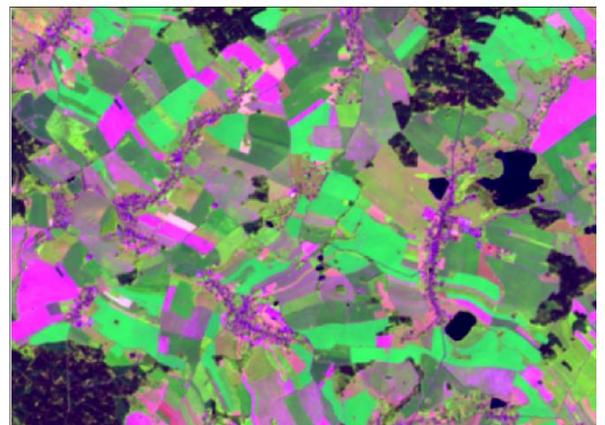
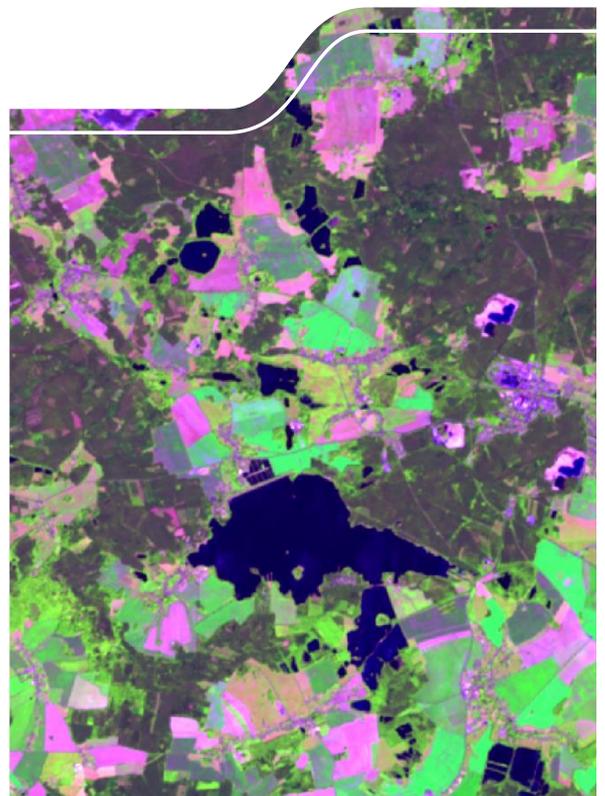


Satellitengestützte Ertrags- erhebung

Schriftenreihe, Heft 21/2016



Satellitengestützte Ertragserhebung

Dr. Heike Bach, Silke Migdall, Franziska Brohmeyer,
Lena Brüggemann, Marion Buddeberg

1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	10
2	Testbetriebe	11
3	Verwendete Daten	13
3.1	Satellitendaten	13
3.1.1	Begründung der Auswahl der Satellitendaten.....	13
3.1.2	Überblick über verwendete Satellitendaten	14
3.2	Vom Auftraggeber bereitgestellte In-Situ-Daten	14
3.3	Basisdaten für das Pflanzenwachstumsmodell.....	20
4	Verwendete Methoden	21
4.1	VISTA's Image Analysis Chains (VIAs)	21
4.2	Reflexionsmodell (SLC)	22
4.3	Pflanzenwachstumsmodell (PROMET).....	25
5	Ergebnisse	26
5.1	Vorprozessierung der Satellitendaten.....	26
5.2	Pflanzenparameter aus Satellitendaten	29
5.2.1	Winterweizen	29
5.2.2	Wintergerste	31
5.2.3	Sommergerste	32
5.2.4	Roggen.....	33
5.2.5	Silomais	33
5.2.6	Körnermais	34
5.2.7	Raps	34
5.3	Ertragsmodellierung.....	35
5.4	Aufbereitung der In-Situ-Ertragskarten	43
5.4.1	Konvertierung der Ertragsdaten in nutzbare Shape-Dateien	43
5.4.2	Bereinigung des Datensatzes	43
5.4.3	Interpolation der Punktdaten.....	45
5.4.4	Kalibrierung mit gelieferten Wiegeergebnissen	45
6	Validierung der Ergebnisse	47
6.1	Teilflächenspezifische Validierung.....	47
6.2	Validierung auf Schlagebene.....	51
6.2.1	Winterweizen	52
6.2.2	Wintergerste	53
6.2.3	Sommergerste	54
6.2.4	Winterroggen	56
6.2.5	Körnermais	57
6.2.6	Silomais	57
6.2.7	Winterraps	59
6.2.8	Gesamtergebnis	60
6.3	Validierung auf Standortebeine	66
6.4	Bewertung der Bodendaten für die Ertragsmodellierung	72
7	Zusammenfassung und Ausblick	77
8	Anhang	81
	Literaturverzeichnis	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lage der drei Testbetriebe in Sachsen mit Information über die Abdeckung durch Aufnahmekacheln der Satelliten RapidEye und Landsat (Quelle: LfULG, USGS, BlackBridgeTM)	11
Abbildung 2:	Felder der drei Testbetriebe im Jahr 2013.....	12
Abbildung 3:	Felder der drei Testbetriebe im Jahr 2014.....	12
Abbildung 4:	Felder der drei Testbetriebe im Jahr 2015.....	13
Abbildung 5:	Fruchtart Winterweizen, Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, mittleres Ergebnis über alle drei Standorte, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung pro Standort und damit die Variabilität der einzelnen Ausprägungen zum Mittelwert.	17
Abbildung 6:	Fruchtart Silomais (links) bzw. Körnermais (rechts), Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.	18
Abbildung 7:	Fruchtart Winterroggen (links) bzw. Sommergerste (rechts), Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.	18
Abbildung 8:	Fruchtart Wintergerste, Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, mittleres Ergebnis über alle drei Standorte, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.	19
Abbildung 9:	Fruchtart Winterraps, Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, mittleres Ergebnis über alle drei Standorte, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.	19
Abbildung 10:	Ablaufschema der Prozessierung von Satellitendaten für die quantitative Ableitung von Pflanzenparametern (Quelle: VISTA).....	22
Abbildung 11:	Prinzip der Strahlungstransfermodellierung" (Quelle: VISTA)	23
Abbildung 12:	Konzept und Eingangsparameter des Strahlungstransfermodells SLC (VERHOEF & BACH 2007). Grün markiert sind die Parameter, die sich zwischen den einzelnen Fruchtarten unterscheiden, rot markiert sind die Parameter mit deutlicher Variabilität innerhalb einer Fruchtart, die aus den Satellitenbildern durch numerische Invertierungsmethoden pixelweise abgeleitet werden.	24
Abbildung 13:	Räumlich verteilter Rechenansatz von PROMET	25
Abbildung 14:	Kalibrierung des Modells über Satellitendaten	26
Abbildung 15:	Klassifikation von Schnee, Wolken und Wolkenschatten am Standort Ost	27
Abbildung 16:	Klassifikation überschwemmter Flächen am Standort West	28
Abbildung 17:	Reflexionsspektrum von Winterweizen im zeitlichen Verlauf des Jahres 2014	29
Abbildung 18:	Räumliche Darstellung des LAI-Verlaufs; als Beispiel dient der Winterweizen am Standort Süd im Jahr 2014.	31
Abbildung 19:	Lufttemperatur in °C, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagesmittelwerte für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	35
Abbildung 20:	Niederschlag in mm, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	35
Abbildung 21:	Bodenfeuchte in Vol.% in unterschiedlichen Bodentiefen (Layer1 = 0,05 m, Layer2 = 0,20 m, Layer3 = 0,65 m, Layer4 = 2,00 m), simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagesmittelwerte für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	36

Abbildung 22:	Verdunstung in mm nach Verdunstungsart, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	36
Abbildung 23:	Schneespeicher, angegeben als Schneewasseräquivalent in mm, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	37
Abbildung 24:	Phänologie von Winterweizen, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis und aggregiert zu Tageswerten für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	38
Abbildung 25:	Verteilung bzw. Allokation der produzierten Biomasse in die einzelnen Pflanzenkompartimente Wurzeln, Blatt, Stängel und Korn, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis für die Fruchtart Winterweizen und angegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	38
Abbildung 26:	Grüne Blattfläche von Winterweizen in m^2/m^2 , simuliert in PROMET auf stündlicher Basis und angegeben als Tagesmittelwerte für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014	39
Abbildung 27:	Beeinflussung des Winterweizen-Wachstums an Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014 durch Wasserstress, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis und angegeben als dimensionsloser Faktor (1 = optimale Wasserversorgung).....	39
Abbildung 28:	Ertrag des Winterweizen-Schlags 431/0 am Standort West in t/ha unter optimalen Bedingungen (normale Phänologie, optimale Nährstoffversorgung), simuliert in PROMET für die Ernte nach der Wachstumsperiode 01.09.2013-31.08.2014	39
Abbildung 29:	Vergleich des in PROMET simulierten jahresspezifischen Ertragspotenzials für Winterweizen am Standort Süd für die Jahre 2013, 2014 und 2015 mit den entsprechenden mittleren gewogenen Erträgen des Standorts	40
Abbildung 30:	Entwicklung der grünen Blattfläche (LAI) von Winterweizen, simuliert im PROMET-Ensemble auf Basis der unterschiedlichen Szenarien 01-22 für Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.01.-31.08.2014. Die roten Karos zeigen die aus Satellitendaten ermittelten Werte.	42
Abbildung 31:	Kornenertrag des Winterweizen-Schlags 431/0 am Standort West in t/ha, simuliert in PROMET unter Annahme verschiedener Bedingungen im Szenarien-Ensemble 01-22 für die Vegetationsperiode 01.09.2013-31.08.2014	42
Abbildung 32:	Original Ertragsdaten für Schlag 121/3 mit Winterraps 2013	44
Abbildung 33:	Histogramm der Originaldaten bis Werte von 20 t/ha.....	44
Abbildung 34:	Bereinigte Ertragsdaten.....	45
Abbildung 35:	Histogramm der bereinigten Ertragsdaten	45
Abbildung 36:	Aufbereitete Ertragskarte für Teilschlag 121/3	47
Abbildung 37:	Ertragsdaten 2013 aus Mähdeschermessung im Testbetrieb Süd	48
Abbildung 38:	Ertrag 2013 simuliert im Testbetrieb Süd	49
Abbildung 39:	Ertragsdaten 2014 aus Mähdeschermessung im Testbetrieb Süd	50
Abbildung 40:	Ertrag 2014 simuliert im Testbetrieb Süd	51
Abbildung 41:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Winterweizen für die Jahre 2013, 2014 und 2015.....	53
Abbildung 42:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Wintergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015; die roten Kreise markieren den Standort West (Anbau auf rekultivierten Kippenböden)	54
Abbildung 43:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Sommergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015	55
Abbildung 44:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Winterroggen für die Jahre 2013, 2014 und 2015.....	56
Abbildung 45:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Körnermais für die Jahre 2013, 2014 und 2015.....	57

Abbildung 46:	Mittlere Entwicklung der grünen Blattfläche [m ² /m ²] gemäß der Pflanzenparameterableitung aus den Satellitendaten zu den markierten Terminen für die Fruchtart Silomais am Standort Ost für die Jahre 2013, 2014 und 2015	58
Abbildung 47:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Silomais für die Jahre 2013, 2014 und 2015	59
Abbildung 48:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Winterraps für die Jahre 2013, 2014 und 2015; die roten Kreise markieren den Anbau auf rekultivierten Kippenböden	60
Abbildung 49:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für alle Kornträge (ohne Silomais) für die Jahre 2013, 2014 und 2015	61
Abbildung 50:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für alle Kornträge ohne Sommergerste und abzüglich der Schläge, die mit weniger als drei LAI-Terminen modelliert wurden für die Jahre 2013, 2014 und 2015, eingefärbt nach Standort	62
Abbildung 51:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag (gleiche Daten wie Abbildung 50) pro Schlag aufgeteilt in die einzelnen Standorte	62
Abbildung 52:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag (gleiche Daten wie Abbildung 50) aufgeteilt in die einzelnen Jahre	63
Abbildung 53:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für alle Fruchtarten inkl. Silomais für die Jahre 2013, 2014 und 2015	63
Abbildung 54:	Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Betrag im Vergleich zu den Messdaten für alle Einzelschläge, angegeben in absoluten Häufigkeiten und als kumulierter Wert [%] ..	64
Abbildung 55:	Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Vergleich zu den Messdaten für alle Einzelschläge	65
Abbildung 56:	Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Betrag und der Größe [ha] der untersuchten Schläge	66
Abbildung 57:	Vergleich der mittleren relativen Abweichungen im Betrag (MAPE) der Ertragssimulation pro Fruchtart über alle drei Jahre für die Schlagebene und für die Standortebene	67
Abbildung 58:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Standort für alle Kornträge ohne Sommergerste und abzüglich der Schläge, die mit weniger als drei LAI-Terminen modelliert wurden für die Jahre 2013, 2014 und 2015, eingefärbt nach Standort (links) bzw. nach Jahr (rechts)	69
Abbildung 59:	Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Betrag im Vergleich zu den Messdaten auf Standortebene, angegeben in absoluten Häufigkeiten und als kumulierter Wert [%]	70
Abbildung 60:	Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Vergleich zu den Messdaten auf Standortbasis	71
Abbildung 61:	Prozentuale Verteilung des Anbaus der Hauptfruchtarten in Sachsen	71
Abbildung 62:	Mit PROMET modellierter Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser [%] auf Basis der BK50 (links) und der räumlich gröberen Europäischen Bodendatenbank (rechts) für Sachsen Süd	73
Abbildung 63:	Gesättigte Leitfähigkeit [mm/h] nach SAXTON et al. (1986) auf Basis der BK50 (links) und der Europäischen Bodendatenbank (rechts) für Sachsen Süd	73
Abbildung 64:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren simulierten Ertrag (Modellierung auf Basis der ESDB-Bodenkarte) pro Schlag für die Fruchtart Winterweizen für die Jahre 2013, 2014 und 2015	74
Abbildung 65:	Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren simulierten Ertrag (Modellierung auf Basis der ESDB-Bodenkarte) pro Schlag für die Fruchtart Wintergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015	75
Abbildung 66:	Ertrag 2014 simuliert für den Testbetrieb Süd auf Basis der ESDB-Bodenkarte	76
Abbildung 67:	Validierung der mittleren gewogenen und modellierten Ertragswerte pro Standort für alle Kornträge ohne Sommergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015, eingefärbt nach Standorten (links) bzw. Jahren (rechts)	78

Abbildung 68: Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse ohne Sommergerste im Vergleich zu den Messdaten auf Standortbasis79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Durch den Auftraggeber gelieferte In-Situ-Daten	15
Tabelle 2:	Basisdaten für PROMET	20
Tabelle 3:	LAI-Verlauf Winterweizen.....	30
Tabelle 4:	LAI-Verlauf Wintergerste.....	31
Tabelle 5:	LAI-Verlauf Sommergerste.....	32
Tabelle 6:	LAI-Verlauf Winterroggen.....	33
Tabelle 7:	LAI-Verlauf Silomais.....	33
Tabelle 8:	LAI-Verlauf Körnermais.....	34
Tabelle 9:	LAI-Verlauf Winterraps.....	34
Tabelle 10:	Szenarien-Ensemble, das in PROMET beispielhaft für den Winterweizen-Schlag 431/0 des Standorts West in der Wachstumsperiode 01.09.2013-31.08.2014 gerechnet wurde, um die Methode der Assimilierung von Satellitenbildern ins Modell zu verdeutlichen	41
Tabelle 11:	Schlagweise zusammengefasste Ertragsdaten für Betrieb Süd 2013.....	45
Tabelle 12:	Schlagweise zusammengefasste Ertragsdaten für Betrieb Süd 2014.....	46
Tabelle 13:	Bestimmtheitsmaße (R^2), mittlere absolute Abweichungen (MAE) und mittlere relative Abweichungen im Betrag (MAPE) der Simulation der unterschiedlichen Fruchtarten über alle drei Jahre auf Basis der Einzelschläge und über alle Schläge eines Standorts gemittelt	67
Tabelle 14:	Übersicht pro Standort nach Fruchtart und Jahr über die Anzahl der bearbeiteten Schläge, gemessene und simulierte Erträge, jeweils gemittelt über alle Schläge eines Standorts	68
Tabelle 15:	Übersicht pro Standort nach Fruchtart und Jahr über die mittlere relative (MPE) und absolute Abweichung (MAE) der Ertragssimulation, jeweils gemittelt über alle Schläge des Standorts	68
Tabelle 16:	Verfügbare und für die Modellierung verwendete Satellitendaten (L7 = Landsat 7 ETM+, L8 = Landsat 8 OLI, R 1,2,3,4,5 = Rapid Eye 1,2,3,4,5, S2 = Sentinel 2)	81

Abkürzungsverzeichnis

BK	Bodenkarte
DGM	Digitales Gelände Modell
DGPS	Differential Global Positioning System
DWD	Deutscher Wetterdienst
EO	Earth Observation
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
EU	Europäische Union
fAPAR	fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
FK	FeldKapazität
FNR	FeldNummeR
GeoSN	Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen
GLA	Green-Leaf-Area (= grüne Blattfläche)
HWSD	Harmonized World Soil Database
LAI	Leaf-Area-Index (Blattflächenindex)
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LK	LuftKapazität
MAE	Horizontmächtigkeit
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MGW	Mittlerer GrundWasserstand
MIT	Modtran Interrogation Technique
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
nFK	Nutzbare FeldKapazität
OLI	Operational Land Imager
PROMET	Process of RadiatiOn Mass and Energy Transfer model
RESA	RapidEye Science Archive
RMSE	Root Mean Square Error
RSE	Remote Sensing of Environment
SLC	Soil Leaf Canopy Reflectance Model
SN	Sachsen
SNR	Signal to Noise Ratio
StNa	StationsName
TS	TrockenSubstanz
UTM	Universal Transverse Mercator
VIA	VISTA's Image Analyses chain
We	effektive Durchwurzelungstiefe, effektiver Wurzelraum

1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zur fachlichen Unterstützung agrarpolitischer Prozesse und zur Ausgestaltung der Ausgleichszulage werden standortdifferenzierte Aussagen zu Ernteertragsunterschieden landwirtschaftlicher Kulturen benötigt. Die vorhandenen offiziellen Ertragsstatistiken des Statistischen Landesamtes auf Basis der Landkreise sind hinsichtlich ihrer standortdifferenzierten Aussagekraft nicht ausreichend, was eine sach- und fachgerechte Evaluierung der Ausgleichszulage erschwert.

Es werden daher Möglichkeiten gesucht, Ertragsunterschiede zwischen den Standorten effizient und kleinräumig zu erheben. Eine Vorstudie (2014) zum Projekt hat gezeigt, dass die satellitengestützte Ertragserhebung ein interessanter Ansatz ist, um dieses Ziel effektiv zu erreichen.

Im vorliegenden Projekt sollte durch die VISTA GmbH die satellitengestützte Ertragsschätzung auf unterschiedlichen Standorten rückwirkend für die Jahre 2013, 2014 und 2015 angewandt werden. Die Ergebnisse wurden dann mit (vor Ort) gemessenen Werten abgeglichen, um so die Genauigkeit der Verfahren für unterschiedliche Standorte in Sachsen zu ermitteln. Damit sollte geprüft werden, ob das angebotene Verfahren auch für großräumigere Anwendungen statistisch sichere Ergebnisse liefern kann. Des Weiteren war aufzuzeigen, wie hoch der zeitliche Aufwand dafür ist.

Auftragsziel war die Ertragserhebung in drei Pilotbetrieben auf verschiedenen Standorten in Sachsen (Fläche rund 500 ha AL) mittels Satellitendaten einschließlich Modellanwendung rückwirkend für die Jahre 2013 und 2014 für die Fruchtarten

- Weizen,
- Gerste (Winter-/Sommergerste),
- Roggen,
- Silomais/Körnermais,
- Raps

durchzuführen und schlagweise (Durchschnittswert) mit von den Betrieben bereitgestellten Messdaten zu vergleichen. Zum anderen wurde zusätzlich eine Ertragserhebung für die o. g. Fruchtarten für das Jahr 2015 durchgeführt und die ermittelten Ergebnisse ohne Abgleich mit den IST-Werten an das LfULG übergeben. Im Anschluss an die „Blind“-Abgabe der Ergebnisse für 2015 wurden VISTA auch für dieses Jahr die Messdaten für die Validierung übermittelt.

Für einen der drei Betriebe erfolgte eine teilschlagbezogene Ertragsschätzung und ein teilschlagbezogener Abgleich mit gemessenen Erträgen laut Mähdrescheraufzeichnung. Als Rastergröße für die teilflächenspezifische Auswertung wurde 20 m verwendet. Dies ist unter Berücksichtigung der Feldgrößen in Sachsen (Felder ab 1 ha können berücksichtigt werden, also 95 % aller Agrarflächen in Sachsen), der räumlichen Auflösung der verfügbaren Satellitensensoren und der üblichen Arbeitsbreiten der DGPS-Mähdrescher eine aussagekräftige Rastergröße.

2 Testbetriebe

Abbildung 1 zeigt die Lage der drei Testbetriebe innerhalb Sachsens und die entsprechenden Aufnahmekacheln der Satelliten Rapid Eye und Landsat. Für die VISTA-interne Bearbeitung wurden die Testbetriebe aufgrund der räumlichen Lage benannt:

Standort West

Standort Süd

Standort Ost

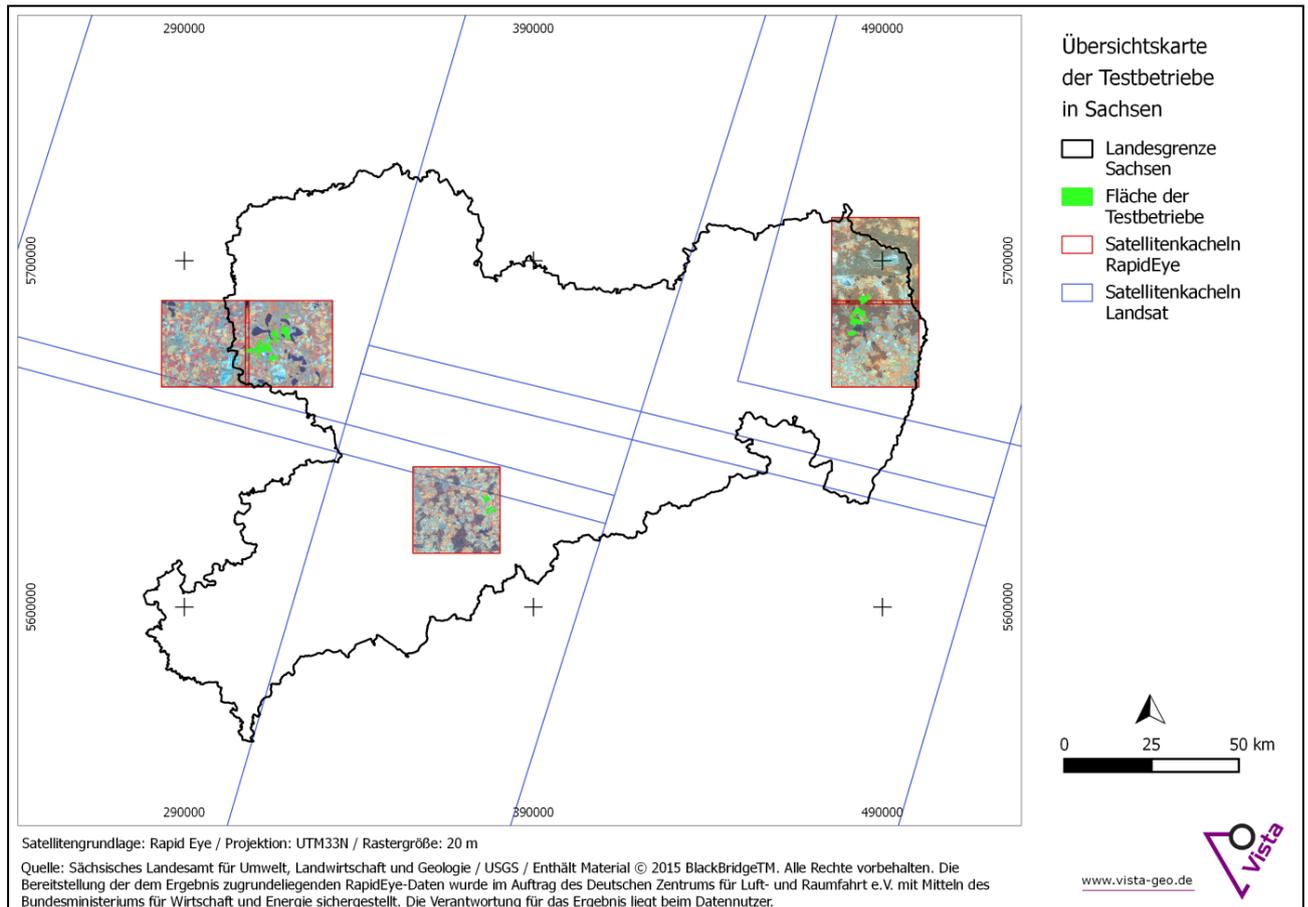


Abbildung 1: Lage der drei Testbetriebe in Sachsen mit Information über die Abdeckung durch Aufnahmekacheln der Satelliten RapidEye und Landsat (Quelle: LfULG, USGS, BlackBridgeTM)

Die folgenden Karten (Abbildung 2 bis Abbildung 4) zeigen für jeden Testbetrieb alle zur Verfügung stehenden Feldgrenzen für die Jahre 2013, 2014 und 2015. Dabei wird zwischen Feldern mit und ohne Wiegeergebnis unterschieden.

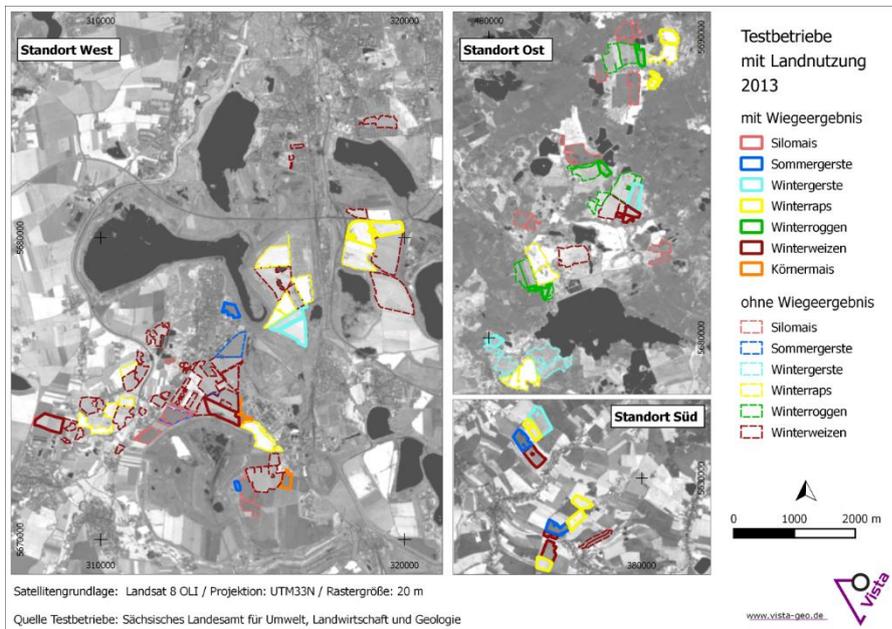


Abbildung 2: Felder der drei Testbetriebe im Jahr 2013

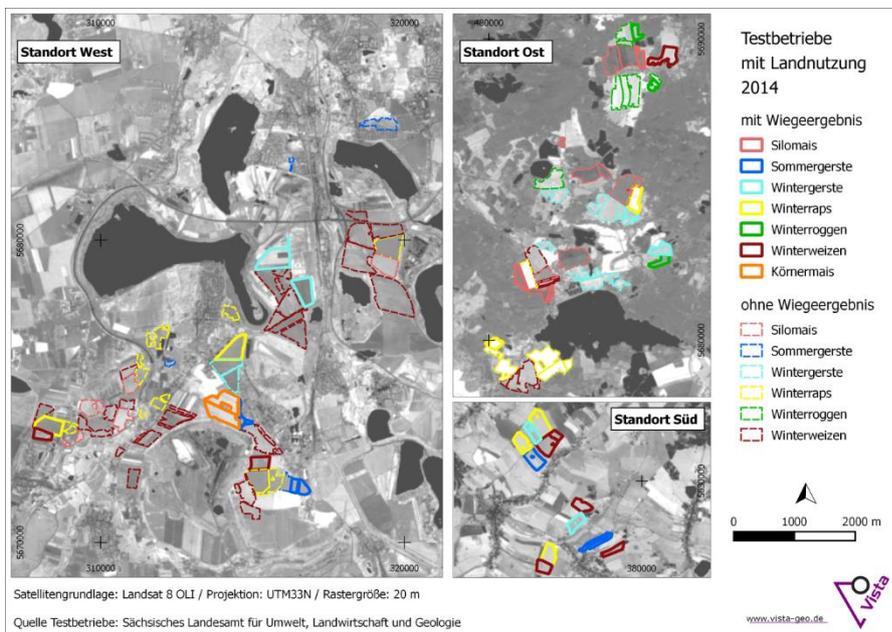


Abbildung 3: Felder der drei Testbetriebe im Jahr 2014

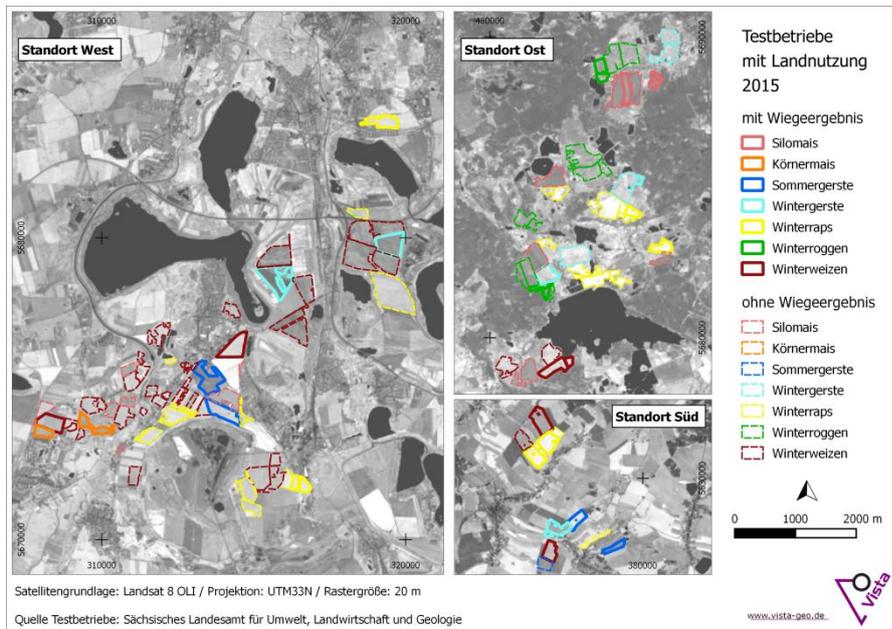


Abbildung 4: Felder der drei Testbetriebe im Jahr 2015

Die vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie zur Verfügung gestellten Shapefiles der Feldstücke erhielten eine interne Nummerierung der Schläge (VISTA-ID). Diese orientiert sich zu großen Teilen an der ursprünglichen Feldstücknummerierung in Kombination mit der Schlagnummer.

3 Verwendete Daten

3.1 Satellitendaten

3.1.1 Begründung der Auswahl der Satellitendaten

Für die Aufgabenstellung wurden für jede Fruchtart mindestens drei bis vier gut über die Vegetationssaison verteilte, hochaufgelöste optische Satellitendaten benötigt, aus denen die Blattfläche als Eingabeparameter für das Wachstumsmodell abgeleitet wurde. Weil sowohl Winter- als auch Sommerfrüchte gewünscht wurden, bedeutete dies ca. eine Satellitenaufnahme pro Monat zwischen April und September jeden Jahres (2013 bis 2015). Die Auswahl der verwendeten optischen Satellitendaten erfolgte aufgrund der folgenden Kriterien:

- operationelle Verfügbarkeit
- Güte der Kalibrierung und Signal-Rausch-Verhältnis
- geeignete spektrale Abdeckung → Abdeckung mindestens im Sichtbaren und nahen Infrarot, optimal auch im mittleren Infrarot
- geeignete räumliche Auflösung → um eine Differenzierung innerhalb der Felder zu erlauben, sind je nach Feldgröße Auflösungen von 5 bis 30 m geeignet
- Preis-Leistungs-Verhältnis → kostenfrei verfügbare Satellitendaten werden bevorzugt

Legt man diese Bewertungskriterien zugrunde, kommt man zu folgender Liste der verwendeten Satellitendaten:

1. **Landsat-8 OLI (seit 2013):** ist mit 30 m Auflösung und sehr guter spektraler Abdeckung gut für landwirtschaftliche Auswertung geeignet. Der Satellit hat ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis und eine Wiederkehrrate von 16 Tagen. Zudem sind die Daten kostenfrei.
2. **RapidEye (seit 2008):** ist mit 5 m Auflösung und guter spektraler Abdeckung gut für landwirtschaftliche Auswertung geeignet. Er hat ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis und dadurch, dass er aus einem System von fünf Satelliten besteht, eine sehr hohe Wiederkehrrate von ein bis drei Tagen. Als kommerzieller Sensor ist er kostenpflichtig. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde vom LfULG ein Antrag an RESA-gestellt, sodass zweckgebunden kostenfreie RapidEye-Daten von den Testbetrieben zur Verfügung standen.
3. **Landsat-7 ETM+ (seit 1999):** Falls nötig, wurden die Daten mit Aufnahmen des Landsat-7 Sensors komplementiert. Landsat 7 nimmt in guter spektraler Qualität, aber nicht mehr flächendeckend auf (schwarze Streifen in den Bilddaten).

Für den Zeitraum dieser Studie noch nicht operationell verfügbar, aber am 23. Juni 2015 erfolgreich gestartet, ist der **Sentinel-2** Sensor der ESA. Sentinel-2 Daten, die seit Herbst 2015 kostenfrei zur Verfügung stehen, sind mit 10 m Auflösung, sehr guter spektraler Abdeckung und einer hohen Wiederkehrrate von drei bis fünf Tagen hervorragend für landwirtschaftliche Auswertung geeignet.

3.1.2 Überblick über verwendete Satellitendaten

Die analysierten und verwendeten Satellitendaten für die Jahre 2013, 2014 und 2015 pro Standort sind detailliert im Anhang A 1 aufgelistet. Dabei sind jeweils sowohl die zur Verfügung stehenden Satellitendaten für jedes Jahr vermerkt als auch die Daten, die tatsächlich in die Ertragsmodellierung eingeflossen sind. Wurde während der Prozessierung eine zu starke Bewölkung bei einer Szene festgestellt, wurde diese aus der Modellierung ausgeschlossen. Die für die Ertragsmodellierung verwendeten Daten sind an dem * zu erkennen.

Für den Standort Ost standen für 2013 14, für das Jahr 2014 ebenfalls 14 und für das Jahr 2015 24 Satellitendatensätze zur Verfügung. Davon flossen 2013 8, 2014 12 und 2015 11 Szenen in die Ertragsmodellierung ein. Am Standort Süd waren im Jahr 2013 16, im Jahr 2014 ebenfalls 16 und im Jahr 2015 30 Szenen verfügbar. Hier wurden 9 (2013), 10 (2014) beziehungsweise 15 (2015) Bilder für die Ertragsmodellierung verwendet. Der Standort West verfügte im Jahr 2013 über 16, im Jahr 2014 über 22 und im Jahr 2015 über 31 Satellitendaten. In die Modellierung eingeflossen sind 2013 12, 2014 13 und 2015 15 Szenen. Dabei lag der Anteil der RapidEye Szenen 2013 bei 15 %, 2014 bei 13 % und 2015 bei 19 %. Der Anteil der Sentinel-2 Daten im Jahr 2015 lag bei 6 %.

3.2 Vom Auftraggeber bereitgestellte In-Situ-Daten

Das LfULG übergab dem Auftragnehmer RapidEye Satellitendaten, die das LfULG zweckgebunden für das Forschungsvorhaben von der RESA beantragt und bereitgestellt bekam. Des Weiteren wurden folgende standortbezogenen Ausgangsdaten vom Auftraggeber bereitgestellt und teilweise in die Modellierung integriert:

- Anbauflächen (Schlaggeometrien und Fruchtarten)
- Bodendaten
- Wetterdaten

■ Geländedaten

Außerdem wurden betrieblich erfasste Ertragsdaten (Wiegeergebnisse und Mähdrescheraufzeichnungen) für Validierungszwecke durch das LfULG in Zusammenarbeit mit den Pilotbetrieben übergeben.

Die gelieferten Daten sind in Tabelle 1 detailliert aufgeführt und beschrieben.

Tabelle 1: Durch den Auftraggeber gelieferte In-Situ-Daten

Datensatz	Name(n)	Datentyp	Kurze Beschreibung (inkl. Auflösung)
01_Ertrag_FuE_All	01_Ertrag_ Betrieb Süd: John Deere T660i_2013, John Deere T660i_2014	Log-Dateien des Mähdre- schers/ Häcks- lers	Für den Pilotstandort Süd wurden die Daten der schlag- bezogenen Ertragserfassung durch die Mähdrescherrauf- zeichnungen für die Jahre 2013 und 2014 zur Verfügung gestellt.
	Erträge_Betrieb Süd.xlsx, Betrieb Ost an Vista.xlsx, Betrieb West an Vista.xlsx	Tabellen	Außerdem wurden für alle drei Pilotstandorte (Süd, Ost, West) die schlagbezogenen Wiegeergebnisse für die Jahre 2013 und 2014 in Tabellenform geliefert. Quelle: LfULG; Pilotbetriebe Süd, Ost, West
02_Anbauflächen_FuE_AI	FuE_Flächen_ 2013.shp FuE_Flächen_ 2014.shp FuE_Flächen_ 2015.shp	Shape	Zur Identifizierung der Schläge standen die räumlichen Schlaggeometrien aller Pilotbetriebe für die Jahre 2013, 2014 und 2015 mit jeweils hinterlegter Angabe zu den angebauten Fruchtarten für die einzelnen Schläge und Flächen zur Verfügung. Quelle: LfULG
03_Bodendaten_FuE_All	BK50_FuE_Flächen.shp	Shape	Bodenkarten wurden im Maßstab 1:50.000 mit folgenden Informationen zur Verfügung gestellt: <ul style="list-style-type: none"> • Bodentyp • Mittlerer Grundwasserstand (MGW) • Horizontmächtigkeit (MAE) • effektive Durchwurzelungstiefe (We) • Anteile der Bodenarten (Profil) • Anteile der Bodenarten (eff. Wurzelraum) • Feldkapazität (FK, Profil) • Feldkapazität (FK, eff. Wurzelraum) • nutzbare Feldkapazität (nFK, Profil) • nutzbare Feldkapazität (nFK, eff. Wurzel.) • Luftkapazität (LK, Profil) • Luftkapazität (LK, eff. Wurzelraum) Quelle: Sächsisches Bodenbewertungsinstrument LfULG 42, Parameterzusammenstellung LfULG 22
04_Wetterdaten_FuE_All		Tabellen mit Stationsdaten	Meteorologische Daten wurden als Stationsdaten der folgenden Messstationen mit Stationskennzahl xxxxx und Stationsname (StNa) bereitgestellt: <ul style="list-style-type: none"> • Für Betrieb Süd (Süd): 10577 Chemnitz, 10579 Marienberg • Für Nähe Betrieb Ost: 00025 Bad Muskau, 10499 Görlitz • Für Betrieb West: 10469 Leipzig-Schkeuditz, 10565 Osterfeld, NN977 Zeitz.

Datensatz	Name(n)	Datentyp	Kurze Beschreibung (inkl. Auflösung)
	metd_yyyy. xxxxx		Die nachfolgend beschriebenen Datensätze wurden zur Verfügung gestellt: <ul style="list-style-type: none"> Tagesmittelwerte zu den Messgrößen: Temperatur (Mittel, Min, Max in 2m über dem Grund), Niederschlag, Evaporation (Potentielle Verdunstung nach HAUDE), Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte Windrichtung (stündlich) Bewölkungsgrad (stündlich) Bodenfeuchte (modellerte Tagessummen bzw. Tagesmittelwerte unterschieden nach den angegebenen Fruchtarten) Bodentemperatur (Tagesmittelwerte in 5, 10 und 20 cm Bodentiefe)
	dd_yyyy.xxxxx ng_yyyy.xxxxx Betrieb Süd_ xxxxx_StNa_ CROP_2010-2015.txt		
	boden_2013, boden_2014		
			Quelle: DWD
05_Gelände_FuE_All	dgm2_süd.tif dgm2_ost.tif dgm2_west.tif	Raster	Ein Digitales Geländemodell (ATKIS-DGM2) wurde für jeden der drei Pilotstandorte als Eingabedatensatz in 2 m Auflösung zur Verfügung gestellt.
			Quelle: GeoSN

Um die Erträge im Untersuchungsgebiet pro Fruchtart und Anbaujahr einschätzen zu können, wurden für 2013, 2014 und 2015 die Wiegeergebnisse (01_Ertrag_FuE_All) über alle Schläge eines Standorts gemittelt und mit dem mittleren Ertrag aller Standorte sowie den Durchschnittswerten der Ertragsstatistik für Sachsen verglichen (Abbildung 5 bis Abbildung 9).

Abbildung 5 zeigt die Ertragsdaten der Fruchtart Winterweizen. Zwischen den mittleren Wiegeergebnissen der Testbetriebe zeigt sich eine Variation, die 2013 im Schwankungsbereich von rund 66 bis 76 dt/ha, 2014 sogar im Bereich von 55 bis knapp über 100 dt/ha und 2015 im Bereich von 68 bis knapp 105 dt/ha liegt. Eine ebenfalls in 2014 stark ausgeprägte Variabilität zeigt sich auch innerhalb der einzelnen Standorte zwischen den Schlägen, was sich an der teilweise sehr hohen Standardabweichung bezogen auf die Standortmittelwerte bemerkbar macht. Die Ertragsstruktur ist damit im Jahr 2013 und 2015 insgesamt homogener als in 2014. Die mittleren Erträge sind in 2014 allerdings deutlich höher als in 2013 und 2015, lediglich der Standort Ost weicht mit einem niedrigeren mittleren Wiegeergebnis von dieser Beobachtung ab.

Vergleicht man für die einzelnen Jahre den Mittelwert über alle drei Standorte mit den erhobenen Mittelwerten der Ertragsstatistik für ganz Sachsen, wird sowohl die Ertragshöhe der betrachteten Jahre als auch die jährliche Schwankung gut abgebildet. Es zeigt sich jedoch deutlich, dass die räumliche Variabilität über das Bundesland mit diesem grob gefassten Durchschnittswert nicht abgebildet werden kann.

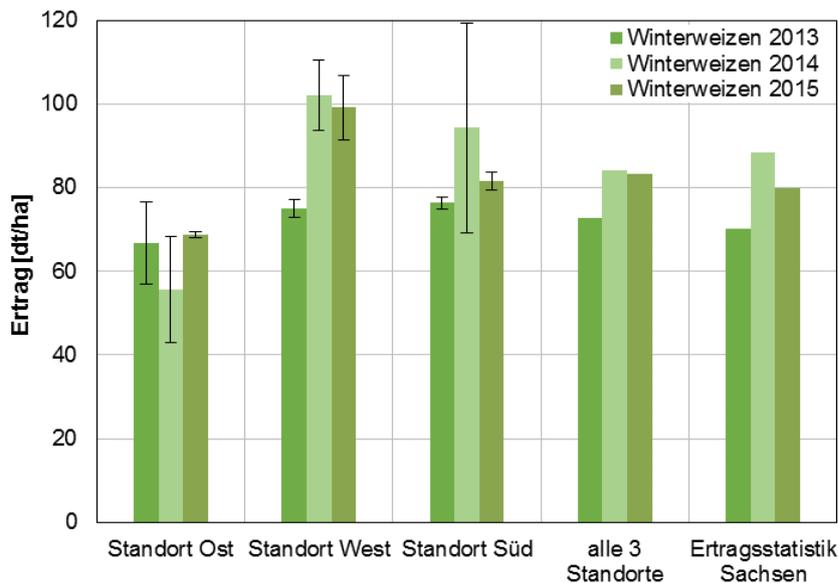


Abbildung 5: Fruchtart Winterweizen, Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, mittleres Ergebnis über alle drei Standorte, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung pro Standort und damit die Variabilität der einzelnen Ausprägungen zum Mittelwert.

Für die Fruchtarten Silomais (Abbildung 6, links), Körnermais (Abbildung 6, rechts), Winterroggen (Abbildung 7, links) und Sommergerste (Abbildung 7, rechts) stehen jeweils nur für einen bzw. bei der Sommergerste zwei der Testbetriebe Wiegeergebnisse mehrerer Schläge zur Verfügung, sodass hier eine Analyse der großräumigen Variabilität allein auf Basis von In-Situ-Daten nicht möglich ist. Hinsichtlich der Variabilität zwischen den einzelnen Schlägen innerhalb der Standorte lässt sich wie schon beim Winterweizen eine teilweise hohe Heterogenität feststellen.

Besonders beim Mais (Wiegeergebnisse für Silomais normiert auf 35 % Trockensubstanz, um sie mit der Ertragsstatistik vergleichbar zu machen, vgl. Kapitel 6.2.6) und auch bei der Sommergerste zeigen sich große Schwankungen zwischen den Erträgen der untersuchten Jahre. Beim Winterroggen ist dieser Unterschied weniger zu erkennen. Die interannuellen Schwankungen zwischen den drei Jahren werden von der Ertragsstatistik für fast alle Fruchtarten erfasst. Die standortspezifischen Unterschiede können über die Ertragsstatistik nicht abgebildet werden.

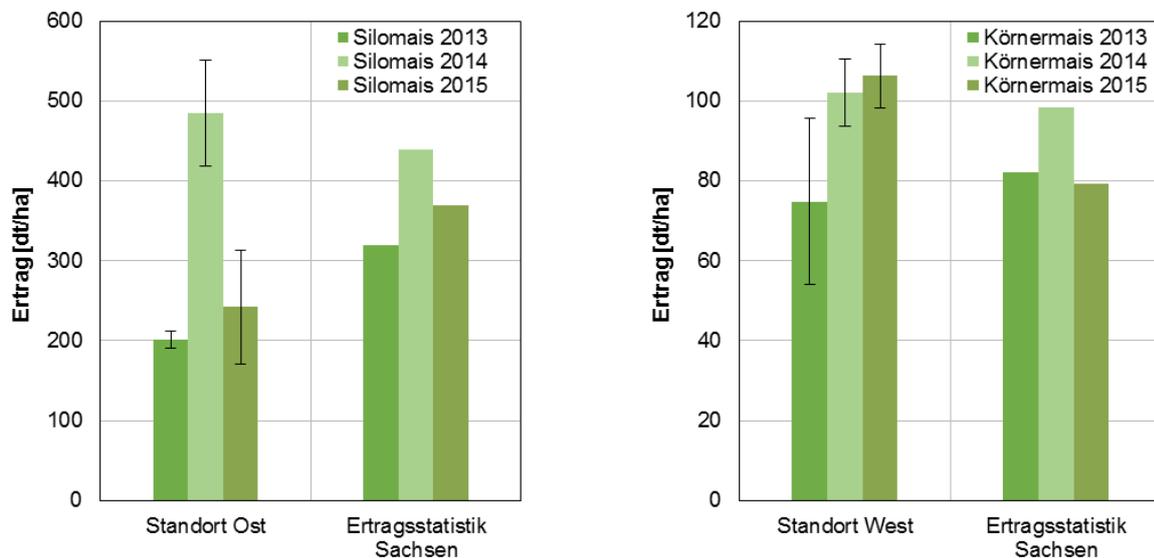


Abbildung 6: Fruchtart Silomais (links) bzw. Körnermais (rechts), Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.

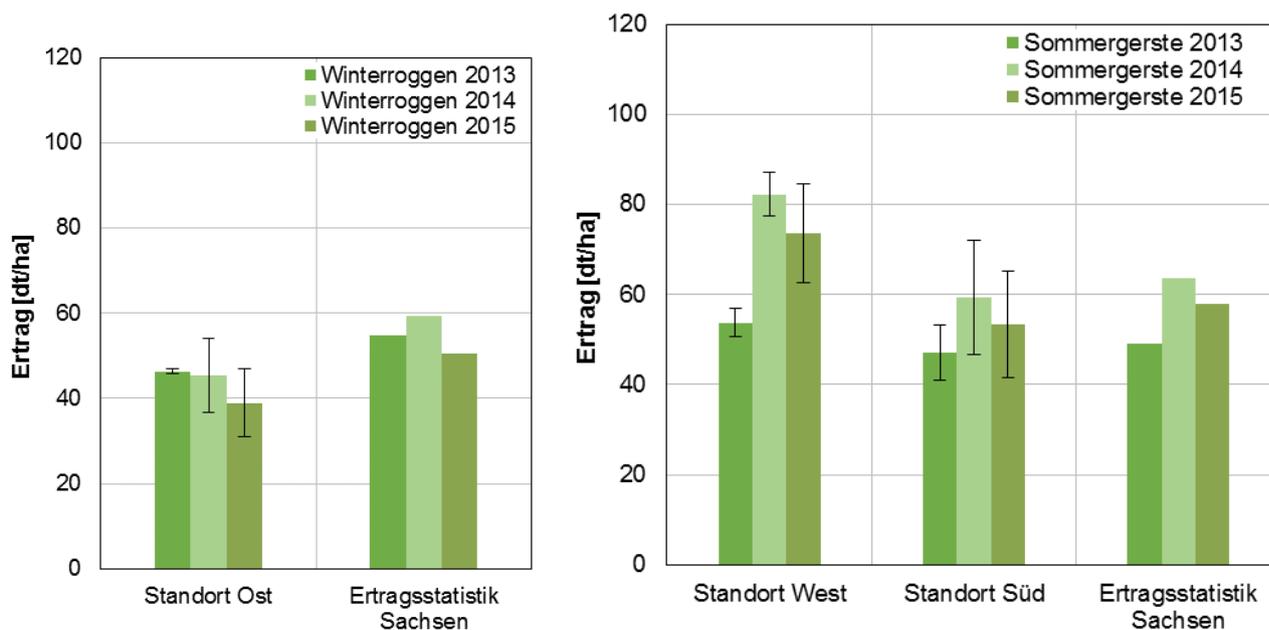


Abbildung 7: Fruchtart Winterroggen (links) bzw. Sommergerste (rechts), Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.

Für die beiden Fruchtarten Wintergerste (Abbildung 8) und Winterraps (Abbildung 9) können ähnliche Beobachtungen gemacht werden wie für den Winterweizen. Die mittleren Wiegeergebnisse der einzelnen Standorte variieren zum Teil stark. Die Standardabweichungen der Mittelwerte sind beim Winterraps etwas geringer ausgeprägt.

Die Erträge des Jahres 2014 sind durchweg höher als für das Jahr 2013. Die 2015er-Erträge liegen zum Teil noch höher als 2014; teilweise werden aber auch niedrigere Mittelwerte als in den beiden vorhergehenden Jahren ermittelt. Der vom Statistischen Landesamt veröffentlichte Ertrag in Sachsen ist ein guter Indikator für durchschnittliche Ertragshöhe, aber er kann die Gesamtvariabilität nicht abbilden. In den folgenden Untersuchungen mit dem Ziel der Abbildung kleinräumiger Unterschiede wird diese Generalisierung vermieden.

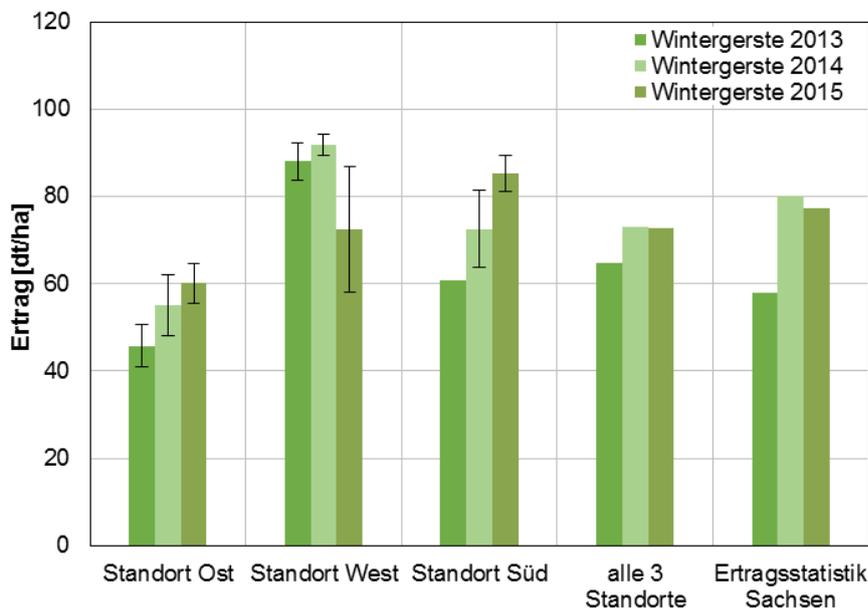


Abbildung 8: Fruchart Wintergerste, Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, mittleres Ergebnis über alle drei Standorte, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.

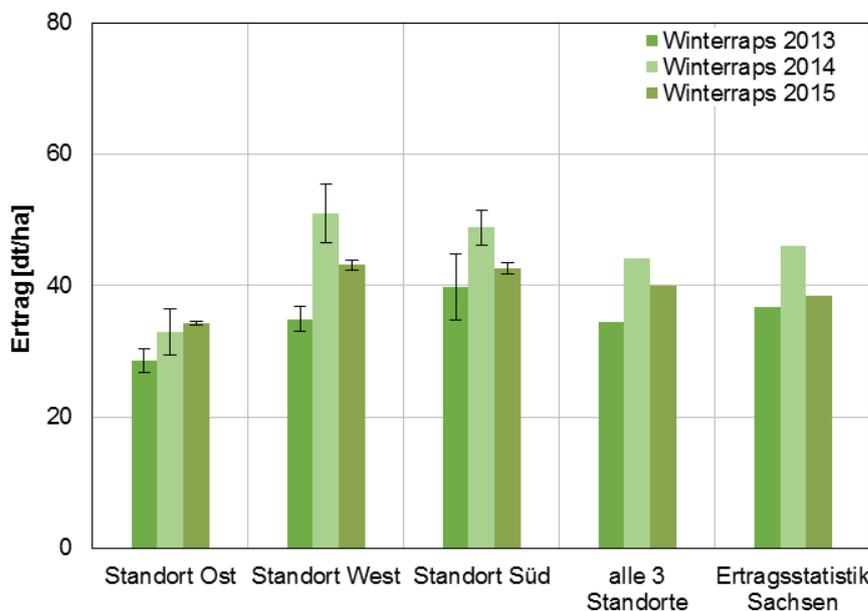


Abbildung 9: Fruchart Winterraps, Ertrag in dt/ha: Wiegeergebnisse gemittelt über alle Schläge des jeweiligen Standorts, mittleres Ergebnis über alle drei Standorte, jeweils für die Jahre 2013, 2014 und 2015 sowie die erhobenen Werte der Ertragsstatistik für Sachsen. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung.

3.3 Basisdaten für das Pflanzenwachstumsmodell

Zur standortspezifischen Modellierung des Ertrags wurde das Pflanzenwachstumsmodell PROMET^{1,2} verwendet. Für die teilflächenspezifische Auswertung und zur Kopplung des Modells mit den aus Satellitenbildern gewonnenen Daten wurde auch hier die Rastergröße auf 20 m gesetzt. Die dafür benötigten Eingangsdaten mit ihrer Datenquelle und räumlichen bzw. zeitlichen Originalauflösung sind in Tabelle 2 näher spezifiziert.

Zur Abbildung der räumlichen Bodenunterschiede wurde für die ersten Modellläufe nach Stand des Zwischenberichts zunächst standardmäßig eine bereits vorhandene Bodenkarte verwendet. Für die Ertragsmodellierung im weiteren Verfahren wurden die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten, detailreichen Bodenkarten (BK50) für das Modell aufbereitet und im Modell verwendet. Gelände-, Gefälle- und Expositionsunterschiede wurden mithilfe der durch den Auftraggeber gelieferten Digitalen Geländemodelle auf 2 m Rastergröße für die Teststandorte berücksichtigt. Eine Maske der Testbetriebe wurde auf Grundlage der ebenfalls vom Auftraggeber bereitgestellten Schlaggrenzen mit Information der angebauten Fruchtarten pro Jahr erstellt.

Die Meteorologie geht aus Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ins Modell ein. Hier wurden vom Auftraggeber für die meisten erforderlichen Größen Tagesmittelwerte zur Verfügung gestellt. Weil für den Antrieb des Modells allerdings stündlich aufgelöste Werte benötigt werden, gingen eigene aufbereitete meteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes auf stündlicher Basis ein.

Tabelle 2: Basisdaten für PROMET

Datensatz	Datenquelle	Dateityp	Jahr	Originalauflösung
Bodenkarte	BK50-Bodenkarten im Maßstab 1 : 50.000 (siehe Kap. 3.2)	Shape	2009	1:50.000
Digitales Geländemodell	ATKIS-DGM2, GeoSN (siehe Kap. 3.2)	Raster	2015	2 m
Maske der Testbetriebe	LfULG (Shapefiles, wurden zu diesem Zweck auf gerastert)	Shape	2013-2015	20 m
Meteorologie	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Stationsdaten	2012-2015	stündlich

¹ MAUSER, W., BACH, H. (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *Journal of Hydrology* 376, 362–377.

² HANK, T., BACH, H., MAUSER, W. (2015): Using a Remote Sensing-Supported Hydro-Agroecological Model for Field-Scale Simulation of Heterogeneous Crop Growth and Yield: Application for Wheat in Central Europe, *Remote Sensing*, 7 (4), 3934-3965, Basel (Switzerland).

4 Verwendete Methoden

4.1 VISTA's Image Analysis Chains (VIAs)

Zur quantitativen Auswertung von optischen Satellitendaten sind verschiedene Prozessierschritte notwendig. Die Daten werden heutzutage vom Satellitendatenbetreiber zumeist als georeferenzierte (im Regelfall UTM-Projektion) Grauwertbilder geliefert. Diese Grauwerte müssen zunächst anhand von durch den Satellitenbetreiber gelieferten Kalibrierwerten in Strahldichtewerte umgerechnet werden.

Die am Sensor ankommenden Strahldichten sind aber immer noch abhängig von der Aufnahmegeometrie (z. B. Sonnenstand) und der Atmosphärenbeschaffenheit (aerosol-optische Dicke der Atmosphäre). Diese müssen korrigiert werden, um vergleichbare Reflexionswerte an der Erdoberfläche zu erhalten. Diese sind die Grundlage für die Ableitung aller physikalisch basierten Pflanzenparameter. Es sind verschiedene Lösungen verfügbar, die die Atmosphärenkorrektur auf Grundlage eines Strahlungstransfermodells der Atmosphäre durchführen, z. B. mit der Prozesskette MIT³, die MODTRAN⁴-basiert ist. Neben der Berücksichtigung der aerosol-optischen Dicken ist es wichtig, dass auch der Einfluss der Nachbarschaftseffekte berücksichtigt wird (sogenannte Überstrahlungskorrektur). Die Überstrahlungskorrektur wird in den VIAs durch eine 1 km² große Filtermatrix berechnet, die für jedes Pixel individuell den Anteil der Streustrahlung quantifiziert und korrigiert.

Um Fehler in der Auswertung zu vermeiden, ist eine Wolken- und Wolkenschattenklassifikation zwingend notwendig. Diese Pixel werden in der Ableitung der Pflanzenparameter nicht berücksichtigt. Die Identifikation von Wolken und deren Schatten geschieht auf den Reflexionswerten und wird in den VIAs mit speziellen Klassifikationsmethoden durchgeführt und erfolgt vollautomatisch.

Auf den gültigen reflexionskalibrierten Pixeln kann nun die Parameterableitung stattfinden. Aus der Literatur ergibt sich, dass LAI (Leaf Area Index) und fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) die beiden bevorzugten Pflanzenparameter für die Assimilation in Ertragsmodelle sind. Für die Nutzung in PROMET wurde der LAI gewählt.

Abbildung 10 fasst die Satellitendatenprozessierung zusammen.

³ VERHOEF, W., BACH, H. (2012): Simulation of Sentinel-3 images by four stream surface atmosphere radiative transfer modeling in the optical and thermal domains. In: Remote Sensing of Environment, 120 (2012), 197-207.

⁴ <http://modtran5.com/>

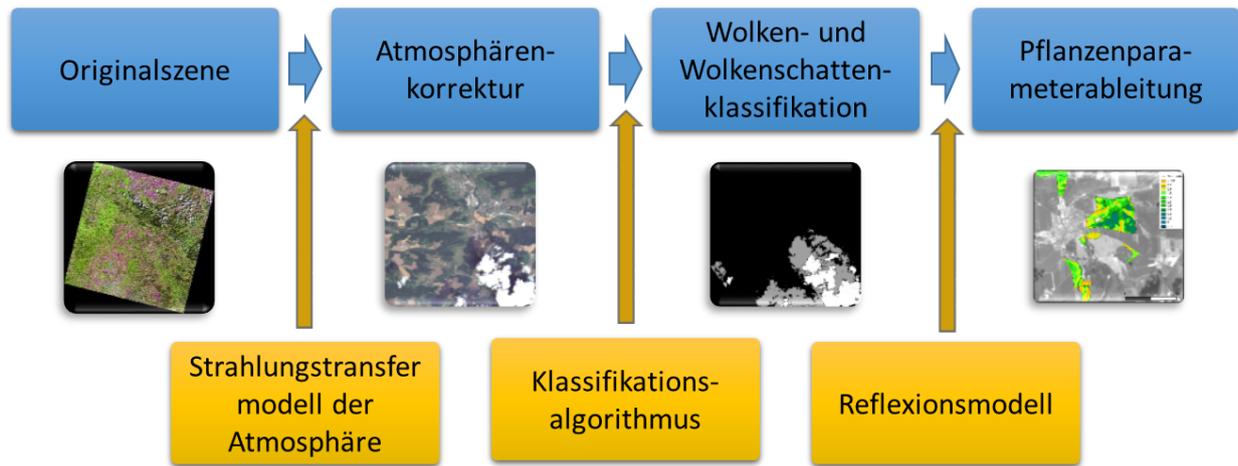


Abbildung 10: Ablaufschema der Prozessierung von Satellitendaten für die quantitative Ableitung von Pflanzenparametern (Quelle: VISTA)

4.2 Reflexionsmodell (SLC)

Innerhalb von VISTA's Prozessketten wird die grüne Blattfläche (LAI) aus den vorprozessierten Satellitendaten abgeleitet und in das Ertragsmodell assimiliert. Die Ableitung des LAIs aus Satellitendaten benötigt komplexere Methoden und Modelle als einfache Indizes. Hier kommt ein sogenanntes Reflexions- oder Strahlungstransfermodell zum Einsatz (siehe Abbildung 11). Dieses berücksichtigt den gesamten Strahlungsgang von der Sonne durch die Atmosphäre zur Erde und wieder durch die Atmosphäre zum Sensor. Zusätzlich berücksichtigt es das Aussehen (d. h. die Geometrie und die biochemischen Inhaltsstoffe) der verschiedenen Fruchtarten und den Bodenhintergrund, auf dem die Pflanzen wachsen. Das Modell nutzt alle verfügbaren Kanäle des Satelliten anstelle von nur meist zwei Kanälen wie bei der Indexberechnung. Daher können mit diesen Modellen physikalisch-basierte Pflanzenparameter (z. B. LAI, Anteil brauner Blätter und Chlorophyllgehalt) abgeleitet werden.

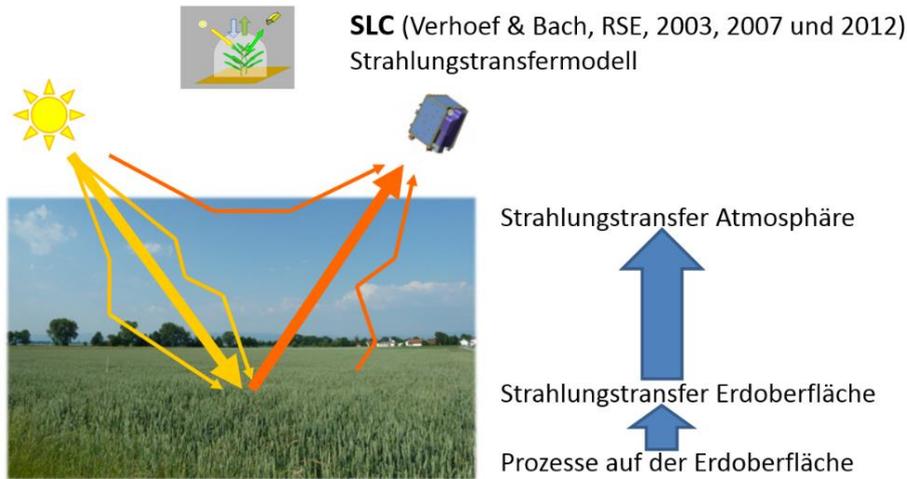


Abbildung 11: Prinzip der Strahlungstransfermodellierung^{5,6,7} (Quelle: VISTA)

Hervorzuheben ist, dass (im Gegensatz zu Regressionsmodellen) keine Kalibriermessungen für die Parameterableitung benötigt werden. Langjährige Validierungen, in die unterschiedliche Termine und Regionen einbringen, zeigen, dass das physikalisch basierte Reflexionsmodell räumlich und zeitlich übertragbar ist.

Abbildung 12 zeigt die genauen Parameter, die im Strahlungstransfermodell SLC entweder als Eingaben gegeben werden oder durch eine Modellinversion ableitbar sind. Sie setzen sich zusammen aus vier großen Gruppen:

- Beobachtungsgeometrie: vorgegeben durch Stand der Sonne, Atmosphärenzustand und Satellitengeometrie zum Zeitpunkt der Aufnahme
- Bodenhintergrund: beschreibt die Reflexion des Bodens, auf dem der Bestand wächst. Kann angenähert werden durch ein Bodenspektrum ähnlichen Bodentyps oder direkt aus dem Bild extrahiert werden. Je dichter der Pflanzenbestand geschlossen ist, desto weniger Bodeneinflüsse sind sichtbar.
- Blattcharakteristika: Unterschiedliche Fruchtarten haben unterschiedliche biochemische Zusammensetzungen. Es unterscheiden sich etwa der Aufbau der Blätter zwischen C3 und C4 Pflanzen (Schwamm- oder Palisadenparenchym), Wasser- und Chlorophyllgehalte. Diese Eigenschaften sind nicht von der Geometrie (z. B. Blattwinkel) abhängig. Sie werden für die verschiedenen Fruchtarten festgesetzt bzw. aus den Satellitendaten direkt abgeleitet.
- Bestandsparameter: Diese Variablen beschreiben den Aufbau des Gesamtbestands und berücksichtigen somit die unterschiedliche Geometrie unterschiedlicher Fruchtarten, z. B. die Blattwinkel. Die Blattfläche und der Anteil brauner Blätter (entspricht dem Reifegrad) fallen in diese Kategorie.

⁵ VERHOEF, W., BACH, H. (2003): Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models, *Remote Sensing of Environment* 87 (2003), 23–41.

⁶ VERHOEF, W., BACH, H. (2007): Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. *Remote Sensing of Environment*, 109 (2007), 166–182.

⁷ VERHOEF, W., BACH, H. (2012): Simulation of Sentinel-3 images by four stream surface atmosphere radiative transfer modeling in the optical and thermal domains. In: *Remote Sensing of Environment*, 120 (2012), 197-207.

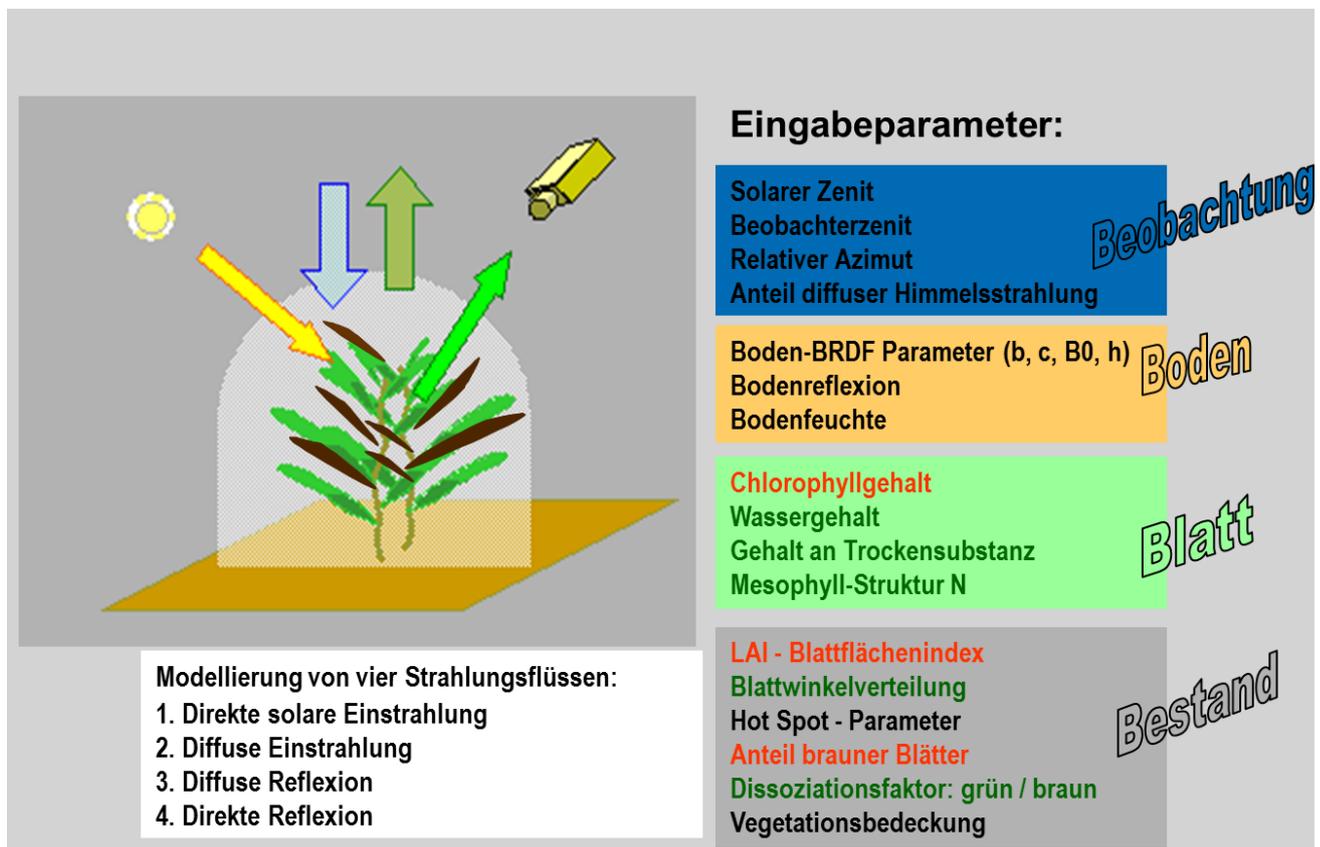


Abbildung 12: Konzept und Eingangsparameter des Strahlungstransfermodells SLC (VERHOEF & BACH 2007). Grün markiert sind die Parameter, die sich zwischen den einzelnen Fruchtarten unterscheiden, rot markiert sind die Parameter mit deutlicher Variabilität innerhalb einer Fruchtart, die aus den Satellitenbildern durch numerische Invertierungsmethoden pixelweise abgeleitet werden. (Quelle: VISTA)

Die Blatt- und Bestandsparameter lassen sich in zwei Kategorien aufteilen: Parameter, deren Variation vor allem zwischen verschiedenen Fruchtarten groß ist (z. B. Blattdicke) und Parameter, die signifikante Variation sowohl zeitlich als auch innerhalb einer Fruchtart aufzeigen (z. B. Blattfläche).

Für die Ableitung der Pflanzenparameter für die betrachteten Fruchtarten wurden daher unterschiedliche Parametrisierungen für die einzelnen Fruchtarten je nach ihrer grundlegenden Ausprägung verwendet (z. B. höhere Blattdicke bei Mais als bei Weizen). Mit Hilfe einer Modellinversion des Strahlungstransfermodells SLC wurden dann die hochvariablen Parameter Blattfläche, Chlorophyllgehalt in der vegetativen Phase und Anteil brauner Blätter in der Reifephase aus den Satellitendaten räumlich abgeleitet. Für die grundlegenden Parametrisierungen der einzelnen Fruchtarten wurden auf Literaturangaben bzw. eigener Forschung aufbauende Werte verwendet.

Die Ableitung der Parametersätze geschieht durch eine Rück-Rechnung (= Inversion) der resultierenden Reflexionswerte aus den Pflanzenparametern. Dabei werden die räumlich variierenden Eingabevariablen schrittweise verändert, bis die beste Übereinstimmung zwischen gemessenem und modelliertem Reflexionsspektrum erreicht ist. Der Variablenraum wird vorher definiert, ist spezifisch für jede Fruchtart und jeden Zeitpunkt und basiert auf a priori-Information sowie landwirtschaftlichem Wissen. Zu Beginn der Inversion wird eine Look-Up-Tabelle simulierter Reflexionswerte für diesen Variablenraum generiert. Die Reflexionswerte jedes Pixels werden dann mit diesen Reflexionen in der Look-Up-Tabelle verglichen und die Varia-

blenkombination mit dem geringsten Root-Mean-Square-Error (RMSE) wird identifiziert und als Ergebnis verwendet.

4.3 Pflanzenwachstumsmodell (PROMET)

Zur Ertragsmodellierung wurde das wissenschaftlich fundierte, physikalisch-basierte Pflanzenwachstumsmodell PROMET^{8,9} verwendet. Es rechnet räumlich verteilt und unterstützt 18 Fruchtarten inklusive der gewünschten Fruchtarten Winterweizen, Winterraps, Wintergerste, Sommergerste, Roggen und Mais.

Das Modell berechnet die Entwicklung der Pflanzen in großer Genauigkeit in stündlichen Rechenschritten unter Berücksichtigung der aktuellen Meteorologie und der Standortgegebenheiten durch Höhe/Gefälle/Exposition und Bodenbeschaffenheit. Diese Inputparameter werden ebenfalls räumlich verteilt im Modell verwendet (Abbildung 13).

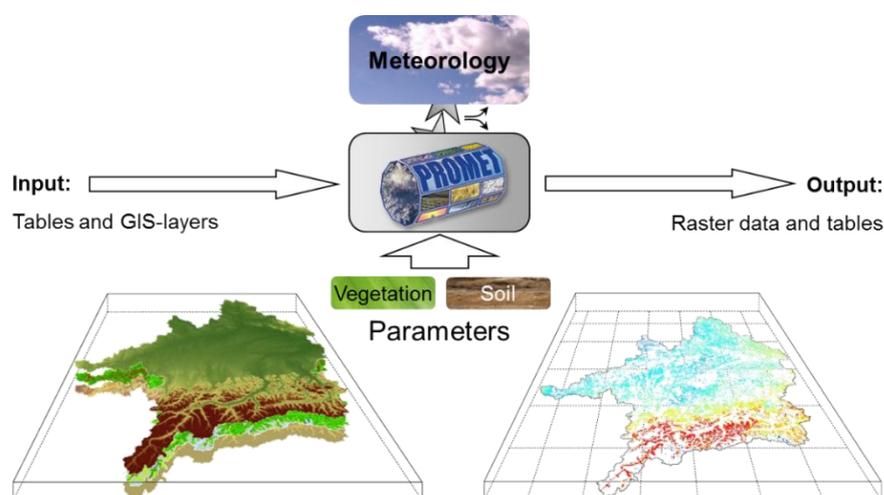


Abbildung 13: Räumlich verteilter Rechenansatz von PROMET (Quelle: LMU)

Die gesamte Umwelt inklusive der Pflanzenkompartimente wird zu jedem Zeitschritt über mehr als 300 verschiedene Modellvariablen für jedes Rasterelement abgebildet. PROMET simuliert dabei den Boden-Wasser-Haushalt, die Pflanzenbedeckung, das Wurzelwachstum, die Phänologie, die Trockenmasseproduktion, den Ertrag, den Boden-Pflanze-Stickstoff-Haushalt und berücksichtigt auch Wasserstress.

Für jedes Rasterelement (Pixel) eines Datensatzes wird mit Hilfe des Modells PROMET für alle parametrisierten Fruchtarten jeweils ein Ensemble an Szenarien modelliert, die sich hinsichtlich Nährstoffsituation und Geschwindigkeit der phänologischen Entwicklung der Pflanzen unterscheiden. Den Effekt der variierenden Nährstoffsituation und Phänologie auf die Blattfläche (LAI) zeigt Abbildung 14 schematisch. Es wird zunächst ohne die Zuhilfenahme von Satellitendaten simuliert und ein Set von Ensembleläufen durchgerechnet. Dabei

⁸ MAUSER, W., BACH, H. (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *Journal of Hydrology* 376, 362–377.

⁹ HANK, T., BACH, H. & MAUSER, W. (2015): Using a Remote Sensing-Supported Hydro-Agroecological Model for Field-Scale Simulation of Heterogeneous Crop Growth and Yield: Application for Wheat in Central Europe, *Remote Sensing*, 7 (4), 3934-3965, Basel (Switzerland).

werden alle Blattflächenverläufe räumlich verteilt für die Ensembleberechnungen abgespeichert. Bei einem Datum, an dem eine Satellitenbeobachtung des modellierten Gebietes vorhanden ist, wird die durch das Reflexionsmodell SLC aus den Satellitenbildern abgeleitete Blattfläche genutzt, um sie mit den simulierten Ergebnissen zu vergleichen. Das Ensembleszenario mit der kleinsten Abweichung zwischen simulierten und mit den Satelliten beobachteten Blattflächen wird nun für jedes Pixel ausgewählt und das jeweilige Ensembleszenario (rote Linien in Abbildung 14) wird in der weiteren Modellierung genutzt.

Es werden circa vier Satellitenszenen pro Wachstumsperiode in das Modell assimiliert, um so das Modell mit der räumlichen Heterogenität des Bestandes, die nicht in all ihren Facetten in der reinen Simulation erfasst werden kann, zu kalibrieren. Eine Kalibrierung des Modells mit In-Situ-Daten ist nicht notwendig.

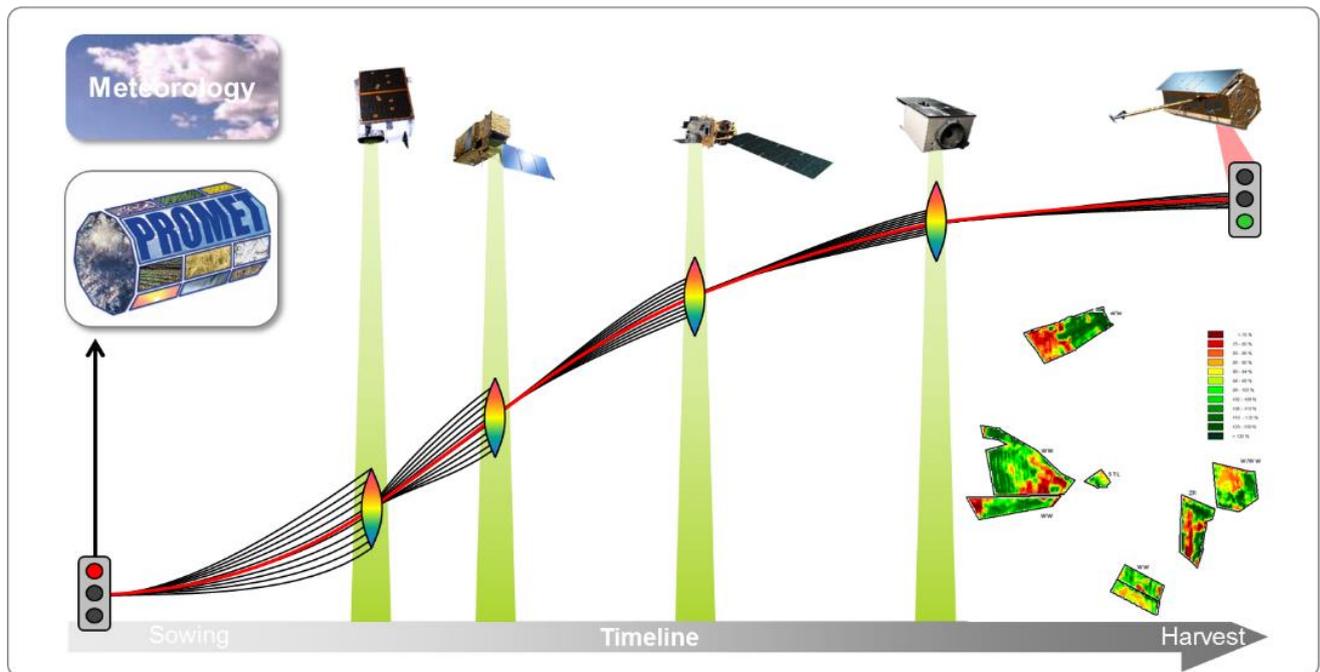


Abbildung 14: Kalibrierung des Modells über Satellitendaten (Quelle: VISTA)

5 Ergebnisse

5.1 Vorprozessierung der Satellitendaten

Für alle verfügbaren Satellitendaten wurden die in Kapitel 4.1 aufgeführten Prozessierungsschritte durchgeführt. Das heißt, die Daten wurden auf die Untersuchungsgebiete ausgeschnitten, atmosphärenkorrigiert (inkl. Überstrahlungskorrektur) und vorklassifiziert, um für die Weiterbearbeitung ungültige Pixel wie Wolken, Wolkenschatten, überflutete Bereiche und Schnee auszuschließen. Die folgenden Abbildungen zeigen Beispiele für die Ergebnisse.

Abbildung 15 zeigt klassifizierten Schnee und klassifizierte Wolken und Wolkenschatten am Standort Ost. Zusätzlich als schwarze Streifen sind im oberen Beispiel die Sensorfehler von Landsat 7 ETM+ erkennbar, der nicht mehr flächendeckend aufnimmt. Während grundsätzlich durch die pixelgenaue Klassifikation die

Weiterverwendung der gültigen Teile einer Satellitenszene möglich ist, ist bei diesen beiden Szenen die Anzahl ungültiger Pixel so hoch, dass sie nicht weiterverwendet werden.

Anders dagegen die Beispiele in Abbildung 16. Hier ist der Standort West zu einem „normalen“, klaren Termin (oben) und zum anderen zu einem Überflutungstermin gezeigt. Zwar ist keines der Felder, für die Ertragsresultate vorliegen, von der Überflutung betroffen, es ist jedoch deutlich sichtbar, dass durchaus Felder des Betriebs unter Wasser standen.

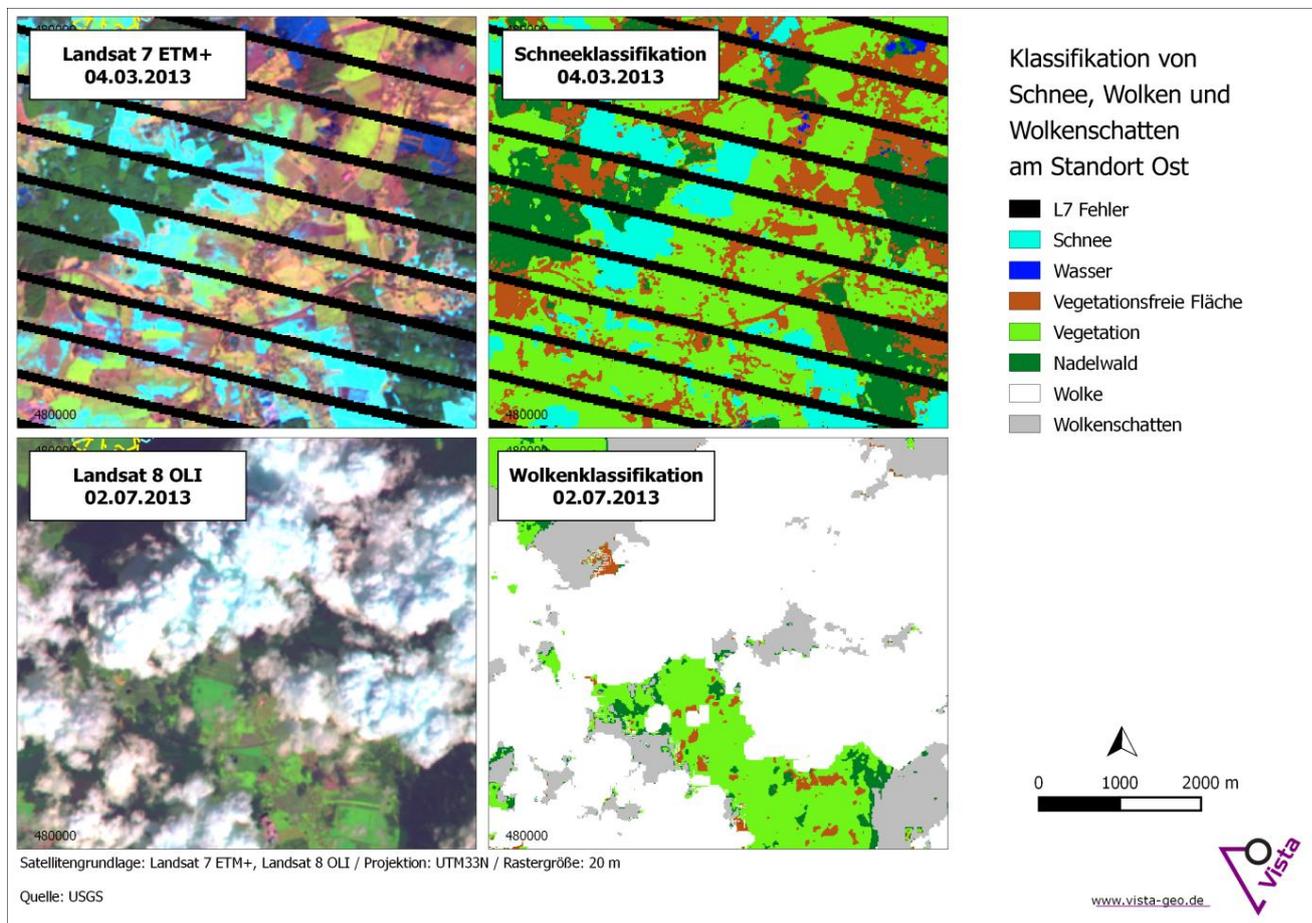


Abbildung 15: Klassifikation von Schnee, Wolken und Wolkenschatten am Standort Ost

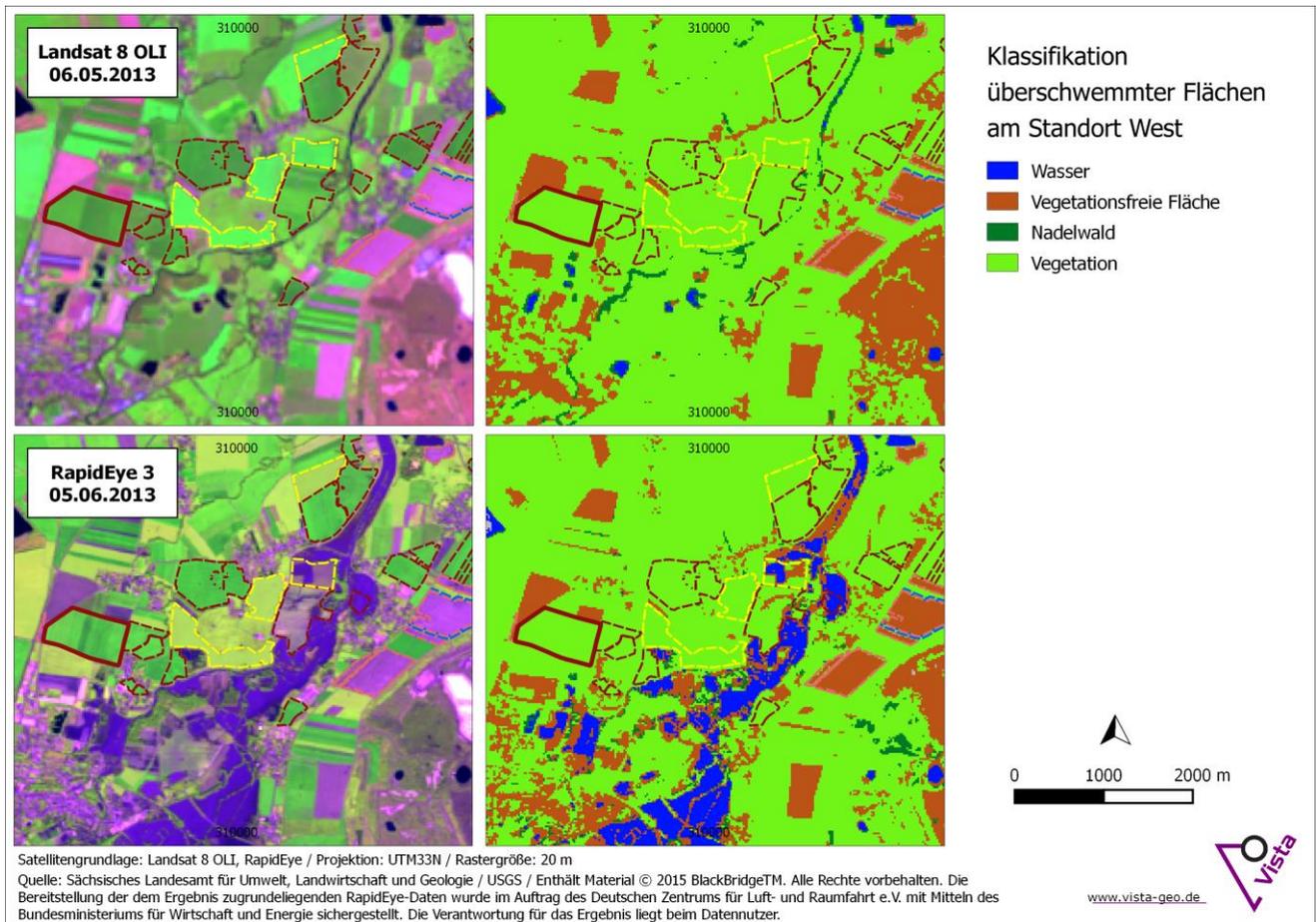


Abbildung 16: Klassifikation überschwemmter Flächen am Standort West

Abbildung 17 zeigt beispielhaft Reflexionsspektren der Landoberfläche nach der Atmosphärenkorrektur, in diesem Fall von Winterweizen. Jede Linie stellt einen Zeitpunkt innerhalb der Vegetationsperiode 2014 dar. Am 30.03.2014 steigt die Reflexion im Bereich des nahen Infrarots (ca. $0.9 \mu\text{m}$) lediglich bis knapp über 30 %. Aufgrund des noch geringen Wassergehaltes in der Pflanze zeigt sich im mittleren Infrarot (ca. $1.6 \mu\text{m}$) keine eindeutige Senke. Je grüner und vitaler die Pflanze wird, umso steiler zeigt sich der Anstieg zwischen dem sichtbaren Bereich ($0.4\text{--}0.6 \mu\text{m}$) und dem nahen Infrarot, wo die Zellreflexion des Bestandes überwiegt. Aufgrund des zunehmenden Pflanzenwassergehalts zeigt sich die Senke im mittleren Infrarot immer deutlicher. Mit Reflexionswerten im nahen Infrarot bis 60 % und deutlicher Chlorophyll- und Wasserabsorption zeigt das Spektrum vom 05.07.2014 einen äußerst vitalen Winterweizen. Nimmt der Chlorophyllgehalt in der Pflanze ab, sinkt die Chlorophyllabsorption und die Reflexion im sichtbaren Bereich steigt an (20.07.2014). Die Zellstruktur der Blätter bricht mit der Reife zusammen, sodass die Reflexion im nahen Infrarot wieder sinkt. Auch die Wasserabsorption nimmt am Ende der Vegetationsperiode ab, sodass die Senke im mittleren Infrarot nicht mehr so stark ausgeprägt ist.

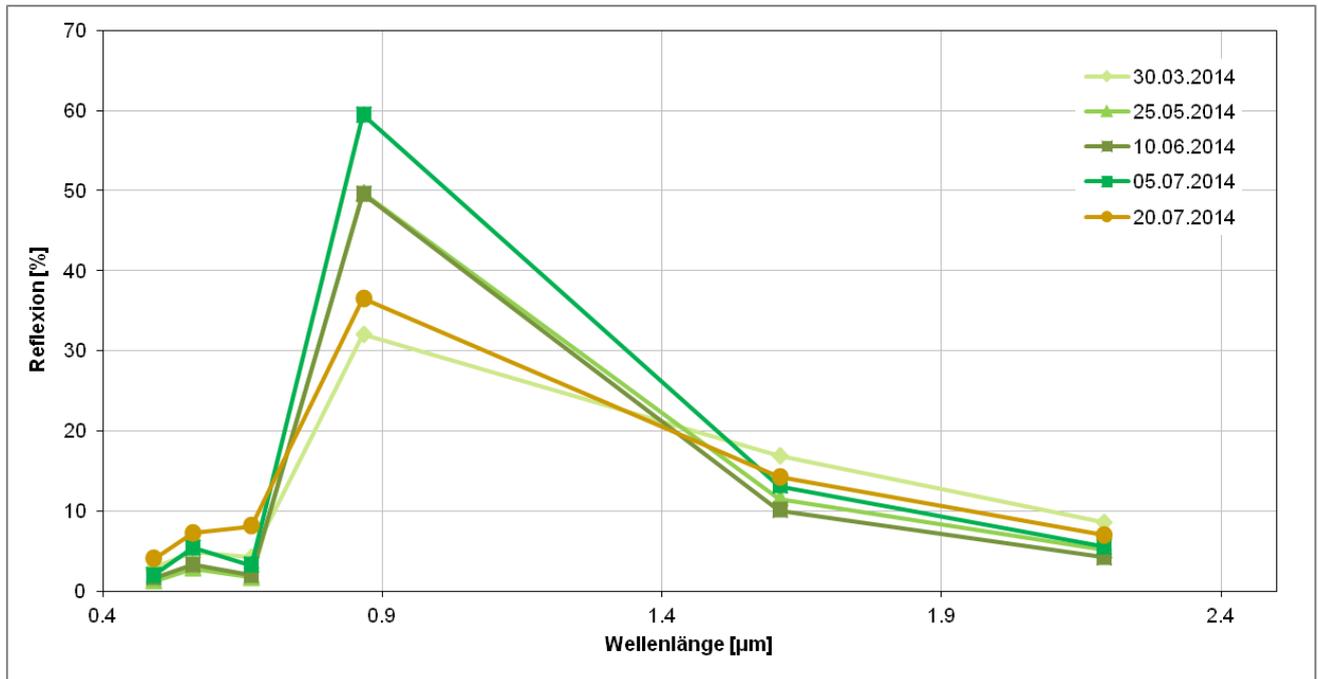


Abbildung 17: Reflexionsspektrum von Winterweizen im zeitlichen Verlauf des Jahres 2014

5.2 Pflanzenparameter aus Satellitendaten

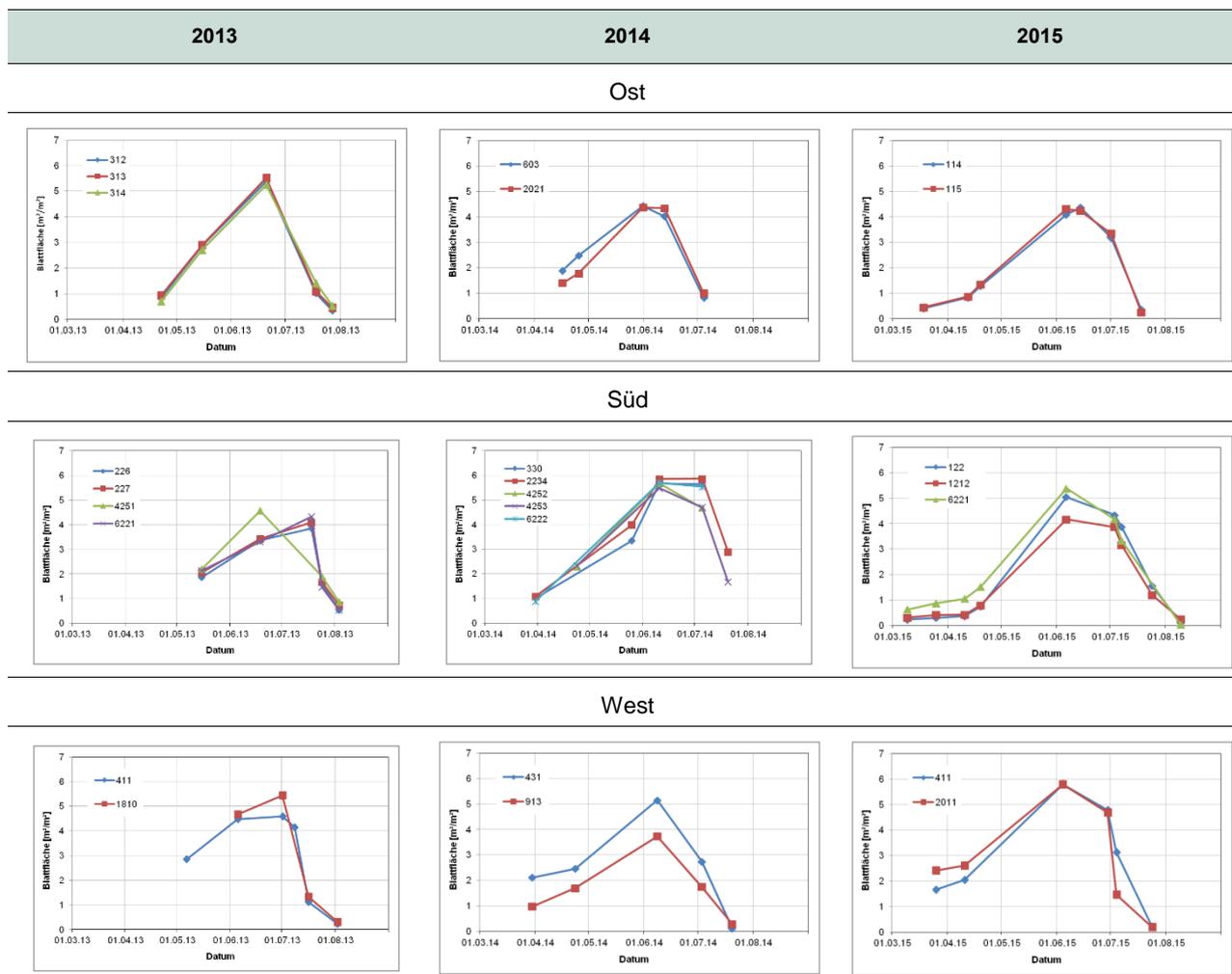
Die folgenden Diagramme zeigen den Wachstumsverlauf in den Jahren 2013, 2014 und 2015 anhand der grünen Blattfläche (LAI) für die Felder, für die Wiegeergebnisse vorhanden sind. Grundsätzlich steigt die grüne Blattfläche in der vegetativen Phase kontinuierlich an, erreicht zum Vegetationsmaximum ihren Höhepunkt und fällt in der Reifephase wieder ab. Äußere Faktoren wie witterungs- und bodenbedingter Wasserstress können zu einem verfrühten Abfall des grünen LAIs führen. Es zeigen sowohl die verschiedenen Jahre als auch die einzelnen Standorte eine hohe Variabilität in den LAI-Verläufen.

In den Diagrammen ist der Verlauf der grünen Blattfläche dargestellt, wie er direkt aus den Satellitendaten abgeleitet wurde, d. h. jeder Punkt im Diagramm entspricht einem ausgewerteten Satellitentermin. Welcher genaue Datensatz dabei zum Einsatz kam, lässt sich aus der Tabelle A1 im Anhang entnehmen.

5.2.1 Winterweizen

Der Winter dauerte im Osten Deutschlands im Jahr 2013 länger an als 2014. Besonders die Diagramme des ersten Standorts Ost in Tabelle 3 für diese beiden Jahre verdeutlichen, dass sich der Winterweizen dort aufgrund von Schnee und niedrigen Temperaturen in 2013 deutlich langsamer entwickelte. 2013 weist der Winterweizen Ende April einen LAI von weniger als $1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ auf. Im gleichen Zeitraum steigt der LAI im Jahr 2014 bereits auf $1,4$ bis $2,4 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

Tabelle 3: LAI-Verlauf Winterweizen



In der räumlichen Darstellung in Abbildung 18 lassen sich sowohl Unterschiede zwischen den Feldern als auch die Heterogenität innerhalb einzelner Schläge erkennen. Als Beispiel dient hier der Winterweizen am Standort Süd im Jahr 2014.

Datenlücken im LAI entstehen durch den Aufnahmefehler des Landsat-7 Satelliten sowie durch Wolken und Wolkenschatten. Sobald Daten des Sentinel-2 Sensors frei verfügbar sind, steht eine weitere Datenquelle zur Verfügung, sodass auf die lückenhaften Landsat-7 Daten verzichtet werden kann.

Die für Weizen beschriebenen Beobachtungen treffen auch für die anderen Fruchtarten zu.

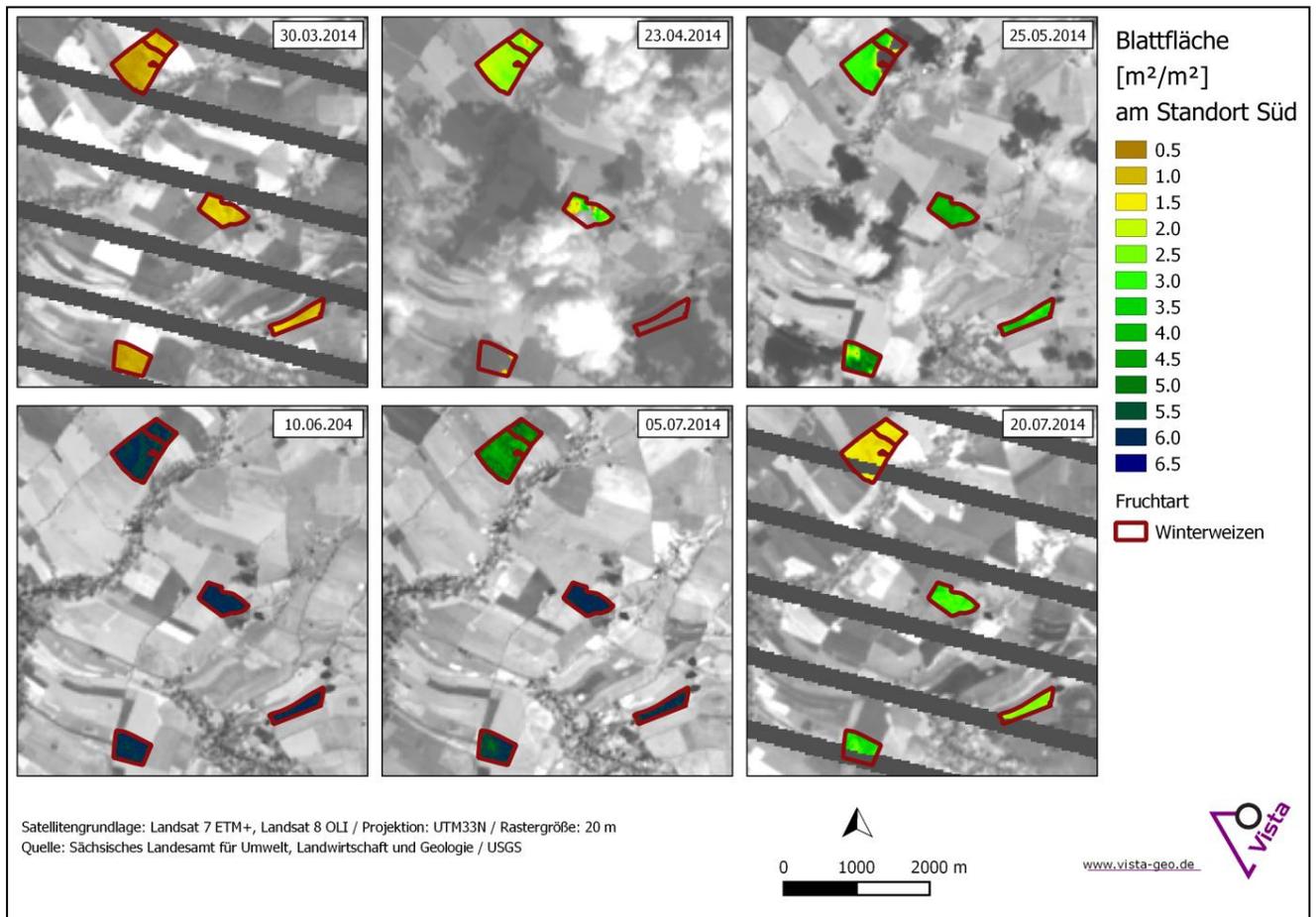
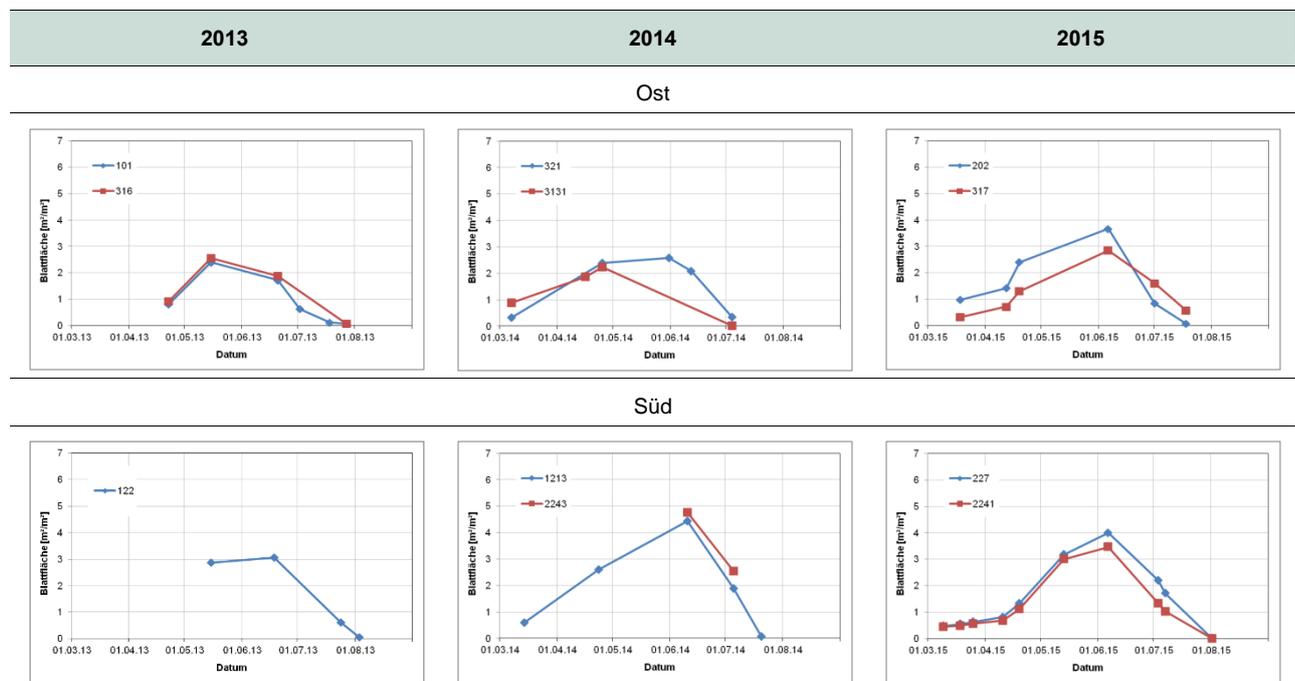


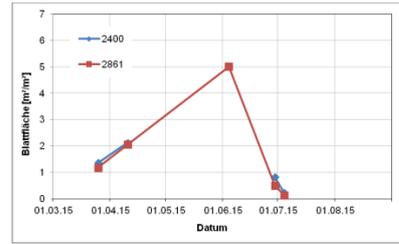
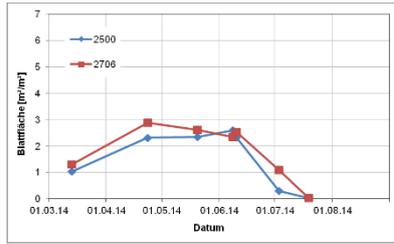
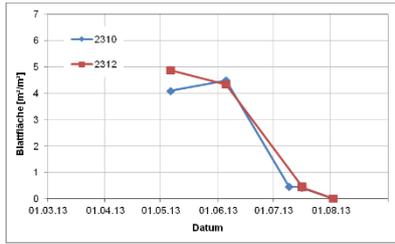
Abbildung 18: Räumliche Darstellung des LAI-Verlaufs; als Beispiel dient der Winterweizen am Standort Süd im Jahr 2014.

5.2.2 Wintergerste

Tabelle 4: LAI-Verlauf Wintergerste



West



5.2.3 Sommergerste

Tabelle 5: LAI-Verlauf Sommergerste

2013	2014	2015
------	------	------

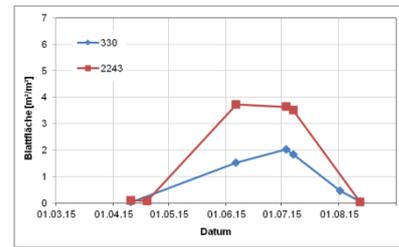
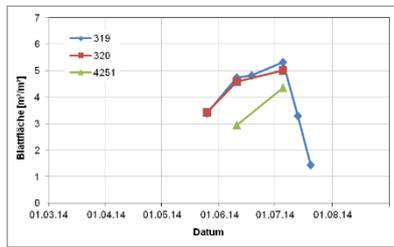
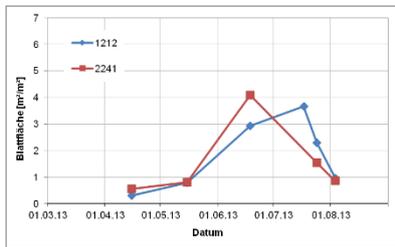
Ost

keine Sommergerste vorhanden

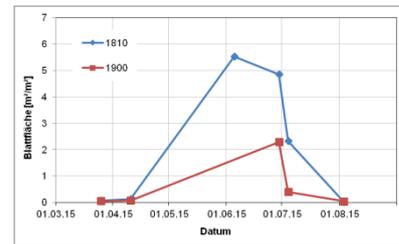
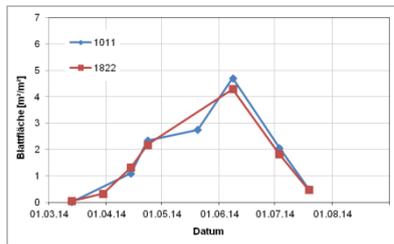
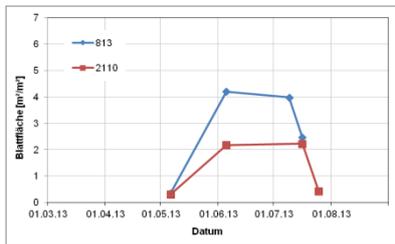
keine Sommergerste vorhanden

keine Sommergerste vorhanden

Süd

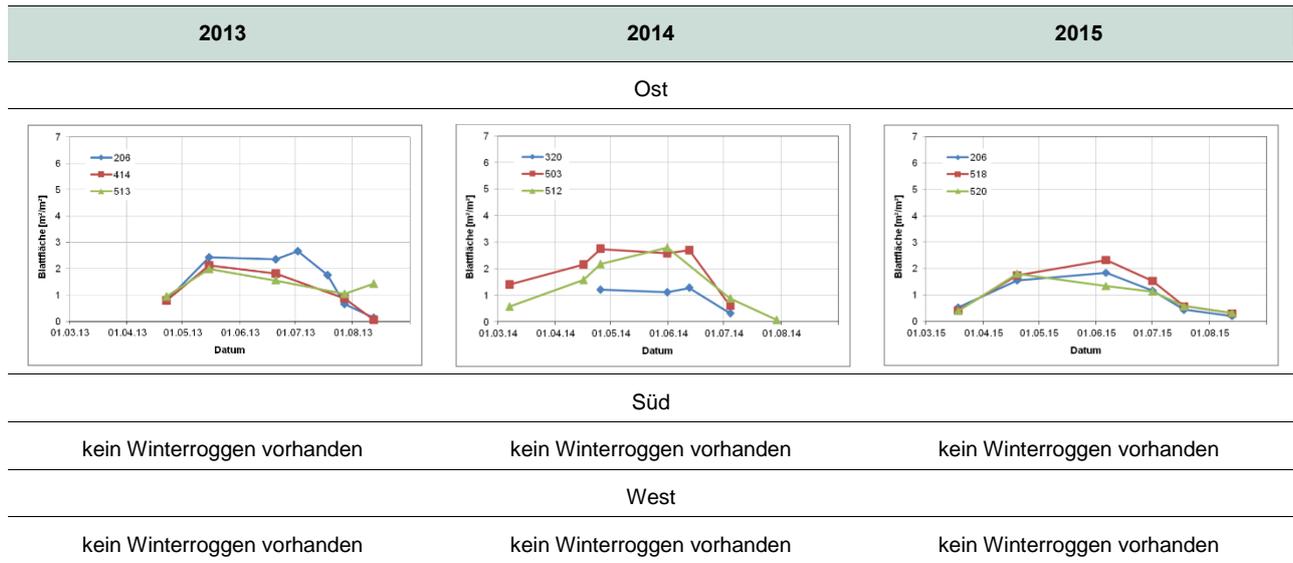


West



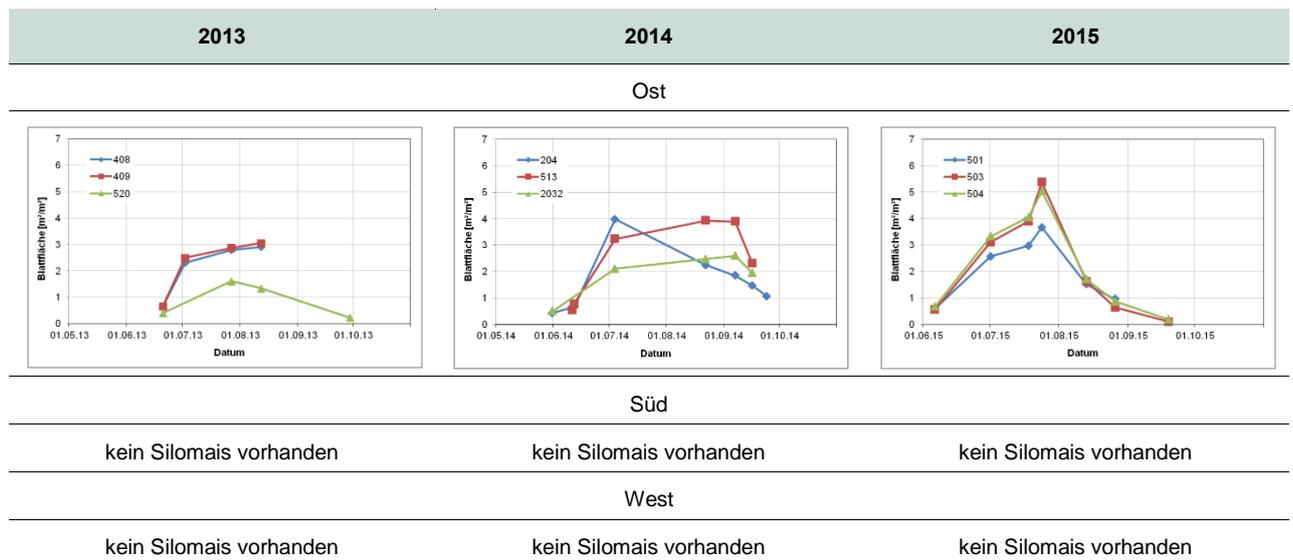
5.2.4 Roggen

Tabelle 6: LAI-Verlauf Winterroggen



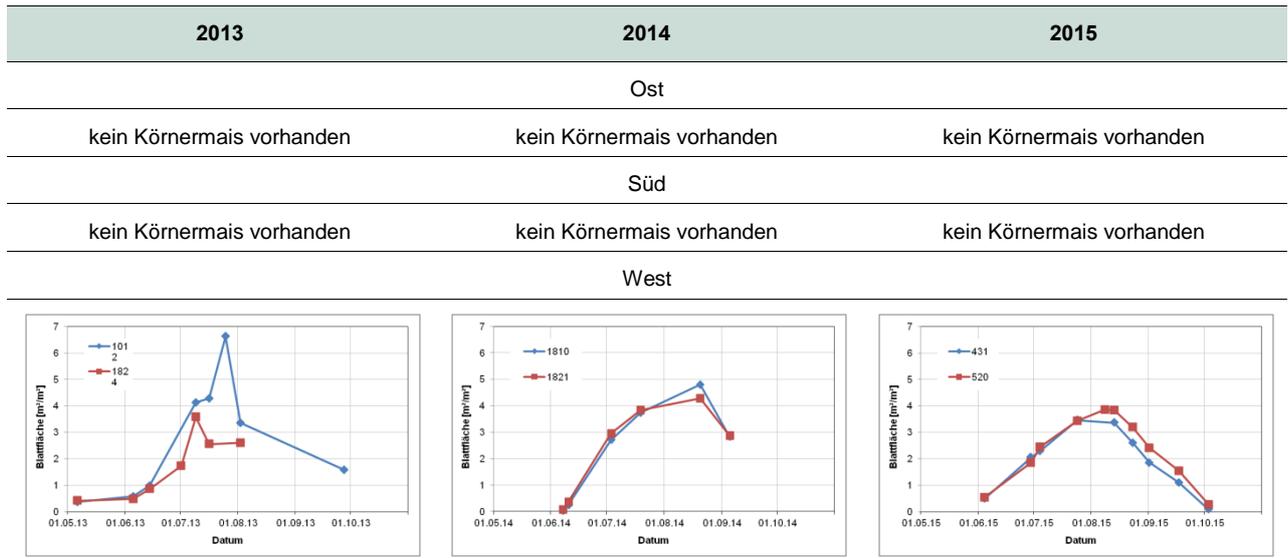
5.2.5 Silomais

Tabelle 7: LAI-Verlauf Silomais



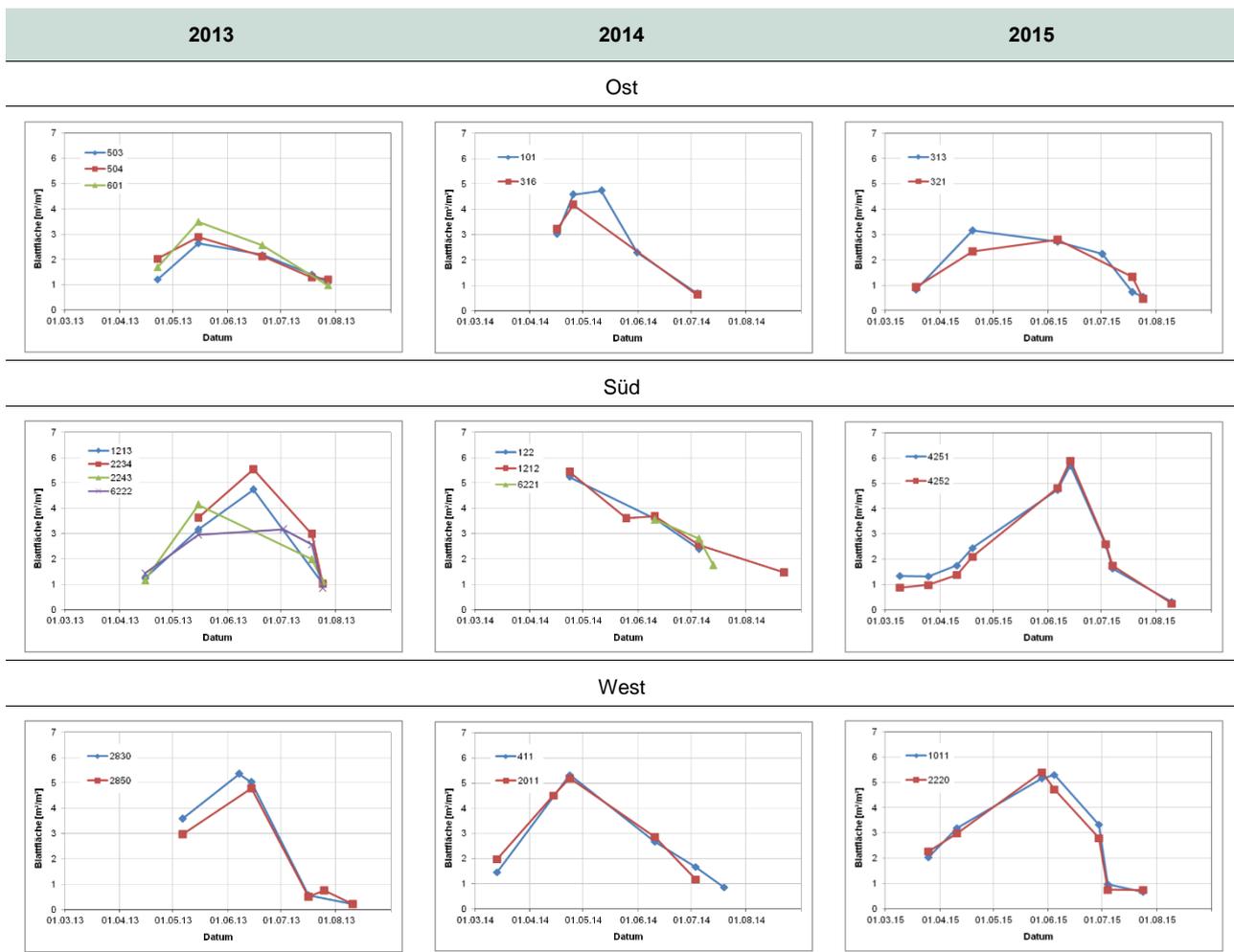
5.2.6 Körnermais

Tabelle 8: LAI-Verlauf Körnermais



5.2.7 Raps

Tabelle 9: LAI-Verlauf Winterraps



5.3 Ertragsmodellierung

Das Pflanzenwachstumsmodell PROMET berücksichtigt zahlreiche meteorologische und hydrologische Größen (vgl. Kap. 4.3), die die Simulation aller pflanzenrelevanten Parameter ermöglichen. Relevante Ausgaben, die das Modell im Hintergrund simuliert und die mit ausgegeben werden können, sind beispielsweise die Lufttemperatur in °C (Abbildung 19), der Niederschlag in mm (Abbildung 20), die Bodenfeuchte in unterschiedlichen Bodentiefen in Vol.% (Abbildung 21), die Verdunstung aufgeteilt nach Verdunstungsart in mm (Abbildung 22) oder der Schneespeicher, angegeben als Schneewasseräquivalent in mm (Abbildung 23). Die dargestellten Abbildungen zeigen die simulierten Größen exemplarisch für den Schlag 431/0 (Winterweizen) am Standort West im Zeitraum vom 01.09.2013 bis 31.08.2014.

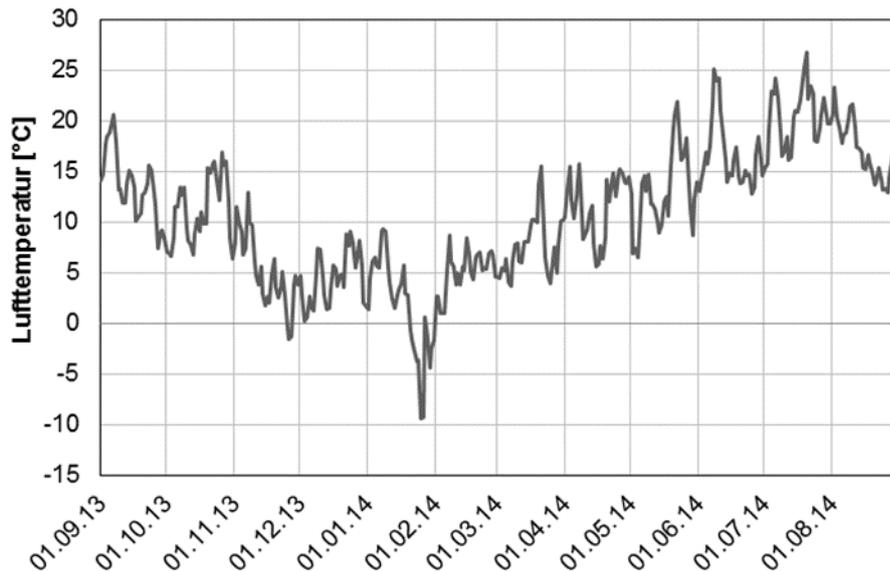


Abbildung 19: Lufttemperatur in °C, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagesmittelwerte für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

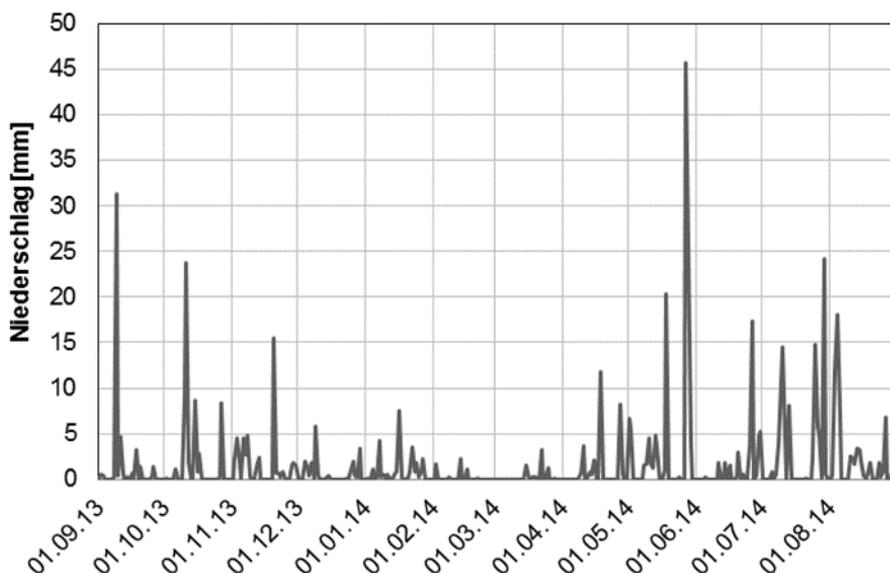


Abbildung 20: Niederschlag in mm, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

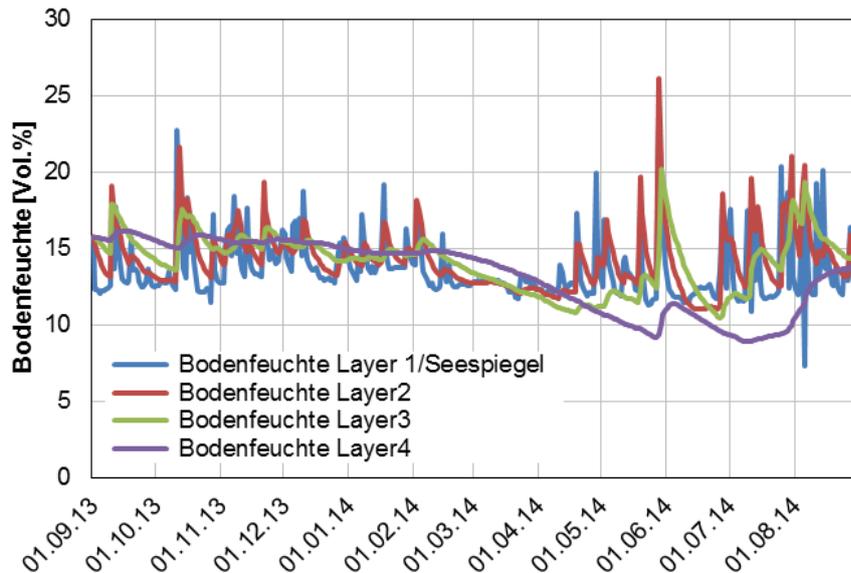


Abbildung 21: Bodenfeuchte in Vol.% in unterschiedlichen Bodentiefen (Layer1 = 0,05 m, Layer2 = 0,20 m, Layer3 = 0,65 m, Layer4 = 2,00 m), simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagesmittelwerte für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

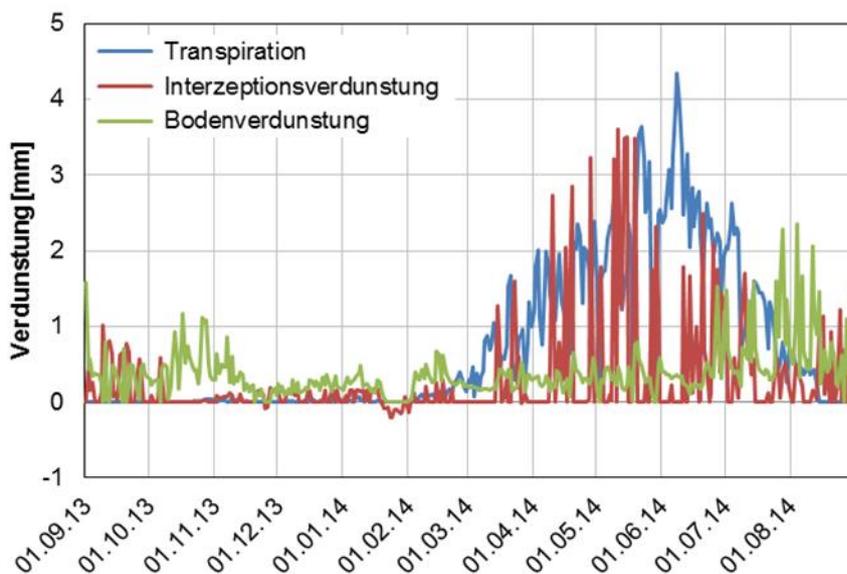


Abbildung 22: Verdunstung in mm nach Verdunstungsart, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

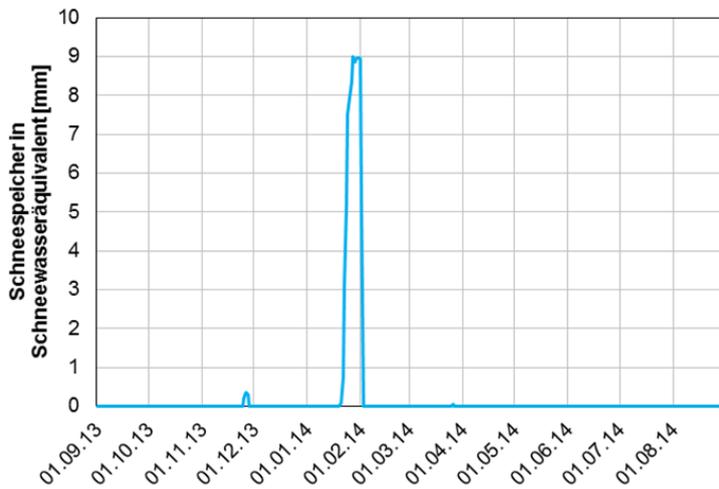


Abbildung 23: Schneespeicher, angegeben als Schneewasseräquivalent in mm, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis, ausgegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

Die wichtigsten pflanzenrelevanten Größen, die das Modell simuliert, sind:

- die phänologische Entwicklung, angegeben in Form des BBCH-Codes¹⁰ (Abbildung 24)
- die Verteilung bzw. Allokation der produzierten Biomasse in die verschiedenen Pflanzenkompartimente in kg/m² (Abbildung 25)
- die grüne Blattfläche in m²/m² (Abbildung 26)
- die Beeinflussung des Wachstums durch Wasserstress (Abbildung 27)
- letztendlich der zur Verfügung stehende Ertrag in t/ha (Abbildung 28)

Die genannten Größen werden in den folgenden Abbildungen ebenfalls exemplarisch für den Standort West, Schlag 431/0 im Zeitraum von 01.09.2013 bis 31.08.2014 gezeigt. Die Modellierung erfolgte unter der Annahme einer optimalen Nährstoffversorgung und einer durchschnittlichen phänologischen Entwicklung. Die beiden genannten Größen – Nährstoffversorgung und Phänologie – sind im Modell die wesentlichen Steuerungsfaktoren für die Kalibrierung des Modells mithilfe der Satellitenbilder.

Als Aussaattermin wurde anhand der phänologischen Beobachtungsdaten des DWD für 2012 der mittlere Aussaattermin aller Stationen in Sachsen für Winterweizen (29. September) bestimmt und im Modell angenommen¹¹. Den Erntetermin bestimmt das Modell, falls nicht anders angegeben, automatisch, sobald die letzte phänologische Reifephase (BBCH 89) überschritten wird.

¹⁰ Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen. BBCH Monografie. 2 Auflage: Biologische Bundesanstalt für Land und Forstwirtschaft (BBA) (Hrsg.), Julius Kühn-Institut (JKI) Open Journal System.

¹¹ Phänologie Daten Deutschland: Climate Data Center (CDC) FTP-Server. Deutscher Wetterdienst (DWD). URL: ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/phenology/ [Zugriffsdatum: 18.11.2015].

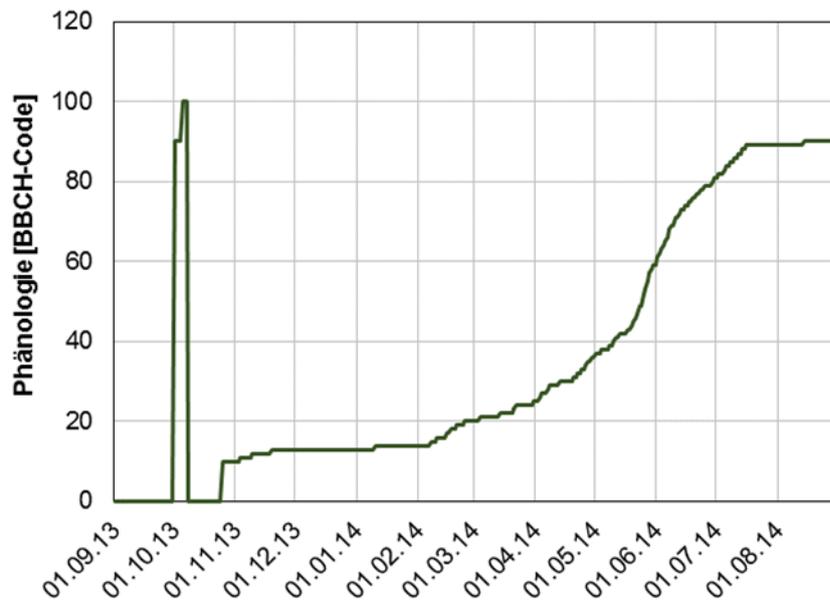


Abbildung 24: Phänologie von Winterweizen, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis und aggregiert zu Tageswerten für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

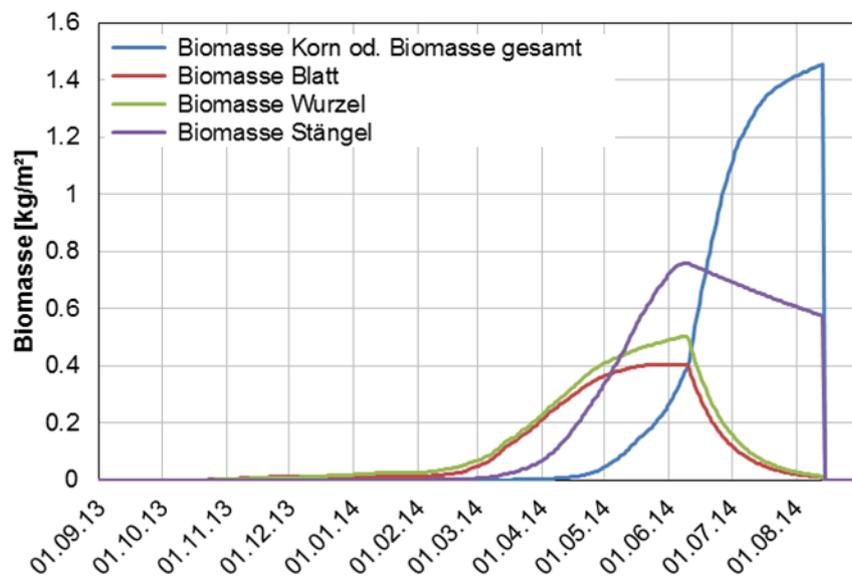


Abbildung 25: Verteilung bzw. Allokation der produzierten Biomasse in die einzelnen Pflanzenkompartimente Wurzeln, Blatt, Stängel und Korn, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis für die Fruchtart Winterweizen und angegeben als Tagessummen für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

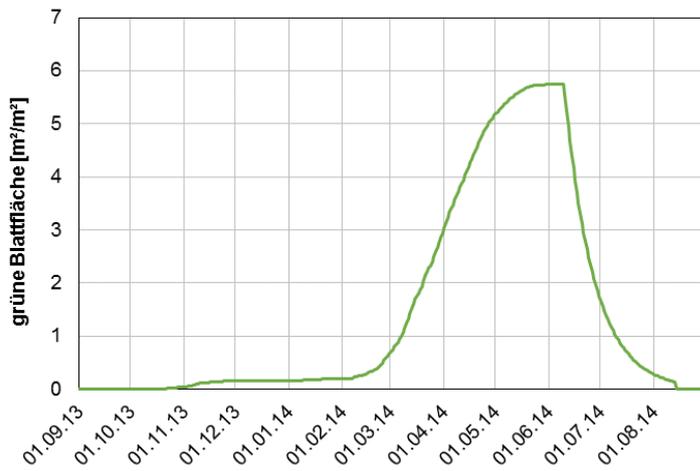


Abbildung 26: Grüne Blattfläche von Winterweizen in m^2/m^2 , simuliert in PROMET auf stündlicher Basis und angegeben als Tagesmittelwerte für den Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014

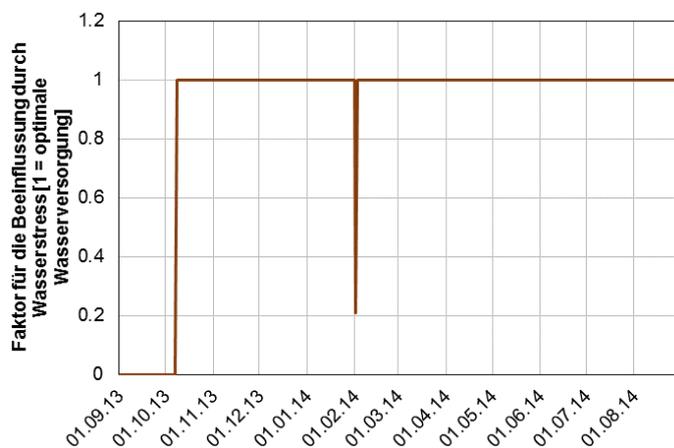


Abbildung 27: Beeinflussung des Winterweizen-Wachstums an Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.09.2013-31.08.2014 durch Wasserstress, simuliert in PROMET auf stündlicher Basis und angegeben als dimensionsloser Faktor (1 = optimale Wasserversorgung)

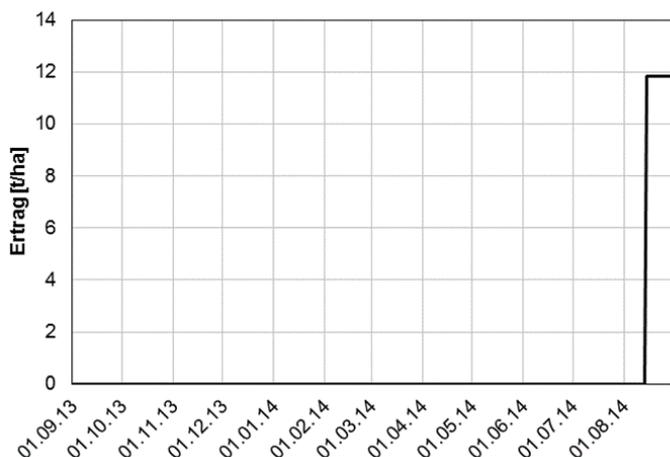


Abbildung 28: Ertrag des Winterweizen-Schlags 431/0 am Standort West in t/ha unter optimalen Bedingungen (normale Phänologie, optimale Nährstoffversorgung), simuliert in PROMET für die Ernte nach der Wachstumsperiode 01.09.2013-31.08.2014

Simuliert man das Pflanzenwachstum im Modell unter der Annahme einer optimalen Nährstoffversorgung und einer durchschnittlichen phänologischen Entwicklung (standardmäßig Szenario 01 im Ensemblelauf), so ergibt sich daraus ein jahresspezifisches Ertragspotenzial. Dieses Ertragspotenzial drückt aus, wie viel Ertrag eine Fruchtart am betrachteten Standort aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften (Boden etc.) und der gegebenen Temperatur, Niederschlag und Strahlung maximal erreichen kann. In diesem Beispiel wird das Ertragspotenzial für einzelne Jahre gerechnet und zeigt den bei optimaler Bewirtschaftung theoretisch erzielbaren Ertrag. Managementoptionen des Landwirts wie die Düngung, Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln oder die Ernteplanung sind dabei nicht berücksichtigt.

Abbildung 29 zeigt die modellierten, jahresspezifischen Ertragspotenziale für Winterweizen am Standort Süd für die Jahre 2013, 2014 und 2015 im Vergleich mit den mittleren gemessenen Erträgen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren sind deutlich erkennbar und verlaufen bei beiden Datenquellen nach den gleichen Mustern, d. h. die niedrigsten Erträge des Standorts wurden in 2013 gemessen und auch das Ertragspotenzial erreicht in diesem Jahr den kleinsten Wert. Etwas höhere Erträge und auch ein deutlich höheres Potenzial können für 2015 festgestellt werden. Am höchsten war das Ertragsniveau für Winterweizen an diesem Standort laut Potenzial-Simulation und Ertragsmessung im Jahr 2014.

Die tatsächlich gemessenen Erträge müssen gemäß ihrer Definition niedriger liegen als die Ertragspotenziale, was ebenfalls aus der Grafik ersichtlich ist.

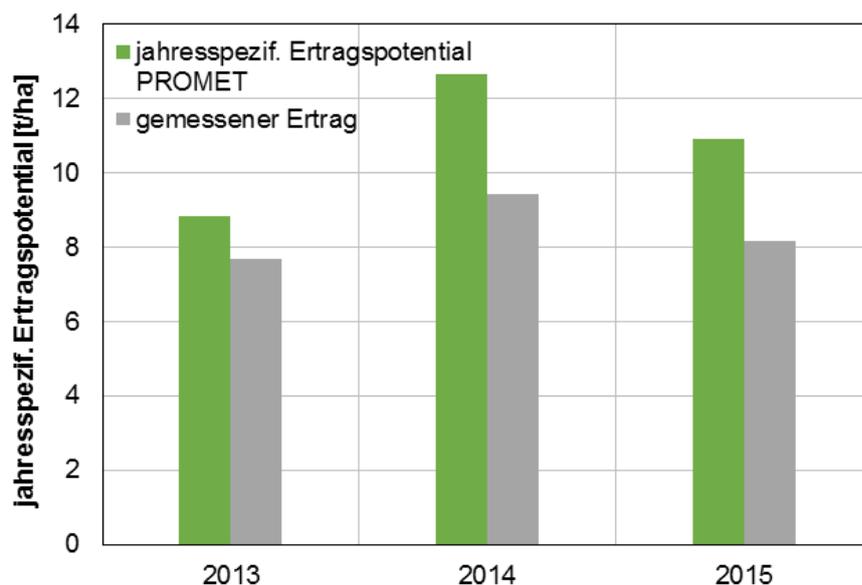


Abbildung 29: Vergleich des in PROMET simulierten jahresspezifischen Ertragspotenzials für Winterweizen am Standort Süd für die Jahre 2013, 2014 und 2015 mit den entsprechenden mittleren gemessenen Erträgen des Standorts

Um aus dem Ertragspotenzial auch im Modell auf den tatsächlichen Ertrag zu schließen, werden wie in Kapitel 4.3 beschrieben, Ensembleläufe mit einer Vielzahl an Szenarien gerechnet, in denen jeweils die Geschwindigkeit der phänologischen Entwicklung (dimensionsloser Faktor) sowie die Nährstoffversorgung (in Prozent) variiert wird. Tabelle 10 zeigt beispielhaft das Szenarien-Ensemble mit seinen unterschiedlichen Faktoren, das in PROMET für den Winterweizen-Schlag 431/0 des Standorts West für die Wachstumsperiode 01.09.2013 bis 31.08.2014 gerechnet wurde.

Tabelle 10: Szenarien-Ensemble, das in PROMET beispielhaft für den Winterweizen-Schlag 431/0 des Standorts West in der Wachstumsperiode 01.09.2013-31.08.2014 gerechnet wurde, um die Methode der Assimilierung von Satellitenbildern ins Modell zu verdeutlichen

Szenario Nr.	Geschwindigkeit der Phänologie (dim.los)	Nährstoffversorgung (%)	Ertrag FNR 431/0 (t/ha)
01	1.0	100%	11.9
02	1.0	95%	11.6
03	1.0	90%	11.4
04	1.0	85%	11.2
05	1.0	80%	10.9
06	1.0	75%	10.6
07	0.9	100%	11.6
08	0.9	95%	11.4
09	0.9	90%	11.2
10	0.9	85%	10.9
11	0.9	80%	10.6
12	0.9	75%	10.3
13	1.1	100%	11.9
14	1.1	95%	11.7
15	1.1	90%	11.4
16	1.1	85%	11.2
17	1.1	80%	10.9
18	1.1	75%	10.5
19	1.0	50%	8.2
20	0.9	50%	8.1
21	1.1	50%	8.1
22	0.9	65%	9.6

Abbildung 30 zeigt schließlich das aus den Szenarien resultierende Ensemble der simulierten LAI-Verläufe für den Standort. Die roten Karos kennzeichnen die LAI-Werte aus den Satellitendaten. Aus dem Ensemblelauf kann nun zunächst der LAI-Verlauf ausgewählt werden, der insgesamt am besten zu den per Satellit gemessenen Werten passt, was in diesem Fall Szenario 10 wäre (als schwarze Linie gekennzeichnet).

Das Modell assimiliert seinen simulierten LAI in Wirklichkeit jedoch zu jedem Zeitpunkt neu, an dem ein Wert aus Satellitendaten eingespeist wird, sodass sich am Ende ein LAI-Verlauf ergibt, der dem Verlauf aus der Realität möglichst stark ähnelt.

Die Nährstoffversorgung eines Feldes variiert in der Natur zu jedem Zeitpunkt in der laufenden Wachstumsperiode. Die Geschwindigkeit der phänologischen Entwicklung wird hauptsächlich durch Sortenunterschiede gesteuert. Das Modell kann genau diese realen Bedingungen widerspiegeln und passt seine pflanzenspezifischen Parameter laufend daran an.

Die variierenden Ausgangsbedingungen steuern zu jedem Zeitpunkt in unterschiedlich starkem Maße den zu erwartenden Ertrag des Standorts, sodass sich aus den verschiedenen Szenarien auch unterschiedlich hohe Erträge ergeben. Die simulierten Erträge der jeweiligen Szenarien für den betrachteten Standort sind in Abbildung 31 zu sehen.

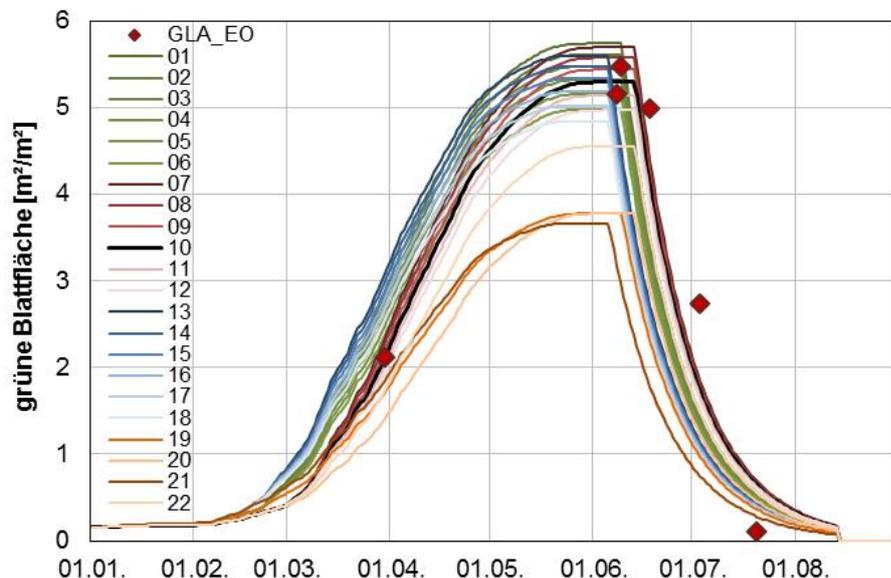


Abbildung 30: Entwicklung der grünen Blattfläche (LAI) von Winterweizen, simuliert im PROMET-Ensemble auf Basis der unterschiedlichen Szenarien 01-22 für Schlag 431/0 am Standort West im Zeitraum 01.01.-31.08.2014. Die roten Karos zeigen die aus Satellitendaten ermittelten Werte.

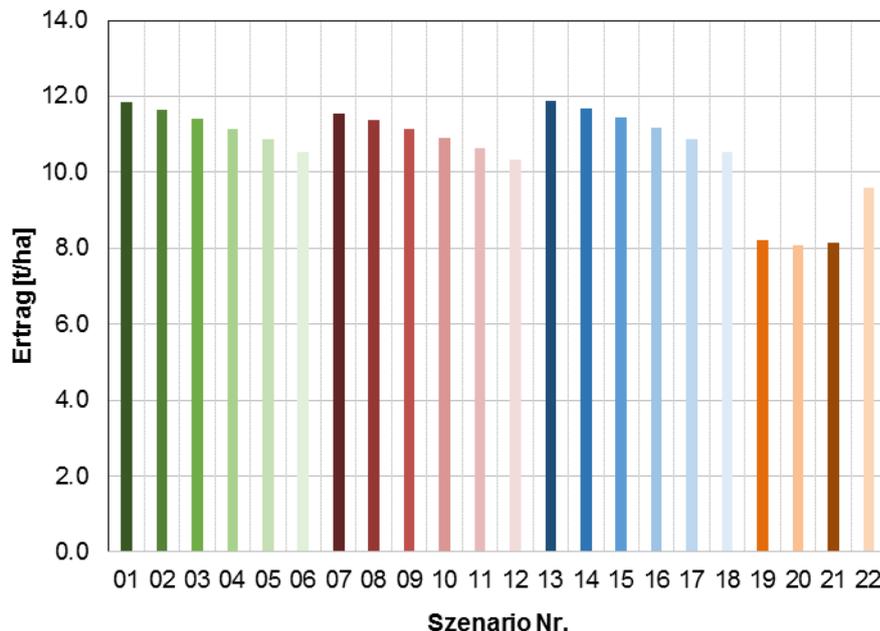


Abbildung 31: Kornenertrag des Winterweizen-Schlags 431/0 am Standort West in t/ha , simuliert in PROMET unter Annahme verschiedener Bedingungen im Szenarien-Ensemble 01-22 für die Vegetationsperiode 01.09.2013-31.08.2014

Auf diese Weise wurden alle Schläge unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fruchtarten für die drei Jahre modelliert. Die Validierung der Ergebnisse auf Basis der gelieferten Wiege­daten des Auftraggebers wird in Kapitel 6 behandelt.

5.4 Aufbereitung der In-Situ-Ertragskarten

Für den südlichsten Ausschnitt der Untersuchungsflächen (Betrieb Süd) wurden Vista räumliche Ertrags­daten aus den Jahren 2013 und 2014 zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden im Originalformat, d. h. wie während der Ernteüberfahrt vom Mäh­drescher aufgezeichnet, übermittelt. Zusätzlich wurden für die Jahre 2013 und 2014 für alle Standorte die Wiege­ergebnisse verschiedener Schläge geliefert. Die Aufbereitung der räumlichen Ertrags­daten erfolgte in mehreren Arbeitsschritten, die im Folgenden einzeln beschrieben werden.

5.4.1 Konvertierung der Ertragsdaten in nutzbare Shape-Dateien

Die Ertrags­daten waren VISTA im Originalformat von John Deere zur Verfügung gestellt worden. Zur weite­ren Bearbeitung mussten die Daten in ein Dateiformat konvertiert werden, das die Bearbeitung mit gängigen Geo-Informationssystemen erlaubte. In diesem Fall wurden die Daten in Punkt-Shape-Dateien konvertiert. Die Software AgrarOffice der Firma FarmFacts wurde genutzt, um die Originaldaten einzulesen. Anschlie­ßend wurden die Shape-Dateien mit Hilfe des Unterprogramms ACViewer als Shape-Datei exportiert.

5.4.2 Bereinigung des Datensatzes

Während der Erntefahrt aufgezeichnete Ertrags­daten enthalten oft Datenpunkte mit ungültigen Werten. Hier­zu gehören beispielsweise Bereiche im Vorgewende, die während der Ernteüberfahrt mehrmals überfahren werden und daher Null-Werte haben. Auch unrealistisch hohe Ertrags­werte sind möglich und sind zumeist durch variierende Fahrgeschwindigkeiten der Erntemaschine bedingt¹².

Um die Ertrags­werte korrekt interpretieren zu können, wurden die Datensätze daher von derartigen Fehler­werten bereinigt. Hierzu wurden anhand einer Histogrammanalyse unrealistisch hohe und niedrige Ertrags­werte aus dem Datensatz ausgeschlossen.

Die genaue Aufbereitung der Ertrags­daten soll anhand des Beispielschlages mit der Schlagnummer 1213 (121/3) für Raps 2013 erläutert werden. In den Originaldaten, wie sie VISTA übergeben wurden (Abbildung 32), ist eine hohe Anzahl rot bzw. schwarz markierter Datenpunkte zu sehen. Schwarz markiert sind Daten­punkte, an denen keinerlei Ertrag gemessen wurde. Dies geschieht in all denen Bereichen des Schlages, an denen eine Fahrspur mehrmals vom Sensor überfahren wurde, also zumeist im Bereich des Vorgewendes. Hier wurde bei der zweiten Überfahrt der Fläche kein Ertrag mehr gemessen, weil die Fläche ja zuvor schon abgeerntet worden war. Auch unrealistisch hohe Werte kommen in der Ertrags­messung vor. Der höchste gemessene Ertrags­wert liegt bei 84,76 t/ha.

Die Analyse des Histogramms der Originaldaten (Abbildung 33) zeigt jedoch, dass der Großteil der Werte sich in einem realistischen Wertebereich zwischen 0 und 20 t/ha bewegt. Anmerkung: In diesem Histogramm

¹² STEINMAYR, T. (2002): Dissertation - Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mäh­drescher zur Ablei­tung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung. Technische Universität München.

wurden aus Gründen der grafischen Darstellbarkeit Werte über 20 t/ha nicht mit einbezogen. Auch Werte aus doppelten Überfahrten (Nullwerte) tauchen in diesem Histogramm nicht mehr auf.

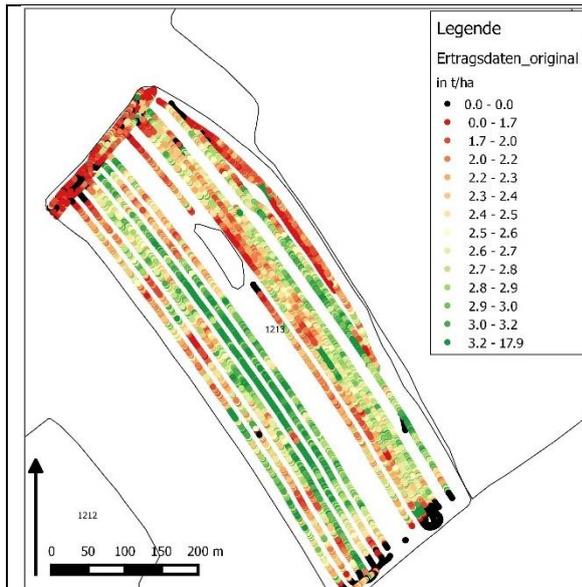


Abbildung 32: Original Ertragsdaten für Schlag 121/3 mit Winterraps 2013

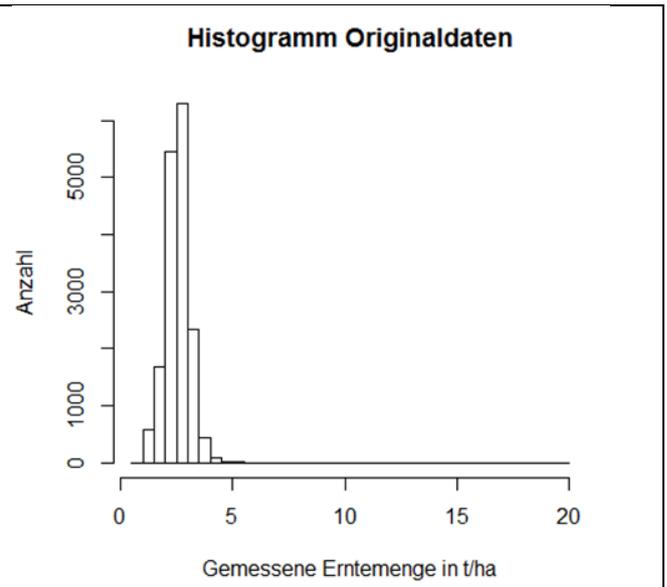


Abbildung 33: Histogramm der Originaldaten bis Werte von 20 t/ha

Nach dem Ausschluss extrem hoher Ertragswerte und der Nullwerte verbleiben insbesondere an den Randbereichen des Schlages viele Datenpunkte mit sehr niedrigen Ertragswerten. Dies ist durch den verringerten Korndurchfluss am Sensor nach der Entleerung über dem Vorgewende bedingt. In einem weiteren Aufbereitungsschritt wurde daher nun der Bereich der valide klassifizierten Ertragsdaten weiter eingeschränkt auf Werte im Bereich Schlagmittelwert +/- Standardabweichung. Auf diese Weise werden auch Datenpunkte mit extrem niedrigen Ertragsmesswerten im Randbereich der Schläge aussortiert.

Letztendlich ist der Datensatz, der zur Erstellung der Ertragsdaten verwendet wurde, um die größten Ausreißer bereinigt. Die Analyse des Histogramms der verbleibenden Daten zeigt, dass es sich in diesem Fall um einen recht homogenen Schlag mit gleichmäßiger Verteilung der gemessenen Ertragswerte handelt.

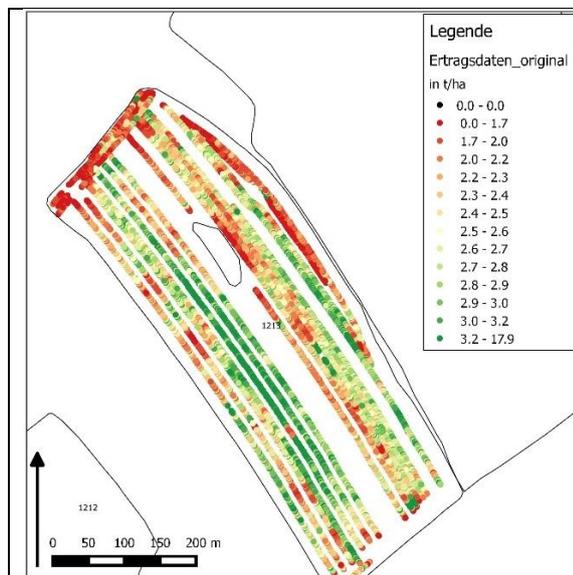


Abbildung 34: Bereinigte Ertragsdaten

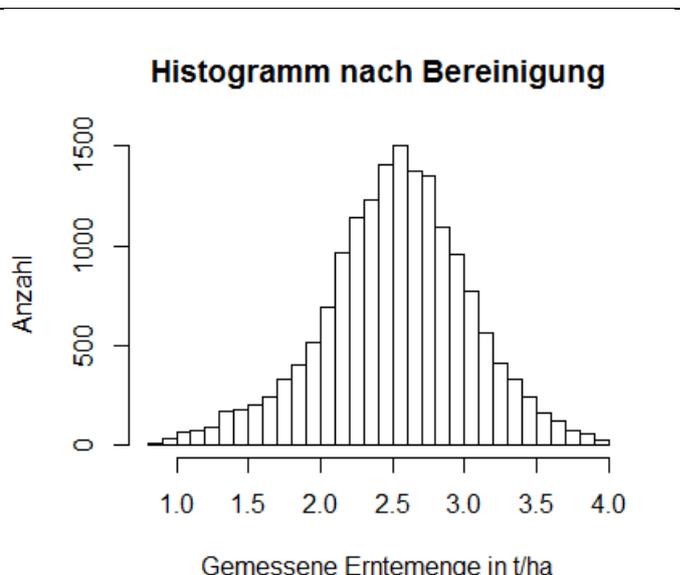


Abbildung 35: Histogramm der bereinigten Ertragsdaten

5.4.3 Interpolation der Punktdaten

Die bereinigten Punktdaten wurden nun in ein Raster mit einer Auflösung von 20 x 20 m überführt, um mit dem Raster der Ertragsmodellierung vergleichbar zu sein. Dazu wurden jeweils die gemessenen Ertragswerte der einzelnen Aufnahmepunkte in einem Radius von 20 m um die Pixelmitte des späteren Pixels interpoliert.

5.4.4 Kalibrierung mit gelieferten Wiegeergebnissen

Für die Schläge liegen neben den während der Überfahrt gemessenen Ertragsdaten auch die Wiegeergebnisse der Ernte zu den einzelnen Schlägen vor.

Die während der Überfahrt gemessenen Ertragsdaten geben die räumliche Verteilung von Ertragsunterschieden im Schlag wieder. Sensorbedingt kann es jedoch zu Abweichungen in der totalen Höhe der Werte kommen. Es wurde daher der Schlagmittelwert der Erntedaten an die nach der Ernte tatsächlich gewogenen Erträge angeglichen. Dazu wurden die Pixelwerte der einzelnen Pixel im Schlag mit einem einheitlichen Faktor multipliziert. Die Kalibrierung mit den Wiegeergebnissen verändert daher die räumliche Variabilität der Ertragsdaten nicht. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die vorhandenen Daten 2013 (Tabelle 11) und 2014 (Tabelle 12).

Tabelle 11: Schlagweise zusammengefasste Ertragsdaten für Betrieb Süd 2013

Schlagnummer	Ertragsmittelwert nach Interpolation in t/ha	Erntejahr 2013		
		Gewogener Ertragsmittelwert in t/ha	Kalibrierfaktor	Ergebnis-Ertrag nach Kalibrierung in t/ha
122	6.56	6.08	0.93	6.08
226	6.74	7.68	1.14	7.68
227	6.54	7.51	1.15	7.51
319	nicht vorhanden	nicht vorhanden	-	-
320	nicht vorhanden	nicht vorhanden	-	-

121/2	4.11	5.14	1.25	5.14
121/3	2.52	3.62	1.44	3.62
223/4	3.23	4.35	1.35	4.35
224/1	3.46	4.28	1.24	4.28
224/3	3.33	4.46	1.34	4.46
425/1	6.58	7.64	1.16	7.64
622/1	6.58	7.68	1.17	7.68
622/2	2.52	3.46	1.37	3.46

Tabelle 12: Schlagweise zusammengefasste Ertragsdaten für Betrieb Süd 2014

Erntejahr 2014				
Schlagnummer	Ertragsmittelwert nach Interpolation in t/ha	Gewogener Schlagmittelwert in t/ha	Kalibrierfaktor	Ergebnis-Ertrag nach Kalibrierung in t/ha
122	3.53	4.61	1.31	4.61
319	6.62	6.36	0.96	6.36
320	6.90	6.95	1.01	6.95
330	9.25	10.77	1.16	10.77
121/2	3.90	4.86	1.25	4.86
121/3	8.69	7.88	0.91	7.88
223/4	9.14	10.04	1.10	10.04
224/3	7.89	6.62	0.84	6.62
425/1	5.40	4.50	0.83	4.50
425/2	7.59	8.32	1.10	8.32
425/3	8.05	7.88	0.98	7.88
622/1	3.88	5.16	1.33	5.16
622/2	8.66	10.12	1.17	10.12

Ein Beispiel für einen fertig aufbereiteten (und in diesem Fall nicht mit Wiegeergebnissen kalibrierten) Teilschlag befindet sich in Abbildung 36.

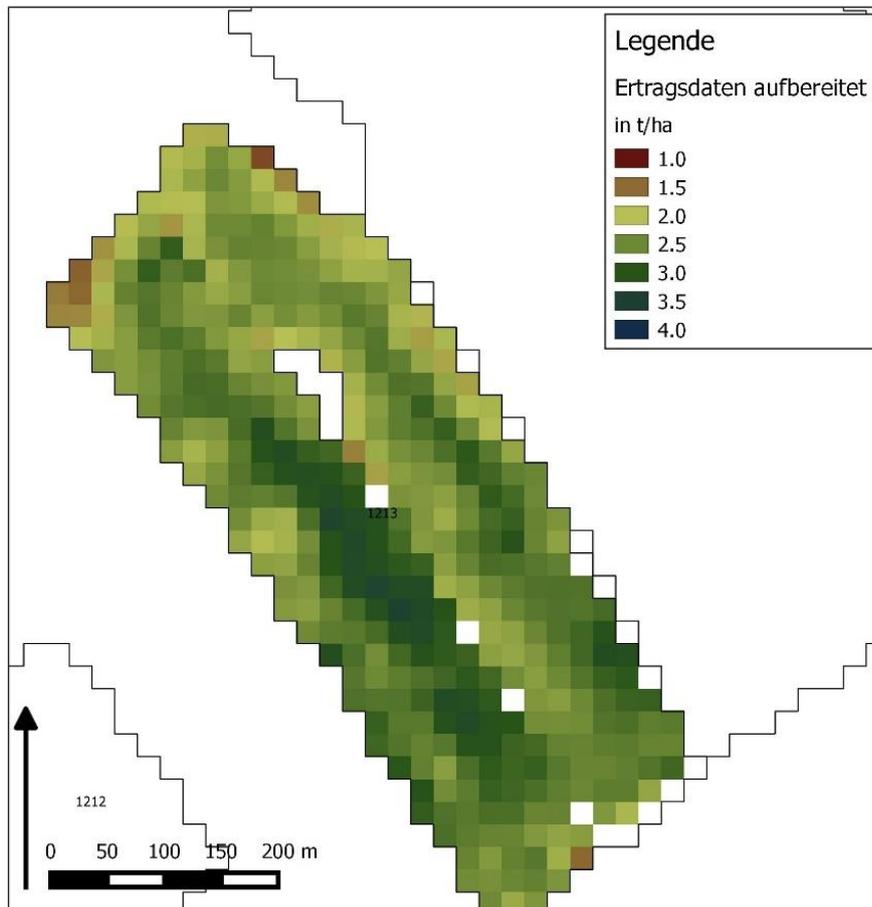


Abbildung 36: Aufbereitete Ertragskarte für Teilschlag 1213/3

6 Validierung der Ergebnisse

6.1 Teilflächenspezifische Validierung

In den folgenden Übersichtskarten sind die aufbereiteten räumlich verteilten Ertragsdaten für die Jahre 2013 (Abbildung 37) und 2014 (Abbildung 39) jeweils im Vergleich zu den Ergebnissen der räumlichen Ertragsmodellierung für die beiden Jahre (Abbildung 38 und Abbildung 40) dargestellt.

Die Ertragskarten aus der Messung zeigen – bis auf die typischen Muster durch die Mährescherüberfahrten – keine starken räumlichen Variationen. Bei Betrachtung der im Modell simulierten Ertragskarten lassen sich fruchtartenspezifische Variationen in der Ertragsmenge gut erkennen. Zudem zeigen sich besonders 2014 (Abbildung 40) auffällige Muster innerhalb einzelner Felder, die zur besseren Sichtbarkeit in der Abbildung durch Pfeile gekennzeichnet sind. In Kap. 6.4 am Ende der Ergebnisvalidierung erfolgt eine Bewertung der für die Ertragsmodellierung verwendeten Bodendaten. Diese Analyse wird zeigen, dass die genannten Muster vor allem kleinräumige Unterschiede zwischen den parametrisierten Bodenarten abbilden und damit auf Schwächen in der Parametrisierung hindeuten. Dieser Sachverhalt wird im entsprechenden Unterkapitel noch genauer diskutiert.

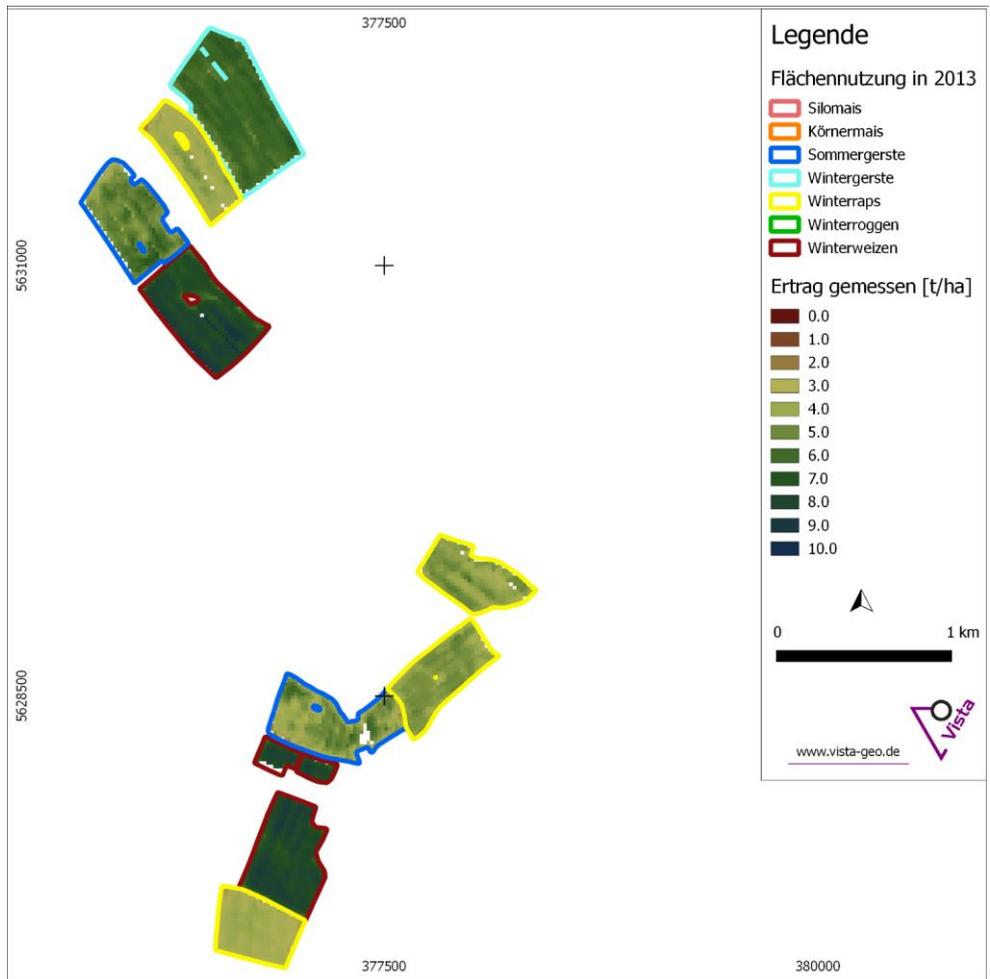


Abbildung 37: Ertragsdaten 2013 aus Mähreschermessung im Testbetrieb Süd

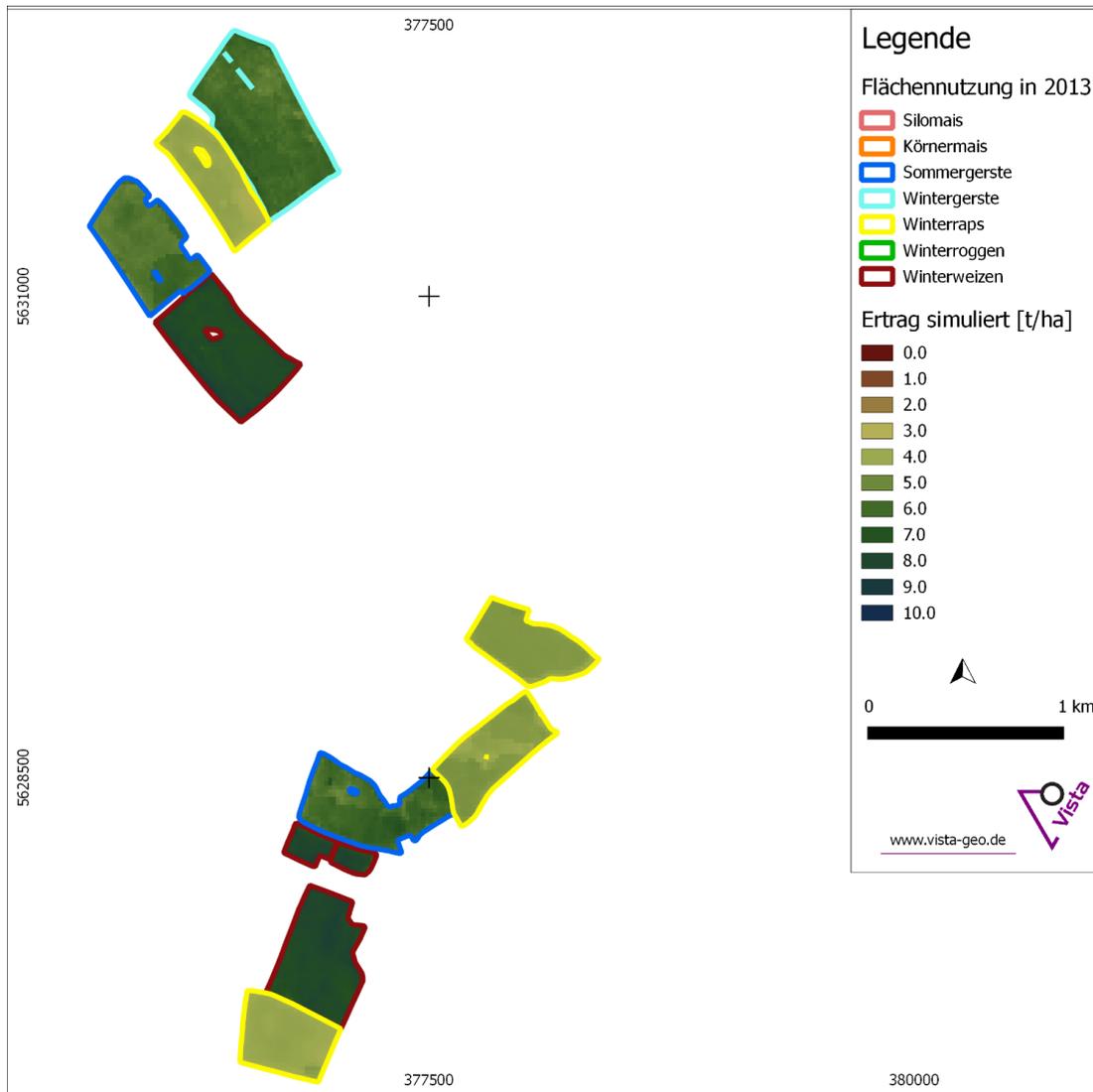


Abbildung 38: Ertrag 2013 simuliert im Testbetrieb Süd

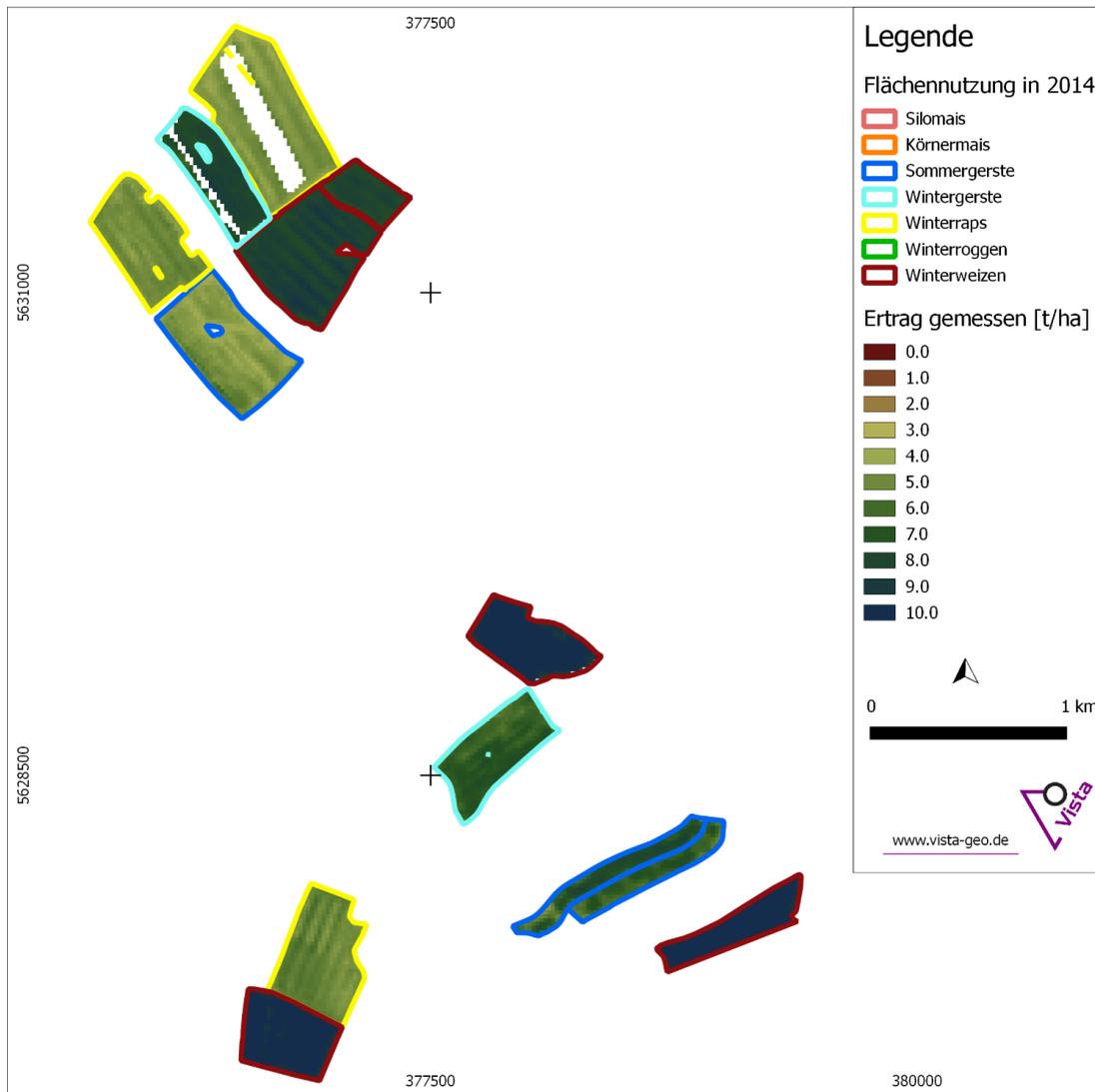


Abbildung 39: Ertragsdaten 2014 aus Mähdreschermessung im Testbetrieb Süd

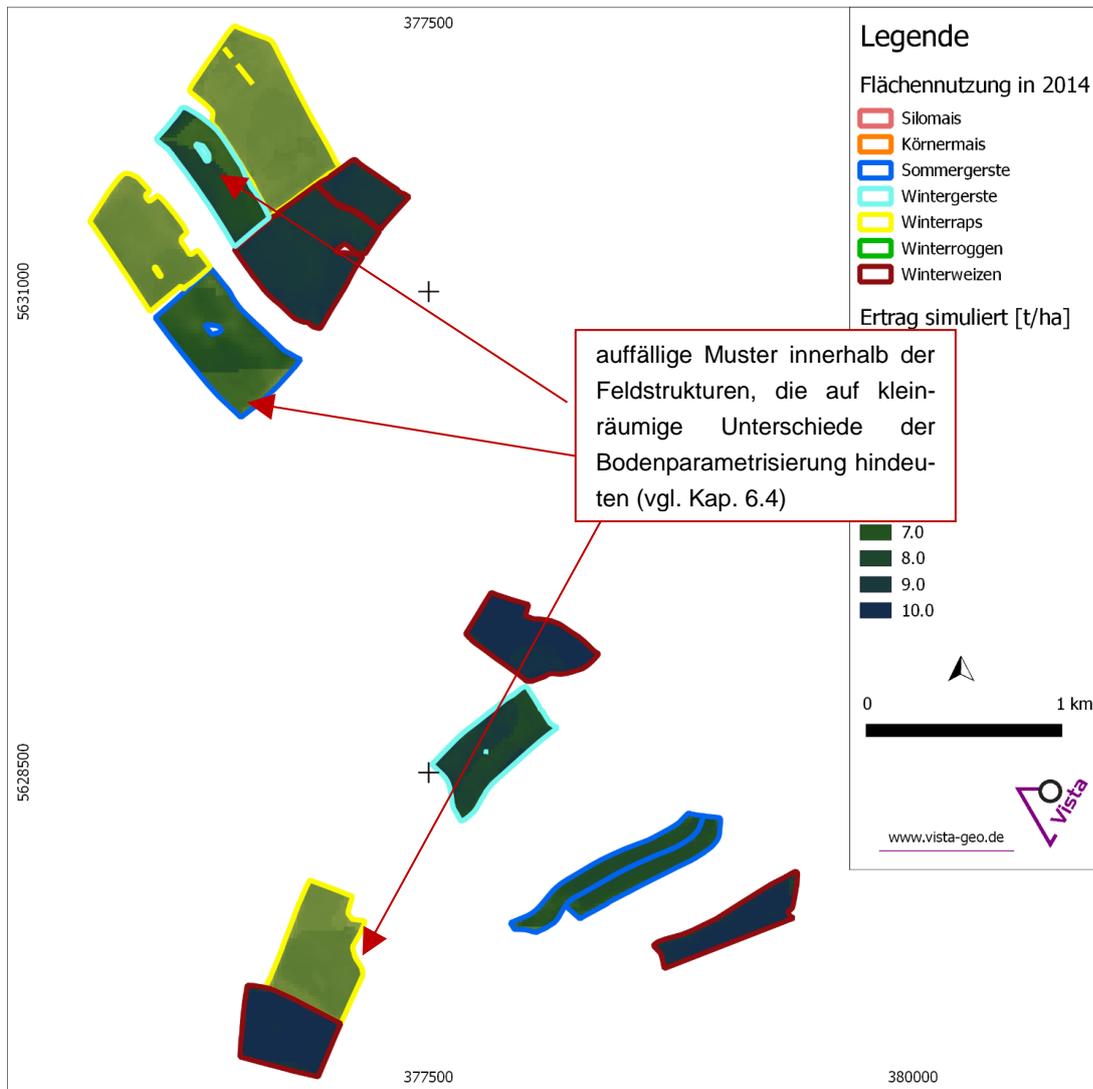


Abbildung 40: Ertrag 2014 simuliert im Testbetrieb Süd

6.2 Validierung auf Schlagebene

Ziel des Projekts ist die Prüfung der Anwendbarkeit einer großräumigen, operationellen satellitengestützten Ertragsmodellierung, die keine Ertragsmessungen als Eingangsdaten benötigt. Dafür ist es sinnvoll, die Ergebnisse mithilfe der genannten Herangehensweise zu simulieren und im Anschluss zu validieren.

Die Validierung der Modellergebnisse erfolgt zunächst durch den Vergleich der gemessenen Erträge auf Schlagebene. Dabei ist zu erwarten, dass der schlagweise Vergleich größere Abweichungen zwischen Modell und Simulation aufweisen wird als die regional differenzierten Ergebnisse. Auf regionaler Ebene heben sich Fehler ggf. auf, falls die Messungen keine systematischen Über- bzw. Unterschätzungen aufweisen und das zu testende Verfahren (hier die Simulation) erwartungstreu ist. Auf Schlagebene machen sich sortenspezifische Unterschiede in der Kornbildung, Aussaat- und Erntetermine bemerkbar. Diese Informationen könnten im Modell zwar berücksichtigt werden, stehen aber für ganz Sachsen nicht zur Verfügung und erhöhen somit die Unsicherheit der satellitengestützten Simulation. Dennoch werden die Ergebnisse auf Schlagebene verglichen, um die Ergebnisse vollständig und transparent zeigen zu können. Im Anschluss an die schlagbezogene Auswertung erfolgt die Validierung auf Standortebeine (Kap. 6.3).

Diese Auswertung auf Schlagebene erfolgt zunächst für jede Fruchtart einzeln und wird dann auch gemeinsam dargestellt. Es werden Vergleichsgrafiken gezeigt, die zudem eine Korrelationsanalyse beinhalten. Dabei ist hervorzuheben, dass diese Korrelation nur zu Vergleichszwecken dient und aufzeigen soll, wie viel Prozent der Variation der Messdaten durch die Modellierung wiedergegeben wird. Dies ist im Bestimmtheitsmaß R^2 ausgedrückt. Das R^2 hängt dabei auch stark von der Varianz der Messungen und Modellergebnisse ab. Die Regressionsgerade zeigt zudem, wie nahe die Beziehung zur angestrebten idealen 1-zu-1-Linie liegt. Der mittlere Schwankungsbereich der Ausprägungen bezogen auf die 1-zu-1-Linie (Erwartungswert) wird quantitativ anhand des mittleren absoluten Fehlers (Mean Absolute Error [MAE]) ausgedrückt, also dem Mittelwert der absoluten Abweichungen aller Einzelschläge vom Erwartungswert in dt/ha. Wird dieser Wert relativ zum Erwartungswert in Prozent angegeben, so spricht man vom mittleren relativen bzw. dem mittleren prozentualen Fehler (Mean Absolute Percentage Error [MAPE]). Um die Güte des Verfahrens fruchtartspezifisch zu vergleichen, ist es empfehlenswerter, den MAE bzw. MAPE zu nutzen als das Bestimmtheitsmaß.

6.2.1 Winterweizen

Korreliert man den mittleren gewogenen Ertrag mit dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag (Abbildung 41), ergibt sich für den Winterweizen über alle Standorte und Jahre ein Bestimmtheitsmaß (R^2) von rund 0.39, ein gutes Ergebnis angesichts der Tatsache, dass die Heterogenität dreier verschiedener Standorte und dreier Jahre mit unterschiedlichsten Wachstumsbedingungen auf Basis einer einheitlichen Parametrisierung simuliert wurden und miteinander verglichen werden.

Betrachtet man die Ergebnisse der Jahre im Einzelnen, lässt sich für 2015 aufgrund der Lage der Punkte nahe der Regressionsgeraden feststellen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Schlägen 2015 vom Modell gut abdeckt werden. Besonders hohe gemessene Erträge werden vom Modell allerdings dadurch unterschätzt, dass das Modell den Wasserstress 2015 vor allem am Standort Süd und West etwas zu stark simuliert (vgl. Kap. 6.4). Die Erträge für 2013 liegen dagegen zwar am nächsten an der 1-zu-1-Linie, zeigen gegenüber 2015 aber eine eher geringe Variabilität. Die Ergebnisse des Jahres 2014 weisen die vergleichsweise größte Streuung auf.

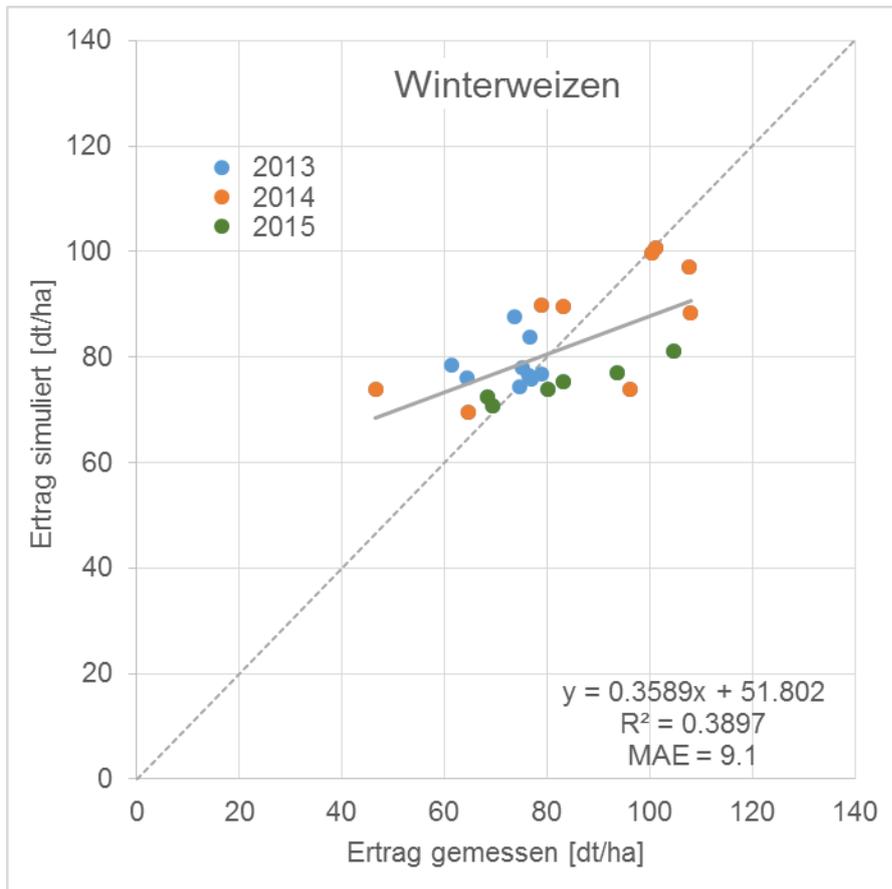


Abbildung 41: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Winterweizen für die Jahre 2013, 2014 und 2015

6.2.2 Wintergerste

Für die Wintergerste ergibt sich im Vergleich zwischen Mess- und Modelldaten (Abbildung 42) ein ähnliches Bild wie für den Weizen. Die Variabilität zwischen den Schlägen ist hier besonders für die Jahre 2013 und 2014 gut getroffen. Wie an den Daten für 2015 zu sehen ist, ist auch hier die Wintergerste durch den Wasserstress stark gedeckelt und die gemessenen hohen Erträge werden vom Modell unterschätzt.

Wichtig zu erwähnen ist außerdem, dass die Wintergerste am Standort West gemäß den Angaben in den Validierungsdaten in allen drei Jahren auf rekultivierten Kippenböden angebaut wurde. Wie anhand Abbildung 42 zu erkennen ist, waren die Erträge an diesen Standorten (rot eingekreist) 2013 und 2014 im Vergleich zu den anderen beiden Standorten auffallend hoch. Die Information wurde deshalb auch im Modell berücksichtigt, indem für den betreffenden Standort in allen Jahren eine durchweg bessere Nährstoffversorgung angenommen wurde. Unter nachträglichem Einbezug der Messdaten für 2015 bestätigt sich, dass an einem der beiden Schläge des Standortes West die Erträge auch in diesem Jahr eher im oberen Bereich liegen, was vom Modell aufgrund des überschätzten Wasserstressess allerdings nur teilweise erfasst wurde.

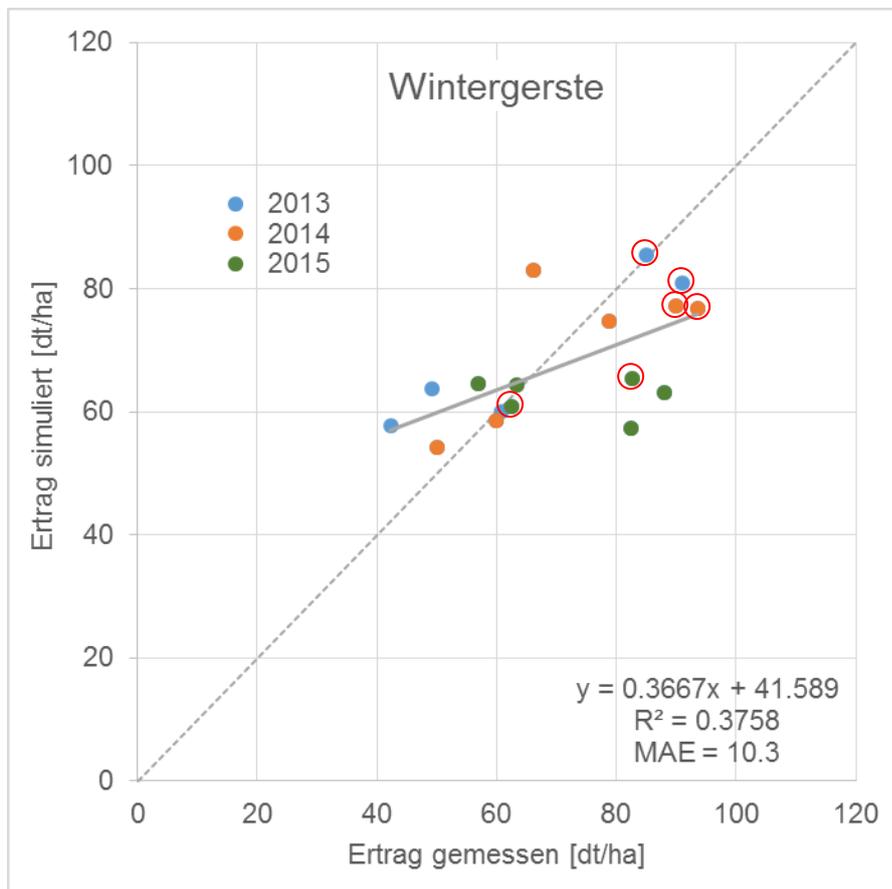


Abbildung 42: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Wintergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015; die roten Kreise markieren den Standort West (Anbau auf rekultivierten Kippenböden)

6.2.3 Sommergerste

Für die Sommergerste, behandelt für die Standorte Süd und West, ergeben sich im Vergleich mit den Messdaten bis auf das Jahr 2015 größere Abweichungen zum Modellergebnis als für die anderen Fruchtarten (Abbildung 43). Eine Schwierigkeit in der Simulation des Wachstums der Sommergerste liegt unter anderem in der kürzeren Vegetationsperiode, die das Wachstum weitaus sensitiver auf den (im Modellansatz unbekannt) Aussaattermin macht, als das bei Wintergetreide der Fall ist und die damit einen starken Einfluss auf die phänologische Entwicklung nimmt.

Außerdem wurde der hier verwendete Ansatz für die Sommergerste erstmalig eingesetzt, eine Optimierung der phänologischen Parametrisierung in PROMET ist daher anzuraten. Die phänologische Entwicklung ist im Modell u.a. verantwortlich für die Verteilung der produzierten Biomasse in die einzelnen Pflanzenkompartimente und damit ein wichtiger Faktor für die Ertragsbildung. Eine Optimierung dieses Prozesses für die Fruchtart Sommergerste wäre ggf. im Rahmen zukünftiger Auswertungen umsetzbar. Die Ergebnisse für 2015 sind bereits vielversprechend.

Ein Punkt, der für die Modellierung der Gerste zudem kritisch sein könnte, ist die Information über den Anbau zwei- oder mehrzeiliger Sorten. Die mehrzeilige Gerste hat in der Regel zwar etwas kleinere Körner als

die zweizeilige Variante, liefert aber laut Untersuchungen häufig einen höheren Ertrag¹³. Diese Unterscheidung könnte im Modell durch unterschiedliche Ernteindizes berücksichtigt werden. Da diese Sorteninformation jedoch nicht verfügbar war, war eine Berücksichtigung bisher nicht möglich.

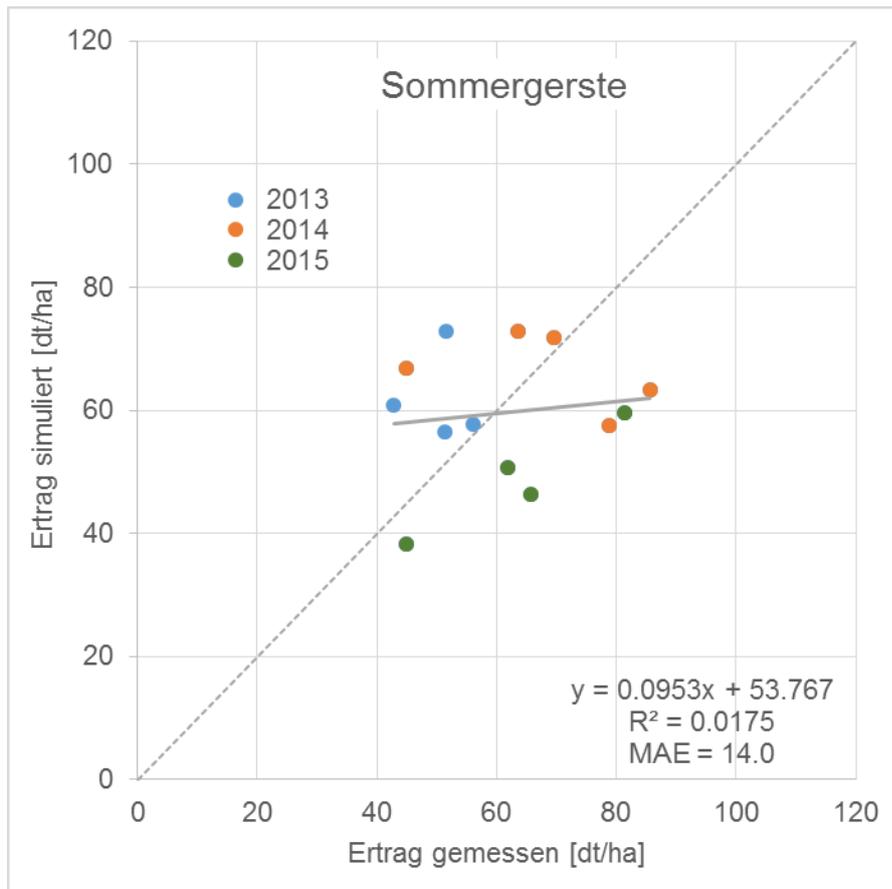


Abbildung 43: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Sommergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015

¹³ <https://www.lfl.bayern.de/ipz/getreide/053935/index.php>

6.2.4 Winterroggen

Bei der Korrelation zwischen simulierten und gemessenen Erträgen für den Winterroggen (Abbildung 44), der nur am Standort Ost mit jeweils drei Schlägen pro Jahr analysiert wurde, lassen sich keine besonderen Auffälligkeiten feststellen. Die Modellierung der Ertragshöhe für die einzelnen Jahre passt gut und auch die schlagspezifische Variabilität wird von den Ergebnissen passend wiedergegeben.

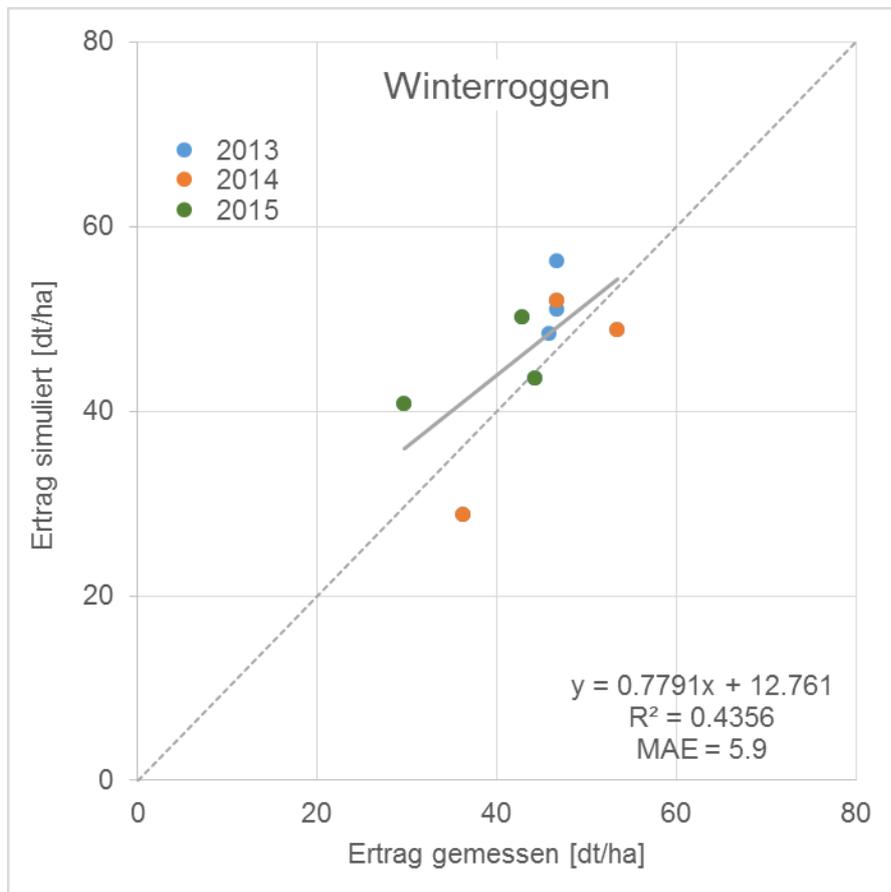


Abbildung 44: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Winterroggen für die Jahre 2013, 2014 und 2015

6.2.5 Körnermais

Auch der Körnermais zeigt hinsichtlich seiner Korrelation von modelliertem zu gemessenem Ertragsergebnis (Abbildung 45) wenig Auffälligkeit. Bis auf einen Ausreißer sammeln sich die analysierten Daten um die 1-zu-1-Linie. Für die Fruchtart ist allerdings mit lediglich einem Standort (Sachsen West) und nur zwei Schlägen pro Jahr die Datenbasis zu klein, sodass es schwer ist, eine signifikante Aussage zu treffen.

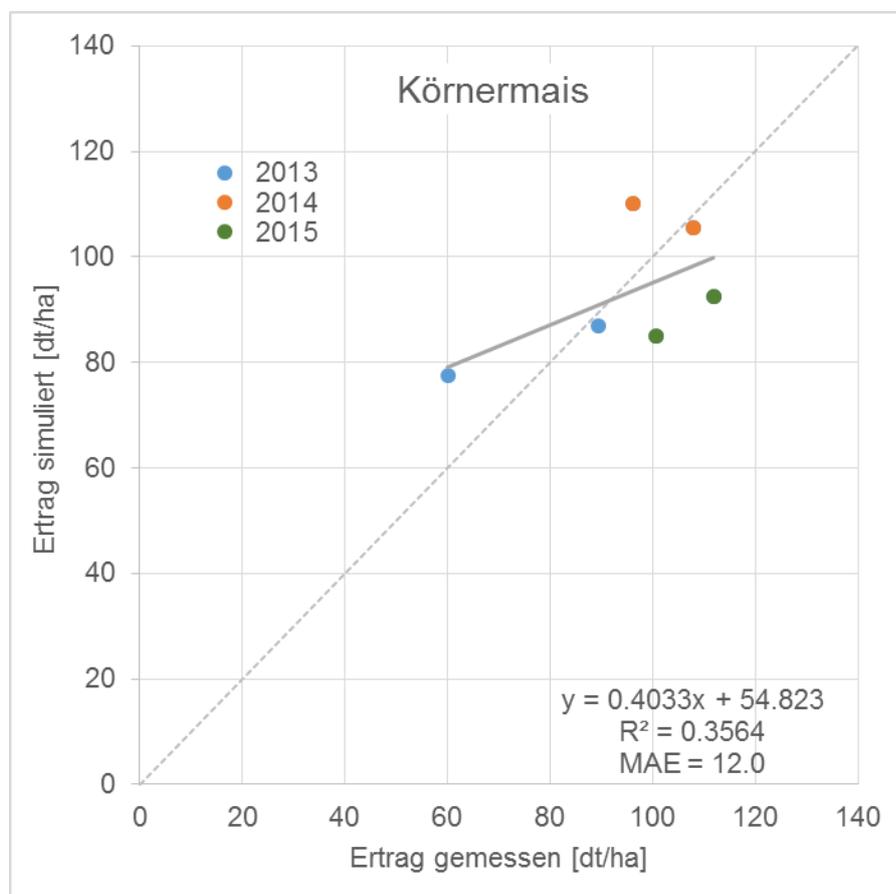


Abbildung 45: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Körnermais für die Jahre 2013, 2014 und 2015

6.2.6 Silomais

Um die Ertragsergebnisse aus den Wiegedaten mit den Modellergebnissen vergleichen zu können, wurden alle vorhandenen Ertragsdaten analog zur Erntestatistik auf einen Trockensubstanz (TS)-Gehalt von 35 % normiert. Für die Normierung wird von den vom Betrieb am Standort Ost übermittelten TS-Gehalten von durchschnittlich 33 % 2013 und 40 bis 45 % 2014 ausgegangen. Für 2015 besteht die Schwierigkeit, dass einer der Schläge zwar mit 50 % TS-Gehalt angegeben ist, die anderen beiden Schläge aber lediglich mit der ungenaueren Angabe „>45 %“ versehen sind. Nachdem die Wiegedaten für dieses Jahr im Vergleich extrem niedrig ausfallen, was auf Nachfrage an den Betrieb durch den Auftraggeber auf die außerordentliche Trockenheit des Jahres zurückzuführen sei, wird hier zunächst die vom Betrieb selbst festgelegte Kategorie „sehr hoch“ („TS 48 und mehr“) angenommen.

Anhand der aus Satellitendaten abgeleiteten Entwicklung der mittleren grünen Blattfläche für den Standort Ost (Abbildung 46) ist im Vergleich der drei Jahre zu sehen, dass der Standort 2015 sehr früh abreift und die Entwicklung der grünen Blattfläche dadurch früher und viel stärker einbricht als in den anderen beiden Jahren. Zudem kann anhand der Grafik von einem Erntetermin im Zeitraum Anfang bis Mitte September, also

einem mittleren bzw. nicht deutlich an den Wassermangel angepassten Erntetermin ausgegangen werden. Aufgrund dieser beiden Faktoren, der deutlich sichtbaren Trockenheit und eines ggf. für diese Bedingungen etwas zu spät gewählten Erntetermins, wurde für die beiden Standorte mit der Angabe >45 % TS 2015 für die Normierung der Validierungsdaten der TS-Gehalt auf einen sehr hohen Wert von 60 % geschätzt.

Bei Betrachtung des resultierenden Ergebnisplots (Abbildung 47) zeigt sich eine mit $R^2 = 0.76$ hohe Gesamtkorrelation für die drei Jahre. Die modellierten Erträge für 2013 und 2015 passen zum Teil gut bzw. sind tendenziell etwas höher als die gewogenen Daten. Für 2014 simuliert das Modell einen etwas zu geringen Ertrag.

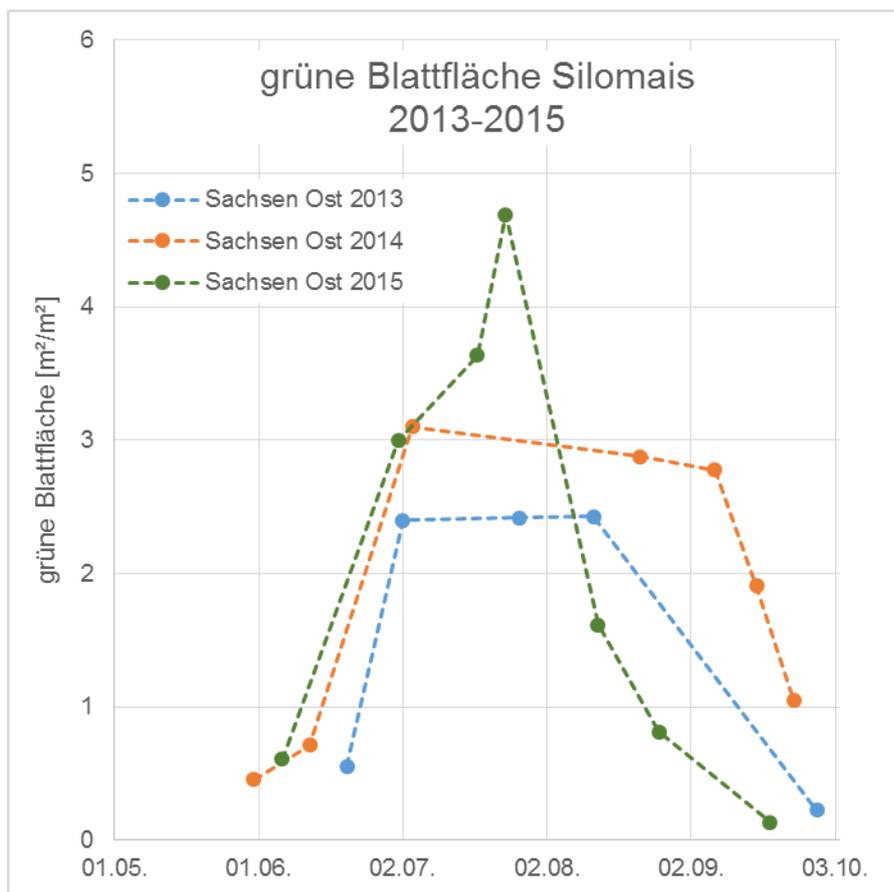


Abbildung 46: Mittlere Entwicklung der grünen Blattfläche [m²/m²] gemäß der Pflanzenparameterableitung aus den Satellitendaten zu den markierten Terminen für die Fruchtart Silomais am Standort Ost für die Jahre 2013, 2014 und 2015

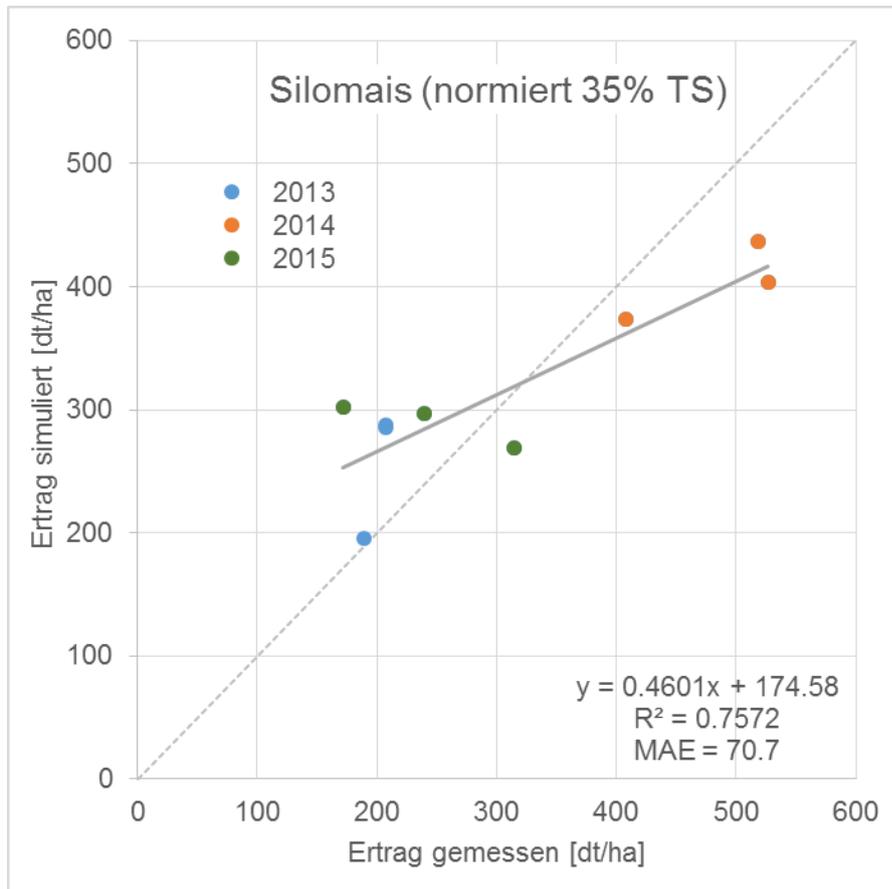


Abbildung 47: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Silomais für die Jahre 2013, 2014 und 2015

Eine Schwierigkeit für die Modellierung des Silomaisertrags ist, wie bereits erwähnt, die starke Sensitivität auf den Erntetermin. Im Modell wird dieses Problem momentan gelöst durch eine gleichzeitige Simulation der Trockensubstanzentwicklung der Pflanze und die Festlegung des Erntetermins in Abhängigkeit des modellierten Trockensubstanzgehalts. Eine exaktere Simulation des tatsächlichen Erntetermins kann in der Regel auf Basis der Satellitendaten erfolgen, wenn die Datenlage im kritischen Zeitraum ausreichend dicht ist. Anhand der grünen Blattflächenentwicklung aus Satellitendaten (Abbildung 46) ist allerdings besonders in den Jahren 2013 und 2015 zu sehen, dass sich zwischen den letzten beiden Aufnahmen für den Standort große Datenlücken befinden. Möglicherweise wurde der Erntetermin durch Auswahl auf Basis der Trockensubstanzsimulation zu spät gewählt. Die Auswahl des Erntetermins mithilfe von Satellitendaten und damit die Simulation der resultierenden Silomaiserträge dürfte in Zukunft allerdings voraussichtlich immer besser gelingen, weil sich die zeitliche Abdeckung durch Satellitendaten u. a. durch den Einsatz von Sentinel-2 ständig verbessert. Alternativ könnte der Erntetermin auch aus Radardaten des Sentinel-1 abgeleitet werden, der nicht von Wolken beeinflusst ist und ab dem Start des zweiten Satelliten (geplant für Ende 2016) und somit ab dem Erntejahr 2017 fast täglich eine Aufnahme Sachsens ermöglichen wird.

6.2.7 Winterraps

Die besten Ergebnisse konnten fruchtartenspezifisch auf Schlagebene für den Winterraps erzielt werden. Die Modellierung liefert mit einem Bestimmtheitsmaß von rund 0.88 eine sehr gute Korrelation zu den Messdaten über alle Jahre und Standorte (Abbildung 48). Auch diese Fruchtart wurde laut Angabe in den Validierungsdaten in einem Jahr auf zwei Schlägen rekultivierten Kippenbodens angebaut. Wie anhand der Markierungen (rote Kreise) in der Abbildung ersichtlich wird, liegen hier die gemessenen Erträge aber insgesamt im

mittleren bis niedrigen Bereich. Es wird damit eine durchschnittliche Nährstoffversorgung des Standorts angenommen und dieser nicht anders als die anderen Standorte behandelt. Auch beim Raps ist der Erntetermin ein kritischer Faktor hinsichtlich der Ertragshöhe. Wie aber in Tabelle 9 dargestellt, ist aufgrund der Datenlage für die Jahre 2013 und 2015 der Erntetermin deutlich besser einschränkbar. Auch hier könnte die Erhöhung der zeitlichen Verfügbarkeit von Satellitendaten noch einmal einen Zugewinn für die Ergebnisse bringen.

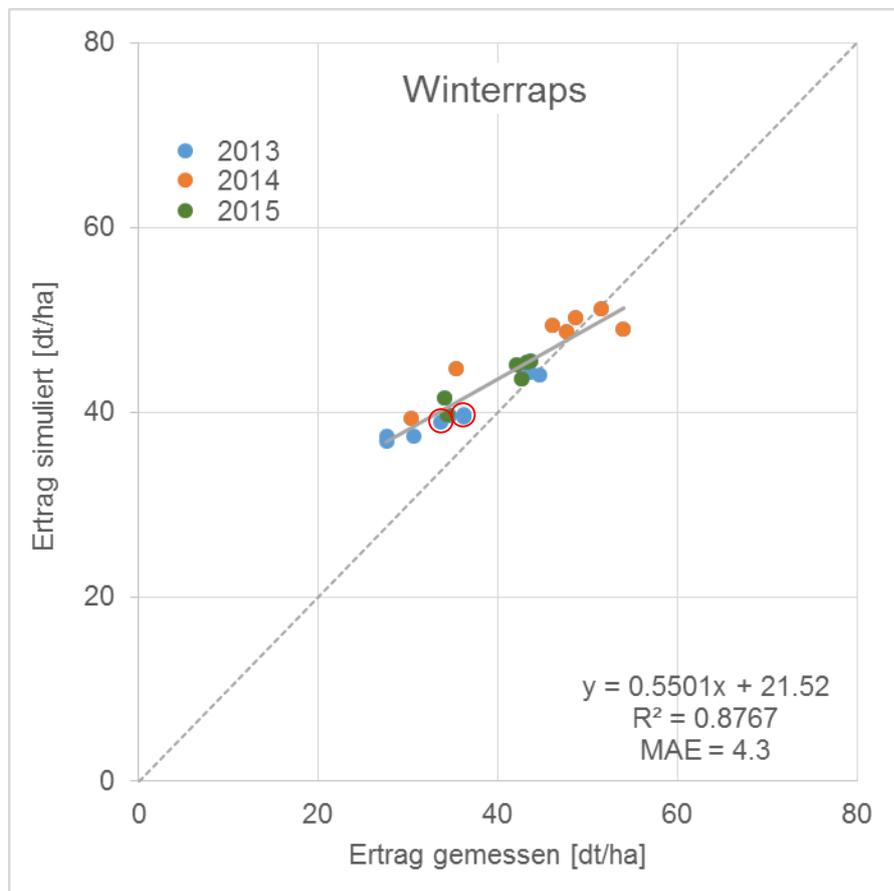


Abbildung 48: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für die Fruchtart Winterraps für die Jahre 2013, 2014 und 2015; die roten Kreise markieren den Anbau auf rekultivierten Kippenböden

6.2.8 Gesamtergebnis

Insgesamt zeigt die Korrelation aller mittleren modellierten Kornerträge (ohne Silomais) pro Schlag im Vergleich zu den korrespondierenden Wiegedaten über alle Standorte (Abbildung 49), dass alle drei Jahre und Fruchtarten gut getroffen sind. 2015 zeigt aufgrund der extremen Bedingungen bezüglich Trockenstresses etwas schwächere Ergebnisse.

Die für die Modellierung noch nicht optimierte Parametrisierung der Sommergerste wurde im entsprechenden Unterkapitel bereits angesprochen. Filtert man diese Daten aus dem Gesamtergebnis heraus und vernachlässigt zudem die Schläge, für die während der Vegetationsperiode weniger als drei Termine mit LAI-Daten zur Anpassung der Pflanzenmodellierung verfügbar sind (das sind aber nur insgesamt zwei), so ergibt sich ein deutlich besseres Bild. Abbildung 50 zeigt, wie sich das Gesamtkollektiv durch Vernachlässigung der Fruchtart Sommergerste und der Schläge mit weniger als drei LAI-Terminen über die Vegetationsperiode verändert. Eingefärbt sind in dieser Darstellung die verschiedenen Standorte Sachsen West, Süd und Ost.

Ohne Berücksichtigung dieser beiden Faktoren ergibt sich über alle Jahre und Standorte insgesamt ein R^2 von 0.82. Es fällt auf, dass das Bestimmtheitsmaß in der Gesamtdarstellung aller Fruchtarten deutlich höher ausfällt als in der Betrachtung der Einzelfruchtarten. Dies ist dem größeren Wertebereich des Gesamtkollektivs geschuldet. Der MAE ist von diesem Effekt nicht betroffen. Er schwankt für die einzelnen Fruchtarten zwischen 4 und 14 dt/ha und beträgt im Schnitt, d. h. im Gesamtkollektiv aller Kornerträge, 9.3 dt/ha.

Die Korrelationen der einzelnen Standorte können in diesem Fall, wie Abbildung 51 zeigt, mit Bestimmtheitsmaßen von rund 0.76 für den Standort West, 0.86 für den Standort Süd und 0.77 für den Standort Ost quantifiziert werden. Es zeigt sich, dass die Standorte West und Süd vom Modell eher unterschätzt werden. Am Standort Ost simuliert das Modell Ertragswerte, die tendenziell etwas höher als die Messwerte liegen.

Differenziert nach den Ertragsjahren (Abbildung 52) zeigt 2015 mit einem R^2 von 0.87 eine sehr gute Korrelation – ein besonders erfreuliches Ergebnis angesichts der Tatsache, dass die Validierungsdaten für dieses Jahr erst nach Fertigstellung der Modellierungsergebnisse an VISTA übermittelt wurden und somit ein realistisches Szenario widerspiegeln. Deutlich zu sehen ist die bereits bei einigen Fruchtarten festgestellte Unterschätzung besonders hoher gemessener Erträge, was auf die Überschätzung des Wasserstress im Modell zurückzuführen sein dürfte (vgl. Kap. 6.4). Für das Ertragsjahr 2013 passen die vom Modell berechneten Erträge mit einem R^2 von 0.89 sehr gut mit einer leichten Tendenz zur Überschätzung. 2014 ist hinsichtlich seiner Tendenzen relativ ausgeglichen, streut aber etwas stärker als die anderen Jahre.

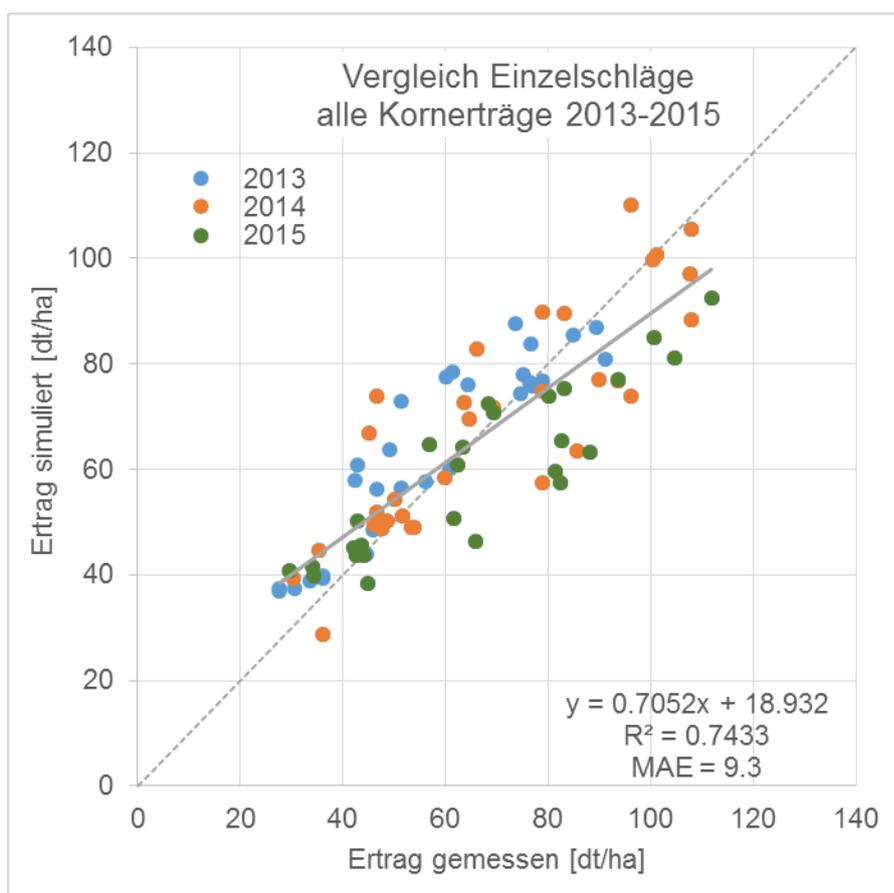


Abbildung 49: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für alle Kornerträge (ohne Silomais) für die Jahre 2013, 2014 und 2015

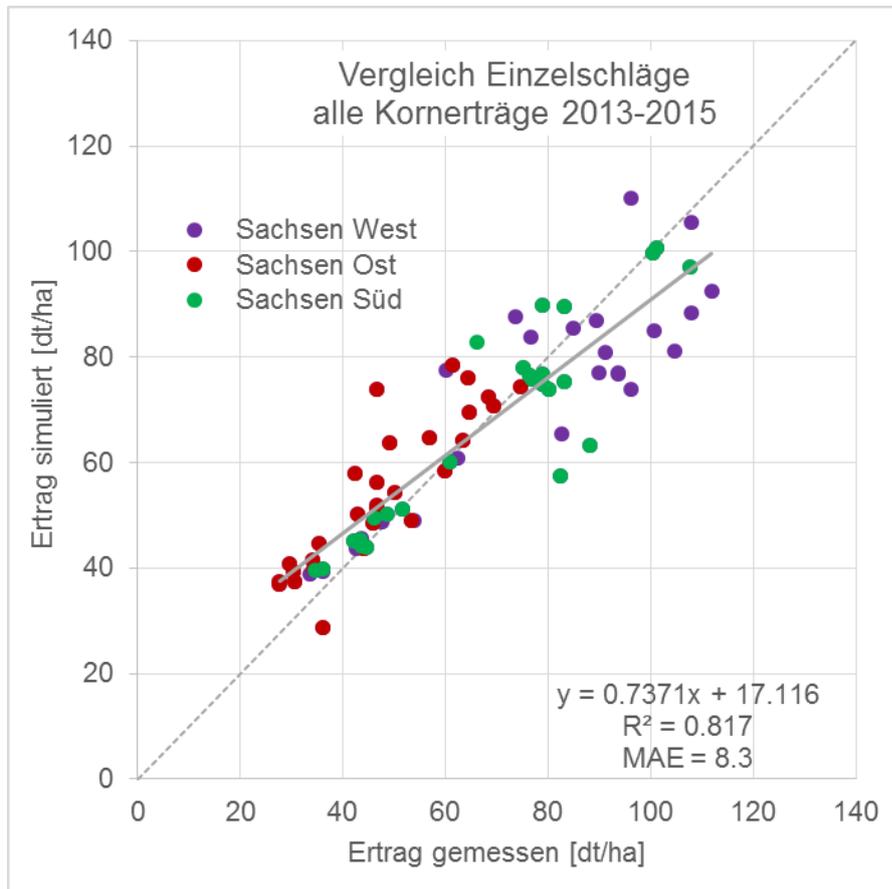


Abbildung 50: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für alle Kornenerträge ohne Sommergerste und abzüglich der Schläge, die mit weniger als drei LAI-Terminen modelliert wurden für die Jahre 2013, 2014 und 2015, eingefärbt nach Standort

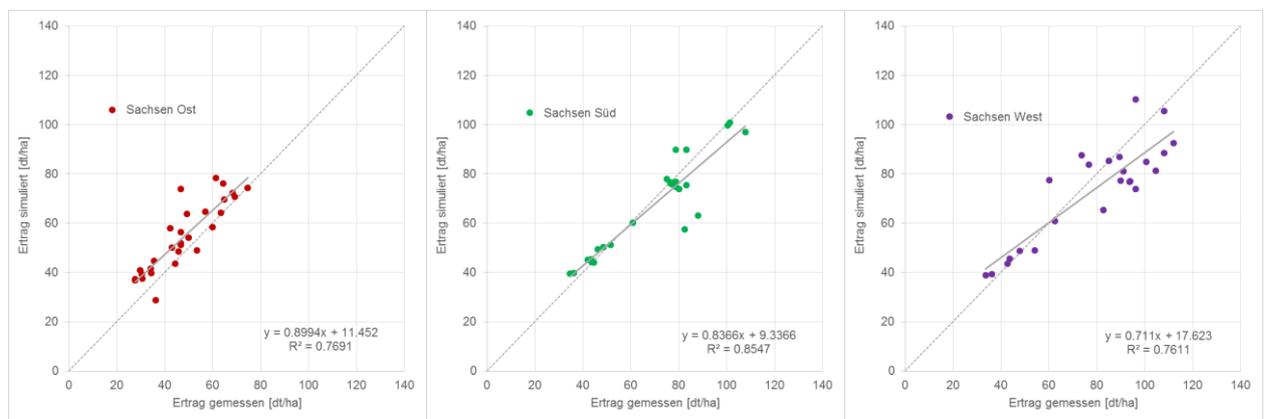


Abbildung 51: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag (gleiche Daten wie Abbildung 50) pro Schlag aufgeteilt in die einzelnen Standorte

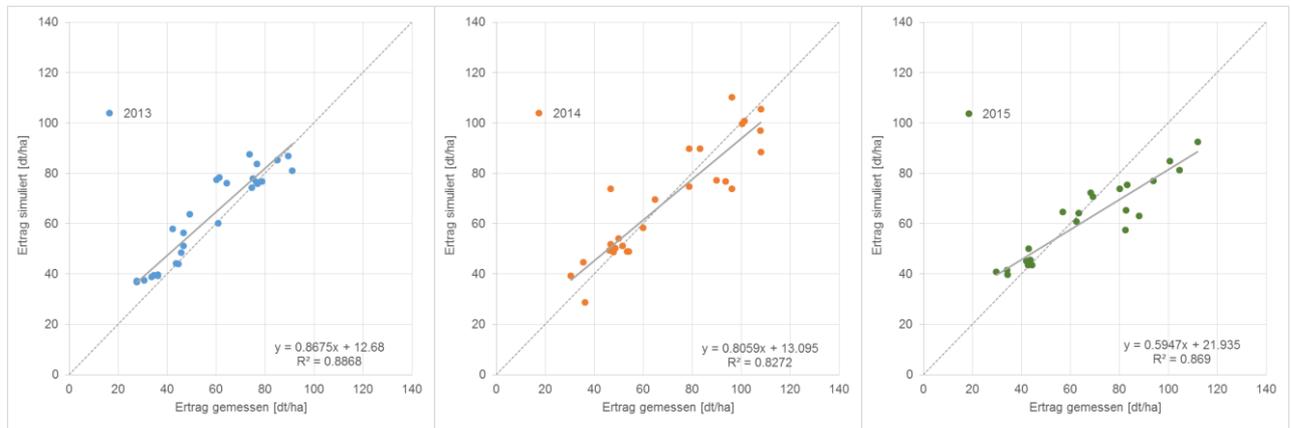


Abbildung 52: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag (gleiche Daten wie Abbildung 50) aufgeteilt in die einzelnen Jahre

Der Silomais wurde bisher in den Korrelationsanalysen der Gesamtergebnisse vernachlässigt. Aufgrund seines abweichenden absoluten Wertebereichs ist er nicht direkt mit den anderen Fruchtarten vergleichbar. Um diesen Teil der Ergebnisanalyse trotzdem noch um die letzte Fruchtart zu vervollständigen, zeigt Abbildung 53 die Gesamtkorrelation aller Fruchtarten, Jahre und Standorte pro Schlag einschließlich dem bisher ausgesparten Silomais. Das Bestimmtheitsmaß ist aber wenig aussagekräftig, weil Kornertrag und Biomasseertrag gemischt sind.

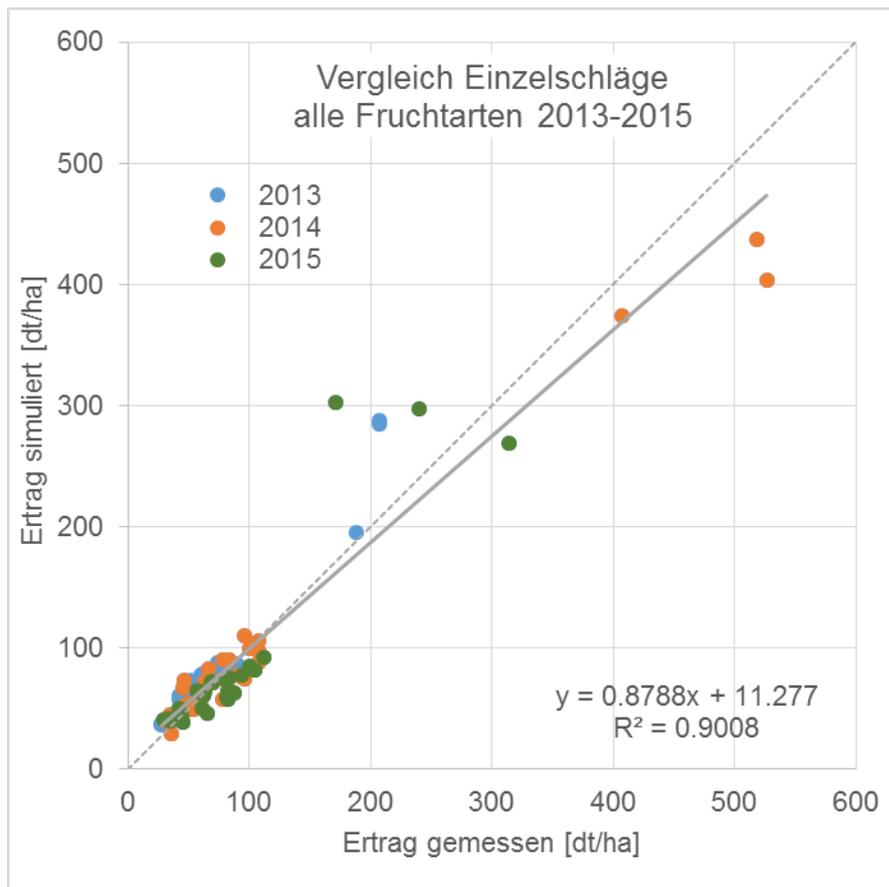


Abbildung 53: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Schlag für alle Fruchtarten inkl. Silomais für die Jahre 2013, 2014 und 2015

Zur weiteren Quantifizierung der relativen Abweichungen aller Modellergebnisse (einschließlich Silomais und Sommergerste) im Vergleich zu den Messdaten wurden die Ergebnisse als Histogramme aufgearbeitet. Abbildung 54 zeigt den Betrag der relativen Abweichungen in absoluten Häufigkeiten (blaue Säulen) und als kumulierten Wert (oranger Graph) in Prozent. Diese Darstellung zeigt, dass mehr als 50 % aller relativen Abweichungen niedriger als 15 % bzw. fast 70 % der Abweichungen unterhalb von 20 % liegen.

Abbildung 55 zeigt außerdem in Klassen eingeteilt die relativen Abweichungen in negative und positive Richtung. Negative Werte sagen aus, dass das Modell einen zu geringen im Vergleich zum gemessenen Ertrag berechnet, positive Werte stehen für eine Überschätzung des Ertrags durch das Modell. Es zeigt sich, dass ein Großteil der Abweichungen im Bereich von -5 bis +15 % liegt. Die leichte Rechtsschiefe des Diagramms lässt darauf schließen, dass größere Abweichungen eher bei einer Überschätzung des Modells entstehen.

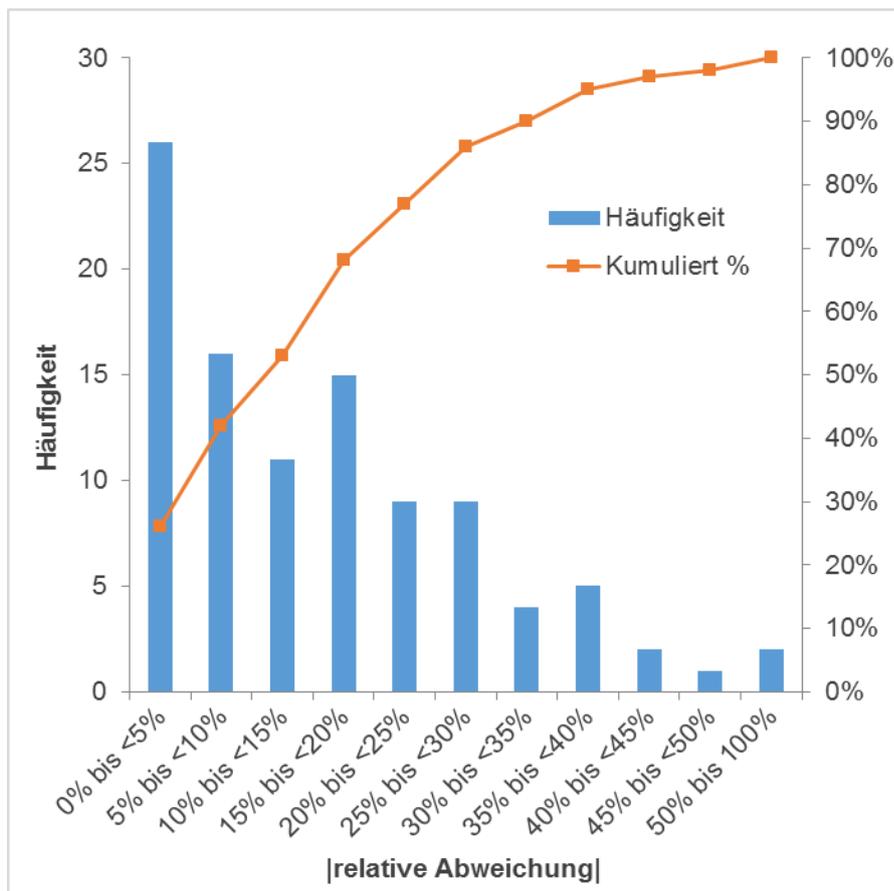


Abbildung 54: Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Betrag im Vergleich zu den Messdaten für alle Einzelschläge, angegeben in absoluten Häufigkeiten und als kumulierter Wert [%]

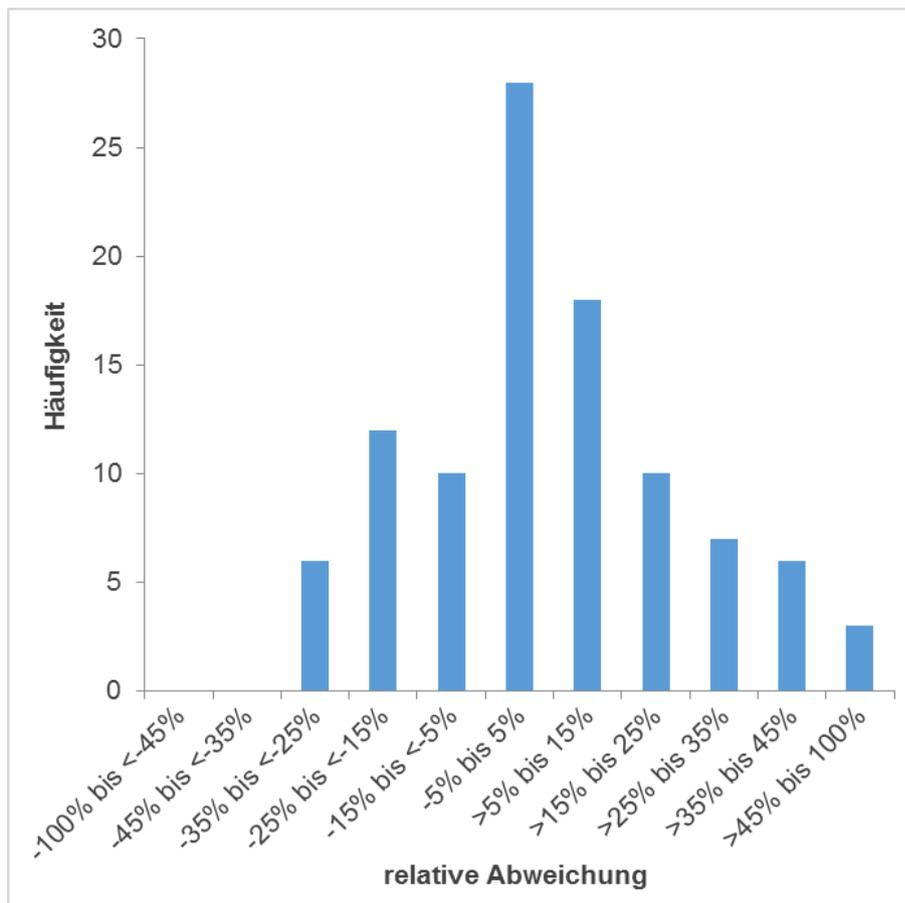


Abbildung 55: Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Vergleich zu den Messdaten für alle Einzelschläge

Als weiterer Einflussfaktor für eventuelle Ungenauigkeiten wird die Größe der untersuchten Schläge in ha analysiert. Wie aus Abbildung 56 ersichtlich ist, besteht für kleinere Schläge eine leichte Tendenz zu höheren relativen Abweichungen zwischen Modellierung und Messung. Die Schlaggröße hat also möglicherweise einen leichten Effekt, ist aber sicherlich nicht die signifikante Fehlerquelle.

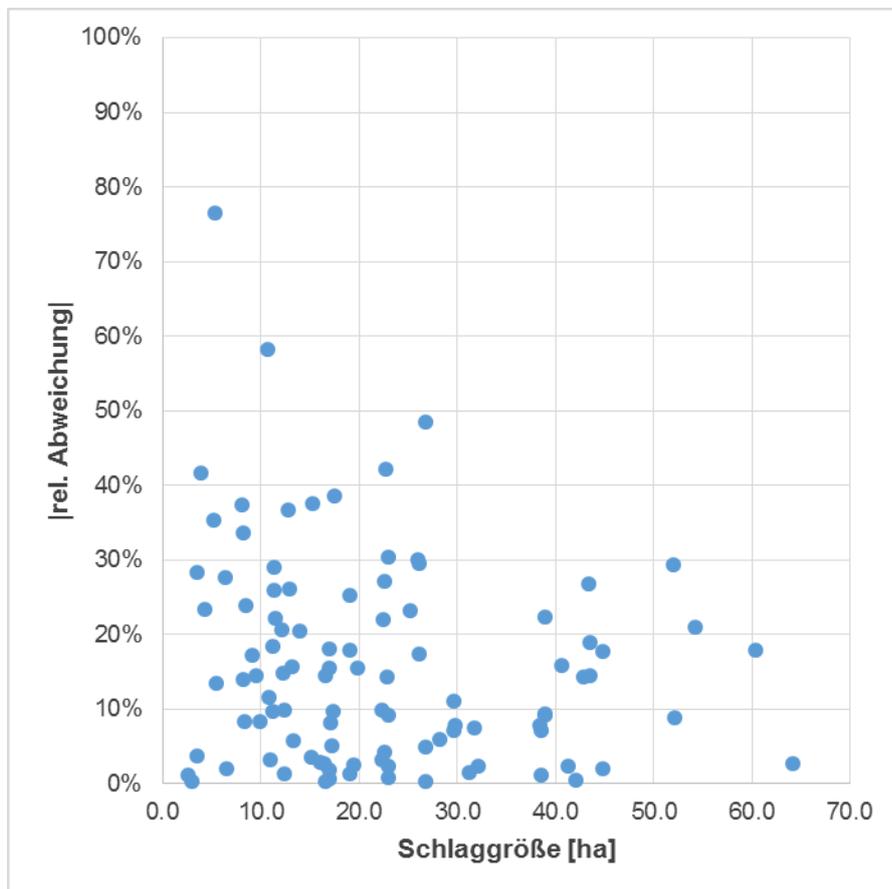


Abbildung 56: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Betrag und der Größe [ha] der untersuchten Schläge

6.3 Validierung auf Standortebene

Bei der standortspezifischen Auswertung werden die Erträge aller Schläge eines Standortes pro Fruchtart gemittelt. Dieser Mittelwert soll repräsentativ für einen regionalen Ertragswert stehen. Dabei stellt sich aber die Frage, ob die Anzahl der Schläge pro Standort und Fruchtart für diese Aussage ausreicht. Normalerweise sollte eine Stichprobe nicht unter 15 Schlägen bestehen. Im Schnitt stehen aber nur 2,4 bzw. maximal 5 Schläge pro Fruchtart und Jahr zur Validierung eines Standortes zur Verfügung. Dieses Problem der zu kleinen Stichprobe hat der satellitengestützte Ansatz in einem operationellen Szenario nicht. Die Validierung ist jedoch auf den eingeschränkten Datensatz beschränkt und hat somit seine Limitierung. Das Ergebnis der standortspezifischen Auswertung erlaubt aber die Prüfung, ob die Abweichung zwischen Messung und Modell kleiner wird, wenn man über den Standort mittelt. Dies spräche dafür, dass keine systematischen Über- bzw. Unterschätzungen in den Messungen auftreten und dass die satellitengestützte Simulation erwartungstreu ist.

Tabelle 13 und Abbildung 57 zeigen unter anderem die Höhe der mittleren relativen Abweichungen im Betrag (MAPE, %) der einzelnen Fruchtarten gemittelt über alle drei Jahre, einerseits auf Basis der Einzelschläge, andererseits gemittelt pro Standort. Man sieht bei allen Fruchtarten eine Reduktion der Abweichungen.

Tabelle 13: Bestimmtheitsmaße (R^2), mittlere absolute Abweichungen (MAE) und mittlere relative Abweichungen im Betrag (MAPE) der Simulation der unterschiedlichen Fruchtarten über alle drei Jahre auf Basis der Einzelschläge und über alle Schläge eines Standorts gemittelt

Fruchtart	R^2	MAE Einzelschläge [dt/ha]	MAPE Einzelschläge [%]	MAE Standorte [dt/ha]	MAPE Standorte [%]
Silomais	0.76	70.7	27%	60.7	21%
Körnermais	0.36	12.0	14%	10.2	11%
Wintergerste	0.38	10.3	15%	9.1	13%
Sommergerste	0.02	14.0	23%	14.2	23%
Winterweizen	0.39	9.1	12%	9.8	12%
Winterroggen	0.44	5.9	15%	4.6	11%
Winterraps	0.88	4.3	13%	4.2	12%

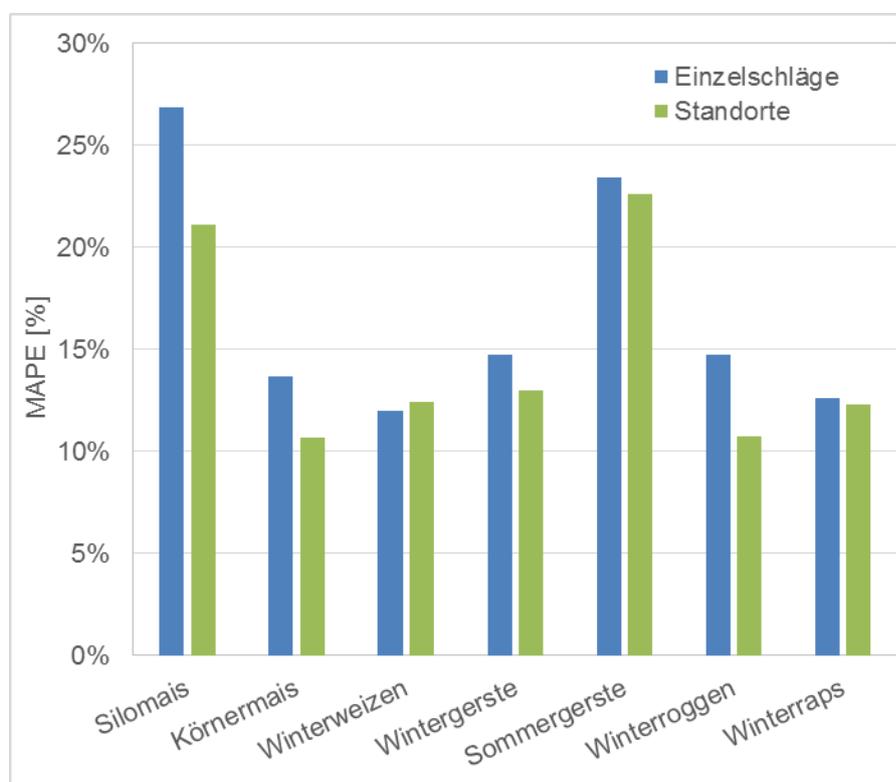


Abbildung 57: Vergleich der mittleren relativen Abweichungen im Betrag (MAPE) der Ertragssimulation pro Fruchtart über alle drei Jahre für die Schlagebene und für die Standorte

Noch etwas differenzierter können die mittleren Erträge (Tabelle 14) bzw. die mittleren Abweichungen zwischen Messung und Simulation (Tabelle 15) pro Standort nach Fruchtart und Jahr dargestellt werden.

Tabelle 14 zeigt zum einen die gemessenen im Vergleich zu den simulierten Ertragsmittelwerten, zum anderen die Anzahl der Schläge über die der Mittelwert pro Standort gebildet wurde. Tabelle 15 zeigt die zwischen Messung und Simulation feststellbaren relativen Abweichungen in negative und positive Richtung in % (MPE) und die absoluten Abweichungen im Betrag in dt/ha (MAE).

Betrachtet man nun noch einmal die Korrelation zwischen den gemessenen und den simulierten Erträgen, diesmal auf Basis der Standorte (Abbildung 58), zeigt sich bezüglich der Tendenzen der Standorte (linke Abbildung) und auch der Jahre (rechte Abbildung) ein ähnliches Bild wie im Vergleich der Einzelschläge. Insgesamt hat sich allerdings die mittlere absolute Abweichung von 8,3 dt/ha (Einzelschläge) auf nur noch 7,6 dt/ha (Standorte) reduziert.

Tabelle 14: Übersicht pro Standort nach Fruchtart und Jahr über die Anzahl der bearbeiteten Schläge, gemessene und simulierte Erträge, jeweils gemittelt über alle Schläge eines Standorts

Fruchtart	Standort	Anzahl Schläge			Ø Erträge, gemessen			Ø Erträge, simuliert		
		2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
Silomais	Ost	3	3	3	201.1	484.3	241.9	255.9	404.8	289.7
Winterweizen	Ost	3	2	2	66.8	55.7	68.8	76.3	71.6	71.6
Wintergerste	Ost	2	2	2	45.7	55.0	60.1	60.8	56.3	64.4
Winterroggen	Ost	3	3	3	46.4	45.4	38.9	52.0	43.2	44.9
Winterraps	Ost	3	2	2	28.6	32.9	34.2	37.2	42.0	40.7
Winterweizen	Süd	4	5	2	76.8	94.3	81.6	76.8	95.4	74.6
Wintergerste	Süd	1	2	2	60.8	72.5	85.3	60.1	78.9	60.3
Sommergerste	Süd	4	3	2	39.7	48.8	42.7	41.9	50.3	45.2
Winterraps	Süd	2	3	2	47.1	59.4	53.4	58.7	70.4	44.5
Körnermais	West	2	2	2	74.8	102.1	106.3	82.2	107.8	88.7
Winterweizen	West	2	2	2	75.1	102.1	99.2	85.7	81.2	79.1
Wintergerste	West	2	2	2	88.1	91.8	72.6	83.2	77.0	63.1
Winterraps	West	2	2	2	34.9	50.9	43.1	39.2	48.9	44.6
Sommergerste	West	2	2	2	53.8	82.2	73.6	65.3	60.4	53.0

Tabelle 15: Übersicht pro Standort nach Fruchtart und Jahr über die mittlere relative (MPE) und absolute Abweichung (MAE) der Ertragssimulation, jeweils gemittelt über alle Schläge des Standorts

Fruchtart	Standort	MPE Standorte [%]			MAE Standorte [dt/ha]		
		2013	2014	2015	2013	2014	2015
Silomais	Ost	27%	-16%	20%	54.8	79.5	47.8
Winterweizen	Ost	14%	29%	4%	9.5	16.0	2.8
Wintergerste	Ost	33%	2%	7%	15.1	1.3	4.3
Winterroggen	Ost	12%	-5%	15%	5.6	2.2	6.0
Winterraps	Ost	30%	28%	19%	8.6	9.1	6.4
Winterweizen	Süd	0%	1%	-9%	0.1	1.1	7.0
Wintergerste	Süd	-1%	9%	-29%	0.7	6.4	25.0

Fruchtart	Standort	MPE Standorte [%]			MAE Standorte [dt/ha]		
		2013	2014	2015	2013	2014	2015
Sommergerste	Süd	25%	19%	-17%	2.2	1.5	2.6
Winterraps	Süd	5%	3%	6%	11.6	11.1	8.9
Körnermais	West	10%	6%	-17%	7.4	5.7	17.6
Winterweizen	West	14%	-21%	-20%	10.6	20.9	20.0
Wintergerste	West	-6%	-16%	-13%	4.9	14.8	9.5
Winterraps	West	12%	-4%	3%	4.3	2.0	1.4
Sommergerste	West	21%	-26%	-28%	11.5	21.8	20.6
GESAMT	Ost	23%	8%	13%	18.7	21.6	13.5
GESAMT	Süd	7%	8%	-12%	3.6	5.0	10.9
GESAMT	West	10%	-12%	-15%	7.7	13.1	13.8

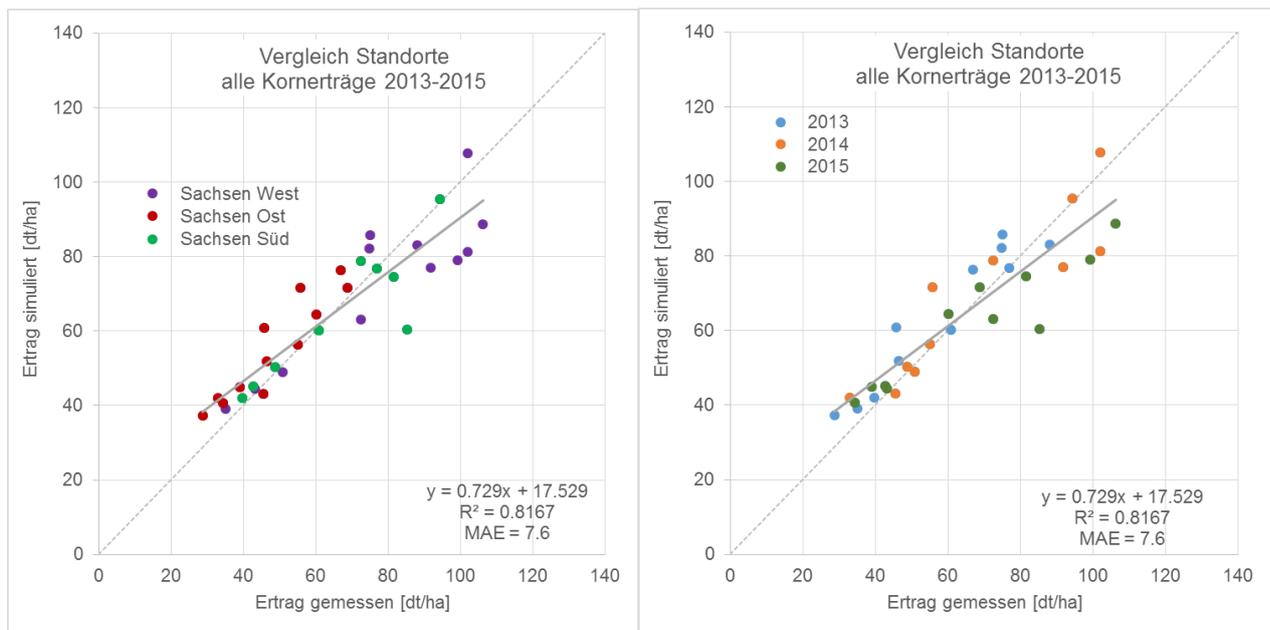


Abbildung 58: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren modellierten Ertrag pro Standort für alle Kornträge ohne Sommergerste und abzüglich der Schläge, die mit weniger als drei LAI-Terminen modelliert wurden für die Jahre 2013, 2014 und 2015, eingefärbt nach Standort (links) bzw. nach Jahr (rechts)

Zum Vergleich können auch auf der Standortbasis die Abweichungen zwischen Messung und Simulation mithilfe von Histogrammen analysiert werden. Abbildung 59 zeigt wieder den Betrag aller relativen Abweichungen (ohne Sommergerste) in absoluten Häufigkeiten (blaue Säulen) und als kumulierten Wert (oranger Graph). Auf Standortebene liegen mehr als 60 % der relativen Abweichungen niedriger als 15 % und 75 % der Abweichungen unterhalb von 20 %. Außerdem sind auf der Standortbasis alle Abweichungen kleiner als

35 %, was schon einmal zeigt, dass durch die Mittelwertbildung die größeren Ausreißer ausgeglichen werden konnten.

Abbildung 60 zeigt außerdem die Häufigkeiten der relativen Über- (positive) bzw. Unterschätzung (negative Abweichungen) der gemessenen Erträge durch die Simulation. Ein Großteil aller Abweichungen liegt noch immer im Bereich von -5 bis +15 %. Zudem sind aber auch ein deutlicher Rückgang der Streuung der Abweichungen und eine Verringerung des Wertebereichs auf -25 bis +25 % festzustellen. Die standortspezifische Auswertung konnte somit trotz der kleinen Stichprobenzahl pro Standort größere Ausreißer ausgleichen und damit die Abweichung zwischen Messung und Modell reduzieren.

Hinsichtlich der prozentualen Verteilung des Anbaus der Hauptfruchtarten in Sachsen (Abbildung 61) lässt sich abschließend feststellen, dass die Validierung der satellitengestützten Ertragsmodellierung für 96 % der Hauptfruchtarten (Winterraps, Winterweizen, Roggen, Wintergerste und Mais) bereits solide Ergebnisse liefern kann. Die Sommergerste macht mit nur 4 % einen eher kleinen Anteil des Anbaus in Sachsen aus.

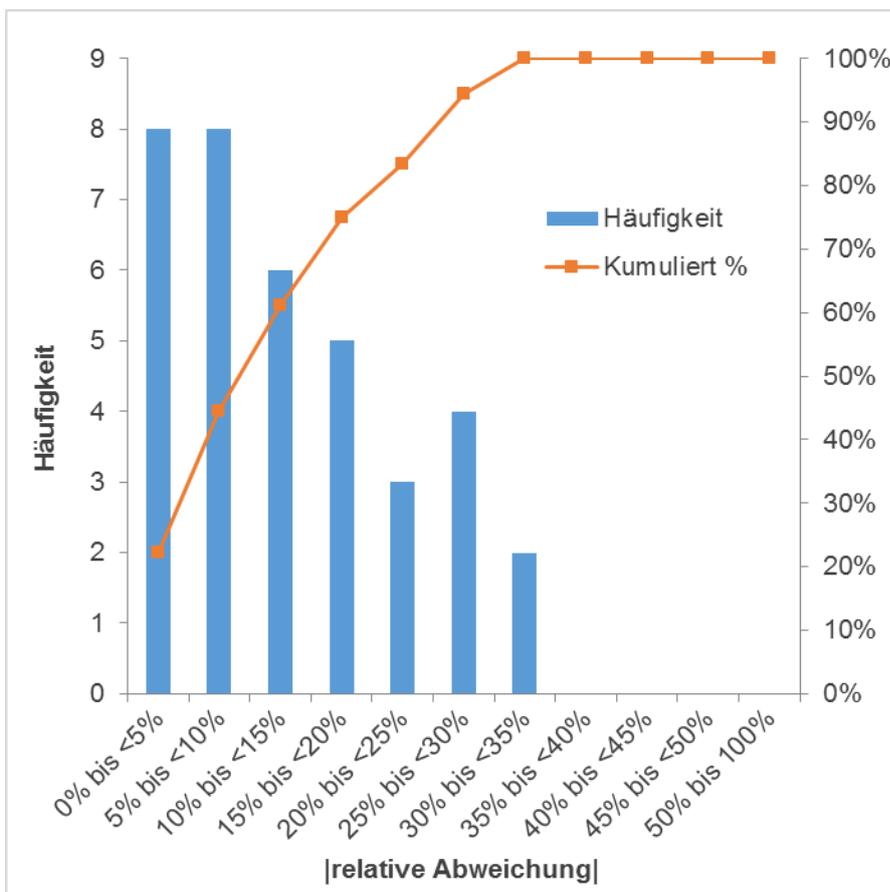


Abbildung 59: Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse im Betrag im Vergleich zu den Messdaten auf Standortebeine, angegeben in absoluten Häufigkeiten und als kumulierter Wert [%]

6.4 Bewertung der Bodendaten für die Ertragsmodellierung

Die Bodeneigenschaften haben neben den klimatischen Bedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Ertragshöhe. Aufgrund dessen sind die Qualität und der Maßstab der verwendeten Eingangsdaten zur Beschreibung der Bodeneigenschaften entscheidend für das Modellergebnis. Dies zeigt das Modell insbesondere in dem Trockenjahr 2015.

Mittels einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss der verwendeten Bodendaten auf die Modellierungsergebnisse beleuchtet. Dabei werden die Daten der BK50 (Maßstab 1 : 50.000) mit einer europaweit verfügbaren Datenquelle, der Europäischen Bodendatenbank (ESDB)¹⁵, verglichen.

Für die Standorte wird zum einen das im Wurzelraum maximal pflanzenverfügbare Wasser (Abbildung 62), zum anderen die hydraulische Leitfähigkeit der Böden (Abbildung 63) als Kennwert für die Infiltration von Niederschlagswasser mit beiden Datengrundlagen berechnet und verglichen.

Betrachtet man die mit den Gleichungen von BROOKS & COREY (1964)¹⁶ berechnete nutzbare Feldkapazität (nFK) im Wurzelraum, so zeigt die BK50 (Abbildung 62, links) eine niedrigere Speicherkapazität mit durchschnittlich ca. 250 mm pflanzenverfügbarem Wasser (bis 150 cm Tiefe) und einer heterogenen Verteilung. Im Vergleich dazu weist die ESDB für diese Region eine homogenere Verteilung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers mit durchschnittlich ca. 300 mm Bodenwasser bis 150 cm Tiefe aus (Abbildung 62, rechts). Für die Modellierung des Pflanzenwachstums bedeutet das, dass mit den Daten der BK50 schneller Trockenstress entstehen kann als mit den entsprechenden Bodendaten auf Basis der ESDB.

Gründe für die unterschiedlichen Werte sind wahrscheinlich die angesetzten Porositäten der aufgeführten Bodenklassen. Hier spielt v. a. der Skelettanteil der Böden eine entscheidende Rolle. Der Skelettanteil lag bei den ESDB-Daten im Mittel zwischen 10–20 %, aus den BK50-Daten konnte dieser nicht direkt entnommen werden. Die fehlende Kenntnis des Skelettanteils hat bei der Berechnung der Modellparameter gerade bei Böden mit einer geringen Porosität zweifachen Einfluss: Einerseits wird korrekterweise der für das Wasser vorhandene Porenraum reduziert, andererseits werden aber die für das prozessbasierte Bodenwassermodell benötigten Parameter so berechnet, als würde der Boden hoch verdichtet sein. Dies kann zu extremen Modellparametern führen, die sowohl die Wasserhaltefähigkeit zu stark reduzieren (Abbildung 62, links) als auch eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit bewirken (Abbildung 63, links).

Man kann unter Umständen davon ausgehen, dass dieser Umstand besonders im Untersuchungsgebiet Sachsen Süd mit niedrigen Porositäten und damit mit einer sehr niedrigen Infiltrationsrate, die Erneuerung des Bodenwasserspeichers in der Modellierung verringert hat. Abbildung 63 (rechts) zeigt, dass die entsprechenden Leitfähigkeiten, die mit den ESDB-Daten inkl. Skelettanteil berechnet wurden, um das 5- bis 10-Fache höher liegen als die BK50-Werte.

¹⁵ <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/datasets>

¹⁶ BROOKS, R. H., COREY, A. T. (1964): Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. Transactions of the ASAE, 7(1), 26-0028.

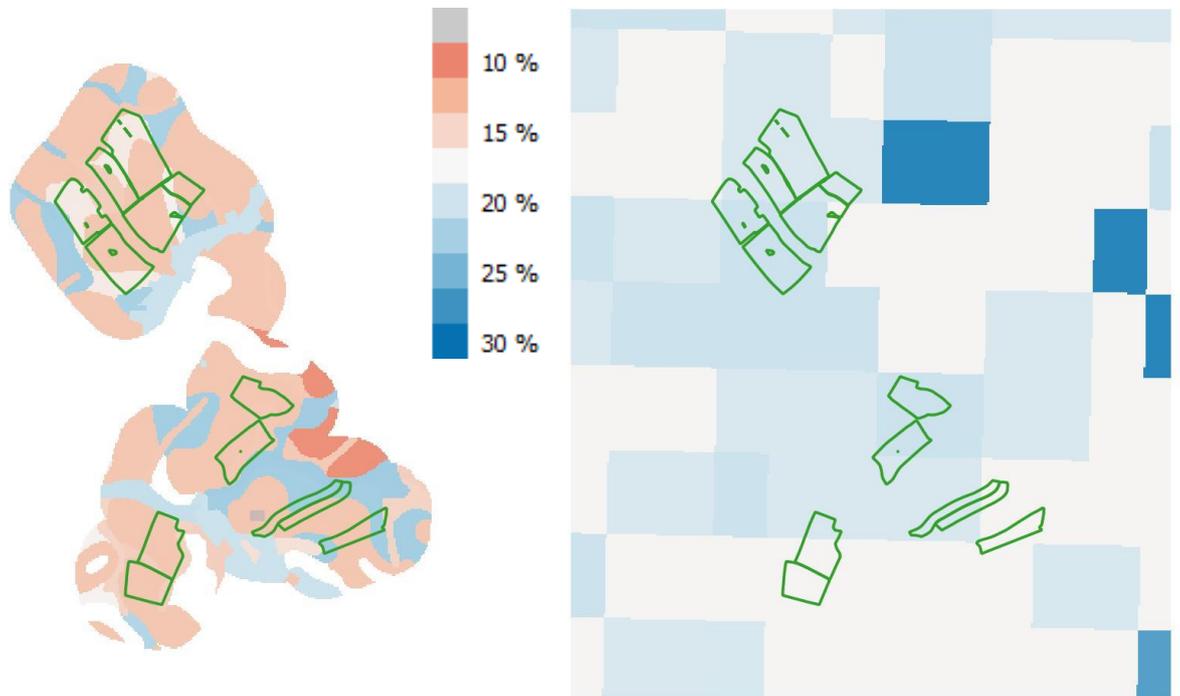


Abbildung 62: Mit PROMET modellierter Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser [%] auf Basis der BK50 (links) und der räumlich gröberen Europäischen Bodendatenbank (rechts) für Sachsen Süd

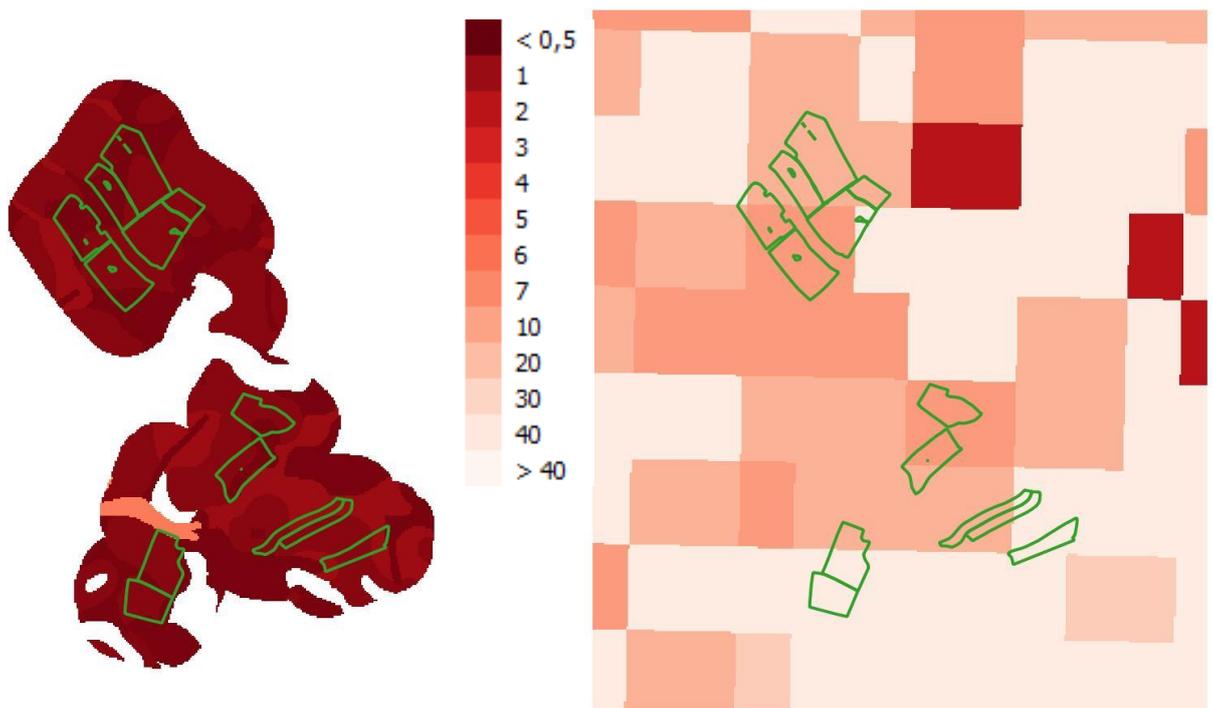


Abbildung 63: Gesättigte Leitfähigkeit [mm/h] nach SAXTON et al. (1986)¹⁷ auf Basis der BK50 (links) und der Europäischen Bodendatenbank (rechts) für Sachsen Süd

¹⁷ SAXTON, K. E., RAWLS, W., ROMBERGER, J. S., PAPENDICK, R. I. (1986): Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Science Society of America Journal, 50(4), 1031-1036.

Bei einem Sensitivitätsmodelllauf für den Standort Süd mit den ESDB-Daten wird deutlich, dass sich die Ergebnisse mit einer Berechnung der Wasserverfügbarkeit unter Zuhilfenahme des Skelettanteils verbessern. So sind die simulierten Erträge für die Fruchtarten Winterweizen (Abbildung 64) und Wintergerste (Abbildung 65) hinsichtlich ihrer Korrelationen besser und das Bestimmtheitsmaß (R^2) für Winterweizen steigt im Vergleich von 0,39 auf 0,42 an, das R^2 für die Wintergerste sogar von 0,38 auf 0,43.

Grundsätzlich zeigt der Vergleich, dass das Modell unter Nutzung des Skelettanteils weniger fehlerhafte/ extreme Parameter erzeugt (vergleiche Abbildung 66 und Abbildung 40). Stattdessen könnten ggf. vorhandene Unterschiede in der Biomasse- und Ertragsstruktur innerhalb eines Schlages besser sichtbar werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die ESDB in den Sensitivitätsstudien trotz des kleineren Maßstabes bessere Ergebnisse für die modellierten Erträge lieferte als die BK50. Es ist daher zu empfehlen, dass im Modell für die Parametrisierung immer der Skelettanteil genutzt werden sollte.

Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber kann der Skelettanteil des Bodens über die BK50 ausgewiesen und genutzt werden, sodass bei weiteren Arbeiten im Modell darauf zurückgegriffen werden kann.

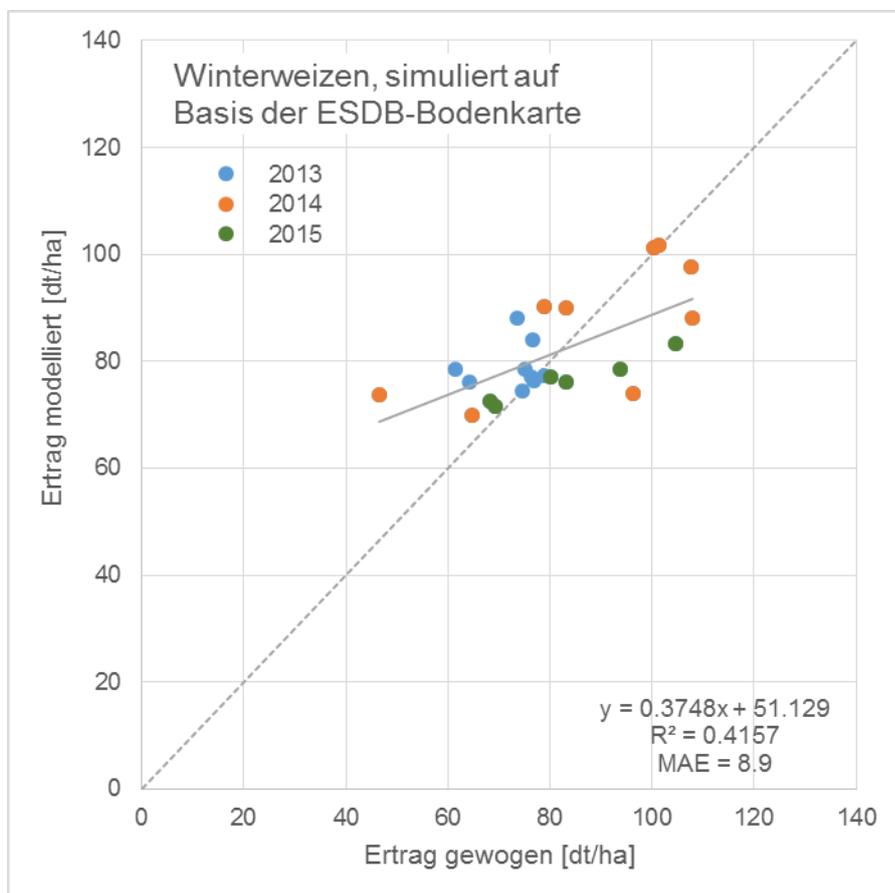


Abbildung 64: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren simulierten Ertrag (Modellierung auf Basis der ESDB-Bodenkarte) pro Schlag für die Fruchtart Winterweizen für die Jahre 2013, 2014 und 2015

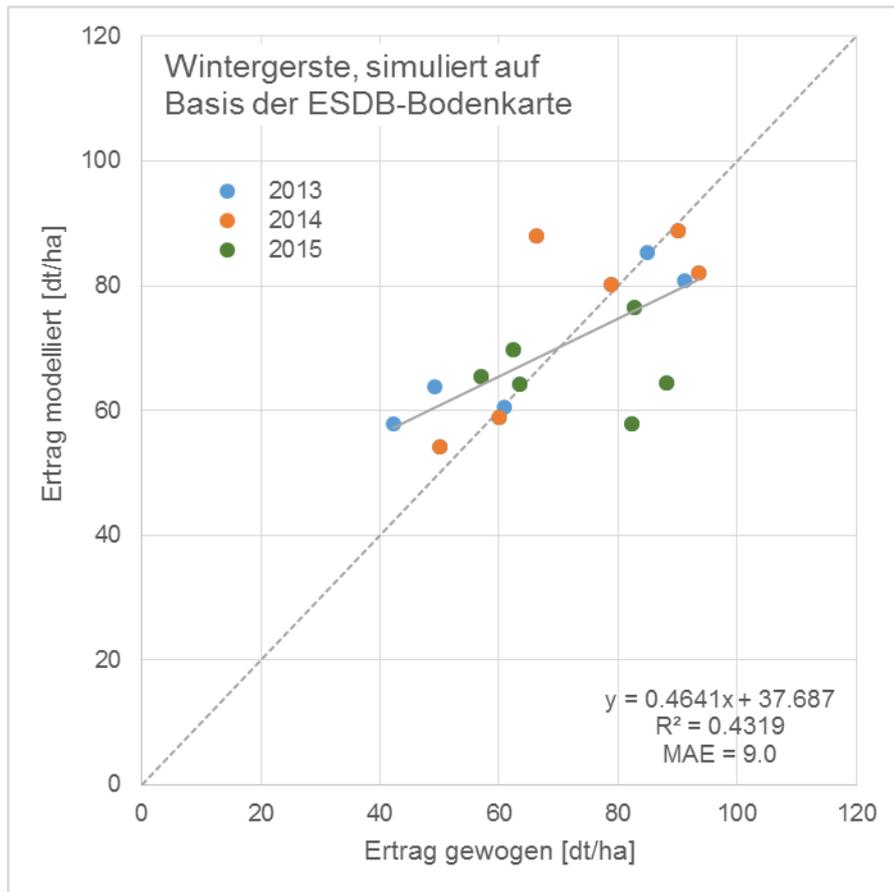


Abbildung 65: Korrelation zwischen dem mittleren gewogenen und dem mittleren simulierten Ertrag (Modellierung auf Basis der ESDB-Bodenkarte) pro Schlag für die Fruchtart Wintergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015

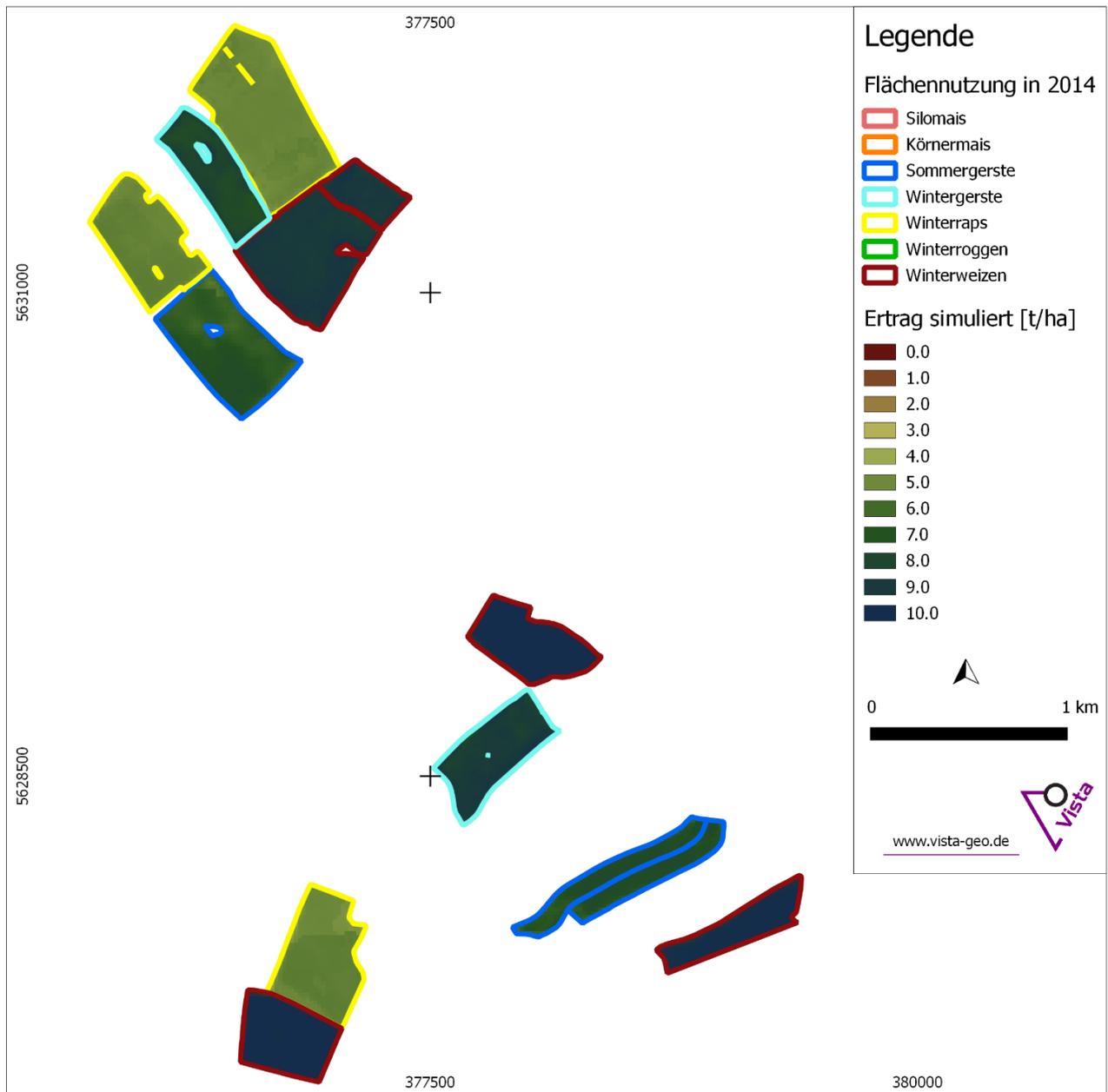


Abbildung 66: Ertrag 2014 simuliert für den Testbetrieb Süd auf Basis der ESDB-Bodenkarte

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt zur satellitengestützten Ertragserhebung wurden innerhalb der Projektlaufzeit von September 2015 bis einschließlich März 2016 durch VISTA GmbH die

- Satellitendaten für 2013, 2014 und 2015 recherchiert, beschafft und aufbereitet,
- In-Situ-Daten gesichtet und, wo möglich, für die Verwendung in der Modellierung vorbereitet,
- PROMET-Modellläufe für die drei sächsischen Untersuchungsgebiete vorbereitet und im ersten Test Simulationen ohne Assimilierung von Satellitendaten gerechnet,
- Pflanzenparameter für die Wachstumsmodellierung mit Hilfe des Strahlungstransfermodells SLC für alle Fruchtarten für die Jahre 2013, 2014 und 2015 fruchtartspezifisch abgeleitet,
- In-Situ-Ertragskarten eingelesen, korrigiert, auf gerastert und in das richtige Format für die spätere Validierung der Modellierung gebracht,
- Pflanzenparameter aus Satellitendaten in die Wachstumsmodellierung assimiliert, um für alle Jahre und Fruchtarten den Ertrag zu modellieren; dabei wurden alle Schläge der Betriebe simuliert,
- Modellergebnisse für die Jahre 2013 und 2014 mit den vorab gelieferten In-Situ-Daten sowohl feldweise als auch teilflächenspezifisch validiert,
- Modellergebnisse für 2015 mit den nachträglich (nach „Blind“-Abgabe der Ergebnisse) übermittelten In-Situ-Daten feldweise validiert.

Die Validierung der Ergebnisse wurde auf Basis der Ertragsmittelwerte aller Einzelschläge für drei verschiedene Standorte und drei Jahre mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen durchgeführt. Damit sollte ein universeller und operationeller Einsatz der Methode für ganz Sachsen getestet werden. Zusätzlich wurde die Auswertung auch gemittelt über die Schläge je Standort durchgeführt, um den operationellen Anwendungsfall für die Verbesserung der Ertragsstatistik zu demonstrieren.

Grundsätzlich sind die Ergebnisse der Untersuchung vielversprechend, wobei im Einzelfall Optimierungsbedarf besteht. So ist die Modellierung für Sommergerste noch zu optimieren.

Wie fehlende Informationen auf die Ergebnisse des Modells wirken, zeigt die Sensitivitätsanalyse in Kap. 6.4. Für weitere Anwendungsfälle ist darauf zu achten, dass umfassende Basisdaten vorliegen.

Unter Berücksichtigung der genannten Punkte (Vernachlässigung der Ergebnisse für Sommergerste, Simulation für Winterweizen und Wintergerste mit vollständiger Bodeninformation) ergab sich für die einzelnen Standorte eine gute Korrelation der Kornerträge mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,83. Damit konnten rund 83 % der Variabilität im Modell richtig wiedergegeben werden (Abbildung 67).

Ebenso wurden die unterschiedlichen Standorte und die jahresspezifischen Wachstumsbedingungen vom Modell gut erfasst. So liegt das Bestimmtheitsmaß der Modellergebnisse bei den einzelnen Standorten zwischen 0,76 und 0,86. Für die einzelnen Jahre wurden Bestimmtheitsmaße von 0,83 bis 0,89 errechnet (Abbildung 51 und Abbildung 52).

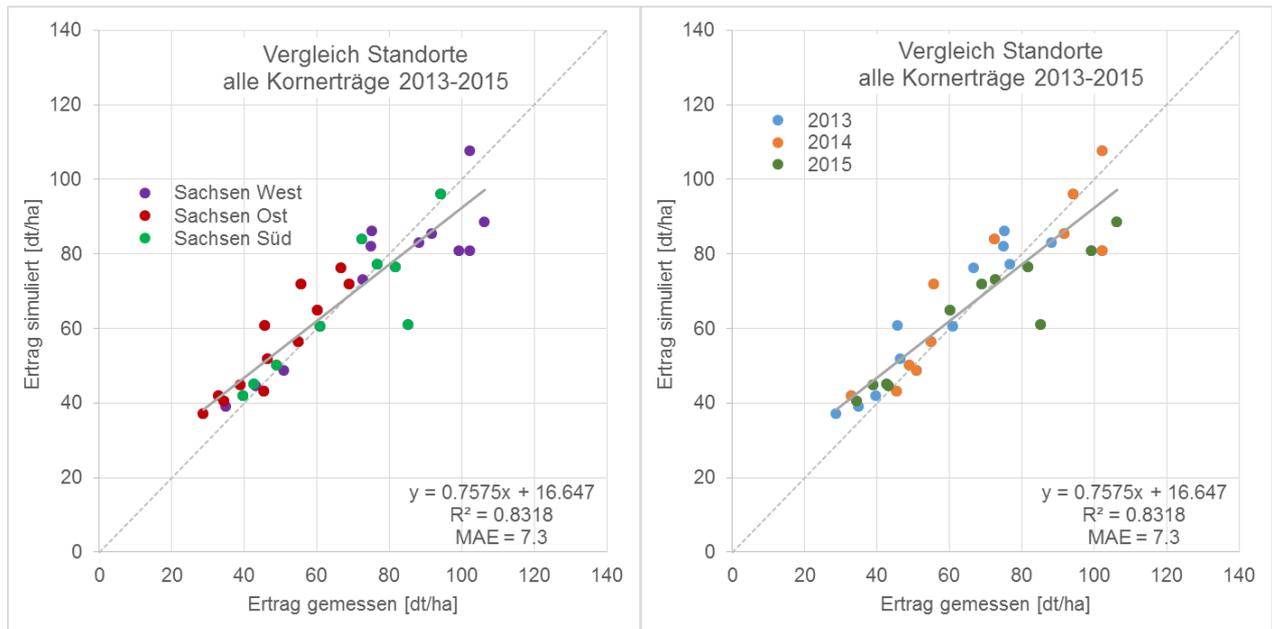


Abbildung 67: Validierung der mittleren gewogenen und modellierten Ertragswerte pro Standort für alle Kornträge ohne Sommergerste für die Jahre 2013, 2014 und 2015, eingefärbt nach Standorten (links) bzw. Jahren (rechts)

Werden die Ergebnisse der einzelnen Standorte insgesamt betrachtet, liegen die Abweichungen der simulierten zu den gemessenen Erträgen zumeist im Bereich von -5 bis +15 %, wobei es aber auch maximale Abweichungen von ± 25 % gab (Abbildung 68). Zudem ist die Streuung der Abweichungen bei der Auswertung der Standorte als Ganzes gegenüber den einzelnen Schlägen wesentlich geringer. Die standortspezifische Auswertung konnte somit trotz der kleinen Stichprobenzahl pro Standort größere Ausreißer ausgleichen und damit die Abweichung zwischen Messung und Modell reduzieren. Dies zeigt, dass sich die Methodik für eine operationelle großflächige Anwendung wie eine regionale Ertragshebung gut eignet.

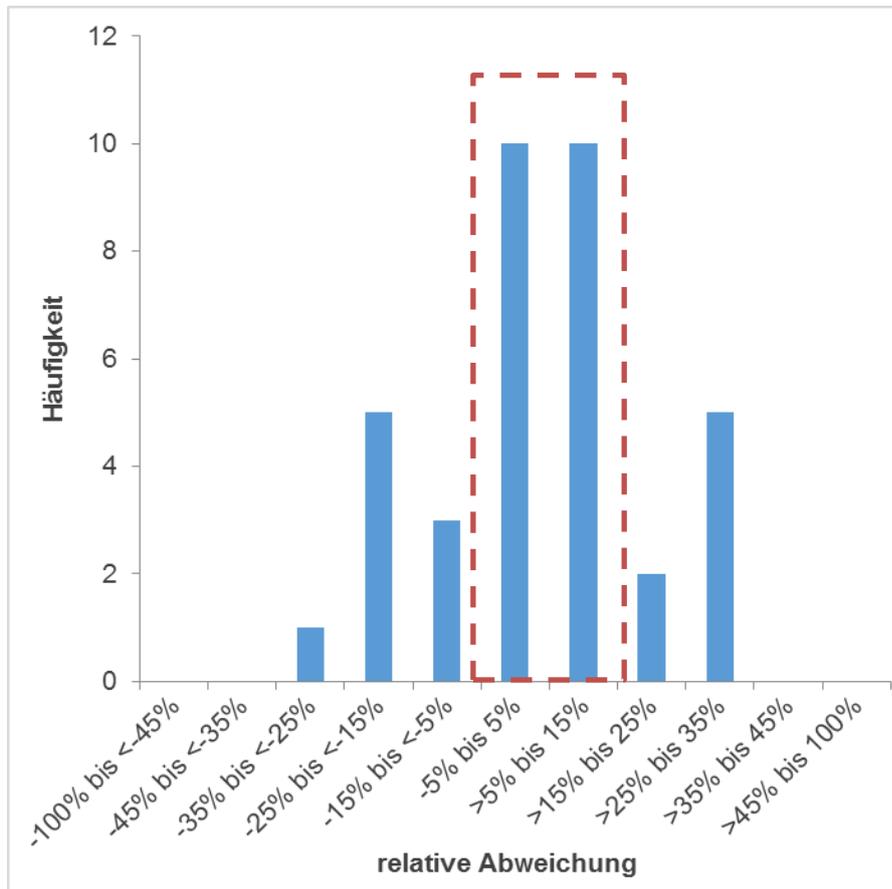


Abbildung 68: Histogramm der relativen Abweichungen [%] der Modellergebnisse ohne Sommergerste im Vergleich zu den Messdaten auf Standortbasis

Die satellitengestützte Modellierung hat sich somit als aussagekräftig, robust und zuverlässig erwiesen.

Mit der Verfügbarkeit von Sentinel-2-Daten seit Herbst 2015 wird sich die Qualität der Ergebnisse potenziell noch erhöhen. Mit dem Copernicus-Satellit wird sich die zeitliche Frequenz der Beobachtungen, die räumliche Passgenauigkeit und durch bessere spektrale Eigenschaften auch die Güte der Ableitung von Pflanzenparametern erhöhen.

Ebenso werden weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Modellierung mit der Vervollständigung der Basisdaten (u. a. Boden) und einer verbesserten phänologischen Parametrisierung der Sommergerste gesehen. In Ausblick auf einen operationellen Einsatz der satellitengestützten Ertragsmodellierung ist außerdem noch einmal die Herausforderung des Erntetermins zu nennen. Dessen exakte Bestimmung ist besonders für das Ergebnis der Fruchtarten Raps und Silomais kritisch. Bisher wurde der Erntetermin aus Satellitendaten bzw. besonders beim Silomais aus bestimmten Parametern der Modellsimulation geschätzt. Dieser Prozess könnte aber bei einer dichteren Datenlage an Satellitenaufnahmen in der entsprechenden Phase noch genauere Ergebnisse liefern und durch eine leichtere Eingrenzung des Zeitraums noch besser automatisiert berechnet werden. Der Einsatz von Sentinel-2 wird hier bereits eine Erleichterung bringen. Weitere Untersuchungen zur Lösung dieses Problems werden mithilfe radargestützter Methoden durch VISTA durchgeführt.

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollte geprüft werden, ob mit dem angebotenen Verfahren standortdifferenzierte Erträge statistisch sicher abgebildet werden können, als Voraussetzung für eine großräumigere

Ertragserhebung für Sachsen. Die Ertragsschätzungen für die drei Standorte führten zu ersten akzeptablen Schätzergebnissen, sodass die angewandte Methode zur Ertragsschätzung eine Erhebung regional-/ gebietsspezifischer Ertragsdaten erlaubt.

Eine großräumige satellitengestützte Ertragserhebung für Sachsen ist über eine flächendeckende Vollerhebung oder eine repräsentative Teilerhebung realisierbar. Die VISTA GmbH schlägt vor, ein Stichprobenverfahren anzuwenden. Die Ertragsschätzung würde für einen vorgegebenen Stichprobenumfang erfolgen. Eine spätere räumliche Aggregation der Einzeldaten könnte dann auf unterschiedlichen räumlichen Einheiten (Gebietskulissen) erfolgen.

Vorteile des Stichprobenverfahrens:

- Es müssen weniger Felder ausgewertet werden als bei einer flächendeckenden Erhebung.
- Die Auswahl nutzt Wolkenlücken.
- Bei einer Beschränkung auf Felder > 1 ha (das sind 95 % der Anbaufläche Sachsens) wäre die Ertragserhebung über kostenfreie Satellitenbilder möglich.
- Es entsteht ein geringerer Arbeits- und Kostenaufwand als bei einer flächendeckenden Erhebung.

Nachteile des Stichprobenverfahrens:

- Stichproben müssen für die räumlichen Einheiten signifikant sein.

8 Anhang

Tabelle 16: Verfügbare und für die Modellierung verwendete Satellitendaten (L7 = Landsat 7 ETM+, L8 = Landsat 8 OLI, R 1,2,3,4,5 = Rapid Eye 1,2,3,4,5, S2 = Sentinel 2)

Ost					
2013		2014		2015	
Datum [TTMMJJ]	Sensor	Datum [TTMMJJ]	Sensor	Datum [TTMMJJ]	Sensor
04.03.2013	L7	* 07.03.2014	L7	* 18.03.2015	L8
* 22.04.2013	L8	* 16.04.2014	L8	19.03.2015	L7
* 15.05.2013	L8	17.04.2014	L7	11.04.2015	L7
16.05.2013	L7	* 25.04.2014	L8	* 12.04.2015	L8
17.06.2013	L7	* 11.05.2014	L8	* 19.04.2015	L8
* 20.06.2013	R5	* 31.05.2014	R2	20.04.2015	L7
* 02.07.2013	L8	11.06.2014	L7	* 06.06.2015	L8
* 18.07.2013	L8	* 12.06.2014	L8	14.06.2015	L7
26.07.2013	L7	* 04.07.2014	R3	* 14.06.2015	R5
* 27.07.2013	L8	* 29.07.2014	L7	* 01.07.2015	L8
* 12.08.2013	L8	* 22.08.2014	L8	* 18.07.2015	R1
* 29.09.2013	L8	* 07.09.2014	L8	* 24.07.2015	L8
22.10.2013	L8	* 16.09.2014	L8	01.08.2015	L7
31.10.2013	L8	* 24.09.2014	L7	10.08.2015	L7
				* 13.08.2015	S2
				26.08.2015	L7
				* 26.08.2015	R2
				03.09.2015	L8
				* 19.09.2015	L8
				05.10.2015	L8
				12.10.2015	L8
				27.10.2015	R2
				28.10.2015	L8
				29.10.2015	L7
verfügbar	14	verfügbar	14	verfügbar	24
für Modellierung verwendet	8	für Modellierung verwendet	12	für Modellierung verwendet	11

Süd					
2013		2014		2015	
Datum [TTMMJJ]	Sensor	Datum [TTMMJJ]	Sensor	Datum [TTMMJJ]	Sensor
* 15.04.2013	R5	07.03.2014	L7	* 09.03.2015	L8
21.04.2013	L7	* 14.03.2014	L7	* 18.03.2015	L8
* 15.05.2013	L8	* 30.03.2014	L7	* 25.03.2015	L8
* 15.06.2013	L7	* 23.04.2014	L8	* 10.04.2015	L8
* 18.06.2013	R2	24.04.2014	L7	* 19.04.2015	L8
01.07.2013	L7	* 25.05.2014	L8	* 13.05.2015	L7
* 02.07.2013	L8	26.05.2014	L7	04.06.2015	R4
* 17.07.2013	L7	* 10.06.2014	L8	05.06.2015	L7
* 18.07.2013	L8	* 18.06.2014	L7	* 06.06.2015	L8
* 24.07.2013	R5	04.07.2014	L7	* 13.06.2015	L8
26.07.2013	L7	* 05.07.2014	L8	* 03.07.2015	R5
02.08.2013	L7	* 13.07.2014	L7	* 07.07.2015	L7
* 03.08.2013	L8	* 20.07.2014	L7	* 07.07.2015	R4
27.09.2013	L8	* 22.08.2014	L8	* 24.07.2015	L8
28.09.2013	L7	06.09.2014	L7	* 01.08.2015	L7
28.09.2013	R4	07.09.2014	L8	06.08.2015	S2
				08.08.2015	L7
				* 09.08.2015	L8
				* 12.08.2015	R2
				13.08.2015	S2
				24.08.2015	L7
				01.09.2015	L8
				01.09.2015	R3
				12.09.2015	R5
				17.09.2015	L8
				25.09.2015	L7
				02.10.2015	R1
				03.10.2015	L8
				11.10.2015	L7

Süd					
				12.10.2015	L8
verfügbar	16	verfügbar	16	verfügbar	30
für Modellierung verwendet	9	für Modellierung verwendet	10	für Modellierung verwendet	15
West					
2013		2014		2015	
Datum [TTMMJJ]	Sensor	Datum [TTMMJJ]	Sensor	Datum [TTMMJJ]	Sensor
05.05.2013	L7	* 13.03.2014	L8	08.03.2015	L7
* 06.05.2013	L8	14.03.2014	L7	* 25.03.2015	L8
* 05.06.2013	R3	* 30.03.2014	L7	* 10.04.2015	L8
* 07.06.2013	L8	* 14.04.2014	L8	11.05.2015	L7
* 14.06.2013	L8	* 23.04.2014	L8	* 28.05.2015	L8
15.06.2013	L7	* 20.05.2014	R5	* 04.06.2015	L8
* 01.07.2013	L7	25.05.2014	L8	* 05.06.2015	L7
* 08.07.2013	L7	* 07.06.2014	R4	12.06.2015	L7
* 09.07.2013	L8	* 08.06.2014	R5	28.06.2015	L7
* 16.07.2013	L8	09.06.2014	L7	* 29.06.2015	L8
* 16.07.2013	R1	* 10.06.2014	L8	* 04.07.2015	R1
* 25.07.2013	L8	18.06.2014	L7	07.07.2015	L7
01.08.2013	L8	* 03.07.2014	L8	* 24.07.2015	R2
* 02.08.2013	L7	04.07.2014	L7	* 03.08.2015	R2
* 10.08.2013	L8	* 19.07.2014	L8	06.08.2015	S2
27.09.2013	L8	* 20.07.2014	L7	07.08.2015	L8
		01.08.2014	R1	* 08.08.2015	L7
		11.08.2014	R2	* 13.08.2015	S2
		* 20.08.2014	L8	15.08.2015	L7
		21.08.2014	L7	22.08.2015	R2
		* 05.09.2014	L8	* 23.08.2015	L8
		06.09.2014	L7	24.08.2015	L7
				31.08.2015	L7
				* 01.09.2015	L8
				08.09.2015	L8

West					
				* 17.09.2015	L8
				02.10.2015	L7
				02.10.2015	R1
				* 03.10.2015	L8
				10.10.2015	L8
				11.10.2015	L7
verfügbar	16	verfügbar	22	verfügbar	31
für Modellierung verwendet	12	für Modellierung verwendet	13	für Modellierung verwendet	15

Literaturverzeichnis

- BROOKS, R. H., COREY, A. T. (1964): Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. Transactions of the ASAE, 7(1), 26-0028.
- HANK, T., BACH, H. & MAUSER, W. (2015): Using a Remote Sensing-Supported Hydro-Agroecological Model for Field-Scale Simulation of Heterogeneous Crop Growth and Yield: Application for Wheat in Central Europe, Remote Sensing, 7 (4), 3934-3965, Basel (Switzerland).
- MAUSER, W., BACH, H. (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. Journal of Hydrology, 376, 362-377.
- SAXTON, K. E., RAWLS, W., ROMBERGER, J. S., PAPENDICK, R. I. (1986): Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Science Society of America Journal, 50(4), 1031-1036.
- STEINMAYR, T. (2002): Dissertation - Fehleranalyse und Fehlerkorrektur bei der lokalen Ertragsermittlung im Mähdrescher zur Ableitung eines standardisierten Algorithmus für die Ertragskartierung. Technische Universität München.
- VERHOEF, W., BACH, H. (2012): Simulation of Sentinel-3 images by four stream surface atmosphere radiative transfer modeling in the optical and thermal domains. Remote Sensing of Environment, 120 (2012), 197-207.
- VERHOEF, W., BACH, H. (2007): Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. Remote Sensing of Environment, 109 (2007), 166–182.
- VERHOEF, W., BACH, H. (2003): Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. Remote Sensing of Environment, 87 (2003), 23–41.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Dr. Heike Bach, Silke Migdall, Franziska Brohmeyer, Lena Brüggemann,
Marion Buddeberg
VISTA Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH
Gabelsbergerstr. 51, 80333 München
Telefon: +49 89 5238-9803
Telefax: +49 89 5238-9804
E-Mail: bach@vista-geo.de
www.vista-geo.de

Redaktion:

Ulrike Bönewitz; Falk Ullrich
LfULG, Abteilung Grundsatzangelegenheiten Umwelt, Landwirtschaft,
Ländliche Entwicklung/Referat Agrar- und umweltpolitische Analysen
August-Böckstiegel-Str. 1, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-2203
Telefax: +49 351 2612-2099
E-Mail: Ulrike.Boenewitz@smul.sachsen.de

Fotos:

VISTA GmbH, Landsat 8 OLI

Redaktionsschluss:

30.07.2016

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.