft - Erfahrungsberichte	58

5	Diskussion.....	62
5.1	Entwicklung des Winterrapses vor Winter	62
5.2	Kornertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019	65
5.3	Geodaten als Referenzdatenquelle	69
5.3.1	Sentinel-2-Satellitenbilder	69
5.3.2	GreenSeeker-Messungen von Winterweizen und Winterraps.....	74
5.3.3	Relativvertragskarten	76
5.4	Satellitendaten in der praktischen Landwirtschaft - Erfahrungsberichte	77
6	Schlussfolgerungen.....	81
7	Zusammenfassung.....	85
9	Quellenverzeichnis	87
	Anhang.....	93
	Selbstständigkeitserklärung	98

Abkürzungsverzeichnis

BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
ESA	European Space Agency
GS	GreenSeeker
M-V	Mecklenburg-Vorpommern
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot
RE	Relativvertrag
REK	Relativvertragskarte
Se2	Sentinel-2
TF	Talking Fields
TM	Trockenmasse
WHD	Wurzelhalsdurchmesser
QGIS	Quantum GIS

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des Versuchsfeldes in Mecklenburg-Vorpommern (oben) und bei Neubrandenburg (unten).....	19
Abbildung 2: Witterungsverlauf mit Temperatur (Minimum, Maximum, Quer) [°C], Sonnenstunden [h*Monat ⁻¹] und Niederschlagsmenge [mm*Monat ⁻¹] von August 2018 bis Juli 2019.....	20
Abbildung 3: Darstellung der Talking Fields Basiskarte anhand der relativen Biomasse-Abweichung [%] auf dem Untersuchungsfeld mit 18 Messpunkten	21
Abbildung 4: Karte des Untersuchungsfeldes mit Feldgrenze, Saatzonen, beprobten Regionen und Messpunkten	25
Abbildung 5: Beerntung eines Messpunktes zur Bonitur der oberirdischen Biomasse vor dem Winter	27
Abbildung 6: Karten des GreenSeeker-NDVI vom 28.04.2017 und 21.11.2018 (interpoliert)	29
Abbildung 7: Relativvertragskarten mit den Relativverträgen [%] des Versuchsfeldes aus den Verrechnungszeiträumen 2003-2012 (links) und 2006-2015 (rechts)	31
Abbildung 8: Verteilung der Trockenmasse [g*m ⁻²] an den 18 Messpunkten und Einfärbung anhand der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields	36
Abbildung 9: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und der Trockenmasse [g*m ⁻²]	38
Abbildung 10: Statistischer Zusammenhang zwischen dem Wurzelhalsdurchmesser [mm] und dem Einzelpflanzengewicht [g TM*Pfl. ⁻¹]	39
Abbildung 11: Karte der bereinigten und interpolierten Ertragsdaten des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019.....	40
Abbildung 12: Ergebnisse des Kornertrags [t*ha ⁻¹] an den 18 Messpunkten und Einfärbung anhand der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields	41
Abbildung 13: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Kornertrag [t*ha ⁻¹] des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019	42
Abbildung 14: Statistischer Zusammenhang zwischen der Bestandesdichte [Pfl.*m ⁻²] und dem Kornertrag [t*ha ⁻¹] des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019	43
Abbildung 15: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Sentinel-2-NDVI _{15.03.2017} [-] ...	45
Abbildung 16: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Sentinel-2-NDVI _{28.03.2017} [-]....	46

Abbildung 17: Monatliche Entwicklung des NDVI über den Vegetationszeitraum des Winterrapses von August 2018 bis Juli 2019 in den Regionen Nord, Süd und West	47
Abbildung 18: Entwicklung des NDVI [-] von Winterraps im Anbaujahr 2018/2019 auf dem Untersuchungsfeld anhand von sechs Sentinel-2-Satellitenaufnahmen	48
Abbildung 19: Entwicklung des Bestimmtheitsmaßes des Se2-NDVI zu verschiedenen Messzeitpunkten und dem Körnertrag in Kombination mit dem des BBCH-Stadium	51
Abbildung 20: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem GreenSeeker-NDVI _{28.04.2017} [-]	53
Abbildung 21: Statistischer Zusammenhang zwischen dem GreenSeeker-NDVI _{21.11.2018} [-] und dem Sentinel-2-NDVI _{28.11.2018} [-] und Einfärbung anhand der relativen Biomasse-Abweichung [-] nach Talking Fields	54
Abbildung 22: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Relativvertrag _{2003 - 2012} [%]	56
Abbildung 23: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Relativvertrag _{2006 - 2015} [%]	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über empfohlene Bestandeseigenschaften von Winterraps vor dem Winter.....	8
Tabelle 2: Übersicht der Zuordnung der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields, Klasse und farblichen Darstellung zu den 18 Messpunkten.....	23
Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse der Punkternte des Winterrapses vor dem Winter im Anbaujahr 2018/2019 anhand der Bestandesparameter BBCH-Stadium, Bestandesdichte, Trockenmasse, Feuchte, Einzelpflanzengewicht und Wurzelhalsdurchmesser	34
Tabelle 4: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen der gemessenen Pflanzenentwicklungsparameter vor dem Winter und der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields.....	37
Tabelle 5: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen des Kornertrags des Winterrapses [t^*ha^{-1}] im Anbaujahr 2018/2019, der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und der gemessenen Pflanzenentwicklungsparameter vor dem Winter ...	42
Tabelle 6: Anzahl jährlich verfügbarer und verwendbarer Sentinel-2-Satellitenbilder in Abhängigkeit von dem maximalen Wolkenbedeckungsgrad von 2016 bis 2019, Stand: 30.11.2019	44
Tabelle 7: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen des Sentinel-2-NDVI aus zwei Aufnahmen (28.11.2018; 05.12.2018), der Pflanzenentwicklungsparameter vor dem Winter und des Kornertrags [t^*ha^{-1}] 2019	49
Tabelle 8: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen des GreenSeeker-NDVI [-] (28.04.2017; 21.11.2018) und der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields, des Sentinel-2-NDVI [-] verschiedener Zeitpunkte, ausgewählter Bestandesparameter und des Kornertrags [t^*ha^{-1}] 2019	52
Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen der Relativverträge [%] der Dekaden 2003-2012 und 2006-2015 und der relativen Biomasseabweichung [%] nach Talking Fields, des GreenSeeker-NDVI _{21.11.2018} [-] und des Sentinel-2-NDVI [-] verschiedener Satellitenszenen, ausgewählter Pflanzenentwicklungsparameter und des Kornertrags [t^*ha^{-1}] 2019	56

1 Problemstellung

Die Landwirtschaft befindet sich in einem stetigen Entwicklungs- und Anpassungsprozess, welcher sich durch verschiedene Herausforderungen ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Art ergibt. Der Standort-spezifische Pflanzenbau ist ein Ansatz, durch welchen eine effizientere und damit auch nachhaltigere Bewirtschaftung von insbesondere heterogenen Flächen realisiert werden soll. Für effizientere und an die Flächen-spezifische Variabilität angepasste Bewirtschaftungsmethoden werden, neben leistungsfähiger Landtechnik, vor allem zuverlässige Informationen für reproduzierbare Entscheidungsprozesse benötigt, bei denen auch die Kenntnis von kleinräumigen Differenzen eine entscheidende Rolle spielt.

Teilflächen-spezifische Anbauverfahren auf Basis von Satellitendaten sind dabei von immer größerer Bedeutung. Diese Fernerkundungsmethode dient als externe Datenquelle, durch welche Geoinformationen über Ackerschläge und das Wachstum landwirtschaftlicher Feldkulturen gewonnen werden können. Da sich die Wiederkehrrate, Auflösung und damit Genauigkeit von Satelliten-gestützten Verfahren in den vergangenen Jahren deutlich verbessert hat, steigt auch die Nachfrage nach diesen Fernerkundungsdaten. Satellitendaten sind jedoch nur Rohdaten, welche erst interpretiert werden müssen, um daraus Informationen zu erhalten. Da dies im landwirtschaftlichen Betriebsalltag aufgrund eines Kenntnis- und Zeitmangels oftmals nicht zuverlässig realisiert werden kann, muss der Landwirt auf externe Unterstützung zurückgreifen.

Online-Plattformen wie Talking Fields (Vista), My Data Plant (Kleffmann Group) oder Atfarm (Yara) haben sich dieser Problematik gewidmet. Die Unternehmen stellen durch die Auswertung und Kombination von Satellitendaten, Pflanzenwachstumsmodellen und anderen Geodatenquellen Informationsprodukte zur Verfügung, die den Landwirt bei der Entscheidungsfindung im Standort-spezifischen Pflanzenbau unterstützen sollen. Diese Produkte sind zumeist Übersichts- und Applikationskarten eines Ackerschlages, wie auch die Talking Fields Basiskarte, welche Angaben über Standorteigenschaften sowie Boden- und Bestandeszustände enthalten. Die genannten Unternehmen sind dabei nur einige der vielen Fachnutzer, welche speziell Daten der Sentinel-2-Erdbeobachtungssatelliten auswerten und die moderne Satellitentechnologie der ESA als Datenquelle zur Erstellung ihrer Kartenmodelle nutzen.

Mittlerweile existiert eine Vielzahl an Anbietern, welche diverse Kartenmodelle und Anwendertools zur Verfügung stellen, die für verschiedenste Betriebsstrukturen geeignete Lösungen bieten sollen. Damit wird bei dem potentiellen Anwender auch eine entsprechende Erwartungshaltung bezüglich der Aussagekraft und Zuverlässigkeit dieser Produkte erzeugt. Das Problem besteht darin, dass sich aus verschiedenen Gründen jedoch nicht immer ein eindeutiger Mehrwert an Informationen durch die Nutzung solcher Karten ergibt, wodurch nicht

zuletzt die Leistungsfähigkeit dieser Informationsprodukte in Frage gestellt wird. Das Hinterfragen von online generierten Produkten ist zwar ein fester Bestandteil des gesamten Arbeitsprozesses, führt aber zu einer fortwährenden Suche nach alternativen Geodatenquellen und Verarbeitungsmethoden, anhand welcher Ackerschlag-spezifische Informationen zuverlässig, aber auch unabhängig von Dritten gewonnen werden können.

In Hinblick auf die gesamte Problematik und auf Basis vorhandener Datenquellen ergeben sich folgende Forschungsfragen, die in dieser Arbeit näher untersucht werden sollen:

1. *Welcher Mehrwert an Informationen ist durch die Nutzung der Talking Fields Basiskarte realisierbar? Lassen sich mit Hilfe dieser Karte Erkenntnisse über das Pflanzenwachstum des Winterrapses im Herbst gewinnen und ist sogar eine potentielle Ertragseinschätzung für das Anbaujahr 2018/2019 möglich?*
2. *Was können aktuell Fernerkundungsdaten der Sentinel-2-Satelliten leisten und wie gut können daraus Informationen über das Pflanzenwachstum des Winterrapses und dessen Körnertrag im Anbaujahr 2018/2019 gewonnen werden?*
3. *Können zusätzliche Informationen durch GreenSeeker-Messungen und Relativvertragskarten über das Wachstum des Winterrapses auf dem Untersuchungsschlag und dessen Körnertrag im Anbaujahr 2018/2019 gewonnen werden?*

Diese Forschungsarbeit soll aufzeigen, ob sich ein Mehrwert an Informationen durch die Nutzung der Talking Fields Basiskarte, Sentinel-2-Satelliten, des GreenSeekers und Relativvertragsdaten bezüglich der Entwicklung der Feldfrucht Winterraps ergibt und ob auf Basis dieser Geodaten die Ackerschlag-spezifische Heterogenität abgebildet werden kann. Im Zuge der Bearbeitung soll immer wieder aufgezeigt werden, ob die verwendeten Datenquellen in einem Zusammenhang mit der Talking Fields Basiskarte, beziehungsweise der darin enthaltenen relativen Biomasse-Abweichung, stehen.

Dazu werden zunächst die theoretischen Grundlagen der verwendeten Datenquellen beschrieben. Nach der Vorstellung des Untersuchungsstandortes und dessen Gegebenheiten wird die Methodik der Datenerhebung und -auswertung näher erläutert. Der darauffolgende Teil beschäftigt sich dann mit der Analyse und Interpretation der erhobenen Daten, sodass in Anlehnung an diese, die Forschungsfragen beantwortet werden sollen. Als weitere Informationsquelle und zur Beantwortung der Fragenstellungen sollen auch Erfahrungsberichte von Landwirten genutzt werden, anhand welcher die beschriebene Problematik im Umgang mit Satellitendaten und Geoinformationsprodukten noch einmal verdeutlicht wird.

2 Stand des Wissens

2.1 Ertragsbildung bei Winterraps

Winterraps ist die bedeutendste Ölfrucht der gemäßigten Klimazonen und wird in erster Linie zur Speiseöl- und Margarineherstellung genutzt (DIEPENBROCK et al. 2016). Rapskuchen und Rapsextraktionsschrot fallen als Rückstände in der Ölgewinnung an und können als einheimisches Eiweißfuttermittel weiterverwendet werden. In Mecklenburg-Vorpommern (M-V) ist der Anbau von Raps neben der Qualitätsweizenproduktion eine der Haupteinnahmequellen für die Landwirtschaft (DIEPENBROCK et al. 2016; PETERS 2019).

Winterraps benötigt eher einen Standort mit ausreichender Wasserversorgung und ausgeglichener Niederschlagsverteilung, als eine überdurchschnittliche Bodenqualität an diesem. Sind diese Voraussetzungen gegeben, eignen sich sowohl tiefgründige Böden mit hoher Feldkapazität als auch lehmige und humose Böden mit Ackerzahlen unter 45 für den Anbau. In Werken von DIEPENBROCK et al. (2016) und SCHÖNBERGER (2013) werden weitreichende Empfehlungen für das Anbauverfahren von Winterraps beschrieben, sodass an dieser Stelle darauf verwiesen werden kann. Der Bestandesetablierung und dem Pflanzenentwicklungsstand im Herbst kommt eine gesteigerte Bedeutung zu, da diese Faktoren Anhaltspunkte für die Pflanzengesundheit und das Überwinterungspotential der Rapspflanzen darstellen und damit eine wichtige Grundlage für das spätere Ertragspotential bilden. Um eine gesunde Bestandesetablierung sicherzustellen, spätere Auswinterungsschäden zu vermeiden und ein hohes Regenerationsvermögen zu fördern, sollten Rapsbestände nach BROCKERHOFF (2016) und DIEPENBROCK et al. (2016) folgenden Entwicklungsstand vor dem Winter aufweisen:

Tabelle 1: Übersicht über empfohlene Bestandeseigenschaften von Winterraps vor dem Winter (nach BROCKERHOFF 2016; DIEPENBROCK et al. 2016, verändert)

Bestandeseigenschaften	Empfehlung	optimal für
Entwicklungsstadium (BBCH)	16 - 19	Vitalität der Einzelpflanze
Bestandesdichte (Hybriden)	30 - 40 Pfl.*m ⁻²	Pflanzenverteilung auf der Fläche, interspezifische Konkurrenz
Anzahl der Laubblätter	8 - 10	Winterhärte, Bedeckung des Vegetationskegels
Sprossachsenlänge	< 2 cm	Winterhärte
Wurzelhalsdurchmesser	8 - 10 mm	Wiederaustrieb im Frühjahr
Wurzellänge	> 20 cm	Nährstoffaneignung vor dem Winter
Trockenmasse	200 - 300 g*m ⁻²	Bodenbedeckung, Nährstoffaufnahme, Wiederaustrieb im Frühjahr, Ertragsanlagen

Trotz der wachsenden Nachfrage nach Winterraps sind die Zahlen der Rapsanbauflächen rückläufig. Gegenüber dem Mittel der Jahre 2013 - 2018 sank die Anbaufläche um 28 % auf 167.700 Hektar (STATISTISCHES AMT M-V 2019). Diese Entwicklung ist unter anderem auf die stark zurückgegangenen Erträge zurückzuführen, welche zumeist durch extreme Wetterlagen in den letzten Anbaujahren, wie langanhaltend hohe Temperaturen und Trockenheit, bedingt waren. Auch das Verbot der Rapsbeize mit Neonicotinoiden gilt als nicht unerheblicher Grund für den Rückgang (OSOL 2019). Der Winterraps in M-V erreichte im Mittel der Jahre 2011 - 2017 einen Ertrag von $3,73 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (STATISTISCHES AMT M-V 2018). Aufgrund monatelanger Trockenheit und hoher Temperaturen im zweiten und dritten Quartal 2018, wurden hier im Anbaujahr 2017/2018 mit durchschnittlich $2,94 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ deutlich geringere Erträge erzielt. Die Erträge erholteten sich im Anbaujahr 2018/2019 wieder, lagen jedoch mit $3,36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ weiterhin unter dem mehrjährigen Durchschnitt des Bundeslandes (STATISTISCHES AMT M-V 2019). Ertragsunterschiede existieren dabei sowohl auf regionaler Ebene als auch innerhalb eines einzelnen Ackerschlages. Diese Unterschiede sind in verschiedenem Maße ausgeprägt und besonders auf großen Flächen auch optisch gut erkennbar. Ursachen für Ertragsunterschiede innerhalb eines Schlages sind einerseits natürliche Faktoren, wie der Boden und andererseits Folgen anthropogener Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie die Nährstoffversorgung oder Drainagen (REICHARDT 2010).

Der Öl- und Körnertrag gelten als zwei der wichtigsten Zielkomponenten im Winterrapsanbau, da sich die Marktleistung vorrangig aus der Menge und Qualität dieser beiden Komponenten berechnet (BROCKERHOFF 2019). Der Begriff „Ertrag“ wird im Verlauf dieser Arbeit synonym für den Körnertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019 verwendet, welcher als eine Ergebniskomponente untersucht worden ist. Der Ertrag setzt sich aus unterschiedlichen Elementen zusammen und wird von diversen Faktoren bestimmt. Nach DIEPENBROCK et al. (2016) gelten für Winterraps die Bestandesdichte, die Anzahl der Schoten pro Pflanze, die Anzahl an Samen pro Schote sowie die Tausendkornmasse als primär ertragsbildende Faktoren. Vor allem die Bestandesdichte sei ein Haupteinflussfaktor für den Körnertrag, da diese maßgeblich die anderen primären Ertragsfaktoren bestimmt (DIEPENBROCK 2000). In Untersuchungen durch (GEISLER und STOY 1987) wurde in diesem Zusammenhang festgestellt, dass in Rapsbeständen mit durchschnittlicher und verringelter Pflanzenanzahl pro Fläche eine Steigerung des Ertragspotentials verbunden ist. Der Grund dafür liegt in der intraspezifischen Konkurrenz der einzelnen Rapspflanzen um die Wachstumsfaktoren Licht, Wasser, Nährstoffe und Standraum. In dichteren Beständen steht der Einzelpflanze ein prozentual geringerer Anteil dieser Faktoren zur Verfügung, welche die Ausbildungsfähigkeit der Ertragsorgane beeinflussen. Die Wachstumsfaktoren selbst werden dabei von der Jahreswitterung bestimmt, sodass die Bestandesdichte eine sich verändernde Größe über die Vegetationsperiode darstellt und in hohem Maße von den Witterungs-

verhältnissen beeinflusst wird (COMBERG 2014; GEISLER und STOY 1987). Abhängig von den Auswinterungsverlusten können somit aus Bestandesdichten im Herbst verschiedene Frühjahrs-Bestandesdichten hervorgehen. Neben den Wachstumsbedingungen hängt dies mit der hohen Kompensationsfähigkeit zusammen, über welche der Raps verfügt. Dadurch können Defizite in der Ausbildung einer Ertragskomponente durch eine andere im Verlaufe der Vegetationsperiode ausgeglichen werden. So können auch niedrige Bestandesdichten mit wenigen gut verteilten Pflanzen pro Quadratmeter und Fehlstellen im Bestand kompensiert und ähnlich hohe Erträge, wie bei optimalen Bestandesdichten, erzielt werden (BIERTÜMPFEL et al. 2018; DIEPENBROCK et al. 2016; GEISLER und STOY 1987).

Die Erfassung von Ertragsrohdaten während des Mähdreschs stellt einen der wichtigsten Bausteine der Datenerfassung in der Standort-spezifischen Pflanzenproduktion dar. Während der GPS-gestützten Ertragskartierung wird jedoch zunächst nur die Durchflussmenge in regelmäßigen Zeitintervallen von ein bis drei Sekunden gemessen. Eine Ertragsangabe ist erst möglich, nachdem die Durchflussmenge auf eine bestimmte Fläche bezogen wurde, welche sich aus der Schnittbreite und zurückgelegten Distanz des Mähdreschers ergibt. Die Ertragsrohdaten werden im GIS zumeist als Punkt wiedergegeben. Sie zeigen den Standort des Mähdreschers zum Zeitpunkt der Datenmessung und enthalten neben der punktuellen Durchflussmenge auch Angaben, wie die Feuchte des Gutes (GRIEPENTROG 1998; TREUE 2003). Bevor gemessene Ertragsdaten, die direkt von Sensoren kommen, zur Kartierung herangezogen werden können, müssen diese zunächst auf Plausibilität geprüft, gegebenenfalls korrigiert und bereinigt werden (REICHARDT 2010). Dabei sind Korndurchsatz, Kornfeuchte, Kornverluste, Positionsbestimmung und Hang, nach GRIEPENTROG (1998), nur einige der Hauptfehlerquellen bei der korrekten Ertragsermittlung und sollten zur Verbesserung des Gesamtergebnisses mit einberechnet werden.

Die GPS-gestützte Ertragsmessung bei Mähdreschfrüchten deckt die oftmals großen Ertragsunterschiede innerhalb der Flächen auf und stellt sie in Karten dar. Besonders das Auswerten der Erträge über mehrere Jahre hinweg hilft dabei, Zonen mit unterschiedlichen Ertragspotenzialen zu erkennen, wobei die Karte selbst keine Auskunft über die Ursachen gibt (NOACK 2007). Um auf Basis von Ertragskarten Aussagen zur Planung Teilflächen-spezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen treffen zu können, sollten im Idealfall Ertragskarten von einem Ackerschlag für mehrere Jahre vorliegen. Aufgrund der unterschiedlichen Witterungsverläufe oder infolge technischer Probleme können die Ertragskarten zwischen den einzelnen Jahren erheblich variieren. Über mehrere Erntejahre hinweg bieten Ertragskarten jedoch eine zuverlässige Datenquelle zur Planung von Bewirtschaftungsmaßnahmen und zur Charakterisierung der Ertragsfähigkeit von Ackerschlägen, da mit längeren Zeitreihen der Einfluss von etwa witterungsbedingten Ertragsunterschieden minimiert wird (JÜRSCHICK et al. 1998; REICHARDT 2010).

2.2 Grundlagen der Fernerkundung

Fernerkundung bezeichnet die Gesamtheit aller Verfahren der berührungslosen Erkundung der Erdoberfläche und Erdatmosphäre, zur Gewinnung von Informationen durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden Energie. Als Informationsträger und Basis aller Fernerkundungssysteme dient dabei reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung der Oberfläche. (BALDENHOFER 2019; SCHAEPMANN und WULF 2015). Das elektromagnetische Spektrum kann insgesamt in verschiedene Bereiche eingeteilt werden, wobei die Grenzen zwischen diesen fließend sind und sich teilweise überlappen. Das sichtbare Licht liegt dabei in einem verhältnismäßig kleinen Abschnitt zwischen circa 400 und 700 nm (0,4 - 0,7 µm), an welches sich das nahe Infrarot (NIR) bis etwa 1 µm sowie das mittlere und ferne Infrarot anschließen (ALBERTZ 2007).

Bei der Fernerkundung finden passive und aktive Systeme Verwendung, durch welche weite Bereiche des elektromagnetischen Spektrums ausgewertet werden können. Passive Systeme zeichnen die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung auf sowie die von der Erdoberfläche emittierte Eigenstrahlung. Im Gegensatz dazu senden aktive Systeme Mikrowellen- oder Laserstrahlen aus und empfangen deren reflektierte Anteile. Dazu zählen Radarsysteme und Laseraltimeter (SCHAEPMANN und WULF 2015).

Im Bereich der Landwirtschaft kommt der optischen Fernerkundung eine besondere Bedeutung zu. Neben der Navigation und Positionsbestimmung werden zumeist Satellitendaten und Luftbilder zur Erfassung von Geländedaten genutzt. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der optischen Fernerkundung durch Satelliten und deren Aufnahmen. In der optischen Fernerkundung erfassen satellitengestützte Sensoren die elektromagnetische Strahlung der Erdoberfläche ohne eigene Anregung dieser, wodurch diese Verfahren den passiven Systemen zugeordnet werden. Optische Sensoren messen dabei die Wellenlängen in den unterschiedlichen Bereichen (Bändern) der elektromagnetischen Strahlung. Dazu gehören insbesondere Bänder im sichtbaren Licht, aber auch Bereiche des nahen und mittleren Infrarots, die vom menschlichen Auge nicht gesehen werden können. Diese Wellenlängen stellen gleichzeitig die wichtigsten Spektralbereiche zur Beschaffung von Fernerkundungsdaten dar (ALBERTZ und WIGGENHAGEN 2009; WINTER et al. 2016).

Bei allen Verfahren, die reflektierte elektromagnetische Strahlung nutzen, muss immer die Atmosphäre auf dem Weg zwischen der Strahlungsquelle und dem Sensor passiert werden. Aus diesem Grund können dafür nur Wellenlängenbereiche genutzt werden, für die die Atmosphäre weitestgehend durchlässig ist, die sogenannten atmosphärischen Fenster. Diese Eigenschaft trifft unter anderem auf das Spektrum des sichtbaren Lichts und des Infrarots zu. Das unterschiedliche Durchdringungsverhalten ist in der physikalischen Zusammensetzung der Atmosphäre begründet. Die in den verschiedenen Aggregatzuständen vorhandenen Teilchen können die elektromagnetische Strahlung teilweise reflektieren,

absorbieren und streuen. Der Transmissionsgrad der Atmosphäre wird folglich in hohem Maße von der Wellenlänge bestimmt. Wolken- und Schneefelder können aufgrund dessen nur schwach von der Strahlung durchdrungen werden und bilden damit den begrenzenden Faktor bei passiven Systemen der optischen Fernerkundung. Anders verhalten sich dagegen Mikrowellenstrahlen, welche einen hohen Transmissionsgrad aufweisen und damit auch Störfaktoren leichter überwinden können (ALBERTZ 2007, ALBERTZ und WIGGENHAGEN 2009). Die Messungen von Satellitensensoren sind damit vom Tageslicht und guten - das bedeutet insbesondere wolkenfreien - Wetterbedingungen abhängig. Auch Oberflächen weisen in den verschiedenen Wellenlängen des Lichts ein unterschiedliches Reflexionsverhalten auf, wodurch sie sich voneinander unterscheiden lassen. Durch weiteres Analysieren und die Kenntnis spektraler Oberflächensignaturen, können Luft- und Satellitenbilder danach klassifiziert und genauer analysiert werden (WINTER et al. 2016).

2.3 Sentinel-2 -Satelliten

ALBERTZ (2007) definiert Satellitenbilder als „[...] Bilder der Erdoberfläche, die von bemannten oder unbemannten Satelliten aus gewonnen werden.“ Dabei sei es zweitrangig, ob damit fotografische Aufnahmen oder Ergebnisse von anderen Aufnahmesystemen der Fernerkundung gemeint sind, solange es sich um eine bildhafte Darstellung der Erdoberfläche handelt (ALBERTZ 2007). Der Fokus in dieser Arbeit liegt insbesondere auf Daten und Aufnahmen der Sentinel-2-Satelliten, weshalb diese nun näher erläutert werden sollen.

Die Sentinel-Satellitenfamilie besteht aktuell aus sechs unterschiedlichen Missionen. Sentinel -1, -2, -3, -5P und -6 sind eigenständige Satelliten, während Sentinel-4 und -5 spezielle Messinstrumente sind, die auf meteorologischen Satelliten von Eumetsat mitfliegen (COPERNICUS 2019a). Die Satelliten und Instrumente wurden von der Europäischen Weltraumorganisation ESA als Kernkomponente des Copernicus-Programms entwickelt. Copernicus ist das bislang komplexeste operationelle europäische Programm zur ganzheitlichen Erkundung und Überwachung der Erde. 1998 startete das Projekt der globalen Umwelt- und Sicherheitsüberwachung noch unter dem Namen „Global Monitoring for Environment and Security“ (GMES) als Gemeinschaftsvorhaben der Europäischen Kommission und der Europäischen Weltraumorganisation. Das Ziel ist es, den aktuellen Zustand der Erde kontinuierlich zu erfassen und die thematisch bearbeiteten Daten über Ozeane, Landoberflächen, die Atmosphäre und den Klimawandel für verschiedene Nutzergruppen, wie Behörden, Institutionen, Umweltämtern und Bürgern zeitnah verfügbar zu machen. Damit bietet das Vorhaben ein weitreichendes Programm zur Sammlung, Aufbereitung und gezielten Auswertung von Fernerkundungsdaten der Erde (EHLERT und SCHWEITZER 2018).

Die Sentinel-Missionen bestehen oftmals aus mehreren baugleichen Satelliten, von denen jeweils zwei gleichzeitig im Orbit sind. Dies soll die zeitliche Wiederholrate erhöhen. Die Sentinel-2-Satelliten sind optische Satelliten, die Aufnahmen im sichtbaren und infraroten Spektrum zwischen 443 und 2190 nm liefern. Alle 13 Kanäle sind speziell für die Beobachtung der Landoberflächen und Vegetation optimiert. Durch eine Abtastbreite von 290 km und die hohe Auflösung können Veränderungen der Vegetation sehr gut erkannt werden. Sentinel-2 liefert Aufnahmen mit Auflösungen von 10, 20 und 60 m. Für das höchste Auflösungsvermögen sind Aufnahmen im Kanal Blau (Band 2), Grün (Band 3), Rot (Band 4) und NIR (Band 8) verfügbar. Das ermöglicht die Überwachung des Wachstums von Wild- und Nutzpflanzen, Erstellung von Erntevorhersagen oder Kartierung von Waldbeständen. In Hinblick auf die stetig wachsende Weltbevölkerung bietet diese Mission wichtige Informationen, um den Ernteertrag zu optimieren und einen Beitrag zur Verbesserung der Ernährungssicherheit zu leisten. Die Satelliten Sentinel-2A und B wurden 2015 und 2017 gestartet (COPERNICUS 2019a; ESA 2017; ESA 2019). Synonym für die verwendeten Sentinel-2-Aufnahmen wird nachfolgend auch der Begriff „Satellitenbilder“ verwendet.

2.4 Talking Fields

Talking Fields (TF) ist ein Projekt der VISTA GmbH. VISTA selbst ist ein deutsches Unternehmen, welches auf dem Gebiet der Fernerkundung daran arbeitet, aktuelle wissenschaftliche Methoden in operative Dienste zu übersetzen. Dafür werden vorzugsweise optische und Radar-Satellitenbilder verschiedener Auflösungen genutzt sowie diverse andere Geodaten kombiniert. Die Hauptarbeitsbereiche von VISTA liegen in der Landwirtschaft und Hydrologie. In der Landwirtschaft konzentriert sich der Schwerpunkt auf die Unterstützung von Management-Entscheidungen sowohl in der hoch technologisierten Landwirtschaft - im „Smart Farming“ - als auch im ökologischen Landbau. Dabei gilt für VISTA zumeist die Nachhaltigkeit des Ressourceneinsatzes als ein treibender Faktor (VISTA 2019a; VISTA 2019b).

Talking Fields war ursprünglich ein Projekt des ESA-Programms „Integrated Applications Promotion“. Heute unterstützt der Service Landwirte auch außerhalb Deutschlands und der EU. Das Projekt ist ein Smart-Farming-Service von VISTA und zielt darauf ab, Standortmerkmale des Betriebs aufzudecken und die aktuelle Biomasse und den Ertrag zu ermitteln. Die Erkenntnisse werden dann dem Landwirt in Form von verschiedenen Kartenmodellen zur Verfügung gestellt (BUDDEBERG 2019). VISTA hat außerdem mit den Partnerunternehmen „FarmFacts“ und „John Deere“ kooperiert, um ein benutzerfreundlicheres System für die präzise, flächenbezogene Ausbringung von organischen oder mineralischen Düngern zu entwickeln, was die Umsetzung weiter vereinfachen soll. Zwar existieren bereits Erdbeobachtungsdaten, Satellitennavigationssysteme sowie diverse Farm-Management-Softwares und Ertragsmodelle, doch die Besonderheit bei Talking Fields sei, dass das

Dienstleistungsunternehmen all diese Anwendungen kombiniert (ESA 2015). In dieser Arbeit wurde ausschließlich mit dem Produkt „Talking Fields Basiskarte“ gearbeitet und diese soll nun näher vorgestellt werden.

Alle Talking Fields-Produkte sind käuflich zu erwerben. Der Preis richtet sich nach der gewünschten Hektar-Anzahl, wobei für die Basiskarte eine Mindestbestellmenge von 100 ha vorgegeben und die Aufbereitung ab 2 ha Schlaggröße möglich ist. Die Karte wird im XML- und Punkt-Shape-Dateien-Format ausgegeben und kann damit in diversen Geoinformationsprogrammen eingelesen und weiterverarbeitet werden. Die Talking Fields Basiskarte gibt die relativen Biomasseunterschiede als prozentuale Abweichung vom Schlagmittelwert an, wobei die Biomasse als eine beständige Größe angenommen wird. Diese Zahl wird nachfolgend als „relative Biomasse-Abweichung“ bezeichnet. Die Basiskarte kann laut Unternehmen genutzt werden, um verschiedene Standortqualitäten aufzuzeigen und zu kartieren und als Informations- und Berechnungsgrundlage für Teilflächen-spezifische Applikationen zu dienen. Damit verbunden ist, dass einem Standort dadurch ein hohes oder niedrigeres Ertragspotential zugeschrieben werden kann (TALKING FIELDS 2019). Die räumliche Auflösung der Karten liegt mittlerweile bei 10x10 Metern. Dies ist darin begründet, dass zur Erstellung der Karte hauptsächlich Aufnahmen der beiden Se2-Satelliten genutzt werden, welche dieses Auflösungsvermögen bieten. Zur Berechnung dieser Werte und Erstellung der Karten werden Satellitendaten der letzten fünf bis zehn Jahre genutzt. Da Sentinel-2A und -2B jedoch erst seit 2015 und 2017 aktiv sind, werden für längere Zeitreihen zusätzlich Daten der Landsat-Sensoren verwendet. Einige Produkte von Talking Fields werden ausschließlich durch Satellitendaten berechnet. Dazu zählen neben der Basiskarte auch Karten, die ein Monitoring über die Stickstoffaufnahme, Entwicklung der Blattfläche und des Chlorophyllgehaltes ermöglichen. Dafür werden alle Bänder des Satelliten genutzt und miteinander verrechnet. Damit soll, laut Unternehmen, die Genauigkeit gegenüber klassischen Indizes, wie dem NDVI, gesteigert werden. Für alle Produkte, bei denen Aussagen in absoluten Werten erzielt werden sollen, beispielsweise in Ertragspotentialkarten, kombiniert TF die Satellitendaten mit dem Pflanzenwachstumsmodell „PROMET“. Dieses nutzt zusätzlich Eingangsdaten wie Wetterdaten, Bodendaten, Höhenmodelle und Pflanzenart-spezifische Parameterdatensätze (BUDDEBERG 2019). Zur Ableitung der relativen Biomasse-Abweichung für die Basiskarte werden keine Indizes, sondern das Strahlungstransfermodell „soil-leaf-canopy“ (SLC) genutzt. Dieses berechnet die Werte über einen Algorithmus und verwendet dabei alle Bänder des Satelliten-Sensors. Damit können Aussagen über die physikalisch-basierten Pflanzenparameter Blattfläche, Chlorophyllgehalt und Anteil brauner Blätter getroffen werden. Das Modell berücksichtigt außerdem den Strahlungsverlauf der Sonne sowie das Aussehen der jeweiligen Feldkultur und des Bodenhintergrundes (BEGIEBING et al. 2006). Folglich soll die Basiskarte nicht nur vergangene Zustandssituationen auf dem Schlag abbilden, sondern durch

die Verschneidung mit aktuellen Daten auch für zukünftige Prognosen angewendet werden können. Nach Feldversuchen von RECKLEBEN (2019) können extern entwickelte Produkte von Talking Fields insgesamt mit Sensor-gestützten Verfahren, wie dem GreenSeeker, Schritt halten und zeigen, dass eine Einschätzung Ackerschlag-spezifischer Heterogenitäten durch Satelliten-gestützte Verfahren in der Praxis funktionieren kann.

2.5 Normalized Difference Vegetation Index

Durch die Messung der Pflanzenreflexionen in verschiedenen Wellenlängen können viele Informationen über den Pflanzenstatus erfasst werden. Mithilfe dieser Daten können diverse Vegetationsindizes, wie der Blattflächenindex (LAI), berechnet werden, die beispielsweise zur Ermittlung der Größe der Pflanzendecke dienen. Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ist einer der am häufigsten verwendeten Vegetationsindizes, um Aussagen über die Vitalität der Vegetation zu treffen (ANDREO 2013). Aufgrund der vielfältigen wissenschaftlichen Kenntnisse und Verwendung sollte der Vegetationsindex auch ein Forschungsgegenstand in dieser Arbeit sein.

Den meisten Vegetationsindizes ist gemein, dass sie die Reflexionen von Rot und nahem Infrarot in Bezug zueinander setzen. Indizes mit Spektraldaten im roten und infraroten Spektrum werden dabei bevorzugt genutzt, da diese am sensibelsten auf Veränderungen der Pflanzenvegetation reagieren. Bei zunehmend wachsender Pflanzenpopulation steigt die Reflexion im nahen Infrarot und die Reflexion im Rot-Bereich sinkt (BIEWER et al. 2006; KALAITZIDIS und MANAKOS 2012). Unter Feldbedingungen, das bedeutet speziell in großen Pflanzenbeständen, ist das Reflexionssignal jedoch immer eine Mischung verschiedener Komponenten. Neben den einzelnen Pflanzenbestandteilen, wie Blättern und Stängel, beeinflussen auch die Stellung und Größe der Blattorgane, die Bestandesdichte (Boden- und Schattenanteil) sowie die Oberflächenrauhigkeit und Reihenrichtung das Signalspektrum. Diese Faktoren sind jedoch zeitlich nicht konstant, sondern unterliegen im Laufe der Pflanzenentwicklung erheblichen Veränderungen (ERASMI 2002). Auch das Aufnahmesystem und Auflösungsvermögen des Sensors beeinflussen die Erkennbarkeit von Objekten, den Kontrast zur Umgebung und damit die Qualität der Aufnahme. Das Zusammenwirken dieser Faktoren ist dabei immer in unterschiedlichem Maße vorhanden und kann nicht allgemein beschrieben werden (ALBERTZ 2007).

Die Ableitung des NDVI erfolgt durch arithmetische Operationen aus Daten geeigneter Spektralkanäle. Der NDVI verknüpft Daten im nahen Infrarot (NIR), auf welche sich die Vitalität der Vegetation besonders auswirkt und Daten des roten Spektralbereichs (ROT), welcher davon nicht beeinflusst wird (ALBERTZ 2007). Die entsprechende Formel zur Berechnung lautet:

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot}$$

Aufgrund der Normierung führt die Berechnung zu Werten zwischen -1 und +1. Der NDVI steigt im Verlaufe der Vegetationsperiode an und erreicht bei Winterannuellen in der Regel im späten Frühjahr sein Maximum. Gesunde Pflanzenbestände weisen zum Vegetationshöhepunkt einen Indexwert von 0,80 bis 0,90 auf. Das Ergebnis wird zumeist in eine Bildwiedergabe umgerechnet, welche die Vitalität der Vegetation in Farbstufen codiert (ALBERTZ 2007; SPICKER 2016). Damit spiegelt der NDVI die Biomasseproduktion und Wachstumsintensität wieder, was jedoch nicht mit dem Ertrag gleichzusetzen ist (HERBOLD 2015). Im sichtbaren Bereich dominiert besonders Chlorophyll als Blattpigment die spektrale Reflexion der Vegetation. Blau und Rot werden absorbiert, wohingegen grün reflektiert wird. Der Grad der Chlorophyllaktivität wird dabei mit der Photosyntheseleistung assoziiert, welche ein Maß für die Vitalität von grünen Pflanzen ist. Im nahen Infrarot zwischen circa 0,7 und 1,3 µm ist dagegen die Zellstruktur das ausschlaggebende Kriterium. Nahe Infrarotstrahlung wird von den Zellwänden reflektiert und gesunde Blätter zeigen dadurch ein großes Reflexionsvermögen, welches unter biotischen oder abiotischen Stressfaktoren abnimmt (ALBERTZ 2007; COMBERG 2014).

Der besondere Vorteil des NDVI liegt darin, dass es durch seine einfache Normierung möglich ist, den Wert vergleichbar zu machen. Effekte von Beleuchtungsunterschieden und Schatten sowie der Atmosphäreneinfluss werden limitiert, da angenommen wird, dass diese Störfaktoren in gleichem Umfang auf die unterschiedlichen Spektralbänder einwirken. Die Schwierigkeit bei Verwendung des NDVI liegt in seiner Sensitivität auf Reflexionen des Bodens. Dessen Signatur steigt ebenfalls vom sichtbaren Rot zum NIR an. Damit ist auch für den Boden ein positiver Vegetationsindex berechenbar. Erst ab einem NDVI von über 0,20 besitzt die Vegetation den Hauptanteil am Reflexionssignal (LILIENTHAL 2003). Des Weiteren tritt mit zunehmendem Biomasseaufwuchs ein Sättigungseffekt ein, wodurch verschiedene Pflanzenbestände ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr voneinander differenzierbar sind. Dieses Problem tritt dabei häufiger bei dem NDVI als bei anderen Vegetationsindizes auf (SPICKER 2016). Außerdem sind oft sonnige und schattige Anteile komplex miteinander vermischt, sodass, je nach Bedingungen, helle oder dunkle Flecken auf den Bildern entstehen können. Vegetationsindizes wie der NDVI stellen jedoch ein wichtiges Hilfsmittel zur quantitativen Bestimmung von Pflanzenvitalität aus Spektraldata dar und weisen dabei eine bessere Empfindlichkeit für die Detektion von Biomasse auf als einzelne Spektralbänder (ALBERTZ und WIGGENHAGEN 2009; LILIENTHAL 2003).

So ist es möglich den NDVI indirekt, über Satellitenbilder durch die Verrechnung der Spektralbänder, oder direkt, über manuell einsetzbare Geräte wie beispielsweise den GreenSeeker, zu ermitteln. Fernerkundungsdaten liefern dafür eine gute Datengrundlage und bieten vielseitige Möglichkeiten der Weiterverarbeitung, wie die Berechnung des Vegetationsindexes. Durch die Perspektive von oben bekommt der Landwirt einen kurzfristig

realisierbaren Überblick über die Ackerflächen und kann vorhandene Heterogenität innerhalb der Schläge gut erkennen (REICHARDT 2010). Aus Fernerkundungsdaten werden oftmals Zeitreihenprodukte erstellt, welche die Entwicklungsstruktur langfristig abbilden können. Diese Zeitreihen sind verhältnismäßig einfach aus allen multispektralen Daten der Se2- oder Landsat-Sensoren ableitbar. Konstant fortgeführte NDVI-Statistiken liefern besonders gut Informationen über die Entwicklung agrarisch genutzter Böden (HEIDEN et al. 2015).

Die Daten der Sensoren können auch genutzt werden, um Prognosen des zukünftigen Ertrags zu erstellen. Es gibt einen Zusammenhang bezüglich des Verhältnisses zwischen Vegetationsindizes, die zu einer bestimmten Zeit gemessen werden, und der endgültigen Ertragsmenge. Diese Verhältnisse, über längere Zeiträume registriert, helfen in Kombination mit Sensordaten von Traktoren, genauere Ergebnisse zum endgültigen Ertrag zu erzielen. Das benannte Verhältnis zwischen Vegetationsindizes und der endgültigen Ertragsmenge ist jedoch normalerweise von der Pflanzenart und der Region, in der sie angebaut wird, abhängig (KALAITZIDIS und MANAKOS 2012). Fernerkundungsdaten sollten nach KALAITZIDIS und MANAKOS (2012) aus diesem Grund regelmäßig zu einem festen Zeitpunkt in der Wachstumsperiode ermittelt werden.

Eine weitere Möglichkeit, um Aussagen über die Vitalität von Pflanzenbeständen zu bekommen, ist die direkte Ermittlung des NDVI über den „FarmFacts AO GreenSeeker“. Der GreenSeeker ist ein aktives System, das während der Überfahrt Vitalitäts- und Biomasseunterschiede des Pflanzenbestandes über eine automatische Berechnung des NDVI ermittelt und diese direkt in Applikationsmaßnahmen übersetzen kann. Ein LED dient dabei als künstliche Lichtquelle und erzeugt Wellenlängen im Bereich von circa 650 bis 780 nm. Der optische Sensor misst die Reflexionseigenschaften des Bestandes im Rot- und Nahinfrarot-Bereich und verrechnet diese direkt zu dem Vegetationsindex. Dabei wird störende Hintergrundbeleuchtung bei der Erfassung des vom Pflanzenbestand zurückgestrahlten Lichts gefiltert. Mit diesen Informationen steuert der GreenSeeker das jeweilige Ausbringungsgerät nach betriebsindividueller Strategie mit den vorgegebenen Höchst- und Mindestmengen von beispielsweise Stickstoffdüngergaben. Der Sensor misst die Reflexion in einem streifenförmigen Muster längs zur Fahrtrichtung in einer Höhe von 70 bis 110 cm über dem Bestand. Die Abtastbreite eines Sensors beträgt aktuell 1,20 m. Je nach Anbringung und Entfernung zum Schlepper findet damit keine flächendeckende Analyse statt, wodurch Fahrspureffekte vermieden werden sollen. Aufgrund der selbstständigen Lichtausstrahlung ist ein von der Tageszeit und den aktuellen Lichtverhältnissen unabhängiger und sehr gut planbarer Einsatz des GreenSeekers möglich. Darüber hinaus lassen sich Ertragspotentialkarten mit dem System kombinieren, die bei *in situ*-Messungen des Pflanzenentwicklungsstandes zusätzlich berücksichtigt werden (COMBERG 2014; FARMFACTS 2016; MISTELE 2014)

3 Material und Methoden

Die Geoinformationssoftware „QGIS 2.18.22“ diente als Basis zur Datenaufbereitung und Darstellung der Talking Fields Basiskarte, Sentinel-2-Aufnahmen, GreenSeeker-Messungen sowie der Ertragsdaten und Relativvertragskarten (REK). Auf Grundlage dessen konnten über spezifische Aktionen aus den Geodatenquellen verschiedene Informationen gewonnen werden. Die einzelnen Funktionen zur Datenextraktion werden an dem jeweiligen Gliederungspunkt näher erläutert.

3.1 Untersuchungsregion und Versuchsfeld

Der Standort des Versuchsfeldes liegt im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern angrenzend an den Ort Ihlenfeld nord-östlich von Neubrandenburg (Vgl. Abb. 1). Das agrarisch geprägte Bundesland verfügt mit einer durchschnittlichen Betriebsgröße von circa 275 ha im deutschlandweiten Vergleich über die größten landwirtschaftlichen Betriebe, von denen 88 % konventionell bewirtschaftet werden (STATISTISCHES AMT M-V 2016).

M-V weist, bedingt durch die geologischen, morphologischen und klimatischen Verhältnisse, eine große Vielfalt an Böden auf. Aus der Bodenübersichtskarte (BÜK) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) geht hervor, dass nord-östlich vom Tollensesee hauptsächlich Fahlerden und Bänderparabraunerden sowie Braunerden und Podsol-Braunerden aus sandigen Deckschichten über Geschiebelehm verbreitet sind. Auch Parabraunerden, Fahlerden und Pseudogleye aus Geschiebelehm über Geschiebemergel sind hier zu finden. Das hügelige Jungmoränenland wird außerdem von Talsandebenen durchzogen (BGR 2014). Durch Bodenerosionen hat sich die Heterogenität des Bodengefüges und damit der landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen weiter ausgeprägt. Auch die natürliche Bodenfruchtbarkeit der Ackerbaustandorte ist demzufolge sehr unterschiedlich (KRUG 2013). Auf dieser Grundlage und im Rahmen von Landesraumentwicklungsprogrammen und nachhaltigen Wirtschaftsmaßnahmen versuchen immer mehr Betriebe gezielt, die vorhandene Ertragsfähigkeit des Bodens über Flächen-spezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen zu verbessern, sich an die Heterogenität anzupassen und die produktiven Betriebsstrukturen zu erhalten (LUNG 2005).

Das Gebiet des Versuchsstandortes verfügt über mittlere Ackerzahlen von 24 bis 27. Auch Bereiche mit Richtwerten von 45 sind hier zu finden. Auf dem Versuchsschlag selbst sind Bodenzahlen von 31 bis 56 vorhanden (DIENST 2018). So werden regional betrachtet die besseren Böden für den Ackerbau und die schlechteren als Dauergrünland genutzt (LUNG 2005). Der untersuchte 73,5 ha große Ackerschlag wird ausschließlich für den Marktfruchtanbau genutzt. Auf dem Versuchsfeld herrschen laut der Bodenübersichtskarte (BÜK) auf diesem speziell die mineralischen Bodenarten lehmiger Sand (IS), stark lehmiger Sand (SL), sandiger Lehm (sL) und auch anlehmiger Sand (SI) vor, sodass hier im

landwirtschaftlichen Sprachgebrauch leichter bis mittlerer Boden vorhanden ist (Geoportal M-V 2019; SCHMIDT 2010). Die BÜK mit den vorhandenen Bodenarten auf dem Untersuchungsschlag ist im Anhang A-1 zu finden.

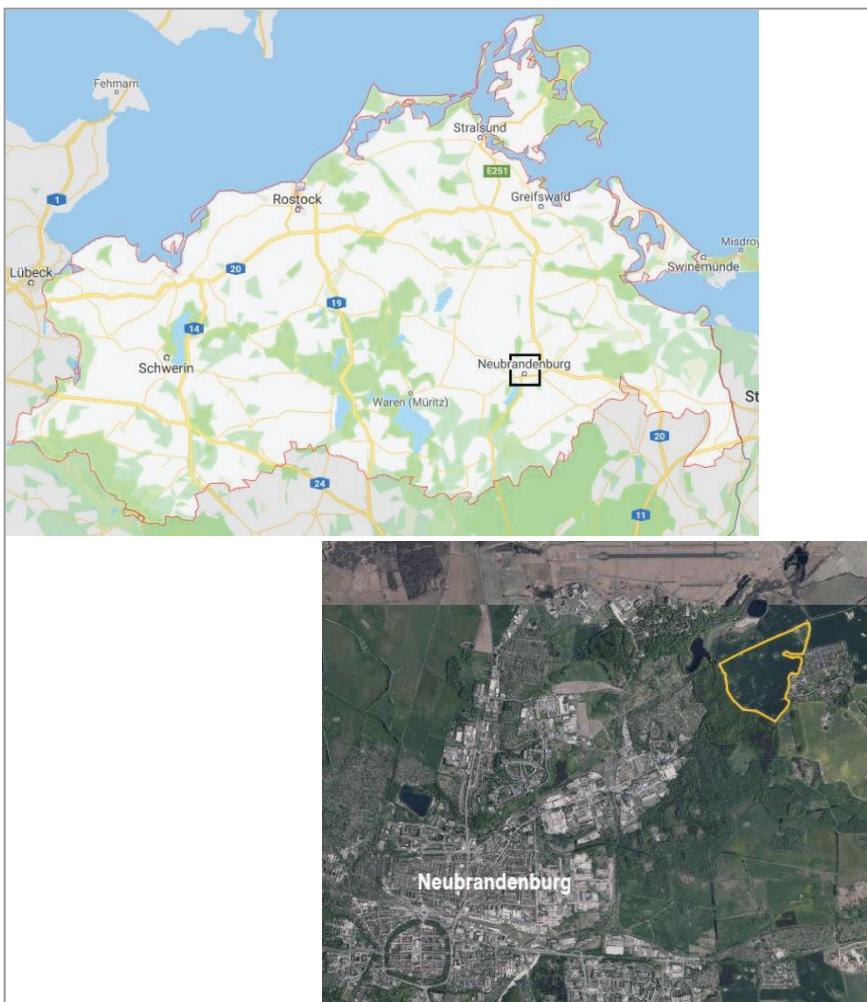


Abbildung 1: Lage des Versuchsfeldes in Mecklenburg-Vorpommern (oben) und bei Neubrandenburg (unten) (Google Maps 2019; DOP: Geoportal-M-V 2019)

In Neubrandenburg ist das Klima im Durchschnitt der Jahre warm und gemäßigt. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,3 °C und im Jahr fallen insgesamt etwa 558 mm Niederschlag. Zu den wärmsten Monaten zählen der Juli und August, wobei der Juli mit durchschnittlich 17,5 °C am wärmsten ist. In diesem Monat fallen mit 68 mm auch die größten Niederschlagsmengen. Die niedrigsten Durchschnittstemperaturen von unter 0°C werden in den Monaten Januar (-0,7 °C) und Februar (-0,4 °C) erreicht. Letzterer ist mit einer Niederschlagssumme von 28 mm, neben dem Monat März, zugleich der niederschlagsärmste Monat des Jahres (climate-data.org 2019).

In der Abbildung 2 sind die Witterungsdaten des Erntejahres 2018/2019 dargestellt. Das Erntejahr bezieht sich auf die Vegetationsperiode des Winterrapses, welche sich von der

Aussaat im August 2018 bis zur Ernte im Juli 2019 erstreckte. Zum Vergleich wurde außerdem die durchschnittliche monatliche Niederschlagsmenge der letzten Jahre hinzugefügt. Auf der Primärachse ist die Temperatur (Minimum, Maximum, Quer in 2 m Höhe) des jeweiligen Monats abzulesen. Die monatliche Summe der Sonnenstunden und des Niederschlags werden auf der Sekundärachse dargestellt.

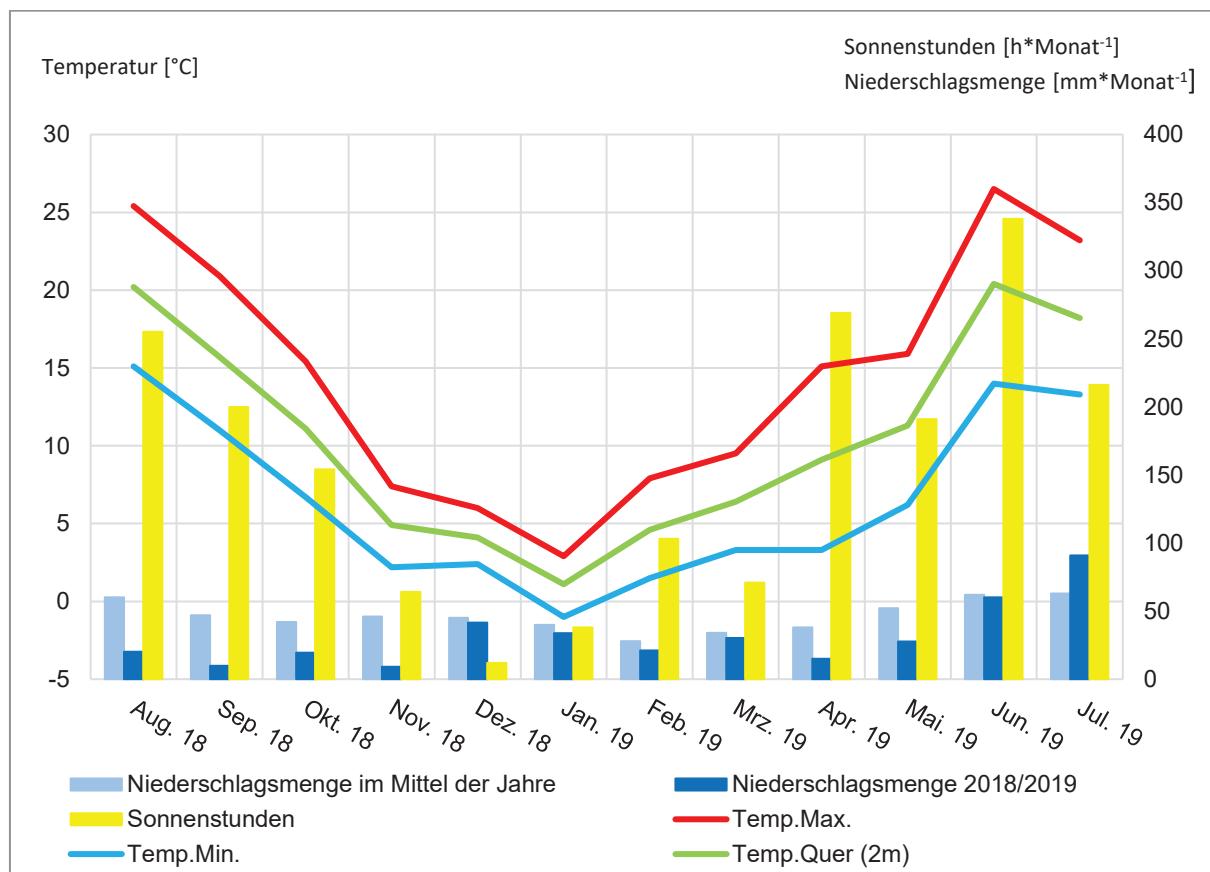


Abbildung 2: Witterungsverlauf mit Temperatur (Minimum, Maximum, Quer) [°C], Sonnenstunden [h*Monat⁻¹] und Niederschlagsmenge [mm*Monat⁻¹] von August 2018 bis Juli 2019 (climate-data.org 2019; Wetterstation Neubrandenburg/Trollenhagen 2019)

Die Temperatur des Erntejahres lag im Durchschnitt bei 10,6 °C. In diesem Zeitraum war der Juni 2019 mit durchschnittlich 20,4 °C der wärmste Monat, wohingegen der Januar 2019 mit 1,1 °C der kälteste Monat war. Zur Aussaat im August verzeichnete die Wetterstation Temperaturen zwischen 15,1 und 25,4 °C bei einer Gesamtniederschlagsmenge von 20,1 mm. Zum Ende der Vegetationsperiode im Juli 2019 lagen die Temperaturen zwischen 13,3 und 23,2 °C.

Die Niederschlagssumme des Erntejahres betrug 379 mm, wobei die mit Abstand größte Menge von 91 mm allein im Erntemonat Juli fiel. Zur Aussaat im August konnte eine Niederschlagsmenge von insgesamt 20,1 mm festgestellt werden. Die niederschlagärmsten Monate waren der September 2018 (9,8 mm) und November 2018 (9,2 mm). Die Summe der Niederschläge liegt hier, im Mittel der Jahre betrachtet, sonst bei 47 und 46 mm.

Die Anzahl der Sonnenstunden in den Aussaat- und Erntemonaten betragen 255 und 260 Stunden. Im Dezember 2018 wurden mit 12 Stunden die wenigsten Sonnenstunden gemessen, wohingegen die meisten (338 Stunden) im Juni 2019 aufgezeichnet worden sind.

3.2 Talking Fields Basiskarte

Die Talking Fields Basiskarte (Abb. 3) stellt eine wichtige Grundlage für diese Arbeit dar und bildet die Basis für alle Datenerhebungen und späteren Interpretationen. Die verwendete Karte wurde mit Hilfe der Geoinformationssoftware QGIS abgebildet und weiterverarbeitet. Die Basiskarte wurde im Frühjahr 2017 von dem Online-Anbieter Talking Fields an den Landwirt geschickt und es wird daher angenommen, dass verfügbare Zeitreihen an Satellitenbildern und Wachstumsmodellen bis zu diesem Zeitpunkt berücksichtigt worden sind.

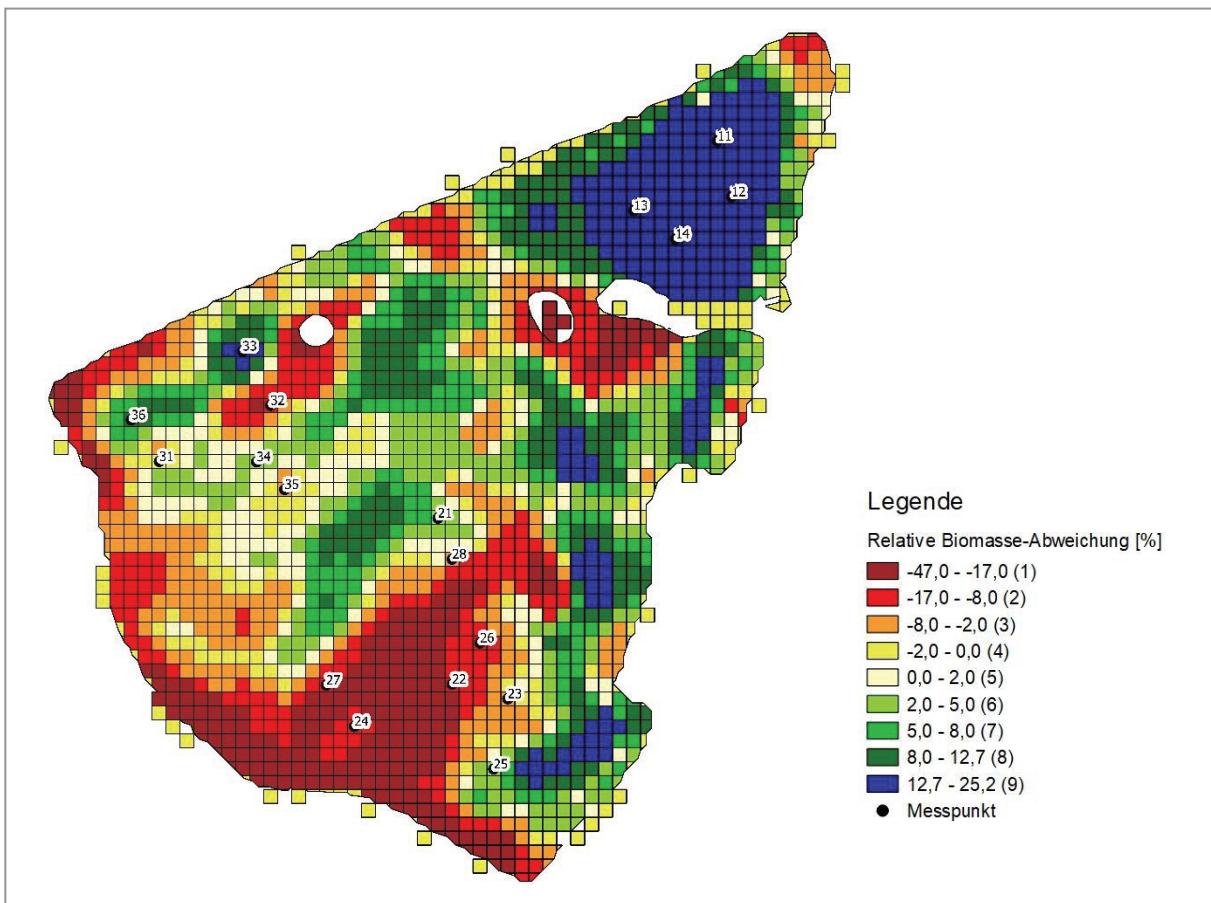


Abbildung 3: Darstellung der Talking Fields Basiskarte anhand der relativen Biomasse-Abweichung [%] auf dem Untersuchungsfeld mit 18 Messpunkten (Eigene Darstellung in QGIS 2.18.22)

Die Basiskarte, welche in einem 20 x 20 m Raster angelegt ist, beinhaltet einen komprimierten Datensatz. Jede Rasterzelle der Shape-Datei enthält einen Wert, welcher der prozentualen Biomasse-Abweichung vom Schlagmittelwert an dem jeweiligen Ort entspricht.

Zur weiteren Analyse, wurde die Attributabelle der Basiskarte in „Microsoft Excel 2016“ und anschließend in „IBM SPSS Statistics 27“ überführt. Mittels letzterer Software konnten die in der Karte hinterlegten relativen Biomasse-Abweichungen zunächst durch eine Häufigkeitsanalyse aufgegliedert werden, um Informationen über deren Verteilung im Wertebereich zu erhalten. Diese ergab, dass in der Basiskarte insgesamt 1993 Attribute für den analysierten Schlag verfügbar sind. Diese Werte erstrecken sich über einen Bereich von -47,0 % (Minimum) bis zu einem Maximum von 25,2 %. Der Mittelwert liegt mit -0,6 % im negativen Bereich. Aufgrund der Spannweite aller Werte von 72,2 % ist die Standardabweichung mit 12,4 % als hoch zu bezeichnen. Die Verteilung der Werte ist insgesamt rechtsschief angelegt. Im Anhang A-2 ist die Verteilung der relativen Biomasse-Abweichung in Form eines Histogramms noch einmal dargestellt. Nach der statistischen Häufigkeitsanalyse ist festzustellen, dass 206 der 1993 Prozentwerte den Wert 0,0 besitzen und dieser somit der häufigste Wert ist. Damit entspricht die vorhergesagte relative Biomasse-Abweichung des Feldes in 10,3 % der Fälle genau dem Schlagmittelwert.

Mittels der Funktion „Zonenstatistik“ in QGIS wurden die spezifischen relativen Biomasse-Abweichungen nach TF aus den Rasterzellen extrahiert und den Messpunkten zugeordnet, um diese für die späteren statistischen Auswertungen nutzen zu können. Nach Feststellung des jeweiligen Wertes konnte jeder Messpunkt in eine bestimmte Klasse eingeordnet werden. Die Klassierung erfolgte in neun Klassen nach Quantilen. Die Klasse 1 entspricht der niedrigsten Klasse mit einer stark negativen prozentualen Abweichung der Biomasse (-47,0 bis -17,0 %) vom Schlagmittelwert. Auf Basis der ermittelten Klasse wurden die Rasterzellen der TF Basiskarte farblich dargestellt (Vgl. Abb. 3). Die in blau dargestellte höchste Klasse 9 bildet in einem Wertebereich von 12,7 bis 25,2 % die größte positive Abweichung der Biomasse des Versuchsschlages ab. Die Zuordnungen der relativen Biomasse-Abweichung, Klasse und entsprechenden Farbe zu dem jeweiligen Probepunkt sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der Zuordnung der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields, Klasse und farblichen Darstellung zu den 18 Messpunkten

Messpunkt	Relative Biomasse-Abweichung [%]	Klasse	Farbliche Darstellung
11	17,0	9	
12	19,0	9	
13	18,0	9	
14	25,2	9	
21	5,0	6	
22	-16,0	2	
23	-2,0	3	
24	-10,0	2	
25	5,0	6	
26	10,0	8	
27	-16,0	2	
28	-2,0	3	
31	-1,0	4	
32	-12,0	2	
33	14,0	9	
34	5,0	6	
35	-3,0	3	
36	11,0	8	

Anhand der Tabelle 2 ist zu erkennen, dass nach der beschriebenen Zuordnung der Probepunkte die Klassen 2; 3; 4; 6; 8 und 9 vertreten sind. Demnach werden alle vier Messpunkte der Region Nord sowie der Punkt 33 der höchsten Klasse 9 zugeordnet. Der niedrigsten Klasse 2 gehören die Punkte 22; 24; 26; 27 und 32 an.

3.3 Auswahl der Messpunkte

Die Auswahl der Beprobungspunkte erfolgte auf Grundlage einer Urteilstichprobe (judgment sampling), bei welcher die Stichproben auf Grundlage von Wissen und Kenntnissen eines Experten ausgewählt werden. Die Auswahl der Beprobungsorte erfolgte außerdem hinsichtlich der zu untersuchenden Merkmale (Pflanzenentwicklungsparameter) und Eigenschaften (relative Biomasse-Abweichung). Die Stichproben wurden dabei unabhängig voneinander gezogen.

Zunächst wurden auf Grundlage des Expertenwissens des Landwirts Bereiche festgelegt, welche die späteren Probepunkte enthalten sollten. Unter Einbeziehung dieser subjektiven Kenntnisse ließ sich der heterogene Schlag in drei Bereiche einteilen, die alle über unterschiedliche Voraussetzungen verfügen. Der nördliche Teil wurde als weitgehend homogen beschrieben. Die Fläche ist eben, lässt eine gleichmäßige Bearbeitung zu und gilt

laut Beschreibung als der insgesamt ertragreichste Bereich des Ackerschlages. Im südlichen Abschnitt des Feldes ist dagegen ein stark heterogener Bereich zu finden, dessen Relief sehr hügelig ist und über große Höhenunterschiede verfügt. Der Boden sei speziell auf den Kuppen der Hügel stark lehmig und daher deutlich schwerer. Eine Bestandesetablierung ist laut Angaben durch den Landwirt in der ertragsschwachen Zone besonders erschwert. Der westliche Probestandort des Schlages ist ebenso heterogen. Anders als in der südlicheren Region ist hier sandiger und damit leichterer Boden vorhanden. Der Bereich wurde, aufgrund seines schlechten Wasserhaltevermögens und den damit verbundenen trockenen Standortbedingungen, vom Landwirt ebenfalls als problematisch beschrieben. Auf Basis dieses Expertenwissens wurden die zu beprobenden Bereiche in die Regionen Nord, Süd und West benannt und als Versuchsgrundlage aufgenommen. Das Einzeichnen und Vermessen der Bereiche erfolgte anschließend manuell in der Geoinformationssoftware QGIS. Bei der Festlegung wurde darauf geachtet, dass das Vorgewende und der im Westen und Nord-Westen des Ackerschlages angrenzende Wald nicht in den Zonen liegt, um deren Einfluss auf das Pflanzenwachstum auszuschließen.

Die Auswahl der konkreten Probepunkte wurde auf Grundlage der eben erläuterten Zonierung sowie mit Hilfe der Talking Fields Basiskarte und zweier verfügbaren Relativertragskarten des Versuchsfeldes getroffen. Zum Expertenwissen erfolgte ein visueller Vergleich dieser Kartenmodelle. Dabei wurde darauf geachtet, an welchen Orten die beiden Datenquellen Gemeinsamkeiten und Unterschiede, in Form eines ähnlichen oder differenzierten Biomasse- und Ertragspotentials, abbilden. An diesen Stellen wurden die Messpunkte gesetzt und in den drei festgelegten Regionen aufgeteilt, um die Ackerschlag-spezifische Heterogenität bestmöglich erfassen zu können.

Das Ergebnis der Auswahl ist in Abbildung 4 zu sehen. Es wurden in der 7,7 ha großen Region Nord insgesamt vier Punkte und in Region Süd (14,4 ha) acht Messpunkte gesetzt. In der 7 ha großen Region West wurden sechs Probepunkte festgelegt. Die Bezeichnung der Punkte erfolgte nach der Zuordnung zu den einzelnen Regionen. Demnach entspricht die erste Zahl der Region (Nord = 1; Süd = 2; West = 3) und die zweite Zahl dem jeweiligen Probepunkt.

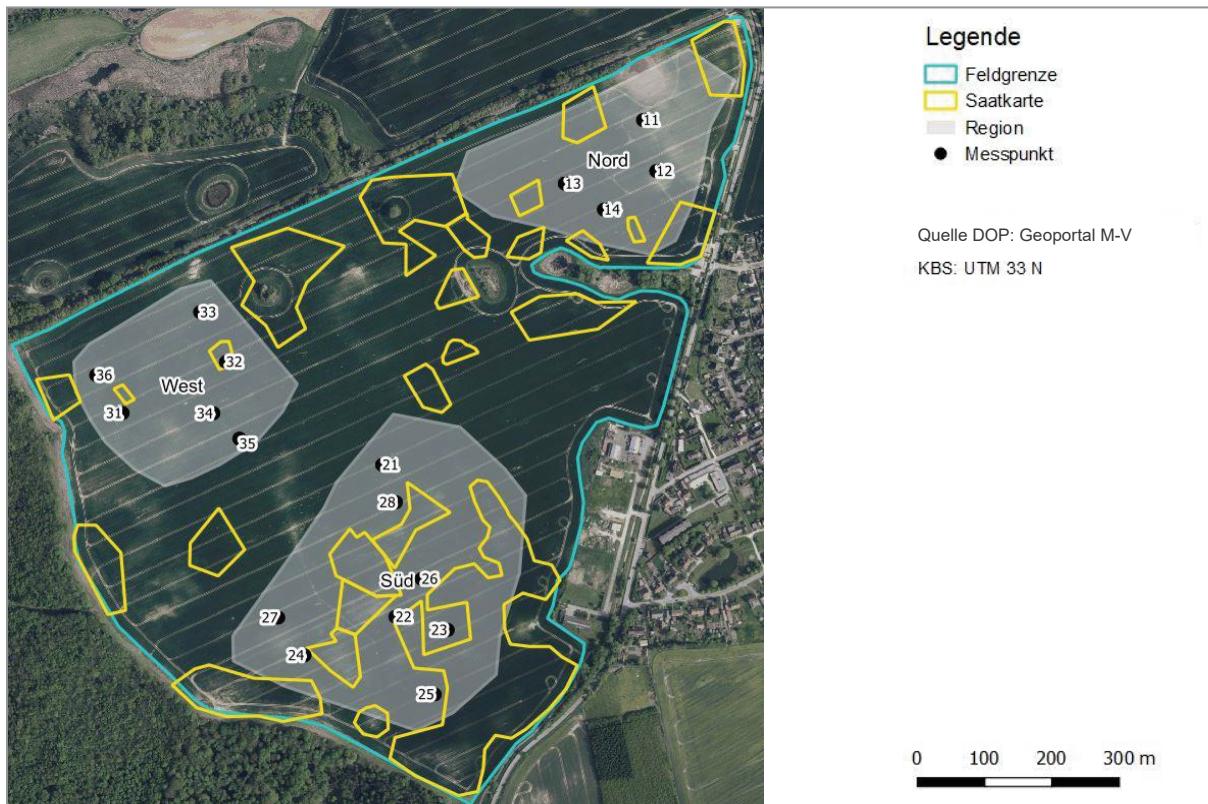


Abbildung 4: Karte des Untersuchungsfeldes mit Feldgrenze, Saatzonen, beprobten Regionen und Messpunkten (Eigene Darstellung in QGIS 2.18.22)

3.4 Bestandesentwicklung und Pflanzenprobenahme

Um Aufschluss über die Entwicklung des Winterrapses über die Vegetationsperiode zu bekommen, wurden zu verschiedenen Zeitpunkten festgelegte Pflanzenentwicklungsparameter bonitiert und schriftlich festgehalten. Dies beinhaltete auch die Feststellung des optischen Gesamteindrucks mit eventuellen Auffälligkeiten und Besonderheiten der Pflanzen und des Bodens.

Die dreigliedrige Fruchfolge auf dem Untersuchungsschlag besteht aus Raps, Weizen und Gerste. Im Erntejahr 2018/2019 wurde ein Winterraps der Sorte „ExLibris“ angebaut. Die Feldfrucht wurde am 20.08.2018 bei warmer und trockener Witterung gedrillt. Die Aussaatstärke der Hybridsorte betrug 35 Körner*m⁻² bei einer Reihenweite von 12,5 cm. In den gelben Bereichen der Saatkarte (Vgl. Abb. 4), die vom Landwirt manuell eingezeichneten worden sind, wurde die Saatgutmenge um 15 % erhöht. Demnach liegt einzig der Punkt 32 in solch einer Zone mit erhöhter Aufwandmenge. Die in QGIS festgelegten Messpunkte wurden in ein Garmin GPS-Gerät eingelesen und mit Hilfe dessen zu jeder Feldbegehung angelaufen.

Die Bonitur des Feldaufgangs erfolgte am 05.09.2018 an zunächst zwölf Messpunkten, aufgeteilt in vier Punkte pro Region. Insgesamt wurden die Anzahl der Rapspflanzen in zwei laufenden Metern sowie das Entwicklungsstadium bestimmt. An jedem Punkt wurden zwei

Wiederholungen gezählt. Des Weiteren wurden der Anteil an Stroh und Ausfallgetreide notiert. Zur Überprüfung der nachfolgenden Pflanzenentwicklung fanden zwei weitere Bonituren am 10.10.2018 und 16.10.2018 statt. Wie bereits zuvor wurden erneut die Bestandesdichte und das BBCH-Stadium bestimmt sowie mögliche Besonderheiten schriftlich festgehalten. Die Anzahl der Messpunkte wurde nach der ersten Bonitur auf 18 erhöht. Damit sollte eine spätere Abbildung der Ackerschlag-spezifischen Variabilität gesteigert werden. Die Ergebnisse der beschriebenen Feldbegehungen sind im Anhang A-3 zu finden.

In Anlehnung an die Empfehlung des anzustrebenden vorwinterlichen Entwicklungsstandes nach BROCKERHOFF (2016) und DIEPENBROCK et al. (2016) wurden für diese Arbeit die Pflanzenentwicklungsparameter BBCH-Stadium, Bestandesdichte und Wurzelhalsdurchmesser im Herbst bonitiert und schriftlich festgehalten. Weiterhin wurde zur Analyse der oberirdischen Biomasse die Frischmasse pro Quadratmeter gewogen, woraus anschließend die Trockenmasse (TM) und die Feuchte der Rapspflanzen ermittelt wurde. Über die Bestandesdichte und die Trockenmasse pro Quadratmeter konnte außerdem das Einzelpflanzengewicht in Gramm errechnet werden. Die Bestandesparameter sollten Aufschluss über den Entwicklungsstatus des Winterrapses auf dem Untersuchungsschlag geben und im weiteren Verlauf auf einen möglichen Zusammenhang mit den genutzten Referenzdatenquellen geprüft werden.

Vom 27.11.2018 bis 03.12.2018 fand die vorwinterliche Punkternte des Winterrapses zur Bestimmung der Biomasse statt. An diesen Tagen lag die durchschnittliche Lufttemperatur bei 2,8 °C und die Niederschlagsmenge betrug insgesamt 5,9 mm. Die Beerntung erfolgte an den 18 Messpunkten in jeweils vier Wiederholungen. Der Probenumfang beinhaltete die gesamte oberirdische Biomasse des Winterrapses auf einem Quadratmeter. Daraus resultiert, dass auch Ausfallraps in die Messungen mit einbezogen wurde und keine weitere Unterscheidung erfolgte. Zum Abmessen des Bereiches wurde ein Zollstock quer zur Drillreihe gelegt (Vgl. Abb. 5), um auch Pflanzen der Nebenreihen zu erfassen. Die Auswahl der Schnittstellen wurde insgesamt so getroffen, dass diese die Punktumgebung bestmöglich repräsentierten. An jeder Wiederholung wurde zuerst das BBCH-Stadium bestimmt und eventuelle Auffälligkeiten notiert. Während des nachfolgenden Schneidens wurden die Rapspflanzen gezählt und in einen perforierten Crispac-Beutel getan. Der Schnitt wurde kurz über der Bodenoberfläche angesetzt, um anschließend den Wurzelhalsdurchmesser mit Hilfe einer Schieblehre zu ermitteln.



Abbildung 5: Beerntung eines Messpunktes zur Bonitur der oberirdischen Biomasse vor dem Winter (Foto: Kunkel, 27.11.2018)

Nach dem Schnitt erfolgte die Einwaage der Proben zur Feststellung der Frischmasse in Gramm pro Quadratmeter. Danach wurden die Proben 48 Stunden lang bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet, sodass durch die Auswaage die absolute Trockenmasse ermittelt werden konnte. Die TM stellt die Bezugsgröße der gebildeten Biomasse dar und wurde im weiteren Verlauf als wichtige Vergleichskomponente genutzt. Über den Masseverlust durch den Trocknungsvorgang wurde die Feuchte der Biomasse ermittelt. Durch das Trocknen konnten gewichtsbeeinflussende Faktoren, wie zusätzliches Wasser durch Niederschlag oder Raureif an der Blattoberfläche, ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse der Pflanzenbonitur vor dem Winter sind in der Tabelle 3 zusammengefasst. Das dargestellte arithmetische Mittel (\bar{x}), die Standardabweichung (s) sowie die Minimal- und Maximalwerte (Min, Max) ergeben sich aus der Verrechnung aller Wiederholungen (n) pro Messpunkt.

Zur Überprüfung der Weiterentwicklung des Winterrapses wurde nach dem Winter am 19.03.2019 und vor Beginn der Blüte am 10.04.2019 das BBCH-Stadium an allen Messpunkten bestimmt (A-3). Darüber hinaus wurden der allgemeine Pflanzenzustand und auffällige Bodenmerkmale notiert. Bezuglich der phytosanitären Lage war zu keinem der Termine ein nennenswertes Vorkommen an Unkräutern oder Ungräsern sowie Krankheiten und Schädlingen zu erkennen. Einzig Wildschäden, wie in Anhang A-4 zu sehen, waren über den gesamten Vegetationszeitraum hinweg als exogener Schadfaktor vorhanden.

3.5 Geodaten als Referenzdatenquelle

Alle verwendeten Referenz-Geodaten des Untersuchungsfeldes wurden mit Hilfe der Geoinformationssoftware QGIS 2.18.22 abgebildet und weiterverarbeitet, um daraus Geoinformationen zu ermitteln. Dabei wurde grundsätzlich in dem Koordinatenbezugssystem (KBS) UTM 33 gearbeitet.

Zur Berechnung von Mittelwerten für den NDVI aus Se2-Daten und GreenSeeker-Messungen sowie der Relativverträge wurde um die Probepunkte grundsätzlich ein Puffer von 10 m gelegt. Damit sollte unter anderem der Einfluss von exogenen Faktoren, wie beispielsweise Wildschäden, bei der statistischen Auswertung verringert werden.

3.5.1 Sentinel-2-Satellitenbilder

Bei der Auswahl Fernerkundungsmethode für die vorliegende Arbeit waren die Verbindung zum Produkt der Talking Fields Basiskarte und die freie Verfügbarkeit zur Weiterverarbeitung entscheidende Kriterien. Aufgrund dessen, dass die Basiskarte laut Talking Fields zumeist durch Se2-Aufnahmen generiert wird und die Daten der Erdbeobachtungssatelliten frei zugänglich sind, sollten auch hier Multispektralaufnahmen dieser Satelliten als Referenz- und Vergleichsmaterial genutzt werden. Aus den Daten wurde der NDVI ermittelt und für diese Untersuchung genutzt, da dieser einer der am häufigsten verwendeten Indizes ist, um zu verschiedenen Zeitpunkten Aussagen über die Vitalität von Pflanzen zu treffen und vielfältige wissenschaftlichen Kenntnisse über den Index vorliegen.

Die für diese Arbeit verwendeten Satellitenbilder des untersuchten Ackerschlages wurden auf der Internetseite des Copernicus-Programms „Copernicus Open Access Hub“ heruntergeladen (COPERNICUS 2019b). Dazu wurde zunächst die Verfügbarkeit von Sentinel-2-Satellitenbildern ab 2016 überprüft, um später die Entwicklung der Wiederholrate beurteilen zu können und einen Überblick über das verfügbare Datenmaterial zu erhalten. Dafür wurden Aufnahmereketten über einen Zeitraum vom jeweils 01.01. bis 31.12. eines Jahres verwendet. Die Anzahl verfügbarer Bilder wurde außerdem in Abhängigkeit von verschiedenen Wolkenbedeckungsgraden gefiltert. Das Ergebnis dessen ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Die konkrete Auswahl der Aufnahmen erfolgte nach den Gesichtspunkten, dass es sich um Szenen der Sentinel-2-Satelliten aus einem bestimmten Zeitraum handelt, beispielsweise aus einem bestimmten Vegetationsmonat und, dass auf dem Bereich des Feldes keine Wolken oder Wolkenschatten vorhanden waren. Aus dem heruntergeladenen Datensatz mit den verschiedenen Bändern der Sentinel-2-Satelliten wurden die Bilddaten der Bänder 4 (ROT) und 8 (NIR) in QGIS dargestellt. Mit dem Verarbeitungswerkzeug „raster calculator“ konnten diese, nach der in Punkt 3.1.2 angegebenen Formel, dort zu einem NDVI-Bild verrechnet

werden. Die Satellitenszene wurde anschließend über die Funktion „Clipper“ auf die Feldgrenze zugeschnitten. Die Farbgebung der NDVI-Bilder wurde über die Einkanal-pseudofarbe erzeugt. Demnach wurde niedrigen Werten ein Braunton zugeordnet und höheren NDVI-Werten ein Grünton. Dabei entspricht der Wert 0,00 dem Erdboden und Werte um 0,80 und höher werden in der Regel von grünen Pflanzen zum Vegetationshöhepunkt erreicht. Mittels der Funktion „Zonenstatistik“ wurden die NDVI-Werte aus der daraus entstandenen Rasterdatei der Satellitenszene für die 18 Probepunkte extrahiert. So konnten unter anderem Informationen über die Entwicklung des Indizes im Verlauf der Vegetationsperiode des Winterrapses ermittelt und in einer Zeitreihe abgebildet werden.

3.5.2 GreenSeeker-Messungen von Winterweizen und Winterraps

Um einen Überblick über die Stickstoffversorgung und den Gesundheitsstatus der Pflanzen zu bekommen, führt der landwirtschaftliche Betrieb regelmäßig NDVI-Messungen mit Hilfe eines GreenSeeker-Systems durch. Die gesammelten Daten können mit anderen Kartensystemen kombiniert und beispielsweise zukünftige Düngemaßnahmen geplant werden. Für den untersuchten Schlag wurden Messdaten aus dem Frühjahr 2017 und Herbst 2018 genutzt, welche ebenfalls als Vergleichsdatenquelle dienten. Bedingt durch die Fruchfolge stand während des früheren Messzeitpunktes Winterweizen als Feldfrucht auf dem Untersuchungsschlag, wohingegen die Messung aus dem Herbst 2018 den NDVI von Winterraps zeigt.

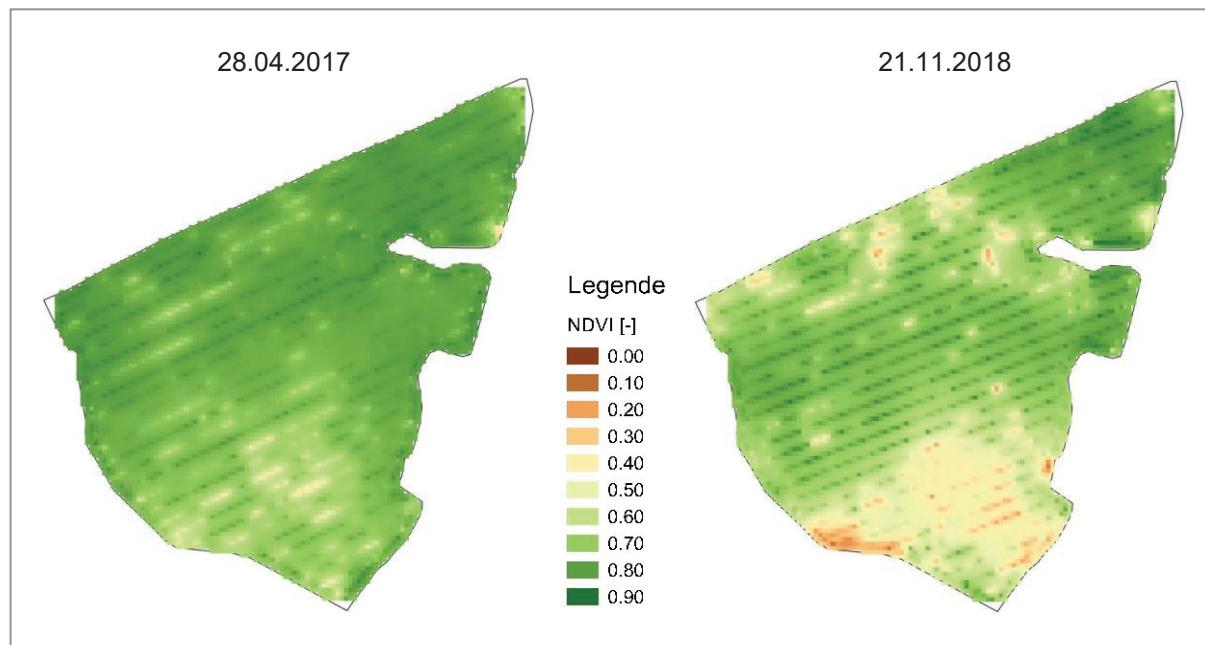


Abbildung 6: Karten des GreenSeeker-NDVI vom 28.04.2017 und 21.11.2018, interpoliert (Eigene Darstellung in QGIS 2.18.22)

Die Vektordateien wurden auf Basis des NDVI-Wertes über das Verarbeitungswerkzeug „Interpolation“ durch Inverse Distanzgewichtung zu einer Rasterdatei umgewandelt (Abb. 6). Die Interpolationsweite wurde auf 10 x 10 m je Rasterzelle festgelegt. Anschließend konnten aus diesen die jeweiligen NDVI-Werte an den 18 Boniturpunkten über „Zonenstatistik“ extrahiert werden. Die Messpunkte wurden dafür auch hier um 10 m gepuffert. Die Rasterdatei wurde außerdem über die Funktion „Clipper“ auf die Schlaggrenze zugeschnitten.

3.5.3 Ertragsdaten und Relativvertragskarten

Ertragsdaten

Für den untersuchten Ackerschlag wurden die aktuellen Ertragsrohdaten aus 2019 herangezogen. Da gemessene Ertragsdaten eine hohe Schwankung aufweisen, müssen die Daten, bevor diese weiterverarbeitet werden können, zunächst auf Plausibilität überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden.

Die Bereinigung der Ertragsrohdaten erfolgte in QGIS. Die Messwerte wurden zunächst als Punkt-Vektoren dargestellt. Zur Steigerung der Datensicherheit wurden Werte, die als „nicht plausibel“ eingestuft worden sind, von der Weiterverarbeitung ausgeschlossen. Als nicht plausible Daten galten Niedrig- und Hochertragspunkte sowie mehrfach überlagerte Punkte und doppelt gefahrene Spuren, die auf eine mehrfache Messung hindeuten und durch Anhalten, Zurücksetzen oder Anfahren von neuen Stellen entstehen können. Dazu wurden die Vektor-Punkte einzeln oder gruppiert angewählt und gelöscht, sodass insgesamt rund 18 % der Daten entfernt worden sind. Nach einer Analyse des bereinigten Datensatzes konnte über „Statist“ in QGIS für den gesamten Untersuchungsschlag das mittlere Ertragsniveau ermittelt werden. Die Vektor-Datei wurde danach über die Inverse Distanzgewichtung ebenso auf ein 10 x 10 m Raster interpoliert. Die Rastergröße wurde so gewählt, dass in der farblichen Darstellung Differenzen zwischen den Standorten optisch gut voneinander unterscheidbar sind und trotzdem eine entsprechende Genauigkeit aufweisen. Eine Darstellung der aufbereiteten Ertragsdaten ist in der Abbildung 11 zu sehen. Die Ertragswerte konnten anschließend über „Zonenstatistik“ an den 18 Boniturpunkten, welche um 10 m gepuffert worden sind, aus der Raster-Datei extrahiert und statistisch ausgewertet werden.

Relativvertragskarten

Für das Versuchsfeld wurden außerdem zwei Relativvertragskarten genutzt, welche jeweils den gemittelten Relativvertrag (RE) eines Zeitraums von zehn Jahren (2003 - 2012 und 2006 - 2015) abbilden und so die Ackerschlag-spezifische Heterogenität der Ertragsstruktur zeigen (Abb. 7). Die Karten dienten gleichzeitig als Grundlage zur Entscheidungsfindung

bezüglich der Positionierung der untersuchten Messpunkte. Dazu wurden beide Karten mit der TF Basiskarte visuell und auf Basis der in den REK enthaltenen Relativverträge miteinander verglichen, um prägnante Unterschiede in der Struktur herauszuarbeiten und einige der Messpunkte danach zu platzieren.

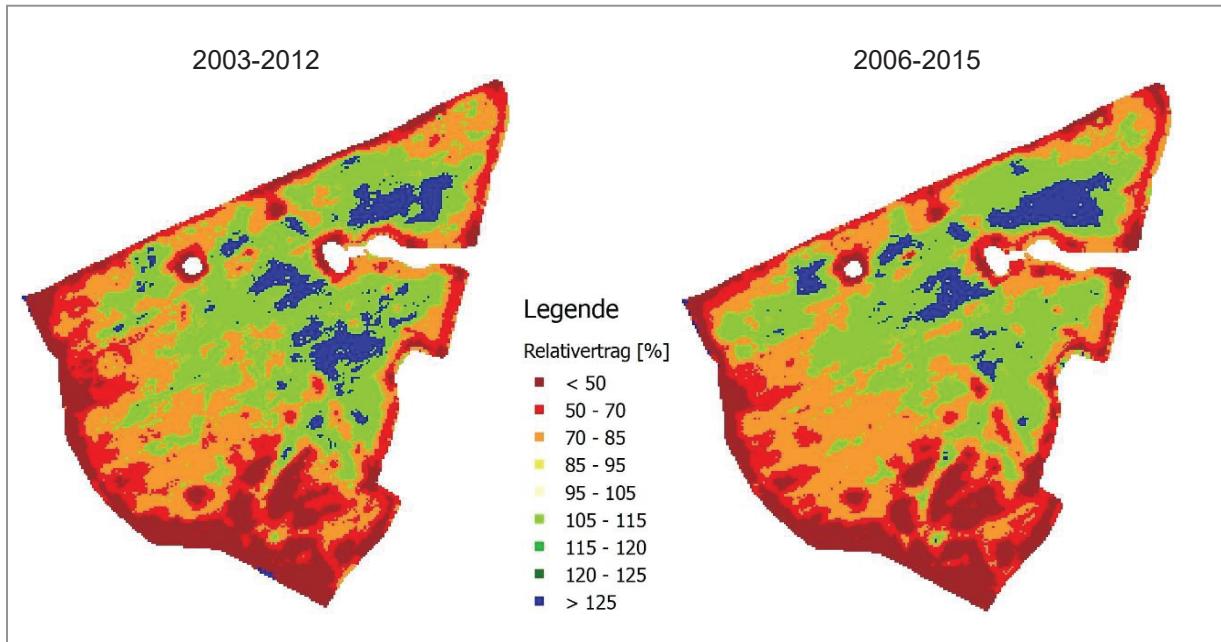


Abbildung 7: Relativvertragskarten mit den Relativverträgen [%] des Versuchsfeldes aus den Verrechnungszeiträumen 2003-2012 (links) und 2006-2015 (rechts) (Eigene Darstellung in QGIS 2.18.22)

Die Darstellung und Verarbeitung der Karten erfolgte ebenfalls in QGIS. Die REK waren zunächst als Punktvektoren dargestellt, von denen jeder verschiedene Relativwerte enthielt. Aus dem Datensatz jeder Karte wurde für diese Arbeit der gemittelte RE als prozentualer Anteil des mittleren Ertrags genutzt. Dabei entsprechen 100 % einem Relativvertrag im Mittel des Ackerschlages. Um den jeweiligen RE für die 18 Boniturpunkte zu ermitteln, wurden die REK über Inverse Distanzgewichtung auf ein 5 x 5 m Raster interpoliert. Das Raster wurde in dieser Weite gewählt, da in den Karten des Untersuchungsschlages eine hohe Punktdichte vorlag und diese somit als zuverlässige Datenquelle eingestuft worden sind. So blieben auch kleinräumige Unterschiede in der Relativvertragsstruktur erhalten. Über „Zonenstatistik“ konnten die Relativverträge für die Messpunkte, die um 10 m gepuffert worden sind, anschließend extrahiert und weiterverarbeitet werden.

3.6 Statistische Datenauswertung

Die generelle Datensammlung und -aufarbeitung erfolgte in der Software „Microsoft Excel 2016“. Diese wurde außerdem zur Erstellung einiger Abbildungen, wie der des Witterungsverlaufes, genutzt. Um die Merkmale relative Biomasse-Abweichung nach Talking Fields, Körnertrag des Winterrapses, Pflanzenentwicklungsparameter, Sentinel-2- und GreenSeeker- NDVI sowie die gemittelten Relativverträge der Jahre 2003 - 2015 auf lineare Zusammenhänge zu untersuchen, wurde die Statistik-Software „IBM SPSS Statistics 27“ genutzt. Mittels einer bivarianten Korrelationsanalyse nach Pearson wurde geprüft, ob ein linearer Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen bestand und wie stark dieser vorhanden war. Das Ergebnis dessen wird durch den Korrelationskoeffizienten r benannt. Die Analyse der Korrelation erfolgte jeweils anhand des Signifikanzniveaus $\alpha = 0,05$. Die Testergebnisse konnten danach in folgende Signifikanzgrenzen differenziert und gekennzeichnet werden:

> 5,0 %	n.s.	=	nicht signifikant
$\leq 5,0 \%$	*	=	schwach signifikant
$\leq 1,0 \%$	**	=	signifikant
$\leq 0,1 \%$	***	=	hoch signifikant

Weiterhin wurde das lineare Regressionsmodell genutzt, um zu prüfen, inwieweit dieser Zusammenhang zwischen den jeweiligen Merkmalen erklärt werden kann. Das Modell gibt durch das berechnete Bestimmtheitsmaß (R^2_{lin}) Aussage darüber, inwieweit die jeweils unabhängige Variable (x) dazu geeignet ist, die Varianz der abhängigen Variablen (y) zu erklären. Die tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der Korrelations- und Regressionsanalysen erfolgt im Verlaufe der Ergebnisdarstellung anhand des Bestimmtheitsmaßes, welches mit dem entsprechenden Signifikanzniveau gekennzeichnet worden ist.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verwendeten Datenquellen Talking Fields, Pflanzenentwicklungsparameter, NDVI aus Sentinel-2-Aufnahmen und GreenSeeker-Messungen, Ertragsdaten und Relativvertragskarten beschrieben, gegenübergestellt und statistisch ausgewertet. Die grafische Darstellung der Regressionsmodelle erfolgte zumeist in Streudiagrammen. In diesen wurden grundsätzlich die analysierten Messpunkte auf Basis ihrer jeweiligen Proberegion durch Formen unterschieden. In ausgewählten Diagrammen wurde zusätzlich die Einfärbung der Punkte nach ihrer relativen Biomasse-Abweichung beziehungsweise nach einer der dadurch zugeordneten neun Klassen (Vgl. Tab. 2) vorgenommen. Die Ergebnisdarstellung soll dabei aufzeigen in welchem Zusammenhang die verwendeten Referenzdatenquellen miteinander, aber auch mit der Talking Fields Basiskarte, beziehungsweise der darin enthaltenen relativen Biomasse-Abweichung, stehen. Die Ergebnisse sollen als spätere Interpretations- und Diskussionsgrundlage dienen.

4.1 Pflanzenentwicklung vor Winter

Die Tabelle 3 gibt einen Überblick über die analysierten Pflanzenentwicklungsparameter BBCH-Stadium, Bestandesdichte, Trockenmasse pro Quadratmeter, Feuchte, Einzelpflanzengewicht und den Wurzelhalsdurchmesser des Winterrapses, welche zum Zeitpunkt der vorwinterlichen Bonitur festgestellt worden sind. Die Beschreibung des Entwicklungsstandes erfolgt anschließend anhand der Empfehlungen nach BROCKERHOFF (2016) und DIEPENBROCK et al. (2016).

Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse der Punkterte des Winterrapses vor dem Winter im Anbaujahr 2018/2019 anhand der Bestandesparameter BBCH-Stadium, Bestandesdichte, Trockenmasse, Feuchte, Einzelpflanzengewicht und Wurzelhalsdurchmesser

Messpunkt	BBCH [-]					Bestandesdichte [Pfl.*m ⁻²]					Trockenmasse [g*m ⁻²]					Feuchte [%]					Einzelpflanzengewicht [g TM*Pfl.· ¹]					WHD* ¹ [mm]				
	n ^{*2}	\bar{X} ^{*3}	s ^{*4}	Min	Max	\bar{X}	s	Min	Max	\bar{X}	s	Min	Max	\bar{X}	s	Min	Max	n	\bar{X}	s	Min	Max	\bar{X}	s	Min	Max				
11	4	18	2	14	19	28	5	23	34	256	57	196	329	85	9,1	1,6	6,8	10,0	28	8,1	1,0	6,9	9,0	8,1	1,0	6,9	9,0			
12	4	18	1	16	19	32	6	25	40	187	20	166	210	85	6,1	1,2	5,0	7,2	31	6,3	0,2	6,1	6,5	7,7	2,0	6,1	10,6			
13	4	18	1	15	19	27	14	17	47	194	77	139	305	83	7,6	0,9	6,5	8,5	27	7,7	2,0	6,1	10,6	5,1	1,2	3,3	7,7			
14	4	17	1	16	19	33	10	22	45	220	21	199	250	83	7,0	1,5	5,5	9,0	33	5,3	0,7	4,4	6,0	5,5	1,3	0,7	4,4	6,0		
21	4	16	2	13	19	38	19	22	64	149	21	128	169	84	4,4	1,4	2,6	6,1	38	6,3	1,1	4,8	7,6	6,1	1,4	2,6	6,1	38		
22	4	16	2	14	18	16	3	13	20	12	5	8	17	79	0,8	0,2	0,6	1,0	13	2,0	0,3	1,7	2,2	5,1	0,4	4,7	5,5	13		
23	4	17	1	15	19	24	5	17	29	68	26	51	106	83	2,9	0,9	2,0	3,7	18	5,1	0,4	4,7	5,5	5,1	1,4	7,5	10,6	21		
24	4	18	1	16	19	23	5	16	26	130	19	105	147	84	5,7	0,5	5,4	6,5	21	8,6	1,4	7,5	10,6	5,4	1,3	7,5	10,6	21		
25	4	16	1	15	18	29	6	23	37	146	61	91	204	80	4,9	1,3	3,7	6,4	29	4,9	0,7	4,0	5,5	3,7	1,2	4,0	5,5	29		
26	4	17	1	15	19	21	4	17	26	83	27	54	116	82	3,9	1,3	3,2	5,8	19	4,6	0,3	4,3	5,0	3,2	1,2	4,2	5,0	19		
27	4	16	2	14	19	24	4	21	30	28	11	14	39	81	1,2	0,4	0,7	1,6	18	4,2	0,3	3,7	4,5	1,2	0,4	4,2	5,0	18		
28	4	18	1	16	19	41	14	27	56	165	27	132	194	83	4,3	0,9	3,2	5,2	40	5,8	2,6	5,6	6,2	3,2	0,9	5,2	5,6	40		
31	4	18	1	16	19	30	8	21	39	189	23	163	210	84	6,5	1,3	5,4	8,5	28	6,6	0,3	6,3	7,0	5,4	1,3	6,3	7,0	28		
32	4	14	2	12	16	12	4	7	17	8	6	2	14	77	0,6	0,3	0,3	1,0	11	1,8	0,4	1,3	2,3	0,3	0,3	1,8	2,3	11		
33	4	18	2	16	19	26	6	18	31	197	31	159	229	85	7,7	1,4	6,0	8,8	24	8,3	0,5	7,9	8,9	7,7	1,2	8,3	8,9	24		
34	4	16	2	14	18	27	10	19	40	114	23	97	149	86	4,5	1,2	3,3	5,6	26	5,9	0,3	5,7	6,4	3,3	1,2	5,9	6,4	26		
35	4	18	1	15	19	42	13	26	56	200	40	155	252	86	5,1	1,6	3,5	7,0	39	6,4	0,4	5,9	6,7	4,5	1,2	6,4	6,7	39		
36	4	17	2	14	19	28	4	22	31	222	65	136	278	84	8,2	3,5	4,5	12,6	28	7,0	0,4	6,5	7,3	4,5	1,2	7,0	7,3	28		
	72	17	1	12	19	28	8	7	64	143	76	2	329	83	5,0	2,5	0,3	12,6	470	5,8	1,9	1,3	10,6	5,0	2,5	12,6	470	5,8		

*1 Wurzelhalsdurchmesser

*2 Anzahl

*3 Arithmetisches Mittel

*4 Standardabweichung

Entwicklungsstadium

Zum Zeitpunkt der vorwinterlichen Bonitur hatten die Pflanzen der beprobten Messpunkte im Mittel das BBCH-Stadium 17 erreicht. Die Pflanzenentwicklung befand sich damit im Makrostadium 1. Der Fokus liegt in dieser Zeit auf der Blattentwicklung am Hauptspross, wobei das Internodium noch nicht gestreckt ist und die Pflanze dadurch noch dicht am Boden anliegt (WEBER und BEINHOLDER 1990; LANCASHIRE et al. 1991). Das BBCH schwankte im Durchschnitt um ein Entwicklungsstadium und kann damit als gering bezeichnet werden. Der Punkt 32 wies zu diesem Zeitpunkt im Mittel das niedrigste Entwicklungsstadium (BBCH 14) auf.

Bestandesdichte

Die empfohlene Bestandesdichte von mindestens 30 Pflanzen pro Quadratmeter, konnte im Durchschnitt an den Messpunkten 12 und 14, 21 und 28 sowie 31 und 35 erreicht werden. Im Mittel wurden an jedem Boniturpunkt 28 Pflanzen auf einem Quadratmeter gezählt. Die Bestandesdichte schwankte im Durchschnitt um 8 Pfl. \cdot m $^{-2}$. Die Standardabweichung zwischen den einzelnen Wiederholungen lag dabei an Punkt 21 mit 19 Pfl. \cdot m $^{-2}$ deutlich über dem Niveau der anderen Messpunkte. An Punkt 32 wurden insgesamt die niedrigste Anzahl an Rapspflanzen (12 Pfl. \cdot m $^{-2}$) festgestellt, wohingegen an Punkt 35 (42 Pfl. \cdot m $^{-2}$) die meisten Pflanzen pro Quadratmeter gezählt wurden.

Trockenmasse

Als weiterer Pflanzenentwicklungsparameter wurde die absolute Trockenmasse an den Probepunkten ermittelt. Für die TM aller Messpunkte konnte ein arithmetisches Mittel von 143 g \cdot m $^{-2}$ mit einer Standardabweichung 76 g \cdot m $^{-2}$ berechnet werden. Die Schwankung zwischen den Wiederholungen war dabei mit 77 g \cdot m $^{-2}$ an Punkt 13 am größten. Im Mittel konnte an Punkt 32 die geringste TM (8,0 g \cdot m $^{-2}$) und an Punkt 11 die höchste TM (256 g \cdot m $^{-2}$) festgestellt werden.

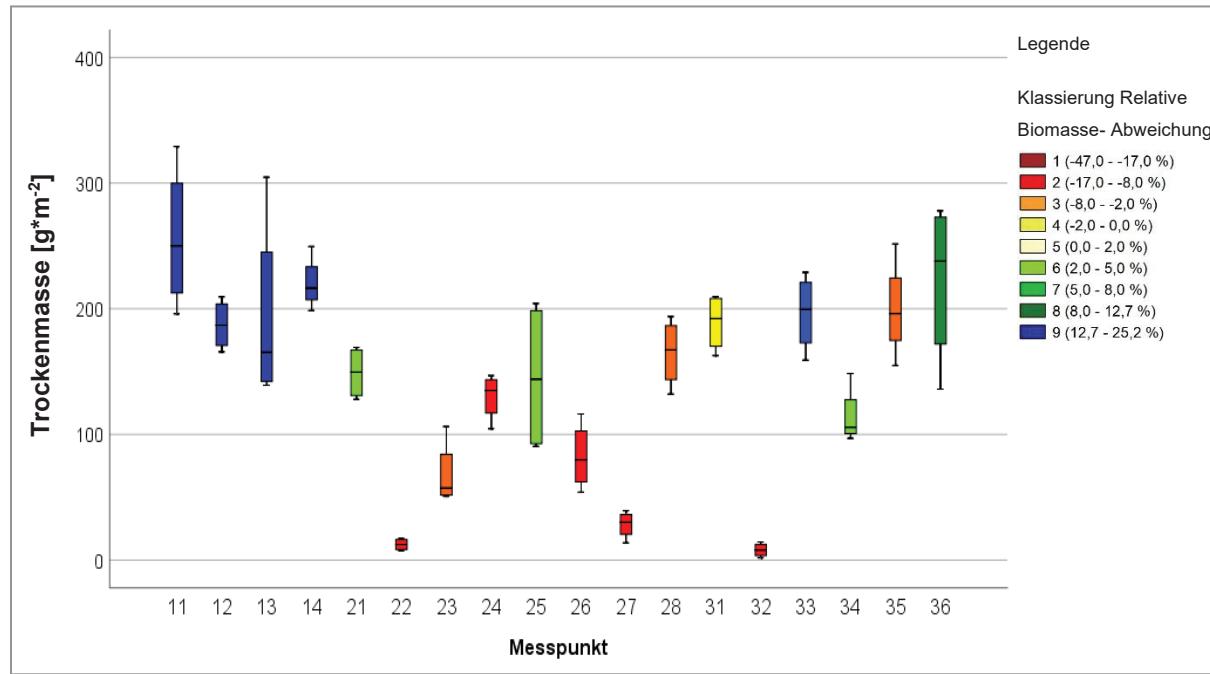


Abbildung 8: Verteilung der Trockenmasse [$\text{g}^* \text{m}^{-2}$] an den 18 Messpunkten und Einfärbung anhand der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields

In Abbildung 8 sind die Trockenmassewerte der einzelnen Standorte aufgegliedert und in Form von Boxplots dargestellt. Diese wurden auf Grundlage ihrer relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields klassiert und entsprechend eingefärbt. Die Zuordnung der Werte in die Klassen entspricht denen in der Talking Fields Basiskarte (Vgl. Abb. 3). An den Punkten 11; 13 und 36 ist zu erkennen, dass dort mit einer höheren durchschnittlichen Trockenmasse auch größere Schwankungen in den beprobenen Wiederholungen verbunden waren. Punkte mit vergleichsweise niedrigeren Klassen, wie Punkt 31 (Klasse 4) und Punkt 35 (Klasse 3), wiesen im Mittel ähnlich hohe oder höhere Trockenmassewerte auf, als Punkte in höheren Klassen, wie beispielsweise Punkt 12 und 33. Die Messpunkte 22; 27 und 32, mit der geringsten mittleren Trockenmasse pro Quadratmeter, weisen gleichzeitig auch die geringste Standardabweichung innerhalb der beprobenen Wiederholungen auf.

Feuchte

Die prozentuale Feuchte der Rapspflanzen lag zwischen 77 und 86 % und betrug im Mittel 83 %. Den niedrigsten Wassergehalt wiesen die Pflanzen an den Punkten 22 (79 %) und 32 (77 %) auf, wohingegen an den Messpunkten 34 und 35 mit 86 % die höchste Feuchte auf Basis des Gewichtsverlustes der Frischmasse des Winterrapses berechnet werden konnte.

Einzelpflanzengewicht

Im Durchschnitt wurde ein Einzelpflanzengewicht von 5,0 g TM*Pfl.⁻¹ ermittelt. Die Standardabweichung betrug insgesamt 2,5 g TM*Pfl.⁻¹. Mit 0,6 g TM*Pfl.⁻¹ wurde an Punkt 32 die geringste und an Punkt 11 mit 9,1 g TM*Pfl.⁻¹ das höchste durchschnittliche Gewicht pro Pflanze festgestellt.

Wurzelhalsdurchmesser

Bezüglich des Wurzelhalsdurchmessers im Vorwinter ist festzustellen, dass nur an den Punkten 11; 24 und 33 ein WHD von mindestens 8 mm erreicht wurde. Im Mittel lag dieser bei 5,8 mm und schwankte um 1,9 mm. Der geringste Durchmesser wurde an Punkt 32 (1,8 mm) festgestellt, wobei der mittlere WHD an Punkt 22 mit 2,0 mm nur geringfügig höher war. Der größte WHD von 8,6 mm wurde an Punkt 24 gemessen.

Die beschriebenen Pflanzenentwicklungsparameter wurden auf einen statistischen Zusammenhang mit Talking Fields geprüft. In der Tabelle 4 sind die Bestimmtheitsmaße der linearen Regression zusammengefasst. Die Stärke des jeweiligen linearen Zusammenhangs wurde anhand der in Punkt 4.6 festgelegten Grenzen gekennzeichnet.

Tabelle 4: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen der gemessenen Pflanzenentwicklungsparameter vor dem Winter und der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields

	Relative Biomasse-Abweichung [%]
	R ² _{lin}
BBCH [-]	0,24*
Bestandesdichte [Pfl.*m ⁻²]	0,12 (n.s.)
Trockenmasse [g*m ⁻²]	0,58**
Einzelpflanzengewicht [g TM*Pfl. ⁻¹]	0,63**
Wurzelhalsdurchmesser [mm]	0,50*

[n.s. p > 0,05; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01]

Das Pflanzenentwicklungsstadium vor dem Winter und die relativen Biomasse-Abweichung weisen einen signifikanten Zusammenhang auf. Dabei konnten 24 % der Varianz des BBCH-Stadiums anhand der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields erklärt werden.

Zwischen den Parametern Bestandesdichte und der prozentualen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields konnte keine signifikante Beziehung nachgewiesen werden. Das Bestimmtheitsmaß lag auf einem Niveau von 0,12.

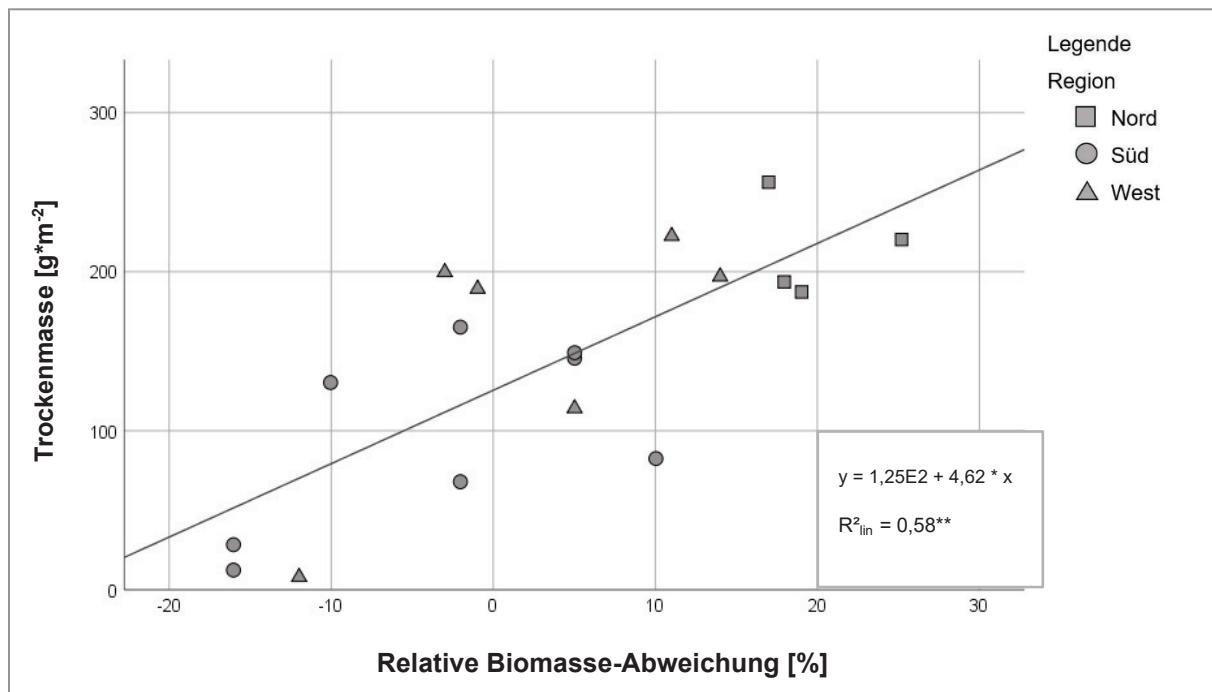


Abbildung 9: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und der Trockenmasse [g*m⁻²]

Der statistische Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung und der Trockenmasse ist anhand eines Streudiagrammes in Abbildung 9 dargestellt. Es konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Parametern ermittelt werden. Die Varianz des positiv linearen Zusammenhangs war dabei zu 58 % erklärbar. Insgesamt trifft die Aussage zu, dass an Messpunkten mit einer höheren relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields (> 10 %) auch eine höhere Trockenmasse pro Quadratmeter erreicht werden konnte.

Zwischen dem Einzelpflanzengewicht und der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields bestand, ähnlich wie bei der Trockenmasse pro Quadratmeter, ein signifikanter Zusammenhang, bei welchem 63 % dieser Varianz erklärt werden konnte.

Der Wurzelhalsdurchmesser, gemessen vor dem Winter, wies einen statistisch signifikanten Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung auf, wobei das Bestimmtheitsmaß bei 50 % lag.

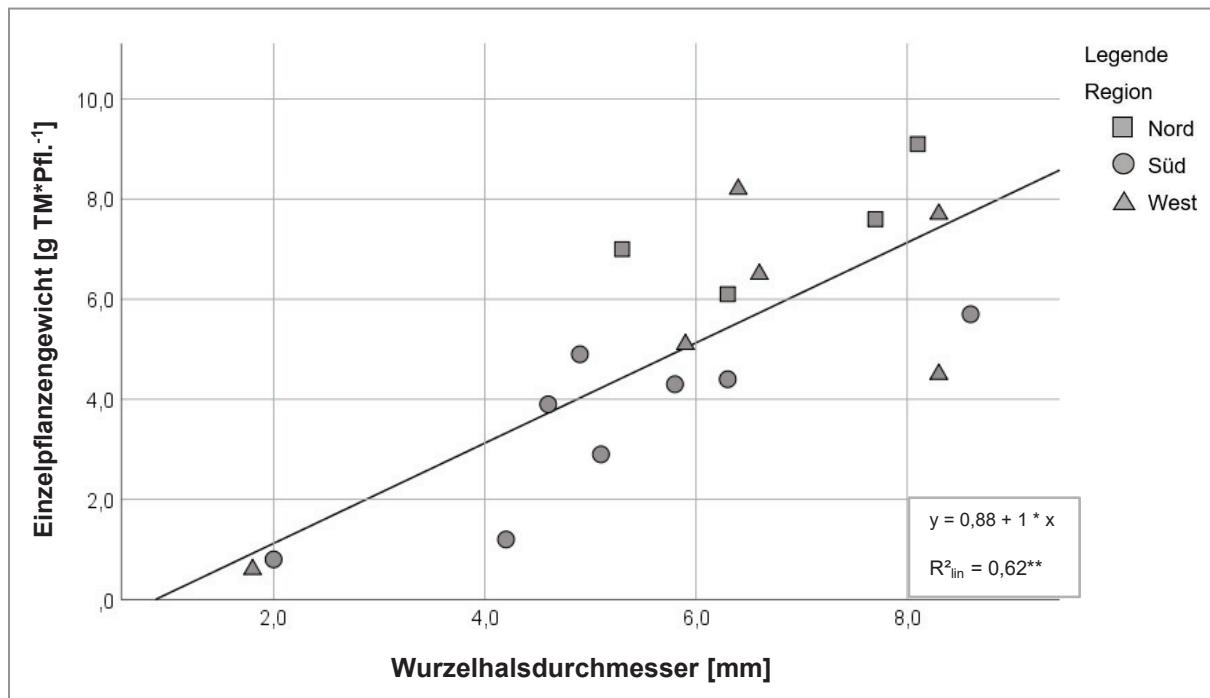


Abbildung 10: Statistischer Zusammenhang zwischen dem Wurzelhalsdurchmesser [mm] und dem Einzelpflanzengewicht [g TM*Pfl.⁻¹]

In der Abbildung 10 ist das Ergebnis der statistischen Analyse der Parameter Einzelpflanzengewicht und Wurzelhalsdurchmesser dargestellt. Zwischen den Pflanzenentwicklungsparametern konnte ein linear positiver Zusammenhang, welcher auf einem signifikanten Niveau lag, nachgewiesen werden. Dabei konnten 62 % der Varianz des Einzelpflanzengewichts mit Hilfe des Wurzelhalsdurchmessers erklärt werden. Ein größerer WHD war dabei nicht immer ausschlaggebend für ein hohes Einzelpflanzengewicht. An einigen Punkten, mit vergleichsweise niedrigeren WHD von 5 bis 7 mm, konnten ähnlich hohe oder teilweise höhere Einzelpflanzengewichte (7,0 bis 8,0 g TM*Pfl.⁻¹) festgestellt werden als an Messpunkten mit einem größeren WHD. Die Beziehung der Punkte war, regional betrachtet, unspezifisch.

4.2 Körnertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019

In diesem Abschnitt der Arbeit wird der Körnertrag des Winterrapses anhand einer Ertragskarte des gesamten Untersuchungsschlages dargestellt, für die einzelnen Messpunkte bestimmt und auf einen statistischen Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields geprüft.

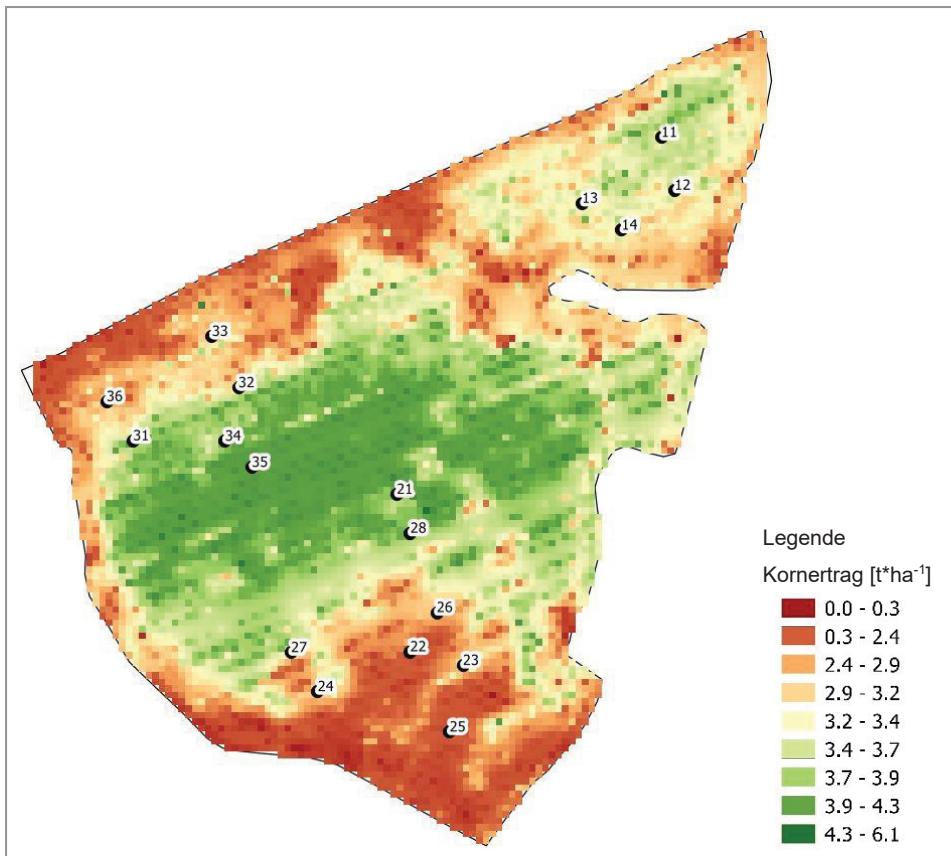


Abbildung 11: Karte der bereinigten und interpolierten Ertragsdaten des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019 (Eigene Darstellung in QGIS 2.18.22)

In der Abbildung 11 ist die Ertragskarte des Winterrapses aus dem Anbaujahr 2018/2019 dargestellt. Die Ertragsdaten wurden nach dem in Punkt 4.5.3 beschriebenen Vorgehen bereinigt, interpoliert und eingefärbt. Wie der Legende zu entnehmen ist, bedeutet eine Rotfärbung einen niedrigeren Ertrag und eine Grünfärbung ist mit einem vergleichsweise höheren Ertragsergebnis zu assoziieren. Anhand der intensiven Grünfärbung im mittleren Teil des Ackerschlages ist zu erkennen, dass der Körnertrag in diesem Bereich am höchsten war ($> 3,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Die Erscheinung lässt sich als „grünes Band“ bezeichnen. Dieser Hochertragsbereich weist im Nord-Westen, in der Umgebung von Punkt 32, eine gradlinige Grenze auf, nach welcher die gemessenen Erträge wieder geringer ausfielen. Der südliche Teil des Feldes war insgesamt von einem vergleichsweise niedrigen Ertragsniveau (0,0 bis $2,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) geprägt. Dieser Niederertragsbereich ist von farblich helleren Strömen durchzogen, in welchen Erträge von mindestens $3,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ erzielt wurden. Die Ertragsstruktur im nördlichen Bereich des Feldes kann als inhomogen beschrieben werden.

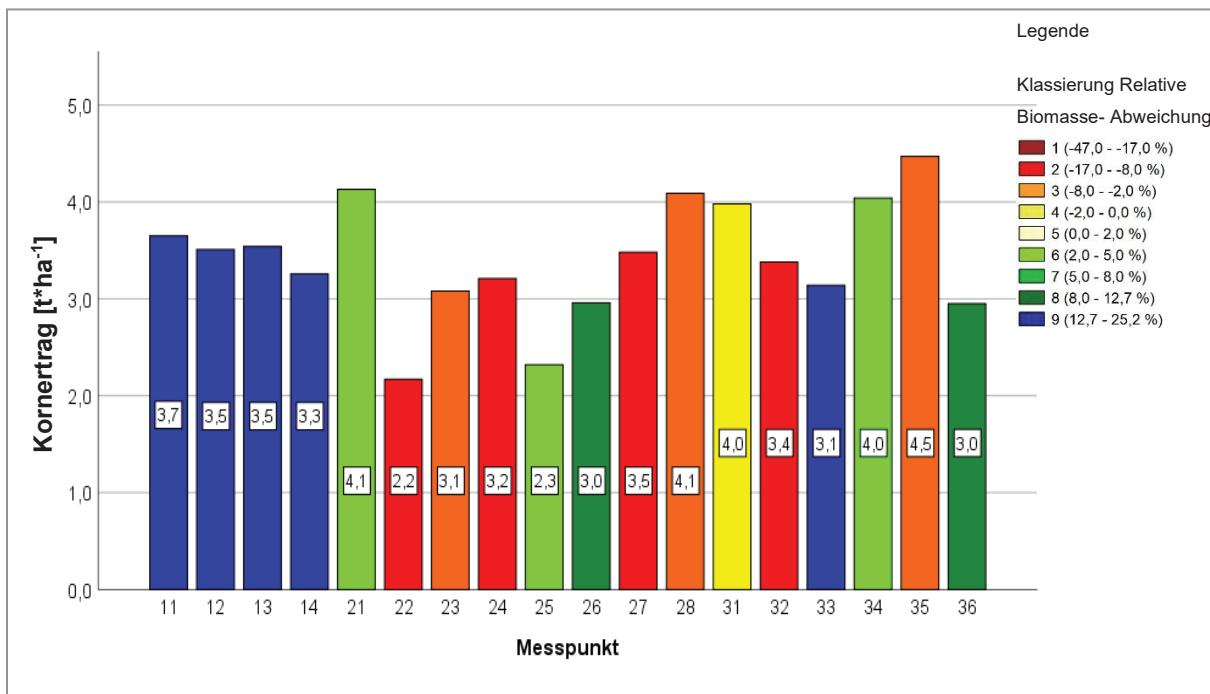


Abbildung 12: Ergebnisse des Kornvertrags [$t^{*}ha^{-1}$] an den 18 Messpunkten und Einfärbung anhand der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields

Abbildung 12 veranschaulicht den aus den Ertragsdaten ermittelten Kornvertrag an den 18 Messpunkten. Die Höhe der Ertragsergebnisse sind in Form von Balken dargestellt und entsprechend der Klassierung der relativen Biomasseabweichung nach Talking Fields eingefärbt worden. Auf Basis der bereinigten Ertragsrohdaten ließ sich ein mittleres Ertragsniveau von $3,3\ t^{*}ha^{-1}$ für den gesamten Untersuchungsschlag ermitteln. Der mittlere Kornvertrag der 18 Messpunkte lag bei $3,4\ t^{*}ha^{-1}$. Der niedrigste Kornvertrag wurde an den Punkten 22 ($2,2\ t^{*}ha^{-1}$) und 25 ($2,3\ t^{*}ha^{-1}$) geerntet, wohingegen mit $4,5\ t^{*}ha^{-1}$ an Punkt 35 das Ertragsniveau am höchsten lag. Die Standardabweichung zwischen allen Probepunkten betrug $0,6\ t^{*}ha^{-1}$. An den Messpunkten in der Region Nord wurde im Mittel ein Kornvertrag von $3,5\ t^{*}ha^{-1}$ erreicht. Die mittleren Erträge in den Regionen Süd und West betrugen 3,2 und $3,7\ t^{*}ha^{-1}$. Dabei war die Ertragsschwankung in Region Süd am höchsten ($0,7\ t^{*}ha^{-1}$) und mit $0,2\ t^{*}ha^{-1}$ in der nördlichen Region am geringsten. Anhand der Zuordnung in die jeweilige Klasse ist zu erkennen, dass auch an Punkten mit einer vergleichsweise niedrigen Klasse, wie Punkt 27 (Klasse 2), 32 (Klasse 2) und 35 (Klasse 3), ähnlich hohe oder höhere Kornverträge erzielt werden konnten, als an Punkten in deutlichen höheren Klassen, wie Punkt 26 und 36 (Klasse 8) oder Punkt 33 (Klasse 9).

Der für die Messpunkte ermittelte Kornvertrag des Winterrapses wurde auf einen statistischen Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields und den Pflanzenentwicklungsparametern, welche vor dem Winter bonitiert worden sind, geprüft.

In der Tabelle 5 sind die Bestimmtheitsmaße der linearen Regression zusammengefasst. Die Stärke des jeweiligen linearen Zusammenhangs wurde anhand der in Punkt 4.6 festgelegten Grenzen gekennzeichnet.

Tabelle 5: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen des Körnertrags des Winterrapses [$t \cdot ha^{-1}$] im Anbaujahr 2018/2019, der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und der gemessenen Pflanzenentwicklungsparameter vor dem Winter

	Körnertrag [$t \cdot ha^{-1}$] 2019
	R^2_{lin}
Relative Biomasse-Abweichung [%]	0,01 (n.s.)
BBCH [-]	0,05 (n.s.)
Bestandesdichte [$Pfl. \cdot m^{-2}$]	0,40**
Trockenmasse [$g \cdot m^{-2}$]	0,12 (n.s.)
Einzelpflanzengewicht [$g \cdot TM \cdot Pfl.^{-1}$]	0,04 (n.s.)
Wurzelhalsdurchmesser [mm]	0,17 (n.s.)

Die statistische Analyse der beiden Parameter ergab, dass zwischen diesen kein signifikanter Zusammenhang bestand und dass sich die Varianz des Körnertrags zu 1 % durch die prozentuale Biomasse-Abweichung von Talking Fields erklären ließ. Das lineare Regressionsmodell der beiden Parameter ist in der Abbildung 13 dargestellt.

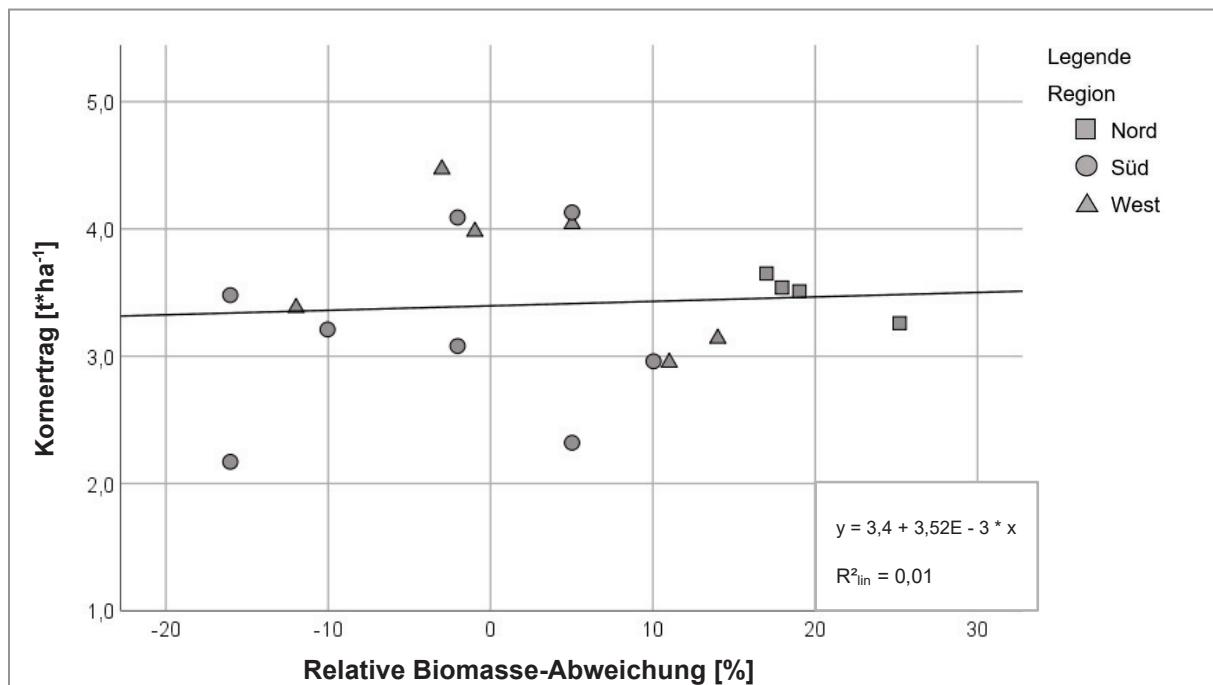


Abbildung 13: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Körnertrag [$t \cdot ha^{-1}$] des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019

Die Abbildung 13 zeigt den Kornertrag in Abhängigkeit von der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields. Die Punkte sind auf Grundlage ihrer jeweiligen Proberegion symbolisch unterschieden worden. Das Bestimmtheitsmaß ist mit einem Wert von 1 % als sehr gering einzustufen. Die unspezifische Beziehung der Punkte im Streudiagramm verdeutlicht das Ergebnis, dass durch die Biomasse-Abweichung an den Messpunkten nicht auf den Kornertrag an selbigen geschlossen werden konnte.

Zwischen dem vorwinterlichen Entwicklungsstadium und dem Kornertrag des Winterrapses konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang ermittelt werden. Die Erklärbarkeit der Varianz betrug 5 %.

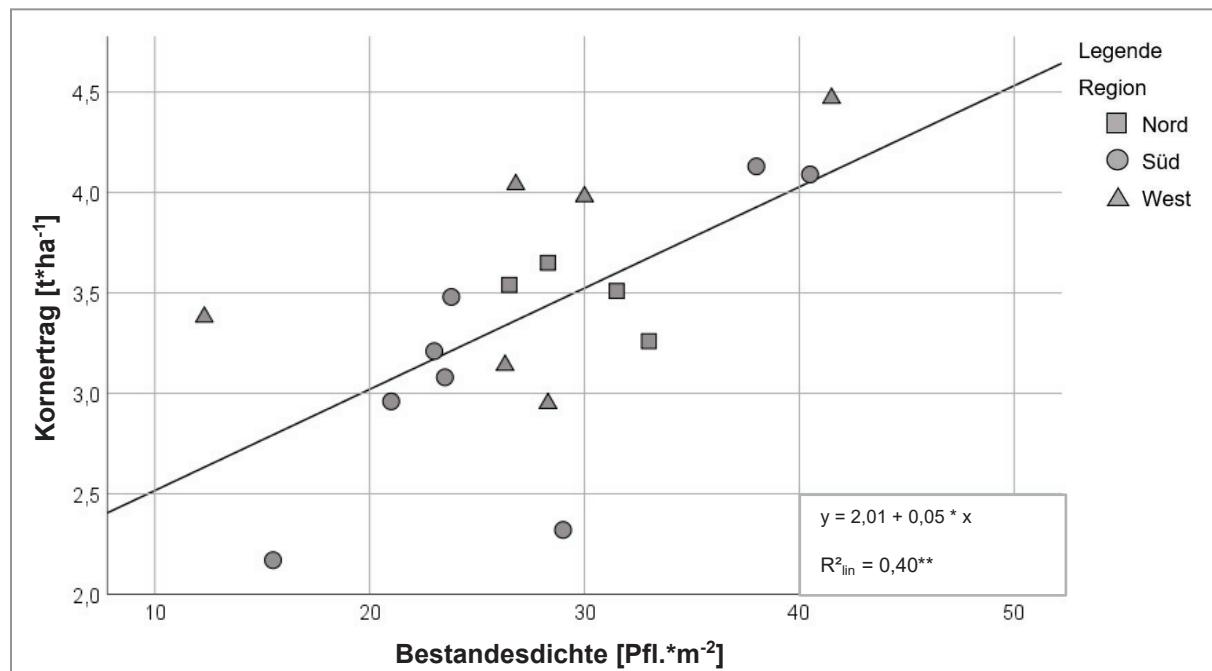


Abbildung 14: Statistischer Zusammenhang zwischen der Bestandesdichte [Pfl.·m⁻²] und dem Kornertrag [t·ha⁻¹] des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019

In der Abbildung 14 ist der lineare Zusammenhang zwischen dem Kornertrag des Winterrapses und der Bestandesdichte dargestellt. Die Bestandesdichte korrelierte mit dem Ertrag auf einem signifikanten Niveau, wobei 40 % der Varianz des Kornertrags durch die Bestandesdichte erklärbar waren. Anhand der Abbildung ist erkennbar, dass an den Punkten mit den höchsten Bestandesdichten tendenziell auch die höchsten Kornerträge erzielt werden konnten. Es wurden jedoch auch an Messpunkten mit einer geringeren Bestandesdichte Erträge im Mittel des Untersuchungsschlages und darüber erreicht.

Zwischen der Trockenmasse und dem Kornertrag des Winterrapses konnte kein statistischer Zusammenhang nachgewiesen werden. Das Bestimmtheitsmaß lag bei 0,12. Zwischen dem Einzelpflanzengewicht und dem Kornertrag im Anbaujahr 2018/2019 konnte

kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Das Bestimmtheitsmaß lag bei 0,04 und ist damit als niedrig einzustufen.

Ein linearer Zusammenhang zwischen dem WHD und dem Kornertrag des Winterapses war nicht nachweisbar. Die Erklärbarkeit der Varianz durch das Bestimmtheitsmaß lag bei 17 %.

4.3 Geodaten als Referenzdatenquelle

In diesem Kapitel werden Informationen der Geodatenquellen Sentinel-2, GreenSeeker und Relativvertragskarten genutzt, um diese auf einen linearen Zusammenhang miteinander, mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields, ausgewählten Pflanzenentwicklungsparametern und dem Kornertrag des Winterapses zu prüfen.

4.3.1 Sentinel-2-Satellitenbilder

Zunächst wird in diesem Abschnitt die Verfügbarkeit von Sentinel-2-Satellitenbildern für mehrere Jahre aufgezeigt. Aus einigen ausgewählten Satellitenszenen wurde dann der NDVI berechnet und genutzt, um diesen auf einen Zusammenhang mit Talking Fields zunächst für das Jahr 2017 zu prüfen, da die Basiskarte in diesem Jahr an den Landwirt geschickt wurde. Anschließend erfolgt die Darstellung der Entwicklung und statistische Analyse des NDVI mit der relativen Biomasse-Abweichung, verschiedenen Pflanzenentwicklungsparametern und dem Kornertrag für das Anbaujahr 2018/2019.

In der Tabelle 6 ist eine Gegenüberstellung verfügbarer und verwendbarer Satellitenbilder der Jahre 2016 bis 2019 zu finden. Dargestellt ist die Anzahl der Bilder der Se2-Missionen für jeweils den Zeitraum eines Jahres (01.01. bis 31.12.). Die Auflistung soll Aufschluss darüber geben, inwieweit sich die Wiederholrate der Se-2-Satelliten in den letzten Jahren entwickelte und wie viel Datenmaterial über Copernicus theoretisch verfügbar war.

Tabelle 6: Anzahl jährlich verfügbarer und verwendbarer Sentinel-2-Satellitenbilder in Abhängigkeit von dem maximalen Wolkenbedeckungsgrad von 2016 bis 2019, Stand: 30.11.2019 (COPERNICUS 2019b)

Jahr	Anzahl verfügbarer Satellitenbilder	Anzahl verwendbarer Satellitenbilder in Abhängigkeit vom maximalen Wolkenbedeckungsgrad [%]			
		70%	50%	30%	10%
2016	168	77	67	42	25
2017	310	124	76	55	22
2018	580	333	278	215	140
2019	536	262	202	146	86

Die Tabelle 5 zeigt, dass sich sowohl die Anzahl verfügbarer als auch die Zahl verwendbarer Satellitenbilder, abhängig von dem Wolkenbedeckungsgrad, in den letzten Jahren deutlich erhöht hat. Die Steigerung der Wiederholrate ist besonders von 2017 auf 2018 erkennbar. Werden die Bilder nach dem Wolkenbedeckungsgrad gefiltert, so reduzierte sich die Anzahl der Szenen sehr stark. Insgesamt standen besonders in den vergangenen zwei Jahren eine große Anzahl von Satellitendaten zur Verfügung. Anhand dessen ließ sich jedoch nicht direkt beurteilen, wie viele Aufnahmen davon konkret für den Untersuchungsschlag verwendbar waren. Dabei konnten selbst kleinflächige Wolkenlücken oder Wolkenschatten eine Satellitenszene zur weiteren Verarbeitung ein- oder ausschließen.

Relative Biomasse-Abweichung und Sentinel-2-NDVI 2017

Für das Jahr 2017 standen insgesamt 310 Satelliten-Aufnahmen zur Verfügung. Diese Anzahl verringerte sich um 60 % allein unter der Bedingung eines maximalen Wolkenbedeckungsgrades von 70 %. Die verwendete TF Basiskarte wurde im Frühjahr 2017 an den Landwirt geschickt. Aus diesem Grund sollten zunächst die prozentuale Biomasse nach TF und der NDVI aus Sentinel-2-Satellitenbildern eines ähnlichen Aufnahmezeitpunktes auf einen statistischen Zusammenhang geprüft werden. Für diesen Zeitpunkt konnten zwei Satelliten-Szenen vom 15.03.2017 und 28.03.2017 genutzt werden. Die Ergebnisse der linearen Korrelation und die Bestimmtheitsmaße sind in den Abbildungen 15 und 16 dargestellt.

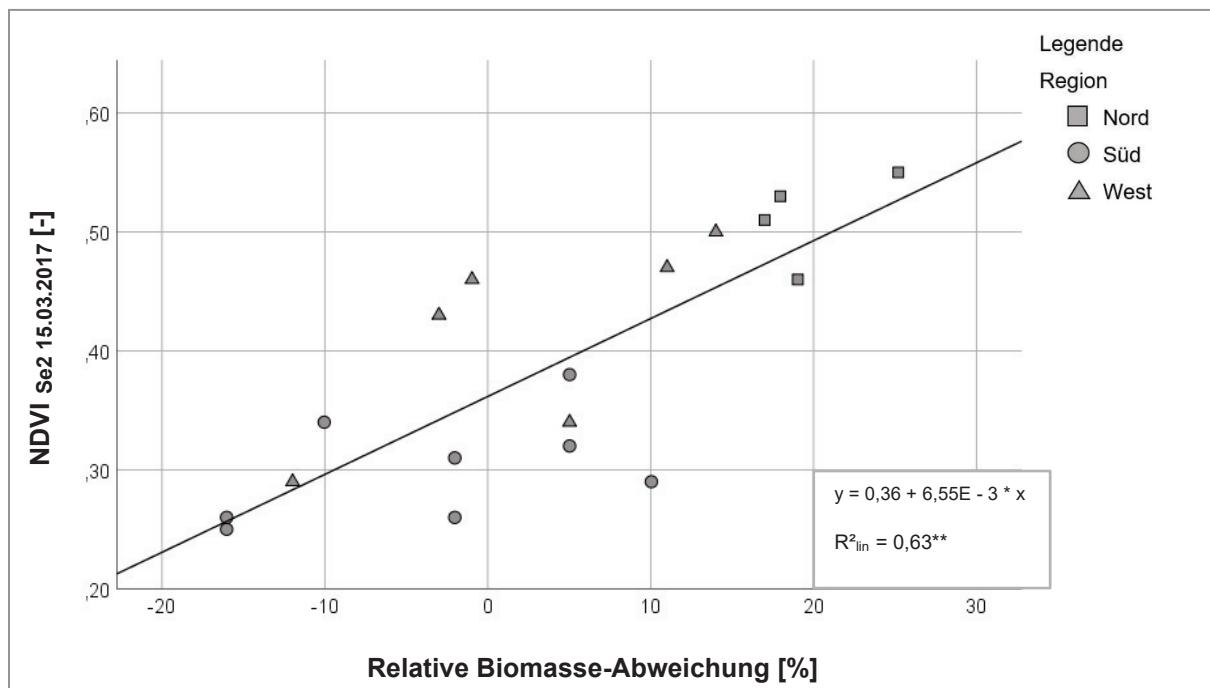


Abbildung 15: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Sentinel-2-NDVI_{15.03.2017} [-]

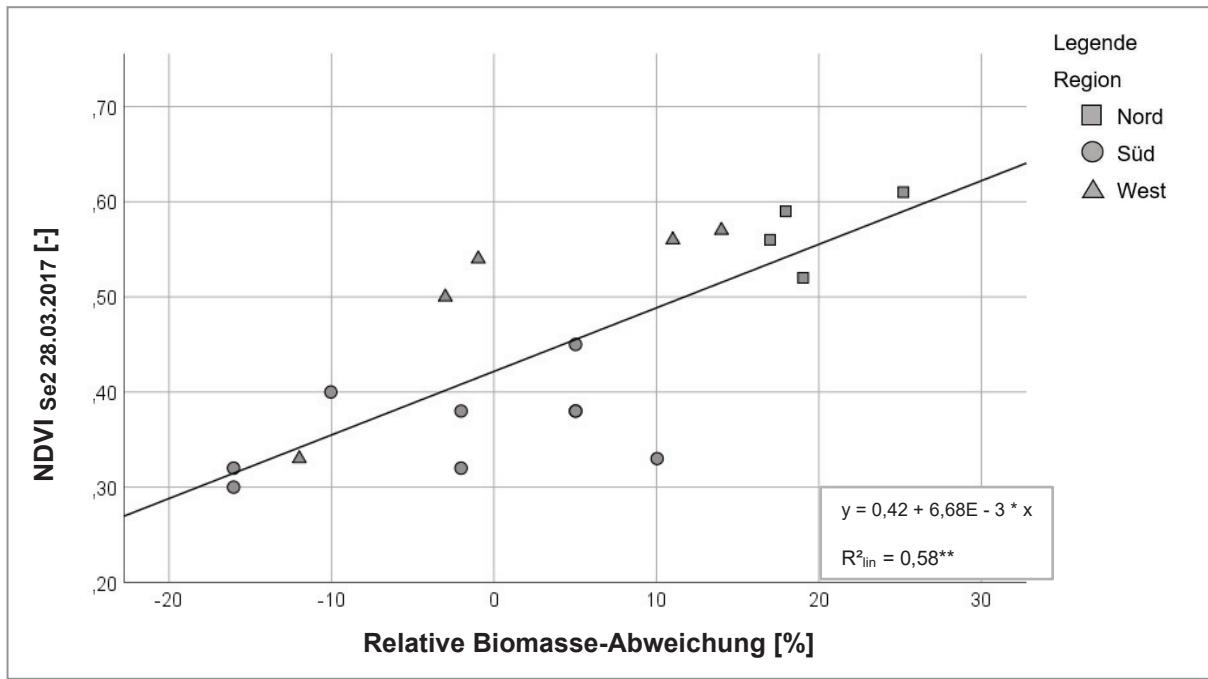


Abbildung 16: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Sentinel-2-NDVI 28.03.2017 [-]

Durch die statistische Analyse konnte zwischen Talking Fields und dem NDVI aus beiden Satellitenszenen ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. 63 % der Varianz des Se2-NDVI der früheren Aufnahme (15.03.2018) konnten durch Talking Fields erklärt werden. Zwei Wochen später (28.03.2017) lag das Bestimmtheitsmaß bei 0,58. Im Verlaufe dieser Zeit gab es einen Anstieg des NDVI an allen Messpunkten. Die Beziehung der Punkte in Region Süd und West war insgesamt nicht eindeutig.

Sentinel-2-NDVI im Anbaujahr 2018/2019

Über die Vegetationsperiode des Winterrapses von der Aussaat im August 2018 bis zur Ernte im Juli 2019 betrug die Anzahl verfügbarer Satellitenszenen insgesamt 262 Aufnahmen. Die Anzahl verringerte sich auf 125 unter der Bedingung eines maximalen Bewölkungsgrades von 70 %. Für das Untersuchungsfeld konnten konkret 19 Szenen für den gesamten Vegetationszeitraum im Anbaujahr 2018/2019 herausgearbeitet werden, auf denen keine Wolken-, Wolkenschatten oder andere Störungen vorhanden waren. Aus den erstellten NDVI-Bildern wurde dann der NDVI der einzelnen Vegetationsmonate für die Messpunkte extrahiert.

In der Abbildung 17 ist die monatliche Entwicklung des NDVI über die Vegetationsperiode dargestellt. Der Indexwert wurde regional und für jeden Vegetationsmonat zusammengefasst. Die Punktwerte wurden außerdem durch eine Interpolationslinie verbunden, welche die NDVI-Werte zwischen den Messzeitpunkten schätzt.

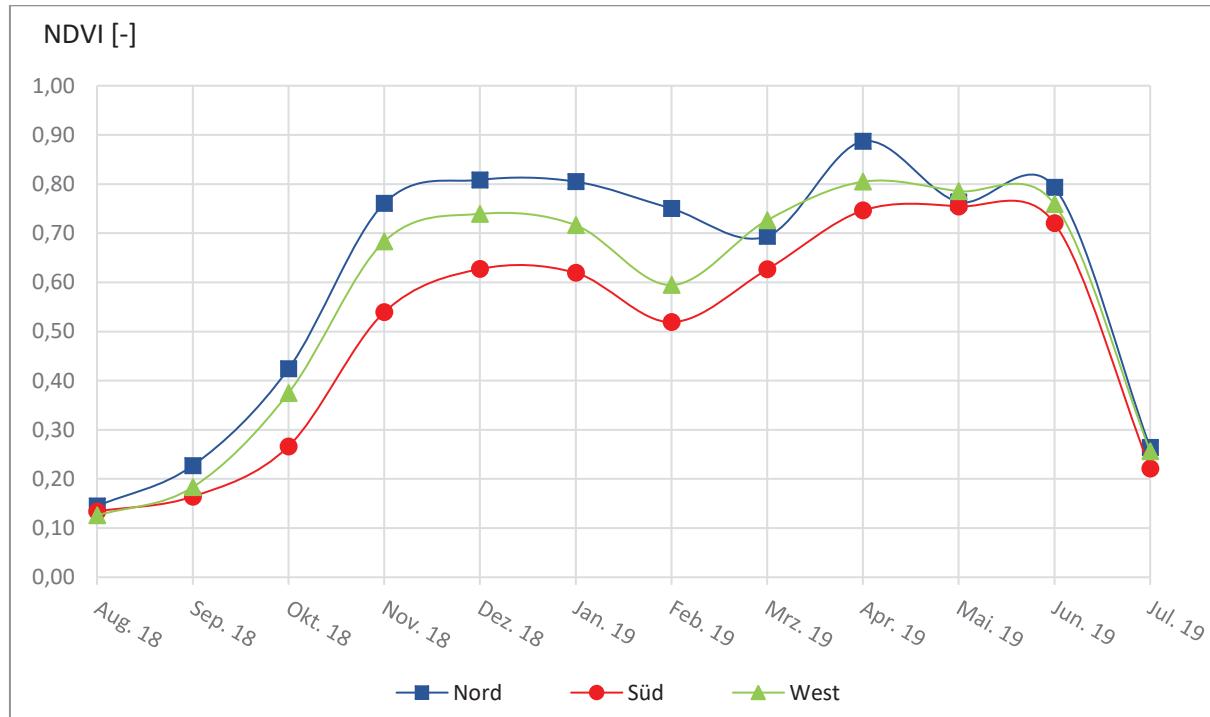


Abbildung 17: Monatliche Entwicklung des NDVI über den Vegetationszeitraum des Winterrapses von August 2018 bis Juli 2019 in den Regionen Nord, Süd und West

Von August bis November 2018 war ein markanter Anstieg des Index in allen Boniturzonen zu verzeichnen. In Abhängigkeit von der Proberegion, wurden bis November 2019 NDVI zwischen 0,55 und 0,75 festgestellt. Der NDVI stieg danach unwesentlich weiter an und stagnierte im Dezember 2018 und Januar 2019 in den Regionen zwischen 0,60 und 0,80, bis dieser im Februar leicht sank. Bis zu diesem Zeitpunkt konnte regional betrachtet eine einheitliche Entwicklung des NDVI festgestellt werden. Dabei lag der durchschnittliche Indexwert in der Region Nord zu jedem Messzeitpunkt am höchsten, wohingegen der Wert in der Region West, und besonders in der Region Süd, deutlich darunter lag. Ab März 2019 begann der NDVI in der nördlichen Region stark zu schwanken. Im Mai 2019 hatten die Indexwerte aller Regionen dann ein nahezu gleiches Niveau von rund 0,75 erreicht. Bis zum Juni konnte eine leichte regionale Differenzierung des NDVI festgestellt werden. Noch vor dem Erntezeitpunkt Ende Juli 2019 fiel der Wert deutlich auf etwa 0,25 ab.

Die Abbildung 18 zeigt die Entwicklung des NDVI auf dem untersuchten Ackerschlag anhand einer kartographischen Darstellung. Zur visuellen Analyse der Pflanzenentwicklung über das Anbaujahr hinweg wurden sechs Se2-Aufnahmen gewählt, welche den Verlauf

bestmöglich veranschaulichen sollten. Dafür wurde dem jeweiligen NDVI eine konkrete Farbe zugeordnet. Dabei entspricht einem NDVI von 0,00 ein dunkles Braun und damit dem Erdboden. Je dunkler der Grünton ist, desto höher ist der NDVI und damit der Biomassewuchs des Winterrapses beziehungsweise der Anteil grüner Pflanzenteile.

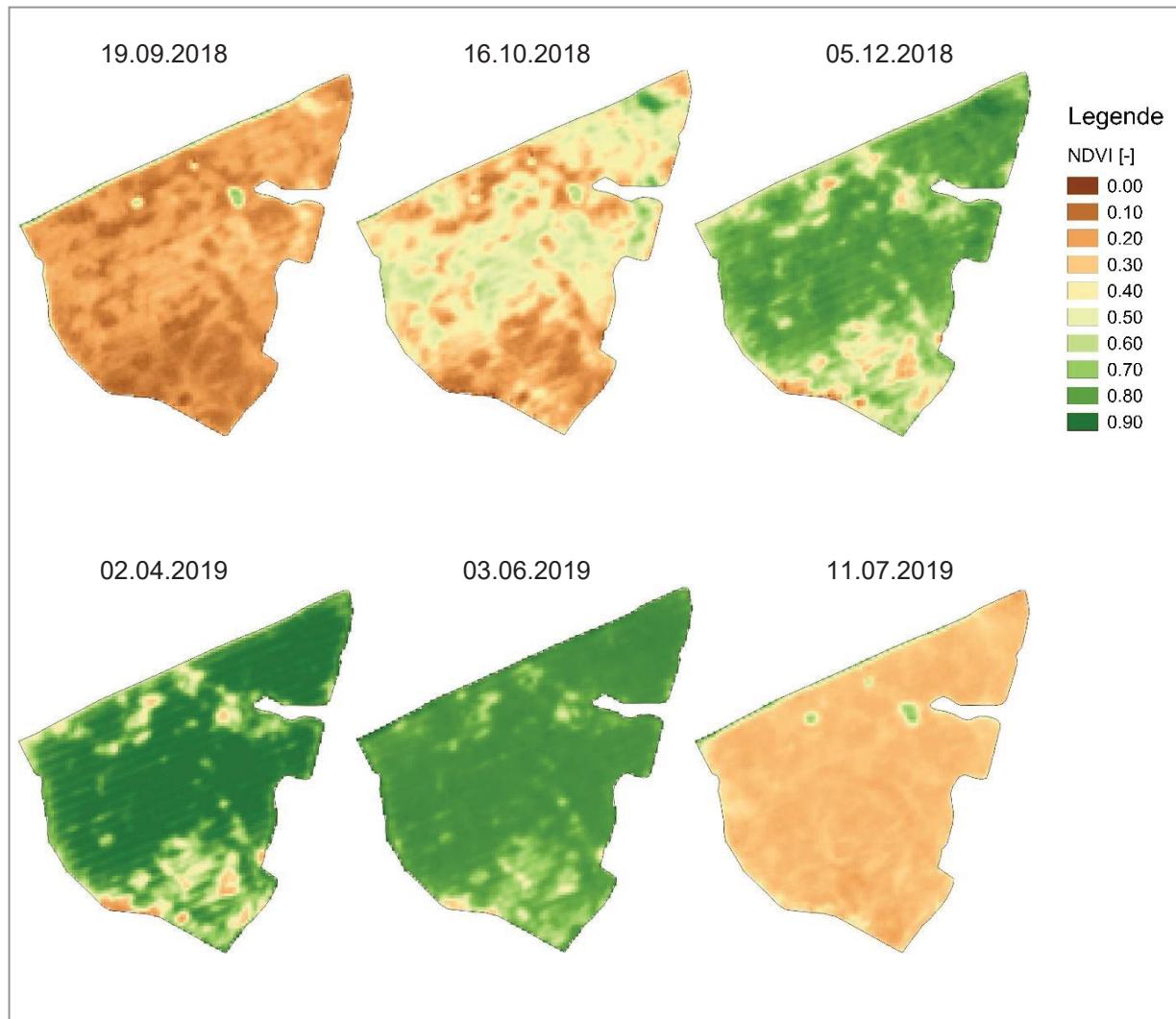


Abbildung 18: Entwicklung des NDVI [-] von Winterraps im Anbaujahr 2018/2019 auf dem Untersuchungsfeld anhand von sechs Sentinel-2-Satellitenaufnahmen (Eigene Darstellung in QGIS 2.18.22; COPERNICUS 2019b)

Zunächst konnte anhand der Entwicklung des NDVI der Zuwachs von Biomasse nachgewiesen werden. Über den Vegetationszeitraum hinweg waren deutliche Unterschiede in der Entwicklungsstruktur vorhanden. Besonders in der südlichen Region des Feldes war dies anhand des zeitlich verzögerten Anstiegs des NDVI erkennbar. Bereits Mitte September 2018 waren Unterschiede anhand der Farbgebung erkennbar. Aufgehelle Bereiche kennzeichnen zu diesem Zeitpunkt einen Anstieg des Vegetationsindizes. Einen Monat später, im Oktober 2018, war der erste Entwicklungsschub erkennbar. Dabei stieg der NDVI besonders in der Mitte und im nördlichen Bereich des Ackerschlages an. Bei Betrachtung der Karte, kann

diese Erscheinung in der Feldmitte als „grünes Band“ bezeichnet werden. Insgesamt ist zu diesem Zeitpunkt eine stark inhomogene Entwicklungsstruktur erkennbar. Nach Abschluss der vorwinterlichen Datenerhebung Anfang Dezember war eine deutliche Zunahme des NDVI über den gesamten Ackerschlag vorhanden, was durch die hohe anteilige Zunahme der Grüntöne gezeigt wird. An der nordwestlichen Feldgrenze sowie im südlichen Bereich waren zu diesem Zeitpunkt noch größere Flächen erkennbar, welche in der Entwicklung des NDVI und damit der Biomasse verzögert waren. Diese Entwicklungsstruktur blieb bis zum darauffolgenden Frühjahr (April 2019) bestehen. Bis zum Frühjahr dunkelten bereits grün gefärbte Bereiche nach und erreichten einen NDVI zwischen 0,70 und 0,90. Zu Beginn der Abreife im Juni 2019 war ein leicht absinkender NDVI über den gesamten Ackerschlag zu verzeichnen, was anhand der Aufhellung des Grüntons erkennbar ist. Die in der Entwicklung verzögerten Bereiche konnten ihren Rückstand augenscheinlich bis dahin zum Teil ausgleichen. Wie bereits in der Abbildung 18 festzustellen war, fiel der Indexwert bis Mitte Juli 2019 stark ab. Die homogene Struktur der Farbgebung zeigt einen gleichmäßigen Abreife-Status des gesamten Versuchsfeldes bis zur Ernte.

Der NDVI aus Sentinel-2-Daten wurde auf einen statistischen Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields, dem NDVI einer GreenSeeker-Messung (21.11.2018), den Pflanzenentwicklungsparametern und dem Kornertrag geprüft. Für die Analysen wurden zwei Se2-Aufnahmen vom 28.11.2018 und 05.12.2018 verwendet, da beide zu Zeitpunkten aufgenommen wurden, an denen die Messungen im Feld vor dem Winter stattfanden, beziehungsweise gerade beendet waren. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regression sind in der Tabelle 7 aufgeführt. Die Kennzeichnung der Stärke des Zusammenhangs erfolgte nach den in Punkt 4.6 festgelegten Grenzen.

Tabelle 7: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen des Sentinel-2-NDVI aus zwei Aufnahmen (28.11.2018; 05.12.2018), der Pflanzenentwicklungsparameter vor dem Winter und des Kornertrags [$t \cdot ha^{-1}$] 2019

	NDVI Se2 28.11.2018 [-]	NDVI Se2 05.12.2018 [-]
	R^2_{lin}	R^2_{lin}
Relative Biomasse-Abweichung [%]	0,39**	0,42**
BBCH [-]	0,31*	0,36**
Bestandesdichte [Pfl. $\cdot m^{-2}$]	0,49**	0,53**
Wurzelhalsdurchmesser [mm]	0,37**	0,47**
Trockenmasse [$g \cdot m^{-2}$]	0,60**	0,66**
Einzelpflanzengewicht [g TM \cdot Pfl. $^{-1}$]	0,48**	0,54**
Kornertrag 2019 [$t \cdot ha^{-1}$]	0,40**	0,45**

[* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$]

Zwischen Talking Fields und dem NDVI beider Satelliten-Aufnahmen bestand ein signifikant linearer Zusammenhang. Dabei konnten 39 % (28.11.2018) und 42 % (05.12.2018) der Varianz der Se2-NDVI-Werte durch die relative Biomasse-Abweichung erklärt werden.

Zwischen allen fünf untersuchten Pflanzenentwicklungsparametern und dem Se2-NDVI beider Satellitenszenen bestand ein signifikanter Zusammenhang. Die Varianz kann insbesondere bei der Trockenmasse erklärt werden. Die Bestimmtheitsmaße der Parameter Se2-NDVI und Trockenmasse betrugen 0,60 (28.11.2018) und 0,66 (05.12.2018).

Der Körnertrag des Winterrapses und die NDVI-Werte der zwei Satelliten-Aufnahmen wiesen einen signifikanten Zusammenhang auf. Das Bestimmtheitsmaß lag zu dem früheren Aufnahmezeitpunkt bei 0,40 und stieg bis zum 05.12.2018 auf 0,45 an.

Die Abbildung 19 zeigt die Entwicklung der Rapspflanzen im Verlauf der Vegetationsperiode anhand des BBCH-Stadiums und der monatlichen Bestimmtheitsmaße, berechnet aus dem Se2-NDVI und Körnertrag des Winterrapses. Mit Hilfe dieser Darstellung soll aufgezeigt werden, ob die Messung des NDVI zu einem bestimmten Entwicklungszeitpunkt erfolgen sollte, um ein besonders hohes Bestimmtheitsmaß des Körnertrags und des Vegetationsindex erzielen zu können.

Das Entwicklungsstadium des Winterrapses wurde im Verlauf des Anbaujahres an sieben Terminen bestimmt und ist für die Darstellung im Diagramm regional zusammengefasst sowie anhand von Symbolen abgebildet worden. Weiterhin wurde für jeden der zwölf Vegetationsmonate eine Sentinel-2-Szene ausgewählt, aus welcher der NDVI für die 18 Messpunkte, nach der in Punkt 3.5.1 beschriebenen Vorgehensweise, extrahiert worden ist. Aus dem gemittelten Se2-NDVI und dem Körnertrag wurden anschließend mit Hilfe des linearen Regressionsmodells die Bestimmtheitsmaße ermittelt.

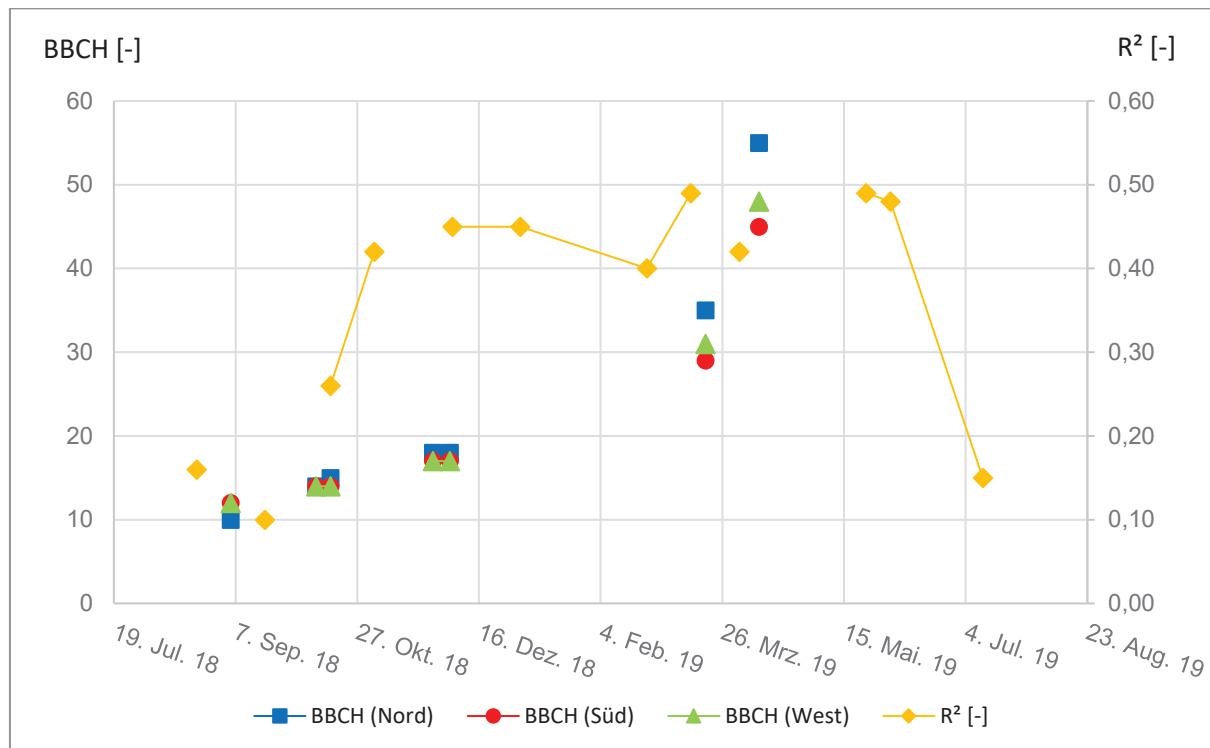


Abbildung 19: Entwicklung des Bestimmtheitsmaßes des Se2-NDVI zu verschiedenen Messzeitpunkten und dem Körnertrag in Kombination mit dem BBCH-Stadium

Anhand der Abbildung 19 ist zu erkennen, dass ein stetiger Anstieg des Entwicklungsstadiums von der Aussaat bis zur Datenerhebung vor dem Winter vorhanden war. In diesem Zeitraum stieg das BBCH-Stadium konstant von circa 10 auf 19 an. Dabei war zwischen den Regionen kein markanter Unterschied bezüglich des Entwicklungsstandes festzustellen. In den Monaten August bis Oktober 2018 schwankte das Bestimmtheitsmaß des NDVI und dem Körnertrag zwischen 0,10 und 0,26. Ab November 2018 stieg das Bestimmtheitsmaß auf 0,42 an und schwankte bis Februar 2019 zwischen 0,40 und 0,45. Im März konnten dann 49 % der Varianz des Körnertrags mit Hilfe des NDVI, welcher im selben Monat gemessen wurde, erklärt werden. Dieser Wert wurde im Verlaufe der Vegetation nicht mehr überschritten. Etwa zum selben Zeitpunkt wurde die Bonitur des Pflanzenentwicklungsstadiums nach Winter durchgeführt. Der Winterraps hatte bis dahin in den Regionen Süd und West das BBCH 30 erreicht. Die Pflanzen in der Region Nord befanden sich zu diesem Zeitpunkt im Durchschnitt bereits im Entwicklungsstadium 35. Die Differenzen in der Pflanzenentwicklung zwischen den Regionen wurden zur letzten Bonitur im April 2019 deutlicher. Der Winterraps hatte in der südlichen und westlichen Region bis dahin das BBCH-Stadium 45 und 48 erreicht, wohingegen sich die Pflanzen in der nördlichen Region im BBCH 55 befanden. In der Zeit zwischen der März- und April-Bonitur sank das Bestimmtheitsmaß auf 0,42. Die Erklärbarkeit der Varianz des Körnertrags durch den Se2-NDVI stieg im Mai 2019 auf 49 % an und erreichte damit erneut das Maximum. Vor der Ernte des Winterrapses im Juli 2019 waren noch 15 % der Varianz des Körnertrags durch den Se2-NDVI erklärbar.

4.3.2 GreenSeeker-Messungen von Winterweizen und Winterraps

Als weitere Datenquellen dienten die verfügbaren Messungen des GreenSeekers aus dem Frühjahr 2017 und Herbst 2018, welche dann mit der prozentualen Biomasseabweichung von Talking Fields, dem Sentinel-2-NDVI verschiedener Aufnahmetermine, ausgewählten Pflanzenentwicklungsparametern und dem Körnertrag des Winterrapses auf einen statistischen Zusammenhang geprüft worden sind. Es ist zu beachten, dass im Anbaujahr 2016/2017 auf dem Untersuchungsschlag Winterweizen angebaut wurde, wodurch der GS-NDVI im Frühjahr 2017 auf diesen bezogen werden muss. Aufgrund des fast zeitgleichen Aufnahmezeitpunktes der Se2-Satellitenaufnahmen und des GreenSeekers im Herbst 2018, sowie bedingt durch die insgesamt begrenzte Anzahl verwendbarer Satellitenbilder, wurden jeweils zwei Szenen aus dem Frühjahr 2017 (15.03.2017 und 28.03.2017) und Herbst 2018 (28.11.2018 und 05.12.2018) ausgewählt. Dadurch sollte aufgezeigt werden, wie sich der statistische Zusammenhang und die Erklärbarkeit der Werte innerhalb eines kurzen Zeitraumes ändern kann. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regression sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Anhand der festgelegten Grenzen (siehe Kap. 4.6) wurde die Stärke der Korrelation der jeweiligen Parameter gekennzeichnet.

*Tabelle 8: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen des GreenSeeker-NDVI [-] (28.04.2017; 21.11.2018) und der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields, des Sentinel-2-NDVI [-] verschiedener Zeitpunkte, ausgewählter Bestandesparameter und des Körnertrags [t*ha⁻¹] 2019*

	NDVI GS 28.04.2017 [-]	NDVI GS 21.11.2018 [-]
	R ² _{lin}	R ² _{lin}
Relative Biomasse-Abweichung [%]	0,31*	0,31*
NDVI Se2 15.03.2017 [-]	0,77**	0,65**
NDVI Se2 28.03.2017 [-]	0,80**	0,64**
NDVI GS 28.04.2017 [-]	---	0,68**
NDVI GS 21.11.2018 [-]	0,68**	---
NDVI Se2 28.11.2018 [-]	0,58**	0,64**
NDVI Se2 05.12.2018 [-]	0,60**	0,66**
Bestandesdichte [Pfl.*m ⁻²]	0,28*	0,26*
Trockenmasse [g*m ⁻²]	0,59**	0,47**
Einzelpflanzengewicht [g TM*Pfl. ⁻¹]	0,60**	0,40**
Körnertrag [t*ha ⁻¹] 2019	0,16 (n.s.)	0,44**

[n.s. p > 0,05; * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01]

Sowohl der NDVI des GreenSeekers aus dem Frühjahr 2017 als auch aus dem Herbst 2018 weisen einen signifikanten Zusammenhang mit der prozentualen Biomasseabweichung nach Talking Fields auf. Die Varianz beider Zusammenhänge ist zu 31 % erklärbar. Anhand einer exemplarischen Grafik lässt sich der Zusammenhang zwischen Talking Fields und dem GreenSeeker-NDVI_{28.04.2017} wie folgt darstellen:

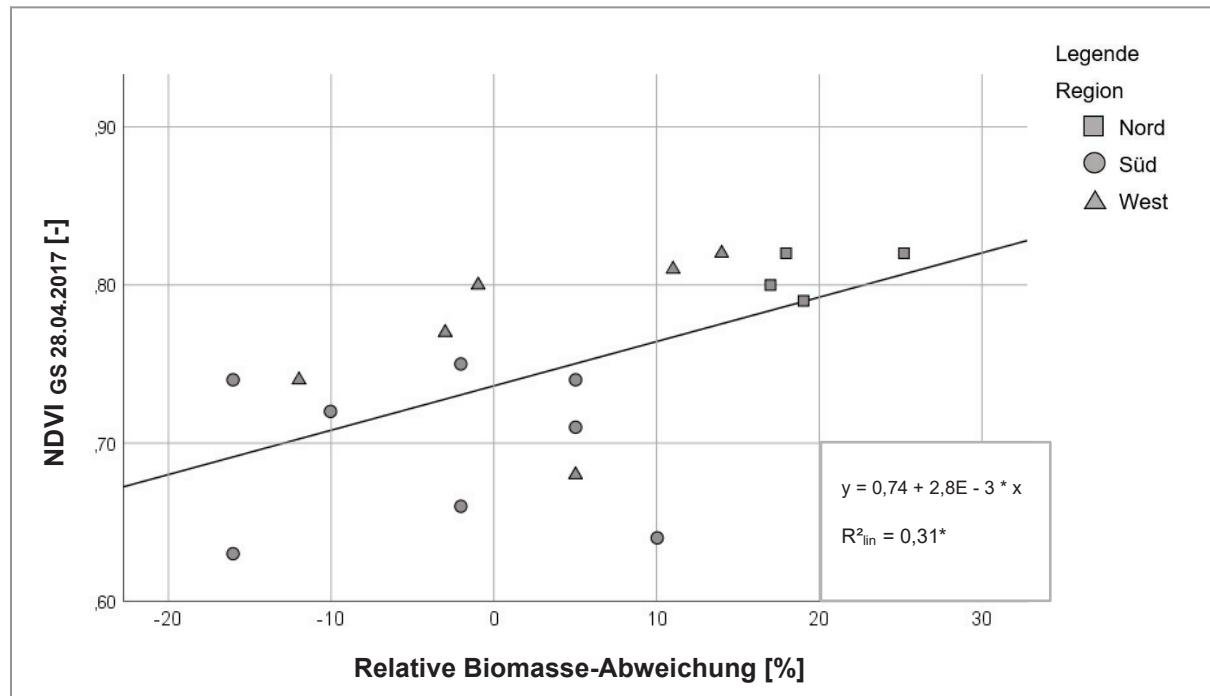


Abbildung 20: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem GreenSeeker-NDVI_{28.04.2017} [-]

Für die meisten Punkte im Streudiagramm (Abb. 20) trifft zu, dass einem höheren TF-Wert auch gleichzeitig ein höherer gemessener NDVI entsprach, der im Frühjahr 2017 im Winterweizen gemessen wurde. An einigen Messpunkten, die nach Talking Fields eine höhere negative Abweichung der Biomasse erwarten ließen, konnten jedoch zu diesem Zeitpunkt ähnlich hohe NDVI-Werte zwischen 0,70 und 0,80 aufweisen. Die regionale Zuordnung der Punkte deutete auf keinen spezifischen Zusammenhang dieser hin.

Zwischen dem GS-NDVI_{28.04.2017} und dem NDVI der Sentinel-2-Aufnahmen vom 15.03.2017 und 28.03.2017 konnte ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Die Bestimmtheitsmaße betrugen 0,77 und 0,80. Auch zwischen den Se2-NDVI-Werten und dem GS-NDVI_{21.11.2018} wurde ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen. Durch die GreenSeeker-Messung aus dem Herbst 2018 konnten 65 und 64 % der Varianz der Se2-NDVI-Werte erklärt werden.

Der Zusammenhang zwischen dem NDVI der GreenSeeker-Messungen des Winterweizens im Frühjahr 2017 und des Winterrapses im Herbst 2018 selbst war signifikant. Die Varianz der NDVI-Werte war dabei zu 68 % erklärbar.

Zwischen dem Se2-NDVI der beiden Satellitenszenen (28.11.2018; 05.12.2018), die zum Zeitpunkt der Herbstbonitur aufgenommen wurden, und den NDVI-Werten der GS-Messungen 2017 und 2018, bestanden signifikante Zusammenhänge. Die Varianzen der Se2-NDVI-Werte waren zu 58 % und 60 % durch den GS-NDVI_{28.04.2017} erklärbar.

Die Bestimmtheitsmaße der Satellitenszenen und der GS-Messung im Herbst 2018 lagen bei 0,64 und 0,66. In der Abbildung 21 ist der statistische Zusammenhang zwischen dem Se2-NDVI_{28.11.2018} und dem GS-NDVI_{21.11.2018}, welche im Winterraps gemessen worden sind, in einem Streudiagramm dargestellt.

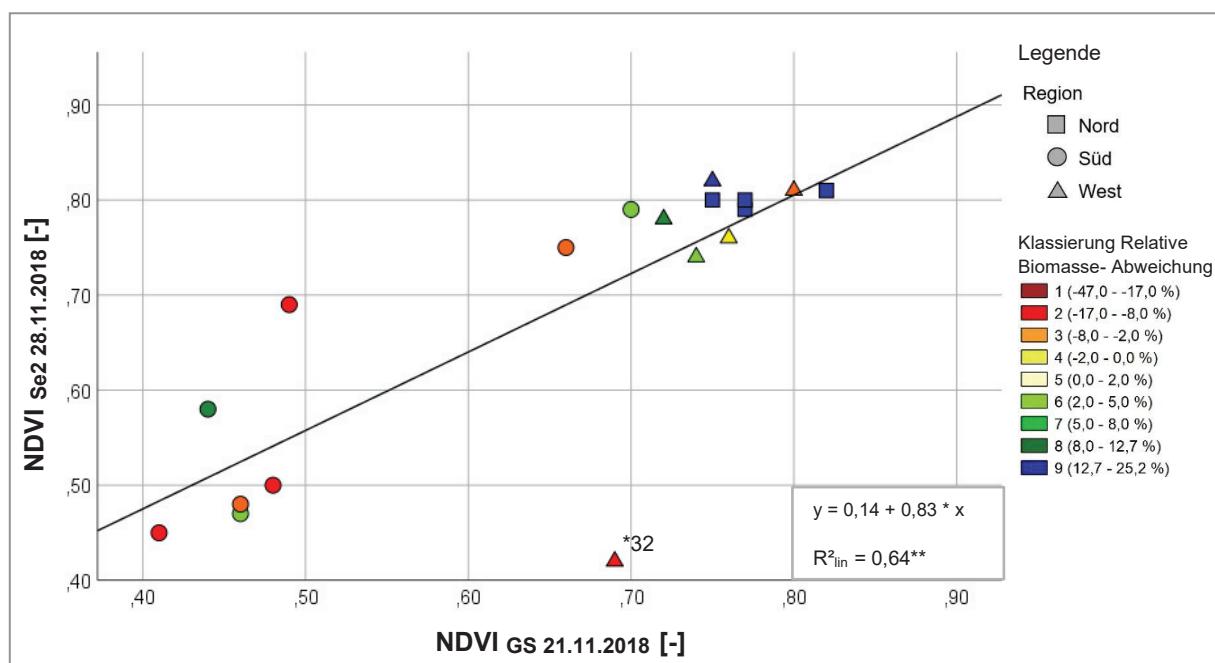


Abbildung 21: Statistischer Zusammenhang zwischen dem GreenSeeker-NDVI_{21.11.2018} [-] und dem Sentinel-2-NDVI_{28.11.2018} [-] und Einfärbung anhand der relativen Biomasse-Abweichung [-] nach Talking Fields

Anhand des Diagramms ist insgesamt der statistische signifikante Zusammenhang des GS-NDVI und Se2-NDVI erkennbar. Anzumerken ist, dass durch die GS-Messung eine stärkere Differenzierung des NDVI, gerade bei höheren Indexwerten (> 0,70), festgestellt werden konnte als durch Se2. Für sechs Messpunkte der Region Süd wurde über die Se2-Aufnahme ein weitaus höherer NDVI ermittelt als durch die GS-Messung eine Woche zuvor (21.11.2018). Das Modell zeigt einen Punkt (*32), für welchen durch Sentinel-2 und den GreenSeeker sehr unterschiedliche NDVI-Werte festgestellt wurden. Für den Punkt 32 wurde durch den GS ein NDVI von circa 0,70 gemessen, wohingegen sieben Tage danach durch die

Sentinel-Aufnahme ein Indexwert von etwa 0,40 ermittelt wurde. Wird dieser Punkt für das statistische Modell ausgeschlossen, können bereits 86 % der Varianz des Se2-NDVI durch den GS-NDVI erklärt werden. Dieses Bestimmtheitsmaß kann als hoch eingestuft werden. Die Gleichung der linearen Regressionsgeraden lautete nach Ausschluss dieses Messpunktes: $y = 0,14 + 0,86 * x$. An den Punkten mit der höchsten positiven Biomasse-Abweichung nach Talking Fields (Klasse 9) wurde insgesamt auch ein höherer NDVI (circa 0,80) sowohl durch den GS als auch Se2 gemessen. An Punkten mit der niedrigsten Klasse 2 wurden durch den GS und Se2 im Herbst dagegen sehr unterschiedliche Indexwerte festgestellt.

Es bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Bestandesdichte des Winterrapses und dem NDVI, gemessen durch den GreenSeeker im Frühjahr 2017 und Herbst 2018. Die Bestimmtheitsmaße lagen bei 0,28 und 0,26.

Zwischen beiden GS-NDVI und der TM konnte jeweils ein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Dabei waren 59 % und 47 % der Varianz der TM anhand des GS-NDVI erklärbar.

Statistisch betrachtet, bestand zwischen dem Einzelpflanzengewicht und dem GS-NDVI beider Aufnahmetermine ein signifikanter Zusammenhang. Dabei konnten 60 % der Varianz des Einzelpflanzengewichts mit dem GS-NDVI_{28.04.2017} erklärt werden. Dagegen lag das Bestimmtheitsmaß des Pflanzenentwicklungsparameters und dem GS-NDVI_{21.11.2018} bei 0,40.

Zwischen dem Kornertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019 und dem GS-NDVI, gemessen im Frühjahr 2017, konnte kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. 16 % der Varianz des Ertrags konnten anhand dieses GreenSeeker-NDVIs erklärt werden. Zwischen dem Kornertrag und dem GS-NDVI_{21.11.2018} bestand dagegen ein signifikanter Zusammenhang. Die Varianz des Ertrags konnte zu 44 % erklärt werden.

4.3.3 Relativvertragskarten

Die Relativverträge aus den Verrechnungszeiträumen 2003 bis 2012 (1. Dekade) und 2006 bis 2015 (2. Dekade) wurden auf einen statistischen Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields, dem GreenSeeker-NDVI_{21.11.2018} und Sentinel-2-NDVI verschiedener Satellitenaufnahmen, ausgewählten Pflanzenentwicklungsparametern und dem Kornertrag des Winterrapses geprüft. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regression sind in der Tabelle 9 zusammengefasst. Die Stärke des linearen Zusammenhangs wurde nach den in Punkt 3.6 beschriebenen Grenzen gekennzeichnet.

Tabelle 9: Bestimmtheitsmaße und Signifikanzen der Relativverträge [%] der Dekaden 2003-2012 und 2006-2015 und der relativen Biomasseabweichung [%] nach Talking Fields, des GreenSeeker-NDVI_{21.11.2018} [-] und des Sentinel-2-NDVI [-] verschiedener Satellitenszenen, ausgewählter Pflanzenentwicklungsparameter und des Körnertrags [$t \cdot ha^{-1}$] 2019

	Relativvertrag 2003-2012 [%]	Relativvertrag 2006-2015 [%]
	R^2_{lin}	R^2_{lin}
Relative Biomasse-Abweichung [%]	0,38**	0,45**
NDVI GS 21.11.2018 [-]	0,46**	0,63**
NDVI Se2 05.12.2018 [-]	0,46**	0,60**
NDVI Se2 03.06.2019 [-]	0,32**	0,41**
Bestandesdichte [$Pfl. \cdot m^{-2}$]	0,10 (n.s.)	0,10 (n.s.)
Trockenmasse [$g \cdot m^{-2}$]	0,18 (n.s.)	0,32*
Einzelpflanzengewicht [$g \cdot TM \cdot Pfl.^{-1}$]	0,14 (n.s.)	0,30*
Körnertrag [$t \cdot ha^{-1}$] 2019	0,19 (n.s.)	0,19 (n.s.)

[n.s. $p > 0,05$; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$]

Zunächst wurde der statistische Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields und dem Relativvertrag der ersten und zweiten Dekade exemplarisch in den Abbildungen 22 und 23 in Form von Streudiagrammen dargestellt.

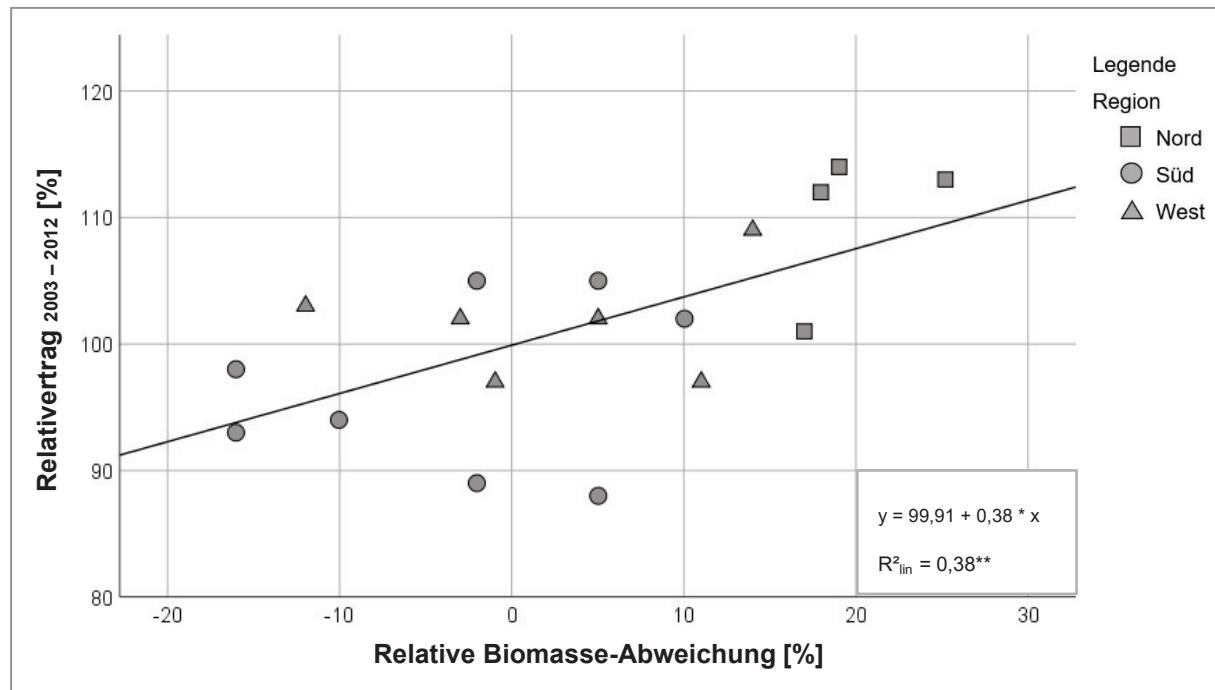


Abbildung 22: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Relativvertrag_{2003 - 2012} [%]

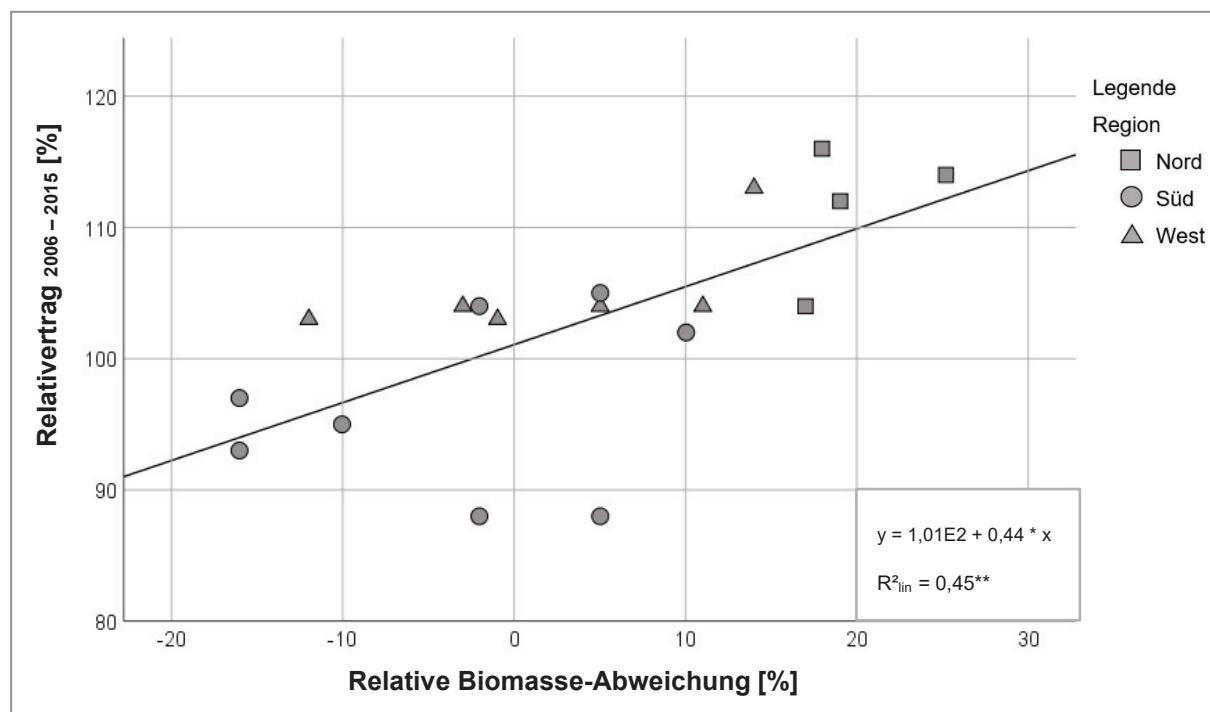


Abbildung 23: Statistischer Zusammenhang zwischen der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields und dem Relativvertrag_{2006 - 2015} [%]

Es ist zu erkennen, dass die prozentualen Relativverträge beider Dekaden einen signifikanten Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields aufweisen. Dabei konnten 38 % der Varianz des Relativvertrags_{2003 - 2012} und 45 % der Varianz des Relativvertrags der zweiten Dekade durch Talking Fields erklärt werden. Für die meisten Punkte der Region Nord und Süd trifft die Aussage zu, dass der Relativvertrag von der ersten zur zweiten Dekade weitestgehend konstant geblieben ist. Dagegen sind Veränderungen des Relativvertrags zur zweiten Dekade, insbesondere an den Punkten der westlichen Proberegion, vorhanden gewesen. An den meisten der Punkte dieser Region konnte eine Erhöhung des Relativvertrags_{2006 - 2015} festgestellt werden.

Der GS-NDVI der Messung aus dem Herbst 2018 und die RE beider Dekaden wiesen einen signifikanten Zusammenhang auf. Dabei ließen sich 46 % der Varianz des GS-NDVI mit dem RE der ersten Dekade und 63 % mit dem RE der zweiten Dekade erklären.

Zwischen dem Se2-NDVI, gemessen Anfang Dezember 2018, und den Relativverträgen lag ein signifikanter Zusammenhang vor. Das Bestimmtheitsmaß des Relativvertrags der ersten Dekade lag bei 0,46 und im zweiten Verrechnungszeitraum bei 0,60.

Bei Prüfung des statistischen Zusammenhangs zwischen dem Se2-NDVI, der am 03.06.2019 gemessen worden ist, und den Relativverträgen der Dekaden konnte ebenfalls ein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Dabei konnten 32 % ($RE_{2003 - 2012}$) und 41 % ($RE_{2006 - 2015}$) der Varianz des Se2-NDVI anhand der Relativverträge erklärt werden. Damit war

im Frühsommer zwischen diesen beiden Parametern eine 20 % geringe Erklärbarkeit der Varianz des NDVI vorhanden, als zur Zeit der Datenerhebungen im Herbst.

Es konnte zwischen der Bestandesdichte und den Relativverträgen beider Dekaden kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regression lagen bei 0,10.

Zwischen dem Relativvertrag_{2003 - 2012} und der Trockenmasse bestand kein signifikanter Zusammenhang. Das Bestimmtheitsmaß lag auf dem Niveau von 0,18. Dagegen wies der Relativvertrag_{2006 - 2015} einen signifikanten Zusammenhang mit der Trockenmasse auf. Dabei waren 32 % der Varianz der Trockenmasse mit Hilfe des Relativvertrags erklärbar.

Ähnlich wie bei der Trockenmasse, konnte auch zwischen Relativvertrag der ersten Dekade und dem Einzelpflanzengewicht kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Das Bestimmtheitsmaß betrug 0,14. Im Gegensatz dazu konnten bereits 30 % der Varianz des Einzelpflanzengewichts anhand des Relativvertrags 2006 - 2015 erklärt werden. Der Zusammenhang war signifikant.

Zwischen den RE beider Dekaden und dem Körnertrag des Winterrapses konnte kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Die Varianz der Körnerträge konnte zu 19 % durch die Relativverträge erklärt werden.

4.4 Satellitendaten in der praktischen Landwirtschaft - Erfahrungsberichte

Über den Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit kam es im Rahmen der Datensammlung und praktischen Arbeit zum Austausch von Informationen, Erfahrungen und Meinungen mit Landwirten, die mit Satellitendaten und daraus entwickelten Produkten wie Applikationskarten diverser Fachnutzer arbeiten und diese für den Standort-anangepassten Pflanzenbau nutzen möchten. Im Zuge des Informationsaustausches wurden auch Probleme genannt, welche die Anwendung von externen Geodatenquellen mit sich bringt. Um einen gezielteren Einblick in die praktische Arbeit von Landwirten mit Satellitendaten und online erstellten Produkten von Fachnutzern zu erhalten, wurden diese persönlichen Erfahrungen als zusätzliche Informationsquelle genutzt. Die in Einzel- oder kleinen Gruppengesprächen gewonnenen Erkenntnisse werden nachfolgend resümiert. Diese sollen der Interpretation und Bewertung der formulierten Zielstellungen dieser Arbeit dienen, aber auch eine Zusammenfassung der aktuellen Situation in der Praxis darstellen.

Die Informationsbeschaffung fand mündlich oder schriftlich, zumeist spontan, in Form eines freien Interviews statt. Die Qualifikationen einer Person für das Interview lag darin, dass diese mit Satellitendaten arbeitet oder ein grundlegendes Interesse dafür besitzt. So wurden Gespräche in verschiedenen Berufszweigen der Landwirtschaft geführt. Für das Interview wurde kein Katalog mit expliziert formulierten Fragen festgelegt, sondern das Gespräch über

ähnliche Themenbereiche auf das Untersuchungsziel hingeleitet. Das Ziel der freien Interviews war es, ein Gespräch über spezielle Themen zu führen, den Austausch aber offen und flexibel zu gestalten, um realistische Bewertungen der Befragten zu bekommen. Damit sollte der Forschungsarbeit weiterführender praktischer Bezug verschafft werden. Ein Überblick über die Themengebiete und Fragen, die besprochen worden sind und so oder in ähnlicher Form und Umfang gestellt wurden, sind im Anhang A-6 zu finden.

Die Motivation, warum Satellitendaten und von externen Anbietern generierte Produkte genutzt werden, sind sehr individuell. Gewisse Gründe und Faktoren stimmen aber grundlegend überein, wiederholen sich und können daher zusammengefasst werden.

Die Nutzung von Satellitendaten stellt für die meisten der Befragten den Einstieg in den Standort-spezifischen Pflanzenbau dar, welcher über externe Datenquellen umgesetzt werden soll. Mit der Anwendung möchten viele eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der eigenen Anbaustrategie nutzen. In den wenigsten Fällen wird jedoch eine Umstrukturierung der gesamten betrieblichen Anbaustrategie angestrebt. Zumeist geht es nur um ausgewählte Ackerschläge, auf welchen einheitliche Anbauverfahren nicht den gewünschten Erfolg gezeigt haben, die Alternativen ausgeschöpft sind und aufgrund ihrer Heterogenität jedoch nach einer angepassten Strategie verlangen. So besteht der eigentliche Nutzungsgrund für Satellitendaten und daraus erstellbaren Applikationskarten anfangs oftmals in dem reinen Interesse daran. Dieses wird zumeist durch Fachmessen und Informationsveranstaltungen sowie den Erfahrungsaustausch mit Berufskollegen geweckt und gesteigert.

Der visuelle Erkenntniszuwachs, gerade anhand von Satellitendaten, stellt den insgesamt am häufigsten genannten Motivationsfaktor dar. Dieser Grund für die Nutzung von externen Geodaten steht für die Befragten zumeist direkt am Anfang und lässt sich laut Aussagen auch verhältnismäßig einfach und schnell realisieren. Gewünscht wird dabei ein ganzheitlicher Überblick über ausgewählte Ackerschläge und das zu einem möglichst beliebigen Zeitpunkt in der Vegetationsperiode. Können neue Informationen anhand von Fernerkundungsdaten oder auch Übersichtskarten gewonnen werden, so wurde dies mehrmals bereits als Erfolg beschrieben.

Die Motivation über den Erkenntniszuwachs hinaus praxistaugliche Applikationsmaßnahmen zu entwickeln, war eher bei den Nutzern der Fall, die sich bereits über einen längeren Zeitraum mit Fernerkundung und dem Standort-spezifischen Pflanzenbau beschäftigen. Wie auch von GRENZDÖRFFER und BILL (2001) beschrieben, sollen die Daten in der Regel dann zur Teilflächen-spezifischen Grund- und Stickstoffdüngung angewendet werden. Ein nicht unerheblicher Motivationsfaktor besteht in der Einsparung von Kosten. Dieser steht jedoch zumeist am Ende einer ganzen Prozesskette und wird als hochgestecktes und nur langfristig erreichbares Ziel angesehen.

Ein weiterer genannter Grund warum, Kartenmodelle und Produkte von externen Dienstleistungsunternehmen genutzt werden, ist die Hoffnung der Anwender, dadurch einen Teil der Arbeit abgeben und ein gewisses Maß an Entlastung erzielen zu können.

Mit der Nutzung von Satellitendaten und deren Verarbeitung in Kartenmodellen von Online-Anbietern ergeben sich auch Anforderungen und Probleme, welche die Grenzen des Einsatzes von solchen Geodaten verdeutlichen. Im Zuge der Gespräche und der Arbeit mit Satellitendaten und der Talking Fields Basiskarte wurden wiederholt bestimmte Problemfelder benannt.

Werden gerade Satellitendaten selbständig genutzt und weiterverarbeitet, stellt sich insbesondere am Anfang das Problem, dass der Anwender nicht einschätzen kann, welche Daten insgesamt benötigt werden, um das angestrebte Ziel zu erreichen. Die Nutzung und Verarbeitung von Satellitendaten als zusätzliche Informationsquelle erfordert, neben der Zeit, auch einen entsprechenden Kenntnisstand im Umgang mit Geoinformationssoftwares. Beide Faktoren sind jedoch oftmals nicht ausreichend vorhanden oder lassen sich nicht ohne weiteres in den Betriebsalltag integrieren, sodass insbesondere der Einstieg einen langwierigen Entwicklungsprozess darstellt.

Mit der eigenständigen Verarbeitung von Satellitendaten geht laut Anwendern außerdem das Problem einher, dass große Datenmengen anfallen und diese oftmals nicht eindeutig zu überblicken wären, sodass eine Unterscheidung nach Wichtigkeit und Nützlichkeit der Daten oftmals schwierig sei. Damit wird auch das insgesamt am häufigsten genannte Problem angedeutet - die Dateninterpretation.

Es wurde vermehrt die Aussage getroffen, dass weder die Zeit noch Kompetenz vorhanden ist, um nützliche Informationen aus Satellitenbildern oder auch, beispielsweise sogenannten Zonenkarten von externen Unternehmen, zuverlässig zu extrahieren und interpretieren zu können. Daraus würde sich ein Informationsverlust ergeben und die praktische Umsetzung und damit eine potentielle Verbesserung der Anbaustrategie könnte kurzfristig nicht realisiert werden.

Nicht jedes Produkt oder Kartenmodell ist für jedes Ziel geeignet und muss daher an die Wünsche und Voraussetzungen angepasst und ausgewählt werden. Es wurde vermehrt kritisiert, dass Unternehmen online zwar eine Vielzahl von Kartenmodellen und Anwendertools anbieten, jedoch bestünde oftmals auch eine gewisse Unsicherheit, welches Produkt überhaupt geeignet ist, um es für das gewünschte Vorhaben auf einem spezifischen Ackerschlag anzuwenden. Damit geht auch die Problematik einher, dass online zur Verfügung gestellte Daten und Produkte aus Satelliteninformationen in der Regel keine Beratung oder konkrete Erläuterung des spezifischen Produktes beinhalten und eher selten ein Austausch zwischen dem Anwender und Anbieter erfolgt.

Eine entsprechende Genauigkeit und flexible Verfügbarkeit von Daten und Kartenmodellen wird für einen schnellen und zuverlässigen Einsatz von dem Anwender grundlegend vorausgesetzt. Da mit Hilfe von online erstellten Karten auch eine gewisse Arbeitsentlastung stattfinden soll, sollten die Karten so zuverlässig sein, dass keine zusätzliche Überprüfung der Genauigkeit etwa durch Boden- oder Pflanzenproben durchgeführt werden muss.

Ein Punkt, der ebenfalls vermehrt angemerkt worden ist, besteht darin, dass Satellitendaten oder Applikationskarten ohne den Landwirt unbrauchbar sind. Nur er könnte durch seine Ackerschlag-spezifischen Kenntnisse hinterfragen und einschätzen, was mögliche Gründe für die vorgeschlagene Applikationsstrategie sind, ob diese überhaupt sinnvoll ist und umgesetzt werden kann. Die meisten Befragten geben an, dass gerade Applikationskarten nicht ohne vorher hinterfragt worden zu sein, angewendet werden sollten.

5 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst, anhand von Angaben in der Literatur verglichen und bewertet. Mit Hilfe dieser Ergebnisauswertung soll die Beantwortung der Forschungsfragen im nachfolgenden Kapitel 6 möglich sein.

5.1 Entwicklung des Winterrapses vor Winter

Zur Bestimmung des Pflanzenentwicklungsstandes des Winterrapses vor dem Winter, wurden in Anlehnung an die Empfehlungen von BROCKERHOFF (2016) und DIEPENBROCK et al. (2016) die Bestandesparameter BBCH-Stadium, Bestandesdichte, Wurzelhalsdurchmesser, Trockenmasse und Einzelpflanzengewicht zu verschiedenen Zeitpunkten im Anbaujahr 2018/2019 auf dem Untersuchungsschlag ermittelt. Die Ergebnisse der Datenerhebung vor dem Winter sollten außerdem genutzt werden, um im Verlauf zu prüfen, ob diese einen Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields, dem Körnertrag, dem Sentinel-2- und GreenSeeker-NDVI sowie den Relativverträgen aufweisen und ob mit Hilfe dieser Referenzdatenquellen Rückschlüsse auf die Entwicklung der Rapspflanzen gezogen werden können.

Feldaufgang- und Jungpflanzenbonitur

Anhand der ersten Feldbonitur Anfang September 2018 und den aufgezeichneten visuellen Eindrücken konnten große Unterschiede zwischen den Regionen und einzelnen Messpunkten bezüglich des Feldaufgangs festgestellt werden (Vgl. A-3). So wurden punktuell Pflanzen boniert, die bereits das BBCH 12 erreicht hatten, wohingegen in einigen Bereichen des Ackerschlags noch keine Rapspflanzen aufgelaufen waren. Diese Gegebenheiten waren insbesondere in der Region Süd sehr ausgeprägt vorhanden.

Eine mögliche Ursache für den verzögerten Feldaufgang und stark differenzierte Entwicklung der Jungpflanzen könnten die vorangegangenen und um die Aussaat herum aufgezeichneten Witterungsverhältnisse gewesen sein. Die Folgen der langanhaltenden Trockenheit und hohen Temperaturen im Erntejahr 2017/2018 waren Ernteverluste in allen Feldkulturen und Grasbeständen sowie ein enormer Rückstand in der Wasserbilanz, welcher auch in der vergangenen Vegetationsperiode nicht aufgeholt werden konnte. Allein Ende Juli 2018 fehlten über 230 mm Niederschlag für eine ausgeglichene Wasserbilanz im Boden (HEILMANN et al. 2018; OSOL 2019; STATISTISCHES AMT M-V 2019). Geringe Niederschlagsmengen und hohe Lufttemperaturen um den Aussaattermin im August und September 2018 haben wahrscheinlich noch verstärkend zu einem verzögerten Auflaufen der Pflanzen geführt.

Weiterhin ist anzumerken, dass der Strohanteil an der Bodenoberfläche und der Anteil von Ausfallgetreide geschätzt worden ist. Der Strohanteil lag in der Region Süd punktuell bei bis zu 20 % (Vgl. A-5). So kann argumentiert werden, dass die Strohauflage das Durchdringen der Raps-pflanzen an diesen Stellen erschwert hat und auch einen Teil des Niederschlags gebunden haben könnte, sodass dieser nicht in vollem Umfang für die Keimung verfügbar gewesen war. Für ein gleichmäßiges Auflaufen der Pflanzen und zur besseren Bestandesetablierung sollte nach DIEPENBROCK et al. (2016) eine gleichmäßige Verteilung und Einarbeitung des kurzgehäckselten Strohs erfolgen. Zu diesem Zeitpunkt wurde Ausfallgetreide zumeist in streifenförmigen Abschnitten festgestellt. Dies könnte unter anderem auch zu einer interspezifischen Konkurrenz mit dem Winterraps um die Faktoren Wasser, Nährstoffe und Standraum sowie folglich zu einem verzögerten Feldaufgang geführt haben.

Datenerhebung vor dem Winter

Die Ergebnisse der Bonitur der Bestandesentwicklung vor dem Winter wurden in der Tabelle 3 zusammengefasst. Insgesamt hatte der Winterrapsbestand vor dem Winter im Mittel nicht den Entwicklungsstand erreicht, welcher durch BROCKERHOFF (2016) und DIEPENBROCK et al. (2016) empfohlen wird. Dabei konnten teilweise erhebliche Differenzen zwischen den beprobten Regionen und einzelnen Messpunkten, insbesondere in Bezug auf die TM und den WHD festgestellt werden. Es konnte ermittelt werden, dass Rapspflanzen mit einem größeren WHD tendenziell auch ein höheres Einzelpflanzengewicht aufwiesen. Der Entwicklungsrückstand des Rapses war in der Region Süd insgesamt am stärksten ausgeprägt. Bei genauerer Ergebnisbetrachtung kristallisierten sich die Punkte 22 und 32 heraus, welche gegenüber den anderen Messpunkten sehr schwach entwickelt waren. Der Region Süd sowie den eben genannten Punkten wird auch durch TF eine höhere negative Biomasse-Abweichung zugeordnet. Die starken Schwankungen des Pflanzenentwicklungsstandes zwischen den Messpunkten bestätigen damit die Variabilität, welche zu der ersten Pflanzenbonitur festgestellt worden ist. Die an dem Punkt 32 erhöhte Saatstärke war anhand der Bestandesparameter, insbesondere der Bestandesdichte, im Herbst nicht nachvollziehbar. Aus diesem Grund kann eine dadurch potentiell positive oder negative Beeinflussung der Bestandesparameter an diesem Punkt nicht eindeutig benannt werden.

Der Entwicklungsrückstand des Winterrapses auf dem Untersuchungsschlag könnte durch Sorten-bedingte Eigenschaften beeinflusst worden sein. Die Hybridsorte „ExLibris“ zeichnet sich laut DEKALB (2019) unter anderem durch eine verhaltende Vorwinterentwicklung aus, wodurch ein Überwachsen des Bestandes verhindert werden soll. Diese Eigenschaft könnte auch zu diesem schwächeren Entwicklungsstand geführt haben. Augenscheinlich waren keine Anzeichen des Überwachsens feststellbar, jedoch bestanden Bedenken, dass schwach entwickelte Einzelpflanzen bei auftretenden Kahlfrösten im Winter abfrieren könnten.

In diesem Versuch wurde festgestellt, dass anhand der relativen Biomasse-Abweichung Rückschlüsse auf fast alle Pflanzenentwicklungsparameter möglich waren, die im Herbst gemessen worden sind. Insgesamt konnte zwischen der relativen Biomasse-Abweichung nach TF und den Pflanzentwicklungsparametern BBCH-Stadium, Trockenmasse, Einzelpflanzengewicht und Wurzelhalsdurchmesser ein signifikanter Zusammenhang ermittelt werden, welcher besonders bei der Trockenmasse und dem Einzelpflanzengewicht in einem verhältnismäßig hohen Maße erklärt werden konnte. Einzig die Varianz Bestandesdichte konnte nicht anhand der relativen Biomasse-Abweichung nachvollzogen werden. So bestätigt das vergleichsweise hohe Bestimmtheitsmaß der Trockenmasse und Biomasse-Abweichung zunächst prinzipiell die Erwartungen, dass anhand der Talking Fields Basiskarte auch grundlegend Aussagen über das Standort-spezifische Biomasse-Potential von Witerraps möglich sind. Da die Trockenmasse die Bezugsgröße der Biomasse darstellt, stehen beide Parameter in einem direkten Verhältnis zueinander. Aus diesem Grund wäre auch eine noch höhere Erklärbarkeit des Zusammenhangs zu vermuten gewesen. Es ist zu beachten, dass über 40 % der Varianz der Trockenmasse nicht anhand der relativen Biomasse-Abweichung erklärt werden können. Wird die Variabilität der Trockenmasse an den Messpunkten anhand des relativen Biomasse-Potentials von TF beurteilt (Abb. 8), werden die teilweise erheblichen Differenzen zwischen der vorhergesagten Biomasse und der tatsächlich festgestellten Trockenmasse deutlich. Daraus resultiert, dass die relative Biomasse-Abweichung tatsächlich nur bedingt dafür geeignet ist, sichere Rückschlüsse auf die Trockenmasse zu ziehen.

Eine Verzerrung der Ergebnisse der Pflanzenbonitur vor dem Winter und damit der statistischen Analyseergebnisse könnte durch die Beprobungsstrategie verursacht worden sein. Es ist anzumerken, dass während der Bonitur im Herbst Pflanzen, die als Ausfallraps gelten, nicht gesondert gezählt oder beurteilt worden sind. Dies war zum einen nicht möglich, da die Pflanzen optisch nicht zu unterscheiden waren. Zum anderen waren zu diesem Zeitpunkt die Drillreihen auf dem Ackerschlag, aufgrund der fortgeschrittenen Entwicklung des Witerrapses in Höhe und Breite, nicht mehr eindeutig identifizierbar, sodass Rapspflanzen außerhalb der Drillreihe hätten ausgeschlossen werden können. Darüber hinaus erfolgte die Auswahl der beprobten Wiederholungen nach einem stark subjektiven Prinzip, was auf der individuellen Wahrnehmung und Einschätzung der Punktumgebung beruht. Auch fehlerhafte Messungen, Wiegungen und Aufzeichnungen müssen als potentielle Fehlerquellen genannt werden. VOß (2005) benennt außerdem die anschließende Interpolation der erhobenen Daten auf die gesamte Fläche als problematisch. Dadurch könnte nicht zwangsläufig die Variabilität eines gesamten Ackerschlages wiedergespiegelt werden und dieses Verfahren würde langfristig Ungenauigkeiten in der Datenstruktur hervorrufen. Dieser Aussage kann insofern

zugestimmt werden, dass Datenerhebungen im Feld nur einen Bruchteil der Schlagspezifischen Heterogenität abbilden. Trotzdem stellten sich die durchgeführten Feldbegehungen und Datenerhebungen insgesamt als unerlässlich heraus, um die Entwicklungssituation der Rapspflanzen am Boden zu einem festen Zeitpunkt beurteilen zu können.

5.2 Körnertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019

Der Ertrag einer Ackerkultur stellt im landwirtschaftlichen Pflanzenbau eine der wichtigsten Zielkomponenten dar. Aus diesem Grund wurden die relative Biomasse-Abweichung von Talking Fields und die bonierten Pflanzentwicklungsparameter des Rapses vor Winter genutzt, um zu prüfen, ob durch diese auch Aussage über das Ertragspotential an den Messpunkten getroffen werden kann. Zur Auswertung wurde die Ertragskarte mit den bereinigten Ertragsrohdaten des Winterrapses aus dem Anbaujahr 2018/2019 verwendet, welche Aufschluss über die Ertragsstruktur des gesamten Untersuchungsschlages und den spezifischen Körnertrag an den festgelegten Messpunkten geben.

Körnertrag und relative Biomasse-Abweichung

Es konnte festgestellt werden, dass die prozentuale Biomasse-Abweichung nach Talking Fields sich in diesem Versuch nicht dazu eignete, auf den Körnertrag des Winterrapses an den 18 Messpunkten zu schließen. Insgesamt war in dieser Arbeit kein anderer der untersuchten Parameter in so geringem Maße mit Talking Fields in Verbindung zu bringen, wie der Körnertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019.

Laut der Basiskarte mit der relativen Biomasse-Abweichung wurde dem Untersuchungsfeld ein stark inhomogenes Biomasse-Potential zugeordnet. Auch die Ertragsstruktur des Winterrapses auf dem Untersuchungsschlag kann laut Ertragskarte insgesamt als inhomogen beschrieben werden. Im Mittel wurde auf dem Ackerschlag im Anbaujahr 2018/2019 ein Körnertrag von $3,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ erreicht, welcher damit genau im bundesweiten Durchschnitt liegt (STATISTISCHES AMT M-V 2019). Aufgrund der Produktbeschreibung der Basiskarte durch Talking Fields (TALKING FIELDS 2019) wäre zu erwarten gewesen, dass ein Standort auf dem Untersuchungsschlag mit einer positiven Biomasse-Abweichung vom Schlagmittelwert, auch eine vergleichsweise höhere Standortqualität besitzt und damit auch das Potential hat, einen höheren Ertrag zu erzielen. Werden die TF Basiskarte und die Ertragskarte nur auf Basis von Zonierungen verglichen, zeigt sich, dass die Basiskarte die letztendliche Ertragsstruktur nur unzureichend abbilden konnte. Beispielhaft dafür ist der Hochertragsbereich in der Mitte des Ackerschlages, welcher deutlich durch die Ertragsstruktur der Ertragskarte gezeigt und rein optisch als „grünes Band“ beschrieben wurde.

Ein Grund für die starke Kontroversität der beiden Kartenmodelle könnte die Verwendung der unterschiedlichen Parameter Kornertrag und Biomasse sein. Es ist zu beachten, dass die TF Basiskarte keine Ertragspotentialkarte darstellt. Die durch die Pflanzen gebildete oberirdische Biomasse, unter welcher die „Biomasse-Abweichung“ nach Talking Fields verstanden wurde, ist nicht mit dem Ertrag gleichzusetzen. Die gebildete Biomasse stellt jedoch eine wichtige Voraussetzung für das Ertragspotential dar (HERBOLD 2015). Der Kornertrag von Winterraps wird durch viele unterschiedliche ertragsbildende Faktoren bestimmt und ist das Produkt von diversen exogenen Einflüssen über die gesamte Vegetationsperiode hinweg (DIEPENBROCK et al. 2016). Die oberirdische Biomasse wird mit allen sich über dem Erdboden befindenden Pflanzenorganen definiert. Damit kann anhand der Biomasse abgeleitet werden, wie hoch die potentielle Photosyntheseleistung der grünen Pflanzenteile, insbesondere der Blätter ist, um ausreichend Assimilate zu bilden, welche über den Biomasse-Zuwachs hinausgehen und im Verlaufe der aufbauenden und reduzierenden Entwicklungsprozesse des Winterrapses zur Ausbildung der Ertragsorgane verwendet werden können (COMBERG 2014; ERASMI 2002; GEISLER 1988). Aufgrund dieses Zusammenhangs wäre somit zu erwarten gewesen, dass Rückschlüsse auf den Ertrag, selbst nur in geringem Maße, anhand der relativen Biomasse-Abweichung möglich sein müssten.

Die letztendliche Ertragsstruktur mit dem Hochertragsareal in der Mitte des Feldes wurde ebenfalls durch DIENST (2018) festgestellt. Auch die Feldfrucht Winterweizen wies im Anbaujahr 2016/2017 die höchsten Erträge in diesem Bereich auf. Aufgrund dieser Feststellungen kann vermutet werden, dass die Ertragsstruktur auf dem Untersuchungsschlag auch durch die Verhältnisse des Bodens und dessen Eigenschaften erklärt werden könnte.

Wasser und dessen Verfügbarkeit bestimmen die Vitalität und Leistung der Kulturpflanzen, wodurch dieses einen der ertragsbegrenzenden Faktoren im Pflanzenbau darstellt (RIPPEL et al. 2014). Laut der Bodenübersichtskarte sind auf dem Ackerschlag insbesondere Bodenarten vorhanden, die über einen vergleichsweise hohen Sandanteil verfügen (A-1). Daraus resultieren unter anderem die Eigenschaften einer guten Wasserführung und eines geringen Adsorptionsvermögens (SCHROEDER und BLUM 1992). Aufgrund dieser Eigenschaften ergibt sich, dass das Wasser eine nur schwache Bindung an die sandigen Bodenbestandteile aufweist, schnell verfügbar ist und damit leichter durch das Wurzelsystem aufgenommen werden kann (RIPPEL et al. 2014). Somit könnte die Wasserausnutzung, selbst von nur geringen Niederschlagsmengen, durch die Rapspflanzen im Verlaufe der Vegetationsperiode dort so effizient gewesen sein, dass auch insgesamt gute Ertragsergebnisse erreicht werden konnten.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Ertragsstruktur im südlichen Bereich des Feldes einen gestromten Verlauf aufweist. Diese Erscheinung wird in der Talking Fields Basiskarte nicht differenziert. Wird eine Reliefkarte des Ackerschlages von DIENST (2018)

genutzt, so geht aus dieser hervor, dass das Relief dort eine ähnliche Struktur aufweist. Das Untersuchungsfeld besitzt in diesem Areal seine tiefsten Punkte, die visuell mit Strömen oder Rinnen vergleichbar sind. Die Vergleichbarkeit der Ertragsstruktur und Reliefform lässt vermuten, dass nicht nur ein Zusammenhang zwischen dem Körnertrag und dem Boden, sondern auch mit der punktuellen Lage im Relief besteht. Durch Erosionsvorgänge und gravitative Gesetze führt ein Wasser- und Nährstoffaustausch in oberen Lagen zu einer Anreicherung dessen in Senkenstrukturen, wie in solchen Rinnen, wodurch in diesen Bereichen verhältnismäßig gute Erträge erreicht werden. Dagegen weisen Hanglagen und Kuppen, aufgrund der verringerten Wasserversorgung, meist ein verzögertes Auflaufen und ein letztendlich geringeres Ertragspotential auf (LEHMANN 2004). Der Messpunkt 23 liegt in einem dieser Ströme, wohingegen die Punkte 22 und 25 in seichter Hanglage lokalisiert sind. An letzteren beiden Punkten wurden insgesamt die niedrigsten Erträge (2,2 und 2,3 t*ha⁻¹) aller 18 Messpunkte geerntet. An Punkt 32 lag das Ertragsergebnis um fast eine Tonne höher. Tendenzen zu diesen Ergebnissen waren anhand der Datenerhebung bereits im Herbst erkennbar (Vgl. Tab. 3). Somit konnte auch in diesem Versuch ein Einfluss der punktuellen Lage im Relief auf den Körnertrag des Winterraps nachgewiesen werden, was sich mit Ergebnissen von DIENST (2018) und LEHMANN (2004) in anderen Ackerkulturen deckt.

Körnertrag und Bestandesparameter des Winterrapses

Werden die im Herbst gemessenen Pflanzenentwicklungsparameter hinzugezogen, so zeigt sich, dass einzig die Bestandesdichte einen Zusammenhang mit dem Körnertrag aufweist. In der Literatur wird unter anderem durch DIEPENBROCK et al. (2000) sowie GEISLER und STOY (1987) beschrieben, dass die Bestandesdichte einen maßgeblichen Einfluss auf den Körnertrag von Winterraps hat. Dadurch kann bezüglich dieses Zusammenhangs insgesamt eine Übereinstimmung des Untersuchungsergebnisses dieser Arbeit und den literarischen Angaben festgestellt werden. Da, bis auf die Bestandesdichte, alle anderen Bestandesparameter einen signifikanten Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung aufwiesen, beide aber nicht mit dem Körnertrag in Verbindung gebracht werden konnten, kann angenommen werden, dass im Entwicklungsprozess eine starke Veränderung der Bestandesparameter nach der Bonitur im Herbst stattgefunden hat und der Winterraps somit erst in der zweiten Vegetationshälfte sein Wachstums- und Ertragspotential an den beprobten Punkten zeigte.

Zunächst konnte in Untersuchungen von GEISLER und STOY (1987) gezeigt werden, dass das Ertragspotential unter anderem von den Wachstumsbedingungen vor dem Winter abhängt, zu welchen die Bestandesdichte und die damit verbundene intraspezifische Konkurrenz der Pflanzen zählt. Weiterhin stellte sich heraus, dass mit zunehmender

Pflanzendichte das Ertragspotential sogar abnimmt und mit geringeren Bestandesdichten potentiell stabilere Erträge auf einem guten Niveau erreicht werden können, was nicht zuletzt durch die hohe Kompensationsfähigkeit von Raps bedingt ist (BIERTÜMPFEL et al. 2018; GEISLER und STOY 1987). Die Bestandsdichte war insgesamt als durchwachsen zu beschreiben, mit Tendenz zu einem eher schwachen Bestand. Diese Tatsache könnte jedoch zu einer optimalen Entwicklung der Einzelpflanze aufgrund einer guten Verfügbarkeit an Licht, Standraum und Nährstoffen geführt haben, sodass eine höhere Biomasse-Bildung an Orten mit einer geringeren Bestandesdichte im Frühjahr stattfand und die Variabilität des Körnertrags somit anhand der Bestandesdichte erklärt werden könnte.

Neben der verhaltenen Vorwinterentwicklung wird der angebauten Rapssorte eine geringe bis mittlere Neigung zur Auswinterung, eine zeitige Weiterentwicklung im Frühjahr sowie ein sehr hoher Körnertrag zugeschrieben (DEKALB 2019). Zum Zeitpunkt der Datenerhebungen im Feld vor dem Winter befanden sich die Rapspflanzen im Makrostadium 1. Wie nach WEBER und BLEIHOLDER (1990) und LANCASHIRE et al. (1991) beschrieben, war der Winterraps noch in der Blattentwicklungsphase am Hauptspross. Das Internodium war noch nicht gestreckt und die Pflanzen selbst lagen dicht am Boden. Damit verfügten die Rapspflanzen insgesamt über eine gute Ausgangslage für den darauffolgenden Winter. Der Winter 2018/2019 kann insgesamt als mild beschrieben werden, da die Temperatur in den Wintermonaten Dezember bis Februar im Mittel zwischen 2 und 5 °C betrug. Zudem konnten in dieser Zeit Niederschlagsmengen gemessen werden, die nur leicht unter dem mittleren Jahresdurchschnitt lagen, wodurch auch ein Wassermangel in dieser Zeit ausgeschlossen werden kann. Hinzu kommt eine verhältnismäßig hohe Anzahl von Sonnenstunden im Februar 2019, welche eine zeitige Weiterentwicklung des Winterraps zum Frühjahr mit initiiert haben könnte. In Verbindung mit der Sorten-bedingten geringen bis mittleren Auswinterungsneigung können damit auch entscheidende Pflanzenverluste über diese Monate als Einflussfaktor vernachlässigt werden.

Ähnlich wie bei Mais, weist Winterraps eine eher verhaltene Biomasse-Bildung in der ersten Entwicklungsphase auf. Ein Teil der bis dahin gebildeten Biomasse des Winterraps, insbesondere der Blattmasse, stirbt über den Winter ab, sodass eine Schwankung in der Masseentwicklung durchaus üblich ist. Ein Großteil des Stickstoffs (N) wird von Winterraps erst im Frühjahr aufgenommen, wodurch die überwiegende Biomasse- beziehungsweise Trockenmasse-Entwicklung erst mit der Streckungsphase der Pflanzen beginnt (EDER und BRANDHUBER 2014; GEISLER 1983). Die N-Düngung auf dem Untersuchungsschlag erfolgte laut Ackerschlagkartei praxisüblich direkt nach dem Winter und im zeitigen Frühjahr. Aufgrund dessen ist zu vermuten, dass erst durch die gesteigerte Bildung von Biomasse und damit Assimilaten, welche zur Entwicklung der Ertragskomponenten benötigt werden, die Ertragsbildung noch einmal stark beeinflusst worden ist, sodass zwischen dem Körnertrag und

den Bestandesparametern im Herbst insgesamt kein Zusammenhang hergestellt werden konnte. Außerdem könnte eine insgesamt geringe N-Nachlieferung oder auch schlechte Aufnahme durch die Pflanzen im Herbst zu dem beschriebenen Entwicklungsrückstand vor dem Winter geführt haben. Zur Überprüfung dieses Zusammenhangs sollte im Frühjahr ein zweiter Biomasseschnitt und eine erneute Auswertung der Trockenmasse erfolgen.

Technische Probleme sowie Fehler in der Prüfung und Korrektur der Ertragsrohdaten sind die Hauptfehlerquellen der Ertragskartierung und können das Endergebnis teilweise stark beeinflussen (GRIEPENTROG 1998; JÜRSCHICK et al. 1998; REICHARDT 2010). Gerade bei der punktuellen Auswertung und kleinflächigen Analysen von Ertragsergebnissen gewichten Ungenauigkeiten stärker, als bei der Auswertung eines gesamten Ackerschlages. Die Prüfung der Ertragsrohdaten des Winterrapses erfolgte manuell in QGIS. Es ist möglich, dass Fehler in der Bereinigung der Ertragsrohdaten zu einer Verzerrung des Ertragsergebnisses an den festgelegten Messpunkten geführt haben könnten, sodass potentiell eine Verbesserung oder auch Verschlechterung des Ertragsergebnisses an den Punkten möglich ist. Auch die Interpolation der Ertragsdaten durch Inverse Distanzgewichtung könnte die Ergebnisse auf diese Weise beeinflussen. Je nach Sicherheit und Datenmenge, also Punktdichte für eine bestimmte Fläche, sollte die Interpolationsweite gewählt werden. Da für diese Arbeit mit der Ertragskartierung eine zuverlässige und engmaschige Ertragsrohdaten vorlagen, kann die Interpolationsweite von 5 m als detailliert eingestuft werden.

5.3 Geodaten als Referenzdatenquelle

5.3.1 Sentinel-2-Satellitenbilder

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit lag in der optischen Fernerkundung mit Hilfe der Se2-Satelliten. Es sollte geprüft werden, was diese Satelliten, welche speziell zur Erkundung der Landoberfläche und der darauf befindlichen Vegetation eingesetzt und optimiert werden, leisten können. Diese Form der Fernerkundung bietet die Möglichkeit eines kostenlosen und relativ einfachen Zugangs zu einer großen Datenmenge, mit der nicht nur Ackerschläge überblickt, sondern auch kleinräumige Heterogenitäten auf diesen erkannt werden können.

Anzahl verfügbarer und verwendbarer Satellitenbilder der vergangenen Jahre

Zunächst ist anzumerken, dass die hohe Anzahl von mehreren hundert Satellitenbildern, die gerade in den letzten Jahren verfügbar war, eine enorme Menge an Datenmaterial suggeriert, welches Informationen über landwirtschaftlich genutzte Flächen bieten kann. Satellitenbilder sind jedoch stark von Wolken und Wolkenschatten abhängig, woraus resultiert, dass ein Großteil der Daten nicht oder nicht vollständig genutzt werden kann. Die Bewölkung

stellt den begrenzenden Faktor in der optischen Fernerkundung dar und schränkt eine vollständige Ausnutzung des Datenmaterials erheblich ein. Das nach wie vor bestehende Problem wurde bereits in diversen Versuchen und Werken durch Autoren wie GRENZDÖRFFER und BILL (2001), LÖFFLER et al. (2005) oder WEINMANN und WEIDNER (2018) beschrieben. Erwartungsgemäß wurde auch in dieser Arbeit die Anzahl verwendbarer Sentinel-2-Aufnahmen für den untersuchten Vegetationszeitraum des Winterraps aufgrund von Wolken und Wolkenschatten stark dezimiert. Das pauschale Filtern der Sentinel-2-Szenen nach deren Bedeckungsgrad kann dabei insgesamt als keine zuverlässige Alternative betrachtet werden, um verwendbare Ackerschlag-spezifische Aufnahmen zu ermitteln. Durch diese Möglichkeit steigt lediglich die Wahrscheinlichkeit einer weitestgehend wolkenfreien Satellitenszene. Ob die Anwendung auf den gewünschten Ackerschlag dann tatsächlich erfolgen kann, kann darüber jedoch nicht beurteilt werden. Außerdem werden mittels des Wolkenfilters auch Bilder ausgeschlossen, die genauer betrachtet, keine Störungen über einem spezifischen Ackerschlag aufweisen. Daher ist zu empfehlen, jede Aufnahme einzeln zu beurteilen und auf die individuelle Verwendbarkeit zu prüfen.

Sentinel-2-NDVI und relative Biomasse-Abweichung

Wird die Spektralsignatur von Raps mit der von Getreidekulturen wie Weizen, Gerste und Roggen generell verglichen, so besteht im Bereich des sichtbaren Lichts nur eine geringe spektrale Differenz. Dagegen weist Raps im NIR ein weitaus höheres Reflexionssignal auf, welches durch den vegetativ bedingten Entwicklungsvorsprung, die höhere Biomasse und Bodenbedeckung der Ackerkultur verursacht wird (COMBERG 2014).

Statistisch betrachtet, ließ sich die Varianz des Se2-NDVI im Frühjahr 2017 im Winterweizen in einem höheren Maße anhand der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields erklären, als der Se2-NDVI im Herbst 2018. Es ist anzumerken, dass die Aufnahmezeitpunkte, der dafür verwendeten Satellitenszenen, den Entwicklungsstand zu völlig unterschiedlichen Zeitpunkten im Vegetationszyklus darstellen. Sowohl bei Winterraps als auch bei Wintergetreide findet ein erhöhter Biomassezuwachs erst ab dem Vegetationsbeginn zum Frühjahr im Zuge der Streckung der Pflanzen statt, sodass das Reflexionsverhalten nicht nur von der Pflanzenkultur, sondern auch von deren Entwicklungsstand abhängig ist (GEISLER 1983). Ein Vergleich der Reflexion und Prüfung eines Zusammenhangs mit der Biomasse-Abweichung wäre damit zu ähnlichen Zeitpunkten im Vegetationsverlauf sinnvoller und vermutlich aussagekräftiger.

Entwicklung des Sentinel-2-NDVI im Anbaujahr 2018/2019

Nach VOß (2005) können multispektrale Fernerkundungsdaten sehr gut genutzt werden, um zuverlässige Informationen über den Gesundheits- und Entwicklungsstatus von Pflanzenbeständen zu erhalten. Es wurde in dieser Arbeit festgestellt, dass sich der NDVI zweier Sentinel-2-Satellitenszenen, aufgenommen im Zeitraum der Herbstbonitur, dazu eigneten, die Varianz der relativen Biomasse-Abweichung sowie aller Bestandesparameter und des Kornertrags in einem mittleren und teilweise hohen Maße zu erklären. Dabei wiesen insbesondere die Pflanzenentwicklungsparameter Bestandesdichte, Trockenmasse und Einzelpflanzengewicht Zusammenhänge mit hohen Bestimmtheitsmaßen auf, sodass angenommen werden kann, dass der Entwicklungsstand von Rapspflanzen im Herbst anhand des NDVI beurteilt werden kann. VOß (2005) beschreibt jedoch weiterhin, dass die zeitliche Differenz zwischen Satellitenbildern und Felderhebungen, eine zu berücksichtigende Fehlerquelle darstellt. Dabei sei der Zeitpunkt der Datenaufnahme ein wichtiges Kriterium für die Genauigkeit und Vergleichbarkeit von Satellitenbildern. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen, dass die räumliche Auflösung einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Erfassung von Teilschlag-spezifischen Pflanzeneigenschaften hat. Dabei geht mit der Verringerung der räumlichen Auflösung auch ein Informationsverlust einher und Unterschiede im Bestand können ab einer bestimmten Auflösung nicht mehr eindeutig erkannt werden (VOß 2005). In dieser Arbeit wurden Sentinel-2-Aufnahmen mit einer Auflösung von 10 x 10 m verwendet, was in der Satelliten-Fernerkundung eine hohe Auflösung darstellt. Dieser technische Stand schließt jedoch nicht aus, dass die Variabilität der einzelnen Bestandesparameter nicht detailliert genug erkannt werden konnte, sodass eine Beeinflussung der Ergebnisse möglich ist. Des Weiteren konnte BIEWER et al. (2006) mittels Feldspektroskopie in Leguminosen/Gras-Gemengen eine signifikante Korrelation zwischen der Trockenmasse und dem Vegetationsindex NDVI feststellen. Dabei war jedoch die Streuung der Werte höher als bei anderen Vegetationsindizes, was die Schätzung der späteren Ertragsanteile erschwerte. Dieses Ergebnis zeigt, dass mit der Verwendung des Vegetationsindex NDVI aufgrund der Streuung eine gewisse Unsicherheit verbunden ist, was insgesamt zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen kann. Die eben benannten Faktoren könnten letztendlich dazu geführt haben, dass die Bestimmtheitsmaße zwischen den Parametern teilweise erheblich schwanken.

Wie durch SPICKER (2016) beschrieben, wurde für den Winterraps eine stetige Steigerung des NDVI über die Vegetationsperiode erwartet, welcher bis zum Frühjahr ein Maximum zwischen 0,80 und 0,90 erreicht, stagniert und anschließend zur Abreife wieder abflacht. Die Entwicklung des NDVI über die Vegetationsmonate konnte so auch in diesem Versuch nachvollzogen werden (Vgl. Abb. 18). Ein Absinken des NDVI nach dem Winter kann durch Pflanzenverluste oder das Absterben von Blättern verursacht werden. Aufgrund der

bereits beschriebenen Witterungsbedingungen über den Winter, kann ein gravierender Pflanzenverlust aber weitgehend ausgeschlossen werden. Weiterhin könnten reflexionsbeeinflussende Faktoren, wie atmosphärische Störungen und Unregelmäßigkeiten durch unterschiedliche Lichtverhältnisse zum Aufnahmezeitpunkt als mögliche Ursache genannt werden. Insgesamt können Schwankungen des NDVI gerade im Verlaufe des Frühjahrs, wie in der Region Nord, nicht allein anhand des Indexwertes erklärt werden.

Entwicklung des NDVI im Anbaujahr 2018/2019 anhand kartografischer Darstellungen

Um Schlag-spezifische Heterogenitäten bezüglich des Reflexionsverhalten teilflächen-genaу detektieren zu können, ist es unerlässlich den zu untersuchenden Ackerschlag in seiner Gesamtheit zu betrachten. Wie unter anderem durch HEIDEN et al. (2015) beschrieben, bietet die Visualisierung des Vegetationsindex in Karten eine sehr gute Grundlage, um auftretende Veränderungen im Laufe der Zeit beobachten und interpretieren zu können.

Es ist zunächst anzumerken, dass insbesondere bei frühen Aufnahmen, aufgrund der geringen Bodenbedeckung durch die Vegetation, eher das Reflexionsverhalten des Bodens wiedergespiegelt wird. Aufgrund der stetigen Veränderung des Feuchtegehalts im Oberboden durch das Abtrocken ändert sich damit auch das Aussehen des Bodens und dadurch die Reflexion und der feststellbare NDVI (LILIENTHAL 2003, PANTEN 2002). Anhand des NDVI konnten ab dem späten Frühjahr keine wesentlichen Differenzen im Pflanzenbestand mehr erkannt werden. Dies könnte zum einen daran liegen, dass Rapspflanzen in vorher schwächer entwickelten Bereichen in der Bestandesentwicklung aufgeholt haben, was Sorten-bedingt durch die zeitige Weiterentwicklung im Frühjahr erklärbar wäre (DEKALB 2019). Weiterhin könnte ein Sättigungseffekt des NDVI eingetreten sein. Ab einem bestimmten Entwicklungsstadium differenziert der Index nicht mehr ausreichend, sodass dies zu einem scheinbaren Angleichen des Reflexionssignals führt und eine visuelle Abgrenzung zwischen unterschiedlich entwickelten Arealen im Bestand nicht mehr möglich ist (SPICKER 2016). Diese Problematik wird auch in Feldversuchen durch RECKLEBEN (2019) beschrieben.

Werden die Ertragskarte (Abb. 11) und die NDVI-Bilder des Untersuchungsschlags (Abb. 18), die über das Vegetationsjahr hinweg gesammelt worden sind, auf visueller Ebene verglichen, so zeigt sich, dass Se2 die letztendliche Ertragsstruktur, wie sie in der Ertragskarte vorhanden ist, sehr gut wiedergeben kann. Markante Zonierungen, insbesondere das Hochertragsareal in der Mitte des Feldes, sind bereits im Herbst deutlich durch die Satelliten erkannt worden und ließen sich durch den NDVI entsprechend abgrenzen. Auch die in der Ertragskarte beschriebenen Ströme in der Region Süd sind bereits in der Aufnahme vom 19.09.2018 erkennbar und bleiben visuell auch im Verlauf der Vegetationsperiode erhalten. Die Se2-Satellitenbilder zeigten über den NDVI zwei Ströme im südlichen Areal des Feldes, wovon Punkt 23 direkt in einem von diesen lag, welche später ebenfalls in der Ertragskarte zu

erkennen sind. Die Talking Fields Basiskarte kann die Strukturen nicht detailliert genug herausdifferenzieren, wie es anhand von Sentinel-2-Aufnahmen möglich ist. Dies könnte unter anderem durch die verhältnismäßig große Rasterweite von 20 x 20 m bedingt sein kann. Insgesamt stellte sich der Vegetationsindex NDVI als gut geeignetes Hilfsmittel für den Erkenntniszuwachs heraus, um zu einem weitestgehend beliebigen Zeitpunkt die Gesamtheit des Untersuchungsschlages überblicken zu können, was gegenüber der Basiskarte einen enormen Vorteil darstellt.

Die kombinierte Darstellung des Entwicklungsstadiums zu verschiedenen Zeitpunkten und des Bestimmtheitsmaßes (Abb. 19) sollte zeigen, ob die Messung des NDVI zu einem bestimmten Entwicklungszeitpunkt in der Vegetationsperiode erfolgen sollte, um eine besonders hohe Erklärbarkeit der Varianz des Kornvertrags erzielen zu können. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass das R^2_{lin} ab dem Herbst, bis weit in das Frühjahr hinein, zwischen 0,40 und 0,50 schwankte. Die Erklärbarkeit der Varianz des Ertrags anhand des NDVI liegt damit auf einem mittleren Niveau, sodass eine sichere Einschätzung nur bedingt möglich gewesen wäre. Eine generelle Empfehlung für einen günstigen Aufnahmezeitraum kann daraus nicht abgeleitet werden. In der Analyse räumlicher Variabilität anhand von Luftbildaufnahmen ermittelte PANTEN (2002), dass im Monat Mai die größte Anzahl reflexionsbeeinflussender Faktoren zu erwarten ist und bestätigt damit GRENZDÖRFFER (1999). Damit könnte die Schwankung des NDVI im Frühjahr erklärt werden, sodass geschlussfolgert werden kann, dass Aufnahmen eher direkt nach dem Winter und im zeitigen Frühjahr genutzt werden sollten, da diese am aussagekräftigsten sind. Außerdem können zu diesem Zeitpunkt Auswinterungsschäden und Frostschäden noch gut erkannt werden und zeigen, mit welchem Status die Pflanzen in die darauffolgende Entwicklungsphase gehen (PANTEN 2002).

Laut HANK et al. (2012) und SCHMIDT (2017) sollte der NDVI, aufgrund seiner nur relativen Einheit, eher ein Bestandteil eines Weiterverarbeitungsprozesses sein und darüber besser in eine agronomische Führungsgröße überführt werden, wie beispielsweise die Biomasse in $t*ha^{-1}$ oder N-Aufnahme $kg\ N*ha^{-1}$. Damit könnten Interpretations- und Anwendungshindernisse in der Praxis umgangen werden (HANK et al. 2012; SCHMIDT 2017). Dem kann sich insofern angeschlossen werden, dass eine simple Interpolation der Satelliteninformation, wie der NDVI nicht ausreicht, um Informationsprodukte zu generieren, die als Entscheidungsunterstützung in Fragen des Teilflächen-spezifischen Managements landwirtschaftlicher Flächen Verwendung finden können. Da in den meisten Fällen eine spezifische Anwendung in Form von Applikationsmaßnahmen durchgeführt werden soll, bedarf es einer Kombination des Vegetationsindex in verschiedenen Modellen, so wie TF dies mit dem PROMET- und SLC-Modell durchführt. Für diese Produkte müssen die genutzten

Parameter jedoch zuerst vergleichbar gemacht werden, indem den unterschiedlichen Parameter in Modellen eine bestimmte Wichtung zugeordnet wird, um festzulegen, wie hoch der Einflussgrad des jeweiligen Parameters ist.

5.3.2 GreenSeeker-Messungen von Winterweizen und Winterraps

Als weitere Datenquelle wurden zwei GreenSeeker-Messungen aus dem Frühjahr 2017 und dem Herbst 2018 genutzt. Der GreenSeeker zeichnet automatisch während der Überfahrt Reflexionsunterschiede des Pflanzenbestandes auf, berechnet daraus den NDVI und ermöglicht dadurch Rückschlüsse auf Vitalitäts- und Biomasseunterschiede der Vegetation. Beide NDVI-Messungen wurden auf statistische Zusammenhänge mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields, dem Sentinel-2-NDVI verschiedener Aufnahmezeitpunkte, ausgewählten Bestandesparametern und dem Körnertrag des Winterrapses geprüft.

Beide GreenSeeker-NDVI-Messungen wiesen einen Zusammenhang mit der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields auf. Aufgrund eines eher geringen R^2_{lin} beider Zusammenhänge muss jedoch geschlussfolgert werden, dass der GS-NDVI bedingt dazu geeignet ist, um auf die relative Biomasse-Abweichung zu schließen.

Es konnten besonders zwischen den Vegetationsindizes der Sentinel-2-Satelliten und GreenSeeker-Messungen im Frühjahr und Herbst des jeweiligen Anbaujahres hohe Bestimmtheitsmaße ermittelt werden. Dieses Ergebnis zeigt zunächst, dass sowohl über den Sensor- als auch über den Satelliten-gestützten Ansatz ein ähnliches Reflexionsverhalten des jeweiligen Pflanzenbestandes ermittelt werden konnte. Dabei ist anzumerken, dass der Zusammenhang der NDVI-Werte im Frühjahr 2017 deutlich höher war als im Herbst 2018.

Eine mögliche Ursache könnte in der Sonneneinstrahlung und der analysierten Ackerkultur liegen. Das GreenSeeker-System verfügt über eine eigene Strahlungsquelle, sodass theoretisch auch Messungen bei Dunkelheit möglich sind. Jedoch ist bei Messungen, die tagsüber stattfinden, zu erwarten, dass die Strahlungsintensität und der Einstrahlungswinkel des Sonnenlichts einen Einfluss auf das Reflexionsvermögen der Pflanzen und folglich die Höhe des NDVI ausüben. Weiterhin besitzt jede Pflanzenart, sowie auch Winterweizen und Winterraps, ein spezifisches Reflexionsmuster, wodurch eine Unterscheidung möglich ist (ERASMI 2002; LILIENTHAL 2003). Das Sonnenlicht und die Strahlungseigenschaften verändern sich nicht nur im Verlaufe des Tages, sondern über die gesamte Vegetationsperiode, sodass die Tages- und Jahreszeit bei der Aufnahme entscheidende Einflussfaktoren darstellen. So ist im Frühjahr eine weitaus höhere Strahlungsintensität vorhanden, als im Spätherbst. Dies kann zur Beeinflussung des ohnehin unterschiedlichen Reflexionsverhaltens des Weizens und Rapses und den gemessenen NDVI geführt haben.

Die Erklärbarkeit der Varianz der Bestandesparameter durch den GreenSeeker lag auf einem niedrigen bis mittleren Niveau, woraus geschlussfolgert werden kann, dass über den GS-NDVI eine nur eingeschränkte Einschätzung des Pflanzenentwicklungsstandes vor dem Winter möglich war. Die Ergebnisauswertung zeigte jedoch, dass die Varianz der Bestandesparameter anhand des Sentinel-2-NDVI in höherem Maße erklärt werden konnte. Es wäre zu erwarten gewesen, dass der GS-NDVI, aufgrund der Nähe zum Bestand und vermutlichen geringeren Beeinflussung des Reflexionssignals, eine höhere Genauigkeit besitzt und damit eine höhere Erklärbarkeit der Pflanzenentwicklung erzielt werden kann. Da mit dem Aufnahmesystem jedoch keine flächendeckende Aufzeichnung des NDVI möglich ist und die Daten vor der Verwendung interpoliert werden mussten, kann über diesen Verarbeitungsschritt eine Verzerrung der Daten verursacht worden sein.

Der signifikante Zusammenhang und die hohe Erklärbarkeit zwischen beiden GS-NDVI aus dem Frühjahr 2017 und Herbst 2018 lässt darauf schließen, dass durch das System in unterschiedlichen Anbaujahren eine ähnliche Variation des Reflexionssignals an den 18 Messpunkten festgestellt werden konnte. Dies zeigt, dass die Variabilität des Reflexionsmusters auf dem Untersuchungsschlag unabhängig von der angebauten Ackerkultur besteht und erkannt werden kann.

KALAITZIDIS und MANAKOS (2012) raten an, Vegetationsindizes regelmäßig und zu festen Zeitpunkten zu ermitteln, um gezieltere Rückschlüsse von diesen auf das Ertragspotential ziehen zu können. Dabei sei es von Vorteil, wenn dabei Fernerkundungsdaten mit Sensordaten vom Traktor, wie durch den GreenSeeker, als Quellen kombiniert werden (KALAITZIDIS und MANAKOS 2012). Für diese Arbeit lag für das Anbaujahr 2018/2019 auf dem Untersuchungsschlag eine Messung des NDVI über das GreenSeeker-System aus dem Herbst 2018 vor. Zwischen dem GS-NDVI war statistisch gesehen ein Zusammenhang mit dem Kornertrag des Winterraps nachweisbar, welcher auf einem mittleren Niveau erklärt werden konnte. Insgesamt kann dadurch aber ein Großteil der Varianz des Kornertrags nicht erklärt werden. Zur Analyse des NDVI auf dem Untersuchungsfeld nach dem Winter wäre eine zweite Messung von Vorteil gewesen, um einen ganzheitlichen Überblick über den Pflanzenbestand zu bekommen. Aufgrund der rasanten Weiterentwicklung und des Massezuwachses von Winterraps im zeitigen Frühjahr sind Feldbonituren im Raps ab einem bestimmten Zeitpunkt stark erschwert und die Pflanzen sind einzeln und von oben nicht mehr zuverlässig einzusehen und beurteilbar. Durch die Überfahrt mit dem Schlepper und GS-System ist es möglich, fast die gesamte Fläche abzudecken und Informationen über den Entwicklungsstand anhand des NDVI auch später im Frühjahr zu generieren.

5.3.3 Relativvertragskarten

Eine Ertragskartierung kann direkt Auskunft darüber geben, wie differenziert die Ernten innerhalb eines Ackerschlages oder auf dessen Teilflächen ausfielen. Diese Differenzierung variiert zwischen den einzelnen Erntejahren aufgrund exogener Einflüsse jedoch sehr stark. Werden aus Ertragsdaten längerer Zeitreihen dann Relativverträge errechnet und verglichen, so sind diese stabil und gelten als gesicherte Datenquelle. So können unabhängig von der Ackerkultur Hoch- und Niederertragszonen erkannt und nach betriebsindividueller Strategie gefördert werden (NOACK 2007; SCHLIEPHAKE 2011).

In dieser Arbeit zeigte sich, dass sich die Relativverträge der Erntejahre 2003 - 2015 dafür eigneten sowohl die Varianz der relativen Biomasse-Abweichung nach Talking Fields als auch des GS-NDVI_{21.11.2018} und Se2-NDVI zweier Szenen aus dem Spätherbst und Frühsommer zu erklären. Die Bestimmtheitsmaße lagen insgesamt auf einem mittleren bis hohen Niveau. Dagegen hätten anhand der Relativverträge insgesamt keine Rückschlüsse auf die ausgewählten Bestandesparameter und den Kornertrag des Winterrapses gezogen werden können.

Die RE beider Dekaden waren besser geeignet die Varianz des Se2-NDVI an den Messpunkten im Herbst, als an selbigen Orten im Frühsommer zu erklären. Dies, in Verbindung mit dem nicht eindeutigen Zusammenhang zwischen den Relativverträgen und den Bestandesparametern vor dem Winter, würde die bereits beschriebene Vermutung unterstützen, dass eine erhebliche Veränderung des Bestandes, aufgrund von Faktoren wie den Sorteneigenschaften oder der N-Düngemaßnahmen, nach dem Winter stattgefunden hat.

SCHLIEPHAKE (2011) stellte eine enge Beziehung zwischen den Relativverträgen und dem absoluten Jahresertrag bei Raps auf trockenen Standorten fest und konnte damit ein ähnliches Ertragsverhalten auf einzelnen Ackerschlägen sowohl in starken als auch schwachen Jahren nachweisen. Dieses Ergebnis wurde auch in dieser Arbeit erwartet, konnte jedoch nicht festgestellt werden. Gerade in den vergangenen Anbaujahren führten die beschriebenen extremen Wetterlagen, mit langanhaltender Trockenheit und hohen Temperaturen, zu einem Ertragsrückgang des Winterrapses in M-V (STATISTISCHES AMT M-V 2018; STATISTISCHES AMT M-V 2019). Auch bei einem Vergleich der Relativvertragskarten und der Ertragskarte auf visueller Ebene wird deutlich, dass die Relativvertragskarten insgesamt nicht die Ertragsstruktur des Winterrapses des Anbaujahres 2018/2019 wiederspiegeln können. Eine stabile Ertragsstruktur scheint nur im südlichen Bereich des Feldes vorhanden zu sein, da beide REK dort bereits den beschriebenen gestromten Verlauf zeigen. Dies würde auch den erheblichen Einfluss der Witterung auf langjährige Datenquellen, wie Erträge und den daraus berechneten Relativverträgen, zeigen.

Die Relativvertragskarten und auch die Talking Fields Basiskarte werden aus Daten längerer Zeitreihen erstellt. In dem mehrjährigen Mittel der beiden Datenquellen sind jedoch die vergangenen Extremjahre nicht enthalten, sodass beide Kartenmodelle einen geminderten Grad an Aktualität aufweisen, was weiterhin zu den geringen Bestimmtheitsmaßen geführt haben könnte. Es wird vermutet, dass bei einem aktuelleren Verrechnungszeitraum eine geringere Abweichung der Erträge zu erwarten wäre und Ackerschlag-spezifische Ertragsdifferenzen genauer erkannt werden könnten. Dies würde sich auch mit den Ergebnissen decken, dass anhand der RE2006 - 2015 deutlich höhere Bestimmtheitsmaße ermittelt werden konnten, als durch die RE des früheren Verrechnungszeitraumes. Bei einer Weiterverarbeitung der verwendeten Ertragsdaten der vergangenen Erntejahre zu aktuelleren Relativverträgen ist es wahrscheinlich, dass diese insgesamt auf einem niedrigeren Niveau liegen und damit eher dem Ertragsniveau der letzten Erntejahre entsprechen würden.

5.4 Satellitendaten in der praktischen Landwirtschaft - Erfahrungsberichte

Für diese Arbeit wurden freie Interviews geführt, um realistische Erfahrungen und Bewertungen von Anwendern von Satellitendaten und daraus entwickelten Kartenmodellen zu bekommen. In diesem Kapitel sollen die Motivationsfaktoren und auch Probleme, die mit der Anwendung solcher Geodaten einhergehen, noch einmal reflektiert werden, um daraus die aktuelle Situation in der praktischen Anwendung von Fernerkundungsdaten zu ermitteln und die genannten Faktoren zur Beantwortung der Forschungsfragen nutzen zu können.

Erfahrungsberichte und Literatur zu Talking Fields

Werden Erfahrungen der praktischen Nutzung von Satellitendaten und daraus generierten Produkten geteilt, so stellen diese Informationen und der Austausch solcher, einen wichtigen Aspekt für die künftige Verbesserung der Anwendungsverfahren dar. Insgesamt ist es jedoch schwierig, Erfahrungsberichte von Anwendern zu finden, die nicht von dem jeweiligen Unternehmen geprüft worden sind. Auch speziell über TF ist Literatur, die über die Produktbeschreibung hinausgeht, praktisch nicht zu finden. Aufgrund dessen konnte kein direkter Vergleich mit anderen Autoren in dieser Arbeit stattfinden, sodass dem zwischenmenschlichen Austausch von Erfahrungen und Meinungen eine noch größere Bedeutung zukommt.

Anforderungen und Erwartungen des Anwenders

Der Trend geht zur Teilflächen-spezifischen Bewirtschaftung, was insgesamt aber keine neue Erscheinung ist, sondern mittlerweile einen fest etablierten Bereich in der Agrarwirtschaft darstellt. Das Ziel von Unternehmen wie Talking Fields ist es, den Landwirt im Standort-spezifischen Pflanzenbau durch die Verarbeitung von Satellitendaten und anderen

Geodatenquellen mit Hilfe von diversen Kartenmodelle zu unterstützen und neue Ackerschlag-bezogene Informationen ermitteln zu können. Mit der aktuellen Menge an Fachtagungen, Technikmessen und Publikationen über die Ausnutzung von Fernerkundungsdaten und daraus generierbaren Produkten, gehen jedoch große Erwartungen und Anforderungen durch den potentiellen Anwender einher. Dies betrifft insbesondere Aspekte wie die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Vielseitigkeit von solchen Geodaten. Es ist jedoch zu bedenken, dass Unternehmen wie Talking Fields oder die Kleffmann-Group selbst nur einen forschenden Charakter besitzen, wodurch die Erarbeitung von Produkten ebenfalls nur über Probieren und eine stetige Anpassung und Verbesserung dieser erfolgt. Die teilweise überzogene Erwartungshaltung der potentiellen Anwender übersteigt oftmals die geforderten Aussagemöglichkeiten sowie praktische Umsetzbarkeit und stößt bei der Vereinbarung von den Vorstellungen und Erwartungen an ihre Grenzen. Die Lösung dieser Problematik beinhaltet somit auch, dass nur eine Zusammenarbeit von Unternehmen und Anwendern zu einer Verbesserung von Ackerschlag-spezifischen Kartenmodellen führen kann und folglich auch zukünftig unerlässlich bleiben wird. Ein möglicher Ansatz wäre ein gesteigerter Informationsaustausch zwischen Unternehmen und den Anwendern, um durch die Zusammenarbeit eine noch höhere Umsetzbarkeit in der Praxis zu erzielen.

Nachfrage und Beratung

Die Nachfrage nach Kartenmodellen und anderen Produkten, die dem Landwirt bei der Entscheidungsfindung im Teilflächen-spezifischen Pflanzenbau unterstützen sollen, ist enorm und führt gerade durch den politischen und öffentlichen Druck zu einem zunehmenden Interesse im Agrarbereich. Wird der Aspekt der zumeist fehlenden Beratung betrachtet, so ist anzumerken, dass die Nachfrage schon lange das Angebot übertrifft. Es fehlt nicht an Unternehmen, die sich den Wünschen und Anforderungen der Landwirte angenommen haben, sondern an Mitarbeitern, die Produkte erstellen, weiterverarbeiten oder auch eine beratende Funktion ausüben können. Diese Problematik wurde unter anderem durch LÖFFLER et al. (2005) beschrieben und wird prognostisch auch weiterhin zu einem begrenzten Ausschöpfen der Möglichkeiten führen.

Planung von Teilflächen-spezifischen Applikationsmaßnahmen

Gerade für den Einstieg in die Teilflächen-spezifische Bewirtschaftung sollte vorher geplant und individuell festgelegt werden, welches Ziel damit erreicht werden soll und über welche Daten oder Kartenmodelle dieses am ehesten erreicht werden kann. Ohne den zielgerichteten Ansatz, besteht die Gefahr, dass die letztendliche Umsetzung nicht, oder erst nach einem sehr langen Arbeitsprozess, realisiert werden kann oder anfallenden Daten, ab einem bestimmten Zeitpunkt, tatsächlich nicht mehr überblickt und sortiert werden können.

Dieser Ansatz schließt jedoch nicht aus, dass im Laufe des Arbeitsprozesses Methoden oder Datenquellen verändert werden können, wenn über diese das Ziel auf einem günstigeren Wege erreicht werden kann. Die Arbeit mit Satellitendaten und daraus generierten Produkten stellt einen fortwährenden Entwicklungsprozess dar, welcher in der Regel auf Probieren und sich verändernden Denk- und Arbeitsmethoden basiert.

Einsparung von Kosten

Ein wichtiger Faktor, der zum Einsatz von Satellitendaten motiviert, ist die Einsparung von Kosten durch den gezielteren Einsatz von Betriebsmitteln und Förderung bestimmter Standortqualitäten. Dazu kommt es, laut der Befragten und nach Einschätzung der Gesamtsituation, jedoch in den wenigsten Fällen. Bis es zur Einsparung von Kosten kommt, werden zumeist nicht unerhebliche monetäre Investitionen getätigt. Sensorgestützte Technik, wie der GreenSeeker, externe Dienstleistungen durch Beratungen und Dienstleistungsprodukte, wie Applikationskarten, besitzen einen hohen Investitionsbedarf, was nicht selten die Möglichkeiten kleiner Betriebe übersteigt. Hinzu kommt, dass mit der Umsetzung selten ein sofort sichtbarer Erfolg erzielt werden kann, sodass die anfängliche Euphorie oftmals in Ansätzen der Frustration mündet und Ansätze der Weiterentwicklung nicht immer bis zum Ende verfolgt werden. Zu diesem Zeitpunkt sind Investitionen jedoch bereits passiert und müssen entweder weiterbearbeitet werden, bis sich auch ein finanzieller Erfolg einstellt, oder ein möglicher Verlust durch andere Betriebszweige ausgeglichen werden kann.

Zeitliche Entlastung

Ähnlich verhält es sich mit der scheinbaren Arbeitszeitentlastung durch das Hinzuziehen eines Online-Anbieters, der Applikationskarten entgeldlich erstellt. Da von externen Fachnutzern generierte Produkte laut Erfahrungen, nie ohne diese zu hinterfragen angewendet werden sollten, bedarf es insgesamt trotzdem einer gewissen Investition an Zeit und Arbeit, wodurch die gewünschte Arbeitsentlastung und das Zeitersparnis zumeist in einem eher geringen Maße stattfinden. Das Hinterfragen und Prüfen von online entwickelten Produkten und das Investieren von Zeit in beispielsweise stichprobenartigen Boden- und Pflanzenproben sind jedoch wichtige Faktoren, ohne die auch eine Weiterentwicklung solcher Produkte nicht möglich wäre.

Erkenntniszuwachs und Interpretationsvermögen

Der visuelle Erkenntniszuwachs stellt insgesamt den größten Motivationsfaktor dar. Das ist in der Regel auch das Ziel, was am schnellsten und einfachsten erreicht werden kann. Die Bedingung ist die korrekte Interpretation von Geodaten, um daraus Geoinformationen gewinnen zu können. Diese Tatsache wurde jedoch gleichzeitig als größte Hürde in der praktischen Anwendung beschrieben. Diese Problematik verdeutlicht, dass verfügbare

Satellitendaten und Produkte, wie Zonen- und Applikationskarten, nicht immer eindeutig nachvollziehbar sind und uneingeschränkt verstanden werden können. Insbesondere in dieser Hinsicht besteht Weiterbildungsbedarf seitens der Online-Anbieter, aber auch der Anwender. Erfahrungswerte und Ackerschlag-spezifische Kenntnisse sind unerlässliche Faktoren bei der Erarbeitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten und Übersichtskarten. In der Regel werden diese zusätzlichen Informationen, insbesondere von den Anbietern, nicht berücksichtigt oder können von dem Anwender nicht immer in bestimmte Karten eingebracht beziehungsweise verarbeitet werden, sodass damit prinzipiell auch ein Informationsverlust einhergeht.

6 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal zusammengefasst, um anhand dieser, die in Punkt 1 genannten drei Forschungsfragen, unter Einbeziehung der Erfahrungen, beantworten zu können. Darüber hinaus sollen anhand der Schlussfolgerungen die Grenzen des jeweiligen Ansatzes aufgezeigt sowie ein Ausblick bezüglich der künftigen Entwicklung in der Praxis ermöglicht werden.

1. *Welcher Mehrwert an Informationen ist durch die Nutzung der Talking Fields Basiskarte realisierbar? Lassen sich mit Hilfe dieser Karte Erkenntnisse über das Pflanzenwachstum des Winterrapses im Herbst gewinnen und ist sogar eine potentielle Ertragseinschätzung für das Anbaujahr 2018/2019 möglich?*

Die Anwendung der Talking Fields Basiskarte hat gezeigt, dass anhand der darin enthaltenen relativen Biomasse-Abweichung Rückschlüsse auf die Pflanzenentwicklungsparameter des Winterrapses zum Zeitpunkt der Bonitur vor dem Winter möglich waren. Neben den Parametern BBCH-Stadium, Wurzelhalsdurchmesser und Einzelpflanzengewicht ließ sich insbesondere die Varianz der Trockenmasse der Rapspflanzen in einem verhältnismäßig hohen Maße durch die relative Biomasse-Abweichung erklären. Aus der Datenauswertung ging ebenso hervor, dass ein großer Anteil der Varianz des jeweiligen Pflanzenentwicklungsparameters nicht durch die relative Biomasse-Abweichung erklärt werden konnte, sodass eine gewisse Unsicherheit, bezüglich der Genauigkeit und Eignung der Basiskarte, in der praktischen Anwendung besteht.

Statistisch betrachtet waren die relative Biomasse-Abweichung nach Talking Fields und der Körnertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019 in keinen Zusammenhang zu bringen, sodass eine potentielle Ertragseinschätzung anhand der relativen Biomasse-Abweichung nicht möglich gewesen wäre. Auch der visuelle Vergleich der Basiskarte und der Ertragskarte zeigte, dass das Ertragspotential auf Basis der Standortqualitäten anhand der relativen Biomasse-Abweichung auf dem Untersuchungsschlag nicht zuverlässig und detailliert genug ausgewiesen werden konnte.

Auf Basis dieser Ergebnisse muss angenommen werden, dass sich Talking Fields Basiskarte insgesamt nicht dazu eignete, um Rückschlüsse auf die Pflanzenentwicklung und das Ertragspotential von Winterraps im Anbaujahr 2018/2019 zu ziehen, sodass sich für diese Untersuchung kein eindeutiger Mehrwert durch die Anwendung des Kartenmodells ergab.

Die genauere Analyse durch die praktische Arbeit mit der Talking Fields Basiskarte kann als eine Art Prüfung und Bewertung dieses Kartensystems aufgefasst werden. Diese soll Defizite aufzeigen, welche inhaltlich und im Umgang mit diesem Kartenmodell auftreten, um einen Ansatz zur Verbesserung im Sinne des Anwenders zu schaffen. Es deutet sich an, dass

auch über andere Geodatenquellen, wie die NDVI-Bilder der Sentinel-2-Satelliten, ähnliche oder zum Teil noch detailliertere Rückschlüsse auf das Pflanzenwachstum gezogen werden können. Da agrarisch genutzte Flächen diversen Umwelteinflüssen unterliegen und daraus fortwährend Veränderungen resultieren, kann es vorteilhafter sein, ein Kartenmodell zu nutzen, welches diese Einflussfaktoren über die Vegetationsperiode hinweg stetig einkalkuliert, wodurch eine höhere Aktualität und Anpassungsfähigkeit erzeugt wird.

Es ist anzumerken, dass durch die Anwendung der Basiskarte nicht beurteilt werden kann, inwieweit sich andere Kartenmodelle des Unternehmens Talking Fields für die praktische Anwendung eignen und welcher Mehrwert an Informationen mit Anwendung dieser erzielt werden könnte. Auch die Weiterverarbeitung der Basiskarte zu Teilflächen-spezifischen Applikationsmaßnahmen wurde in dieser Arbeit nicht verfolgt, sodass auch in dieser Hinsicht keine praktische Umsetzung stattfand und weiterführend geprüft werden sollte. Weiterhin ist die Basiskarte wohl teilweise veraltet, sodass mittlerweile eine Verbesserung, bezüglich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit, stattgefunden haben könnte.

Im Zuge der Bearbeitung stellte sich heraus, dass die Beprobung und Untersuchung von Pflanzenbeständen an heterogenen Standorten unabdingbar sind, um Aufschluss über die Variabilität des Pflanzenwachstums und Ertrags zu bekommen. Dabei ist es ebenso relevant, mögliche Ursachen einzubeziehen. Erst dadurch kann ein tatsächlicher Erkenntniszuwachs des Anwenders stattfinden und ein Mehrwert an Informationen wird realisierbar.

Die Weiterentwicklung und Verbesserung von, aus Satellitendaten realisierten Kartenmodellen, wird aufgrund der hohen Nachfragen auch zukünftig stattfinden und sich weiter an den Bedarf des Anwenders anpassen. Dieser Vorgang ist unabdingbar, um einen Informationsgewinn und eine praktische Umsetzung noch konsequenter realisieren zu können.

2. *Was können aktuell Fernerkundungsdaten der Sentinel-2-Satelliten leisten und wie gut können daraus Informationen über das Pflanzenwachstum des Witerrapses und dessen Körnertrag im Anbaujahr 2018/2019 gewonnen werden?*

Die Untersuchung hat gezeigt, dass eine Anzahl von mehreren Hundert Sentinel-2-Aufnahmen auch für die vergangenen Vegetationsjahre zur Verfügung stand. Davon konnten für das Anbaujahr 2018/2019, aufgrund von Störungen durch Wolken und Wolkenschatten, jedoch nur wenige genutzt werden. Aufgrund dessen wurde das verfügbare Material für eine Weiterverarbeitung stark eingeschränkt, sodass Aufnahmen, mit zum Teil großen zeitlichen Abständen, ausgewertet werden konnten, wodurch diese Arbeitsmethode keine lückenlose Datensammlung und -aufbereitung ermöglichte. Aufgrund der physikalischen Gegebenheiten und Eigenschaften der passiven Fernerkundung ist zu erwarten, dass die Wolkenbedeckung weiterhin den begrenzenden Faktor in der Satelliten-Fernerkundung darstellen wird und muss fortwährend bei der Arbeit in diesem Spektralbereich einkalkuliert werden.

Anhand von Fernerkundungsdaten der Sentinel-2-Satelliten, dem daraus berechneten NDVI und dessen kartographischer Darstellung, konnte die Entwicklung des Winterrapses über das Anbaujahr 2018/2019 und dessen Veränderungen auf dem Untersuchungsfeld sehr gut erkannt und abgebildet sowie zeitlich verhältnismäßig gut eingeordnet werden. Die Varianzen der Pflanzenentwicklungsparameter im Herbst, insbesondere der Bestandesdichte, Trockenmasse und Einzelpflanzengewicht sowie die Varianz des Körnertrags, waren statistisch in einem mittleren und hohen Maße erklärbar. Aufgrund der nicht unerheblichen Rest-Varianz ist jedoch zu vermuten, dass Rückschlüsse auf die Bestandesparameter und den Ertrag anhand des Vegetationsindex nicht uneingeschränkt möglich sind.

Satelliten-Fernerkundung bietet sowohl Vor- als auch Nachteile, sodass die Methodik auf Basis der individuellen Anforderungen bewertet werden muss. Die Beurteilung der Pflanzenentwicklung anhand des Vegetationsindizes NDVI und dessen Betrachtung in seiner Gesamtheit mittels der kartografischen Darstellung stellte sich als günstige Analysemethode heraus. Generell kann durch diese Fernerkundungsmethode eine flächendeckende Erfassung der Entwicklung landwirtschaftlicher Pflanzenkulturen realisiert werden, wodurch die Arbeit mit Satellitendaten auch eine gute Möglichkeit für den Einstieg in den Standort-spezifischen Pflanzenbau darstellt. Darüber hinaus ermöglicht die ESA mit dem Copernicus-Programm einen kostenlosen Zugang zu Satellitendaten in hoher Auflösung und Wiederkehrrate, was eine gute Alternative zu kostenpflichtigen Kartenmodellen, wie auch der Basiskarte, darstellen kann und die Attraktivität dieser Fernerkundungsmethode zur Informationsbeschaffung in Zukunft weiter steigern wird.

Es ist jedoch zu beachten, dass über diese Arbeitsmethode nur Gegebenheiten und Veränderungen an der Erdoberfläche detektiert werden können und die Ursachenforschung, bezüglich externer Einflüsse, damit weiterhin in der Hand des Anwenders bleibt. Darüber hinaus stellt der NDVI einen Vegetationsindex dar, der weitestgehend sichere Rückschlüsse auf den Pflanzenentwicklungsstatus von Winterraps zulässt, jedoch aufgrund seines Sättigungseffektes und Beeinflussungspotentials ebenso fehleranfällig ist. Die Beprobung von Pflanzenbeständen ermöglicht genaue Rückschlüsse auf die Pflanzenentwicklung und sollte daher weiterhin als eine am Boden lokalisierte Referenzdatenquelle genutzt werden. Die eigenständige Verarbeitung von Fernerkundungsdaten im GIS erfordert außerdem einen entsprechenden Kenntnisstand sowie ein hohes Maß an Zeit, was oftmals investiert werden muss. Durch diese Faktoren besteht insgesamt immer ein gewisses Fehler-Potential, was wiederum den Erkenntniszuwachs und die praktische Umsetzung erschweren und verzögern kann.

3. *Können zusätzliche Informationen durch GreenSeeker-Messungen und Relativvertragskarten über das Wachstum des Winterrapses und dessen Körnertrag auf dem Untersuchungsschlag im Anbaujahr 2018/2019 gewonnen werden?*

Die Ergebnisauswertung zeigte, dass anhand des GreenSeeker-NDVI die Varianz der Pflanzenentwicklungsparameter Bestandesdichte, Trockenmasse und Einzelpflanzengewicht im Herbst sowie des Körnertrags des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019 in einem niedrigen bis mittleren Maße erklärt werden konnte. Aufgrund dieser Ergebnisse ist anzunehmen, dass in dieser Untersuchung nur begrenzt Informationen durch den GS-NDVI über den Gesundheits- und Entwicklungsstatus des Winterrapses gewonnen werden konnten. Der Einsatz des GreenSeekers kann jedoch als zusätzliche Informationsquelle genutzt werden, da dieser neben Se2-Satellitenaufnahmen die Möglichkeit bietet, zu einem individuell planbaren Zeitpunkt eine relativ große Messfläche zu betrachten und einen Überblick über die Pflanzenentwicklung zu bekommen. Parallel zu der Arbeit mit dem GreenSeeker-System sollten insgesamt Referenzmessungen durch beispielsweise Fernerkundungsdaten erfolgen, um die Datensicherheit und Genauigkeit zu steigern.

Im Gegensatz zu dem GS-NDVI waren die Relativverträge der Jahre 2003 - 2012 und 2006 - 2015 insgesamt nicht dazu geeignet, Rückschlüsse auf die genannten Bestandesparameter und den Körnertrag des Winterrapses im Anbaujahr 2018/2019 zu ziehen. In dem untersuchten Erntejahr war resümiert somit kein eindeutiger Mehrwert an Informationen durch die Relativvertragskarten realisierbar. Es wird jedoch Abstand von der Aussage genommen, dass über Relativverträge insgesamt keine zusätzlichen Informationen über das Wachstumspotential auf dem Untersuchungsschlag hätten gewonnen werden können. Die beschriebene eingeschränkte Aktualität der RE und das vermutlich gesteigerte Wachstumspotential des Winterrapses im Frühjahr 2019 könnten zu diesem Ergebnis geführt haben. REK können dazu eingesetzt werden, um eine Vorstellung von dem vergangenen und zukünftigen Ertragspotential und der Ertragsstruktur zu bekommen, wodurch die Verwendung dieser Geodatenquelle jeweils am Anfang und am Ende eines jährlichen Arbeitsprozesses im Standort-spezifischen Pflanzenbau eingeordnet werden könnte.

Sowohl die Anwendung des GreenSeeker-Systems als auch die Nutzung von Relativvertragsdaten in dieser Arbeit verdeutlichen, wie wichtig eine konsequente Datensammlung und -aufbereitung ist. Erst durch weitestgehend lückenlose Datenstruktur können Erkenntnisse gewonnen, Schlag-spezifische Entwicklungen beobachtet und mögliche Ursachen ermittelt werden. Diese Arbeitsschritte werden jedoch weitestgehend in der Hand des Anwenders bleiben und können nur bedingt auf externe Unternehmen ausgelagert werden.

7 Zusammenfassung

Standort-spezifische Anbauverfahren auf Basis von Satellitendaten sind von immer größerer Bedeutung, da sich die radiometrische und temporale Auflösung dieser Fernerkundungsmethode deutlich verbessert hat. Der Auswertung von Sentinel-2- Satellitendaten und Kombination mit anderen Geodaten, wie Pflanzenwachstumsmodellen, haben sich Fachnutzer, wie das Unternehmen Talking Fields von Vista, angenommen und entwickeln daraus Übersichts- und Applikationskarten, die den Landwirt bei der Entscheidungsfindung für eine angepasste Anbaustrategie auf insbesondere heterogenen Standorten unterstützen sollen.

In der vorliegenden Arbeit wurde auf einem Ackerschlag in der Nähe von Neubrandenburg in Mecklenburg-Vorpommern untersucht, inwieweit sich speziell Sentinel-2- Satellitendaten, das daraus generierte Produkt „Basiskarte“ des Fachnutzers Talking Fields, aber auch GreenSeeker-Messungen und Relativvertragsdaten dazu eignen, um einen Mehrwert an Informationen über die Bestandesentwicklung und den Körnertrag von Winterraps im Anbaujahr 2018/2019 zu erhalten.

Im Rahmen der Arbeit wurden die Beziehungen zwischen ausgewählten Bestandesparametern von Winterraps und den verwendeten Referenzdatenquellen visuell und statistisch ausgewertet. Dazu wurde die Entwicklung des Winterraps auf dem Untersuchungsschlag über das Anbaujahr hinweg begleitet, indem verschiedene Pflanzenentwicklungsparameter zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Vegetationsjahr an 18 Punkten gemessen und vor dem Winter beprobt wurden. Als Referenzdatenquellen wurden neben der relativen Biomasse-Abweichung, entnommen aus der Talking Fields Basiskarte, auch der Vegetationsindex NDVI, welcher anhand von Sentinel-2-Satellitenbildern und Messungen des GreenSeekers ermittelt worden ist, sowie Relativvertragsdaten des Untersuchungsschlags der Jahre 2003 - 2012 und 2006 - 2015 genutzt.

Die Untersuchungen erbrachten resümiert folgende Ergebnisse:

- Anhand der relativen Biomasse-Abweichung aus der Talking Fields Basiskarte waren Rückschlüsse auf den vorwinterlichen Entwicklungsstand von Winterraps möglich. Die relative Biomasse-Abweichung war jedoch nicht geeignet, um auf den Körnertrag des Winterraps in dem untersuchten Anbaujahr zu schließen.
- Der besondere Vorteil der Satelliten-Fernerkundung über Sentinel-2 ist der kostenlose und simple Zugang zu einer großen Anzahl an Aufnahmen mit einer vergleichsweise hohen Auflösung. Die Anzahl verfügbarer Sentinel-2-Satellitenbilder hat sich dabei in den vergangenen Jahren stark erhöht, jedoch wird die Verwendbarkeit dieser, aufgrund von Wolken und Wolkenschatten, stark dezimiert, was die Informationsbeschaffung über diese Methode begrenzt und auch in Zukunft weiterhin einschränken wird.

- Sentinel-2-Satellitenszenen und der daraus berechnete Vegetationsindex NDVI eigneten sich gut, um die Veränderungen auf dem Untersuchungsfeld ganzheitlich zu überblicken und Rückschlüsse auf die Bestandesparameter vor dem Winter und den Ertrag von Winterraps ziehen zu können. Dabei kann insgesamt kein spezifischer Zeitpunkt in der Vegetationsperiode benannt werden, an welchem die Varianz des Körnertrags in besonders hohem Maße anhand des NDVI erklärbar ist.
- Der NDVI, welcher durch den GreenSeeker zum Zeitpunkt der vorwinterlichen Bonitur gemessen worden ist, erlaubte Rückschlüsse auf den Pflanzenentwicklungsstand und späteren Körnertrag von Winterraps auf einem geringen bis mittleren Niveau.
- Anhand der Relativverträge und visuellen Auswertung der Relativvertragskarten konnten insgesamt keine zusätzlichen Informationen über die Entwicklung und den Körnertrag von Winterraps gewonnen werden.
- Erst eine konstante Sammlung und Aufbereitung von Satelliten- und Sensor-Daten und Kombination von aktuellen Bestandesparametern ermöglichen ein zuverlässiges Erkennen und eine aussagekräftige Interpretation von Gegebenheiten und Veränderungen auf Ackerschlägen. Dabei sollten mögliche Ursachen von Schlagspezifischen Heterogenitäten bei der Auswertung und Anwendung von Satellitendaten sowie Übersichts- und Applikationskarten immer berücksichtigt werden.
- Es existiert ein breites Angebot an Fachnutzern von Satellitendaten, wodurch in der Theorie genügend Informationsprodukte über die Variabilität von Ackerschlägen vorhanden sind. Der eigentliche Bedarf liegt in der Unterstützung des Landwirtes bei der Interpretation und Anwendung von diesen online generierten Applikationskarten.

Im Rahmen der Arbeit wurde deutlich, dass die Verarbeitung von verschiedenen Geodaten für Teilflächen-spezifische Anbauverfahren eine Vielfalt von Pfaden und Optionen in der Analyse, Entscheidungsfindung und Gestaltung darstellen. Die Satelliten-Fernerkundung und die Nutzung der daraus gewonnenen Daten bieten ein enormes Potential für die Beschaffung raumbezogener Informationen, sodass das Ziel von Fachnutzern, wie Talking Fields, daraus Informationsprodukte für den Landwirt zu generieren, unbedingt weiterverfolgt und stetig dem Bedarf der praktischen Landwirtschaft angepasst werden sollte. Die Prüfung von Geodaten und online generierten Kartenmodellen kann dabei helfen, die Defizite sowohl in der Genauigkeit als auch Umsetzbarkeit dieser aufzuzeigen und somit einen Ansatz für Verbesserungsmöglichkeiten im Sinne des Anwenders zu schaffen.

9 Quellenverzeichnis

Literatur

ALBERTZ, J. (2007): *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG), ISBN: 978-3-534-19878-8, S. 1-221

ALBERTZ, J. und WIGGENHAGEN, M. (2009): *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung*, Wichmann-Verlag, 5. Auflage, 334 Seiten, ISBN: 978-3-87907-384-9.

ANDREO, V. (2013): *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Precision Agriculture*, Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich" - CONAE / UNC, Facultad de Matematica, Astronomia y Física - UNC

BEGIEBING, S.; BACH, H.; WEHRHAN, M.; MAUSER, W (2006): *Derivation of Canopy Parameters of Wheat Using Hyperspectral, Directional Remote Sensing Data and the Canopy Reflectance Model SLC*, Vista Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. - Institut für Bodenlandschaftsforschung, Department for Earth and Environmental Sciences

BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2014): *Bodenübersichtskarte von Deutschland, 1 : 3 000 000*

BIERTÜMPFEL, A.; GRAF, T.; ORMEROD, C. (2018): *Ölfrüchte und Nachwachsende Rohstoffe - Feldversuchsbericht 2016/17*, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

BIEWER, S.; ERASMI, S.; FRICKE, T.; KAPPAS, M.; WACHENDORF, M (2006): *Schätzung des Ertrags und der Bestandeszusammensetzung von Leguminosen/Gras-Gemengen mittels Feldspektroskopie - Erste Ergebnisse eines Gefäßversuches*, Georg-August-Universität Göttingen - Geographisches Institut, Universität Kassel - Fachgebiet Grünlandökologie und Futterbau

BROCKERHOFF, H. (2016): *Winterraps - Allgemeine Infos und Aussaatstärken*, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Bericht, 2 Seiten.

BUDDEBERG, M. (2019): *Schriftliche Mitteilung (12.03.2019)*, Vista Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH - Talking Fields

COMBERG, C. (2014): *Einfluss der Bestandesarchitektur auf die Ertragsbildung im Winterraps (Brassica napus L.)*, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften, 399 Seiten

DIENST, L. (2018): *Eignung und Kombination verschiedener Geodaten zur Ableitung von Ertragserwartungskarten für Winterweizen*, Masterthesis, 89 Seiten, Georg-August Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften

DIEPENBROCK, W. (2000): *Yield Analysis of Winter Oilseed Rape (Brassica napus L.): A Review*, *Field Crops Research*, 67, 35-49

DIEPENBROCK, W.; ELLMER, F.; LÉON, J. (2016): *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Grundwissen Bachelor*, 4. Auflage, Ulmer-Verlag, ISBN: 978-3-8252-4607-5

EDER, J. und BRANDHUBER, R. (2014): Getreide- und Maisbau, in: *Landwirtschaftlicher Pflanzenbau*, 13. Auflage, ISBN: 978-3-8354-0716-9, BLV-Buchverlag

EHLERT, I. und SCHWEITZER, C. (2018): *Copernicus für das Umweltmonitoring - Eine Einführung*, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Hamburg), Umweltbundesamt (Dessau-Roßlau)

ERASMI, S. (2002): *Analyse spektroradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen*, Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

FARMFACTS (2016): *Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung mit AO GreenSeeker - Erträge steigern, Kosten senken, Umwelt schonen, Sensortage 2016 in Mecklenburg-Vorpommern*, Vortrag, 31 Seiten, Farm Facts GmbH & Co. KG

GEISLER, G. (1983): *Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas*, Paul Parey-Verlag, ISBN: 3489610105

GEISLER, G. (1988): *Pflanzenbau - Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion*, Paul Parey-Verlag, ISBN: 978-3826328978

GEISLER, G. und STOY, A. (1987): *Untersuchungen zum Einfluß der Bestandesdichte auf das Ertragspotential von Rapspflanzen (Brassica napus L. var. napus)*, In: *Journal of Agronomy and Crop Science*, Ausgabe 4, 159 Seiten, Seite 232-240

GRENZDÖRFFER. (1999): *Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS*, In: *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität*, KTBL-Arbeitspapier 264, Seite 93-105, ISBN 3-7843-1993-9

GRENZDÖRFFER, G. und BILL, R. (2001): *Wieviel Fernerkundung braucht der Landwirt, heute und in Zukunft*, Universität Rostock, Institut für Geodäsie und Geoinformatik, Bericht, 10 Seiten

GRIPENTROG, H.W. (1998): *Fehlerquellen der Ertragsermittlung beim Mähdresch*, Department of Agricultural Sciences , Agricultural Engineering. in *LANDTECHNIK* (5/98), S. 288-289.

HANK, T.; LOCHERER, M.; RICHTER, K.; MAUSER, W. (2012): *Die Bedeutung physikalisch basierter Auswerteverfahren für die Anwendung von Erdbeobachtungsdaten in der Landwirtschaft - Eine Analyse im Hinblick auf die Wissenschaftsmission EnMAP*, Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Geographie und Geographische Fernerkundung, Department für Geographie, Fakultät für Geowissenschaften, Vortrag, 33 Seiten

HEIDEN, U.; ROGGE, D.; ZEIDLER, J.; ESCH, T.; MÜLLER, A.; BACHMANN, M. (2015): *Die Ressource Boden Neue Informationen aus optischen Satellitenbild-Zeitreihen*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Vortrag, 26 Seiten, Abteilung Landoberfläche (LAX)

HEILMANN, H.; ZIESEMER, A.; JAKOBS, M. (2018); *Erntebericht MV 2018 (31. KW)*, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei, Institution für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft, Bericht, 11 Seiten

HERBOLD. (2015): *Fernerkundung in der Ernteversicherung - Möglichkeiten und Grenzen*, D-GEO Arbeitsgruppe (“Group on Earth Observation” – deutsche Sektion), Vortrag, 14 Seiten

JÜRSCHICK, P.; WENDROTH, O.; GIEBEL, A. (1998): *Beziehungen zwischen lokalen Ertragsdaten und Fernerkundungsdaten*, Institut für Agrartechnik Bornim ATB (Potsdam), Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (Müncheberg), Agrartechnische Forschung, Bd. 4 Nr. 2, S. 94-102

KRUG, J. (2013): *Perspektiven ackerbaulicher Grenzstandorte in Nordostdeutschland*, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Thünen Report 6, ISBN: ISBN 978-3-86576-106-4

LANCASHIRE, P. (1991): *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen - BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien von Raps*. Bayer plc. Eastern Way

LEHMANN, E. (2004): *Aspekte der GPS-gestützten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung in Mecklenburg-Vorpommern*, Abschlussbericht, 23 Seiten, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Institut für Betriebswirtschaft.

LILIENTHAL, H. (2003): *Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft*, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) - Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Braunschweig: in Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 254

LÖFFLER, E.; HONECKER, U.; STABEL, E. (2005): *Geographie und Fernerkundung: Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten*, Borntraeger-Verlag, 3. Auflage, ISBN: 978-3443071400

LUNG (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (2005): *Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern*, Bericht 88 Seiten, 2. Auflage

MISTELE, B. (2014): *Sensoren für die Stickstoff-Düngung*, Präsentation Amazone Active-Seminar 2014, 30 Seiten

NOACK, P. (2007): *Ertragskartierung im Getreidebau*, KTBL- Heft 70, ISBN: 978-3-939371-42-7

PANTEN, K. (2002): *Beitrag Fernerkundung räumliche Variabilität Boden- und Bestandesmerkmalen*, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde (Braunschweig), Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 232

PETERS, J. (2019): *Wie kann sich der Anbau von Winterraps wieder lohnen?* Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei, Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft, Vortrag, 39 Seiten

RECKLEBEN, R. (2019): *Sensor- und satellitengestützte Stickstoff-Düngung - Ein Weg zu mehr N-Effizienz?*, Getreide Magazin 01/2019, ISSN 2191-5172

REICHARDT, M. (2010): *Precision Farming in der deutschen Landwirtschaft - eine GIS-gestützte Analyse*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Geowissenschaften

RIPPEL, R.; BRANDHUBER, R.; BECK, R.; WALTER, R. (2014): *Bodenkundliche Grundlagen - Humus, Bodenleben*, In: *Landwirtschaftlicher Pflanzenbau*, 13. Auflage, ISBN: 978-3-8354-0716-9, BLV-Buchverlag

SCHAEPMANN, M. und WULF, H. (2015): *Grundlagen der Fernerkundung -14*, Vortrag, 79 Seiten, University of Zurich - Department of Geography

SCHLIEPHAKE, W. (2011): *Anforderungen an eine teilflächenspezifische N-Düngung unter besonderer Berücksichtigung einer umweltorientierten Nährstoffversorgung auf trockenen Standorten*, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Sachsen), Schriftenreihe, Heft 17/2011

SCHMIDT, G. (2010): *Bodenarten*, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Ref. 22, Sachgebiet Bodenuntersuchung

SCHÖNBERGER, H. (2013): *Rapsanbau: Ein Leitfaden für Bestandesaufbau, Bestandesführung und Ertragssicherung*, AGROCONCEPT-Verlag, 1. Auflage, ISBN: 978-3981454925

SCHROEDER, D. und BLUM, E. (1992): *Bodenkunde in Stichworten*, Ferdinand-Hirt-Verlag, 5. Auflage, ISBN: 3-443-03103-X

SPICKER, A. (2016): *Entwicklung von Verfahren der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (Hordeum vulgare L.) und Winterraps (Brassica napus L.) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen*, Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

STATISTISCHES AMT M-V (2016): *Agrarstrukturerhebung 2016*, Poster, Bestell-Nr.: Z961 2016 01

STATISTISCHES AMT M-V (2018): *Erträge von Getreide und Raps in Mecklenburg-Vorpommern*, Anlage zur Presseinformation Nr. 25/2018

STATISTISCHES AMT M-V (2019): *Ernteberichterstattung über Feldfrüchte und Grünland in Mecklenburg-Vorpommern*, Statistische Berichte - Wachstumsstand und Ernte, Kennziffer C213 2019 06

TREUE, P. (2003): *Potentiale und Grenzen teilflächenspezifischer N-Düngung in Schleswig-Holstein/Precision Agriculture*, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät, 138 Seiten

VOß, K. (2005): *Beitrag zur skalenabhängigen Erfassung teilschlagspezifischer Pflanzenschäden mit Methoden der Fernerkundung und Geoinformationen*, Dissertation, 276 Seiten, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

WEBER, H. und BLEIHOLDER, E. (1990): *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen - BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien von Raps*, BASF AG - Landwirtschaftliche Versuchsstation

WEINMANN, M. und WEIDNER, U. (2018): *Erste Erfahrungen mit der Nutzung von Sentinel-2 Daten zur multispektralen und multitemporalen Analyse mit verschiedenen Klassifizierungsverfahren*, 38. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFGK18 Tagung, München, Publikationen der DGPF, Band 27

WINTER, C.; BACKER, V.; ADOLPH, W.; BARTHOLOMÄ, A.; BECKER, M.; BEHR, D; u.A. (2016): *WIMO - Wissenschaftliche Monitoringkonzepte für die Deutsche Bucht - Abschlussbericht*, 158 Seiten, DOI 10.2314/GBV:860303926

Internet

BALDENHOFER, K. (2019): *Lexikon der Fernerkundung*, abgerufen von <http://www.fe-lexikon.info/index.htm>, Abschnitt: Fernerkundung (FE)

BROCKERHOFF, H. (2019): *Landessortenversuche Winterraps 2019*, *Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen*, von <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/raps/winterraps-sv-2019.htm> abgerufen

COPERNICUS (2019a): *Die Sentinel-Satellitenfamilie*, von Copernicus - Europas Blick auf die Erde: <https://www.d-copernicus.de/daten/satelliten/daten-sentinels/> abgerufen

COPERNICUS (2019b): *Copernicus Open Access Hub, Satellitenaufnahmen Sentinel-2*, von <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> abgerufen

DEKALB (2019): Sorteneigenschaften DK Exlibris, von <https://www.dekalb.de/raps/sortenuebersicht/dk-exlibris> abgerufen

ESA (2015): *Wie Landwirte von Satellitendaten profitieren*, von http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Wie_Landwirte_von_Satellite_ndaten_profitieren abgerufen

ESA (2017): *Sentinel-2 - Colour Vision for Copernicus, Dokument (2 Seiten)*, von <https://www.d-copernicus.de/daten/satelliten/daten-sentinels/> abgerufen

ESA (2019): *Spezial: Copernicus - Europas Wächter im Weltraum*, von http://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Spezial_Copernicus_-_Europas_Waechter_im_Weltraum abgerufen

Geoportal M-V. (2019): *Digitales Orthophoto (DOP), Bodenübersichtskarte (BÜK)*, von https://www.geoportal-mv.de/portal/Geowebdienste/Fachthemen/Landwirtschaft_und_Forst abgerufen

Google-Maps. (2019). *Kartografische Übersicht von Mecklenburg-Vorpommern*. Von <https://www.google.de/maps/preview> abgerufen

KALAITZIDIS, C., & MANAKOS, I. (2012): *Fernerkundung in der Landwirtschaft*, Science Education through Earth Observation for High Schools (SEOS), von <https://seos-project.eu/agriculture/agriculture-c00-p01.de.html> abgerufen

OSOL, R. (2019): *Drastischer Rückgang: In MV wird immer weniger Raps angebaut*. (OSTSEE-ZEITUNG, Herausgeber) Von <https://www.ostseezeitung.de/Nachrichten/MV-aktuell/Weniger-Raps-MV-verzeichnet-Ernteverlust> abgerufen

SCHMIDT, A. (2017): *Über den Droneneinsatz im Pflanzenbau und die EXAgT ist auf der MeLa 2017*. EXAgT GbR - Büro für präzise Agronomie, von <https://news.exagt.de/?p=442> abgerufen

TALKING-FIELDS. (2019): *Produktblatt TalkingFields Basiskarte, TF Basiskarte (Dokument)*, von <http://www.talkingfields.de/downloads/> abgerufen

VISTA (2019a): *Profil, Vista GmbH - Geowissenschaftliche Fernerkundung*, von <http://www.vista-geo.de/profil/> abgerufen

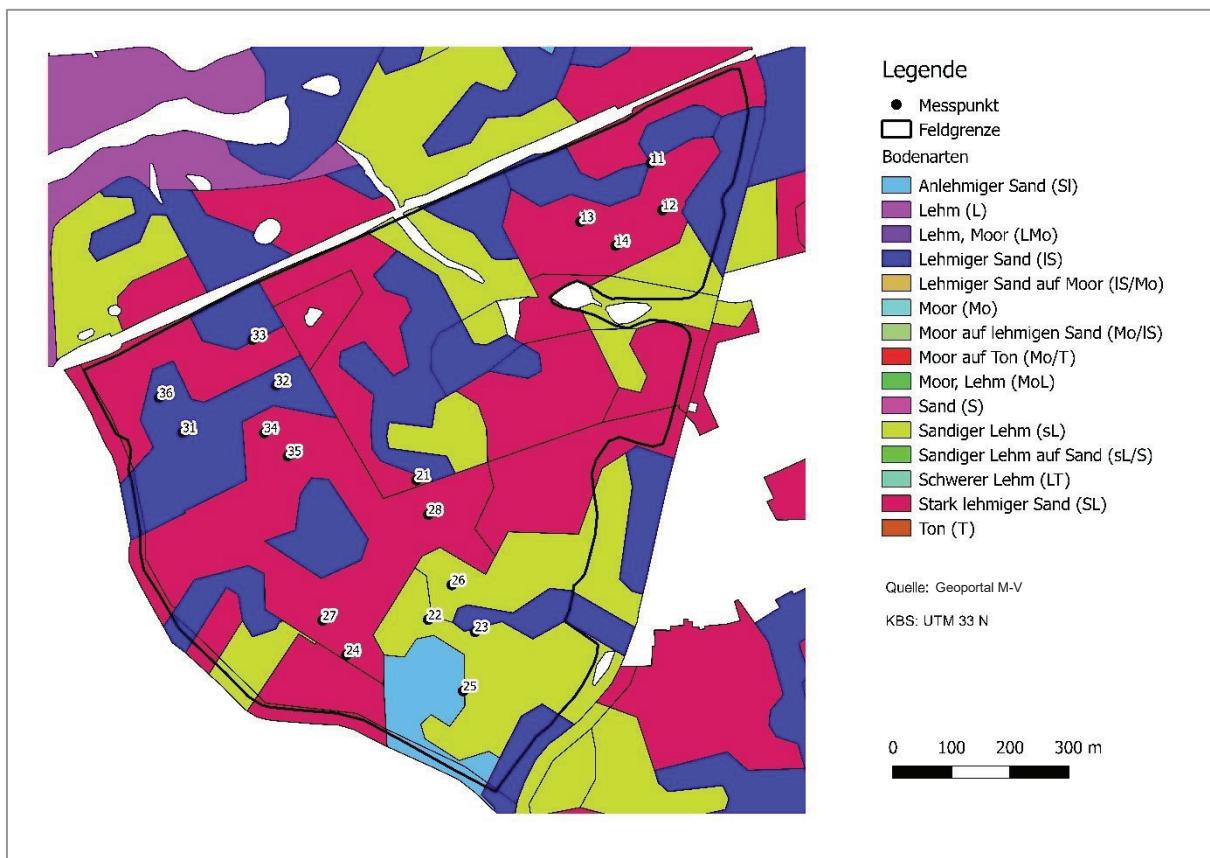
VISTA (2019b): *Smart Farming*, Vista GmbH - Geowissenschaftliche Fernerkundung (Vista GmbH, Fernerkundung und Modellierung für Hydrologie, Landwirtschaft und Umwelt), von <http://www.vista-geo.de/portfolio-items/smart-farming> abgerufen

Wetterdaten

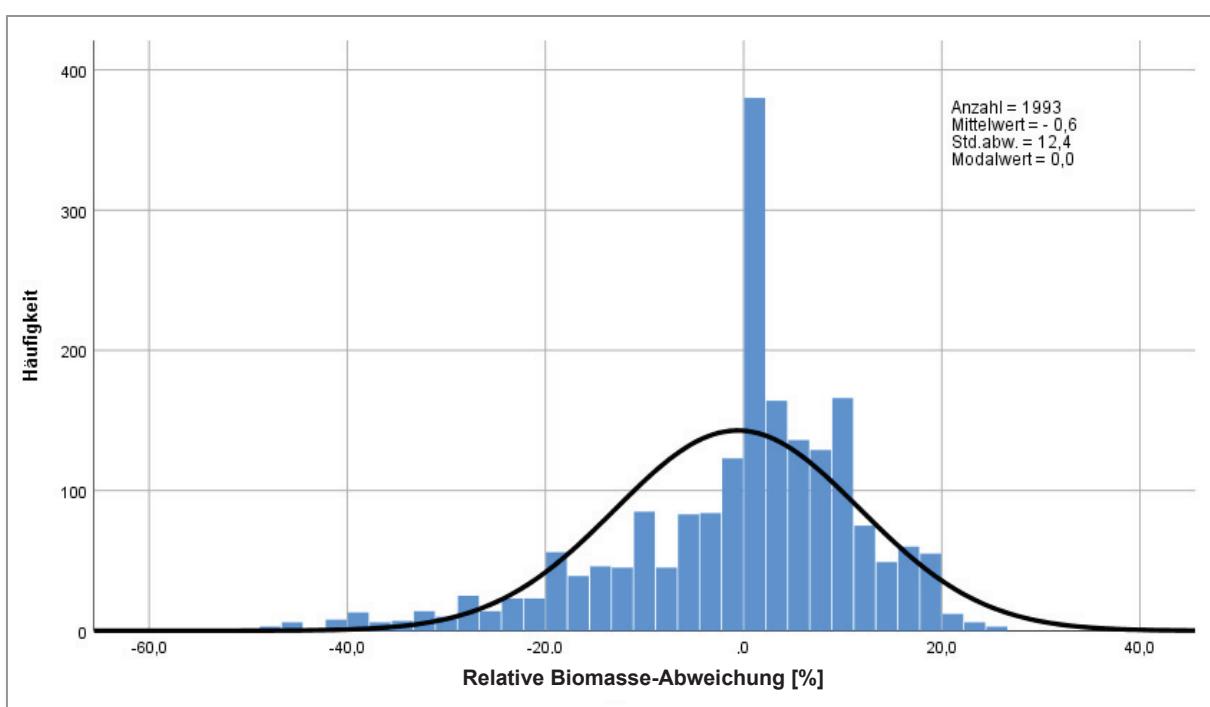
climate-data.org (2019): *Wetterdaten Neubrandenburg*, von <https://de.climate-data.org/europa/deutschland/mecklenburg-vorpommern/neubrandenburg-9287/#climate-graph> abgerufen

Wetterstation Neubrandenburg/Trollenhagen (2019): *Wetterdaten über: expert.classic, proPlant Gesellschaft für Agrar- und Umweltinformatik mbH, Münster*

Anhang

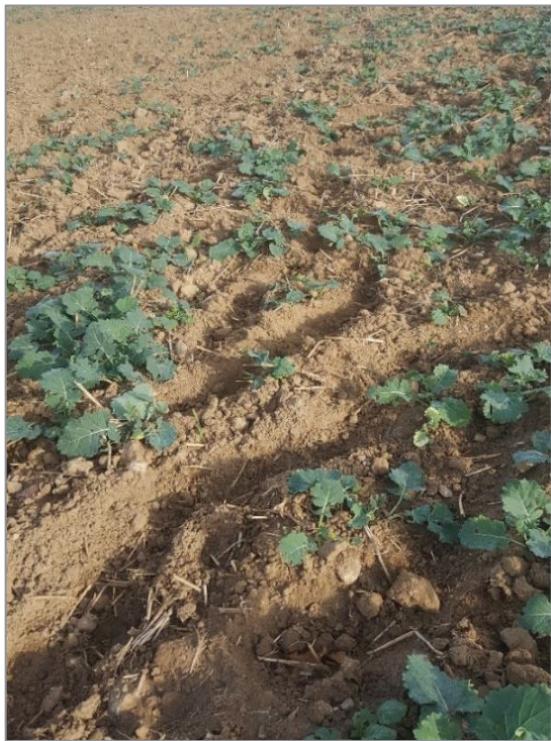


A-1: Bodenübersichtskarte des Untersuchungsfeldes (Eigene Darstellung in QGIS 2.18.22)

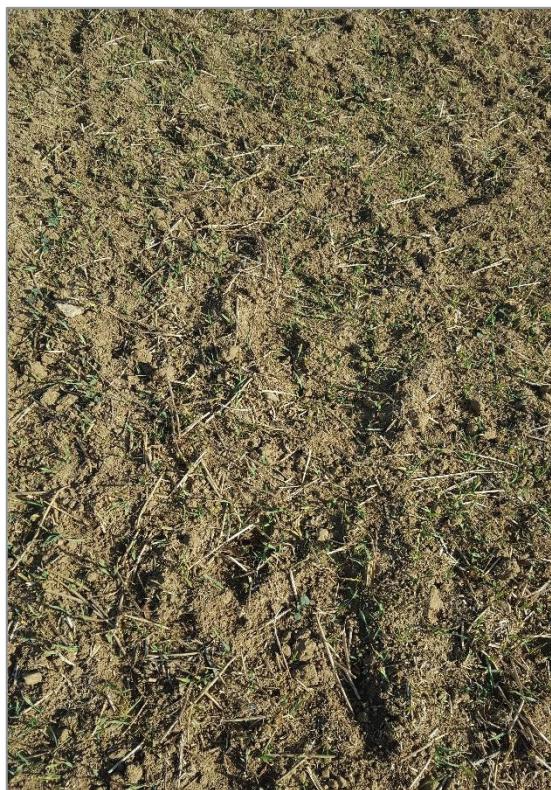


A-2: Histogramm der relativen Biomasse-Abweichung [%] nach Talking Fields (über: SPSS Statistics 27)

A- 3: Ergebnisse der Feldbegehungen



A-4: Wildschäden auf dem Untersuchungsschlag (Foto: Kunkel, 10.11.2018)

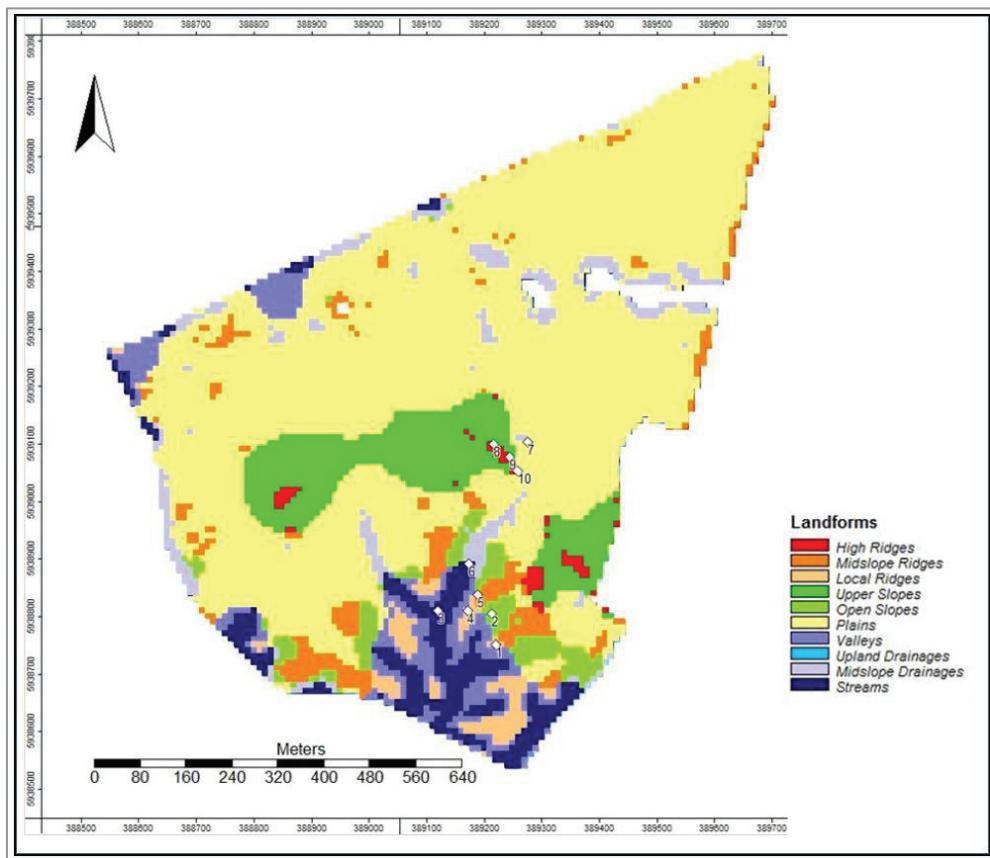


A- 5: Strohrückstände und Ausfallgetreide auf dem Untersuchungsschlag an Punkt 22 (Foto: Kunkel, 05.09.2018)

Fragen zur Nutzung von Satellitendaten und von Online-Anbietern generierten Kartenmodellen für den Standort-spezifischen Pflanzenbau

- Aus welchem Grund nutzen Sie Fernerkundungsdaten?
- Wofür nutzen Sie Fernerkundungsdaten?
- Was versprechen Sie sich von der Nutzung von Satellitendaten?
- Was bedeutet für Sie der erfolgreiche Einsatz von Satellitendaten?
- Welche Ziele konnten Sie bisher durch die Nutzung erreichen und welche Ziele möchten Sie in Zukunft noch erreichen?
- Wie realisieren Sie die Einbindung und Umsetzung von Fernerkundungsdaten und Applikationskarten in den Betriebsalltag?
- Sehen Sie Satellitendaten als Gewinn für den Standort-spezifischen Pflanzenbau?
- Welche Probleme treten aus Ihrer Sicht bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten und Applikationskarten von Online-Anbietern auf?
- Lohnt sich aus Ihrer Sicht eine Investition in Kartenmodelle von externen Anbietern?
- Für welche Ziele ist Talking Fields geeignet?

A-6: Fragen zur Nutzung von Satellitendaten und von Online-Anbietern generierten Kartenmodellen für den Standort-spezifischen Pflanzenbau



A-7: Reliefkarte des Untersuchungsfeldes (DIENST 2018)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Hilfsmittel als angegeben verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift