

Projekt PhenoS

Phänologische Strukturierung von zeitlich hochauflösenden
Sentinel-2-Datensätzen zur Optimierung von Landnutzungs-
klassifikationen



Zuwendungsempfänger:



Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Geowissenschaften und Geographie
Fachgebiet Geofernerkundung und Kartographie
Von-Seckendorff-Platz 4
06120 Halle (Saale)



Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Institut für Geographie und Geologie
Lehrstuhl für Fernerkundung
Am Hubland
97074 Würzburg



Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Department Landschaftsökologie
Permoserstr. 15
04318 Leipzig

FKZ GeoMLU:

50EE1262

FKZ GeoLMU:

50EE1263

FKZ UFZ:

50EE1264

Schlussbericht PhenoS

Förderkontext:	Vorbereitung der wissenschaftlichen und kommerziellen Nutzung der Sentinel-Missionen und nationalen Missionen (Schwerpunktbereich B)
Vorhabensbezeichnung:	Phänologische Strukturierung von zeitlich hochauflösenden Sentinel-2-Datensätzen zur Optimierung von Landnutzungsklassifikationen - PhenoS
Laufzeit des Vorhabens:	01.04.2013 - 31.01.2017
Berichtszeitraum:	01.04.2013 – 31.01.2017
Kontakt:	Prof. Dr. C. Gläßer Tel.: 0345/55-26020, cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de
	Prof. Dr. C. Conrad Tel.: 0931/3184960, christopher.conrad@uni-wuerzburg.de
	Dr. D. Doktor Tel.: 0341/2351943, daniel.doktor@ufz.de
Gesamtschriftleitung:	Prof. Dr. Cornelia Gläßer
Autoren GeoMLU:	Henning Gerstmann, Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Dr. Detlef Thürkow, Florian Thürkow
Autoren GeoJMU:	Dr. Patrick Knöfel, Prof. Dr. Christopher Conrad
Autoren UFZ:	Xingmei Xu, Dr. Daniel Doktor
Bearbeiterinnen und Bearbeiter GeoMLU:	Henning Gerstmann, Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Dr. Detlef Thürkow Florian Thürkow (UMGEODAT)
Bearbeiter GeoJMU:	Dr. Patrick Knöfel, Prof. Dr. Christopher Conrad
Bearbeiter und Bearbeiterinnen UFZ:	Dr. Daniel Doktor, Xingmei Xu

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
1 Kurzdarstellung	11
1.1 Aufgabenstellung.....	11
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	12
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	13
1.3.1 Modellierung von phänologischen Entwicklungsstadien	14
1.3.2 Objektbasierte Klassifikation landwirtschaftlicher Nutzung mit Satellitenbilddaten	15
1.3.3 Kopplung von Spektralindex-Profilen und Wachstumsstadien für Landnutzungsklassifikationen	15
1.3.4 Aufbau von webbasierten geowissenschaftlichen Portalen	15
2 Eingehende Darstellung	17
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	17
2.1.1 UFZ.....	17
2.1.2 GeoJMU	34
2.1.3 GeoMLU.....	60
2.1.4 Arbeitspaket 6: Webbasiertes Prognose- und Auskunftssystem WPA-PhenoS	83
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	91
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	91
2.4 Voraussichtlicher Nutzen.....	91
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	92
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	92
3 Erfolgskontrollbericht.....	95
3.1 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen.....	95
3.2 Wissenschaftlich-Technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen	96
3.3 Fortschreitung des Verwertungsplans.....	99
3.3.1 Schutzrechte	99
3.3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	100
3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	102

3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....	103
3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	104
4	Literaturverzeichnis.....	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur des Projektes PhenoS.....	13
Abbildung 2: Sämtliche Aufnahmedaten für 2 ausgewählte RapidEye Szenen zwischen 2009-2015. Die Kachel ‚Mountain‘ (Katalog ID: 3262921) deckt einen Teil des Harzgebietes und die Kachel ‚Flat area‘ (Katalog ID: 3262922) Teile der Magdeburger Börde ab.....	17
Abbildung 3: Akquirierte RapidEye Szenen (alle Kacheln im rot umrandeten Gebiet), die den Zeitraum September 2009 – Juni 2014 abdecken. Etwa alle 6 Wochen ist jeweils eine Szene im Zeitraum März – Oktober verfügbar.....	18
Abbildung 4: Simulierte Sentinel-2-Daten (10 m räumliche Auflösung, Bandkombination CIR) für das UG Harz’	19
Abbildung 5: Teilausschnitt des Untersuchungsgebietes zwischen Aschersleben und Meisdorf (Google Earth Images), mit angezeigten Meßpunkten (rote Quadrate) und intern vergebenen Feldnummer (in weiß).	20
Abbildung 6: Teilausschnitt des Untersuchungsgebietes zwischen Aschersleben und Meisdorf mit den phänologisch untersuchten Anbaufrüchten nebst BBCH Code für einen Zeitschnitt. Blau unterlegte Felder wurden nicht beprobt.....	20
Abbildung 7: Phänologische Stadien der Feldbeobachtungen von 2015, insgesamt 37 Felder im Untersuchungsgebiet. Im Vergleich zu 2014 war die Vegetationsperiode aufgrund der Dürre im Frühjahr und Frühsommer deutlich kürzer.....	21
Abbildung 8: Phänologische Beobachtungsstationen (graue Dreiecke) in Naturraumgruppen (Schmithüsen & Meynen, 1962) sowie die entsprechenden kombinierten Zeitreihen (rote Dreiecke) und aggregierten Zeitreihen (blaue Punkte), die zum zur Modellanpassung verwendet wurde.....	22
Abbildung 9: Modellierte versus beobachtete Werte für die phänologische Phase 'Blüte' von Winterroggen. Die orangene Linie zeigt den tatsächlichen linearen Zusammenhang, während die grüne Linie den theoretisch idealen Zusammenhang darstellt.....	25
Abbildung 10: Mittels External Drift Kriging (EDK) interpolierte Simulationen (Ährenschieben Winterweizen) für das Jahr 2011 mit 759 Beobachtungsstationen. Regionen mit frühem Phaseneintritt (Tag 140-150, in Grün) lassen sich klar von Regionen mit spätem Phaseneintritt (Tag >160, in Gelb) unterscheiden.....	25
Abbildung 11: Beispiel für die Extraktion phänologischer Maße anhand täglicher MODIS-Beobachtungen (schwarze Punkte). Nachdem die Rohdaten dynamisch gefiltert sind (BISE, Best Index Slope Extraction) wird an die verbliebenen Beobachtungen (rotes Kreuz, wolkenfrei) eine logistische Funktion angepasst (orangene Linie). Anhand bestimmter Schwellenwerte auf der modellierten Linie (z.B. die Hälfte zwischen maximalen und minimalen NDVI-Wert) kann dann der Zeitpunkt des Phaseneintritts auf der X-Achse abgetragen werden (grüne bzw. blaue horizontale Linie).	27
Abbildung 12: Beispiel für den NDVI-Verlauf über mehrere Jahre mit variierenden landwirtschaftlichen Kulturen. Nachdem die Rohdaten dynamisch gefiltert sind (BISE, Best Index Slope Extraction) wird an die verbliebenen Beobachtungen (rotes Kreuz, wolkenfrei) eine Filterfunktion angepasst (Savitzky-Golay, blaue Linie).	28
Abbildung 13: Streudiagramme von extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten (MODIS) versus entsprechende Bodenbeobachtungen von DWD und UFZ für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen: a)-d) 2010-2014 versus DWD Daten; e) und	

f) 2014 versus UFZ Daten. Rote Symbole zeigen Schläge, die am nächsten zu den DWD Beobachtungsstationen liegen. Jeder Boxplot repräsentiert die phänologischen Stadien aller Felder im Umkreis von 3 km einer DWD Station.....	29
Abbildung 14: Streudiagramme von extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten (RapidEye) versus entsprechende Bodenbeobachtungen von DWD und UFZ für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen (Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Zuckerrübe). Rote Symbole zeigen Schläge, die am nächsten zu den DWD Beobachtungsstationen liegen	31
Abbildung 15: Vergleich des jahreszeitlichen Verlaufs von MODIS und RapidEye NDVI-Beobachtungen für eine landwirtschaftliche Kultur und Schlag. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung sind RapidEye Beobachtungen als Boxplots dargestellt. Zeitlich simultane Beobachtungen von RapidEye mit MODIS sind rot markiert	31
Abbildung 16: Extrahierter Tag des Phaseneintritts für das phänologische Stadium Seneszenz bzw. Vollreife aus RapidEye-Daten für das Untersuchungsgebiet Harzgradient. Die kleinräumigen Strukturen mit unterschiedlichen Phaseneintrittspunkten können aufgrund der hohen räumlichen Auflösung gut herausgearbeitet werden	32
Abbildung 17: Akquirierte und atmosphärenkorrigierte Sentinel-2 a Szenen des Untersuchungsgebietes für 2015	33
Abbildung 18: Akquirierte und atmosphärenkorrigierte Sentinel-2 a Szenen des Untersuchungsgebietes für 2016	33
Abbildung 19: Zeitpunkt der Seneszenz (Tag des Jahres) für landwirtschaftliche Kulturen und Forst des Untersuchungsgebietes basieren auf Sentinel-2A-Daten (20 m räumliche Auflösung) für das Jahr 2016	34
Abbildung 20: Zeitpunkt des Ergrünens (Tag des Jahres) für landwirtschaftliche Kulturen und Forst des Untersuchungsgebietes basieren auf Sentinel-2A-Daten (20 m räumliche Auflösung) für das Jahr 2016.....	34
Abbildung 21: Darstellung der grafischen Benutzeroberfläche einer Testversion des Klassifikationswerkzeuges	37
Abbildung 22: Darstellung der grafischen Benutzeroberfläche des Klassifikationsalgorithmus zur Ausgabe der Klassifikationsgüte der betreffenden Zeitschnittkombination. Hier dargestellt sind die Ergebnisse der klassenspezifischen Genauigkeit (F1-measure) für die Klasse Getreide der landwirtschaftlichen Schläge der Testumgebung Demmin.	38
Abbildung 23: Digitale Photographien von agrarischen Testflächen im Untersuchungsgebiet. Hier die Wintergetreidearten Gerste (oben) und Weizen (unten).	41
Abbildung 24: Vergleich der Klassifikationsgenauigkeit der Permutationen unterschiedlicher Datenverfügbar-keit für Sommergetreide, a) sämtliche Zeitschnitte verfügbar, b) nur die Zeitschnitte 3, 4, 5, 6 sind verfügbar.	44
Abbildung 25: Vergleich der Klassifikationsgenauigkeit der Permutationen unterschiedlicher Datenverfügbarkeit für Wintergetreide, a) sämtliche Zeitschnitte verfügbar, b) nur die Zeitschnitte 3, 4, 5, 6 sind verfügbar.	44
Abbildung 26: Vergleich der Gesamtklassifikationsgenauigkeit des Jahres 2011 für das UG Mitteldeutschland in unterschiedlichen thematischen Auflösung für Getreide, a) Getreide getrennt gemäß Zielklassenspezifikation, b) Getreide zusammengefasst zu Winter- und Sommergetreide.	45

Abbildung 27: Variation der thematischen Auflösung für Wintergetreide für das Jahr 2010 im UG Demmin.....	46
Abbildung 28: Ergebnisse der Klassifikationsgüte mit und ohne Integration der UFZ phänologischen Maße.....	47
Abbildung 29: Ergebnisse der Integration der phänologischen Maße der GeoMLU.....	48
Abbildung 30: Variablenwichtigkeit ausgedrückt durch den mittlerer Genauigkeitsverlust in % für die ausschließliche Verwendung der phänologischen Maße zur Klassifikation.....	50
Abbildung 31: Mittlerer Genauigkeitsverlust in % unter Berücksichtigung der phänologischen Maße des UFZ für 2011	50
Abbildung 32: Variablenwichtigkeit der Klassifikationsfeatures für die Verwendung aller Features. MeanDecreaseAccuracy gibt an wie viele Objekte im Mittel falsch klassifiziert werden würden, wenn man das Feature nicht berücksichtigt. Hinweis: ts =time step, X = Indizes GeoMLU.....	51
Abbildung 33: Darstellung der Ergebnisvisualisierung des Analysewerkzeugs „MELanGe“ nach Implementierung der Ausgabe eines Maßes der räumlichen Unsicherheit.	53
Abbildung 34: Illustration der mittleren klassenspezifischen Genauigkeit für die untersuchten Stratenkombinationen. Im Boxplot dargestellte Werte sind Minimum, Maximum, 25%- und 75-Quantil sowie Median der klassenspezifischen Genauigkeit.....	58
Abbildung 35: Boxplotdarstellung der Analyse des Einflusses auf die Klassifikationsgenauigkeit (Overall accuracy (links) und f-measure ausgewählter Landnutzungsklassen: Winterweizen (Mitte) und Gerste (rechts) im Jahr 2011 für das UG Mitteldeutschland/Harz. Datengrundlage: 700 Referenzobjekte, die entweder zufällig, proportional zur Klassenhäufigkeit oder stratifiziert selektiert wurden. Wiederholung der Modellläufe: 10.	58
Abbildung 37: Histogramm der zwischen Aussaat und beobachtetem Beginn der Gelbreife akkumulierten effektiven Temperaturen.....	63
Abbildung 38: Modellierter Eintrittstag und Kriging-Standardabweichung der Phase Gelbreife 2011 (Gerstmann et al. 2016).....	64
Abbildung 39: Klassenspezifische Histogramme des optierten Indexes für die Trennung von Winterweizen und Wintergerste am 4. Juni 2014.....	68
Abbildung 40: Optimierter Index (oben) und NDVI (unten) für ausgewählte Testfelder.....	68
Abbildung 41: Trennbarkeitsprofil für die Unterscheidung Von Wintergerste und Winterweizen für die Jahre 2010 - 2015 im UG Harz.....	70
Abbildung 42: Trennbarkeit / Overall classification accuracy für die spektrale Trennung von Winterweizen von allen anderen Zielklassen im Untersuchungsgebiet Harz auf Basis einer RapidEye-Zeitreihe von 2010 - 2015. Ausgewählte Bänder für optimierte Spektrale Maße (oben), beste 2-Band-Ratio (Mitte) und bester etablierter Index (unten), jeweils pro Jahr.....	72
Abbildung 43: Optimierter Index für die Trennung von Winterweizen von allen anderen Zielarten für die RapidEye-Kachel 3262922 am 06. Juni 2011.....	73
Abbildung 44: Bänder des optimalen Indexes sowie bester etablierter Index und zugehörige <i>Overall classification accuracies (OA)</i> für die Unterscheidung von Winterweizen und allen anderen Zielarten auf Grundlage der Sentinel-2-Zeitreihe für 2016.....	74

Abbildung 45: Zeitreihen verschiedener Sensoren abgeleitete Trennbarkeitsprofile und phänologische Entwicklungsstadien für Winterweizen (oben) und Winterraps (unten) für die Jahre 2010 – 2015 im UG Harz und 2010 – 2012 im UG Demmin.....	77
Abbildung 46: Optimale Klassifikationszeitfenster und phänologische Indikatorphasen.....	79
Abbildung 47: Semantische Vernetzung der PhenoS-Geodienste in einem Drupal- gestützten Web Content Management System (phase.geo.uni-halle.de).....	83
Abbildung 48: Modulare Konzeption der PhenoS-Geodienste zur Datenarchivierung und Analyse	84
Abbildung 49: Beispiel zur Geodatensuche im DCLIGHT4G-Metadatenkatalog des Projektes PhenoS.....	85
Abbildung 50: Automatisierte Prozessierung der PHASE- Eingangsdaten zu Wetter und Phänologie	86
Abbildung 51: Workflow zur automatisierten Datenprozessierung und Analyse des PHASE- Modells innerhalb von R-Phase Modeler und PHASE Analyser.....	87
Abbildung 52: Inhalt und Funktionen der ADAK-Wettervisualisierungen von Stationen der MLU im Mitteldeutschen Trockengebiet	88
Abbildung 53: Suchapplikationen und WMS-Viewer innerhalb der PHASE-Kartendienste	89
Abbildung 54: Eigenschaften der PHASE Geodienste (Tags)	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modellierte phänologische Stadien der ausgewählten landwirtschaftlichen Kulturen. Die entsprechenden Stadien nach DWD IDs sind in Klammern angezeigt.....	22
Tabelle 2: Angepasste (optimierte) Parameter für letztendlich ausgewählte Modellvarianten, phänologische Stadien und landwirtschaftlichen Kulturen. a1 - a4 sind Skalierungsparameter, T*,2 Minimum/ Optimum/Maximum Temperaturwerte für den Inhibitor (wachstumshemmend) und T*,3 Minimum/ Optimum/Maximum Temperaturwerte für den Promoter (wachstumsfördernd).	23
Tabelle 3: Validierung der simulierten phänologischen Stadien anhand der entsprechenden Beobachtungen mit verschiedenen statistischen Maßen, wie dem mittleren absoluten Fehler (MAE), dem Pearson Korrelationskoeffizient (R2) und der Wurzel der mittleren quadrierten Fehler (RMSE)	24
Tabelle 4: : Die phänologischen Stadien verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen, die mit entsprechenden extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten abgeglichen wurden.....	26
Tabelle 5: Die iterativ kalibrierten 'sliding period' und Schwellenwerte (anhand von Felddaten von 2010-2014) für alle verwendete Methoden: Savitzky-Golay (SG), Lineare Interpolation (Linear), Fast Fourier Transformation (FFT) und Spline Interpolation (Spline). d und m stellen den Grad polynomiauen Fits dar und die mittlere Breite des sog. moving window. s ist die Glättungsintensität von FFT.....	28
Tabelle 6: Die phänologischen Stadien verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen, die mit entsprechenden extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten abgeglichen wurden.....	29
Tabelle 7: Die iterativ kalibrierten 'sliding periods' und Schwellenwerte (anhand von Felddaten von 2010-2014) für alle verwendete Methoden: Savitzky-Golay (SG), Lineare Interpolation (Linear) und Fast Fourier Transformation (FFT). d und m stellen den Grad polynomiauen Fits dar und die mittlere Breite des sog. moving window. s ist die Glättungsintensität von FFT.....	30
Tabelle 8: Zielklassen getrennt nach Untersuchungsgebieten	35
Tabelle 9: Ausgewählte Klassifikationsmerkmale (spektrale Indizes und Reflektanzen) für RapidEye-Daten.	37
Tabelle 10: Tage mit wolkenfreien Aufnahmen, die für die Klassifikation im Untersuchungsgebiet Mitteldeutschland der Jahre 2011 - 2015 (RapidEye) und 2016 (Sentinel-2) verwendet wurden.....	39
Tabelle 11: Darstellungen der Tage mit wolkenfreien Aufnahmen (Markierung) nach Tabelle 10 in einem Monatsraster zur besseren Interpretation. Die Einheiten sind Viertel-Monate.....	39
Tabelle 12: Gesamtklassifikationsgenauigkeit (OA) aller berechnet Jahre für das UG Mitteldeutschland aufgelistet nach der Anzahl der verwendeten Zeitschnitte. Aufgeführt sind jeweils die beste und die durchschnittliche OA. Unterschiedene landwirtschaftlichen Klassen: Kartoffel, Mais, Raps, Wintergetreide und Sommergetreide.....	40
Tabelle 13: Integrierte phänologische Maße des UFZ.....	42
Tabelle 2-14:Gesamtklassifikationsgenauigkeiten (OA) der Klassifikationen nur mit spektralen Merkmälern, mit spektralen und phänologischen Maße, mit ausschließlich	

phänologischen Maßen, mit spektralen Merkmalen, mit spektralen und optimierten Indizes und nur mit optimierten Indizes. Unterschieden in 6 landwirtschaftliche Klassen: Kartoffel, Mais, Raps, Zuckerrüben, Winter- und Sommergetreide.....	43
Tabelle 15: Gesamtklassifikationsgenauigkeiten (OA) der Klassifikationen nur mit spektralen Merkmalen, mit spektralen und phänologischen Maße, mit ausschließlich phänologischen Maßen, mit spektralen Merkmalen, mit spektralen und optimierten Indizes und nur mit optimierten Indizes. Unterschieden wurde in 11 landwirtschaftliche Klassen: Kartoffel, Mais, Raps, Zuckerrüben, Wintergerste, –weizen und –roggen, sowie Sommerhafer, –hartweizen, -gerste und –weizen.	49
Tabelle 16: Ergebnisse der Klassifikationsgenauigkeit der Klassen Kartoffeln und Sommerhartweizen berechnet nur mit spektralen Indizes und mit optimierten Indizes für das Jahr 2011 im UG Mitteldeutschland.....	52
Tabelle 17: Eingabefeatures für die RF-Klassifikation, inkl. der angepassten Formeln zur Berechnung der Sentinel-2 spezifischen Indizes.	54
Tabelle 18: Verwendete Straten im UG Mitteldeutschland/Harz: Bodentyp, Schlaggröße und Landnutzung.	56
Tabelle 19: Ausgewählte Straten für weitere Analysen zum Einfluss des Naturraums auf die Modellergebnisse.	57
Tabelle 20: Übersicht über die Zielklassen im Projekt PhenoS sowie Verfügbarkeit phänologischer Beobachtungen.....	61
Tabelle 21: Vergleich der mit den Modellen PIM und PHASE in der aktuellen Version sowie in der Version zu Projektbeginn erzielten Genauigkeitsmaße.	65
Tabelle 22: Vergleich der Klassifikationsgenauigkeiten für die Clusterung von I_{opt} und I_S	69
Tabelle 23: Zeitpunkt der höchsten Trennbarkeit je Jahr und korrespondierende phänologische Phasen	70
Tabelle 24: Für das UG Harz zur Verfügung stehende Sentinel-2-Daten für 2016.....	73
Tabelle 25: Optimaler Aufnahmezeitpunkt für die Trennung der einzelnen Zielarten mit Sentinel-2-Daten sowie optimaler Index mit Overall Classification Accuracy (OA), beste Band- Ratio und bester etablierter Index.	75
Tabelle 26: Zeiträume höchster spektraler Trennbarkeit und korrespondierende phänologische Phasen sowie mittlere und maximale Genauigkeit und Verhältnis zur Bestimmung des optimalen Zeitraums je Fruchtart. Der optimale Zeitraum ist fett hervorgehoben.....	78
Tabelle 27: Anzahl phänologischer Stationen mit mindestens einer gemeldeten Beobachtung je Land, Jahr und Fruchtart in der PEP725-Datenbank. Stand: 7.11.2016. AT – Österreich, BA – Bosnien-Herzegowina, CZ – Tschechische Republik, DE – Deutschland, ES – Spanien, HR – Kroatien, ME – Montenegro, SK – Slowakei.....	82
Tabelle 28: Für die Web-Variante des PHASE-Modells verwendete Werte für die Basistemperatur	86

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Der Bedarf an aktuellen räumlichen Daten zur Landnutzungsklassifikation steigt für vielfältige Anwendungen stetig. Mit den neuen Daten aktueller Sensorentwicklungen erhöhen sich die Möglichkeiten der operationellen Landnutzungsklassifikation auch von agrarisch geprägten Räumen erheblich. Die Daten der Sentinel-Familie, insbesondere der Sentinel-2A-Daten mit einem bisher einmaligen Verhältnis von spektraler, räumlicher und zeitlicher Auflösung und der ESA-Copernicus Produkte und Services stellen zukunftsorientierte Entwicklungen für die Operationalisierung der Fernerkundung dar. Durch die hohe zeitliche Auflösung der Daten besteht erstmals die Möglichkeit auch für großmaßstäbige Anwendungen phänologische Aspekte in die Auswertung einzubeziehen. Dies betrifft die Kenntnisse des phänologischen Entwicklungszustandes zum Aufnahmzeitpunkt als auch phänologische Indikatoren während der gesamten Vegetationsperiode. Beide Parameter stehen im engen Zusammenhang mit den klassenspezifischen Spektralcharakteristika. Die Detektion optimaler phänologischer Zeitfenster ermöglicht eine kosten- und recheneffiziente Klassifikation. Dabei ist es erforderlich, für eine einzelne Zielklasse unterschiedliche phänologische Entwicklungsstufen zu berücksichtigen, die aufgrund standortrelevanter Faktoren oder des Managements auch innerhalb einer Aufnahmeabdeckung liegen können. Damit besteht erstmals die Möglichkeit, spektral sehr ähnliche Zielklassen zu differenzieren und eine neue Klassifikationsgüte zu erhalten.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projektvorhaben folgende Hauptziele:

- Phänologische Strukturierung (Phänologische Phasen, Vegetationszustände) von zeitlich hoch aufgelösten Fernerkundungsdatensätzen (Sentinel-2A, RapidEye),
- Untersuchung von Zusammenhängen zwischen phänologischen Phasen bzw. Entwicklungszuständen und der Optimierung von Feldfruchtarten sowie
- Kopplung der flächenhaften Prognoseergebnisse phänologische Phasen aus den verschiedenen phänologischen Modellen und den Entwicklungen der Feldfruchtarten
- Integration aller Teilergebnisse in einen Klassifikationsrahmen
- Test des Einflusses verschiedener zusätzliche Referenzdaten auf die Klassifikationsgüte
- Umsetzung und Bereitstellung aller Algorithmen als *Open Source*-Lösungen innerhalb der Programmierumgebung R
- Umsetzung der Daten, Modelle, Ergebnisse in einer Web-Anwendung mit dem Ziel einer Deutschland-weiten räumlichen Vorhersage von phänologischen Phasen und Zuständen und eine Zielklassen-spezifische Auswahl geeigneter Satellitenbildszenen.

Vom Projektpartner GeoMLU wird das phänologische Modell Phase weiter entwickelt, um die Güte der räumlichen Prognosen phänologischer Phasen zu verbessern. Für die Zeitreihen multispektraler Satellitenbilddaten (RapidEye, Sentinel-2A) werden spektrale und phänologische Merkmale zur Trennbarkeit von Feldfruchtarten definiert. Abgeleitet werden optimierte Zeitfenster für die Klassifikation der Fruchtarten. Die Entwicklung und Umsetzung des Webinterfaces PhenoS mit vielfältigen Abfrage- und Visualisierungstools gehört ebenso wie die Gesamt-Projektkoordination zu den Aufgaben der Uni Halle.

Dem Projektpartner GeoJMU oblag die Konzeption und Umsetzung eines Klassifikationsrahmens zur Klassifikation landwirtschaftlicher Flächen. Fokus des Teilprojektes war die Verbesserung der Klassifikation durch die Nutzung phänologischer Merkmale und optimierter spektraler Indizes. Dabei wurden

vier Teilziele verfolgt, von denen das erste mit der Erstellung einer Programmumgebung zur Klassifikation multi-temporaler optischer Datensätze (Skala RapidEye, Sentinel-2) war. Des Weiteren erfolgte eine systematische Untersuchung aller Eingangsdaten und deren Auswirkungen auf die Genauigkeit. Drittes Ziel war die Ermittlung statistisch relevanter Zeitschnitte für die Klassifikation. Abschließend erfolgte die statistische Untersuchung von Auswirkungen der verschiedenen naturräumlichen Ausstattungen auf die Klassifikationsgenauigkeiten und räumliche Verteilung der Klassenentscheidungen.

Vom Projektpartner UFZ sollten Methoden entwickelt werden, um phänologische Maße aus multispektralen, hochauflösenden Satellitendaten zu extrahieren, die anschließend als zusätzliche Variable in die multi-temporale Landnutzungsklassifikation einfließen sollen. Weiterhin oblagen dem Projektpartner die Akquise von Fernerkundungsdaten sowie der Bezug von eventuell benötigten Zusatzdaten. Als dritter Fokus dieses Teilprojektes sollte das bereits existierende phänologische Modell PIM, welches für die Anwendung in Waldbeständen konzipiert wurde, auf landwirtschaftliche Fruchtarten übertragen werden.

Um die Klassifikationsgenauigkeiten verbessern zu können, die mittels des vom Projektpartner GeoJMU entwickelten Klassifikationsrahmens erzielt werden, stand als zweites Hauptziel des Teilprojektes die Entwicklung neuer spektraler Indizes im Vordergrund. Hierfür steht der spektrale Bereich des *Red-Edge* im Fokus der Untersuchungen, da dieser besonders sensitiv für phänologisch bedingte Unterschiede des pflanzenphysiologischen Zustandes ist (Horler et al. 1983; Ramoelo et al. 2012). Die Entwicklung wird durch die einzigartige spektrale Auflösung des Sentinel-2-Sensors im *Red-Edge*-Wellenlängenbereich begünstigt. Die bestimmten spektralen Indizes sollen anschließend in langjährige Trennbarkeitsanalysen verschiedener Fruchtarten einfließen, um Zeiträume einer hohen zu erwartenden Klassifikationsgenauigkeit eingrenzen zu können. Die spektralen Maße werden für verschiedene Sensorsysteme wie RapidEye, MODIS und hyperspektraler Flugzeugscannerdaten getestet.

Die daraus abgeleiteten Methoden und Ergebnisse sollen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden um eine kontinuierliche Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Satellitendaten bereitzustellen. Dafür, und um die Nachvollziehbarkeit der verwendeten Methoden, Modelle und Verfahren zu gewährleisten, sollten eine Geodateninfrastruktur und ein webbasiertes Prognose- und Auskunftssystem entwickelt werden welches quelloffen und OGC-standardkonform konzipiert werden sollte.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der Projektpartner GeoJMU verfügt über einen großen Erfahrungsschatz zur Integration phänologischer Parameter unterschiedlicher Nutzungsarten und der Landnutzungsklassifikation mittels multisensoraler Fernerkundungsdaten unterschiedlicher geometrischer, temporaler und spektraler Auflösung. Darüber hinaus wurde in dem Vorgängerprojekt DeCover (FG Geofernerkundung) der Prototypen des phänologischen Modells PHASE entwickelt. Außerdem verfügt die Fachgruppe über langjährige Erfahrungen für webbasierte Visualisierung und Aufbau von Portalen für Projekte.

Die vom Projektpartner GeoJMU eingebrachten Voraussetzungen umfassen die Entwicklung von Klassifikationsverfahren in landwirtschaftlich genutzten Räumen sowie in der Ableitung von phänologischen Mustern auf Basis mittelaufgelöster Satellitendaten, beispielsweise im Rahmen des Projektes MSAVE¹.

¹ msave.de

Der Projektpartner UFZ, Department Landschaftsökologie, führt die Ableitung phänologischer Zustände von Vegetation auf großen Skalenebenen operationell auf Basis von MODIS- und AVHRR-Daten durch. Weiterhin existierten intensive Vorarbeiten für phänologische Modellierung, die im phänologischen Modell PIM einflossen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Aufteilung des Gesamtprojektes in Teilprojekte ist aus Abbildung 1 ersichtlich, auf die Inhalte der Arbeitspakete wird im Folgenden kurz eingegangen.

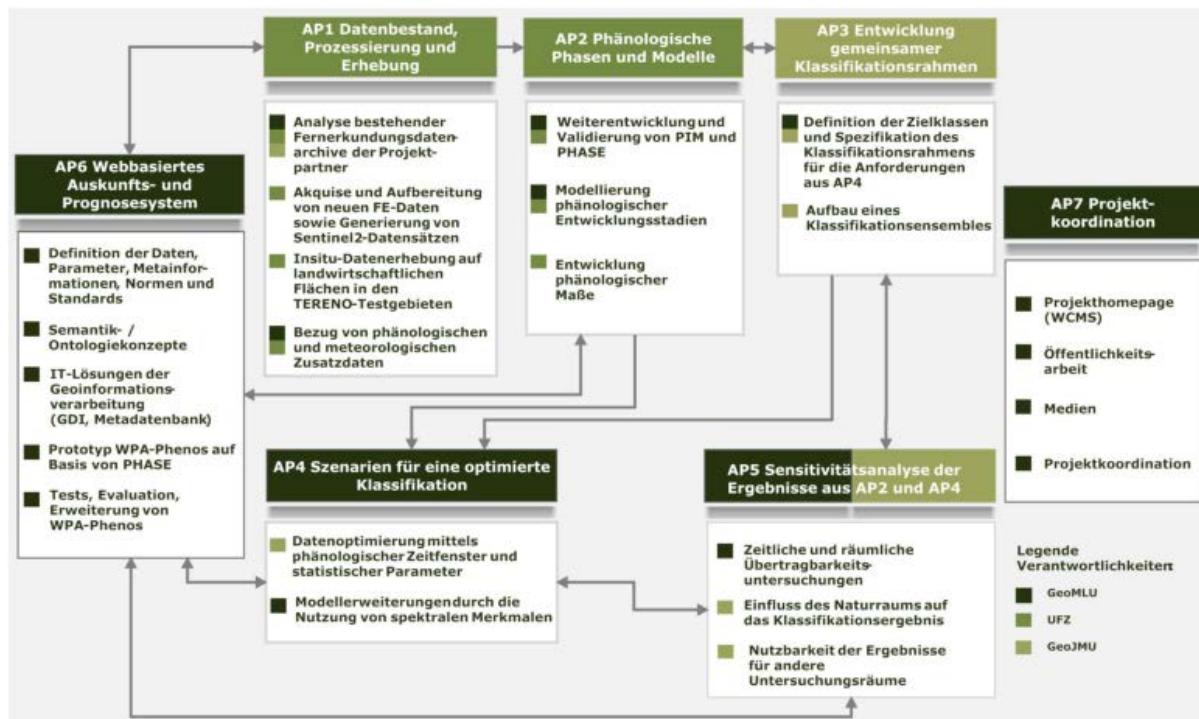


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur des Projektes Phenos

Arbeitspaket 1 (Datenbestand, Prozessierung und Erhebung) wurde größtenteils vom Projektpartner UFZ bearbeitet und umfasste den Bezug von Satelliten- und Zusatzdaten sowie Feldarbeiten. Hierbei sollten aus Zeitreihen hyperspektraler AISA-Dual-Daten Sentinel-2-Daten simuliert werden, bis reale Sentinel-2-Daten zur Verfügung stehen. Aufgrund technischer, meteorologischer und institutioneller Probleme konnte jedoch nur eine AISA-Aufnahme zu einer Sentinel-2-Szene weiterverarbeitet werden. Hauptdatengrundlage für die im Projekt bearbeiteten Fragestellungen waren RapidEye-Szenen der Jahre 2010 bis 2015 im Untersuchungsgebiet Harz, die einheitlich mit der Software ATCOR vom Projektpartner UFZ atmosphärisch korrigiert wurden.

Arbeitspaket 2 (Modellierung phänologischer Phasen und Extraktion phänologischer Maße) wurde von den Projektpartnern GeoMLU und UFZ bearbeitet. Dabei wurden in AP 2.1 die unterschiedlich komplexen, bereits existenten phänologischen Modelle PHASE (GeoMLU; Möller et al., 2011) und PIM (UFZ; Schaber & Badeck, 2003) weiterentwickelt bzw. auf die Anwendung für landwirtschaftliche Kulturen übertragen. In AP 2.1 wurden vom Projektpartner UFZ Methoden entwickelt, um aus multitemporalen MODIS- und RapidEye-Daten phänologische Maße zu extrahieren. Zum Projektende wurden die entwickelten Verfahren auf die Sentinel-2-Zeitreihe des Jahres 2016 übertragen.

Im vom Projektpartner GeoJMU bearbeiteten Arbeitspaket 3 (Entwicklung eines gemeinsamen Klassifikationsrahmens) wurden die Anforderungen und Zielklassen des Klassifikationsrahmens definiert (AP 3.1) sowie die Implementierung, Tests und Validierung des Algorithmus vorgenommen (AP 3.2).

Das vom Projektpartner GeoMLU und GeoJMU bearbeitete Arbeitspaket 4 (Szenarien für eine optimierte Klassifikation) umfasste den Test verschiedener Einflussfaktoren wie Datendichte, Klassentiefe und Sensorauflösungen sowie die Integration phänologischer und spektraler Charakteristika auf das Klassifikationsergebnis (AP 4.1, Zuständigkeit: GeoJMU). Im Arbeitspaket 4.2 wurden vom Projektpartner GeoMLU ein Verfahren zur automatisierten Bestimmung von spektrale, red-edge-basierten Indizes auf Basis von RapidEye-Daten entwickelt und auf Sentinel-2-Daten übertragen. Weiterhin wurden phänologische Zeitfenster bestimmt, in denen die Trennung der Zielarten mit den höchsten zu erwartenden Klassifikationsgenauigkeiten möglich ist.

In Arbeitspaket 5 wurde von den Projektpartnern GeoMLU und GeoJMU die Sensitivität des Verfahrens analysiert. Hierbei erfolgten Untersuchungen zur Modellrobustheit sowie des Einflusses des Naturraums auf die Klassifikation (GeoJMU). Die Übertragbarkeit auf andere europäische Untersuchungsgebiete wurde vom Projektpartner GeoMLU theoretisch diskutiert.

Arbeitspaket 6, welches in Kooperation vom Projektpartner GeoMLU und dem Unterauftragnehmer UMGEODAT bearbeitet wurde, erfolgte der Aufbau einer Geodateninfrastruktur sowie eines Webbasierten Prognose- und Auskunftssystem, in welchem die wichtigsten Projektergebnisse in Form von frei verfügbaren Geodiensten der Öffentlichkeit zur Verfügung stehen.

Arbeitspaket 7 umfasste die Projektkoordination sowie Aufbau und Pflege einer gemeinsamen Projekthomepage und wurde vom Projektträger GeoMLU in Zusammenarbeit mit dem UA Umgeodat bearbeitet. Im Vordergrund der Arbeiten standen webbasierte IT-Lösungen (OGC, ISO), die eine interoperative Nutzung und innovative Abfrage- Visualisierungstools umfassen.

Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.3.1 Modellierung von phänologischen Entwicklungsstadien

Variationen im Zeitpunkt des Auftretens von phänologischen Phasen lassen sich sowohl auf langfristige als auch witterungsbedingt unterschiedlich ausgeprägte Wachstumsfaktoren zurückführen. Daher kann die phänologische Entwicklung als Indikator für diese Parameter verstanden werden und bedingt dadurch den Bedarf für flächendeckend modellierte phänologische Phasen. Überblickshafte Darstellungen über etablierte existierende Modellierungsansätze geben Hänninen & Kramer (2007) und Menzel (2007).

Der etablierte Temperatursummen- oder *Growing-Degree-Days*-Ansatz wurde bereits von Réaumur (1735) vorgestellt und bis heute kontinuierlich weiterentwickelt (u.a. Sitch et al. 2003, Miller et al. 2001, McMaster & Wilhelm 1997). Das phänologische Modell PHASE, welches ebenfalls auf Temperatursummen basiert, wurde erstmals von Möller et al. (2011) vorgestellt. In drei Teilmodellen wurden aus Beobachtungsdaten deutschlandweite Temperaturen mittels *Random-Forest*-Regression modelliert. Aus diesem Datensatz wurden in Modell 1 stations- und phasenspezifische Temperatursummen extrahiert, die in Modell 2 zu stationsunspezifischen, phasenspezifischen Temperatursummen über *Random-Forest*-Regression transformiert wurden aus denen der Eintrittstag der zu bestimmenden

phänologischen Phase bestimmt wird (Modell 3). Der Starttag der Temperatursummierung wird durch eine Optimierung mit dem Ziel der Minimierung des Modellfehlers bestimmt.

Als Bezugseinheiten wurden durch Segmentierung des SRTM-DGM bestimmte Reliefeinheiten oder ein $20 \times 20\text{ km}$ -DGM verwendet.

1.3.2 Objektbasierte Klassifikation landwirtschaftlicher Nutzung mit Satellitenbilddaten

Zu Projektbeginn herrschten bereits Erkenntnisse zum Mehrwert multitemporaler Daten gegenüber monotemporalen Verfahren bei der Klassifikation optischer Fernerkundungsdaten, sei es für Kartierungen der Landbedeckung allgemein, oder zur spezialisierten Abgrenzung landwirtschaftlicher Nutzflächen (Engvall et al., 1977). So lassen sich in den Satellitendaten verschiedene Ackerfrüchte erst durch die Hinzunahme des Jahresgangs der Bodenbedeckung erkennen. Spektrale Ähnlichkeiten von Feldfrüchten sind unabhängig vom Untersuchungsmaßstab in mono-temporalen Klassifikationen schwer zu trennen (Cord et al., 2010; Mueller-Warrant et al., 2011). In gut strukturierten Landschaften haben sich für landwirtschaftliche Anwendungen objektbasierte Ansätze durchgesetzt (De Wit & Clevers, 2004; Lobo et al., 1996; Turker & Arikan, 2005), weil man auch die Variabilität eines Feldobjekts, das unter einer Nutzung steht, besser berücksichtigen kann. Die Wahl des *Random Forest* (Breiman, 2001) als Klassifikator basierte auf den Vorkenntnissen, dass das vielfach eingesetzte und erprobte nicht-parametrische Klassifikationsverfahren mit großen Merkmalsräumen umgehen kann. Dies war aufgrund der hohen Datenverfügbarkeit ein wichtiges Kriterium bei der Verfahrenswahl.

1.3.3 Kopplung von Spektralindex-Profilen und Wachstumsstadien für Landnutzungsklassifikationen

Die Zusammenhänge zwischen multitemporalen Vegetationsindex-Profilen und Pflanzenphänologie wurden bereits seit einigen Dekaden untersucht (Odenweller & Johnson, 1984) und weiterentwickelt. Dabei wurden in den letzten Jahren die jahreszeitlichen Unterschiede in den fruchtartenspezifischen NDVI-Werten in multitemporalen Datensätzen für eine Klassifikation der entsprechenden Landnutzungstypen verwendet (Förster et al. 2012, Boschetti et al. 2009, White et al. 2009). Viele phänologische Phasen lassen sich auch aus Fernerkundungsdaten ableiten. Dies ist beispielsweise für die Phasen Ergrünen, Erblühen, Ährenschieben und beginnende Reife möglich.

Über Beobachtungsdaten lassen sich jedoch wesentlich genauer beschreibende Sub-Phasen mit Spektralindex-Profilen kombinieren. Möller et al. (2012) präsentierten hierfür einen Ansatz, bei dem modellierte phänologische Phasen mit fruchtartspezifischen NDVI-Kurven überlagert werden. Über die NDVI-Profile kann mittels der Kolmogorov-Smirnov-Distanz, des maximalen Abstandes zwischen den empirischen kumulativen Verteilungsfunktionen der Zielarten, der Zeitpunkt und die phänologische Phase der maximalen spektralen Unterscheidbarkeit bei Nutzung einer RapidEye-Zeitreihe zweier Zielarten bestimmt werden.

1.3.4 Aufbau von webbasierten geowissenschaftlichen Portalen

Sowohl der Projektpartner GeoMLU als auch der Unterauftragnehmer UMGEODAT verfügen über intensive Erfahrung im Aufbau von Geowissenschaftlichen Portalen zur Wissensvermittlung und Datenerfassung, die dem aktuellen Entwicklungsstand entsprechen.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projektes kam es zur Zusammenarbeit mit Dr. Markus Möller und dem Forschungsprojekt *DynaC-Zeitliche und räumliche Dynamisierung des RUSLE-C-Faktor* (FKZ 50 EE1230, Uni Halle, FG Geofernerkundung). Dies betraf vor allem die Weiterentwicklung des PHASE-Modells sowie die Evaluation der Nutzungsmöglichkeiten von PHASE für andere Anwendungen außerhalb des Projektes PhenoS. Weiterhin sollten die für das Projekt DynaC (FG Geofernerkundung) aus hyperspektralen AISA-Dual-Daten simulierten Sentinel-2-Daten auch innerhalb von PhenoS verwendet werden. Ebenso flossen wesentliche Entwicklungen aus der Phase-Modellentwicklung (Projekt DeCover, FG Geofernerkundung, GeoMLU) direkt in das Dynac-Projekt ein, dass allerdings schon 2015 endete.

Durch die Kooperationen kam es außerdem zum Kontakt mit Detlef John (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt), durch den die anonymisierten InVeKoS-Schlagdaten für das Untersuchungsgebiet Harz kostenfrei für das Projekt PhenoS bereitgestellt werden.

Mit dem Projekt *Assessing and Monitoring the Impacts of Genetically Modified Plants on Agro-Ecosystems* (AMIGA), in Person Dr. Stephan Härtel, Universität Würzburg, bestand Kontakt zur Abschätzung des Potentials der in PhenoS entwickelten Methoden auf andere europäische Untersuchungsgebiete. Leider konnte aufgrund der Tatsache, dass im AMIGA-Geländeprogramm die für PhenoS nötigen Informationen nicht erhoben wurden, keine Kooperation stattfinden.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 UFZ

2.1.1.1 AP 1 Datenbestand Prozessierung und Erhebung

AP 1.1 Akquirierung neuer Fernerkundungsdaten

RapidEye

Insgesamt wurde 411 RapidEye-Szenen im Zeitraum 2009-2015 akquiriert (Abbildung 2). Die Szenen decken Teile des Harzes, der Magdeburger Börde, den Raum Halle/Leipzig und das Thüringer Becken ab (Abbildung 3). Die Daten weisen eine nominelle räumliche Auflösung von 5/6,5 m mit 5 spektralen Kanälen auf (Rot, Grün, Blau, Red-Edge und NIR) und liegen für den genannten Zeitraum etwa alle 6 Wochen während der Vegetationsperiode vor.

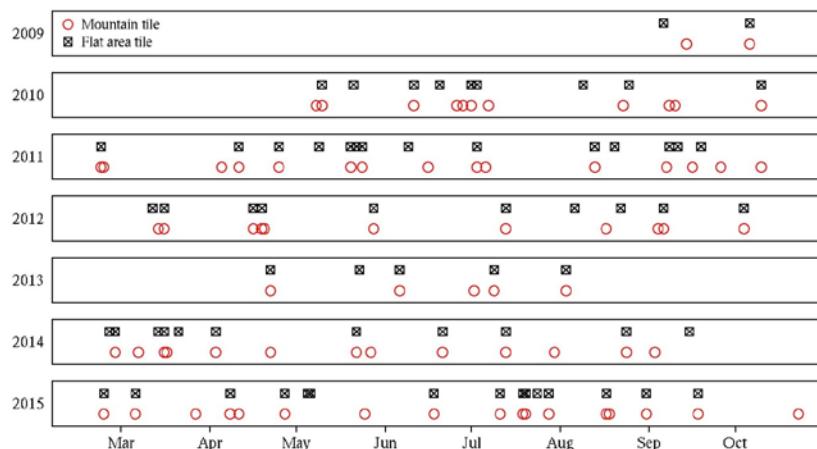


Abbildung 2: Sämtliche Aufnahmedaten für 2 ausgewählte RapidEye Szenen zwischen 2009-2015. Die Kachel „Mountain“ (Katalog ID: 3262921) deckt einen Teil des Harzgebietes und die Kachel „Flat area“ (Katalog ID: 3262922) Teile der Magdeburger Börde ab

Aufgrund der großen Datenmengen wurde eine automatisierte Entpackungsroutine für RapidEye-Daten entwickelt, respektive eine automatisierte Metadatenanalyse (Wolkenbedeckung etc.). Der Großteil der RapidEye Szenen konnte über eine automatisierte Atmosphärenkorrektur (ATCOR 2/3, „batch mode“) prozessiert werden. Szenen mit einer Wolkenbedeckung von mehr als 25% mussten weiterhin manuell prozessiert werden, da Standardeinstellungen für das sog. „de-shadowing“ nicht praktikabel sind und auch nicht automatisiert generiert werden können.

Zur Unterstützung der Atmosphärenkorrektur wurde eine Land-Wasser-Maske aus ATKIS-Daten generiert, da Wasserflächen von ATCOR z.T. fälschlicherweise als Schatten detektiert werden. Bei der Korrektur der Wolkenschatten lässt sich häufig ein NDVI-Anstieg bei geringer und eine NDVI-Abschwächung bei dichter Vegetationsbedeckung feststellen, der nur schwer verifiziert werden kann. Diese Unterschiede können auch in homogenen landwirtschaftlichen Flächen bis zu NDVI=0.2 betragen.

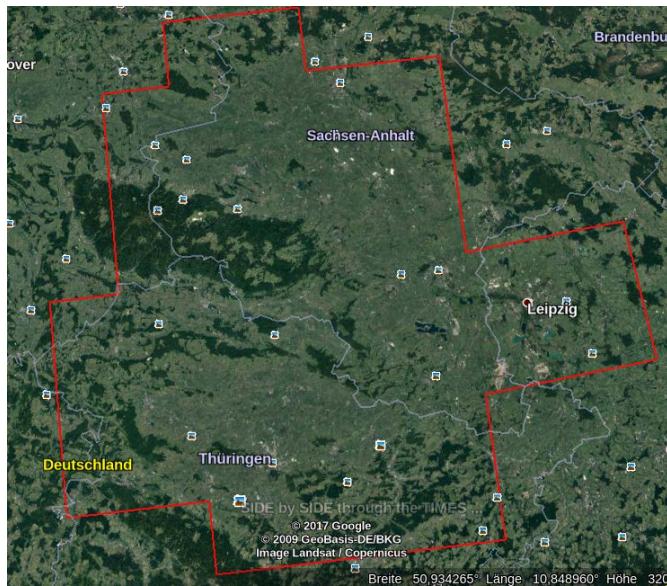


Abbildung 3: Akquirierte RapidEye Szenen (alle Kacheln im rot umrandeten Gebiet), die den Zeitraum September 2009 – Juni 2014 abdecken. Etwa alle 6 Wochen ist jeweils eine Szene im Zeitraum März – Oktober verfügbar.

Zur Validierung der Güte der Atmosphärenkorrektur wurde eine Datenbank aus spektralen Feldmessungen (Reflektanzen) aufgesetzt. Der Abgleich spektraler Feldmessungen (108 Messungen) mit ausgewählten korrigierten RapidEye Szenen ergab zusammenfasst: Räumlicher Versatz der beiden Datensätze < 1 Pixel, zeitlicher Versatz 0-14 Tage. Ca. 83% der abgeleiteten NDVI-Werte zeigen Differenzen < 0,1. ca. 15% Abweichungen zwischen 0,1 – 0,2, d.h. die überwiegende Mehrheit der Szenen konnte erfolgreich korrigiert werden. NDVI-Werte identischer Schläge bei überlappenden Szenen zeigen Abweichungen von NVDI < 0,01.

Der Datenbestand wurde mehrfach zur Erhöhung der räumlichen Abdeckung und zeitlichen Dichte aktualisiert.

MODIS

Tägliche Aqua-MODIS-Daten (Oberflächenreflektanzen, MYD09GQ, L2G, Collection 5) mit einer nominalen Auflösung von 231 m wurden für den Zeitraum 2009-2015 akquiriert (Kacheln h18v03 und h18v04). Das Produkt stellt 2 spektrale Kanäle bereit: Rot (620-670 nm) und NIR (841-876 nm), welche nachfolgend zur Berechnung des NDVI genutzt werden (s. Kapitel 0)

Zwecks verbesserten NDVI-Profil-Rekonstruktion in den Wintermonaten wurde das „MODIS daily snow product MYD10A1 Aqua L2G“ herangezogen (500 m räumliche Auflösung). Hier liegen Daten zwischen 2009 und 2014 vor, die auf 250 m disaggregiert wurden. Durch die Eliminierung von NDVI-Werten schneedeckter Oberflächen konnte eine robustere NDVI Zeitreihe generiert werden.

Das Umprojizieren und ggf. Mosaikieren sämtlicher MODIS-Daten erfolgte mit dem MODIS *Reprojection Tool* (MRT) im sog. „batch mode“.

AP 1.2 Simulation von Sentinel-2-Daten

Aufgrund der widrigen Witterungsbedingungen sind die hyperspektralen Befliegungen in den Untersuchungsgebieten erst im Sommer 2014 erfolgt. Zwei Hyperspektralbefliegungen vom Juli 2014 sind basierend auf Feilhauer, et al., 2013 zur Generierung von Sentinel-2-Daten eingesetzt worden. Die Befliegungen decken einen Großteil der durch die Projektpartner untersuchten landwirtschaftlichen Regionen ab.

Die Routine zur Aufbereitung der hyperspektralen Rohdaten wurde im Anschluss aktualisiert, um verbesserte Simulationsergebnisse erzielen zu können. Diesbezügliche Arbeiten wurden im Januar 2015 abgeschlossen und beinhalteten: 1) die radiometrische Korrektur der AISA-Rohdaten als eigene Routine inkl. „*jump correction*“; 2) eine Orthorektifizierung mittels der Software ParGe und 3) die Atmosphärenkorrektur mittel ATCOR 4. Als letzter Schritt erfolgte die Simulation der Sentinel-2-Daten basierend auf hyperspektralen Oberflächenreflektanzen (s. auch Abb. Abbildung 4: Simulierte Sentinel-2-Daten (10 m räumliche Auflösung, Bandkombination CIR) für das UG Harz‘):

$$\text{signal}_i = \left[2^{\text{rad}} \times \sum (\text{ref} \times \text{src}_i) \right]_{[1]}$$

wobei **signal**, das simulierte Sentinel-2 Signal in band **i** ist, **rad** die radiometrische Auflösung, **ref** von AISA aufgenommene Oberflächenreflektanz und **src**, die spektrale Ansprechfunktion von Band **i** von Sentinel-2 mit $\sum \text{src}_i = 1$ sind.

Die entsprechenden Daten stehen den Projektpartnern zur Verfügung. Die Atmosphärenkorrektur mit ATCOR 4 wurde im sog. „batch mode“ aufgesetzt. Letztendlich betrug die Rechenzeit (Korrekturen + Simulation) in etwa 1 Woche für sämtliche Flugstreifen im Harzgradient.



Abbildung 4: Simulierte Sentinel-2-Daten (10 m räumliche Auflösung, Bandkombination CIR) für das UG Harz‘

AP 1.3 Phänologische und spektrale Messungen/Beobachtungen

Für die Vegetationsperioden der Jahre 2014 und 2015 wurde im Untersuchungsgebiet Harzgradient (zwischen Harzgerode und Aschersleben) ein phänologisches Beobachtungsprogramm aufgesetzt. Dies beinhaltete eine nahezu wöchentliche Erhebung der phänologischen Daten nach BBCH (Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie) Nomenklatur in 41 landwirtschaftlich genutzten Schlägen mit den Anbaufrüchten Wintergerste, Winterweizen, Winterroggen, Winterraps, Mais und Zuckerrübe. Aus Zeitgründen liefen in dem topographisch weniger reliefierten Teilgebiet zwischen Aschersleben und Meisdorf diese Erhebungen wöchentlich (200 m NN, 35 Felder), während in dem sich anschließenden Aufstieg in den Harz nur etwa alle 3 Wochen Beobachtungen durchgeführt wurden (400 m NN, 6 Felder). Pro Feld und Beobachtung wurde ein BBCH-Code zugewiesen, außer bei extrem großen Schlägen, die mit mehreren Wuchsstadien belegt werden konnten (Abbildung 5). Zusätzlich wurde auch jeweils die Wuchshöhe ermittelt.

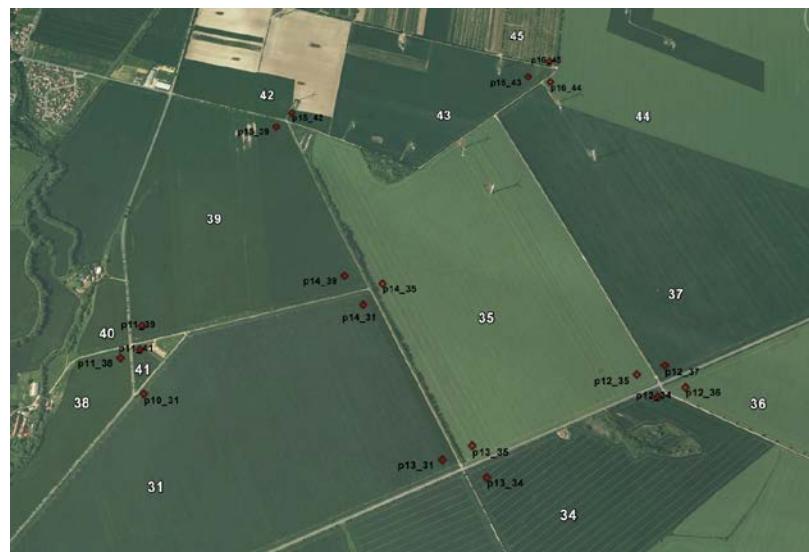


Abbildung 5: Teilausschnitt des Untersuchungsgebietes zwischen Aschersleben und Meisdorf (Google Earth Images), mit angezeigten Meßpunkten (rote Quadrate) und intern vergebenen Feldernummer (in weiß).

Die erhobenen Daten wurden sukzessive GIS-basiert aufbereitet (Abbildung 6).

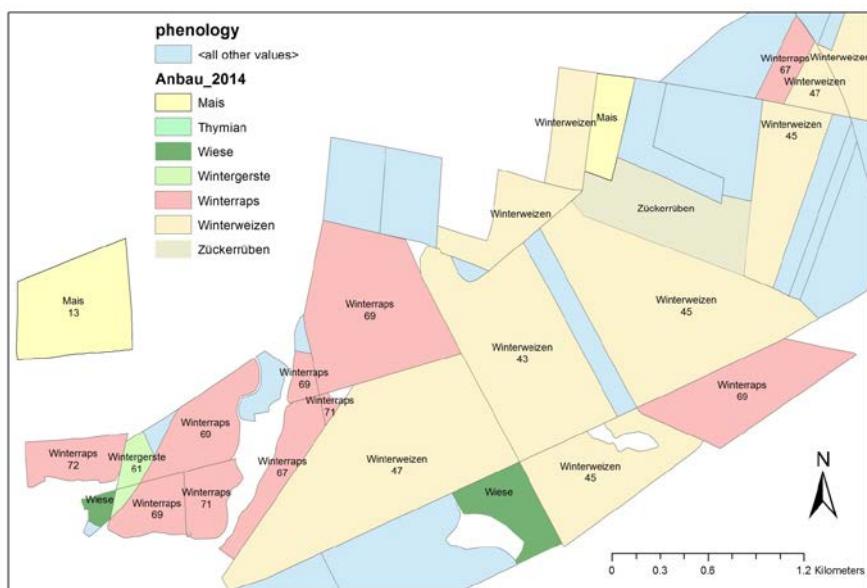


Abbildung 6: Teilausschnitt des Untersuchungsgebietes zwischen Aschersleben und Meisdorf mit den phänologisch untersuchten Anbaufrüchten nebst BBCH Code für einen Zeitschnitt. Blau unterlegte Felder wurden nicht beprobt.

Die Anzahl der Schläge variiert leicht zwischen 2014 und 2015 bedingt durch Fruchtwechselfolgen und einem Fokus auf flächengroße Schläge. Fast alle Kulturen litten 2015 unter extremen Trockenstress in den phänologischen Stadien 'Ährenschieben' und 'Blüte' mit z. Bsp. Auswirkungen auf die Wuchshöhe. Abbildung 7 zeigt eine Zusammenfassung der Feldkampagnen für das Jahr 2015.

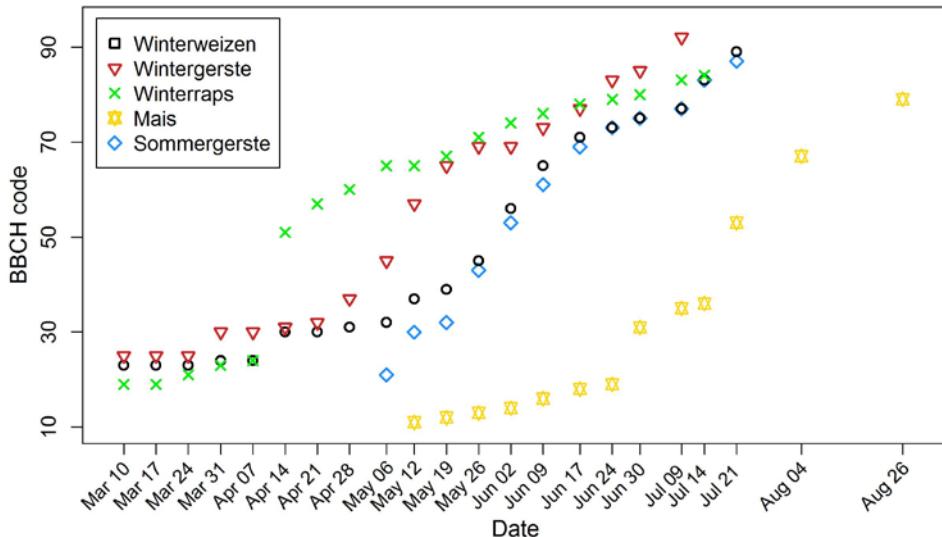


Abbildung 7: Phänologische Stadien der Feldbeobachtungen von 2015, insgesamt 37 Felder im Untersuchungsgebiet. Im Vergleich zu 2014 war die Vegetationsperiode aufgrund der Dürre im Frühjahr und Frühsommer deutlich kürzer.

AP 1.4 Phänologische und meteorologische Zusatzdaten

Tagesmitteltemperaturen von 1951-2012 konnten über den Deutschen Wetterdienst (DWD, WebWerdis) akquiriert und fehlerbereinigt werden. Phänologische Beobachtungen landwirtschaftlicher Kulturen des DWD wurden über die online-Datenbank PPODB (*Plant Phenological Online Database*, www.podb.de, Dierenbach et al., 2013) bis 2012 akquiriert, einschließlich einer vom DWD bereitgestellten Dokumentation zur Übertragung des BBCH-Codes in die vom DWD verwandte phänologische Nomenklatur.

2.1.1.2 AP 2.1 Die Modellierung phänologischer Entwicklungsstadien

Das sogenannte Promoter-Inhibitor-Modell (PIM) basierend auf der Arbeit von Schaber & Badeck, 2003 wurde zur Simulation phänologischer Phasen landwirtschaftlicher Kulturen eingesetzt. PIM konnte bereits erfolgreich im Kontext der Phänologie wildwachsender Pflanzen für Forschungsarbeiten genutzt werden. Modelltreiber sind Tagesmitteltemperaturen und Tageslänge. Nach erfolgreicher Anpassung an die Charakteristika landwirtschaftlicher Kulturen (z.B. Modellierung ab Tag der Aussaat) erfolgten erste Tests an verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen. Hier standen im Zeitraum 1951-2009 sowohl entsprechende phänologische Bodenbeobachtungen als auch tägliche Mitteltemperaturen vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung. Die täglichen Mitteltemperaturen wurden auf ein 1 km Raster (deutschlandweit) interpoliert.

Für 4 landwirtschaftliche Kulturen wurden 2-4 phänologische Stadien modelliert, da abhängig von der Kultur sowohl Stadien als auch Nomenklatur unterschiedlich sein können (s. Tabelle 1).

Die Modellierung jeder phänologischen Phase mit PIM erfordert als Eingabe das Datum des Initialzustandes, um die Akkumulierung des sog. Promoters (P) zu starten. Das zu modellierende Stadium ist bei P=1 erreicht. Räumlich laufen die Modellierungen für das gesamte Bundesgebiet.

Tabelle 1: Modellierte phänologische Stadien der ausgewählten landwirtschaftlichen Kulturen. Die entsprechenden Stadien nach DWD IDs sind in Klammern angezeigt

Kultur	Simulationsbeginn	Modelliertes Stadium	
Winterweizen Wintergerste	Aussaat	Auflaufen	(12)
	Auflaufen	Ährenschieben	(18)
	Ährenschieben	Gelbreife	(21)
Winterraps	Aussaat	Auflaufen	(12)
	Auflaufen	Vollreife	(22)
Zuckerrübe	Aussaat	Auflaufen	(12)
	Auflaufen	Geschl. Bestand	(13)
Winterroggen	Aussaat	Auflaufen	(12)
	Auflaufen	Schossen	(15)
	Schossen	Blüte	(5)
	Blüte	Gelbreife	(21)

Datenpräparation

Im Vorfeld zur Modellierung der phänologischen Phasen sind mehrere Schritte notwendig. Zuerst wird eine sogenannte kombinierte Zeitreihe aus den phänologischen Einzel-Beobachtungen erstellt, d.h. es werden die Beobachtungen von mindestens 5 räumlich nahe beieinander liegenden Stationen so kombiniert, dass eine ausreißerbereinigte, durchgehende Zeitreihe mit geringerer Varianz entsteht (Abbildung 8).

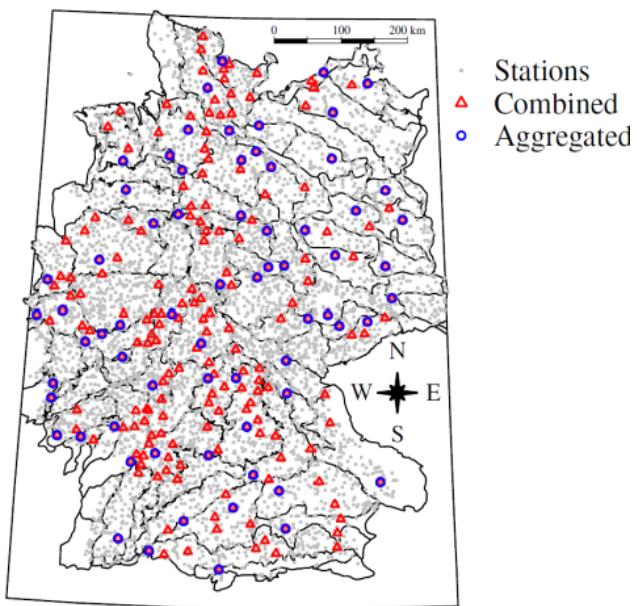


Abbildung 8: Phänologische Beobachtungsstationen (graue Dreiecke) in Naturraumgruppen (Schmithüsen & Meynen, 1962) sowie die entsprechenden kombinierten Zeitreihen (rote Dreiecke) und aggregierten Zeitreihen (blaue Punkte), die zum zur Modellanpassung verwendet wurde

Diese Daten werden nochmals aggregiert, d.h. es wird eine kombinierte Zeitreihe pro Naturraum generiert, um die Rechenzeit zu minimieren. Die Qualität der phänologischen Daten wurde mittels der Kombination von zwei Ausreißerdetektionsroutinen verbessert: 1) basierend auf der Routine des R-Pakets ‚pheno‘ (Schaber & Badeck, 2002) und 2) durch Eliminierung verbliebener Beobachtungen, wenn diese mehr als 3 Standardabweichungen vom Mittel der jeweiligen Phase (pro Jahr) abwichen.

Modellanpassung

PIM baut auf 12 Modellvarianten auf, die vergleichend miteinander angepasst und getestet wurden. Das R-Paket ‚DEoptim‘ wurde zur Anpassung der Parameter in den PIM Modellvarianten benutzt. Diese Optimierungsroutine minimiert als Kostenfunktion die Summe der absoluten Residuen (SAR) zwischen beobachteten und modellierten Werten (phänologischen Stadien). Dies beinhaltet Skalierungsparameter und verschiedene Temperaturwerte für wachstumsfördernde und wachstumshemmende Prozesse. Die sehr rechenintensive Modellpassung wurde basierend auf ungeraden Beobachtungsjahren (1951, 1953,...) auf einer repräsentativen Auswahl von Beobachtungen (aggregierte Zeitreihen) vorgenommen, wobei der Temperaturbereich für die entsprechenden Parameter (Promoter, Inhibitor) zwischen -20°C bis 40°C festgesetzt wurde. Letztendlich wurden verschiedene PIM-Modellvarianten für die jeweiligen phänologischen Stadien und landwirtschaftlichen Kulturen ausgewählt (s. Tabelle 2). Allerdings waren die Unterschiede zwischen den Modellvarianten bezüglich SAR äußerst gering. Jede Modellanpassung erforderte 20 Läufe mit je 150 Iterationen, was sich bei einer Parallelisierung auf 112 Prozessoren auf etwa 2 Tage Rechenzeit niederschlug.

Tabelle 2: Angepasste (optimierte) Parameter für letztendlich ausgewählte Modellvarianten, phänologische Stadien und landwirtschaftlichen Kulturen. a₁ - a₄ sind Skalierungsparameter, T,2 Minimum/ Optimum/Maximum Temperaturwerte für den Inhibitor (wachstumshemmend) und T*,3 Minimum/ Optimum/Maximum Temperaturwerte für den Promoter (wachstumsfördernd).*

Art	Phase	Variante	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	T _{min,2}	T _{opt,2}	T _{max,2}	T _{min,3}	T _{opt,3}	T _{max,3}
Winterweizen	Auflaufen	1	-	0.166	0.181	0.012	-13.144	11.919	36.220	-17.049	23.020	28.427
	Ährenschieben	10	-	0.008	0.253	0.002	-17.737	-5.503	33.045	4.109	32.128	34.726
	Gelbreife	12	0.063	0.194	0.187	-	-7.358	31.660	37.082	1.709	25.915	38.834
Wintergerste	Auflaufen	1	-	0.173	0.175	0.003	-10.588	14.169	31.368	-18.082	16.395	37.056
	Ährenschieben	7	-	0.024	0.038	0.013	-16.052	-7.807	26.943	-7.499	20.220	26.542
	Gelbreife	10	-	0.104	0.330	0.057	3.614	27.056	37.026	-17.972	32.141	37.358
Winterroggen	Auflaufen	1	-	0.273	0.166	0.037	-17.934	29.921	37.637	-18.483	15.200	39.065
	Schossen	5	-	0.012	0.115	0.032	-10.366	-9.023	23.644	-6.187	16.740	34.891
	Blüte	12	0.178	0.808	0.238	-	-0.654	26.734	31.007	-0.537	29.069	32.825
	Gelbreife	1	-	0.008	0.595	0.010	6.863	27.958	30.569	5.132	25.560	37.105
Winterraps	Auflaufen	1	-	0.252	0.155	0.004	-10.018	10.390	38.595	-19.048	19.563	27.471
	Vollreife	5	-	0.016	0.046	0.010	-3.885	-3.791	17.332	2.724	22.363	37.283
Zuckerrübe	Auflaufen	1	-	0.197	0.257	0.075	-2.627	32.979	33.875	-5.835	14.275	39.712
	Geschl. Bestand	9	0.112	0.334	0.090	-	-13.459	35.610	39.955	-7.179	19,88	35.770

Die Parameterwerte für Inhibitor und Promoter liegen dabei im antizipierten Wertebereich mit generell ansteigen Temperaturwerten zwischen den phänologischen Stadien und zwischen Inhibitor und Promoter.

Modellvalidierung

Nach der Auswahl der Modellvariante(n) wurden die oben genannten phänologischen Stadien der landwirtschaftlichen Kulturen simuliert und gegen die entsprechenden Beobachtungen validiert. Dies konnte an verschiedenen Maßen, wie dem mittleren absoluten Fehler (MAE), dem Pearson-Korrelationskoeffizient (R^2) und der Wurzel der mittleren quadrierten Fehler (RMSE), quantifiziert werden (s. Tabelle 3). Generell ließ sich das Stadium 'Auflaufen' mit einem relativ geringen MAE (3-5 Tage) und rohem R^2 (>0.7) modellieren, während zeitlich nachfolgende Stadien in der Vorhersagegüte abnahmen.

Tabelle 3: Validierung der simulierten phänologischen Stadien anhand der entsprechenden Beobachtungen mit verschiedenen statistischen Maßen, wie dem mittleren absoluten Fehler (MAE), dem Pearson Korrelationskoeffizient (R^2) und der Wurzel der mittleren quadrierten Fehler (RMSE)

Art	Phase	MAE	R^2	RMSE
Winterweizen	Auflaufen	4.655	0.803	6.541
	Ährenschieben	6.695	0.379	9.139
	Gelbreife	7.368	0.513	9.949
Wintergerste	Auflaufen	3.566	0.779	5.262
	Ährenschieben	5.432	0.417	7.548
	Gelbreife	7.142	0.431	9.566
Winterroggen	Auflaufen	3.847	0.821	5.597
	Schossen	10.994	0.221	14.080
	Blüte	6.704	0.384	8.915
	Gelbreife	8.347	0.375	10.928
Winterraps	Auflaufen	4.039	0.777	5.610
	Vollreife	7.217	0.339	10.012
Zuckerrübe	Auflaufen	5.051	0.675	6.803
	Geschl. Bestand	8.149	0.187	11.259

Das Streudiagramm zwischen beobachteten und modellierten phänologischen Stadien zeigt weitere Zusammenhänge auf (Abbildung 1). So werden frühe Beobachtungen in der Regel überschätzt, während späte Beobachtungen unterschätzt werden.

Räumliche Darstellung der Simulation

Durch sog. *External Drift Kriging (EDK)* konnten die simulierten Stadien auch flächenhaft für Ackerland in Deutschland zugewiesen werden (s. Abbildung 10). Dabei kommen deutlich die durch Topographie und Nähe zum Meer induzierten Unterschiede in der Phänologie zum Ausdruck: Die Mittelgebirge als auch küstennahen Regionen weisen einen deutlich verzögerten Phaseneintritt auf. Allerdings können diese klimatisch bedingten Unterschiede teilweise durch Züchtungen, verwendete Sorten, Bodenbearbeitung und Aussaat nivelliert werden.

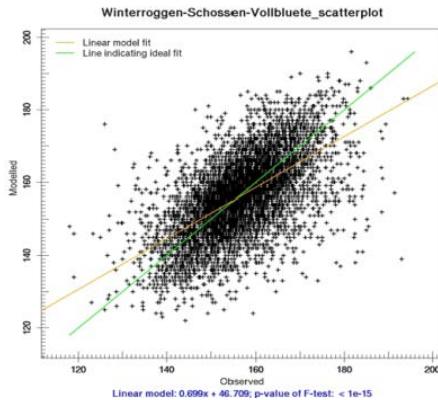


Abbildung 9: Modellierte versus beobachtete Werte für die phänologische Phase 'Blüte' von Winterroggen. Die orangene Linie zeigt den tatsächlichen linearen Zusammenhang, während die grüne Linie den theoretisch idealen Zusammenhang darstellt.

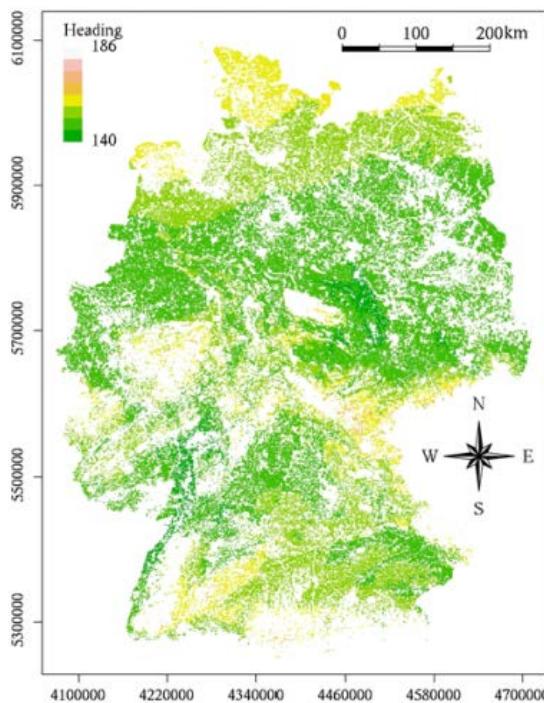


Abbildung 10: Mittels External Drift Kriging (EDK) interpolierte Simulationen (Ährenschieben Winterweizen) für das Jahr 2011 mit 759 Beobachtungsstationen. Regionen mit frühem Phaseneintritt (Tag 140-150, in Grün) lassen sich klar von Regionen mit spätem Phaseneintritt (Tag >160, in Gelb) unterscheiden.

AP 2.2 Extraktion phänologischer Maße aus Satellitenbilddaten

Insgesamt wurden für 4 landwirtschaftlichen Kulturen zwischen 1-3 phänologische Maße aus Satellitendaten extrahiert (s. Tabelle 4). Die Stadien erstrecken sich über die gesamte Vegetationsperiode und beinhalten sowohl Wintergetreide als auch Kulturen mit Aussaat im Frühjahr (Zuckerrübe).

Tabelle 4: Die phänologischen Stadien verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen, die mit entsprechenden extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten abgeglichen wurden.

Kultur	DWD ID	DWD Stadium	BBCH	Beschreibung Stadium
Winterweizen/gerste	12	Auflaufen	10	Die ersten Blätter treten aus der Koleoptile, die Pflanzenreihen sind schon sichtbar
	18	Ährenschieben	51	Die Spitze des Blütenstandes tritt aus der Schutzhülle, die ersten Ähren gerade sichtbar
	21	Gelbreife	87	Die ersten Körner haben Ihre Farbe von grün zu gelb gewechselt und können leicht von der Ähre entfernt werden. Die einzelnen Körner können mit dem Daumennagel zuerdrückt werden, der Körnerinhalt ist plastisch bis hart.
Winterraps	12	Auflaufen	10	Die Pflanzen haben die Oberfläche durchbrochen und haben eine Höhe von ca. 1 cm.
	22	Vollreife	87	Die meisten Körner sind von einer Seite schwarz.
Zuckerrübe	12	Auflaufen	10	Erstes Blatt sichtbar: Kotyledon horizontal entfaltet.

Die Extraktion der Maße erfolgte auf Basis des jahreszeitlichen Verlaufs des '*Normalized Difference Vegetation Index*' (NDVI). Der NDVI ist der Quotient aus den Differenzen zwischen rotem und nah-infraroten Bereich des vom Satelliten empfangenen Reflektionssignals und ein Maß für die Aktivität (Grünheit) und des Pflanzenbedeckungsgrades. Für die Berechnung des NDVI wurden aus dem MODIS-Produkt (tägliche Oberflächenreflektanzen) die Kanäle 1 und 2 und aus dem RapidEye-Produkt (ca. 6-wöchentlichen Oberflächenreflektanzen) die Kanäle 3 und 5 verwendet. Da etwa 50 % der Satellitendaten durch Wolken/Dunst beeinträchtigt sind müssen die NDVI-Rohdaten dynamisch gefiltert werden, um Werte von wolkenlosen Beobachtungen zu selektieren. Im Folgenden werden an die verbliebenen NDVI vier Modelle angepasst (*Linear Interpolation*, *Savitzky-Golay Filter*, *Spline interpolation*, *Fast Fourier Transformation (FFT)*) und basierend auf lokalen oder globalen Schwellenwerten der Tag des Phaseneintritts festgelegt (s. Abbildung 11).

Die exakten Schwellenwerte wie Werte für die sog. '*sliding period*' wurden iterativ durch Abgleich mit phänologischen Bodenbeobachtungen ermittelt. '*Sliding period*' definiert ein Zeitfenster, indem der Algorithmus bei der Rekonstruktion der NDVI-Kurve nach höheren Werte sucht. Wird innerhalb der '*sliding period*' kein höherer Wert gefunden, wird der nächstniedrige NDVI-Wert selektiert. Je mehr Wolkenbedeckung das Untersuchungsgebiet aufweist, desto länger sollte die Periode gewählt werden. Folgende Maße wurden extrahiert und mit den Beobachtungen von Tabelle 4 abgeglichen: Ergrünungs- und Seneszenztag, Länge der Vegetationsperiode, Maximum und Minimum NDVI sowie Tag des Maximum und Minimum NDVI.

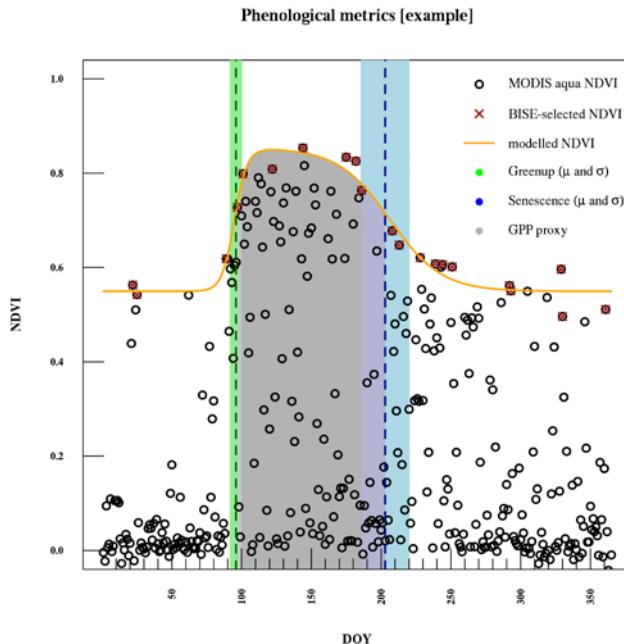


Abbildung 11: Beispiel für die Extraktion phänologischer Maße anhand täglicher MODIS-Beobachtungen (schwarze Punkte). Nachdem die Rohdaten dynamisch gefiltert sind (BISE, Best Index Slope Extraction) wird an die verbliebenen Beobachtungen (rotes Kreuz, wolkenfrei) eine logistische Funktion angepasst (orangene Linie). Anhand bestimmter Schwellenwerte auf der modellierten Linie (z.B. die Hälfte zwischen maximalen und minimalen NDVI-Wert) kann dann der Zeitpunkt des Phaseneintritts auf der X-Achse abgetragen werden (grüne bzw. blaue horizontale Linie).

MODIS-Daten

Sämtliche phänologische Maße konnten für ganz Deutschland von 2000-2015, basierend auf dem R-Paket „phenex“ (Doktor & Lange, 2014) extrahiert werden. Basierend auf räumlich und thematisch hochauflösenden Informationen über Anbaufrüchte (InVeKos) von 2010-2015 konnten insgesamt 600 Felder in zwei RapidEye-Kacheln (Kachel ID: 3262921, 3262922) lokalisiert werden, deren Fläche minimal der eines MODIS-Pixels entsprach. Die entsprechenden MODIS-Pixel – insgesamt 1500 – weisen ein homogenes Signal über die Jahre auf, da das Signal nur durch eine landwirtschaftliche Kultur generiert wird (keine sog. Mischpixel). Für diese Pixel wurden die oben dargestellten Maße extrahiert. Je nachdem ob Sommer- bzw. Wintergetreide angebaut wurden kann der NDVI-Verlauf von Jahr zu Jahr stark variieren (Abbildung 12).

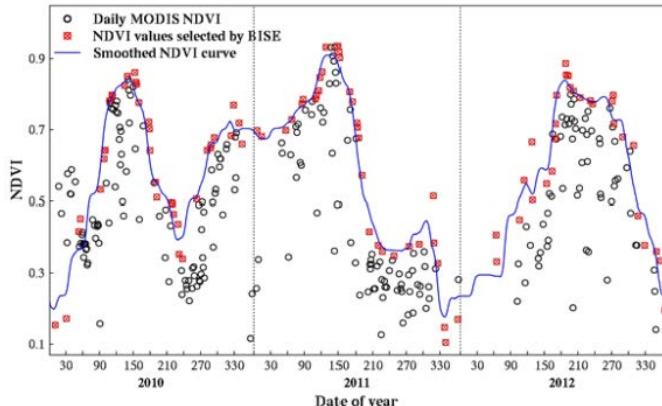


Abbildung 12: Beispiel für den NDVI-Verlauf über mehrere Jahre mit variierenden landwirtschaftlichen Kulturen. Nachdem die Rohdaten dynamisch gefiltert sind (BISE, Best Index Slope Extraction) wird an die verbliebenen Beobachtungen (rotes Kreuz, wolkenfrei) eine Filterfunktion angepasst (Savitzky-Golay, blaue Linie).

Erwähnenswert sind die iterativ detektierten unterschiedlichen Schwellenwerte für Seneszenz und Ergrünen, die sich z.T. deutlich von anderen Landnutzungen (Wald) unterscheiden (s. Tabelle 5). Da der Savitzky-Golay-Filter den niedrigsten RSME aufweist wurde im Folgenden ausschließlich mit dieser Methode weitergearbeitet.

Tabelle 5: Die iterativ kalibrierten 'sliding period' und Schwellenwerte (anhand von Felddaten von 2010-2014) für alle verwendete Methoden: Savitzky-Golay (SG), Lineare Interpolation (Linear), Fast Fourier Transformation (FFT) und Spline Interpolation (Spline). d und m stellen den Grad polynomialen Fits dar und die mittlere Breite des sog. moving window. s ist die Glättungsintensität von FFT

Me-thode	Einstellun-gen	Sliding period (Tage)	Phänometrik	Lokaler Schwellenwert		RMSE
				Winterge-treide	Zucker-rübe	
SG	d=2; m=5	21	Ergrünen	0.10	0.29	12.76
			Seneszenz	0.41		
Linear		23	Ergrünen	0.17	0.30	13.76
			Seneszenz	0.50		
FFT	S=1	28	Ergrünen	0.12	0.26	13.96
			Seneszenz	0.48		
Spline		31				15.91

Die phänologische Stadien 'Ährenschieben' und 'Seneszenz' (Vollreife) konnten mittels Satellitendaten relativ exakt abgeschätzt werden (s. Tabelle 6). Im Gegensatz dazu weist die Ableitung des Ergrünens (Auflaufen) deutlich größere Unsicherheiten auf, vermutlich bedingt durch die schlechten Beleuchtungsbedingungen und hohen Grad an Wolkenbedeckung in den Herbstmonaten.

Tabelle 6: Die phänologischen Stadien verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen, die mit entsprechenden extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten abgeglichen wurden.

RMSE (Tage)	Jahre	Ergrünen	Ährenschieben	Seneszenz
Winterweizen	2010-2012, 2014	17.61(14)	8.52(25)	9.43(29)
Wintergerste	2010-2012, 2014	15.67(10)	10.38(13)	3.80(13)
Winterraps	2010-2012, 2014	13.20(17)		15.24(20)
Zuckerrübe	2010-2012, 2014	21.19(9)		

Die Unterschiede zwischen den extrahierten phänologischen Metriken und entsprechenden Bodenbeobachtungen variieren zwischen den landwirtschaftlichen Kulturen (s. Abbildung 13).

Große Abweichungen sind teilweise auch durch immer noch vorhandene Ausreißer in den DWD-Datensätzen zu erklären.

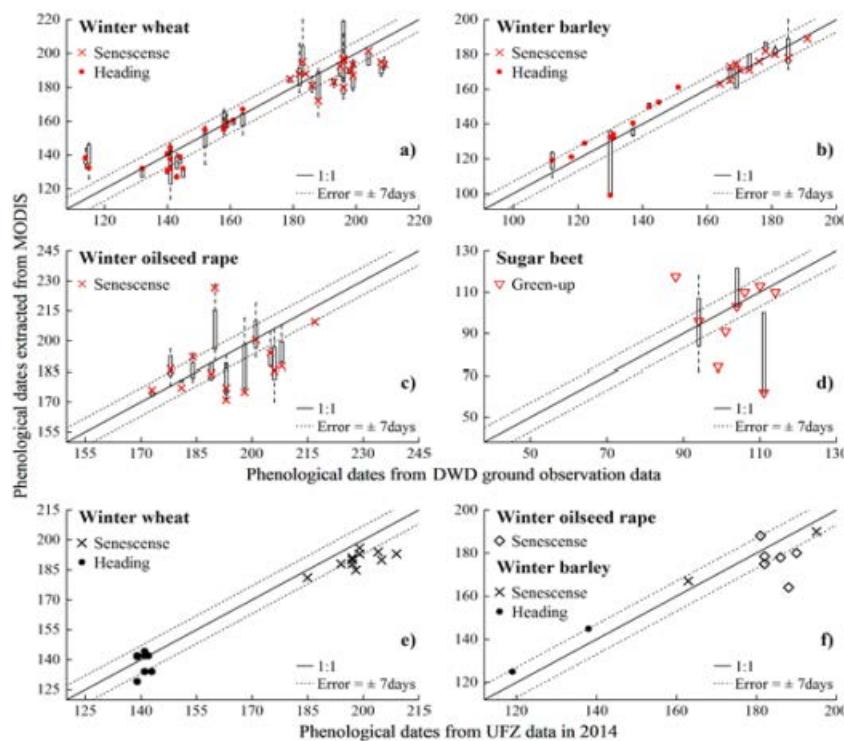


Abbildung 13: Streudiagramme von extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten (MODIS) versus entsprechende Bodenbeobachtungen von DWD und UFZ für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen: a)-d) 2010-2014 versus DWD Daten; e) und f) 2014 versus UFZ Daten. Rote Symbole zeigen Schläge, die am nächsten zu den DWD Beobachtungsstationen liegen. Jeder Boxplot repräsentiert die phänologischen Stadien aller Felder im Umkreis von 3 km einer DWD Station.

RapidEye-Daten

Für atmosphärisch korrigierte Szenen wurden analog zu der MODIS-Prozedur phänologische Maße extrahiert. Allerdings mussten die entsprechenden Algorithmen aufgrund der deutlich geringeren Datendichte angepasst werden (< 10 Aufnahmen pro Kachel und Jahr).

Die für RapidEye ermittelten Schwellenwerte sind vergleichbar mit MODIS, wobei die 'sliding period' aufgrund der unterschiedlichen temporalen Auflösung deutlich abweicht (s. Tabelle 7).

Im Mittel liegen die Abweichung zwischen extrahierter und beobachteter Phase höher als bei MODIS, bei ca. 8 Tagen (s. Abbildung 14). Das liegt vornehmlich an der niedrigeren zeitlichen Auflösung. Dies galt insbesondere für die Metriken der Zuckerrübe, deren Genauigkeit erheblich von der limitierten Anzahl der RapidEye-Beobachtungen der entsprechenden Wachstumsphasen beeinflusst war. Dafür konnten aufgrund der höheren räumlichen Auflösung mehr Felder in die Analyse miteinbezogen werden.

Tabelle 7: Die iterativ kalibrierten 'sliding periods' und Schwellenwerte (anhand von Felddaten von 2010-2014) für alle verwendete Methoden: Savitzky-Golay (SG), Lineare Interpolation (Linear) und Fast Fourier Transformation (FFT). d und m stellen den Grad polynomialen Fits dar und die mittlere Breite des sog. moving window. s ist die Glättungsintensität von FFT

Methode	Einstellungen	Sliding period	Phänometriks		Schwellenwert
			Wintergetreide	Zuckerrübe	
FFT	2	2	Ergrünen	0.25	0.03
			Seneszenz	0.45	
	Linear		Ergrünen	0.38	0
			Seneszenz	0.42	
SG	d=2; m=5	2	Ergrünen	0.18	0
			Seneszenz	0,35	

Das starke Seneszenz-Signal der Wintergetreide (auch Ernte) gekoppelt mit relativ guten Wetterbedingungen erleichtert die Extraktion der entsprechenden Metrik für beide Satelliten. So ist z.B. der RSME für Winterweizen in 2014 auf Basis von 24 Schlägen und RapidEye-Daten kleiner als 6 Tage. Die Schwellenwerte zur Extraktion der Seneszenz liegen für beide Satelliten bei ca. 0.5. Dies deutet darauf hin, dass die Hälfte des NDVI-Maximums auf der reproduzierten NDVI-Kurve an spezifische phänologische Stadien gekoppelt ist (z.B. DWD-Stadium 21 / BBCH 87).

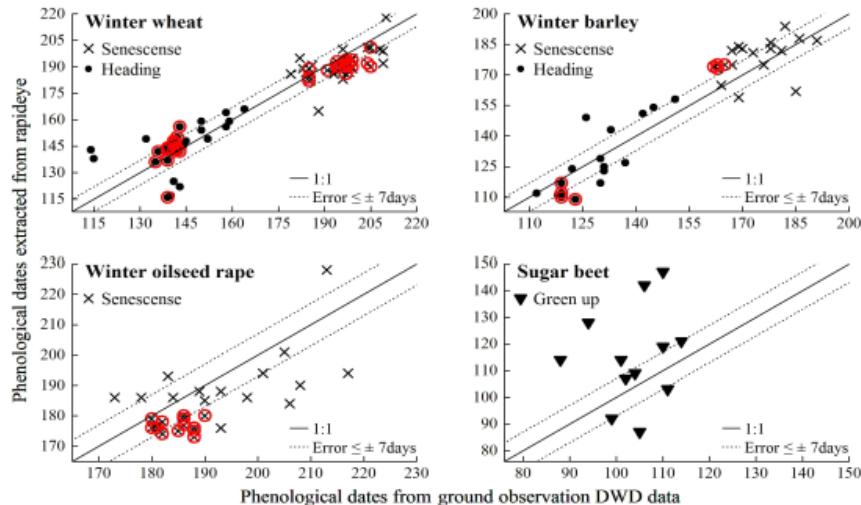


Abbildung 14: Streudiagramme von extrahierten phänologischen Maßen aus Satellitendaten (RapidEye) versus entsprechende Bodenbeobachtungen von DWD und UFZ für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen (Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Zuckerrübe). Rote Symbole zeigen Schläge, die am nächsten zu den DWD Beobachtungsstationen liegen

Wie bereits festgestellt, korrespondieren die von homogenen MODIS-Pixeln und RapidEye-Daten extrahierten Metriken (z.B. Seneszenz) gut mit dem lokalen phänologischen Kalender. Generell ist hier das von RapidEye extrahierte Eintrittsdatum etwas früher terminiert. Dies kommt durch die unterschiedlichen NDVI-Werte (an demselben Beobachtungstag) der beiden Sensoren zu Stande (s. Abbildung 15). Zu Beginn und Ende der Wachstumsperiode, bei relativ geringer Vegetationsdichte, weist MODIS zumeist einen höheren NDVI auf als der für das Feld entsprechende maximale RapidEye-NDVI-Wert, d.h. dass die Skalierung hin zu einer größeren Auflösung eine Verschiebung der extrahierten Metriken nach späteren Eintrittstagen nach sich zöge.

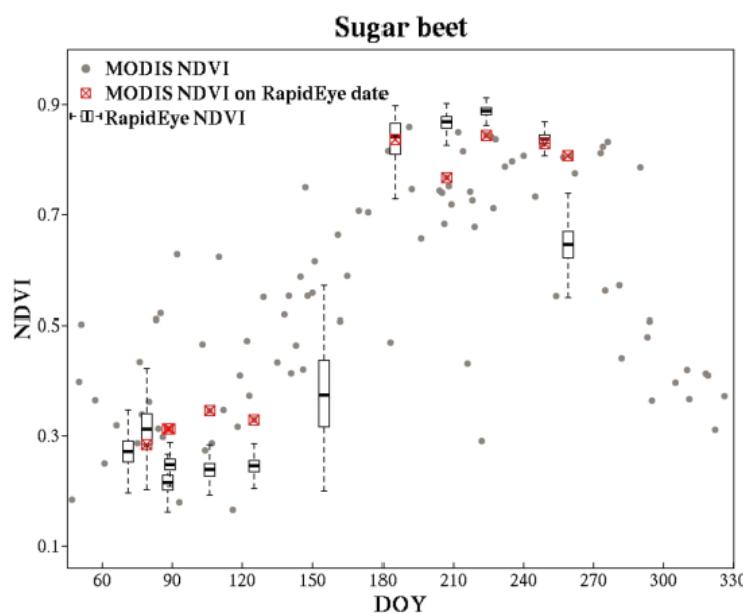


Abbildung 15: Vergleich des jahreszeitlichen Verlaufs von MODIS und RapidEye NDVI-Beobachtungen für eine landwirtschaftliche Kultur und Schlag. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung sind RapidEye Beobachtungen als Boxplots dargestellt. Zeitlich simultane Beobachtungen von RapidEye mit MODIS sind rot markiert

Trotz der vergleichbar niedrigen zeitlichen Auflösung von RapidEye im Vergleich zu MODIS und eines damit verbundenen größeren Fehlers in der Abschätzung der Metriken ist eine Anwendung in räumlich fein strukturierten Landschaften durchaus sinnvoll (s. Abbildung 15).

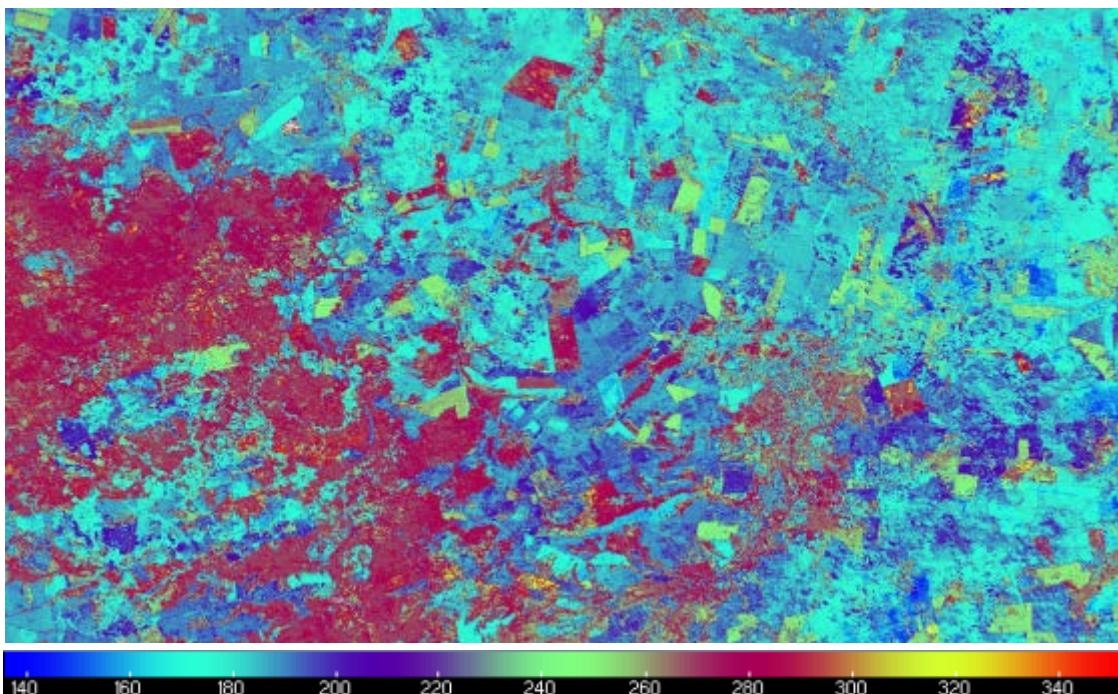


Abbildung 16: Extrahierter Tag des Phaseneintritts für das phänologische Stadium Seneszenz bzw. Vollreife aus RapidEye-Daten für das Untersuchungsgebiet Harzgradient. Die kleinräumigen Strukturen mit unterschiedlichen Phaseneintrittspunkten können aufgrund der hohen räumlichen Auflösung gut herausgearbeitet werden

Sentinel-2-Daten, Übertragung der Routinen

Das UFZ konnte sämtliche verfügbare Sentinel-2-Szenen des Untersuchungsgebietes für die Jahre 2015 und 2016 akquirieren (Abb. Abbildung 17 und Abbildung 18). Die anfänglichen Schwierigkeiten bei der Datenakquise (Überlastung ESA-Server) scheinen auf ESA-Seite behoben. Die Installation der ESA-Software zur Atmosphärenkorrektur (*sen2cor*) ist zumindest auf Linux-Systemen nur von IT-Experten zu bewältigen. Zudem waren die ersten Programmversionen noch stark fehlerbehaftet und nur bedingt einsetzbar. Daher wurde die Atmosphärenkorrektur zusätzlich auch mit ATCOR durchgeführt. Diese beiden Prozessierungsgrundlagen liefern vergleichbare, aber im Detail unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich i) absoluter Reflektanzwerte, ii) Wolkenmaske/Wolkenschatten und iii) Anzahl Szenen, die abschließend korrigiert werden konnten.

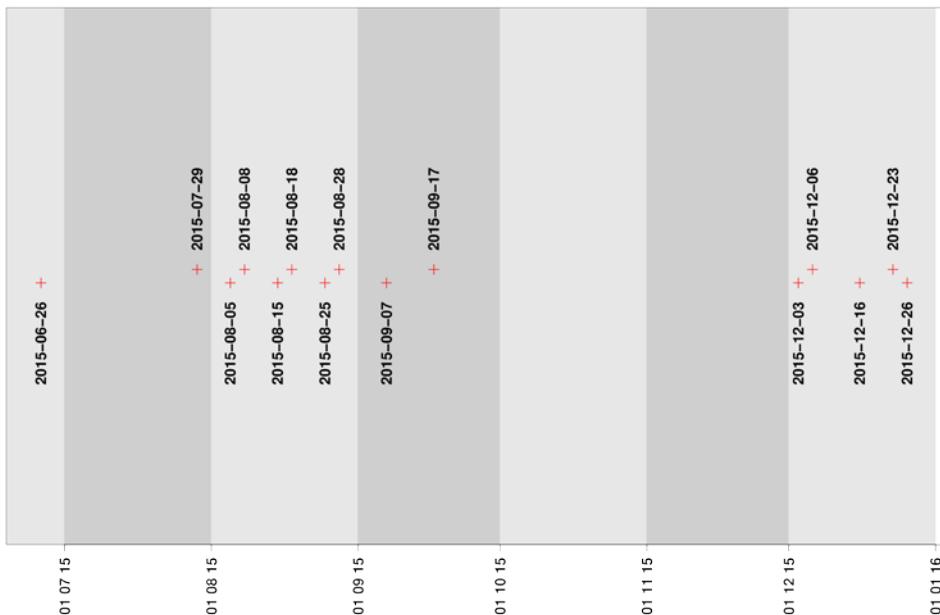


Abbildung 17: Akquirierte und atmosphärenkorrigierte Sentinel-2A-Szenen des Untersuchungsgebietes für 2015

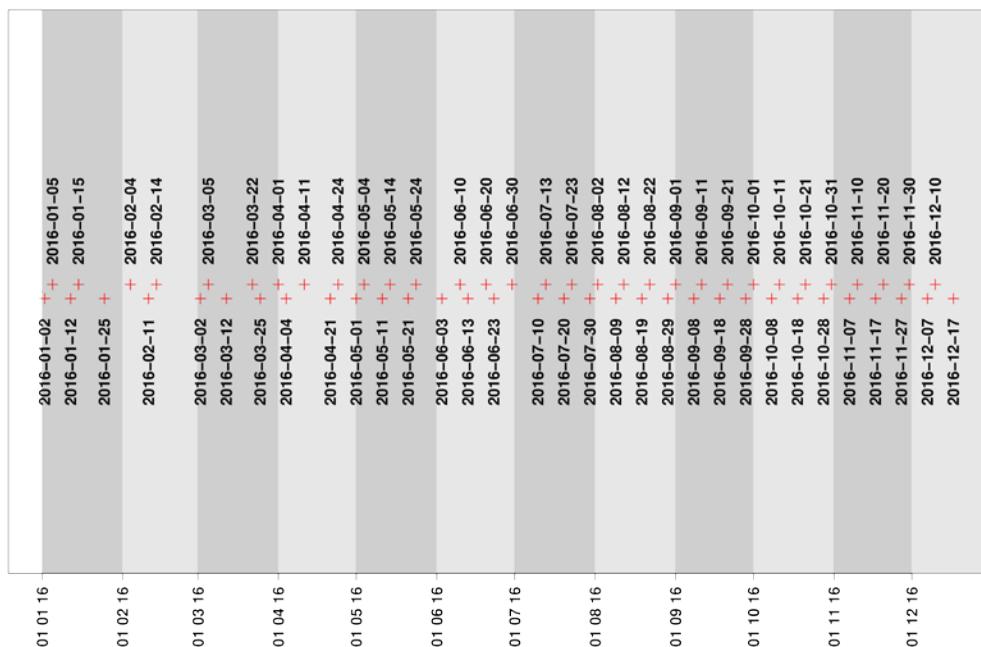


Abbildung 18: Akquirierte und atmosphärenkorrigierte Sentinel-2A-Szenen des Untersuchungsgebietes für 2016

Diese Unterschiede wurden anhand eines Validierungsstandortes analysiert (s. auch Projekt Förderkennzeichen 50EE1218). Anhand der oben genannten Kriterien konnte keiner Software eine eindeutige Präferenz gegeben werden, so dass letztendlich auf 'sen2cor' zurückgegriffen wurde, in der Hoffnung, dass angekündigte Aktualisierungen der Software eine höhere Qualität gewährleisten. Anschließend wurde aus den entsprechenden Kanälen des 10 m bzw. 20 m Produkts jeweils der NDVI als Grundlage für die Extraktion der phänologischen Maße generiert.

Die für MODIS- sowie RapidEye-Daten entwickelten Routinen konnten auf Sentinel-2A-Daten angepasst und die phänologischen Maße erfolgreich extrahiert werden (s. Abbildung 19 und Abbildung 20). Mit einer verbesserten zeitlichen Abdeckung nach Start von Sentinel-2B wird sich die Qualität der extrahierten phänologischen Maße verbessern.

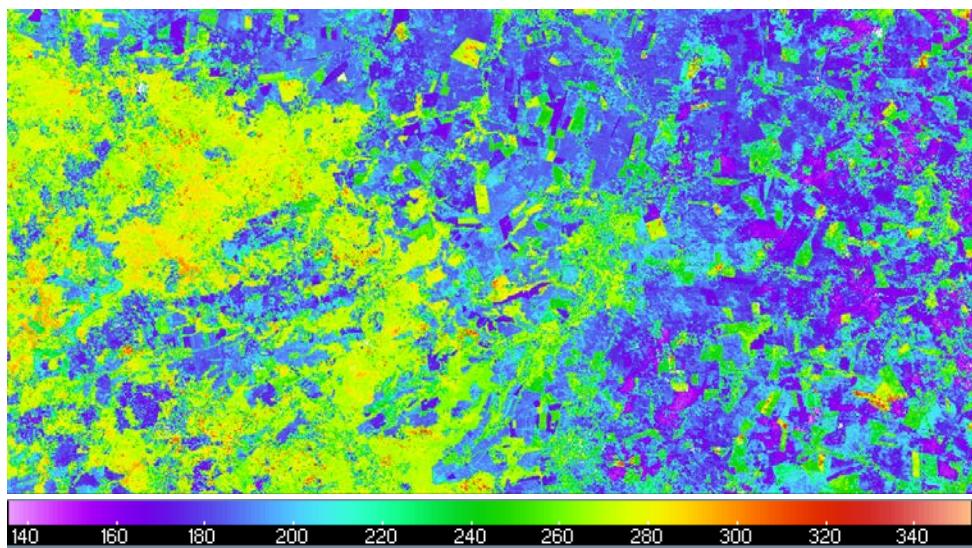


Abbildung 19: Zeitpunkt der Seneszenz (Tag des Jahres) für landwirtschaftliche Kulturen und Forst des Untersuchungsgebietes basieren auf Sentinel-2A-Daten (20 m räumliche Auflösung) für das Jahr 2016

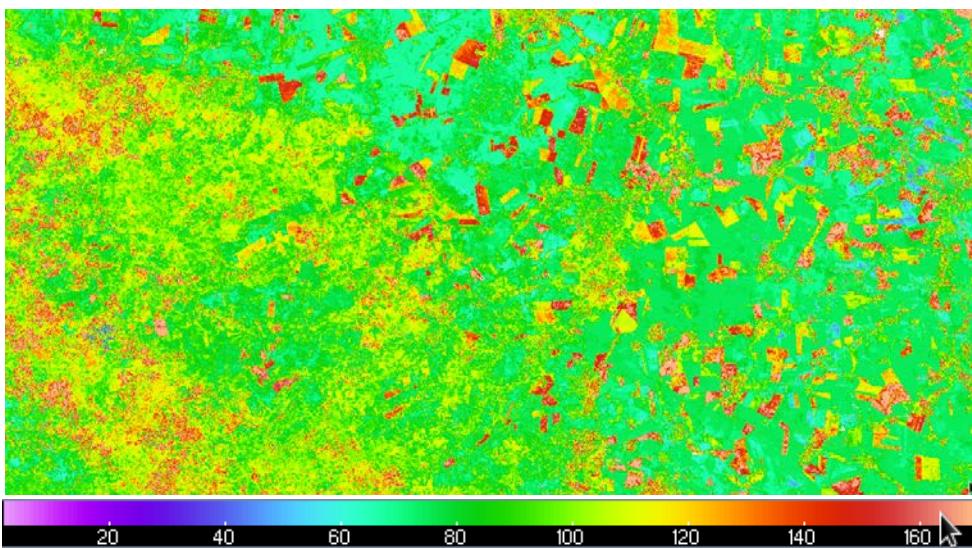


Abbildung 20: Zeitpunkt des Ergrünens (Tag des Jahres) für landwirtschaftliche Kulturen und Forst des Untersuchungsgebietes basieren auf Sentinel-2A-Daten (20 m räumliche Auflösung) für das Jahr 2016.

2.1.2 GEOJMU

Es folgt die Beschreibung der Verwendung der Zuwendungsmittel sowie der erzielten Ergebnisse im Einzelnen. Die nachfolgenden Kapitel sind gemäß der Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete organisiert.

2.1.2.1 Arbeitspaket 3: Entwicklung eines gemeinsamen Klassifikationsrahmens

In diesem Arbeitspaket wurde die Entwicklung eines standardisierten Klassifikationsrahmens unter Nutzung optimierter phänologischer Phasenvorhersage und sensorspezifischer Indizes bearbeitet. Alle Ergebnisse wurden hinsichtlich Qualität und Robustheit der Verfahren nach einheitlichen Standards bewertet. Zu Beginn der Arbeiten an diesem Arbeitspaket erfolgten die Definition der Zielklassen sowie eine Spezifikation des Klassifikationsrahmens für die Anforderungen aus AP 4.

Arbeitspaket 3.1: Definition der Zielklassen für die Klassifikation

In der Initialphase des Projektes wurden die Zielklassen für das Untersuchungsgebiets Ammer-Einzugsgebiet (AME) basierend auf Datengrundlagen aus den Vorläuferprojekten (MSAVE, DeCOVER2) ermittelt. Hierbei wurde eine Unterscheidung der Grünlandklasse 4102 in naturnahes Grünland, Extensivgrünland und Intensivgrünland angestrebt. Die natürlichen Grünlandklassen im süddeutschen Transekt (Projekt MSAVE, FKZ 50EE1032) lassen sich in sechs verschiedene Lebensraumtypen (LRT) und Flächen unterschiedlichen Naturwertes (High Nature Value, HNV) unterscheiden.

Tabelle 8: Zielklassen getrennt nach Untersuchungsgebieten

Klassen Ammereinzugsgebiet	Klassen Mitteldeutschland		Klassen Demmin	
Lebensraumtypen	hohe thematische Auflösung	niedrige thematische Auflösung	hohe thematische Auflösung	niedrige thematische Auflösung
Trockenrasen (LRT 6210)	Winterweizen	Wintergetreide	Winterweizen	Wintergetreide
	Wintergerste		Wintergerste	
	Winterroggen		Winterroggen	
Pfeifengraswiesen (LRT 6410)	Winterraps	Winterraps	Winterraps	Winterraps
degradierte Hochmoore (LRT 7120)	Mais	Mais	Mais	Mais
kalkreiche Niedermoore (LRT 7230)	Sommerweizen	Sommergetreide	Sommergerste	Sommergetreide
	Sommergerste		Hartweizen	
	Hartweizen		Sommerweizen	
	Hafer			
Übergangs Schwingrasenmoore (LRT 7140)	Zuckerrüben	Zuckerrüben	Zuckerrüben	Zuckerrüben
	Kartoffeln	Kartoffeln	Kartoffeln	Kartoffeln
artenreiche Flachlandmähwiesen (LRT 6510)	Weide/Gras	Weide/Gras	Weide/Gras	Weide/Gras
	Sonstiges	Sonstiges	Sonstiges	Sonstiges

Die Ausweisung der ackerbaulichen Zielklassen im Untersuchungsgebiet DEMMIN erfolgte nach Einsicht der Aufzeichnungen der Geländeaufnahmen im Untersuchungsgebiet Demmin. Diese Informationen wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt Neustrelitz gesammelt und im Rahmen des Kooperationsvertrages bereitgestellt. Die Einsichtnahme verzögerte sich allerdings zeitlich. Bedingt durch diese Verzögerung und die daraus resultierende Informationslücke wurden die Zielklassen innerhalb des ersten Projektjahres ständig angepasst. Die endgültige Festlegung der Zielklassen für sämtliche Untersuchungsgebiete ist in Tabelle 8 aufgeführt. Die Klassen der Untersuchungsflächen AME, Demmin und Mitteldeutschland basieren auf Projekterkenntnissen^{2,3} sowie Landwirtschaftstatistiken⁴. Für das UG Mitteldeutschland wurden im Vergleich zu Demmin die Klassen Hartweizen und

² <http://demminweb.dlr.de/>

³ <http://www.msave.de>

⁴ <http://www.invekos.sachsen-anhalt.de>

Hafer ergänzt, da ihr Vorkommen charakteristisch für die dortige Landwirtschaft ist. Die Festlegung der konkreten ackerbaulichen Klassen in Tabelle 8 erfolgte dabei im Wesentlichen aufgrund des Kriteriums der phänologischen Trennbarkeit.

Arbeitspaket 3.1: Spezifikation des gemeinsamen Klassifikationsrahmens

Das Ziel des Arbeitspakets war es gemeinsam mit allen Projektpartnern einen Klassifikationsrahmen zu spezifizieren der alle Möglichkeiten der Kombination aus Eingangsdaten und Merkmalen für die Klassifikation ermöglicht. Das Validierungswerkzeug zur Bestimmung der Klassifikationsgüte, welches im nächsten Unterkapitel vorgestellt wird, wurde gemäß den im Projektantrag formulierten Anforderungen an den Klassifikationsrahmen entwickelt. Die Funktionalität beinhaltet insbesondere:

- die Berücksichtigung unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten
- die Kombinationen von verschiedenen Datenquellen (RapidEye, Sentinel-2)
- die Berücksichtigung vielfältiger spektraler Merkmale und Trainingsdaten und
- Ausgabe standardisierter Protokolle der Klassifikationsgenauigkeit und -unsicherheit

Der Algorithmus selbst wird dabei nicht verändert. Die Änderungen können durch Variation der Eingabedaten vorgenommen werden.

Arbeitspaket 3.2: Aufbau eines Klassifikationsensembles und Bestimmung der Klassifikationsgüte durch Validierungswerkzeuge

In diesem Teilarbeitspaket wurde der Klassifikationsrahmen gemäß der erarbeiteten Spezifikation umgesetzt. Zur Klassifikation wurde die Ensemble-Klassifikationsmethode Random Forest (RF) verwendet. Die Implementierung eines zweistufigen Ensembles aus RF und Support Vector Machines wurde nach anfänglichen Tests verworfen. Die geringfügig höhere erzielbare Klassifikationsgenauigkeit eines solchen kombinierten Verfahrens erfordert deutlich höhere Rechenzeiten, die gemäß den Spezifikationen und Zielsetzungen des Projekts (Recheneffizienz) zu einer ineffizienten Klassifikationsperformance führten. Der Kompromiss aus Recheneffizienz und Klassifikationsgenauigkeit führte zur ausschließlichen Verwendung der Ensemble-Klassifikationsmethode RF.

Die ersten Testversionen des Klassifikationswerkzeuges (siehe Abbildung 21) konnten aufgrund der bereits in Abschnitt 0 beschriebenen Verzögerungen bei der Felddateneinsicht nicht wie angestrebt für die Untersuchungsfläche Demmin getestet werden. Bis die Informationen über die Schlaggeometrien im Untersuchungsgebiet Demmin vorlagen, wurden zum Test des Algorithmus Feldinformationen der Testfläche AME verwendet. Die hierbei erzielten Ergebnisse wiesen allerdings nur geringe Klassifikationsgenauigkeiten für die unterschiedlichen Lebensraumtypen auf. Das lag im Wesentlichen an der schwierigen Zuweisung der Lebensraumtypen zu räumlich expliziten Objekten. Weshalb die anvisierte objekt-basierte Klassifikation für LRT nicht weiter verfolgt wurde. Der Test des Klassifikationsalgorithmus konnte aber trotzdem als erfolgreich bezeichnet werden, da sowohl die Funktionalität als auch die Berechnungen der zonalen Statistiken sowie die Ausgabe überprüft werden konnte.

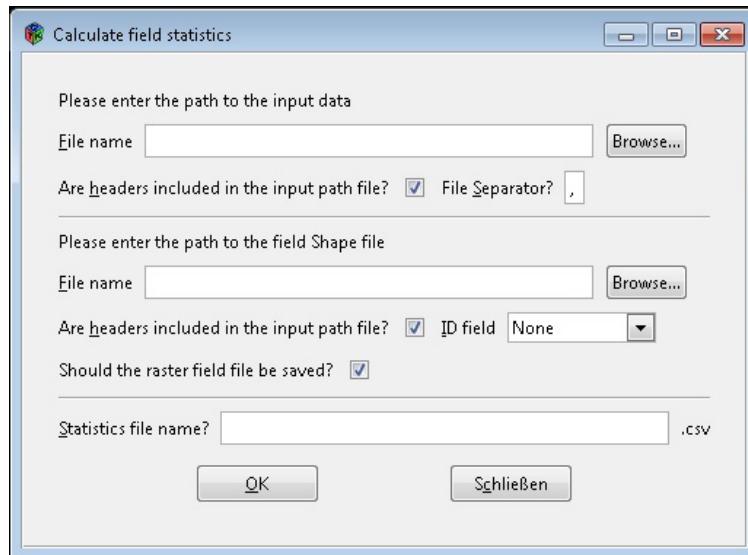


Abbildung 21: Darstellung der grafischen Benutzeroberfläche einer Testversion des Klassifikationswerkzeuges

Das Validierungswerkzeug zur Bestimmung der Klassifikationsgüte wurde anschließend weiterentwickelt und besteht seitdem aus drei separat benutzbaren Teilen und wurde im Mai 2014 auf dem RESA Workshop in Bonn vorgestellt (<http://resa.blackbridge.com/workshops/2014>). Der Name des entwickelten Validierungswerkzeugs lautet „MELang“ (Multifunktionales Werkzeug zur Evaluierung der Landnutzungsklassifikation und Geometrischen Genauigkeit). Der erste Teil besteht aus einer automatisierten schlagspezifischen Berechnung der zonalen Statistiken (Vegetationsindizes, Red-Edge-Indizes, usw.) basierend auf Trainingsdaten der Region. Hierzu werden Mittelwerte von 18 ausgewählten Indizes (siehe Tabelle 9; Empfehlungen aus Löw et al., 2012) automatisch berechnet und außerdem die Reflektanzen der Einzelbänder für jedes Schlagobjekt zum Merkmalsraum hinzugefügt.

Tabelle 9: Ausgewählte Klassifikationsmerkmale (spektrale Indizes und Reflektanzen) für RapidEye-Daten.

Bandreflektanz	Vegetationsindex	Red-Edge-Index	Krümmungsindex
Band 1	Greenness Index (GI)	GreenRedEdge NDVI (GRNDVI)	RedEdge Length (REL)
Band 2	Blue-green Ratio (BGI)	Normalized difference red edge index (redNDVI)	Relative RedEdge Legth (RREL)
Band 3	Red-Green Ratio (RGI)		
Band 4	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)		
Band 5	Difference Vegetation Index (DVI) Green Vegetation Index (VIGreen) Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) Enhanced Vegetation Index (EVI) Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI)		

Es erfolgt eine automatische Ermittlung der Eingangspixelgröße und wurde ursprünglich für RapidEye-Daten entwickelt, konnte im Projektverlauf allerdings erfolgreich auf die Eingabe von Landsat, Sentinel-2 und Sentinel-1-Daten übertragen werden. Der zweite Teil des Validierungswerkzeugs beinhaltet

die automatische Berechnung der Klassifikationsgenauigkeiten aller Kombinationen (Permutationen) der Zeitschnitte. Der dritte Teil dient der Visualisierung der Klassifikationsgenauigkeiten (siehe Abbildung 22) mit Hilfe der Boxplot Darstellung. Die optionalen Ausgabemöglichkeiten sind:

- Gesamt-Klassifikationsgenauigkeit (OA, *overall accuracy*; Congalton & Green, 2008),
- klassenspezifische Genauigkeit (F1-measure, Rijksbergen, 1979),
- Nutzer- und Produzentengenauigkeit (Congalton & Green, 2008) und
- Auswahl der zu analysierenden Zeitschnitte und Feldfrüchte

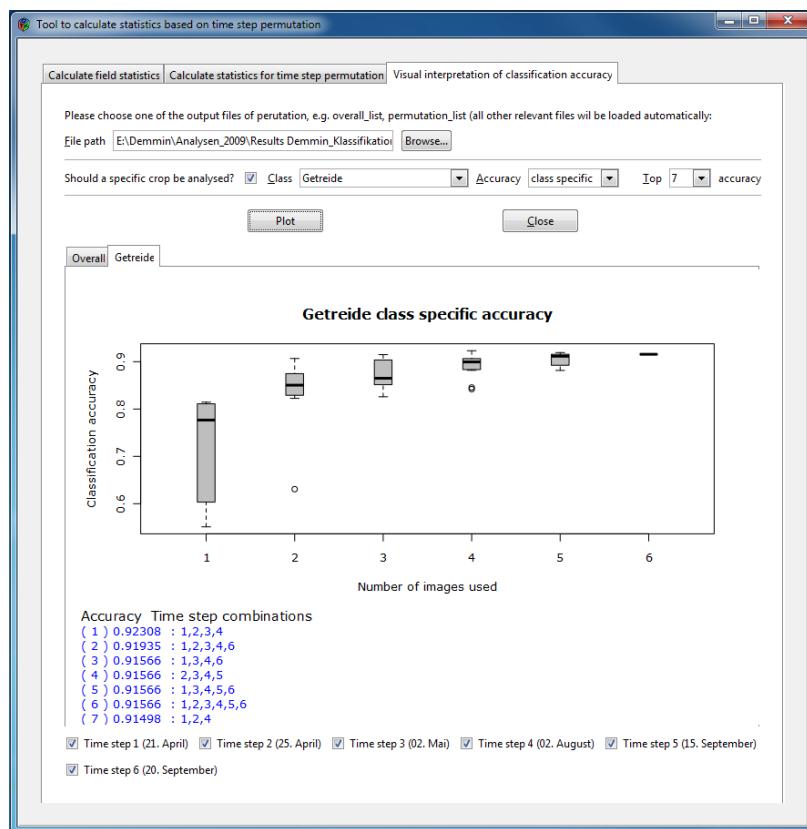


Abbildung 22: Darstellung der grafischen Benutzeroberfläche des Klassifikationsalgorithmus zur Ausgabe der Klassifikationsgüte der betreffenden Zeitschnittkombination. Hier dargestellt sind die Ergebnisse der klassenspezifischen Genauigkeit (F1-measure) für die Klasse Getreide der landwirtschaftlichen Schläge der Testumgebung Demmin.

Als nächster Schritt erfolgte der Test zur Bestimmung der Klassifikationsgüte mit Hilfe des entwickelten Klassifikations- und Validierungswerkzeuges auf den Schlägen der Testfläche Demmin für die Jahre 2009 bis 2012. Nachdem die Informationen über die Schlaggeometrien im Untersuchungsgebiet Demmin bekannt waren, konnte die Ableitung geometrischer Qualitätsmaße für eine objektbezogene Bewertung in den Algorithmus implementiert und getestet werden (siehe Abbildung 22). Die Analyse der Datensätze mit Hilfe des Validierungswerkzeugs konnte erfolgreich durchgeführt werden.

Anschließend wurde die Bewertung der Landnutzungsklassifikation auch für das Prioritätsuntersuchungsgebiet Mitteldeutschland/Harz mit dem Validierungswerkzeug „MELanGe“ durchgeführt. Mit sämtlichen verfügbaren Datensätzen wurden mittels des Analysewerkzeugs „MELanGe“ und analog zu

Arbeiten von Murakami et al. (2001) bzw. Conrad et al. (2012a) die Zeitschnitte bestimmt und ausgeben, die zu hohen Klassifikationsgenauigkeiten führen. Zunächst für die Jahre 2011 bis 2013. Im Projektverlauf dann jeweils am Ende des entsprechenden Kalenderjahres die Jahre 2014 bzw. 2015. Zum Ende des Projektes konnte das Klassifikationswerkzeug schließlich auch mit Sentinel-2-Daten verwendet werden. RapidEye-Daten aus dem Jahr 2016 standen leider für Vergleichszwecke nicht zur Verfügung.

Tabelle 10: Tage mit wolkenfreien Aufnahmen, die für die Klassifikation im Untersuchungsgebiet Mitteldeutschland der Jahre 2011 - 2015 (RapidEye) und 2016 (Sentinel-2) verwendet wurden.

Zeitschnitt	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	07.03.2011	28.03.2012	05.05.2013	10.03.2014	21.04.2015	22.04.2016
2	24.04.2011	28.04.2012	19.06.2013	27.03.2014	10.05.2015	02.05.2016
3	08.05.2011	01.05.2012	22.07.2013	16.04.2014	01.07.2015	24.06.2016
4	06.06.2011	25.07.2012	16.08.2013	04.06.2014	02.08.2015	15.07.2016
5	26.08.2011	18.08.2012	-	06.09.2014	01.10.2015	21.07.2016
6	02.10.2011	16.10.2012	-	-	-	13.08.2016

Die jeweils verwendeten, wolkenfreien Aufnahmen der einzelnen sind in Tabelle 10 aufgeführt. Es zeigte sich, dass jährlich nicht immer die gleiche Anzahl an Zeitschnitten zur Verfügung stand. Zusammen mit den Tatschen, dass die vorhanden Zeitschnitte auch nicht immer in den gleichen Viertelmonaten (siehe Tabelle 11) lagen und die Phänologie witterungsbedingten Schwankungen unterlaufen ist, macht es einen interannuellen Vergleich der Klassifikationsergebnisse unmöglich.

Tabelle 11: Darstellungen der Tage mit wolkenfreien Aufnahmen (Markierung) nach Tabelle 10 in einem Monatsraster zur besseren Interpretation. Die Einheiten sind Viertel-Monate.

Jahr	März				April				Mai				Juni				Juli				Aug				Sept				Okt			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	
2011	x							x	x			x											x					x				
2012			x				x	x													x		x							x		
2013							x					x				x				x		x										
2014		x	x			x				x			x										x									
2015				x			x		x					x			x			x				x					x			
2016 S-2					x		x						x				x		x	x	x											

Abschließend sind die Ergebnisse der Evaluierung der Klassifikationen in Tabelle 12 aufgelistet. Hierbei ist zu erkennen, dass in den meisten Jahren bereits nach drei Zeitschnitten eine Sättigung der OA eintritt, wobei mono- und bi-temporale Klassifikationen noch starken Schwankungen bei insgesamt deutlich geringeren Gesamtklassifikationsgenauigkeiten unterworfen sind.

Tabelle 12: Gesamtklassifikationsgenauigkeit (OA) aller berechnet Jahre für das UG Mitteldeutschland aufgelistet nach der Anzahl der verwendeten Zeitschnitte. Aufgeführt sind jeweils die beste und die durchschnittliche OA. Unterschiedene landwirtschaftlichen Klassen: Kartoffel, Mais, Raps, Wintergetreide und Sommergetreide.

Anzahl verwendeter Zeitschnitte	2016														
	2011			2012			2013			2014			2015		
	Sentinel-2														
	Beste OA	Ø- OA	Beste OA Ø- OA	Beste OA	Ø- OA	Beste OA Ø- OA	Beste OA	Ø- OA	Beste OA Ø- OA	Beste OA	Ø- OA	Beste OA Ø- OA			
1	0,865	0,759	0,910	0,818	0,905	0,891	0,764	0,697	0,917	0,817	0,921	0,815			
2	0,906	0,859	0,962	0,919	0,952	0,941	0,861	0,824	0,950	0,918	0,952	0,899			
3	0,936	0,899	0,966	0,951	0,967	0,960	0,903	0,874	0,954	0,946	0,958	0,936			
4	0,938	0,920	0,966	0,961	0,967	-	0,915	0,899	0,961	0,956	0,962	0,950			
5	0,938	0,932	0,968	0,965	-	-	0,910	-	0,965	-	0,960	0,956			
6	0,938	-	0,966	-	-	-	-	-	-	-	0,958	-			

Nimmt man die Tabelle 11 bei der Interpretation der Ergebnisse zu Hilfe, so lässt sich erkennen, dass die Jahre in denen eine OA von unter 0,96 (Maximum in den übrigen Jahren) erzielt wurde auf Zeitserien basieren, die keinen Zeitschnitt im Juli aufweisen. Der phänologische Verlauf im Juli ist aber möglicherweise von großer Bedeutung für die korrekte Identifizierung von landwirtschaftlichen Kulturen. Außerdem zeigen die Ergebnisse für Sentinel-2 aus dem Jahr 2016 im Vergleich zu den RapidEye-Ergebnissen der Jahre 2011-2015, dass die Verwendung der geringeren räumlichen Auflösung von Sentinel-2 keinen negativen Einfluss auf die OA hat.

Durchführung einer mehrwöchigen Geländekampagne

Im Mai 2014 wurde zwischen dem 05.05. und dem 23.05. eine dreiwöchige Geländekampagne durchgeführt. Diese Geländekampagne konzentrierte sich auf die UG Flächen in Mitteldeutschland und diente insbesondere zur Differenzierung der Wintergetreidearten Weizen, Gerste und Roggen. Diese Informationen werden im weiteren Projektverlauf zur Untersuchung der optionalen Klassentiefen (AP 4.1) herangezogen. Die gesammelten Geländeinformationen bestehen u.a. aus:

- phänologischem Stadium nach BBCH-Code
- relativem Bodenbedeckungsgrad
- Blattflächenindex und
- volumetrischer Bodenfeuchte

Außerdem wurde die, in diesem Zeitraum (21.06.) stattfindende und vom Projektpartner UFZ koordinierte, Flugkampagne zur Simulierung von Sentinel-2-Daten durch Messung spektraler Bodenreferenzdatensätze unterstützt.



Abbildung 23: Digitale Photographien von agrarischen Testflächen im Untersuchungsgebiet. Hier die Wintergetreidearten Gerste (oben) und Weizen (unten).

2.1.2.2 Arbeitspaket 4.1: Datenoptimierung mittels phänologischer Zeitfenster und statistischer Parameter

Die zur Bearbeitung des Arbeitspakets ausgewählten Szenarien zur Beurteilung der Klassifikation waren neben der Integration phänologischer Maße die Variation der Datendichte inkl. Variation der Datenverfügbarkeit und von Referenzdaten. Außerdem wurden Klassentiefe, Klassenheterogenität und Sensorauflösung variiert. Die Ergebnisse der Szenarienanalyse werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Arbeitspaket 4.1: Integration phänologischer Maße als Merkmale

Gemäß aktualisiertem Zeitplan wurde die Integration der phänologischen Maße in das Analysewerkzeug implementiert. Der Schwerpunkt dieses Arbeitspaktes lag in der Untersuchung von Beziehungen zwischen optimalen Satelliten-Aufnahmezeitpunkten und spezifischen phänologischen Phasen in Abhängigkeit von der spektralen Sensorcharakteristik. Dazu wurden im UG mit Hilfe der Modelle PHASE und PIM sowohl klassische phänologische Maße (UFZ, siehe Tabelle 13) als auch sensorspezifische Indizes (GeoMLU) hinsichtlich der optimalen phasenspezifischen Trennbarkeiten analysiert. Zunächst erfolgte die Integration der vom UFZ bereitgestellten phänologischen Maße (Tabelle 13).

Tabelle 13: Integrierte phänologische Maße des UFZ

Phänologisches Maß
Erster NDVI
Ergrünen
MaxNDVI
MinNDVI
integrierter NDVI
MaxDOY
MinDOY
Seneszenz
Vegetationsperiode
Ergrünen (Winter)
integrierter NDVI (Winter)
Vegetationsperiode (Winter)

Beim ersten Experiment wurden die bereitgestellten phänologischen Maße genutzt, um den Datensatz der bereits berechneten zonalen Features der Zeitschnittpermutation zu ergänzen. Dieser erweiterte *Feature-Datensatz* wurde zum Trainieren des *Random-Forest-Klassifikators* und zur Berechnung der Klassifikationsgenauigkeit verwendet. Die Ergebnisse der Klassifikationsgüte zeigen, dass unter Verwendung der abgeleiteten phänologischen Maße keine Verbesserung der maximal erreichbaren Klassifikationsgüte im Vergleich zu den spektralen Merkmalen (siehe Tabelle 2-14) erzielt werden kann. Allerdings gelang hier bereits mit nur wenigen Zeitschnitten (monotemporal und bitemporal) eine, auch im Mittel, hohe Genauigkeit. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die saisonal abgeleiteten phänologischen Maße bereits die zeitlichen Informationen der gesamten Zeitreihe beinhalten.

Das zweite Experiment in diesem Zusammenhang verwendete ausschließlich die phänologische Maße zur Klassifikation mit dem Analysewerkzeug MELanGe. Da die einzelnen Maße aufgrund ihrer Berechnungsweise keinem konkreten Zeitschnitt zugeordnet werden können, erfolgte eine Klassifikation ohne Permutation. Die Gesamtklassifikationsgenauigkeit (OA, *Overall Accuracy*) betrug in diesem Fall 0,826 (siehe Tabelle 2-14). Im Vergleich zur ausschließlichen Verwendung der phänologischen Maße kann allerdings eine Steigerung der Klassifikationsgenauigkeit durch die synergetische Verwendung von spektralen Merkmalen und phänologischen Maßen erzielt werden (Steigerung um 11,3% auf 0,938).

Nach der Integration der vom Projektpartner UFZ bereitgestellten phänologischen Maße erfolgte die Integration der optimierten spektralen Indizes der GeoMLU. Analog zur Integration der Maße des UFZ, wurden die optimierten spektralen Indizes in das Analysewerkzeug MELanGe integriert und zunächst an den Datensatz der bereits berechneten Features der Zeitschnittpermutation angehängt. Dieser erweiterte *Feature-Datensatz* wurde zum Trainieren des *Random-Forest-Klassifikators* und zur Berechnung der Klassifikationsgenauigkeit verwendet. Bei Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 2-14 wird ersichtlich, dass die Integration der optimierten spektralen Indizes zu einer Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit führt (0,946). Bemerkenswert ist hier, dass eine Hinzunahme der ursprünglich verwendeten spektralen Merkmale zu keiner Steigerung, im Vergleich zur ausschließlichen Verwendung der optimierten Indizes (0,945), mehr führte.

Tabelle 2-14: Gesamtklassifikationsgenauigkeiten (OA) der Klassifikationen nur mit spektralen Merkmalen, mit spektralen und phänologischen Maße, mit ausschließlich phänologischen Maßen, mit spektralen Merkmalen, mit spektralen und optimierten Indizes und nur mit optimierten Indizes. Unterschieden in 6 landwirtschaftliche Klassen: Kartoffel, Mais, Raps, Zuckerrüben, Winter- und Sommergetreide.

Anzahl verwendeter Zeitschnitte	<u>nur</u> <u>mit</u> <u>spektralen</u> <u>Merkmalen</u>		<u>mit phänologischen Maßen</u>		<u>phänologische Maße</u>	<u>mit optimierten Indizes</u>		<u>nur</u> <u>mit optimierten Indizes</u>	
	Beste OA	Ø-OA	Beste OA	Ø-OA		Beste OA	Ø-OA	Beste OA	Ø-OA
1	0,865	0,759	0,892	0,864	-	0,869	0,770	0,867	0,778
2	0,906	0,859	0,918	0,895	-	0,916	0,873	0,922	0,875
3	0,936	0,899	0,936	0,913	-	0,941	0,912	0,938	0,915
4	0,938	0,920	0,937	0,926	-	0,945	0,929	0,944	0,932
5	0,938	0,932	0,941	0,933	-	0,945	0,939	0,946	0,941
6	0,938	-	0,938	-	0,826	0,945	-	0,946	-

Arbeitspaket 4.2: Variation der Datendichte (Datenverfügbarkeit und Referenzdaten)

Das in AP 3 entwickelte Validierungswerkzeug „MELanGe“ bietet, wie bereits oben beschrieben, im dritten Modul „Visuelle Interpretation der Klassifikationsgüte“ die Möglichkeit zur Simulation unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten. Durch Selektion bzw. Deselektion von Zeitschnitten kann die Klassifikationsgüte aller Zeitschnittkombination aus den ausgewählten Zeitschnitten visualisiert und mit anderen verglichen werden. In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind Boxplotdiagramme der Klassifikationsgüte für Sommergetreide (Abbildung 24) und Wintergetreide (Abbildung 25) dargestellt. Abbildung 24a und Abbildung 25a zeigen jeweils die Klassifikationsgüte aller Permutationen unter Verwendung sämtlicher zur Verfügung stehender Zeitschnitte (siehe Tabelle 10). Wohingegen in Abbildung 24b und Abbildung 25b Ergebnisse alle Permutationen für eine simuliert geringe Datenverfügbarkeit illustrieren. Im konkreten Fall sind das die Zeitschnitte 3, 4, 5 und 6. Während sich die Klassifikationsgenauigkeit für Wintergetreide durch die reduzierte Datenverfügbarkeit nur geringfügig (Maximum sinkt von 0,93 auf 0,90) ändert, führt die veränderte Datenverfügbarkeit zu einer deutlichen Verschlechterung der Klassifikationsgenauigkeit (um 18%, Maximum sinkt von 0,71 auf 0,53) für die Klasse Sommergetreide.

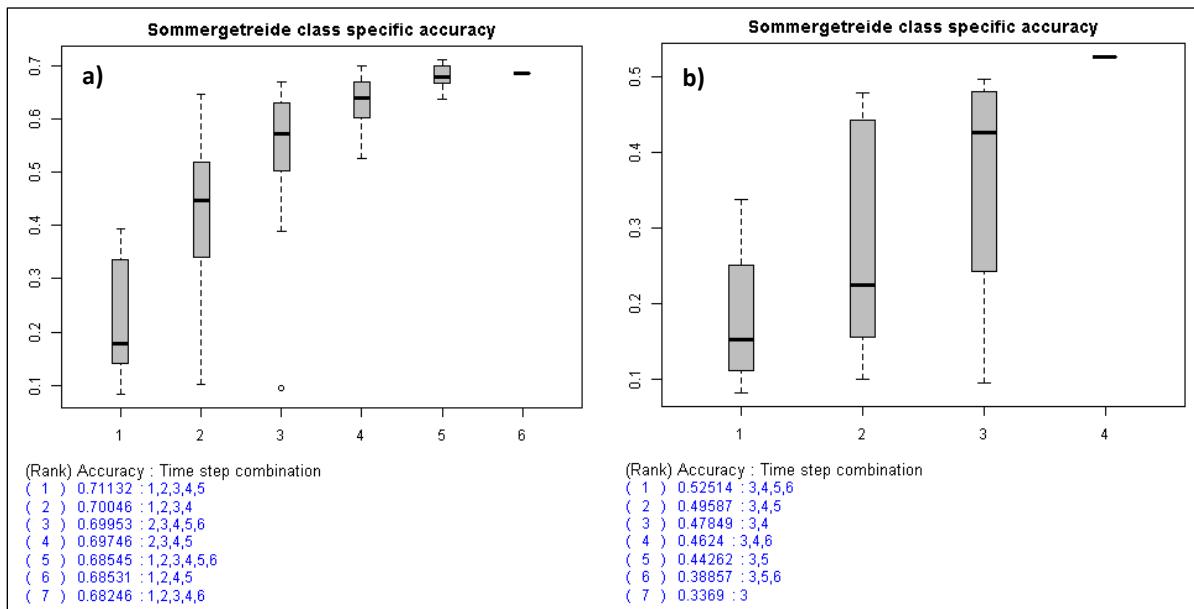


Abbildung 24: Vergleich der Klassifikationsgenauigkeit der Permutationen unterschiedlicher Datenverfügbarkeit für Sommergetreide, a) sämtliche Zeitschnitte verfügbar, b) nur die Zeitschnitte 3, 4, 5, 6 sind verfügbar.

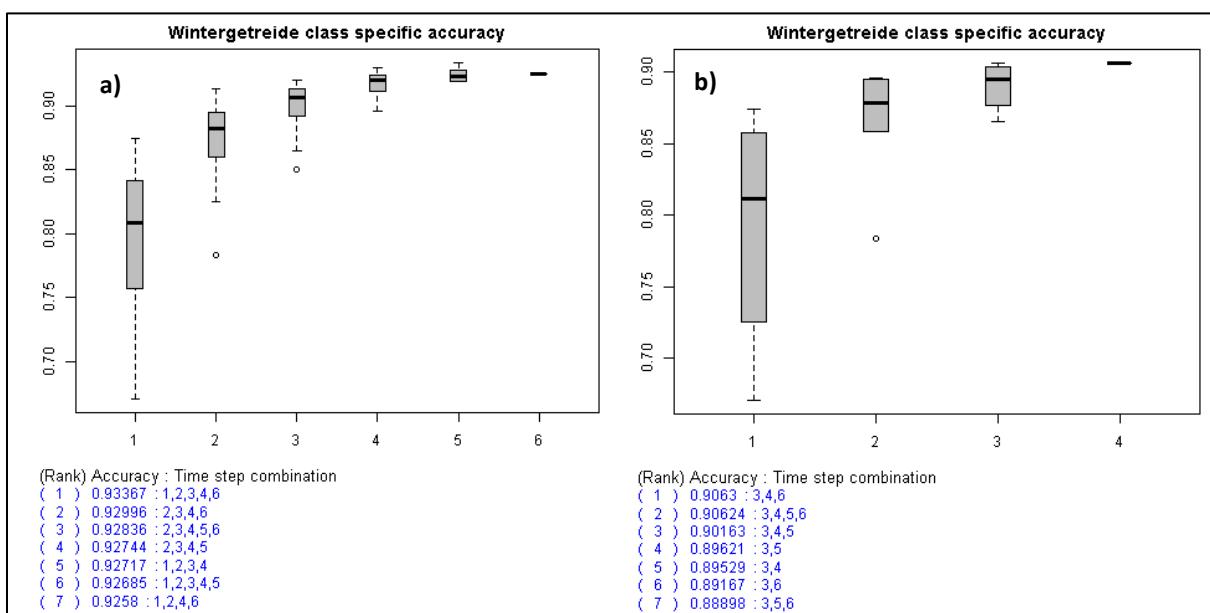


Abbildung 25: Vergleich der Klassifikationsgenauigkeit der Permutationen unterschiedlicher Datenverfügbarkeit für Wintergetreide, a) sämtliche Zeitschnitte verfügbar, b) nur die Zeitschnitte 3, 4, 5, 6 sind verfügbar.

Bei der Variation der Referenzdatendichte, wurden unterschiedliche Methoden zur Referenzobjektauswahl untersucht. Ziel war es, die Anzahl der für die Klassifikation verwendeten Referenzobjekte zu reduzieren. Hierzu wurden aus der Gesamtmenge der Objekte 30% der Referenzobjekte selektiert. Dabei wurden drei unterschiedliche Auswahlmethoden untersucht, die aus der Gesamtmenge:

- rein zufällig,
- zufällig und proportional zur Häufigkeit der Zielklasse in der Gesamtmenge, sowie
- zufällig und nach Zielklasse, Bodentyp und Schlaggröße stratifiziert ein Anteil der Referenzobjekte selektiert.

Die Ergebnisse dieser Analysen werden zusammen mit den Ergebnissen aus Arbeitspaket 5 in Kapitel 2.1.2.3 vorgestellt.

Variation der Klassentiefe

Die Variation der thematischen Auflösung (d.h. der Klassentiefe) wurde für das UG Mitteldeutschland anhand der Klasse „Getreide“ untersucht. Hier zeigte sich, dass durch die Erhöhung der Klassentiefe eine Verschlechterung der maximal erzielbaren Klassifikationsgüte für einige Getreideklassen eintritt. Ein Beispiel für die unterschiedliche Gesamtklassifikationsgüte ist in Abbildung 26 für das Untersuchungsgebiet Mitteldeutschland im Jahr 2011 dargestellt.

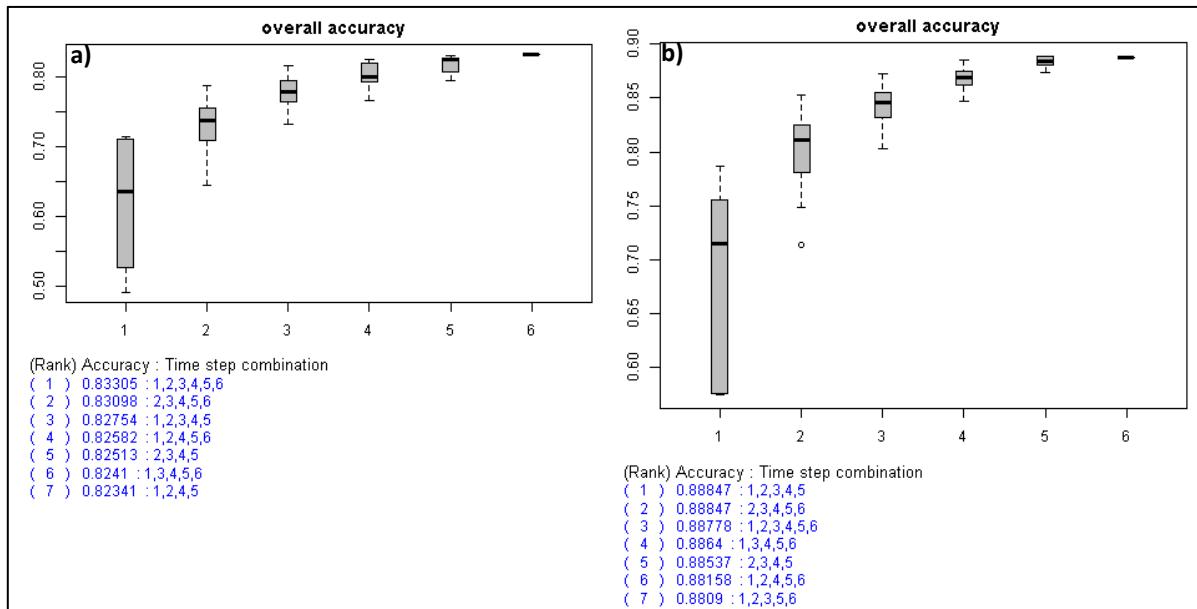


Abbildung 26: Vergleich der Gesamtklassifikationsgenauigkeit des Jahres 2011 für das UG Mitteldeutschland in unterschiedlichen thematischen Auflösungen für Getreide, a) Getreide getrennt gemäß Zielklassenspezifikation, b) Getreide zusammengefasst zu Winter- und Sommergetreide.

Die in der Abbildung dargestellte Verteilung der OA weist eine höhere Klassifikationsgüte (Max: 0,89) bei der Klassifikation mit thematisch niedriger aufgelösten Zielklassen auf (Abbildung 26b), als bei der Klassifikation mit höherer thematischer Auflösung (Max: 0,83, siehe Abbildung 26a). Dies ist dadurch bedingt, dass die klassenspezifischen Genauigkeiten (F1) der Getreideunterarten eine große Streuung im Wertebereich aufweisen. Winterweizen erreicht mit 0,88 zwar annähernd die OA von Wintergetreide 0,93, jedoch erzielen die Wintergetreideunterarten Gerste und Roggen deutlich geringere maximale klassenspezifische Genauigkeiten von 0,77 bzw. 0,13.

Die Variation der thematischen Auflösung wurde ergänzend anhand der Klasse „Wintergetreide“ für das UG Demmin untersucht (Abbildung 27). Analog zu den bereits vorgestellten Erkenntnissen zeigt sich, dass durch die Erhöhung der Klassentiefe eine Verschlechterung der maximal erzielbaren Klassifikationsgüte die Subgetreideklasse Wintergerste eintritt (Winterweizen \approx 0,85, Wintergerste \approx 0,75 im Vergleich zu Wintergetreide 0,93).

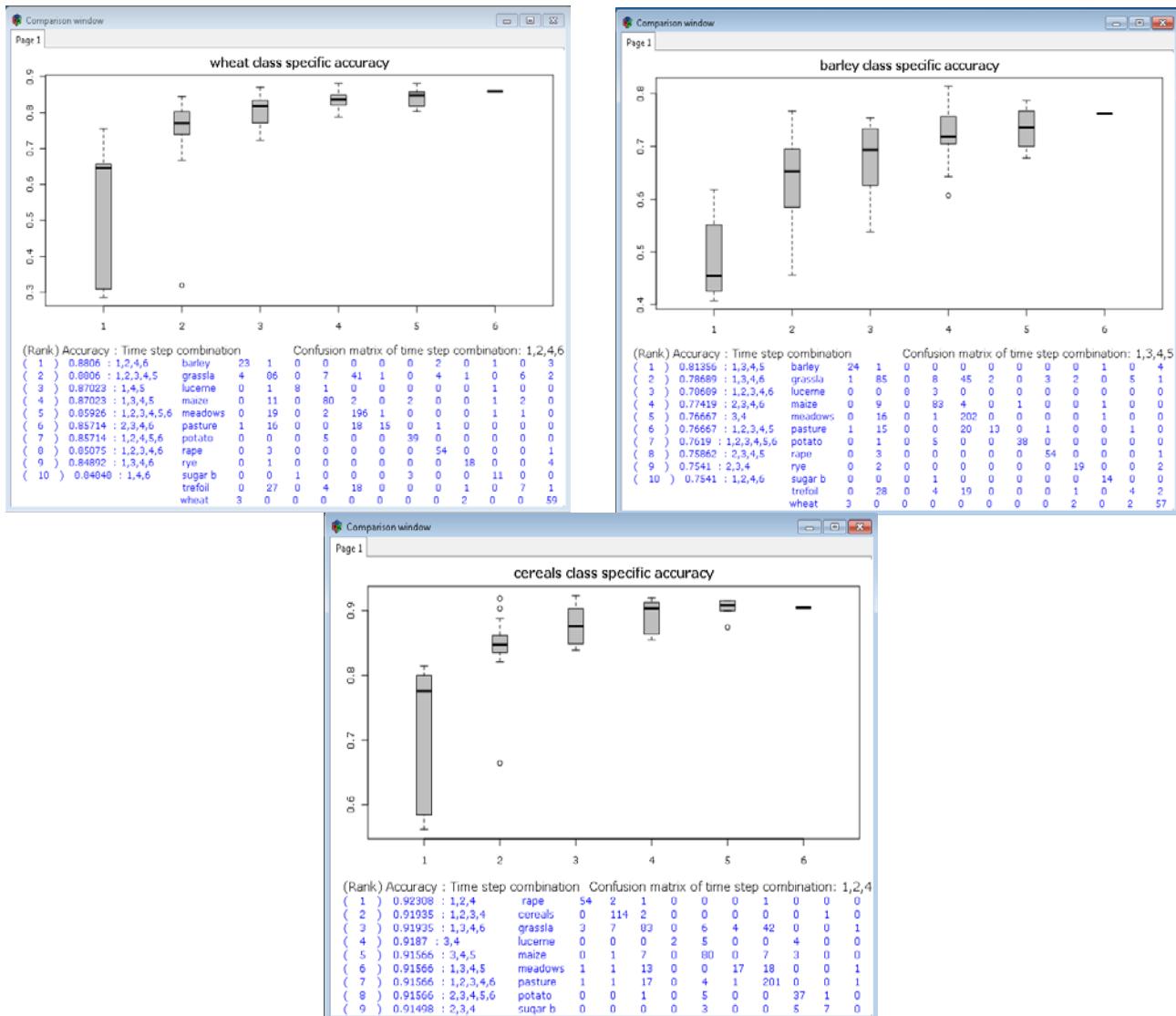


Abbildung 27: Variation der thematischen Auflösung für Wintergetreide für das Jahr 2010 im UG Demmin.

Die klassenspezifischen Genauigkeiten von Wintergerste weisen eine große Streuung im Wertebereich auf. Winterweizen erreicht mit 0,88 eine hohe Klassifikationsgüte, die der von Wintergetreide 0,93 ähnelt. Die Wintergetreideunterart Wintergerste erzielten deutlich geringere maximale klassenspezifische Genauigkeiten von maximal 0,81 (bei einer Kombination von 4 Zeitschnitten). Bei einer anderen Analyse in diesem UG stellte sich heraus, dass die klassenspezifische Genauigkeit unter Verwendung unterschiedlicher thematischer Detailschärfe (z.B. F1-measure für Weizen $\approx 0,87$, Gerste $\approx 0,77$, Roggen $\approx 0,79$) nicht an die Genauigkeit für die Gesamtklasse Getreide (F1-measure $\approx 0,92$) heranreichen. In Ergänzung zu den bereits beschriebenen Experimenten zur Integration der phänologischen Maße und optimierten Indizes erfolgte eine Analyse deren Auswirkungen auf die OA mit höher thematischer aufgelösten Eingangsdaten. Die Boxplot-Darstellungen der Ergebnisse des zweiten Experiments sind in Abbildung 28 (oben) illustriert und die Werte in Tabelle 15 aufgeführt. Im Vergleich dazu sind in Abbildung 28 (unten) die Ergebnisse der Klassifikation nur mit spektralen Merkmalen dargestellt bzw. aufgelistet (Tabelle 15). Die Ergebnisse der Klassifikationsgüte zeigen analog zu den unter 2.1.2.1 beschriebenen Ergebnissen, dass unter Verwendung der abgeleiteten phänologischen Maße eine Verbesserung

der Klassifikationsgüte (siehe Tabelle 15) erzielt werden kann (auf 0,872). Besonders für Klassifikationen mit wenigen Zeitschnitten (monotemporal bis 3er-Zeitschnitt-Kombinationen). Es wird erneut darauf hingewiesen, dass die saisonal abgeleiteten phänologischen Maße bereits die zeitlichen Informationen der gesamten Zeitreihe beinhalten und dieser Einfluss bei den Klassifikationsergebnissen zu berücksichtigen ist.

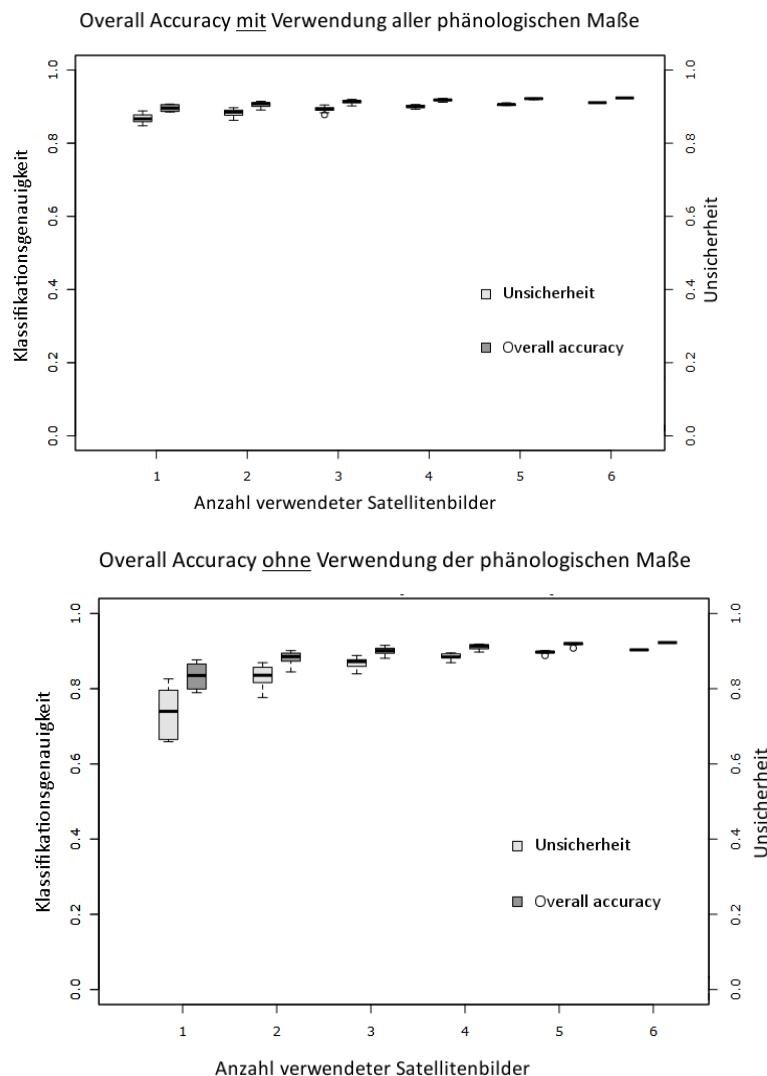


Abbildung 28: Ergebnisse der Klassifikationsgüte mit und ohne Integration der UFZ phänologischen Maße.

Die erreichbare Klassifikationsgenauigkeit liegt bei der höheren thematischen Auflösung bei 0,872 im Vergleich zur erreichbaren Genauigkeit mit geringerer Detailgrad (0,938). Die höchsten erzielbaren Genauigkeiten lassen sich erneut mit den optimierten spektralen Indizes erzielen, obwohl auch hier eine insgesamt um 6% geringe OA (0,894) erzielt werden konnte als mit geringerer thematischer Auflösung 0,946. Verwendet wurden:

- (Abbildung 28, oben) ursprüngliche spektrale Klassifikationsfeatures
- (Abbildung 28, Mitte) ursprüngliche spektrale Klassifikationsfeatures plus optimierte Indizes
- (Abbildung 28, unten) ausschließlich die optimierte Indizes

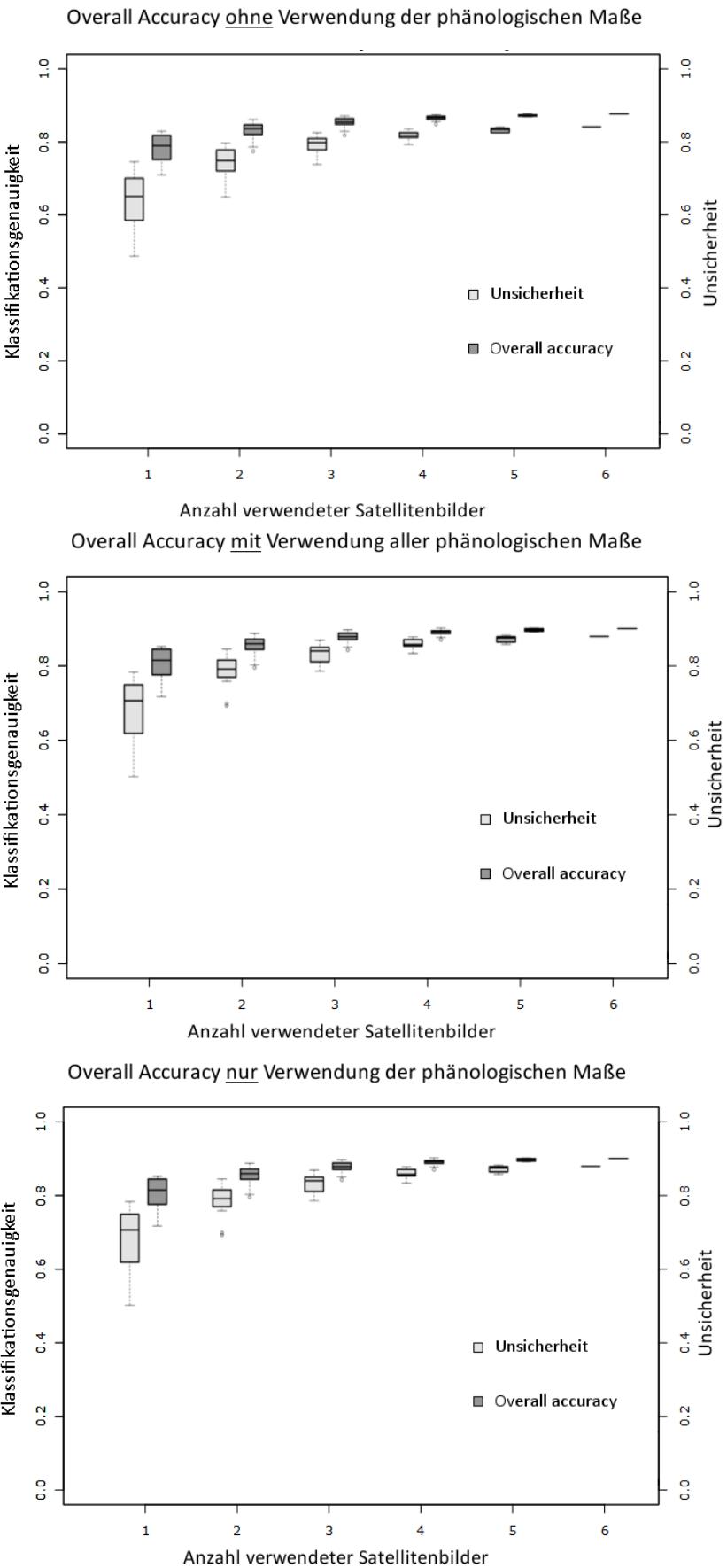


Abbildung 29: Ergebnisse der Integration der phänologischen Maße der GeoMLU.

Allgemein kann festgestellt werden, dass mit Verwendung der abgeleiteten phänologischen Maße eine Verbesserung der Klassifikationsgüte bzw. Klassifikationsunsicherheit erzielt werden kann. Die Verbesserung beträgt im Mittel etwa 4% Verbesserung der Klassifikationsgüte und 3% der Unsicherheit. Unterstützend kann die Wichtigkeitsanalyse (Abbildung 32) zur Interpretation der Ergebnisse aus Abbildung 29 herangezogen werden.

Tabelle 15: Gesamtklassifikationsgenauigkeiten (OA) der Klassifikationen nur mit spektralen Merkmalen, mit spektralen und phänologischen Maße, mit ausschließlich phänologischen Maßen, mit spektralen Merkmalen, mit spektralen und optimierten Indizes und nur mit optimierten Indizes. Unterschieden wurde in 11 landwirtschaftliche Klassen: Kartoffel, Mais, Raps, Zuckerrüben, Wintergerste, -weizen und -roggen, sowie Sommerhafer, -hartweizen, -gerste und -weizen.

Anzahl verwendeter Zeitschnitte	nur mit spektralen Merkmalen		mit phänologi- schen Maßen		nur phäno- logische Maße		mit optimier- ten Indizes		nur mit optimierten Indizes	
	Beste OA	Ø- OA	Beste OA	Ø- OA	Beste OA	Beste OA	Ø- OA	Beste OA	Ø- OA	
1	0.780	0.675	0.831	0.790	-	0.797	0.690	0.806	0.693	
2	0.836	0.778	0.847	0.822	-	0.857	0.796	0.859	0.800	
3	0.855	0.822	0.862	0.840	-	0.875	0.841	0.877	0.846	
4	0.865	0.845	0.871	0.854	-	0.884	0.864	0.885	0.869	
5	0.868	0.859	0.868	0.863	-	0.887	0.879	0.893	0.883	
6	0.868	-	0.872	-	0,748	0.892	-	0.894		

Bei Betrachtung der Abbildung 29 wird außerdem deutlich, dass sich die Genauigkeiten nicht wesentlich verändern, wenn man zur Klassifikation ausschließlich die optimierten Indizes der GeoMLU verwendet (Abbildung 29, unten und Tabelle 15). Hinsichtlich der Beurteilung der Verbesserung der Recheneffizienz muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Ableitung der phänologischen Maße Rechenzeit benötigt, die teilweise durch potentiell geringe Rechenzeiten bei der Berechnung der spektralen Indizes (innerhalb des MELanGe-Algorithmus) gespart werden kann. Die besten Klassifikationsergebnisse der thematisch höher aufgelösten Klassen wurden unter Verwendung der optimierten spektralen Indizes erzielt; dies entspricht den Ergebnissen mit niedrigerer thematischer Auflösung (Tabelle 2-14). Insgesamt werden durch die Erhöhung des thematischen Detailgrades, im Vergleich zu den Ergebnissen aus Tabelle 2-14, um 5-7% schlechtere Klassifikationsgenauigkeiten erzielt. Dies ist aber in Anbetracht des Informationsgewinns zu tolerieren, d.h. die OA für hohe thematische Auflösungen sind noch ausreichend genau.

Zur Beurteilung welche phänologische Maße am wichtigsten für die Klassifikation mit höherer thematischer Auflösung sind, wurde die *Importance*-Ausgabe des Klassifikationswerkzeugs genutzt. Hier werden die verwendeten Features anhand der Variablenwichtigkeit beurteilt, d.h. wie wichtig sind die Features (sprich Indizes) bei der Klassifikation. Dies geschieht über die so genannte *MeanDecreaseAc*

curacy. Diese ist ein RF internes Beurteilungsmaß und gibt, vereinfacht gesagt, an wie viele Objekte im Mittel falsch klassifiziert werden würden, wenn man das betreffende Feature bei der Klassifikation nicht berücksichtigt. In diesem Bericht wird daher von mittlerem Genauigkeitsverlust gesprochen, dieser ist für das erste Experiment in Abbildung 29 dargestellt.

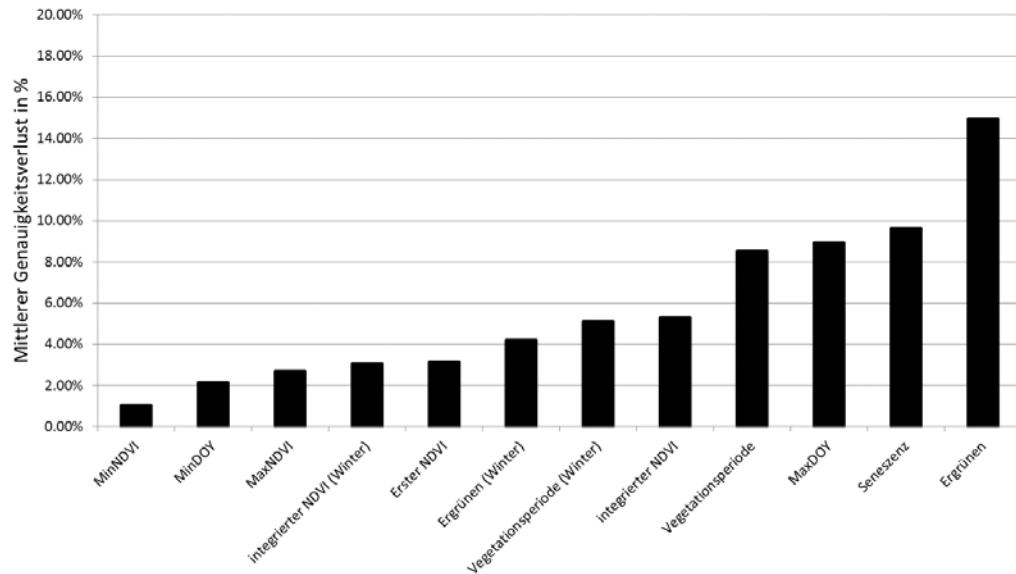


Abbildung 30: Variablenwichtigkeit ausgedrückt durch den mittleren Genauigkeitsverlust in % für die ausschließliche Verwendung der phänologischen Maße zur Klassifikation.

Hieraus wird ersichtlich, dass die Information über das Ergrünen (vollständige Übersicht über die phänologischen Maße siehe Tabelle 13) am meisten Einfluss (Genauigkeitsverlust von 15 % bei fehlender Information) auf die Klassifikation hat, gefolgt von den Maßen Seneszenz, dem maximalen Tag des Jahres (engl. Day of Year, DOY) und der Vegetationsperiode.

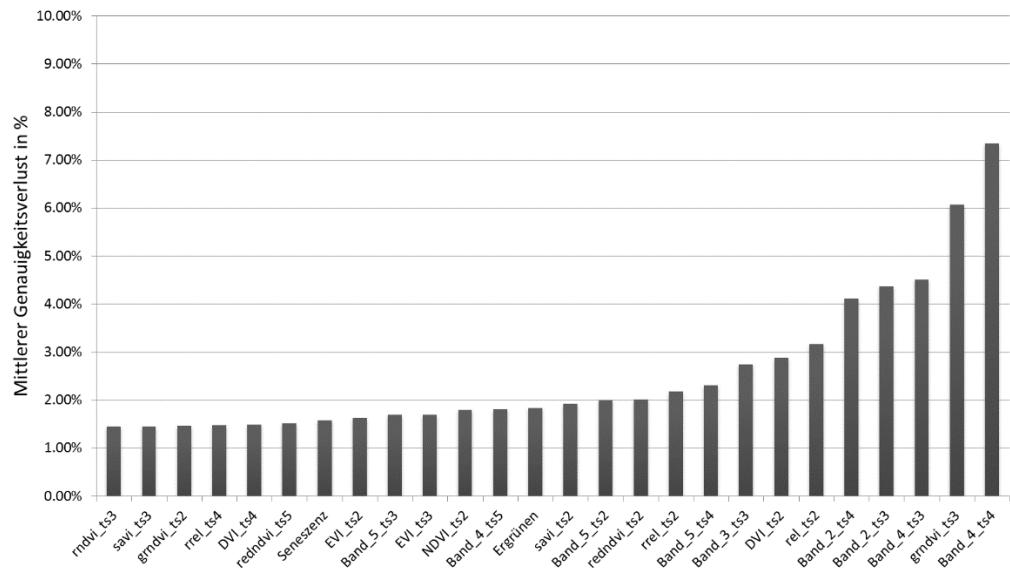


Abbildung 31: Mittlerer Genauigkeitsverlust in % unter Berücksichtigung der phänologischen Maße des UFZ für 2011.

Auch für den kombinierten *Feature* Datensatz aus spektralen und phänologischen Maßen wurde die Variablenwichtigkeit untersucht. Das dazugehörige Balkendiagramm ist in Abbildung 30 dargestellt. Analog zum vorher beschriebenen Experiment scheinen die phänologischen Maße Ergrünen und Seneszenz am wichtigsten für die Klassifikation. Die Klassifikation erfährt allerdings eine Verbesserung durch die Verwendung der spektralen Indizes bzw. Reflektanzen der Bänder. Demnach besitzen der *Red-Edge* (7,2% und 4,5%) sowie der grüne Kanal (4,3% und 4,1%) der Zeitschnitte (ts) 3 (08. Mai) und 4 (06. Juni) hohe Wichtigkeit bei den Klassifikationsmerkmalen. Wichtige spektrale Indizes sind u.a. der Green NDVI, die Krümmungs-Indizes (REL und RREL) sowie der DVI. Bei den spektralen Indizes fällt auf, dass besonders Zeitschnitt 2 (24. April) zur Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit beiträgt. Schließlich wurde die Variablenwichtigkeit noch für die Klassifikationsergebnisse mit hoher thematische Auflösung und optimierten spektralen Indizes durchgeführt.

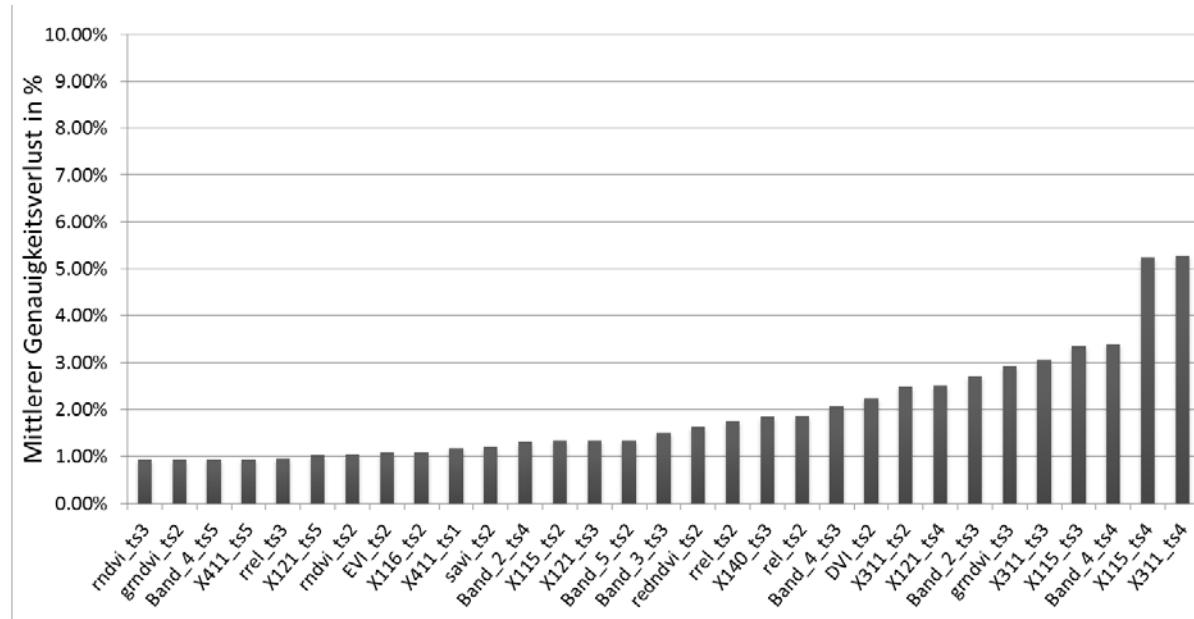


Abbildung 32: Variablenwichtigkeit der Klassifikationsfeatures für die Verwendung aller Features. MeanDecreaseAccuracy gibt an wie viele Objekte im Mittel falsch klassifiziert werden würden, wenn man das Feature nicht berücksichtigt. Hinweis: ts = time step, X = Indizes GeoMLU

Hierbei fällt auf, dass zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmte Indizes besonders zur Verbesserung beitragen, diese sind beispielsweise:

- die optimierten Trennungsindizes für Raps (X311) und Winterweizen (X115) an Zeitschnitt 3 (08. Mai 2011) und 4 (6. Juni 2011)
- der *Red-Edge*-Kanal zu Zeitpunkt 4 (6. Juni 2011)
- sowie der grüne Kanal und der *greenNDVI* zu Zeitpunkt 3 (08. Mai 2011)

Bisher wurde zur Beurteilung der Klassifikationsgüte ausschließlich die OA herangezogen. Diese gibt allerdings nur Auskunft, darüber wie viele Objekte insgesamt richtig klassifiziert wurden. Beinhaltet allerdings keine Metrik zur Beurteilung der einzelnen Klassen. Daher wird im Folgenden an den Beispielen der Klassen Kartoffeln und Sommerhartweizen der Einfluss der zu verwendenden Indizes auf

die Klassengenauigkeit (F1) analysiert. Unter Zuhilfenahme der Ergebnisse aus Tabelle 16 wird ersichtlich, dass für die „kleineren“ Klassen mit geringem Vorkommen im UG der Einfluss der optimierten Indizes aufs Klassifikationsergebnis größer ist als auf die OA. Wohin gegen die OA im Jahr 2011 lediglich 2,6% betrug (vgl. Tabelle 15) werden die Klassen Kartoffeln und Hartweizen um 6,5% bzw. 8,8% verbessert. Nochmal zur Erklärung: Die besseren F1-Genauigkeiten spiegeln sich nicht direkt in der OA wieder, da es sich auch um Klassen mit einem geringen Vorkommen im UG handelt (vgl. Tabelle 8) und daher ist der Einfluss dieser Klassen auf die OA geringer als beispielweise der der häufiger vorkommenden Klassen Raps und Winterweizen, mit insgesamt hohen Genauigkeiten.

Tabelle 16: Ergebnisse der Klassifikationsgenauigkeit der Klassen Kartoffeln und Sommerhartweizen berechnet nur mit spektralen Indizes und mit optimierten Indizes für das Jahr 2011 im UG Mitteldeutschland.

Anzahl verwendeter Zeitschnitte	Kartoffeln nur mit spektralen Merkmalen		Kartoffeln mit optimierten Indizes		Hartweizen nur mit spektralen Merkmalen		Hartweizen mit optimierten Indizes	
	Beste F1	Ø- F1	Beste F1	Ø- F1	Beste F1	Ø- F1	Beste F1	Ø- F1
1	0.133	0.044	0.000	0.000	0.392	0.167	0.464	0.199
2	0.565	0.138	0.588	0.112	0.500	0.361	0.565	0.408
3	0.625	0.258	0.667	0.227	0.580	0.464	0.626	0.533
4	0.622	0.376	0.667	0.369	0.599	0.543	0.655	0.599
5	0.638	0.474	0.703	0.491	0.628	0.582	0.659	0.637
6	0.583		0.571		0.613		0.701	

Einfluss der Standorteigenschaften auf die räumliche Unsicherheit

Das Validierungswerzeug zur Bestimmung der Klassifikationsgüte („MELanGe“) wurde im Laufe des Projektes weiterentwickelt und um die Funktion zur Darstellung der räumlichen Unsicherheit erweitert, da die bisher implementierten Klassifikationsgütemaße weder auf die räumliche Verteilung noch andere Eigenschaften der Validierungsdaten eingeht, die z.B. durch unterschiedliche phänologische Zustände innerhalb einer Klasse verursacht werden. Hierzu wurde die sogenannte a-posteriori Wahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit mit der eine Zuordnung des Klassenlabels letztendlich erfolgt, verwendet. Mit Hilfe dieser Wahrscheinlichkeiten wird die sogenannte α -Quadrat Entropie berechnet:

$$H_{\alpha}(x) = \frac{1}{n * (2^{-2\alpha})} * \sum_{i=1}^n pr_i^{\alpha}(x) (1 - pr_i(x))^{\alpha}$$

Hierbei ist α ein Exponent der das Verhalten von H beschreibt und für die Implementierung in das Analysewerkzeug auf den empfohlenen den Wert 0,5 gesetzt wurde. Die normalisierte Form der α -Quadrat Entropie wird in der Ergebnisausgabe von MELanGe dargestellt. Werte nahe 0 bedeuten eine

hohe räumliche Unsicherheit und Werte nahe 1 stehen für eine geringe räumliche Unsicherheit des Klassifikationsergebnisses. Eine beispielhafte Ergebnisdarstellung der räumlichen Unsicherheit ist in Abbildung 32 dargestellt.

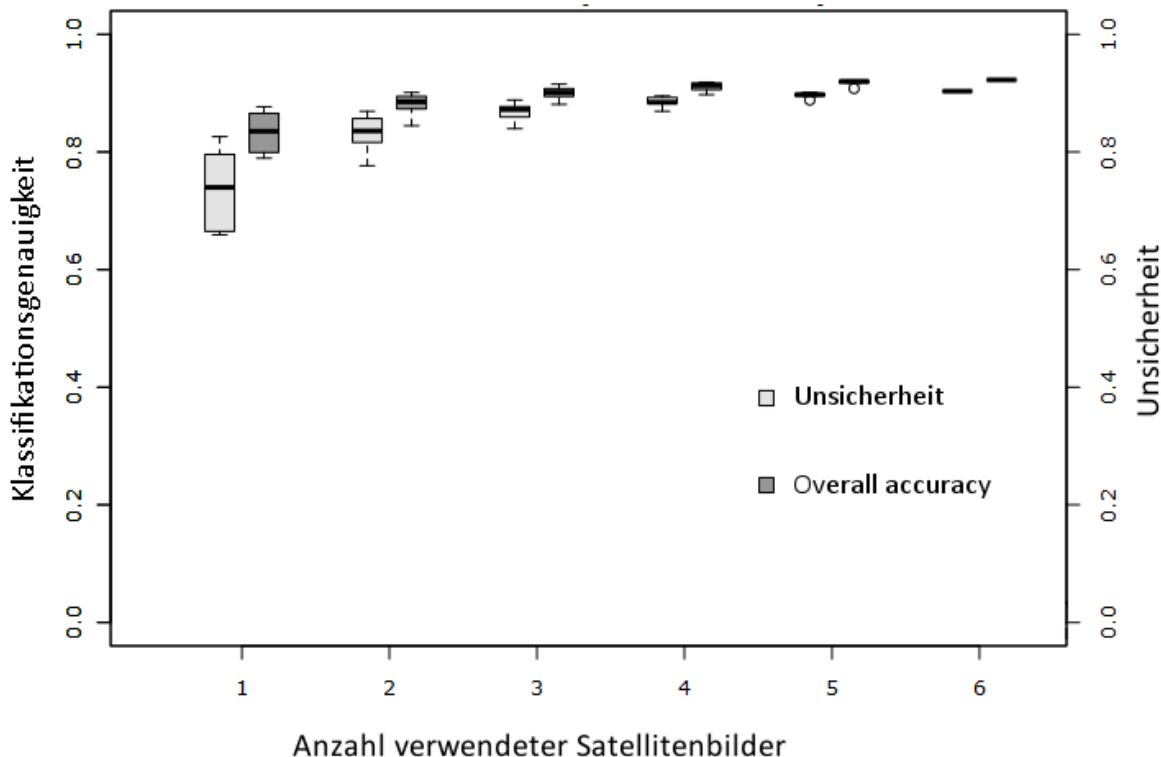


Abbildung 33: Darstellung der Ergebnisvisualisierung des Analysewerkzeugs „MELanGe“ nach Implementierung der Ausgabe eines Maßes der räumlichen Unsicherheit.

Der Abbildung 32 ist zu entnehmen, dass die räumliche Unsicherheit, genau wie die Klassifikationsgüte, mit zunehmender Anzahl verwendeter Satellitenszenen verbessert wird. Demnach herrscht bei Verwendung monotemporaler Klassifikationen nicht nur die größte Klassifikationsgenauigkeit, sondern auch die größte räumliche Unsicherheit der Klassifikationsergebnisse.

Arbeitspaket 4.1.4 Variation von Sensorauflösungen und Zusatzinformationen

Bis zur Verfügbarkeit von Sentinel-2-Datensätzen konnten die Einflüsse der Sensorauflösungen auf die Klassifikationsgüte nicht untersucht werden und auch nach Verfügbarkeit der Sentinel-Daten konnten keine RapidEye-Vergleichsdatensatz akquiriert werden. Daher ist diese Untersuchung nicht Bestand des vorliegenden Berichtes.

Adaption, Entwicklung und Anwendung von Red-Edge-Methoden auf Sentinel-2-Daten

Vorbereitend für die Nutzung von Sentinel-2-Daten wurde eine Liste der angepassten Klassifikationsfeatures erstellt, die als Eingangsdaten für den Klassifikationsalgorithmus verwendet werden sollen. Besondere Beachtung dabei fanden die Indizes im Red-Edge-Bereich von Sentinel-2 (Tabelle 17). Eine detaillierte Auflistung der, an die Spezifikation von Sentinel-2 angepassten, Features findet sich im Folgenden:

Tabelle 17: Eingabefeatures für die RF-Klassifikation, inkl. der angepassten Formeln zur Berechnung der Sentinel-2 spezifischen Indizes.

1. Reflektanzen der einzelnen Bänder

2. Vegetationsindizes

	Index Name	Abkürzung	Formel angepasst an Sentinel-2
a.	Greenness Index	GI	$B3/B4$
b.	Ratio Vegetation Index	RVI	$B8/B4$
c.	Blue-green Ratio	BGI	$B1/B3$
d.	Red-Green Ratio	RGI	$B4/B3$
e.	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(B7 - B4)/(B7 + B4)$
f.	Green NDVI	GNDVI	$(B9 - B3)/(B9 + B3)$
g.	Green NDVI hyper 1	GNDVI _{hyper1}	$(B8 - B3)/(B8 + B3)$
h.	Green NDVI hyper 2	GNDVI _{hyper2}	$(B7 - B3)/(B7 + B3)$
i.	Green Vegetation Index	VI _{Green}	$(B3 - B5)/(B3 + B5)$
j.	Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI	$\left(\frac{B8 - B4}{(B8 + B4 + L)} \right) \cdot (1 + L)$
k.	Enhanced Vegetation Index	EVI	$2.5 \left(\frac{B9 - B5}{(B9 + 6 \cdot B5 - 7.5 \cdot B1) + 1} \right)$
l.	Atmospherically Resistant Vegetation Index	ARVI	$\left(\frac{B9 - B4 - y(B1 - B4)}{B9 + B4 - y(B1 - B4)} \right)$
m.	Renormalized Difference Vegetation Index	RDVI	$\left(\frac{B8 - B4}{\sqrt{B8 + B4}} \right)$
n.	Modified Simple Ratio	MSR	$\left(\frac{\frac{B8 - B4}{B4} - 1}{\frac{B8 - B4}{B4} + 1} \right)$

3. Red-Edge-Indizes

	Index Name	Abkürzung	Formel angepasst an Sentinel-2
a.	RedEdge Chlorophyll Index	CI_re	$\frac{B9}{B5} - 1$
b.	Green Chlorophyll Index	CI_green	$\frac{B9}{B3} - 1$
c.	RedEdge Position Linear Extrapolation	REP_LE	$\frac{-(c1 - c2)}{(m1 - m2)} = m1 \cdot \lambda + c1$ $Line of refl_far_red(B4, B5) = m1 \cdot \lambda + c1$ $Line of refl_NIR(B6, B7) = m2 \cdot \lambda + c2$
d.	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	MTCI	$\frac{B6 - B5}{B5 - B4}$
e.	modified Normalized Difference 705	mND705	$\frac{B6 - B5}{B6 + B5 - 2 \cdot B1}$
f.	Maccioni Index	Maccioni	$\frac{B7 - B5}{B7 - B4}$
g.	Datt Index	Datt	$\frac{B8 - B5}{B8 - B6}$
h.	Datt Index 2	Datt2	$B8/B5$
i.	Simple RedEdge Ratio	SRR	$B6/B5$

j.	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	OSAVI2	$\frac{(1 + 0.16)(B6 - B5)}{B6 + B5 + 0.16}$
k.	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index 2	MCARI2	$1.5 \left(\frac{2.5(B8 - B4) - 1.3(B8 - B3)}{\sqrt{(2 \cdot B8 + 1)^2 - (6 \cdot B8 - 5 \cdot \sqrt{B4} - 0.5)}} \right)$
l.	RedEdge Inflection Point	REIP	$705 + 35 \left(\frac{\frac{B4+B7}{2} - B5}{B6 - B5} \right)$
m.	Normalized Area Over the reflectance Curve	NAOC	$1 - \frac{\int_{B4}^{B7} \text{Band reflectance } d\lambda}{152 \cdot B7}$
n.	RedEdge Ratio1	RRI1	$B9/B5$
o.	RedEdge Ratio2	RRI2	$B6/B4$
p.	Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index	TCARI	$3 * [(B5 - B4) - 0.2(B5 - B3) \left(\frac{B5}{B4} \right)]$
q.	Triangular Vegetation Index	TVI	$\frac{120(B6 - B3) - 200(B4 - B3)}{2}$
r.	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index	MCARI	$(B5 - B4) - 0.2(B5 - B3) \left(\frac{B5}{B4} \right)$

4. Krümmungs-Indizes

	Index Name	Abkürzung	Formel angepasst an Sentinel-2
a.	RedEdge Length	REL	
b.	Relative RedEdge Legth	RREL	
c.	RedEdge Curvature	CUR	

2.1.2.3 Arbeitspaket 5: Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse aus AP 2 und AP 4

Test der Robustheit des Verfahrens durch Wiederholung der Modellläufe

Die Robustheit des Verfahrens bzw. der Einfluss auf das Modellergebnis wurde durch die Analyse von jeweils 500 Wiederholungsläufen des Modells untersucht. Die Ergebnisse unterschieden sich nicht signifikant, so dass man von einem robusten Algorithmus zu Generierung von reproduzierbaren Ergebnissen sprechen kann.

Einfluss des Naturraums auf die Klassifikationsergebnisse

Gemäß Arbeitsplan wurde mit der Untersuchung des Einflusses des Naturraums auf die Klassifikation begonnen. Hierbei wurden Standorteigenschaften (Tabelle 18) berücksichtigt. Die Untersuchungen fanden in Kombination mit den Untersuchungen zu AP4.1 (Variation der Datendichte) und AP5.1 statt. Teile der Ergebnisse wurden bereits in Form von Posterbeiträgen auf der EGU 2015 in Wien (EGU2015-13270) und der ISRSE 2015 in Berlin präsentiert.

Tabelle 18: Verwendete Straten im UG Mitteldeutschland/Harz: Bodentyp, Schlaggröße und Landnutzung.

Stratum	Unterklassen	
Bodentyp	Ah/C-Böden	
	Schwarzerden	
	Braunerden	
	Lessives	
Schlaggröße	< 3ha	
	3ha - 25ha	
	> 25ha	
Landnutzung	hohe thematische Auflösung	niedrige thematische Auflösung
	Winterweizen	
	Wintergerste	Wintergetreide
	Winterroggen	
	Winterraps	Winterraps
	Mais	Mais
	Sommerweizen	
	Sommergerste	Sommergetreide
	Hartweizen	
	Hafer	
	Zuckerrüben	Zuckerrüben
	Kartoffeln	Kartoffeln
	Weide/Gras	Weide/Gras
	Sonstiges	Sonstiges

Die ersten Ergebnisse zur Untersuchung sind in Abbildung 34 dargestellt. Untersucht wurde der Einfluss auf die Gesamtklassifikationsgenauigkeit (OA) und die klassenspezifische Genauigkeit (F1-measure) von Weizen (hohe Stichprobenanzahl) und Gerste (niedrige Stichprobenanzahl). Für die Analyse wurden drei unterschiedliche Methoden zur Selektion der Referenzobjekte durchgeführt.

1. Stratifizierte Selektion, d.h. aus den gefundenen 126 Straten wurden proportional zur Häufigkeit der Klasse im UG 30 % der Referenzobjekte ausgewählt.
2. Proportionale Selektion anhand der 13 Landnutzungsklassen, d.h. es wurden 30% der Referenzobjekte proportional zur Häufigkeit der Klasse im UG ausgewählt.
3. Zufällige Auswahl von 30% der Referenzobjekte.

Die Ergebnisse implizierten eine robuste Anwendung des Analysewerkzeugs mit einer Gesamtgenauigkeit $\approx 0,8$, bei einer Standardabweichung (SD) von 0,72 – 1,14%. Die Ergebnisse für die Klasse Weizen liefert ähnliche Erkenntnisse, bei hohen klassenspezifischen Genauigkeiten und geringen SD 1,22 – 1,36%. Die Ergebnisse der erweiterten Analyse unter Verwendung zusätzlicher Straten (Tabelle 19) werden im Folgenden vorgestellt.

Tabelle 19: Ausgewählte Straten für weitere Analysen zum Einfluss des Naturraums auf die Modellergebnisse.

Stratum
Thematische Klasse (LU)
Bodentyp (soil)
DGM (relief)
Schlaggröße (size)
Hangneigung (aspect)
Gefälle (slope)

Die Berechnungen unter ausschließlicher Verwendung der thematischen Klassen weiß einen hohen Wertebereich der klassenspezifischen Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Klassifikationsgenauigkeit auf. Die zusätzliche Verwendung der Straten Schlaggröße und Bodentyp führt zu einer Verringerung in der Streuung der Klassifikationsgenauigkeit, aber auch zu einer Verschlechterung des Medians. Die zusätzliche Einbeziehung weiterer Standortfaktoren auf die stratifizierte Probennahme zeigt, dass im Vergleich zum ersten Zwischenbericht 2015 (verwendete Straten: Schlaggröße, Bodentyp und thematische Klasse) die Verwendung der Hangneigung einen positiven Einfluss ausübt. Allerdings ist den Ergebnissen auch zu entnehmen, dass sich ab drei verwendeten Straten eine Verschlechterung des Effekts der stratifizierten Probennahme einstellt. Für die letztendliche Auswahl geeigneter Straten zur Stratifizierung der Probennahme ist ein Kompromiss zwischen Robustheit (geringe Streuung des Wertebereichs) und der mittleren Klassifikationsgenauigkeit zu ermitteln.

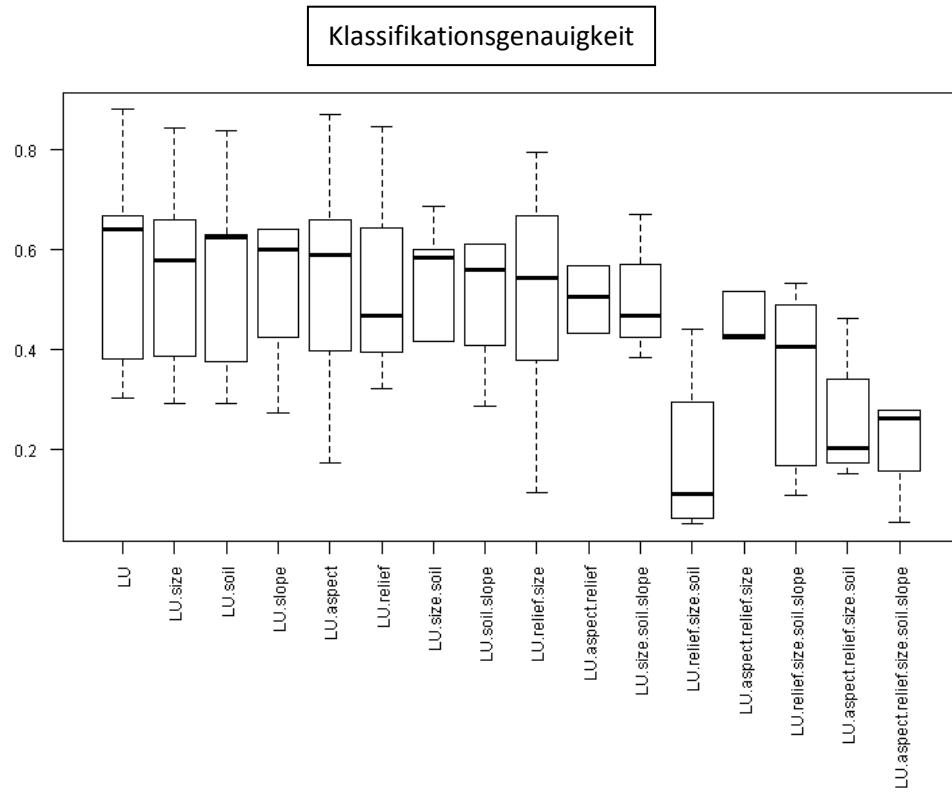


Abbildung 34: Illustration der mittleren klassenspezifischen Genauigkeit für die untersuchten Stratenkombinationen. Im Boxplot dargestellte Werte sind Minimum, Maximum, 25%-und 75-Quantil sowie Median der klassenspezifischen Genauigkeit.

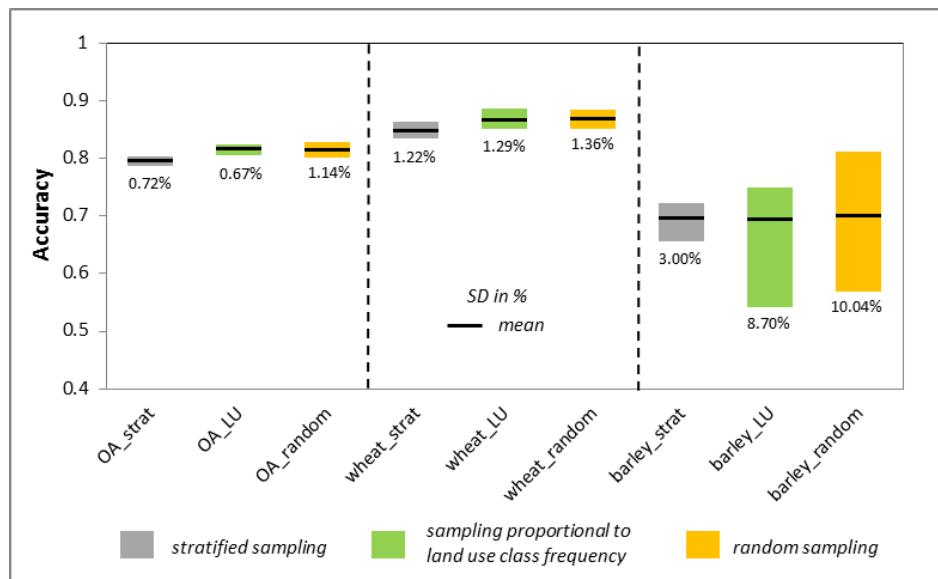


Abbildung 35: Boxplotdarstellung der Analyse des Einflusses auf die Klassifikationsgenauigkeit (Overall accuracy (links) und f-measure ausgewählter Landnutzungsklassen: Winterweizen (Mitte) und Gerste (rechts) im Jahr 2011 für das UG Mitteldeutschland/Harz. Datengrundlage: 700 Referenzobjekte, die entweder zufällig, proportional zur Klassenhäufigkeit oder stratifiziert selektiert wurden. Wiederholung der Modellläufe: 10.

Beim Vergleich mit der Klasse Gerste wird die Robustheit der stratifizierten Selektionsmethode deutlich. Die geringe SD der stratifizierten Objektselektion ist mit 3% deutlich geringer als die der übrigen beiden Methoden 8,7 bzw. 10%, bei sonst ähnlichen Mittelwerten der klassenspezifischen Genauigkeit ($\approx 0,7$) über die 10 Wiederholungsläufe. Der stratifizierten Objektselektion kann ein hoher Grad an Robustheit bescheinigt werden, da über alle drei beschriebenen Untersuchungen hinweg die stratifizierte Objektauswahl die geringste Standardabweichung bei ausreichend hoher Klassifikationsgenauigkeit aufweist.

2.1.3 GeoMLU

2.1.3.1 Arbeitspaket 2.1: Modellierung phänologischer Entwicklungsstadien

Arbeitspaket 2.1.1: Anpassung und Weiterentwicklung des PHASE-Modells

Im Arbeitspaket 2.2.1 sollten die Prognosefähigkeit sowie die operationelle Generierung räumlich expliziter phänologischer Phasen des PHASE-Modells durch verschiedene Modellerweiterungen verbessert werden. Die größten Schwächen des PHASE-Modells in seiner Fassung zu Projektbeginn lagen in der geringen Vorhersagegenauigkeit der Temperatursummen durch das *Random-Forest*-Modell sowie den hohen Rechenaufwand zur Generierung der Phaseninformationen. Diese Defizite sollten durch die Optimierung der räumlichen Bezugseinheiten zur Prognose sowie die Nutzung verschiedener digitaler Höhenmodelle verringert werden.

Die Nutzung des geostatistischen *Universal-Kriging*-Verfahrens anstatt des *Random-Forest*-Verfahrens verringert die benötigten Rechenzeiten signifikant und erlaubt somit eine deutliche Verbesserung der Operationalität des Modells. Aus diesem Grund wurde das Modell zur Nutzung von *Universal Kriging* angepasst. Die einzelnen Sub-Modelle und die Basierung auf dem *Growing-Degree-Days*-Konzept bleiben jedoch erhalten. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessierungsschritte kurz zusammengefasst. Für detailliertere Beschreibungen wird auf den in Form eines Aufsatzes in *Computers and Electronics in Agriculture* veröffentlichten Aufsatz verwiesen (Gerstmann et al. 2016a).

Modelleingangsdaten und Gültigkeitsbereich

Das Modell PHASE benötigt zwei Eingangsdatensätze. Zum einen sind dies die Tagesmitteltemperaturen, die an ca. 500 unregelmäßig verteilte Wetterstationen in Deutschland täglich gemessen und bereitgestellt werden. Die räumliche Lageunsicherheit ist bei diesen Stationen marginal, da es sich um fest installierte Messpunkte handelt deren geographische Lage genau erfasst wurde.

Der zweite wesentliche Eingangsdatensatz sind die phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes. Diese werden von freiwilligen Beobachtern an ca. 700 Stationen für landwirtschaftliche Kulturen erhoben. Dabei wird der Gesamtdatensatz in Sofort- und Jahresmelder unterschieden. In den Sofortmelderdatensatz fließt eine reduzierte Anzahl an Messungen ein, die ohne Fehlerkorrektur direkt dem Deutschen Wetterdienst gemeldet und von diesem veröffentlicht werden. Nach Ende einer Anbausaison werden diese Daten sowie die übrigen Stationsdaten fehlerkorrigiert bereitgestellt, so dass dieser Jahresmelderdatensatz eine höhere Stationsanzahl und eine höhere Anzahl an gemeldeten Phasen aufweist. Die Lagegenauigkeit der phänologischen Beobachtungen liegt zwischen 2 und 5 km wobei in diesem Radius die Geländehöhe um weniger als 50 m schwanken darf (Deutscher Wetterdienst, 2015). Diese Lagegenauigkeiten sind die Hauptursache für Modellunsicherheiten, jedoch aufgrund des Untersuchungsdesigns unvermeidbar.

Das Modell PHASE kann für die Modellierung der Phasen der Zielklassen verwendet werden, für die phänologische Beobachtungen (sowohl Sofort- als auch Jahresmelder) vom Deutschen Wetterdienst erfasst werden. Eine Gegenüberstellung der Feldfrüchte mit modellierbaren Phasen ist in der Tabelle 20 enthalten. Die Modellierung beschränkt sich ausschließlich auf Phasen mit pflanzenphysiologischen Hintergrund; für die anthropogenen Phasen Bestellung und Ernte wird keine Modellierung durchgeführt.

Tabelle 20: Übersicht über die Zielklassen im Projekt PhenoS sowie Verfügbarkeit phänologischer Beobachtungen

Zielklasse	Zielklasse (botanisch)	Phasen-ID	Bemerkung
Winterweizen	Triticum aestivum	10,12,15,18,19,21,24	
Wintergerste	Hordeum vulgare	10,12,15,18,21,24	
Winterroggen	Secale cereale	10,12,15,5,6,18,21,24	
Winterraps	Brassica napus	10, 12, 14, 67, 17, 5,	
Sommerhafer	Avena sativa	10,12,15,66,19,21, 24	
Mais	Zea mays	10,12,67,5,65,19, 20,	
Kartoffel	Solanum tuberosum	10,12,5	24 in historischen Daten
Zuckerrübe	Beta vulgaris	10,12,13,24	
Sommergerste	Hordeum vulgare	10,12,15,18,21,24	Seit 2014
Sommerweizen	Triticum aestivum	Nicht beobachtet	
Hartweizen	Triticum durum	Nicht beobachtet	
Dauergrünland	-	1,25,26	

1 – Ergrünen | 5 – Beginn Blüte | 6 – Vollblüte | 10 – Bestellung | 12 – Auflaufen | 13 – Reihenschluss |

Den dritten modellrelevanten Eingangsdatensatz stellt ein digitales Höhenmodell dar, das auf Basis des frei verfügbaren SRTM-Datensatzes auf eine Rasterzellengröße von 1 km^2 aggregiert wurde. Die genaue Prozessierung des DGM kann Gerstmann et al. (2016a) entnommen werden.

Sub-Modell 1: Generierung täglicher Temperaturdaten

Aus den täglichen Beobachtungsdaten der Tagesmitteltemperatur, die an ca. 500 Stationen des Deutschen Wetterdienstes erhoben werden, werden über eine erste *Kriging*-Interpolation flächenhaft auf ganz Deutschland interpoliert. Dabei wird als Bezugsmaßstab eine Zellengröße von $1 \times 1 \text{ km}$ gewählt. Das zugrundeliegende DGM wurde auf Basis des frei verfügbaren SRTM-DGM zur entsprechenden Zellengröße aggregiert. Auf die Nutzung verschiedener Segmentierungsebenen zur Ableitung topographisch ähnlicher Einheiten und die Bewertung alternativer digitaler Geländemodelle wurde dabei aufgrund zweier Erkenntnisse verzichtet:

1. *Kriging*-Interpolationen mit einer hohen Anzahl an kleinen Objekten irregulärer Formen erfordern einen deutlich höhere Prozessierungsaufwand als die Nutzung eines Rasters mit regelmäßiger Zellengröße. Weiterhin sind die durch Segmentierung erzeugten Reliefeinheiten größer als die 1 km^2 . Somit wird durch die Nutzung des rasterbasierten Ansatzes sowohl eine Optimierung hinsichtlich des Prozessierungsaufwandes als auch hinsichtlich der räumlichen Auflösung erreicht.
2. Die phänologischen Beobachtungsdaten haben eine Lageunsicherheit von 2 – 5 km (DWD 2015). Die Nutzung von Reliefeinheiten geringerer Auflösung wird daher keinen Performance-Gewinn mit sich bringen. Aus diesem Grund konnte auf den Vergleich unterschiedlicher Höhenmodelle verzichtet werden.

Die täglichen Beobachtungsdaten der Tagesmitteltemperatur werden innerhalb einer in der freien Statistiksprache R (R Core Team 2015) programmierten Routine über die Nutzung von *Universal Kriging* (R-package *gstat*) mit der Höheninformation der Rasterzelle, in der sich die Klimastation befindet, als erklärende Variable interpoliert. Dabei werden die umgebenden 30 Klimastationen für die Prognose der Mitteltemperatur einer Rasterzelle verwendet. Die Nutzung dieser Begrenzung der benötigten Klimastationen verringert die Rechenzeiten deutlich, während die Unsicherheit verglichen zur Nutzung aller Stationen nur marginal ansteigt (vgl. Gerstmann et al. 2016a). Das Fitting der Variogramm-Parameter erfolgt automatisiert über die im *gstat*-Paket enthaltene Funktion *fit.variogram()*.

Auf diesem Wege wurden deutschlandweite Temperaturraster für die Jahre ab 2009 erzeugt und für jedes Jahr gespeichert. Sie werden täglich durch den jeweils aktuellen Tagesdatensatz erweitert.

Sub-Modell 2: Berechnung von phasen- und stationsspezifischen Temperatursummen

In Sub-Modell 2 werden die phänologischen Beobachtungen in einen Geodatensatz konvertiert und für jede Station die Beobachtung der Aussaat und der jeweiligen Zielphase bestimmt. Um Fehlbeobachtungen auszuschließen, werden alle Beobachtungen, die außerhalb des Intervalls $\pm 1.5 \times \sigma$ liegen, von der weiteren Modellierung ausgeschlossen.

Zwischen den Tagen der Aussaat und beobachteter Phase wird die Summe der täglichen Temperaturen, die über die Verschneidung der phänologischen Beobachtungen mit den interpolierten Temperaturrastern ermittelt werden, bestimmt. Dabei muss für Phasen von Winterfrüchten auf die Temperaturen des Vorjahres zurückgegriffen werden. Dabei werden die Tagesmitteltemperaturen durch die Tageslänge, die sich aus geographischer Breite der phänologischen Station und dem jeweiligen Tag mittels des R-Paketes *geosphere* errechnen lässt, normalisiert. Somit wird nur die tatsächlich pflanzenverfügbare Energie des jeweiligen Tages für die Temperatursummenbestimmung berücksichtigt. Anschließend wird von den so bestimmten gewichteten Temperaturen eine artspezifische Basistemperatur subtrahiert, die den unteren Schwellenwert für photosynthetische Aktivität der Pflanze darstellt. Da sich die Angaben für die artspezifische Basistemperatur in der Literatur zum Teil deutlich unterscheiden, wird hier eine Optimierung durchgeführt und die Modellgüte für alle Temperaturen zwischen 0°C und 10°C bestimmt. Die Basistemperatur mit den geringsten Fehlerwerten wird für die finale Prognose verwendet.

Die Sub-Modelle 1 bis 2 können mit Gleichung (1) zusammengefasst werden.

$$T_{sum}^{eff}[j] = \sum_{i=DOY_{start}}^{DOY_{obs}} \left[(\bar{T}_{i,j} - T_B) \times \frac{DL_{i,j}}{24} \right] \quad (1)$$

Wobei $T_{sum}^{eff}[j]$ in *heat units* die phasenspezifische effektive Temperatursumme an der Station j zwischen Tag der Aussaat und beobachtetem Tag der phänologischen Phase darstellt. $\bar{T}_{i,j}$ beschreibt die Tagesmitteltemperatur zum Tag i an der Station j während T_B die artspezifische Basistemperatur darstellt. Schließlich bezeichnet $DL_{i,j}$ die Tageslänge an Station j zu Tag i .

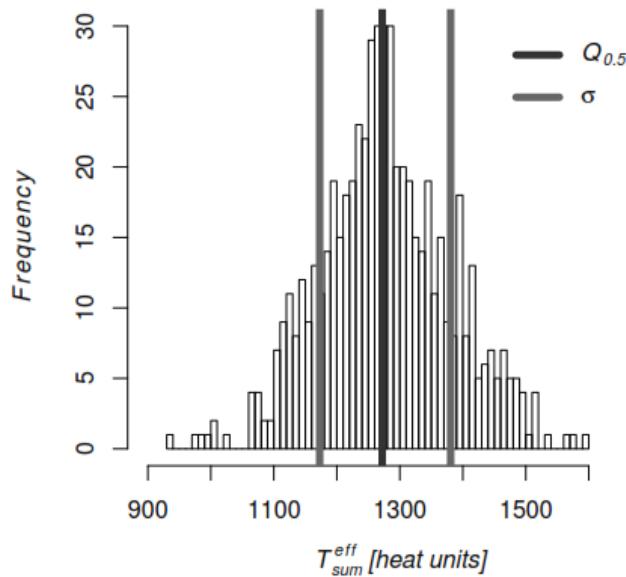


Abbildung 36: Histogramm der zwischen Aussaat und beobachtetem Beginn der Gelbreife akkumulierten effektiven Temperaturen.

Sub-Modell 3: Bestimmung von phasenspezifischen Temperatursummen

Aus der Verteilung der beobachteten Temperatursummen an allen Stationen wird ein Indikatorwert als phasenspezifische Temperatursumme bestimmt, der als aussagekräftig für die jeweilige Phase für ganz Deutschland verstanden wird. Der Tag, an dem die Temperatursumme den jeweiligen Indikatorwert erstmals überschreitet, wird für jede Station ermittelt.

Für die Bestimmung dieses Wertes wird eine Optimierung durchgeführt, bei der verschiedene Quantile der Temperatursummenverteilung hinsichtlich des mittleren Absolutfehlers (MAE) zwischen Überschreitungstag und beobachteter Phase getestet werden. Das Quantil mit dem niedrigsten MAE wird anschließend ausgewählt.

Sub-Modell 3 wird durch Gleichung (2) zusammengefasst:

$$T_P = Q_{opt}(T_{sum}^{eff}) \quad (2)$$

Wobei T_P die phasenspezifische Temperatursumme beschreibt und Q_{opt} das optimale Quantil der Verteilung aller T_{sum}^{eff} darstellt.

Sub-Modell 4: Räumliche Prognose der Phasen und Validierung

Der Tag der Überschreitung der phasenspezifischen Temperatursumme wird anschließend über eine zweite Kriging-Interpolation mit der Höhe als erklärende Variable flächenhaft modelliert. Abschließend werden über Kreuzvalidierung Performanzparameter bestimmt, die einen Aufschluss über die Modellgüte geben. Als zusätzlicher Output wird die Kriging-Standardabweichung berechnet, die ein räumlich explizites Maß für die Modellunsicherheit darstellt.

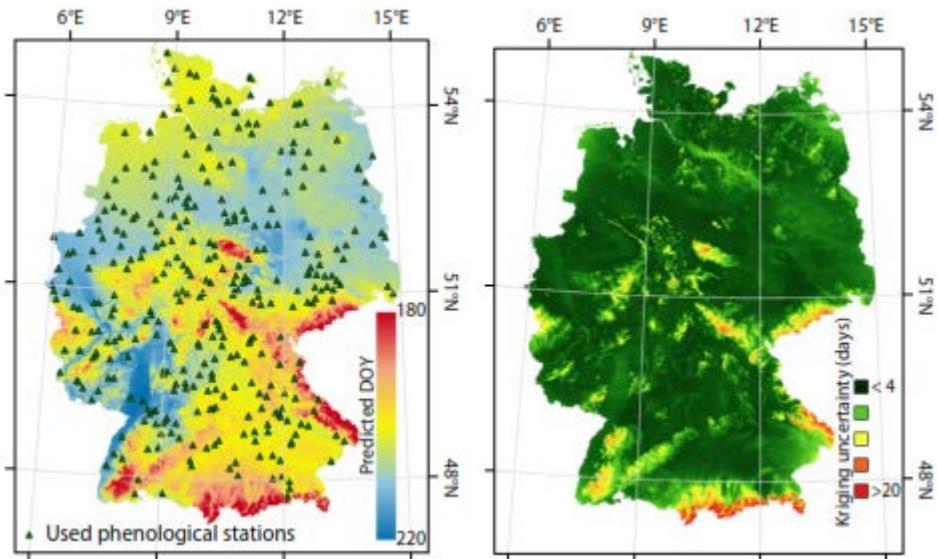


Abbildung 37: Modellierter Eintrittstag und Kriging-Standardabweichung der Phase Gelbreife 2011 (Gerstmann et al. 2016).

Die Modellergebnisse bestätigen die zu erwartenden räumlichen Trends von früheren Eintrittsdaten in den Gunsträumen im Rheintal und in den Bördegebieten Mitteldeutschlands, während in höheren und küstennäheren Lagen die Entwicklung verzögert erfolgt. Die *Kriging*-Standardabweichung ist in höheren Lagen deutlich gegenüber den übrigen Regionen erhöht, da hier aufgrund natürlicher Anbaugrenzen weniger phänologische Beobachtungen zur Verfügung stehen.

Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse für 2011

Die bestimmten RMSE-Werte zeigen einen Trend hin zu höheren Genauigkeiten für spätere Phasen verglichen mit früheren Phasen wie das Auflaufen oder die Rosettenbildung. Frühe Phasen werden mit Unsicherheiten zwischen 8 und 11 Tagen modelliert, während spätere Phasen mit Abweichungen zwischen 2 und 5 Tagen bestimmt werden können. Das optimale Quantil zur Bestimmung der phasenspezifischen Temperatursumme ist in den meisten Fällen zwischen 0.45 und 0.55, lediglich für die Prognose der Phasen Schossen und Knospenbildung von Winterraps wurden Werte von 0.75 und 0.7 bestimmt. Verglichen mit anderen Interpolationsmethoden (*Ordinary Kriging* und *Inverse Distance Weighting Interpolation*) können vorwiegend für spätere Phasen die Unsicherheiten halbiert werden. Für frühere Phasen sind die Genauigkeiten zwischen den drei Methoden vergleichbar. Für eine detaillierte Beschreibung der Genauigkeitsanalyse und deren Ergebnisse wird auf Gerstmann et al. (2016a) verwiesen.

Modellerweiterung durch Einbindung zusätzlicher Variablen

Hier wurden die Effekte der Einbindung der zusätzlichen Variablen Basistemperatur, Tageslänge und Berücksichtigung der Bodenfeuchte untersucht.

Die Berücksichtigung der Basistemperatur führte zu Genauigkeitsverbesserungen, die in Gerstmann et al. (2016a) beschrieben sind. Daher wurde dieser Parameter fest in das PHASE-Modell integriert.

Die Tageslänge wurde ebenfalls fest in das Modell mit eingebunden. Der Einfluss auf die Gesamtgenauigkeiten wurde nicht systematisch untersucht, der Einfluss auf die Prognosefähigkeit temperaturgetriebener phänologischer Modelle ist jedoch vielfach belegt (z.B. Siebert & Ewert, 2012, Solantie 2004, Schaber & Badeck 2003; vgl. auch AP 2.1.1).

Arbeitspaket 2.1.2: Modellvergleich von PHASE und PIM

Um die Weiterentwicklungen des PHASE-Modells und Vorhersage-Güte der von PHASE und PIM (vgl. Kap. 2.1.1.2) Modelle zu vergleichen, wurden standardisierte Vergleichskriterien erstellt. Der Vergleich bezieht sich auf die Jahre 2010 und 2012. Für Winterweizen und Wintergerste wurden die Phasen *Auflaufen*, *Ährenschieben* und *Gelbreife* betrachtet und für Zuckerrübe die Phasen *Auflaufen* und *Bestand geschlossen* verglichen. Dazu wurden das Bestimmtheitsmaß R^2 , der Root-Mean-Squared-Error (RMSE) und der mittlere Absolutfehler (MAE) der Vorhersagen ermittelt. Zusätzlich wurden dieselben Genauigkeitsmaße für das Modell PHASE in der Ausgangsversion zu Projektbeginn für Winterweizen (PHASE₂₀₁₃) im Jahr 2010 berechnet.

Tabelle 21: Vergleich der mit den Modellen PIM und PHASE in der aktuellen Version sowie in der Version zu Projektbeginn erzielten Genauigkeitsmaße.

Fruchtart	Jahr	Phase	PHASE			PIM			PHASE ₂₀₁₃		
			R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE	R^2	RMSE	MAE
Winterweizen	2010	12	0.07	11.25	9.3	0.76	6.41	4.99	0.01	20.53	13.42
		18	0.11	5.80	4.42	0.14	9.54	7.24	0.29	9.47	7.28
		21	0.13	6.43	5.1	0.40	8.53	6.60	0.16	10.86	8.27
	2012	12	0.11	9.58	7.79	0.81	6.20	4.52			
		18	0.13	6.05	4.58	0.14	9.01	6.70			
		21	0.12	8.03	6.70	0.25	10.92	8.08			
Wintergerste	2010	12	0.03	9.83	7.85	0.82	4.22	3.30			
		18	0.07	5.72	4.85	0.25	7.09	5.27			
		21	0.1	7.25	5.85	0.18	7.59	5.99			
	2012	12	0.02	10.73	8.70	0.62	6.29	4.15			
		18	0.14	6.68	5.37	0.12	8.38	5.89			
		21	0.09	9.00	7.08	0.17	9.71	7.34			
Winterroggen	2010	12	0.03	9.83	7.85	0.75	6.64	4.72			
		18	0.07	5.72	4.85	0.17	8.61	6.59			
		21	0.10	7.25	5.85	0.13	10.21	7.87			
	2012	12	0.02	10.73	8.7	0.75	7.01	4.81			
		18	0.14	6.68	5.37	0.21	7.80	6.18			
		21	0.09	9.00	7.08	0.33	9.77	7.93			
Hafer	2010	12	0.11	7.08	5.81	0.66	6.63	4.59			
		18	0.19	6.02	4.69	0.25	9.46	7.08			
		21	0.07	8.24	6.47	0.17	9.88	8.08			
	2012	12	0.08	7.44	5.69	0.56	7.72	5.50			
		18	0.16	6.14	4.82	0.21	9.62	7.24			
		21	0.21	6.83	5.41	0.29	10.25	7.81			
Zuckerrübe	2010	12	0.08	6.87	5.64	0.35	8.70	6.64			
		13	0.01	7.75	6.34	0.10	10.47	8.20			
	2012	12	0.01	7.31	6.19	0.45	7.27	5.18			
		13	0.08	6.60	5.28	0.02	11.33	7.90			

Erkennbar ist, dass Phase 12 für das Modell PHASE meist höhere Fehlerwerte aufweist als das Modell PIM. Für die übrigen untersuchten Phasen sind die von PHASE erzielten Genauigkeiten höher. Die Genauigkeiten der Ergebnisse von PHASE haben sich seit Projektbeginn deutlich verbessert.

PIM verwendet die Beobachtungen für alle Jahre seit 1951 für die Modellbildung. Dadurch kann für jedes beliebige Jahr eine Prognose erstellt werden, auch für Feldfrüchte, die aufgrund von Änderungen des Beobachtungsprogramms nicht mehr beobachtet werden. Demgegenüber ist das Modell PHASE an das aktuelle Jahr gebunden, sodass auch nur die Phasen modelliert werden können, die tatsächlich beobachtet wurden. Für nahezu alle verglichenen Phasen sind die mittels PHASE erreichten R^2 -Werte deutlich geringer als für PIM, was eine höhere Robustheit des Promotor-Inhibitor-Modells nahelegt, was ebenfalls durch die langjährige Datenbasis von PIM bedingt ist.

Dieser Unterschied in der verwendeten Datenbasis ist beispielsweise für Sommergerste relevant, die nur in der DDR beobachtet wurde, und erst ab 2014 in das gesamtdeutsche Beobachtungsprogramm aufgenommen wurde. PIM ist aufgrund der existierenden historischen Beobachtungen in der Lage, die phänologische Entwicklung der Sommergerste für alle Jahre zwischen 1991 und 2014 zu modellieren, was mit dem Modell PHASE nicht möglich ist. Ein methodischer Modellvergleich ist in Gerstmann et al. (2016a) zu finden.

2.1.3.2 Arbeitspaket 4.2: Modellerweiterungen durch die Nutzung von spektralen Merkmalen

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, spektrale Indizes und Merkmale zu definieren, die in den gemeinsamen Klassifikationsrahmen mit einfließen können und so die Klassifikationsgenauigkeiten erhöhen sollen. Die Umsetzung dieses Arbeitspaketes weicht deutlich von der ursprünglichen Struktur ab, da keine geeignete Zeitreihe aus hyperspektralen Rohdaten bzw. aus diesen Rohdaten simulierte Sentinel-2-Datensätze zur Verfügung standen. Weiterhin standen durch den verzögerten Start des Satelliten reale Sentinel-2-Datensätze erst für die Anbausaison 2016 zur Verfügung.

Aus den oben genannten Gründen wurde eine neue Methode entwickelt, die basierend auf RapidEye-Zeitreihen automatisiert optimale spektrale Indizes bestimmt. Diese Methode ist flexibel und konnte im zweiten Halbjahr 2016 auf die dann zur Verfügung stehende Sentinel-2-Zeitreihe angewendet und evaluiert werden. Die Umsetzung der einzelnen Unterpunkte des AP 4.2 wird im Folgenden anhand einer Beispieldetaillierung erläutert. Diese Trennung betrifft die RapidEye-Kachel mit der ID 3262922. Abschließend werden die Endergebnisse für alle Zielarten sowohl auf RapidEye- als auch auf Sentinel-2-Daten basierend kurz dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik findet sich in Gerstmann et al. (2016b).

2.1.3.2.1 Methodenentwicklung

Adaption, Entwicklung und Anwendung von Red-Edge-Methoden auf Sentinel-2-Daten

Aufgrund der im Vergleich zum Projektantrag veränderten Datengrundlage wurde eine Methode zur Entwicklung von Red-Edge- und anderen spektralen Maßen entwickelt, die zwar auf RapidEye-Daten basiert, jedoch flexibel auf Daten anderer Sensoren übertragbar ist.

Ziel der entwickelten Methodik ist es, eine sehr hohe Zahl an spektralen Indizes dahingehend zu testen, wie charakteristisch verschiedene Wertebereiche der ausgewählten Indizes für die jeweiligen Zielarten sind. Die Entwicklung des Ansatzes erfolgte dabei auf Rasterbasis. Als Trainings- und Validierungsflächen konnten die InVeKoS-Daten der Jahre 2010 bis 2016 im UG Harz verwendet werden, die vom

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt für das Projekt kostenfrei zur Verfügung gestellt wurden. Für das UG Demmin standen schlaggenaue Anbaudaten für die Jahre 2010 bis 2012 zur Verfügung, die vom Projektpartner GeoJMU bereitgestellt wurden.

Berechnung der Testindizes

Die Testindizes werden systematisch berechnet, indem jede Kombination der einzelnen Spektralbänder und spezifischer Parameter mit einer Formel berechnet wird. Dabei wird auf die Formel des *Enhanced Vegetation Index (EVI)* zurückgegriffen (Eq. 1), da diese bei bestimmten Parameterkombinationen auch normalisierte Differenzindizes (NDVI, GNDVI, etc.) aus zwei Bändern mit einschließt. Die Grundidee wurde bereits von anderen Autoren für die Ableitung biophysikalischer Parameter verwendet (Le Maire 2008), jedoch ist keine vergleichbare Anwendung des Ansatzes für Klassifikationszwecke bekannt.

$$\text{Index} = G \times \frac{B_1 - B_2}{B_1 + c_1 \times B_2 - c_2 \times B_3 + L} \quad (\text{Eq. 1})$$

Weiterhin basieren die meisten Indizes in der Literatur auf einer der beiden Varianten. In Eq. 1 beschreiben die Variablen B_1 , B_2 und B_3 Spektralkanäle, während c_1 , c_2 Wichtungsfaktoren darstellen und L als Parameter für den Einfluss des Bodens auf das Reflexionssignal verstanden werden kann. Die Definitionsbereiche der empirischen Wichtungsfaktoren können prinzipiell frei gewählt werden, im Projekt wurde jedoch der Definitionsbereich für c_1 und c_2 mit $D=\{-1, 0, 1, 2.4, 6, 7.5\}$, für L mit $D=\{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$ und für G mit $D=\{1, 1.5, 2.5\}$ festgelegt. Diese Festlegungen erfolgten auf Grundlage häufig verwendeter Indizes aus der Literatur und den Anforderungen an eine operationelle Anwendbarkeit.

Bewertung der Klassentrennbarkeit

Die Eignung eines getesteten Index für die Trennung zweier Arten wurde dabei mit dem Effektstärke-Maß η^2 (*eta-Quadrat*) sowie der *Kolmogorov-Smirnov-Distanz* quantifiziert. Die Auswahl dieser Maße wurde dadurch bedingt, dass die Zielvariable (Klassenzugehörigkeit) ein nominales Skalenniveau aufweist und daher andere Maße wie der Korrelationskoeffizient nach Pearson nicht geeignet sind. Weiterhin kommen spektrale Trennbarkeitsmaße wie *Jeffries-Matusita-Distanz* oder *Divergence* nicht in Frage, da sie eine Normalverteilung der Daten voraussetzen, die aber unter den Testbedingungen nicht gegeben ist (keine Mischpixel, Ausmaskierung aller Flächen bis auf die Zielarten).

Der Wertebereich von η^2 bewegt sich zwischen 0 und 1, wobei alle Werte größer als 0.26 eine hohe Unterscheidbarkeit der Testarten anzeigen (*Cohen's rule of thumb*).

Ergebnisse

Anhand der Trennung von Winterweizen und Wintergerste wird im Folgenden das Prinzip der Methodik dargestellt. Für jede der beiden Zielarten wurden 10 Testfelder und 10 Felder zur Validierung ausgewählt. Durch die in oben beschriebene Parametrisierung wurden insgesamt 28050 berechenbare Indizes getestet. Den höchsten η^2 -Wert erzielte der Index:

$$I_{opt} = 1 \times \frac{\text{RedEdge} - \text{BLUE}}{\text{RedEdge} + 7.5 \times \text{BLUE} + 1 \times \text{NIR} + 1}$$

mit einem η^2 -Wert von 0.82. Die klassenspezifischen Histogramme sind in Abbildung 37 dargestellt.

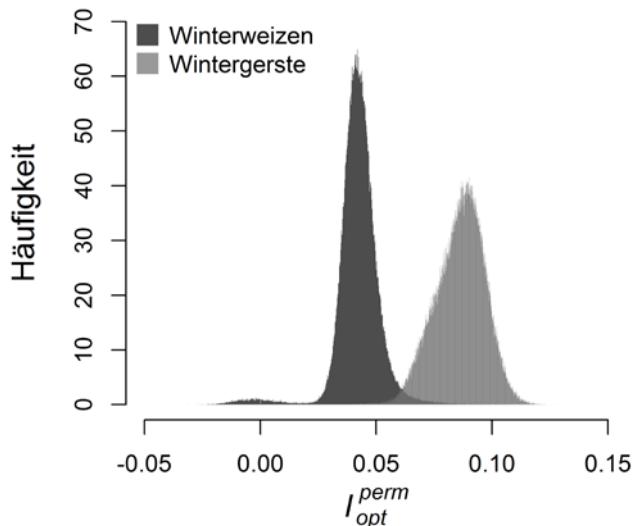


Abbildung 38: Klassenspezifische Histogramme des optierten Indexes für die Trennung von Winterweizen und Wintergerste am 4. Juni 2014

Der Überlappungsbereich beider Histogramme, der eine Klassifikationsunsicherheit beschreibt, ist fast nicht existent, sodass mit dem ermittelten optimierten Index eine genaue Trennung der beiden Arten möglich ist.

Die vorgestellte Indexoptimierung wurde auf die RapidEye-Zeitreihe aus dem UG Harz angewandt, so dass insgesamt 43 Optimierungen durchgeführt wurden.

Vergleichende Trennbarkeitsanalysen auf Basis von NDVI und Red-Edge-basierten Indizes

An die Indexoptimierung anschließend wurden jene Indizes aus AP 4.1.4 verwendet, die sich aus den RapidEye-Spektralkanälen berechnen lassen. Sowohl optimierte als auch der Literatur entnommene Indizes wurden für die Testflächen berechnet und unter Anwendung eines *K-Means*-Klassifikators geclustert.

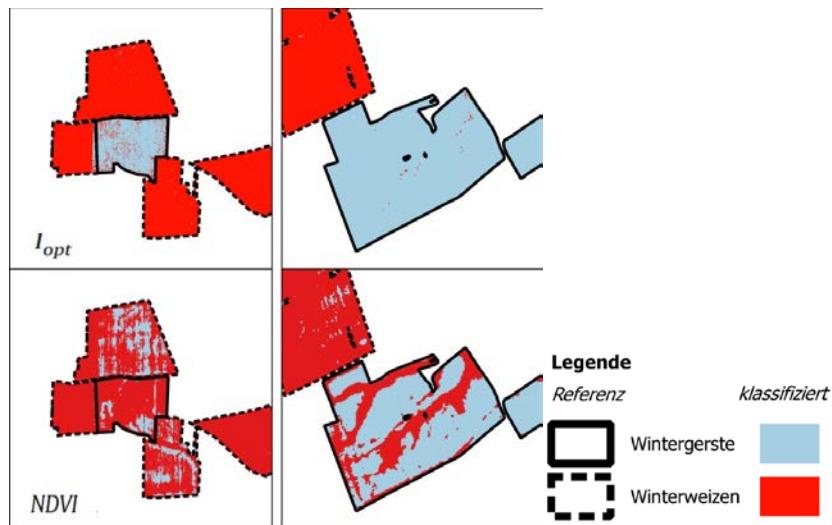


Abbildung 39: Optimierter Index (oben) und NDVI (unten) für ausgewählte Testfelder.

In Abbildung 38 sind die Ergebnisse der Clusterung vergleichsweise für den optimierten Index und den NDVI dargestellt. Die Klassifikation des optimierten Indexes erreicht eine Genauigkeit von über 90 %, während die Klassifikation des NDVI deutlich unsicherer ist. In Abbildung 38 (links) wurde das zentrale Feld nahezu vollständig falsch klassifiziert, während im rechten Beispiel deutliche Fehlklassifikationen aufgrund des Reliefs erkennbar sind.

Die Analysen wurden für die gesamte RapidEye-Zeitreihe im UG Harz durchgeführt. Tabelle 22 enthält die Klassifikationsgenauigkeiten des optimierten Indexes für jene Aufnahmetage, an denen η^2 des optimierten Indexes den Schwellwert von 0.26 überschreitet, sowie die Klassifikationsgenauigkeit des besten etablierten Indexes.

Tabelle 22: Vergleich der Klassifikationsgenauigkeiten für die Clusterung von I_{opt} und I_s .

Auf-nahme-	I_{opt}										I_s				
	B_1	B_1	B_1	c_1	c_2	L	η^2	A	d_{KS}	A_{KS}	Index	η^2	A	d_{KS}	A_{KS}
24.06.201	RE	R	NI	0	6	-	0.6	0.9	0.8	0.9	SRR	0.5	0.9	0.8	0.9
03.07.201	B	RE	NI	-1	1	0	0.7	0.9	0.9	0.8	NDVI ^{RE}	0.7	0.9	0.9	0.9
23.10.201	RE	NI	-	-1	-1	-	0.3	0.7	0.6	0.7	SAVI	0.2	0.7	0.5	0.7
02.06.201	B	NI	RE	1	1	1	0.4	0.7	0.6	0.7	EVI ^{RE}	0.2	0.7	0.5	0.7
04.06.201	RE	B	NI	7.	-1	1	0.4	0.6	0.6	0.7	EVI ^{RE}	0.3	0.7	0.5	0.7
06.06.201	RE	RE	NI	2.	6	-	0.5	0.8	0.7	0.6	EVI ^{RE}	0.4	0.7	0.6	0.7
13.11.201	RE	NI	-	0	6	1	0.3	0.8	0.5	0.7	EVI ^{RE}	0.3	0.8	0.5	0.7
29.11.201	NI	R	RE	-1	6	-	0.3	0.8	0.6	0.7	SRR	0.3	0.8	0.4	0.8
09.12.201	NI	R	RE	-1	2.	-	0.3	0.8	0.5	0.7	SRR	0.2	0.7	0.5	0.8
01.05.201	G	NI	B	0	2.	-	0.2	0.7	0.5	0.7	SRR	0.1	0.7	0.4	0.4
14.11.201	NI	R	G	2.	1	1	0.3	0.8	0.5	0.8	SAVI	0.3	0.8	0.5	0.8
06.02.201	NI	R	B	6	6	1	0.3	0.8	0.5	0.6	WDRVI	0.2	0.8	0.4	0.8
19.06.201	RE	B	NI	6	-1	1	0.5	0.9	0.8	0.8	EVI ^{RE}	0.3	0.8	0.7	0.8
10.03.201	G	B	R	2.	2.	1	0.3	0.8	0.6	0.6	EVI ^{RE}	0.0	0.5	0.2	0.5
29.03.201	G	RE	NI	1	-1	-	0.3	0.7	0.5	0.7	EVI ^{RE}	0.0	0.5	0.2	0.4
04.06.201	RE	B	NI	7.	-1	1	0.8	0.9	0.9	0.9	NDVI ^{RE}	0.5	0.8	0.9	0.9
04.07.201	R	NI	B	2.	7.	-	0.6	0.8	0.8	0.7	SAVI	0.4	0.7	0.8	0.6
08.03.201	B	G	-	-1	-1	-	0.4	0.7	0.7	0.7	CI_gree	0.1	0.5	0.4	0.5
21.04.201	NI	R	G	7.	7.	1	0.2	0.6	0.5	0.4	EVI	0.1	0.6	0.3	0.4
19.05.201	RE	R	NI	2.	-1	1	0.3	0.6	0.6	0.6	SRR	0.0	0.5	0.1	0.5
01.07.201	R	NI	RE	1	1	-	0.7	0.9	0.9	0.6	NDVI	0.7	0.8	0.9	0.8

Zeitfensterdetektion

Für die Detektion phänologischer Zeitfenster wurden aus den spektralen Trennbarkeiten der Aufnahmetage Trennbarkeitsprofile erstellt. Weiterhin wird für jeden Aufnahmetag für die entsprechenden Zielarten die aktuelle phänologische Phase bestimmt. Dazu werden für alle mit dem PHASE-Modell modellierten phänologischen Phasen die Mittelwerte auf den jeweiligen Testfeldern extrahiert, auf denen die entsprechende Zielart angebaut wurde. Anschließend wird der Aufnahmetag der jeweiligen aktuellen Phase zugeordnet.

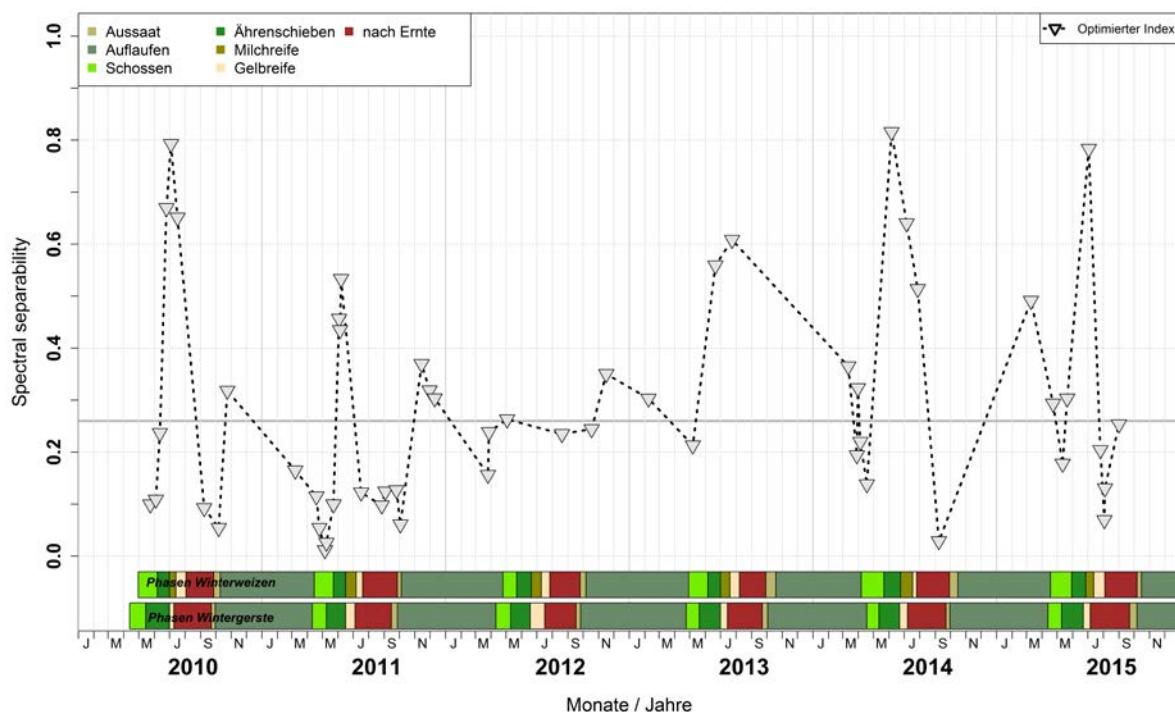


Abbildung 40: Trennbarkeitsprofil für die Unterscheidung Von Wintergerste und Winterweizen für die Jahre 2010 - 2015 im UG Harz

Aus dem Trennbarkeitsprofil können nun die Zeitpunkte maximaler Trennbarkeit spezifischen phänologischen Phasen zugeordnet werden.

Tabelle 23: Zeitpunkt der höchsten Trennbarkeit je Jahr und korrespondierende phänologische Phasen

Jahr	Datum	Phase Winterweizen	Phase Wintergerste	Bemerkung
2010	3.7.	Milchreife	Gelbreife	Zweithöchste Trennbarkeit bei Ähren-
2011	6. 6.	Ährenschieben	Ährenschieben	-
2012	14. 11.	Winterruhe	Winterruhe	Keine Aufnahme zwischen 1.5. und 18.8.
2013	19. 6.	Ährenschieben	Ährenschieben	-
2014	4. 6.	Ährenschieben	Ährenschieben	-
2015	1.7.	Milchreife	Gelbreife	Keine Aufnahme zwischen 20.5. und 1.7.

Für die Trennung von Winterweizen und Wintergerste ist ein Aufnahmezeitpunkt optimal, an dem sich beide Zielarten im Stadium „Ährenschieben“ befinden. Dies wird für die Jahre 2011, 2013 und 2014 beobachtet. Im Jahr 2010 existiert zwar ein Zeitpunkt einer anderen Phasenkombination, jedoch erreicht die Trennbarkeit für dieses Jahr ihren zweithöchsten Wert ebenfalls während der Phase „Ährenschieben“. In den Jahren 2012 und 2015 standen im Juni keine RapidEye-Aufnahmen zur Verfügung, sodass die Phase „Ährenschieben“ in diesen Jahren nicht abgebildet wurde. Jedoch erreicht die Trennbarkeit 2015 ihr Maximum während der Phase „Milchreife“ für Winterweizen und „Gelbreife“ für Wintergerste. Diese Phasenkombination wurde ebenfalls für 2010 als optimal ausgewiesen, sodass diese Phasen ein gutes Alternativauswahlkriterium darstellen, falls keine Aufnahmen während des Ährenschiebens verfügbar sind.

Übertragung der Ergebnisse der Trennbarkeitsanalysen auf den Klassifikationsrahmen

Um die Extraktion spektraler Maße in den Klassifikationsrahmen einzubinden, wurden einige Anpassungen in der Methodik vorgenommen. Dies betrifft zuerst die Überführung vom rasterbasierten Ansatz hin zu einer Objektbasierung, sodass die Indexwerte nicht pro Pixel, sondern pro Feld bestimmt werden. Diese Geometriemodifikation führt außerdem zu deutlich verringerten Rechenzeiten zur Indexoptimierung. Die Objekte umfassen alle Felder im Untersuchungsgebiet, auf denen eine in AP 3.1. definierten Zielklassen angebaut wurde.

Weiterhin wurde der Indikator für die Bewertung der Klassifikationseignung eines Index verändert. Innerhalb des Klassifikationsrahmens wird die Bewertung anhand der *Overall Classification Accuracy* vorgenommen. Für die Extraktion der spektralen Maße bedeutet dies, dass jeder permutierte Index mittels eines *Random-Forest*-Klassifikators in die Klassen „Zielart“ und „Alle anderen Arten“ klassifiziert und die Klassifikationsgenauigkeit bestimmt wird. Somit werden die Indizes auf die Unterscheidbarkeit einer Art von allen anderen Arten anstatt der Trennung zweier Arten optimiert.

Schließlich wurde die räumliche Ausdehnung der Analysen dahingehend verdoppelt, dass die Optimierung für die beiden RapidEye-Kacheln 3262921 und 3262922 durchgeführt wurde. Die Trennbarkeitsprofile für Winterweizen für die RapidEye-Kachel 3262922 (UG Harz) sind in Abbildung 39 dargestellt. Die Clusterung des optimierten Indexes spiegelt dessen Güte wieder, da die meisten Winterweizenfelder in Cluster 1 fallen, während die übrigen Zielklassen überwiegend Cluster 2 zugeordnet wurden. Insgesamt wurden 73% aller Winterweizenfelder der richtigen Klasse zugeordnet.

In allen Jahren existiert bei den optimierten spektralen Maßen ein Trennbarkeitsmaximum im Sommer, wo die jeweilige Klassifikation des besten Einzelindex eine Genauigkeit von 80 % erreicht. Beispielhaft in Abbildung 41 dargestellt sind der mittels K-Means in 2 Klassen geclusterte optimale Index für den 06.06.2011 sowie die tatsächlichen, dem InVeKoS-Datensatz entnommenen Winterweizenfelder.

Über die gesamte Zeitreihe betrachtet sind die Genauigkeiten der Clusterung der am besten geeigneten Band-Ratios und der etablierten *Red-Edge*-Indizes deutlich geringer. Das Trennbarkeitsmaximum wird in den Jahren 2010, 2011, 2013 und 2014 während der Phase Ährenschieben beobachtet, in den Jahren 2012 und 2015 während des Schossens. Im Jahr 2015 fällt die Trennbarkeit nach der Ernte hingegen nicht so stark ab wie in den übrigen Jahren, jedoch existiert keine Beobachtung aus der Phase Ährenschieben, sodass kein klares Trennbarkeitsmaximum in diesem Jahr mittels der *Overall Accuracy* beobachtet werden konnte.

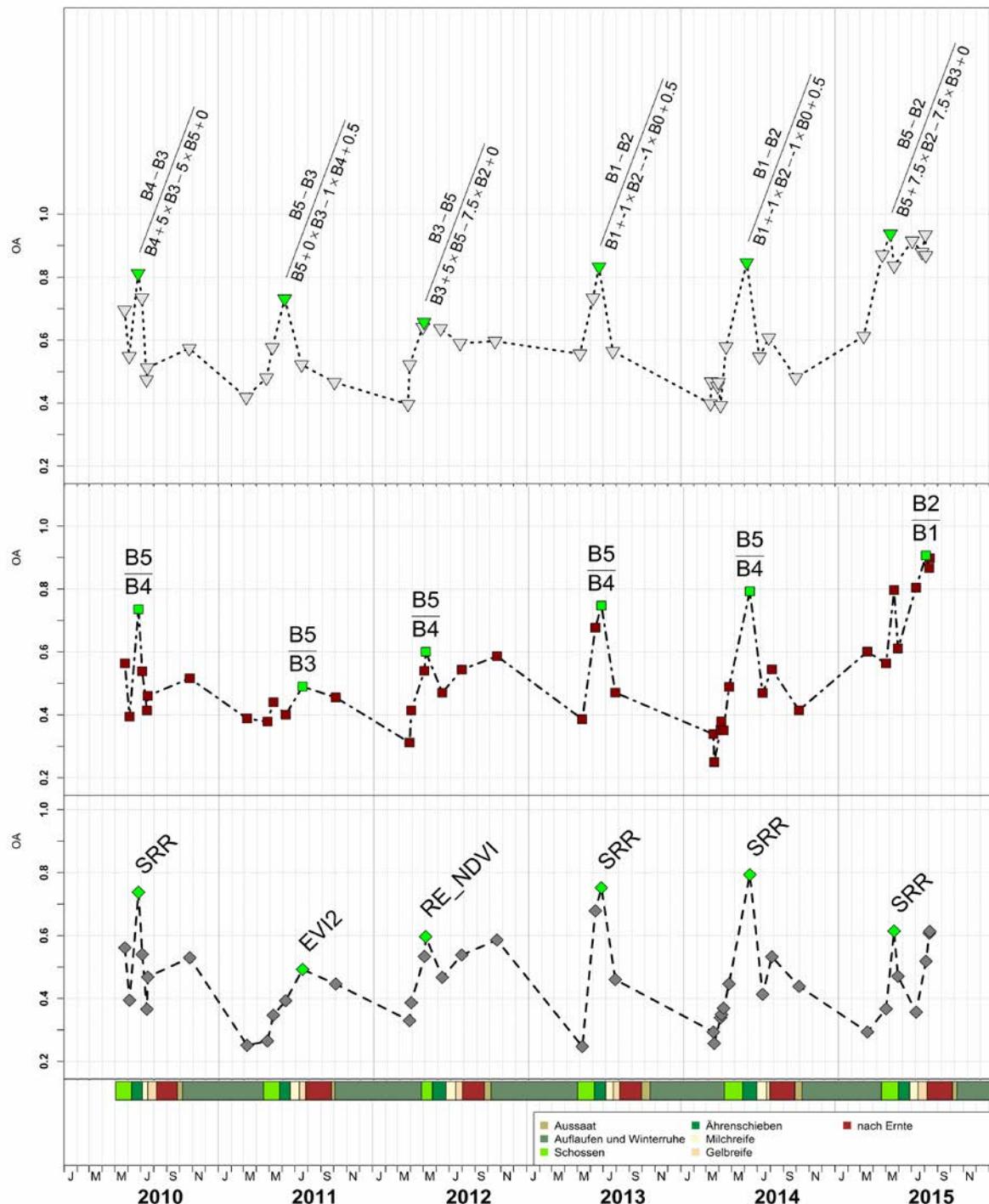


Abbildung 41: Trennbarkeit / Overall classification accuracy für die spektrale Trennung von Winterweizen von allen anderen Zielklassen im Untersuchungsgebiet Harz auf Basis einer RapidEye-Zeitreihe von 2010 - 2015. Ausgewählte Bänder für optimierte Spektrale Maße (oben), beste 2-Band-Ratio (Mitte) und bester etablierter Index (unten), jeweils pro Jahr.

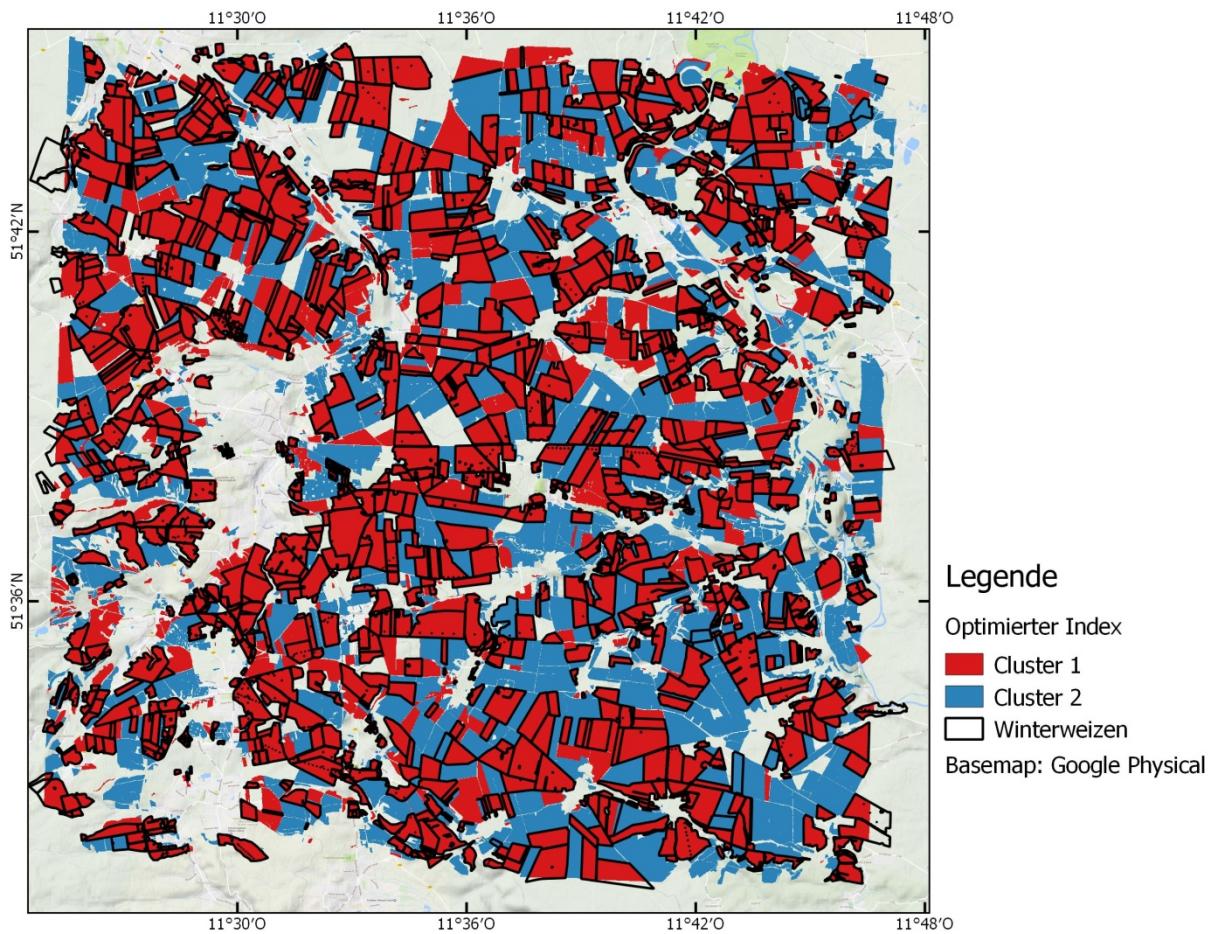


Abbildung 42: Optimierter Index für die Trennung von Winterweizen von allen anderen Zielarten für die RapidEye-Kachel 3262922 am 06. Juni 2011

Übertragung auf Sentinel-2-Zeitreihe

Die Methoden zur Extraktion spektraler Maße, Trennbarkeitsanalysen und Ausweisung phänologischer Zeitfenster konnte für die Wachstumssaison 2016 auf Sentinel-2A-Daten übertragen werden. Dazu standen für das Untersuchungsgebiet Harz (Sentinel-Tile-ID: T32UPC) insgesamt 16 verwendbare Aufnahmen zur Verfügung. Um das beste Verhältnis von räumlicher und spektraler Auflösung nutzen zu können, wurde das 20 m – Produkte verwendet.

Tabelle 24: Für das UG Harz zur Verfügung stehende Sentinel-2-Daten für 2016.

Monat	Verfügbare Aufnahmen
Februar	1 (12.02.)
März	2 (03.03., 26.03.)
April	2 (02.04., 22.04.)
Mai	4 (02.05, 05.05., 12.05., 22.05.)
Juni	2 (04.06., 24.06.)
Juli	2 (24.07., 31.07.)
August	1 (13.08.)
September	1 (29.09.)
Oktober	1 (02.10.)

Die Sentinel-2A-Daten wurden mittels des von der ESA entwickelten und bereitgestellten Atmosphärenkorrektur-Modul *Sen2Cor* atmosphärisch korrigiert. Der dabei erzeugte Landnutzungsklassifikations-Layer enthält mehrere Wolkenklassen, aus denen eine Wolkenmaske für jeden Datensatz abgeleitet werden konnte. Die bewölkten Bildteile wurden anschließend ausmaskiert. Die Analysen wurden für das 20m-Sentinel-Produkt durchgeführt, da dieses die *Red-Edge*-Bänder enthält. Da die Rechenzeiten durch die Vielzahl der Bänder deutlich höher sind als bei der Verwendung von RapidEye-Daten, wurden die Definitionsbereiche der Parameter c_1 , c_2 und L auf die möglichen Werte 1, -1 und begrenzt. Die Ergebnisse der Analysen sind für alle Zielarten in Tabelle 25 dargestellt. Die verschiedenen *Red-Edge*-Kanäle sind häufig in den ausgewählten, optimalen Indizes enthalten. Dies bekräftigt die Erwartung an den Sentinel-2-Sensor mittels der *Red-Edge*-Kanäle besonders gut für detaillierte Klassifikationen geeignet zu sein. Weiterhin treten die SWIR-Kanäle relativ häufig auf, was durch Unterschiede im Reifegrad der Zielart erklärt wird, da der Wassergehalt bei zunehmender Reife sinkt und somit spektrale Variationen im SWIR-Bereich hervorruft.

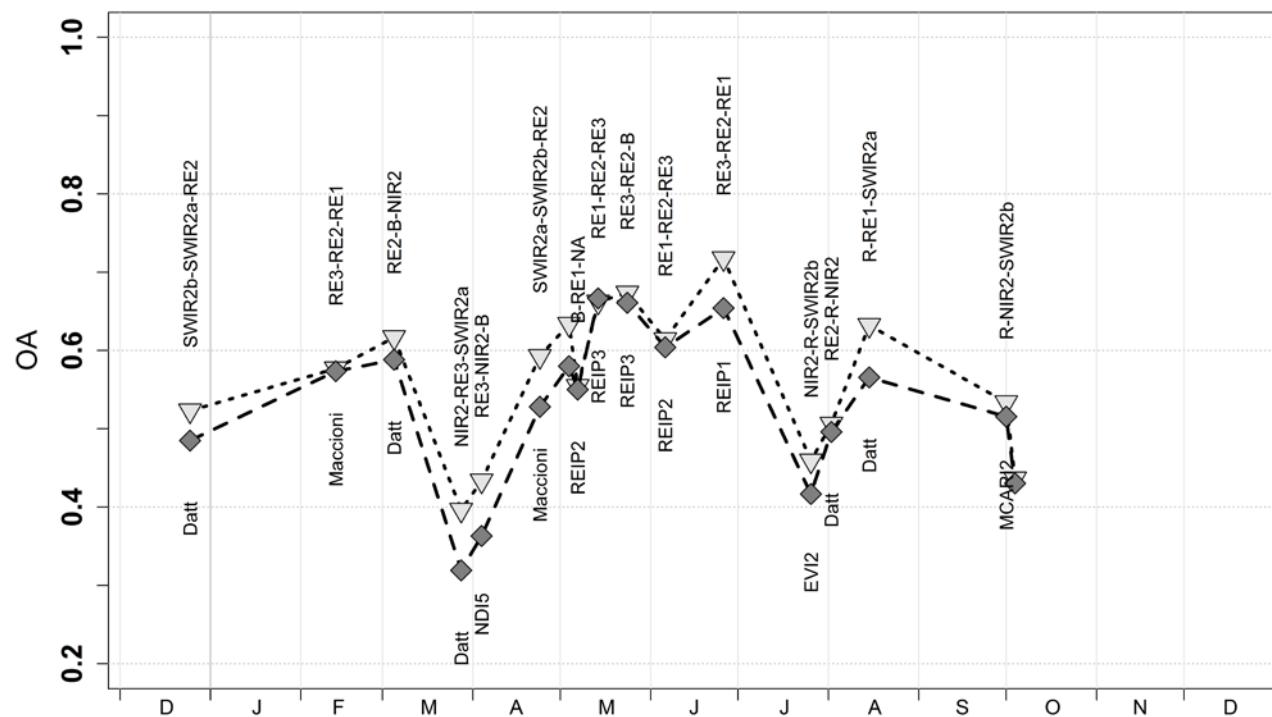


Abbildung 43: Bänder des optimalen Indexes sowie bester etablierter Index und zugehörige *Overall classification accuracies (OA)* für die Unterscheidung von Winterweizen und allen anderen Zielarten auf Grundlage der Sentinel-2-Zeitreihe für 2016

Tabelle 25: Optimaler Aufnahmezeitpunkt für die Trennung der einzelnen Zielarten mit Sentinel-2-Daten sowie optimaler Index mit Overall Classification Accuracy (OA), beste Band-Ratio und bester etablierter Index.

Fruchtart	Feld-anzahl	Tag	Phänologische Phase	Optimierter Index	OA	Beste Ratio	Etablierter Index
Grünland	2806	13.08	1.Silageschnitt	$\frac{R - G}{R + G - NIR2}$	0.91	$\frac{B}{RE3}$	MSR
Winterwei-zen	1557	24.06	Ährenschieben	$\frac{RE3 - RE2}{RE3 + RE2 + RE1}$	0.72	$\frac{RE3}{RE2}$	REIP1
Winterge-riste	399	24.06	Gelbreife	$\frac{B - R}{B + SWIR2a}$	0.79	$\frac{SWIR2a}{RE1}$	NDSVI
Sommerwei-zen	15	22.05	Nicht beobach-tet	$\frac{RE1 - RE2}{RE1 + RE2 - 7.5 \times NIR2}$	0.36	$\frac{R}{SWIR2a}$	ND75
Hartweizen	56	02.05	Nicht beobach-tet	$\frac{B - RE1}{B - 7.5 \times R + 0.5}$	0.41	$\frac{SWIR2a}{NIR2}$	SATVI
Winterrog-gen	15	03.03	Winterruhe	$\frac{RE2 - RE3}{RE2 - RE3 + 0.5}$	0.35	$\frac{RE2}{RE3}$	REIP1
Sommer-gerste	42	05.05	Auflaufen	$\frac{SWIR2b - NIR2}{SWIR2b + NIR2 - 7.5 \times}$	0.34	$\frac{RE1}{B}$	ND75
Hafer	72	02.05	Auflaufen	$\frac{B - G}{B - G - 7.5 \times R + 0.5}$	0.32	$\frac{R}{G}$	MCARI2
Winterraps	700	22.05	Blüte Beginn	$\frac{RE1 - SWIR2a}{RE1 + 7.5 \times SWIR2a - 7}$	0.95	$\frac{SWIR2a}{RE1}$	Datt
Mais	110	13.08	Blüte	$\frac{RE2 - RE3}{RE2 + RE3 - 7.5 \times NIR2}$	0.77	$\frac{RE2}{RE3}$	MTCI
Kartoffel	20	21.05	Auflaufen	$\frac{RE3 - RE2}{RE3 + SWIR2a}$	0.71	$\frac{SWIR2a}{RE1}$	EVI
Zuckerrüben	112	13.08	Bestand ge-schlossen	$\frac{RE1 - SWIR2a}{RE1 - SWIR2a - RE2 +}$	0.87	$\frac{NIR2}{RE3}$	OSAVI2

2.1.3.2.2 Vergleichende Darstellung der Ergebnisse aus AP 4.2 für beide Untersuchungsgebiete

Trennbarkeitsprofile

Für die beiden Untersuchungsgebiete wurden für alle Zielarten, sofern sie im betreffenden Jahr angebaut wurden, Trennbarkeitsprofile berechnet. Dabei besteht die Zeitreihe für das UG Demmin ausschließlich auf RapidEye-Daten der Jahre 2010 - 2012, während für das UG Harz neben der RapidEye-Zeitreihe der Jahre 2010 - 2015 auch die Sentinel-2-Zeitreihe für 2016 zur Verfügung stand. Für Vergleichszwecke wurde zusätzlich noch eine Zeitreihe von Landsat-8-Daten herangezogen, die im *Surface-Reflectance-Prozessierungslevel* bezogen wurden und insgesamt 13 Zeitpunkte umfasst. Die Profile sind zusammen mit der phänologischen Entwicklung in beiden Untersuchungsgebieten in Abbildung 44 dargestellt.

Über den kompletten Untersuchungszeitraum von 2010 bis 2016 betrachtet sind mehrere Dinge auffällig. Zum einen, sind die Trennbarkeitsmaxima im UG Demmin für die Jahre 2010 und 2012 deutlich geringer als im UG Harz, die Zeitpunkte sind jedoch ähnlich. Zweitens sind die Trennbarkeiten basierend auf der 20-m-Sentinel-Zeitreihe sowie auf der Landsat-8-Zeitreihe sind geringer als die Trennbarkeiten für die RapidEye-Zeitreihe im Harz (Abbildung 44: oben). Beide Auffälligkeiten treffen allerdings nur auf die Fruchtart Winterweizen zu; für die übrigen Zielarten, beispielsweise Winterraps (s. Abbildung 44 unten) sind die erzielten Trennbarkeiten vergleichbar hoch.

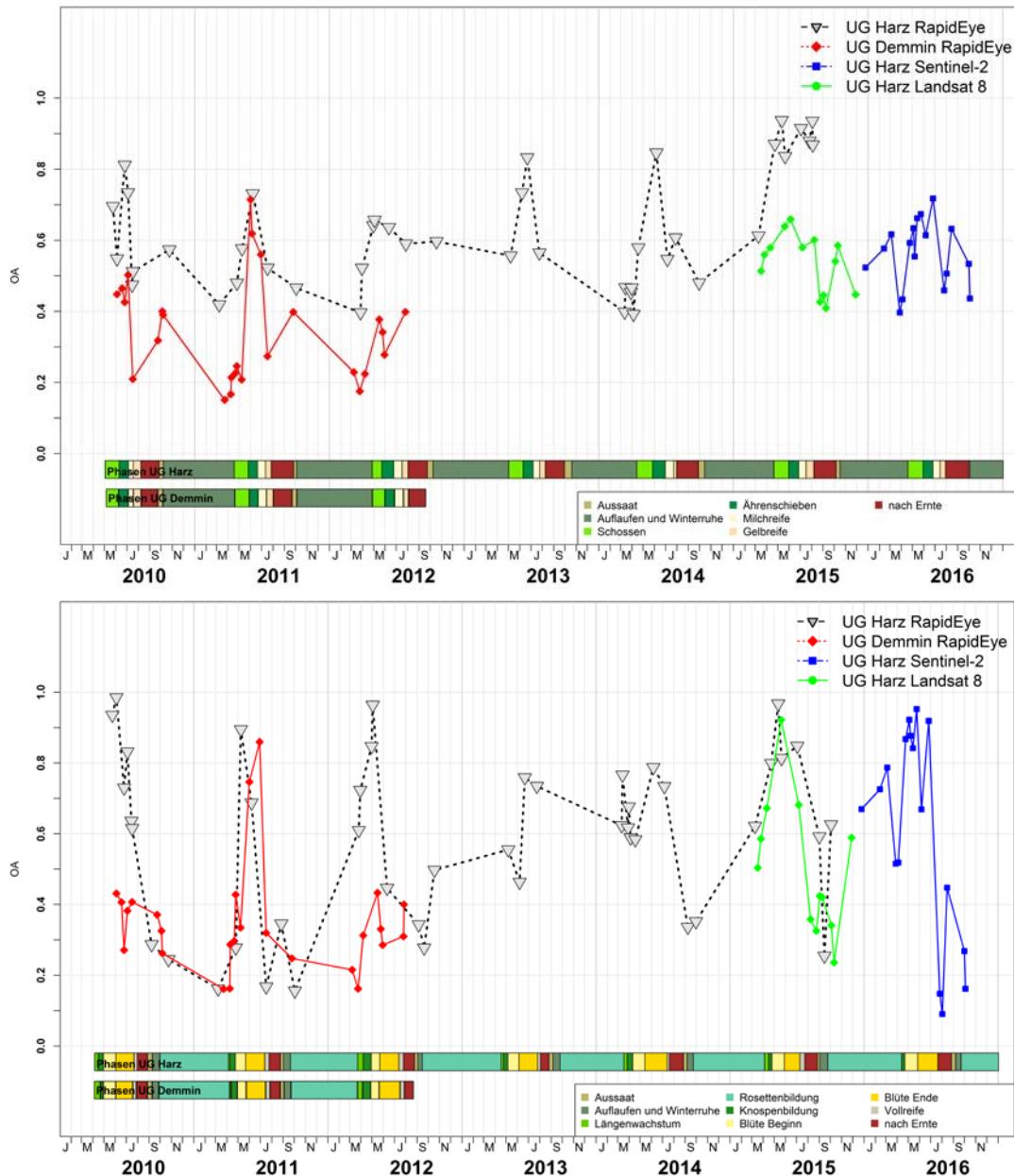


Abbildung 44: Zeitreihen verschiedener Sensoren abgeleitete Trennbarkeitsprofile und phänologische Entwicklungsstadien für Winterweizen (oben) und Winterraps (unten) für die Jahre 2010 – 2015 im UG Harz und 2010 – 2012 im UG Demmin

Zeitfensterdetektion

Die finale Zeitfensterdetektion basiert für alle Zielarten auf den Ergebnissen der Trennbarkeitsanalysen für die Untersuchungsgebiete Demmin und Harz/Harzvorland auf RapidEye-Basis sowie für das UG Harz/Harzvorland auf Sentinel-2-Basis. Die Landsat-8-Zeitreihe wurde aufgrund des Fehlens von spektralen Informationen aus dem *Red-Edge*-Bereich nicht berücksichtigt. Für jedes Jahr und Untersuchungsgebiet wurde der Zeitpunkt der maximalen Trennbarkeit bestimmt und der entsprechenden phänologischen Phase, sofern diese Teil des DWD-Beobachtungsprogramms ist, zugordnet.

Um von allen mindestens einmal als optimal ausgewählten Zeiträumen jenen zu bestimmen, der mit größter statistischer Sicherheit sehr gute Klassifikationsergebnisse ermöglicht, wird das dimensionslose Maß

$$S_{TF} = N_{obs} \times \frac{OA_{max}^2}{OA_{mean}}$$

berechnet. Dabei stellt N_{obs} die Anzahl dar, mit der ein bestimmter Zeitraum als optimal bewertet wurde, OA_{max} und OA_{mean} repräsentieren die Genauigkeitsmaximal- und Mittelwerte des jeweiligen Zeitraums. Jener Zeitraum, der den höchsten Wert für S_{TF} aufweist, wird als optimal betrachtet. Das Maß ist dahingehend entwickelt worden, dass die Anzahl der Beobachtungen einer Phase, die als optimal bewertet wird, den größten Einfluss auf die Zielgröße hat. Zweitwichtigstes Entscheidungskriterium ist die maximal beobachtete Klassifikationsgenauigkeit je optimaler Phase.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 zusammenfassend dargestellt. Einen grafischen Überblick gibt Abbildung 45: Optimale Klassifikationszeitfenster und phänologische Indikatorphasen.

Tabelle 26: Zeiträume höchster spektraler Trennbarkeit und korrespondierende phänologische Phasen sowie mittlere und maximale Genauigkeit und Verhältnis zur Bestimmung des optimalen Zeitraums je Fruchtart. Der optimale Zeitraum ist fett hervorgehoben.

Fruchtart	DOY _{min} -DOY _{max}	Phase	Anzahl	OA _{max}	OA _{mean}	S _{TF}
Dauergrünland	122-128	Erstes Ergrünen	2	0,99	0,94	2,8
	170-275	Erste Heuschnitt	11	0,95	0,85	11,68
	130-154	Erster Silageschnitt	3	0,82	0,81	2,49
Hartweizen	63-71		2	0,38	0,3	0,96
	111-125	Nicht beobachtet	4	0,26	0,19	1,43
	154-161		2	0,26	0,26	0,52
	201-228		2	0,31	0,25	0,77
Winterweizen	122-130	Schossen	2	0,74	0,7	1,56
	153-184	Ährenschieben	11	0,85	0,72	11,04
	176-176	Milchreife	1	0,72	0,72	0,72
	207-213	Gelbreife	2	0,64	0,55	1,49
Sommerweizen	66-88		4	0,54	0,31	3,76
	106-128	Nicht beobachtet	5	0,35	0,25	2,45
	192-213		3	0,22	0,2	0,73
Winterroggen	179-184	Vollblüte	2	0,48	0,32	1,44
	66-100	Auflaufen / Winterruhe	6	0,66	0,24	10,89
	119-130	Schossen	2	0,31	0,19	1,01
	197-207	Gelbreife	4	0,2	0,15	1,07
Wintergerste	260-260	Bestellung	1	0,36	0,36	0,36
	66-99	Auflaufen	4	0,68	0,42	4,40
	153-170	Ährenschieben	3	0,52	0,36	2,25
	176-196	Gelbreife	8	0,89	0,7	9,05

Sommergerste	93-126 143-154	Nicht beobachtet	9 2	0,45 0,31	0,27 0,27	6,75 0,71
Fruchtart	DOY _{min} -DOY _{max}	Phase	Anzahl	OA _{max}	OA _{mean}	S _{TF}
Hafer	79-99	Bestellung	3	0,6	0,36	3,00
	114-125	Auflaufen	6	0,44	0,28	4,15
	154-154	Schossen	1	0,23	0,23	0,23
	201-201	Milchreife	1	0,38	0,38	0,38
	207-214	Gelbreife	2	0,45	0,32	1,27
Winterraps	122-143	Blüte Beginn	10	1	0,87	11,49
	154-196	Blüte Ende	6	0,89	0,76	6,25
Sommerraps	128-128	Nicht beobachtet	1	0,3	0,3	0,3
Mais	135-160	Auflaufen	4	0,93	0,73	4,74
	207-213	Blüte Beginn	4	0,86	0,81	3,65
	226-242	Milchreife	4	0,81	0,72	3,64
	203-203	Fahnenschieben	1	0,72	0,72	0,72
	170-197	Längenwachstum	3	0,66	0,58	2,25
Kartoffeln	106-123	Bestellung	2	0,35	0,32	0,77
	128-170	Auflaufen	7	0,35	0,3	2,86
	171-274	Bestand geschlossen	4	0,3	0,22	1,64
Zuckerrübe	89-99	Bestellung	2	0,88	0,81	1,91
	114-154	Auflaufen	8	0,7	0,53	7,40
	207-262	Bestand geschlossen	6	0,88	0,64	7,26

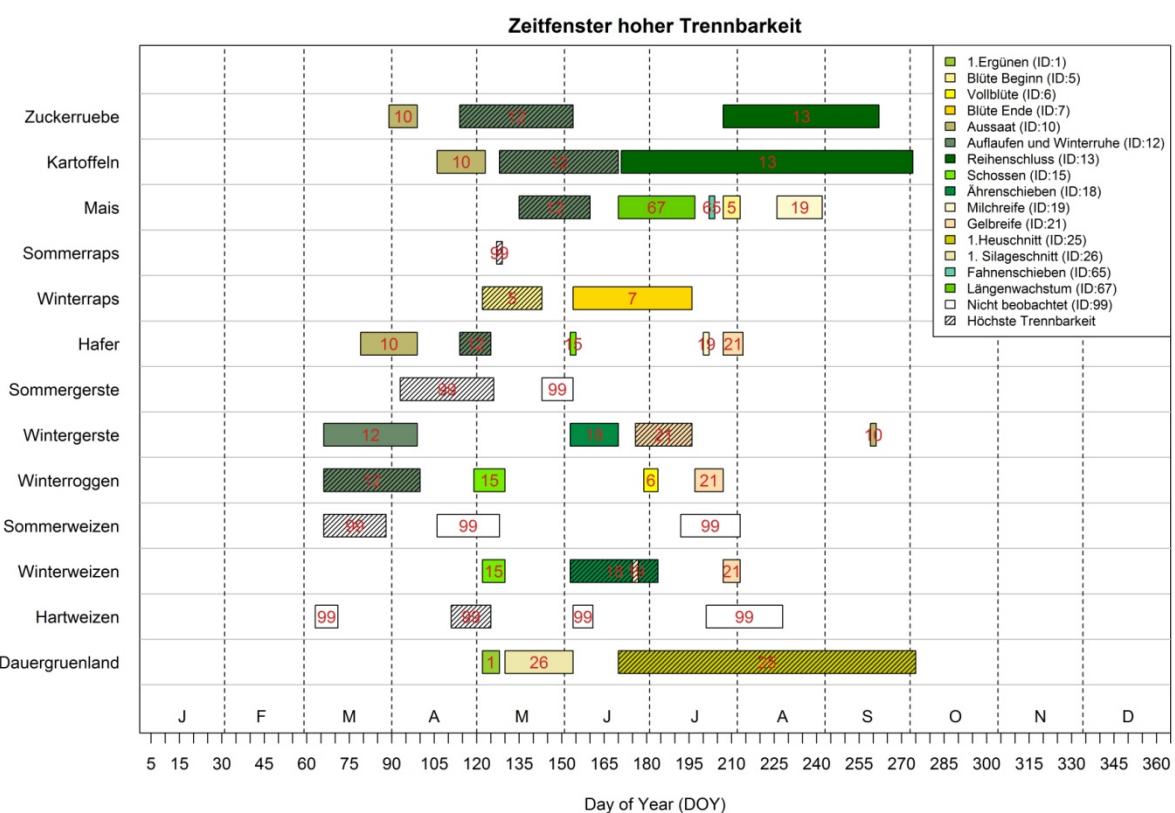


Abbildung 45: Optimale Klassifikationszeitfenster und phänologische Indikatorphasen.

Für eine praktische Nutzung der erzielten Ergebnisse zur Optimierung der Auswahl geeigneter Satellitendatensätze für die Klassifikation bedeutet dies: wenn beispielsweise die Unterscheidung der drei Zielarten Winterweizen, Wintergerste und Winterroggen angestrebt wird, lässt der Zeitraum zwischen 170. und 190. Tag die beste Klassifikationsgüte erwarten, da in diesem Zeitraum Winterweizen und Wintergerste ihren optimalen Wachstumszustand (Ährenschieben bzw. Gelbreife) erreicht haben und sich Winterroggen in der Phase Blüte befindet, die als eine weniger sichere Indikatorphase ausgewiesen wurde.

Eine Publikation des Verfahrens zur Ableitung und Präsentation der Indikatorphasen und phänologischen Zeitfenster wird für das Frühjahr 2018 angestrebt (Gerstmänn et al. 2018).

2.1.3.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse zu den im Projektantrag formulierten Zielen

Aufgrund der Tatsache, dass nur für die Anbausaison 2016 eine Sentinel-2A-Zitreie zur Verfügung stand und Referenzdaten in diesem Jahr nur für das UG Harz verwendet werden konnten, konnten keine Vegetationsindizes entwickelt werden, deren Eignung über mehrere Jahre hinweg validiert wurde. Die Formulierung entsprechender Indizes einzig auf Basis von RapidEye-Daten ist nicht im Sinne der Projektziele, da dieser weder die temporale noch die spektrale Auflösung des Sentinel-2-Sensors erreicht. Die entwickelte Methodik ist jedoch flexibel, sodass in Folgejahren weitere Analysen auf Basis von den nunmehr verfügbaren Sentinel-2A/B-Zitreien durchgeführt werden können, um allgemeingültige Indizes zu entwickeln.

2.1.3.3 Arbeitspaket 5.3: Nutzbarkeit der Ergebnisse für andere Untersuchungsräume

2.1.3.3.1 Arbeitspaket 5.3.1: Natürliche Standortbedingungen

Um die Übertragung der Ergebnisse auf andere europäische Regionen zu testen, sollte über eine Kooperation mit dem Projekt AMIGA theoretisch analysiert werden. Innerhalb des Projektes AMIGA wurden jedoch keine systematischen Erhebungen zu Entwicklungsstadien durchgeführt (Dr. Stephan Härtel, Universität Würzburg, schriftlich). Weiterhin lag der Fokus des Forschungsprojektes auf den Kulturarten Kartoffel und Mais, die innerhalb des PhenoS-Projektes nur von untergeordneter Bedeutung waren. Getreidearten wurden innerhalb von AMIGA nicht systematisch untersucht. Dadurch erfolgt die Übertragbarkeitsanalyse ausschließlich auf Literaturbasis.

Landwirtschaftliche Gliederung Europas

Innerhalb Europas ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Regionen dann möglich, wenn ähnliche Naturraumverhältnisse, Fruchtarten und Bewirtschaftungsweisen auftreten. Da Wintergetreide eine Mindestanzahl an Frosttagen benötigen, werden diese überwiegend in gemäßigten Übergangsklimaten Mitteleuropas angebaut, jedoch nicht in den mediterranen Klimaten Südeuropas oder den maritimen Klimaten der britischen Inseln und Frankreichs.

Übertragbarkeit der Ergebnisse aufgrund der landwirtschaftlichen Gliederung

Für jede Fruchtart werden nach verschiedenen Kriterien wie Frosthärtete, Schädlingsanfälligkeit oder Trockenstressresistenz für verschiedene Klimate unterschiedliche Sorten derselben Fruchtart angebaut. Diese zeigen teilweise deutlich unterschiedliche phänologische Entwicklungsabläufe, da die erforderlichen Temperatursummen für das Erreichen des nächsten Wachstumsstadiums variieren. Weiterhin unterscheiden sich verschiedene Sorten einer Art morphologisch teilweise stärker von anderen

Sorten als von anderen Arten. Speziell für die nah verwandten Getreidearten ergibt sich dadurch eine Verringerung der Allgemeingültigkeit der Klassifikationsmethoden.

Die phänologischen Modelle PIM und PHASE basieren auf modifizierten Varianten des Growing-Degree-Days-Konzeptes. Zahlreiche Studien kamen zu dem Ergebnis, dass die phänologische Entwicklung von Getreide nur in gemäßigten Klimaten fast ausschließlich von der Temperatur abhängt, während in Gebieten höherer Aridität die Intensität und Verteilung der Niederschläge einen höheren Einfluss auf die phänologischen Ereignisse hat. Dies wird sich in der sinkenden Genauigkeit der modellierten phänologischen Phasen widerspiegeln. Unabhängig von der Verfügbarkeit phänologischer Beobachtungen sind die Modellierungsergebnisse in kontinentalen und mediterranen Klimaten wahrscheinlich ungenauer als im ozeanischen oder Übergangsklima.

2.1.3.3.2 Arbeitspaket 5.3.2: Verfügbarkeit phänologischer Beobachtungsdaten

Die europaweite Verfügbarkeit phänologischer Beobachtungen wurde unter Nutzung der Datenbank des *Pan-European Phenology Project (PEP725)*, welches das Nachfolgesystem des COST 725-Systems darstellt, durchgeführt. Der Großteil der innerhalb der Datenbank verfügbaren Observationen beschreibt die Phänologie von natürlichen krautigen Pflanzen und Baumarten, nur ein geringer Anteil betrifft landwirtschaftliche Feldfrüchte. Die Datenverfügbarkeit erfolgte auf Basis der in AP 3.1 definierten Zielklassen für die Untersuchungsgebiete Harz/Harzvorland und Demmin mit Beginn der im Projekt betrachteten Jahre ab 2010.

Insgesamt existieren im Untersuchungszeitraum phänologische Beobachtungen für 9 der definierten Zielklassen in Österreich, Bosnien-Herzegowina, Tschechische Republik, Deutschland, Spanien, Kroatien, Montenegro und der Slowakei, mit deutlichen Unterschieden in der Anzahl der phänologischen Stationen sowie des beobachteten Artenspektrums (siehe Tabelle 27). Die größten Länder Europas neben Deutschland (Frankreich, Italien und Großbritannien) fehlen völlig. Für Deutschland existieren die mit Abstand meisten Beobachtungen, wobei jedoch deutsche Beobachtungen des Winterrapses nicht in die Datenbank mit einfließen.

Die PEP725-Datenbank enthält in der Regel alle Daten bis auf das laufende Jahr. Ausnahme bildet hier Österreich, da die PEP725-Datenbank von der Österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) administriert wird, die ebenfalls das österreichische phänologische Beobachtungsnetzwerk betreibt. Alle übrigen Länder liefern die jeweiligen Daten im Folgejahr nach der routinemäßigen Qualitätskontrolle innerhalb der zuständigen Behörden des jeweiligen Landes.

Die Übertragbarkeit der Methoden zur phänologischen Modellierung auf andere Untersuchungsräume ist insgesamt nur stark eingeschränkt möglich. Lediglich Österreich und die Slowakei verfügen über ein ausreichend dichtes Beobachtungsnetz für die phänologischen Modelle PHASE und PIM sowie über genügend verschiedene Feldfrüchte.

Tabelle 27: Anzahl phänologischer Stationen mit mindestens einer gemeldeten Beobachtung je Land, Jahr und Fruchtart in der PEP725-Datenbank. Stand: 7.11.2016. AT – Österreich, BA – Bosnien-Herzegowina, CZ – Tschechische Republik, DE – Deutschland, ES – Spanien, HR – Kroatien, ME – Montenegro, SK – Slowakei

Fruchtart	Land	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Hafer	AT	20	19	12	12	9	-	-
	CZ	2	2	-	-	-	-	-
	DE	623	593	601	545	516	502	-
	HR	2	2	2	2	2	2	-
Winterweizen	AT	18	18	20	17	20	-	-
	BA	1	1	1	1	1	-	-
	CZ	2	2	-	-	-	-	-
	DE	854	854	850	817	804	765	-
	ES	3	3	-	-	-	-	-
	HR	4	4	4	4	3	3	-
Wintergerste	SK	44	40	38	38	-	-	-
	AT	19	17	15	15	19	-	-
	DE	876	843	846	827	809	787	-
	ES	1	1	-	-	-	-	-
	HR	3	3	3	3	2	2	-
Sommergerste	SK	8	8	6	5	-	-	-
	AT	24	22	19	14	1	-	-
	BA	-	1	-	1	1	-	-
	CZ	2	2	-	-	-	-	-
	HR	1	1	1	1	1	1	-
Winterroggen	SK	42	38	40	34	-	-	-
	AT	24	18	16	14	11	-	-
	DE	603	584	604	560	522	497	-
	SK	10	13	12	8	-	-	-
Kartoffeln	AT	35	35	33	58	29	21	6
	BA	-	-	-	3	3	-	-
	HR	3	3	2	2	3	4	-
	ME	7	6	4	-	-	-	-
	SK	75	78	78	77	-	-	-
Mais	AT	29	27	28	26	41	22	7
	BA	-	1	1	1	1	-	-
	CZ	2	2	-	-	-	-	-
	DE	841	836	806	820	782	756	-
	ES	3	3	-	-	-	-	-
	HR	5	5	5	5	4	4	-
	ME	1	1	1	-	-	-	-
Winterraps	SK	29	25	26	25	-	-	-
	AT	-	7	16	10	11	8	4
Zuckerrübe	AT	6	7	3	4	14	3	1
	DE	499	492	506	468	445	423	-
	SK	19	16	17	19	-	-	-

2.1.4 Arbeitspaket 6: Webbasiertes Prognose- und Auskunftssystem WPA-PhenoS

Das webbasierte Prognose- und Auskunftssystem WPA-PhenoS bereitet die Ergebnisse der Projektpartner für den Wissenstransfer zu Fachleuten, Bildungsträgern und interessierter Öffentlichkeit auf. Folgende wissenschaftlich-technische Zielstellungen wurden in diesem Arbeitspaket primär verfolgt:

- Entwicklung von IT-Werkzeugen für eine Deutschland-weite räumliche Analyse und Vorher-sage von phänologischen Phasen und Zuständen
- Präsentation der detektierten Zeitfenster hoher Trennbarkeit von Feldfrüchten
- Nutzung des Systems als Grundlage für die zielklassenspezifische Auswahl geeigneter Satelli-tenbildszenen
- Bereitstellung von OGC- und ISO- konformen Diensten für die operationelle Nutzung des PHASE-Modells durch Fachleute (Ämter, Behörden, Bildungsträger) und die interessierte Öf-fentlichkeit
- Generierung von Webservices bzw. servicebasierten Architekturen (SOA) - On Demand, auto-matisiert
- Umsetzung moderner Web-Standards mit typischen Eigenschaften einer *Rich Internet Appli-cation (RIA)*, bereit gestellt über eine Drupal-gestützte Webplattform

Abbildung 46 zeigt einen Screenshot der Startseite des Systems (links Ansicht Standard-Internetbrow-ser, rechts Ansicht mobile Endgeräte).

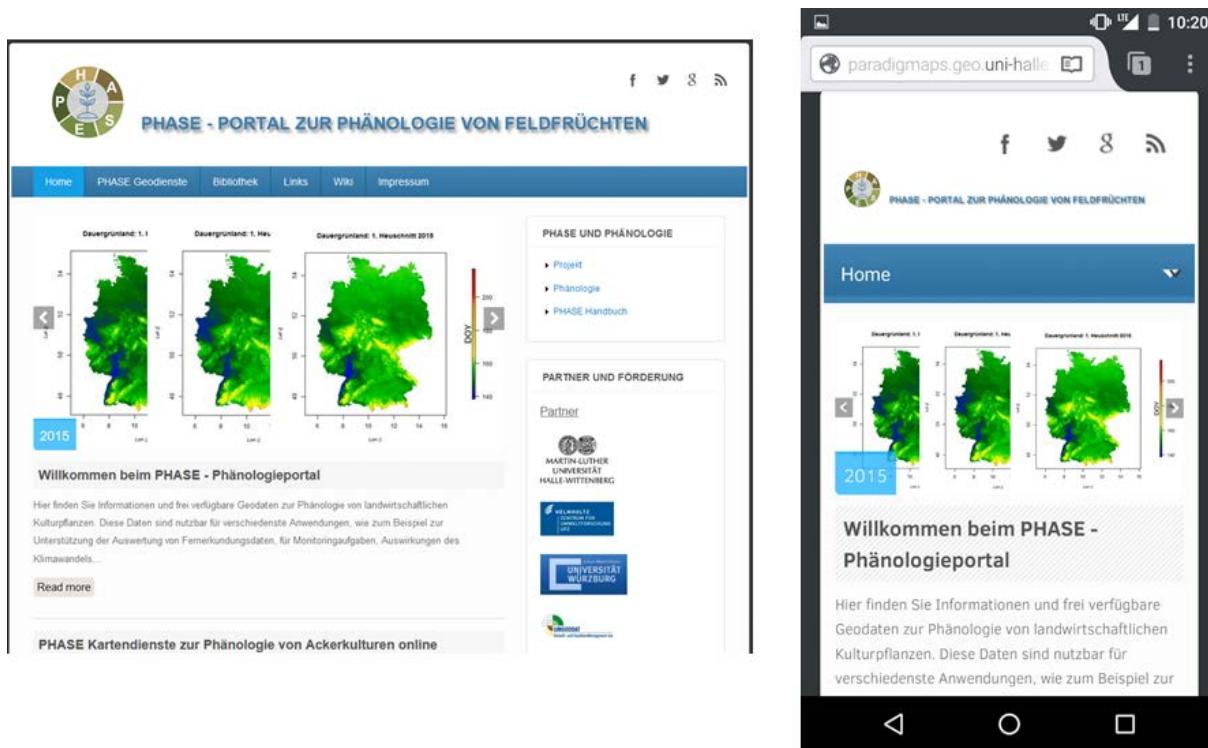


Abbildung 46: Semantische Vernetzung der PhenoS-Geodienste in einem Drupal- gestützten Web Content Ma-nagement System (phase.geo.uni-halle.de)

Der modulare Aufbau in einem inhaltlich und technisch offen konzipierten System unter Verwendung von internationalen Standards und Normen gewährleistet die Nachhaltigkeit des Portals (vgl. Abbil-dung 47).

2.1.4.1 Arbeitspaket 6.1 Spezifische Methodenentwicklung zur Datenarchivierung und Analyse

Die im Projekt entwickelten Methoden zur Datenarchivierung und Analyse (PHASE-Geodienste) bestehen aus den über standardisierte Schnittstellen korrespondierenden Komponenten Geo- und Metadatenarchiv, Geodateninfrastruktur (GDI), R-PHASE-Modeler und PHASE-Analyser (vgl. Abbildung 47).

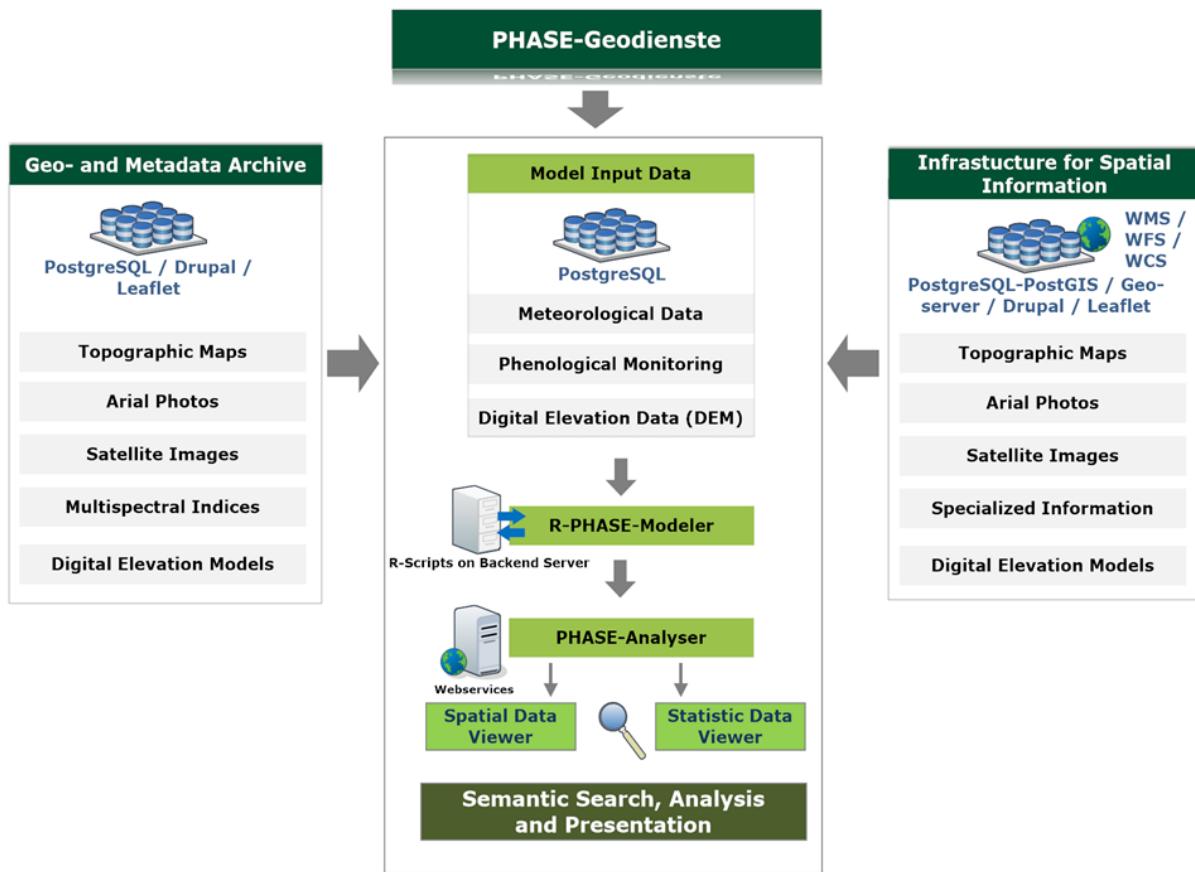


Abbildung 47: Modulare Konzeption der PhenoS-Geodienste zur Datenarchivierung und Analyse

In den folgenden Abschnitten erfolgt eine Kurzdarstellung.

PhenoS- Metadatenarchiv DCLIGHT4G

In der ersten Phase des Projekts wurde ein Metadatenarchiv entwickelt, in welchem die Mitarbeiter die Metainformationen zu den projektrelevanten Geo- und Massendaten speichern und analysieren können. Um die Interoperabilität dieses Dienstes zu gewährleisten, wurde nach Evaluationen mehrerer Standards innerhalb einer Vorauswahl (z.B. ISO 19115, FGDC Geospatial Standards) der weltweit verbreitet genutzte *Dublin-Core Lightweight Profile for Geospatial (DCLight4G)* implementiert und durch einige spezifische Datenfelder ergänzt. Die technische Umsetzung erfolgte innerhalb des CMS Drupal. Aktuell befinden sich 215 Fernerkundungsdatensätze in der Datenbank, zu welchen mit diesem Werkzeug u.a. eine Vorschau zur Gebietsabdeckung, die Projektion, das Erstellungsdatum, Rechte und der Speicherort exploriert werden kann (Abb. 48). Ein weiterer Vorteil dieser Applikation sind Möglichkeiten der Mehrfachnutzung für weitere Forschungsprojekte.

The screenshot shows a search interface for geodata. On the left, there's a sidebar for 'Data Mining in the Geodata Archive' with a list of projects (Project PhenoS is selected). Below it are filters for dataset type (e.g., Airborn Scanner, Digital Elevation Model, Satellite Image, Thematic Map, etc.), longitude/latitude ranges, and a date range from 2009 to 2017. A map on the right shows a bounding box over a region in Central Europe, specifically around Rostock, Germany. A table below the map lists datasets found, including one for 'Demmin' from 'Sunday, August 2, 2009'.

Abbildung 48: Beispiel zur Geodatensuche im DCLIGHT4G-Metadatenkatalog des Projektes PhenoS

PhenoS - Geodateninfrastruktur

Über die in einer zweiten Projektphase generierte GDI von PhenoS werden interoperable Schnittstellen zu und für externe Kataloge internationaler und nationaler geodatenhaltender Stellen implementiert. Dazu gehören u.a.:

- WMS OSM, ESRI World Topo Map und Imagery, WMS Bing, Google Earth
- WMS / WFS / WCS Dienste INSPIRE, GDI Deutschland, Dienste anderer nationaler Behörden
- Bereitstellung der PHASE-Dienste für Nutzung in GIS- und WebGIS-Anwendungen
- Web Map Services (WMS) zu den phänologischen Phasen und Zuständen

Die technische Umsetzung erfolgte im Rahmen einer Softwarekonfiguration aus dem Zusammenspiel von PostgreSQL/PostGIS, Geoserver, Drupal und Open Layers.

2.1.4.2 Arbeitspaket 6.2 Wissenschaftliche und Technische Konzeption und Umsetzung

Prototyp des WPA-PhenoS auf Basis von PHASE

Ziel dieser Tasks ist die webbasierte und automatisierte operationelle Nutzung des PHASE-Modells (vgl. Kap. 2.1.3.1) und zugehöriger Eingangsdaten durch die Implementierung der entwickelten Applikationen *R-PHASE-Modeler* und *PHASE-Analyser* innerhalb der zentralen Plattform des Geodienstesystems PHASE⁵ von PhenoS. Abbildung 49 verdeutlicht die Konzeption und Umsetzung in einem Workflow. Zunächst wurden für die Eingangsdaten des PHASE-Modells Schnittstellen zu den Observation Services⁶ (Wetter und Phänologie) des DWD programmiert, welche automatisiert und täglich die vom DWD bereit gestellten deutschlandweiten Daten zu Wetter und Phänologie speichern und an den *R-PHASE-Modeler* übergeben (vgl. Abbildung 49 und Abbildung 50).

Die Einbindung des Modells PHASE erfolgt über einen *chron*-Job, der täglich das R-Skript aufruft und alle Phasen mit den tagesaktuellen phänologischen Beobachtungen modelliert. Dazu ist es notwendig, den Automatisierungsgrad weiter zu erhöhen und eine universal einsetzbare Konfiguration des Modells zu bestimmen, die keine Optimierung von Basistemperatur oder Quantil erfordert. Um diese Ziele zu erreichen, wurde aufgrund der Beobachtungen, dass das 45%-Quantil für den Großteil der phänologischen Phasen optimal ist, ausschließlich dieses Quantil verwendet. Als Basistemperaturen wurden

⁵ <http://phase.geo.uni-halle.de>

⁶ <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>

jene Werte verwendet, die am häufigsten in der Literatur verwendet wurden (Tabelle 28). Weiterhin wird die Parametrisierung des Kriging-Modells durch die Umstellung auf die Funktion `autokrige()` im R-Paket `automap()` vollständig automatisiert optimiert.

Tabelle 28: Für die Web-Variante des PHASE-Modells verwendete Werte für die Basistemperatur

Fruchtart	Basistemperatur
Grünland	2 °C
Winterweizen	5.5 °C
Wintergerste	5.5 °C
Winterroggen	5.5 °C
Hafer	5.5 °C
Mais	5.5 °C
Winterraps	5.0 °C
Kartoffeln	8.0 °C
Zuckerrübe	1.1 °C

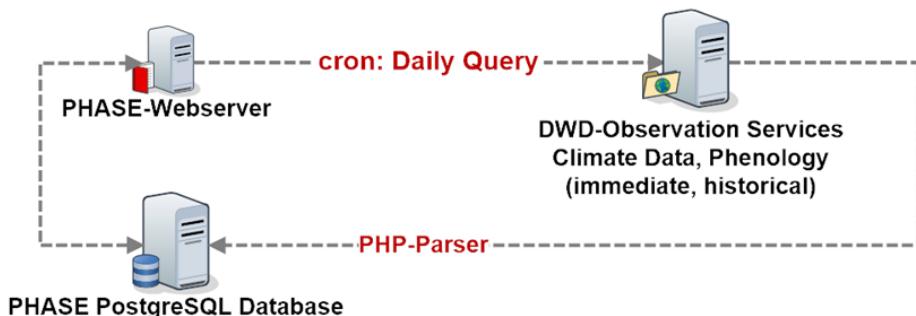


Abbildung 49: Automatisierte Prozessierung der PHASE- Eingangsdaten zu Wetter und Phänologie

Aus den vom *R-PHASE-Modeler* im Geo-TIFF-Format bereit gestellten Modellierungen zu den phänologischen Phasen werden anschließend über PHP- Skripte und die REST-ful-Schnittstelle des Geoservers standardisierte Web Map Services (WMS-Dienste) generiert. Die WMS-Services sind On Demand in tagesaktueller Auflösung über den in das Geodienstportal eingebundenen *PHASE-Analyser* verfügbar und können frei zugänglich und ortsunabhängig analysiert und visualisiert werden. Einige Voraussetzungen sind ein Webbrower der aktuellen Generation und ein Internetanschluss.

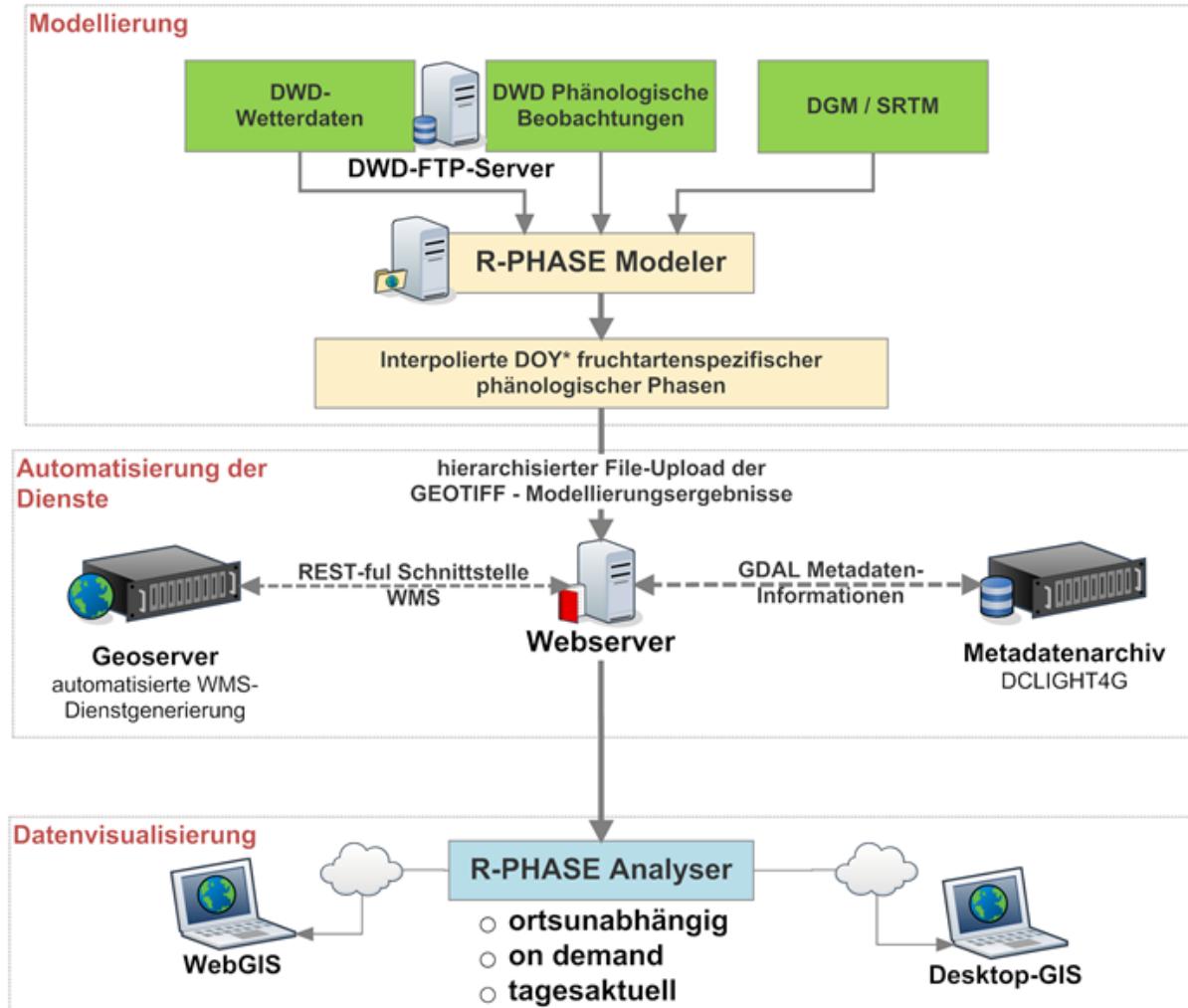


Abbildung 50: Workflow zur automatisierten Datenverarbeitung und Analyse des PHASE-Modells innerhalb von R-Phase Modeler und PHASE Analyser.

Die im System erfolgte Implementierung sämtlicher Daten über Taxonomien ermöglicht ein effizientes, semantisch begründetes Explorieren der Informationen zu Wetter und Phänologie. Die Geodienste des PHASE Analyzers setzen sich modular aus den Komponenten:

- Deutschlandweite Wetterstatistiken (Basis DWD)⁷
- Wetterstatistiken zu Mitteldeutschland (Basis ADAK-MLU)⁸
- deutschlandweite phänologische Beobachtungen des DWD⁹
- aus dem PHASE-Modell exportierte Kartendienste zur Phänologie von Ackerkulturen¹⁰

zusammen. Die Aktualisierung erfolgt automatisiert in täglicher Auflösung, so dass die Datenbestände dieser Applikationen stetig erweitert und aktualisiert werden. Gegenwärtig sind ca. 1000.000 Datens-

⁷ <http://phase.geo.uni-halle.de/maps/dwdwetter>

⁸ <http://phase.geo.uni-halle.de/maps/adakwetter>

⁹ <http://phase.geo.uni-halle.de/maps/dwd-phänologie>

¹⁰ <http://phase.geo.uni-halle.de/phase-wms-dienste>

ätzte des DWD zu Niederschlag, Temperatur und Sonnenscheindauer für 1089 Wetterstationen in einem interaktiven Viewer visualisierbar. Darüber hinaus lassen sich aus den Zeitreihen zu den stationsgebundenen Parametern aggregierte Statistiken (Minima, Maxima, Median, Summen) ableiten.

Für die von der MLU innerhalb des Klimainformationssystems ADAK im Mitteldeutschen Trockengebiet erfassten Daten (aktuell ca. 2.500.000 Datensätze von 11 Wetterstationen) sind gleichermaßen interaktive Visualisierungstools umgesetzt. Die Verfügbarkeit der Parameter ist hier größer (z.B. Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Richtung, Globalstrahlung). Zudem können diese Daten frei heruntergeladen und in externe Tabellenkalkulationsprogramme integriert werden, weil die Lizenzrechte bei der MLU liegen.



Abbildung 51: Inhalt und Funktionen der ADAK-Wettervisualisierungen von Stationen der MLU im Mitteldeutschen Trockengebiet

Mit Hilfe der Geodienste zu den deutschlandweiten phänologischen Beobachtungen des DWD wird eine effiziente Analyse und Visualisierung stationsgebundener, fruchtartenspezifischer phänologischer Phasen möglich. In dieser Semantic-Web- Applikation ermöglichen in Drupal implementierte Taxonomien zur Phänologie die interaktive, phasenspezifische Analyse statistischer Parameter zum Eintrittsdatum (Day of the Year - DOY) phänologischer Phasen. Über einen zur Verbesserung der *Usability* programmierten *DOY 2 Date Calculator* kann direkt die Umrechnung der DOY zu einem kalendarischen Datum erfolgen. Auch hier lassen sich die Daten, Zeitreihen und Statistiken mit Hilfe von interaktiven Diagrammen analysieren.

Die Bereitstellung der Modellierungsergebnisse des PHASE Modells erfolgt über die PHASE-Karten-dienste. Gegenwärtig (18.05.2017) stellt das System 455 WMS-Dienste zur deutschlandweiten Analyse phänologischer Phasen von Ackerkulturen bereit. Die zugehörigen WMS-Adressen und *getCapabilities*-Dokumente ermöglichen weltweit und kostenlos eine beliebige OGC-konforme Integration der Karten-dienste in externe GIS- und WebGIS Anwendungen. Alternativ können die Kartenexports aus dem

PHASE-Modell aber auch im PDF-Format (z.B. zur Verwendung in analogen Printmedien) oder im GEOTIFF-Format (Einbindung in Desktop-GIS) heruntergeladen werden.

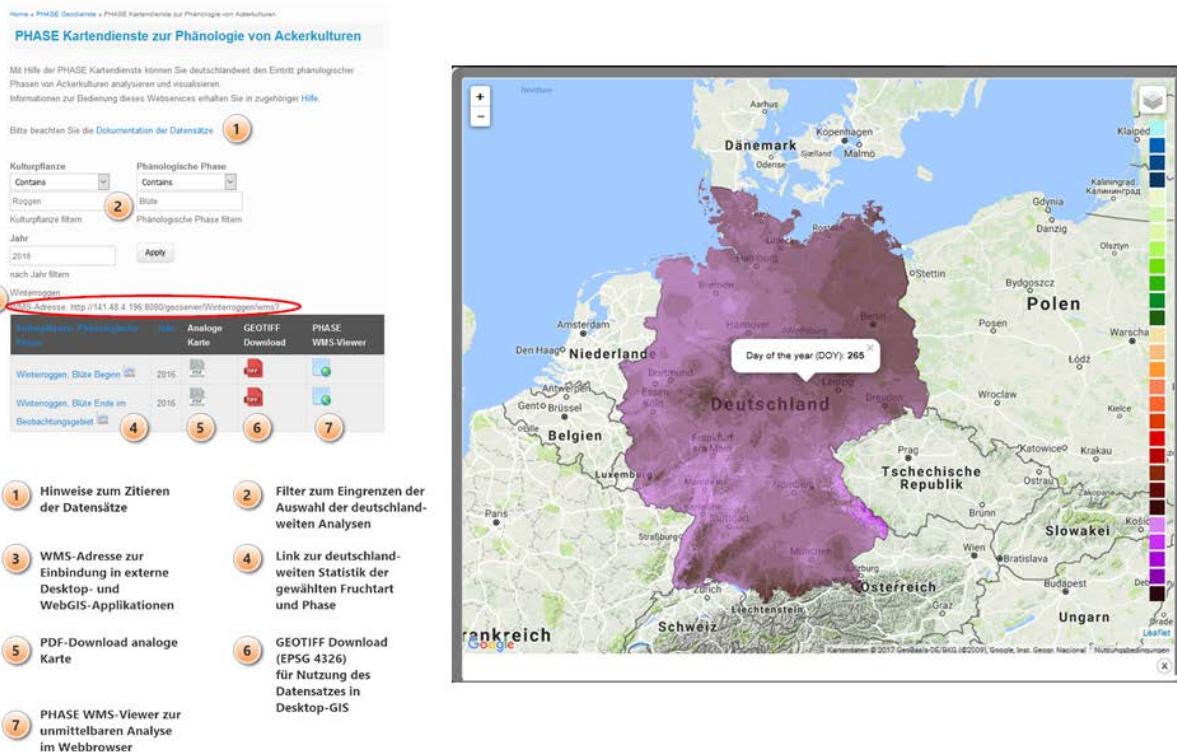


Abbildung 52: Suchapplikationen und WMS-Viewer innerhalb der PHASE-Kartendienste

Fazit: Die Geodienste von PHASE stellen innovative Werkzeuge für einen zeitgemäßen Wissenstransfer der Projektergebnisse zu Fachleuten bereit. Die Implementierung des PIM Modells kann auf gleiche Weise erfolgen, war jedoch im Laufe der Projektlaufzeit nicht mehr realisierbar. Zudem ist eine Nachnutzung und Weiterentwicklung der innerhalb des Arbeitspakets WPA-PhenoS generierten Methoden und Softwareapplikationen ohne Einschränkung möglich, da sie unter Berücksichtigung internationaler Normen und Standards konzipiert und umgesetzt sind.

Webservices zu Wetter, Phänologie und Zeitfenstern (Geodaten)

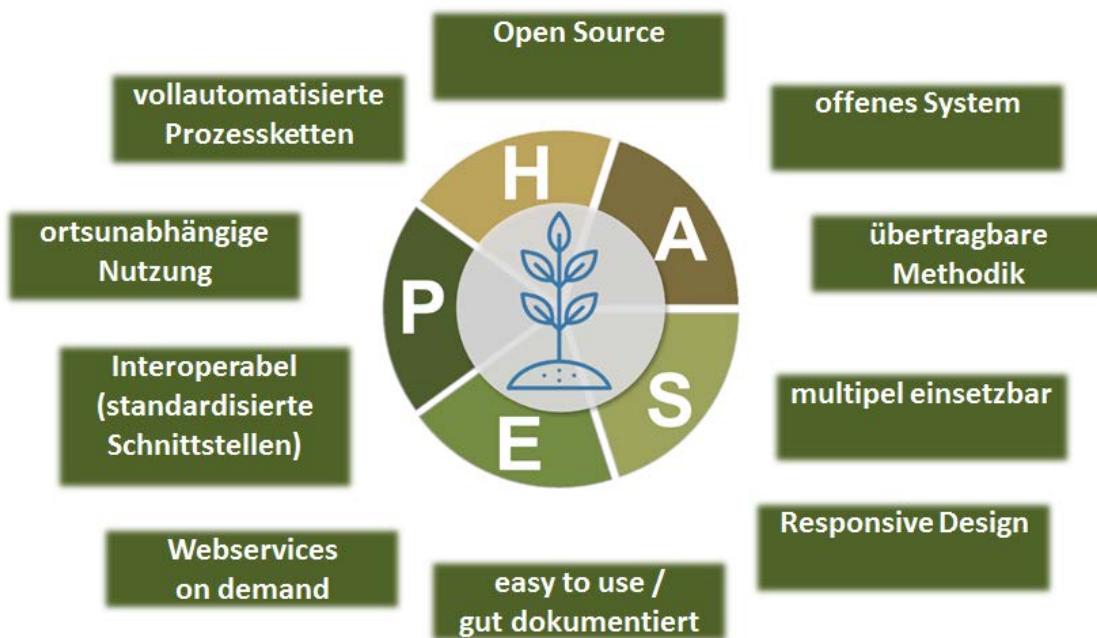


Abbildung 53: Eigenschaften der PHASE Geodienste (Tags)

Tests, Evaluation und Erweiterung von WPA-PhenoS

Die Evaluation des Prototyps erfolgte zweistufig. Innerhalb des ersten Schrittes wurde die Usability durch Mitglieder und wissenschaftliche Hilfskräfte der Fachgruppe Geofernerkundung der MLU Halle bewertet. Diese bereits verbesserte Version wurde im Zuge des gemeinsamen Workshops der Arbeitskreise Fernerkundung und Auswertung von Fernerkundungsdaten der DGfG bzw. DGPF am 29.09.2016 in Halle (Saale) in Form eines Tutoriums präsentiert, wobei anschließend eine Evaluation durch die Teilnehmer vorzunehmen war. Die daraus hervorgegangen Anmerkungen wurden anschließend umgesetzt. Diese Erweiterungen umfassten weitergehende Download-Möglichkeiten, verbesserte kartographische Darstellungen im WebGIS sowie ein detailliertes Glossar zu Fruchtarten, Phasen und Bedienung des Portals.

2.1.4.3 Arbeitspaket 7: Projektkoordination

Das administrative Arbeitspaket 7 umfasste den Aufbau einer Projekthomepage sowie die Koordination der Arbeiten der einzelnen Projektpartner.

Die Koordination umfasste vorwiegend die Organisation von jährlichen Projekttreffen (2013: Halle, 2014: Leipzig, 2015: Würzburg, 2016) sowie zusätzlichen Treffen mit besonderem Anlass. Ein solches außerplanmäßige Treffen fand im Frühjahr 2014 in Halle statt, bei dem das Geländeprogramm des Projektpartners GeoJMU und die Planung für die angedachten Hyperspektralbefliegungen spezifiziert wurden. Weiterhin wurde vom Projektpartner GeoMLU das Verfassen der halbjährlichen Zwischenberichte sowie die Vorbereitung und Koordination des Abschlussworkshops und –berichtetes übernommen.

Die aufgebaute Projekthomepage wurde vollständig in Drupal implementiert und enthält öffentlich zugängliche und projektinterne Bereiche. Die Homepage ist über die URL PhenoS.geo.uni-halle.de er-

reichbar. Intern werden nicht-öffentliche Dokumente und Daten dem Projektteam zur Verfügung gestellt, während im frei zugänglichen Teil des Systems Neuigkeiten und Grundlageninformationen zum Projekt abrufbar sind.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

GeoJMU

Im Rahmen der Durchführung des Projektes sind Ausgaben in Form von Personalkosten, Reisekosten und Materialkosten entstanden, über die im Detail im Verwendungsnachweis berichtet wurde.

GeoMLU

Im Rahmen der Durchführung des Projektes sind Ausgaben in Form von Personalkosten, Reisekosten, Kosten für den Unterauftragnehmer UMGEODAT sowie Materialkosten entstanden, über die im Detail im Verwendungsnachweis berichtet wurde.

UFZ

Über die Im Rahmen der Durchführung des Projektes sind Ausgaben in Form von Personalkosten, Reisekosten und Materialkosten entstanden Kosten wurde im Detail im Verwendungsnachweis berichtet.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

GeoJMU

Der Verlauf der Arbeit im Projekt folgte der im Projektantrag formulierten Planung. Alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet und im angemessenen Umfang verbreitet. Es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt nötig.

GeoMLU

Der Verlauf der Arbeit im Projekt folgte der im Projektantrag formulierten Planung. Die im Arbeitsplan formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet und im angemessenen Umfang verbreitet (siehe Kapitel 2.6). Es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt nötig.

UFZ

Die geleistete Arbeit entspricht dem Projektplan. Alle Aufgaben wurden der Planung entsprechend ohne Nutzung zusätzlicher Ressourcen bearbeitet.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

GeoJMU

Die Verwertung der Ergebnisse des ZE findet sich detailliert im Erfolgskontrollbericht. Hervorzuheben sind hier insbesondere:

- Das Validierungswerkzeug zur Beurteilung der Klassifikationsgenauigkeit ist durch die Open-Source Programmierung prinzipiell für andere Nutzer verfügbar. Eine Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit durch Erstellung eines R-Programm Packages ist anvisiert.

- Die im Projektverlauf erhobenen Felddaten stehen nach Projektende zur weiteren Nutzung durch andere wissenschaftliche Interessenten zur Verfügung.

GeoMLU

Ausführungen zur Verwertbarkeit finden sich detailliert im Erfolgskontrollbericht. Die wichtigsten Punkte umfassen dabei:

- Die entwickelten Methoden zur Integration phänologischer Merkmale, zur Optimierung der Indizes und zur Zeitfensterdetektion stehen grundsätzlich für andere Nutzer zur Verfügung und wurden zum Großteil bereits veröffentlicht.
- Das phänologische Modell PHASE ist auf OpenSource-Basis programmiert, frei verfügbar und für andere Nutzer auf dem Projektportal verfügbar.
- Das entwickelte Webportal kann für vielfältige Anwendungsmöglichkeiten auch nach Projektende weiter genutzt werden. Insbesondere trifft dies auf die Bereitstellung der modellierten phänologischen Phasen zu, die kontinuierlich erzeugt und bereitgestellt werden

UFZ

Ausführungen zur Verwertbarkeit finden sich detailliert im Erfolgskontrollbericht.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

GeoJMU

Die Entwicklungen und Forschungsaktivitäten im Bereich der Landnutzungsklassifikation haben weitere interessante Erkenntnisse und Fragestellungen aufgeworfen, die nicht durch das beschriebene Projekt beantwortet werden können.

GeoMLU

Dem Zuwendungsempfänger GeoMLU sind keine entsprechenden Vorhaben bekannt.

UFZ

Dem Zuwendungsempfänger UFZ sind keine entsprechenden Vorhaben bekannt.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

GeoJMU

Vorträge und Poster:

Knöfel, P. (2014): Entwicklung eines Analysetools zur Detektion optimaler Klassifikationszeitschnitte. In 6. RESA Workshop, 05.-06.03.2015 Bonn.

Knöfel, P., Uslar, J. von, and Conrad, C. (2016): Einfluss stratifizierter Probennahme auf die Genauigkeit multitemporaler objektbasierter Landnutzungsklassifikation. In: RESA Workshop, 15.-16.03.2016, Bonn, Germany.

Knöfel, P., Löw, F., and Conrad, C. (2015): Object-Based Land Use Classification of Agricultural Land by Coupling Multi-Temporal Spectral Characteristics and Phenological Events in Germany. In European Geosciences Union General Assembly (EGU) 2015, 12.-17.04.2015, Wien, Austria.

Knöfel, P., Löw, F., Gerstmann, H., Möller, M., Xu, X., and Conrad, C. (2015): Introduction of a multi-functional tool for the evaluation of uncertainty and accuracy in multitemporal object-based land use classification. In SPIE Remote Sensing Conference, 21.-24.09.2015, Toulouse, France.

Knöfel, P., Löw, F., Möller, M., and Conrad, C. (2015): Evaluation of Uncertainty and Accuracy in Multi-Temporal Object-Based Land Use Classification, 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Berlin.

GeoMLU

Veröffentlichungen:

Gerstmann, H.; Doktor, D.; Gläßer, C. & Möller, M. (2016): PHASE: A geostatistical model for the Kriging-based spatial prediction of crop phenology using public phenological and climatological observations. *Computers and Electronics in Agriculture* 127. pp. 726-783. DOI: 10.1016/j.compag.2016.07.032

Gerstmann, H.; Möller, M. & Gläßer, C. (2016): Optimization of spectral indices and long-term separability analysis for classification of cereal crops using multi-spectral RapidEye imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52. pp. 115-125. DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.001

Möller, M.; Gerstmann, H.; Dahms, T.C.; Gao, F. & Förster, M (2017): Coupling of phenological information and simulated vegetation index time series: Limitations and potentials for the assessment and monitoring of soil erosion risk. CATENA, 150, S.192-205. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816216304696>

Gerstmann, H.; Gläßer, C.; Thürkow, D. und Möller, M: Detection of phenological indicator phases for optimised acquisition time frames for crop classification. Eingereicht in: Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. 15 Pages, accepted

GeoMLU

Vorträge

Gläßer, C., Gerstmann, H., Knöfel, P. und Conrad, C . (2017): Optimization of multi-temporal land use classification by integration of phenological time frames: MultiTemp 2017, 27.-29. June, Bruges, Belgium

Gläßer, C., Conrad, C. & D. Doktor (2017): Phänologische Strukturierung von Sentinel-2-Daten-Ergebnisse und Lessons learned – Projekt PhenoS: Workshop „Möglichkeiten und Herausforderungen im Kontext aktuelle und zukünftiger Erdbeobachtungsdaten“, KUBUS, Leipzig, 9./10. März 2017

Gläßer, C. (2017): Phänologische Strukturierung von zeitlich hochauflösenden Sentinel-2-Datensätzen zur Optimierung von Landnutzungsklassifikationen ArgriSens Science Meeting, Science Day, DLR Neutreititz, 08.-09. Februar 2017

Gerstmann, H. & Gläßer, C. (2016): Optimierung spektraler Indizes aus multisensoralen Satellitenbildzeitreihen für Landnutzungsklassifikationen. 5. gemeinsamer Workshop der Arbeitskreise "Auswertung von Fernerkundungsdaten" der DGPF e.V. und "Fernerkundung" der DGfG e.V., 28./29.09.2016, Halle.

Gerstmann, H.; Thürkow, D.; Thürkow, F. & Gläßer, C. (2016): PHASE – Ein Modell zur automatischen Interpolation phänologischer Phasen. Tutorium zur Nutzung des PhenoS-Phänologieportals. 5. gemeinsamer Workshop der Arbeitskreise "Auswertung von Fernerkundungsdaten" der DGPF e.V. und "Fernerkundung" der DGfG e.V., 28./29.09.2016, Halle.

Gerstmann, H.; Möller, M.; Thürkow, D.; Knöfel, P.; Xu, X. & Gläßer, C. (2015): Nutzung phänologischer Zeitfenster für satellitengestützte Klassifikationen landwirtschaftlicher Nutzflächen. Deutscher Kongress für Geographie, Berlin, 01.10.2015.

Gerstmann, H.; Möller, M.; Thürkow, F. & Gläßer, C. (2015): Entwicklung eines OpenSource-WebGIS zur Modellierung von Pflanzenentwicklungsstadien. 7. Geofachtag. Halle (Saale), 18.02.2015.

Gläßer, C.; Gerstmann, H.; Möller, M.; Thürkow, D.; Conrad, C.; Knöfel, P.; Doktor, D.; Xu, X. (2015): Phänologische Strukturierung von zeitlich hochauflösenden Sentinel-2-Datensätzen zur Optimierung von Landnutzungsklassifikationen. DLR-Workshop „Nutzung der Sentinels und nationalen Erdbeobachtungsmissionen“. Bonn, 31.01.2015.

Gerstmann, H.; Möller, M. & Gläßer, C. (2014): Phänologische Strukturierung von Satellitendaten zur Detektion optimaler Zeitfenster für Landnutzungsklassifikationen. 3. gemeinsamer Workshop der Arbeitskreise "Auswertung von Fernerkundungsdaten" der DGPF e.V. und "Fernerkundung" der DGfG e.V., 10.10.2014, Berlin.

Dissertation:

Gerstmann, H.: "Phenological time frames and phenology-related spectral optimization for improved multi-spectral crop classification" Einreichung geplant 2018

UFZ

Veröffentlichungen:

Xu, X., Conrad, C., Doktor, D. (2017) Optimising Phenological Metrics Extraction for Different Crop Types in Germany Using the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). Remote Sensing, 9, 254.

Geplante Dissertation:

Xu, Xingmei

3 Erfolgskontrollbericht

3.1 Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen

UFZ

Das UFZ hat mit den entwickelten Methoden und Modellen zur flächenhaften Ableitung und Vorhersage der Phänologie in Agrarlandschaften die Vorbereitung der wissenschaftlichen und kommerziellen Nutzung der Sentinel-Missionen und nationalen Missionen maßgeblich unterstützt. In diesem Zusammenhang hat das UFZ neue operationelle Anwendungen der Erdbeobachtung insbesondere für die Umweltforschung und -überwachung entwickelt, die im Sinne des Copernicus-Programmes aktuell und frei zugänglich sind. Die Ergebnisse zeigen deutlich das Potenzial der Copernicus-Dienste sowohl für öffentliche Einrichtungen als auch zur Beantwortung verschiedener wissenschaftlicher Fragestellungen.

GeoJMU

Das Gesamtprojekt PhenoS, welches aus den drei Partnern Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (GEOMLU), Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) und Julius-Maximilians-Universität Würzburg (GEOJMU) bestand, fügt sich in eine Reihe von förderpolitischen Zielen ein: Es diente der Vorbereitung der wissenschaftlichen und kommerziellen Nutzung der Sentinel-Missionen und nationalen Missionen. So kommen die Erfahrungen und Ergebnisse, welche im Zuge des Projektes entwickelt wurden, unmittelbar den Nutzern der Daten der Copernicus Missionen zugute. Zum anderen wurden in diesem Projekt wissenschaftliche Fragestellungen verfolgt, die wichtige Erkenntnisse für die Landnutzungsklassifikation des landwirtschaftlichen Raums liefern. Es diente der Entwicklung neuer operationeller Anwendungen der Erdbeobachtung insbesondere für die Umweltforschung und -überwachung. Alle genannten Punkte entsprechen prioritären Zielen des deutschen Raumfahrtprogramms. Der Zuwendungsempfänger (ZE) hat während der Projektlaufzeit an der Entwicklung eines Klassifikationswerkzeuges zur Evaluierung von objektbasierten Landnutzungsklassifikationen aus Erdbeobachtungsdaten gearbeitet. Dabei wurden auch unterschiedlicher Szenarien untersucht (Variation der Datenverfügbarkeit und Referenzdaten, Erhöhung des thematischen Detailgrads, etc.) und als Datengrundlage dienten, bis zur Verfügbarkeit von Sentinel-2-Daten, geometrisch hochauflöste RapidEye-Daten, um die objektbasierten spektralen Merkmale für die Klassifikation abzuleiten. Die entwickelten Methoden zeigen das Potenzial und insbesondere auch die Herausforderungen hinsichtlich der Übertragung von bereits angewandten Verfahren für mittelauflösende Sensoren auf räumlich besser aufgelöste Daten wie die der RapidEye-Konstellation oder der Sentinel-2-Mission. Die operationelle Auslegung dieser beiden Systeme mit häufigen Wiederholraten ermöglicht in dem Forschungsbereich der Phänologie und der Klassifikation von Landnutzung die Weiterentwicklung innovativer Informationsprodukte.

GeoMLU

Das Ziel des durch die Europäische Kommission und die Europäische Raumfahrtagentur ESA geplante und umgesetzte COPERNICUS-Programmes ist die Bereitstellung von kosteneffizienten, aktuellen und öffentlich zugänglichen Daten und Produkten für Zwecke des Umweltmonitorings und der öffentlichen

Sicherheit. Dabei stellt die operationelle Satellitenfernerkundung eines der Fundamente dar, welches vorwiegend auf den Satellitenkonstellationen der Sentinel-Familie basiert.

Vor diesem Hintergrund stellen die im von der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg bearbeiteten Teilprojekt entwickelten Lösungen für effektive Auswahlverfahren für Satellitendaten einen Baustein zur Erreichung der definierten Ziele dar. Potentielle Nutzer sind dabei sowohl in Administration und Verwaltung als auch in der zunehmend Geodaten nutzenden freien digitalen (Land-) Wirtschaft zu finden.

3.2 Wissenschaftlich-Technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen

UFZ

AP 1.1 Akquirierung neuer Fernerkundungsdaten

Für das Untersuchungsgebiet konnten erfolgreich räumlich hochauflösende RapidEye-Daten von 2010-2015 akquiriert und prozessiert werden. Der betreffende Datensatz umfasst insgesamt 411 Kacheln mit Aufnahmen während der Vegetationsperiode (ca. 7 pro Jahr). Für den gleichen Zeitraum wurden zusätzlich erfolgreich tägliche MODIS-Daten (250 m Auflösung) akquiriert und prozessiert. Für das Jahr 2015 und 2016 wurden erfolgreich 15 respektive 64 Sentinel-2-Szenen akquiriert und prozessiert.

AP 1.2 Simulation von Sentinel-2-Daten

Sentinel-2-Daten wurden erfolgreich auf Basis von einer flugzeuggetragenen Hyperspektralbefliegung in Kooperation mit der Universität Erlangen (Dr. Hannes Feilhauer) simuliert. Die Befliegung fand im Juli 2014 statt, die nachfolgende Simulation auf Sentinel-2-Spezifikationen (räumliche und spektrale Auflösung) wurde Anfang 2015 abgeschlossen und den Projektpartner zur Verfügung gestellt.

AP 1.3 Phänologische und spektrale Messungen/Beobachtungen

Entsprechende Feldkampagnen fanden auf über 40 landwirtschaftlich genutzten Schlägen für die Jahre 2014-2015 statt. Hier wurden für alle beobachteten Kulturen die phänologischen Wuchsstadien und die Wuchshöhe bestimmt. Die Kampagnen erfolgten während der Vegetationsperiode im wöchentlichen Rhythmus.

AP 1.4 Zusätzliche phänologische und meteorologische Zusatzdaten

Entsprechende Datensätze konnten über das DWD Webportal „WebWerdis“ (tägliche Mitteltemperaturen von 1951-2012) und über die online verfügbare phänologische Datenbank, PPODB‘ akquiriert und für die nachfolgenden Arbeitspakete genutzt werden.

AP 2.1 Die Modellierung phänologischer Entwicklungsstadien

Das ursprünglich für die Simulation der Phänologie von wildwachsenden Pflanzen (Waldbäume) entwickelte *Promoter-Inhibitor-Modell (PIM)* konnte erfolgreich auf landwirtschaftliche Kulturen angepasst werden. Für 4 Kulturen wurden zwischen 2-4 Wachstumsstadien deutschlandweit simuliert, wobei generell die frühen Stadien (Auflaufen) besser vorhergesagt werden konnten als späte Stadien. Der durchschnittliche Fehler der Vorhersagen lag bei etwa 1 Woche. Nach einer relativ komplexen Modellanpassung (inverse Parametrisierung) kann das Modell im sog. „Vorwärtsmodus“ performant ohne ak-

tuelle phänologische Beobachtungen allein basierend auf Tageslängen und Temperaturen phänologische Wachstumsstadien simulieren.

AP 2.2 Extraktion phänologischer Maße aus Satellitendaten

Basierend auf einer Weiterentwicklung des R-Paketes „phenex“ wurden sowohl für RapidEye- als auch für MODIS-Daten phänologische Maße extrahiert (insgesamt 6 für jede landwirtschaftliche Kultur). Die Genauigkeit der Ableitung variierte zwischen den Wuchsstadien, generell konnten Phasen im Frühjahr und Sommer aufgrund guter Beleuchtungsgeometrien und weniger Wolken besser abgeleitet werden (3-7 Tage Fehler). Aufgrund der höheren temporalen Auflösung waren MODIS- basierte Ableitungen durchschnittlich genauer, allerdings nur in wenig fragmentierten Landschaften mit relativ großen Schlägen.

AP 2.2 Übertragung der Routinen auf Sentinel-2-Daten

Die für RapidEye und MODIS entwickelten Routinen konnten erfolgreich auf Sentinel-2 übertragen werden. Entsprechend wurden Sentinel-2 basiert sämtliche phänologische Maße für das Jahr 2016 extrahiert.

GeoJMU

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projekts sind im Detail im Schlussbericht aufgeführt. Für die drei vom ZE bearbeiteten Arbeitspakete 3, 4 und 5 werden diese Ergebnisse sowie erreichte Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen nachfolgend stichpunktartig aufgeführt.

Arbeitspaket 3: Entwicklung eines gemeinsamen Klassifikationsrahmens

- Das in der *Open Source* Programmiersprache R entwickelte Klassifikationswerkzeug „ME-LanGe“ bietet die Möglichkeit fernerkundungs- und objektbasierte Klassifikationen durchzuführen und deren Qualität zu bewerten.
- Das Werkzeug bietet drei separat nutzbare Module
- Modul 1: Basierend auf Fernerkundungszeitserien und Objektinformationen (z.B. landwirtschaftliche Schläge) können zonale, d.h. objektspezifische Statistiken (z.B. Mittelwerte spektraler Indizes) berechnet und in einer Tabelle ausgegeben werden.
- Modul 2: Mit Hilfe objektspezifischer Informationen (entweder aus Modul 1 oder externe Datenquelle) werden für alle möglichen Permutationen aus den zugrundeliegenden Zeitschnitten Klassifikationengütemaße berechnet.
- Modul 3: Die Ergebnisse aus Modul 2 lassen sich mit Hilfe des Moduls 3 visualisieren analysieren. Außerdem kann durch Selektion und Deselektion von Zeitschnitten unterschiedliche Datenverfügbarkeiten simuliert werden.

Wesentliche Erfahrungen

- Die für das Hauptuntersuchungsgebiet Mitteldeutschland durchgeföhrten Bewertungen zur Klassifikationsgüte (basierend auf 6 Klassen, d.h. mit niedriger thematisch aufgelösten Klasseneinteilung) zeigt, dass ab drei verfügbaren Zeitschnitten eine ausreichend hohe Klassifikationsgenauigkeit erzielt werden kann.

Arbeitspaket 4: Szenarien für optimierte Klassifikationen

Ergebnisse

- Die Integration phänologischer Maße als Merkmale zeigte, dass unter Verwendung der abgeleiteten phänologischen Maße keine Verbesserung der höchst erreichbaren Klassifikationsgüte im Vergleich zu den spektralen Merkmalen erzielt werden kann. Allerdings gelang hier bereits mit nur wenigen Zeitschnitten (monotemporal und bitemporal) eine, auch im Mittel, hohe Genauigkeit. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die saisonal abgeleiteten phänologischen Maße bereits die zeitlichen Informationen der gesamten Zeitreihe beinhalten.
- Bei der Variation der Datendichte (Datenverfügbarkeit und Referenzdaten) führt die veränderte Datenverfügbarkeit zu einer deutlichen Verschlechterung der Klassifikationsgenauigkeit.
- Die Variation der Referenzdatendichte, d.h. unterschiedliche Methoden zur Referenzobjektauswahl diente dazu, die für die Klassifikation verwendeten Referenzobjekte zu reduzieren. Hierzu wurden aus der Gesamtmenge der Objekte 30% der Referenzobjekte selektieren. Dabei wurden drei unterschiedliche Auswahlmethoden untersucht, die aus der Gesamtmenge:
 - o rein zufällig,
 - o zufällig und proportional zur Häufigkeit der Zielklasse in der Gesamtmenge, sowie
 - o zufällig und nach Zielklasse, Bodentyp, Hangneigung und Schlaggröße stratifiziert

Die zusätzliche Verwendung der Straten Schlaggröße und Bodentyp führt zu einer Verringerung in der Streuung der Klassifikationsgenauigkeit, aber auch zu einer Verschlechterung des Medians. Die zusätzliche Einbeziehung weiterer Standortfaktoren auf die stratifizierte Probennahme zeigt, dass die Verwendung der Hangneigung einen positiven Einfluss ausübt. Für die letztendliche Auswahl geeigneter Straten zur Stratifizierung der Probennahme ist ein Kompromiss zwischen Robustheit (geringe Streuung des Wertebereichs) und der mittleren Klassifikationsgenauigkeit zu wählen.

- Eine Variation der Klassentiefe zeigt, dass durch die Erhöhung der Klassentiefe eine Verschlechterung der maximal erzielbaren Klassifikationsgüte die Subgetreideklasse eintritt.
- Die Variation von Sensorsauflösungen und Zusatzinformationen auf die Klassifikationsgüte konnte nicht untersucht werden da zunächst keine Sentinel-2-Vergleichsdaten vorlagen und nach Verfügbarkeit der Sentinel-2-Daten konnten keine RapidEye-Vergleichsdatensatz akquiriert werden.

Arbeitspaket 5: Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse aus AP 2 und AP

Ergebnisse

- Die Robustheit des Verfahrens wurde durch jeweils 500 Wiederholungsläufe des Modells untersucht. Die Ergebnisse unterschieden sich nicht signifikant, so dass man von einem robusten Algorithmus zu Generierung von reproduzierbaren Ergebnissen sprechen kann.
- Die Untersuchungen zum Einfluss des Naturraums auf die Klassifikationsergebnisse implizierten eine robuste Anwendung des Analysewerkzeugs mit einer Gesamtgenauigkeit.

GeoMLU

Wesentliches Ergebnis des Projektes ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Erhöhung der Klassifikationsgüte von typischen Feldfruchtarten durch die Nutzung der einmaligen Kombination des Sensors Sentinel-2 von temporaler, spektraler und geometrischer Auflösung. Dies wird durch die Optimierung

spektraler Indizes erreicht, die sich seit Jahrzehnten der bei Auswertung von Fernerkundungsdaten als wirksames Werkzeug zur Informationsgenerierung etabliert haben.

Während des Projektes zeigte sich, dass bereits die Zeitreihen des Sentinel-2A-Satelliten eine höhere zeitliche Auflösung aufweisen als andere Systeme wie RapidEye und somit eine gezieltere Auswahl der Aufnahmezeitpunkte für Klassifikationszwecke ermöglicht wird. Nach Projektende stehen Sentinel-2A- und 2B-Daten zur Verfügung, so dass sich der Nutzen und damit die Klassifikationsgüte weiter erhöhen wird. Weiterhin werden die Klassifikationsergebnisse besonders durch Indizes verbessert, die auf den drei *Red-Edge*-Kanälen sowie den SWIR2-Kanälen basieren. Weiterhin erlaubt die routinemäßige Bereitstellung vieler Datenqualitätslayer eine operationelle Auswertung der Sentinel-2-Daten zu operationalen Auswertungszwecken. Dies ist besonders im Vergleich zu RapidEye-Daten hervorzuheben, für die sich die genaue Maskierung bewölkter Flächen deutlich aufwendiger gestaltet und nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen geführt hat.

Ein weiteres Projektergebnis besteht in der Implementierung eines automatisierten, auf der *Open Source*-Programmiersprache **R** basierenden Systems zur Modellierung täglich aktualisierter phänologischer Phaseninformationen auf Rasterbasis mit deutschlandweiter Gültigkeit. Dabei konnte festgestellt werden, dass die statistische Sicherheit der Modellergebnisse mit fortschreitender phänologischer Entwicklung zunimmt. Die Temperatur wirkte hierbei als treibende Variable für phänologische Modelle in mittleren Breiten Genauigkeiten. Die Integration im Jahr 2016 frei verfügbarer Bodenfeuchtedaten erhöhte die Genauigkeit nicht. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit höher auflösender, tagesaktueller Bodenfeuchtedaten sind diese Ergebnisse erneut zu überprüfen.

Durch den Praxispartner UMGEODAT wurden die Ergebnisse der phänologischen Modellierung und der Detektion phänologischer Klassifikationszeitfenster in ein der Öffentlichkeit kostenfrei zur Verfügung stehendes Webportal eingebunden.

3.3 Fortschreitung des Verwertungsplans

3.3.1 Schutzrechte

UFZ

Nicht zutreffend.

GeoJMU

Im Projektantrag wurde ein gemeinsamer Verwertungsplan für alle drei Partner eingereicht. Seitens des ZE waren im Projektverlauf keine Änderungen am ursprünglichen Verwertungsplan notwendig. Hier dargestellt sind die den ZE betreffenden Verwertungsmöglichkeiten, der Verwertungszeitraum endet am 31.07.2016.

Die Punkte „Schutzrechte“ und „wirtschaftliche Erfolgssichten“ treffen auf den ZE nicht zu.

GeoMLU

Vom Zuwendungsempfänger wurden bisher keine Erkenntnisse gewonnen, die für eine Patent- oder Schutzrechtsanmeldung zugrunde gelegt werden können. Schutzrechte Dritter sind nach Kenntnisstand des Zuwendungsempfängers nicht berührt. Innerhalb des Projektes wurden keine Ergebnisse erzielt, die als Erfindung patentiert werden könnten.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende***UFZ***

Nicht zutreffend.

GeoMLU

Alle Methoden und Ergebnisse werden über das Webbasierte Prognose- und Auskunftssystem bereitgestellt und können damit von Wirtschaftsunternehmen der Fernerkundungsbranche für vielfältige Zwecke praxisrelevanter Aufgaben bis hin zu den Datenauswertungen für die Copernicus-Proedukte genutzt werden. Das System dient zugleich der aktuellen und künftigen effizienten Datenverwaltung innerhalb der Fachgruppe.

3.3.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende***UFZ***

Ein Großteil der vom UFZ entwickelten Methoden und Modelle wurde in Form der R-Pakete ‚phenex‘ und ‚phenmod‘ implementiert und ist als *Open Source Software* unter <https://cran.r-project.org/> frei verfügbar. In der Wissenschaftsgemeinde ist diese Software mittlerweile weit verbreitet und dementsprechend kann von einer weitergehenden Nutzung ausgegangen werden. Dies auch unter dem Aspekt, dass die Thematik sowohl für den Bereich Fernerkundung als auch Ökologie oder Klimafolgenforschung relevant ist. Vielversprechend ist eine Fusion mit anderen zugänglichen Copernicus-Daten wie z.B. Sentinel-1, die eine verbesserte Ableitung der Phänologie vermuten lässt. Zudem ist mit dem erfolgreichen Start von Sentinel-2B eine noch höhere zeitliche Dichte der Satellitenaufnahmen gesichert, die eine robustere Extraktion der phänologischen Maße mit den entwickelten Methoden sicherstellt.

GeoJMU

Die während zur Projektlaufzeit gestartete Projekt „GLAM.DE“ können durch die Beteiligung des ZE direkt von den Ergebnissen und Erfahrungen aus PhenoS profitieren.

Durch das dokumentierte Interesse von Institutionen und Unternehmen zur Nutzung des MEAnGe Klassifikationswerkzeugs wird ein hoher wissenschaftlicher Nutzen erwartet. Die im Zuge der Anwendung und Nutzung interessierter Institutionen zu erwartenden Verbesserungen und Erweiterungen der Funktionalitäten des Klassifikationswerkzeugs wird durch die Verwendung der open Source Programmiersprache R und die freie Verfügbarkeit des Werkzeugs gewährleistet.

GeoMLU

Die entwickelten Methoden und Ergebnisse werden in weiteren Publikationen veröffentlicht. Sie stellen zudem die Basis für weitere Klassifikationen dar. Zu nennen sind Übertragungen auf Fruchtarten-detection in weiteren Regionen mit anderen, jedoch ähnlichen Boden-, Klima- und Fruchtarten, wie auch die Übertragung auf naturnahe Vegetation.

Die entwickelten Methoden wurden quelloffen und flexibel gestaltet, um die Ergebnisse in weiteren Forschungsprojekten zu verwenden und spezifizieren zu können und auch Nutzern aus der Verwaltung und von Fachfirmen zugänglich zu machen. Dies betrifft sowohl die Methodik zur Bestimmung optimaler, fruchtartenspezifischer phänologischer *Red-Edge*-Vegetationsindizes als auch die Methodik zur Zeitfensterdetektion

Das phänologische Modell PHASE zeichnet sich durch eine vielfältige Anwendbarkeit aus und kann daher zukünftig in einem breiten Spektrum von wissenschaftlicher Forschung und praktischen Anwendung zum Einsatz kommen. Damit erhöht sich die Kompetenz der Fachgruppe Geofernerkundung bei der Einwerbung neuer Forschungsprojekte.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

UFZ

Eine wissenschaftliche Verwertung erfolgte durch das UFZ im Rahmen von etlichen Beiträgen auf Fachkonferenzen/Workshops und auch einer Veröffentlichung in einem Fachjournal (‘Remote Sensing’). Das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus mit den entsprechenden Daten und Diensten wird auch zukünftig steigende Nachfragen im Bereich Umwelt- und Naturschutz oder Land- und Forstwirtschaft generieren. Diese Plattform kann mit den operationell anwendbaren Methoden und Modellen des UFZ bedient werden.

Die Projektmitarbeiterin plant die Einreichung ihrer Dissertation 2017.

GeoJMU

Es wurde eine wissenschaftliche Verwertung durch Beiträge auf Fachkonferenzen und in Fachjournals angestrebt. Dieser Informationsaustausch wurde über die in Kapitel 2.5 des Schlussberichts zusammengestellten Publikationen, Vorträge und besuchte Konferenzen sowie Workshops sichergestellt. Es ist eine weitere Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift geplant (Einreichung Mitte 2017), in der Auswirkung und Einflusses des Naturraums und der Probennahme auf die Klassifikation untersucht werden.

Der Projektmitarbeiter Henning Gerstmann plant die Einreichung seiner kumulativen Dissertation 2018.

GeoMLU

Vor dem Hintergrund der Erfüllung von EU-Vorgaben zu Umweltmonitoring der gemeinsamen Agrarpolitik steigt der Bedarf an operationell verfügbaren sowie räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Informationen zu Landnutzung und Pflanzenphänologie. Hierfür wurden innerhalb des Projektes nachvollziehbare und überprüfbare Methoden entwickelt, die einen Beitrag zum Erreichen der beschriebenen Ziele leisten können. Hervorzuheben sind vor allem die Entwicklungen zur Optimierung spektraler Indizes für Klassifikationen von Ackerfrüchten mittels multisensoraler Fernerkundungsdaten, die Integration von phänologischen Parametern zur Optimierung von Zeitfenstern und die phänologische Modellierung basierend auf tagesaktuell frei verfügbaren Daten des DWD mittels des Modells Phase.

3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

UFZ

Nicht zutreffend.

GeoJMU

AP 3.2 Aufbau eines Klassifikationsensembles und Bestimmung der Klassifikationsgüte durch Validierungswerkzeuge

Zum Test des Algorithmus wurden Feldinformationen der Testfläche Ammereinzugsgebiet verwendet. Die schwierige Zuweisung der Lebensraumtypen zu räumlich expliziten Objekten führte dazu, dass die anvisierte objekt-basierte Klassifikation für Lebensraumtypen nicht weiterverfolgt wurde. Der Test des Klassifikationsalgorithmus konnte aber trotzdem als erfolgreich bezeichnet werden, da sowohl die Funktionalität sowie die Ausgabe des Klassifikationswerkzeugs überprüft werden konnte.

AP 4.1.4 Variation von Sensorauflösungen und Zusatzinformationen

Bis zur Verfügbarkeit von Sentinel-2A-Datensätzen konnten die Einflüsse der Sensorauflösungen auf die Klassifikationsgüte nicht untersucht werden und auch nach Verfügbarkeit der Sentinel-2A-Daten konnten keine RapidEye Vergleichsdatensatz akquiriert werden. Daher konnte der Einfluss der Sensor Auflösung nicht hinreichend genau untersucht werden. Dies ist insbesondere im Kontext der ursprünglichen Projektstruktur und der Aufgaben im Rahmen von Copernicus zu bedauern und sollte in einem künftigen Projekt untersucht werden.

GeoMLU

AP 2.1 Weiterentwicklung des PHASE-Modells

Innerhalb des Arbeitspaketes wurde untersucht, ob der Starttag der Temperatursummierung auch durch die Schneehöhe definiert werden kann oder ob ein deutschlandweit einheitlicher Starttag zu Genauigkeitsverbesserungen führt. Für die erste Variante wurde aus den 500 Klimastationen des DWD der letzte Tag bestimmt, an dem eine Schneehöhe gemeldet wurde. Der auf diesen Tag folgende Tag wurde bestimmt, interpoliert und als Starttag für die Temperatursummierung verwendet. Für die zweite Variante wurde die Verwendung vom 1. Januar (Winterfrüchte) und 1. März (Sommerfrüchte) eines Jahres überprüft. Beide Varianten wurden verworfen, da die Modellgenauigkeiten durch die Berücksichtigung im Vergleich zur Nutzung der beobachteten Aussaattage nicht verbessert werden konnten.

Der Einfluss der Einbindung von Bodenfeuchteinformationen auf die Prognosegenauigkeit wurde anhand von DWD bereitgestellten täglichen, deutschlandweiten Rasterdatensätzen mit 1km Auflösung getestet. Dabei wurde die Abweichung der pflanzennutzbaren Feldkapazität von 100% als zusätzlicher Wichtigsfaktor in der Temperatursummenbestimmung berücksichtigt. Die Einbindung der Bodenfeuchte führte allerdings für die Großteil der phänologischen Phasen nur zur marginalen Veränderungen der Prognosegüte (Gerstmann et al. 2016). Es wird künftig zu prüfen sein, inwieweit mit den aus den Sentinel-1-Daten abgeleiteten täglichen Bodenfeuchtedaten eine Verbesserung möglich ist.

AP 4.2 Extraktion spektraler Maße

Um für die geplanten Zeitreihen von hyperspektralen AISA-Daten und daraus simulierter Sentinel-2-Daten eine *Ground-Truth*-Basis zur Verfügung zu haben und diese auch zur Entwicklung neuer *Red Edge*-basierter Spektralindizes zu verwenden, wurde zu den geplanten Befliegungsterminen Flächen, auf denen die Zielarten angebaut wurden, spektrometrisch erfasst. Aufgrund der Tatsache, dass keine entsprechende Fernerkundungsdaten-Zeitreihe zur Verfügung stand, wurden diese Daten nicht weiterverwendet.

AP 6 Webbasiertes Prognose- und Auskunftssystem

Der erste Prototyp des WPA-PhenoS basierte auf einer eigenen Drupal-gestützten Weblösung, die bereits alle geplanten Funktionalitäten enthielt. Jedoch waren die Darstellungsmöglichkeiten limitiert, was eine Migration des Webportals in ein anderes System nötig machte.

3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

UFZ

Ein Großteil der vom UFZ entwickelten Methoden und Modelle wurde in Form der R-Pakete ‚phenex‘ und ‚phenmod‘ implementiert und ist als *Open Source Software* unter <https://cran.r-project.org/> frei verfügbar. Die wissenschaftlichen Inhalte und Ergebnisse wurden u.a. auf folgenden Konferenzen/Workshops kommuniziert: RESA Workshop (Bonn, 16.03.2016), Workshop: "Nutzung der Sentinels und nationalen Erdbeobachtungs-Missionen" (Bonn, 16.01.2015), „MultiTemp“ (Annecy, 24. Juni 2015), „Möglichkeiten und Herausforderungen im Kontext aktueller und zukünftiger Erdbeobachtungsdaten“ in Leipzig vom 9.-10. März 2017.

GeoJMU

Als mögliche Nutzer der Ergebnisse des ZE wird für allem die wissenschaftliche Community adressiert. Präsentationsmöglichkeiten ergeben sich dadurch vor allem auf nationalen und internationalen Konferenzen und Workshops sowie in Fachzeitschriften.

Das im Rahmen dieses Arbeitspakets entwickelte Validierungswerkzeug zur Bestimmung der Klassifikationsgüte „MElaGe“ (Multifunktionales Werkzeug zur Evaluierung der Landnutzungsklassifikation und der Geometrischen Genauigkeit) wurde im Rahmen eines Workshops auf dem Treffen der Arbeitskreise „Fernerkundung“ (DGfG) und „Auswertung von Fernerkundungsdaten“ (DGPF) am 9/10. Oktober 2014 an der TU Berlin vorgestellt.

Nach Beendigung des Projekts werden die Ergebnisse noch auf dem Workshop „Möglichkeiten und Herausforderungen im Kontext aktueller und zukünftiger Erdbeobachtungsdaten“ in Leipzig am 9. - 10. März 2017, sowie auf der Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft am 7./8. März 2017 in Dresden vorgestellt.

GeoMLU

Das Verbundprojekt wurde mit einem Workshop am 24.1.2017 an der Uni Halle abgeschlossen. Herzuheben ist, dass die knapp 50 Teilnehmer nicht nur Vertreter von Forschungseinrichtungen, sondern auch von staatlichen Dienststellen (z.B. DWD, Landesämter) und von Fachfirmen kamen.

Die Veröffentlichungen der Ergebnisse erfolgten in internationalen Fachzeitschriften sowie mit Postern und Vorträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen.

Eine Gesamtaufstellung aller Präsentationen findet auf dem PhenoS-Phänologieportal als auch die Projekthomepage. Soweit es die Lizenzbedingungen erlauben sind diese öffentlich zugänglich. Eine Zusammenfassung aller Arbeiten aus dem Projekt findet sich im Bericht Anhang.

3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

UFZ

Die ursprüngliche Zeit- und Kostenplanung wurde weitestgehend eingehalten. Aufgrund der verspäteten Einstellung des Projektmitarbeiters wurde das Projekt zuerst um den Zeitraum von 6 Monaten bis 30.09.2016 kostenneutral verlängert. Dementsprechend wurde eine Mittelverschiebung von 2014 nach 2015 bewilligt. Eine weitere kostenneutrale Verlängerung um 4 Monate bis 31.01.2017 wurde unter der Voraussetzung, dass bestehende Routinen auf Sentinel-2-Daten angewandt werden, gewährt. Es wurden nach Projektende verbliebene Reisemittel in Höhe von 8.048,15 € zurückerstattet.

GeoJMU

Der Ablauf des Vorhabens entspricht grundsätzlich den Planungen, wie sie im Forschungsantrag formuliert und zeitlich eingeordnet wurden. Eine wesentliche Änderung gegenüber der ursprünglichen Planung betrifft die kostenneutrale Verlängerung des ZE bis zum 31.01.2017.

Änderungen hinsichtlich der inhaltlichen Ausgestaltung der Aufgaben und des Zeitplans haben sich innerhalb der verschiedenen Arbeitspakete ergeben, die zeitnah in den jeweiligen Zwischenberichten dokumentiert wurden.

Am 24.09.2013 wurde die Projektlaufzeit bis zum 30.09.2016 bewilligt.

Am 13.11.2013 wurde ein Antrag auf Mittelverschiebung gestellt um die durch eine verzögerte Einstellung entstandenen Einsparungen auf das Haushaltsjahr 2016 zu verschieben.

Am 06.07.2015 wurde die Entsperrung der Mittel i.H.v. 1.024,00 € auf der Position 0845 (Auslandsdienstreisen) für die Teilnahme an der SPIE-Konferenz 2015 in Toulouse, Frankreich beantragt und später bewilligt.

Am 18.03.2016 wurde der Bewilligungszeitraum über den 30.09.2016 hinaus bis zum 31.01.2017 kostenneutral verlängert.

GeoMLU

Der Ablauf des Vorhabens entspricht im Wesentlichen dem beantragten Projektplan. Durch die ver-spätete Einstellung des Projektbearbeiters wurde das Projekt zuerst um den Zeitraum von 6 Monaten bis 30.09.2016 kostenneutral verlängert. Eine weitere kostenneutrale Verlängerung um 4 Monate bis 31.01.2017 wurde durch die Elternzeit des Projektbearbeiters gewährt. Damit ergaben sich für die 3 Projektpartner drei unterschiedliche Laufzeiten des Projektes. Dies erforderte von allen projektbeteiligten eine hohen Flexibilität und Kooperationsbereitschaft, um nicht nur die individuellen projektziele, sondern vielmehr die übergeordneten gemeinsamen Ziele zu erreichen.

Änderungen in der Ausgestaltung der einzelnen Arbeitspakete wurden in den Zwischenberichten und im Schlussbericht dokumentiert. Dies betrifft vor allem die Einbindung des Unterauftragnehmers UMGEO DAT für die Bearbeitung des Arbeitspaketes 6 "Webbasiertes Prognose- und Auskunftssystem WPA-PhenoS".

Die projektbezogenen Ausgaben sind im Verwendungsnachweis dokumentiert. Nach Projektende verbleiben Restmittel in Höhe von 406,16 €, da die Kosten für die Teilnahme an den geplanten Auslandskonferenzen geringer ausfielen als beantragt. Weiterhin verbleibt ein Rest bei den Verbrauchsmaterialien und Sachmitteln, da viele Daten aufgrund der geänderten Datenpolitik des Deutschen Wetterdienstes kostenfrei zur Verfügung standen, was zum Antragszeitpunkt nicht absehbar war.

Danksagung:

Die Weiterentwicklung des phänologischen Modells Phase im Rahmen des Projektes PhenoS basierte auf dem Ausgangsmodell von Möller (Projekt DeCover, Uni Halle, Fachgruppe Geofernerkundung). Im ersten Jahr der Projektlaufzeit von PhenoS (bis 2015) war Herr Möller als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt Dynac (Uni Halle, Fachgruppe Geofernerkundung, tätig. Somit ergaben sich sehr gute Synergien für die Weiterentwicklung von dem Modell Phase. Wir danken Herrn Möller für die aktive Mitwirkung an der Qualifizierung des Modells.

Wir danken allen studentischen Hilfskräften, die im Projekt mitgearbeitet haben:

GeoMLU: Stefanie Elste, Ivo Walther, Tilman Krüger, Clemens Schenke, Fabian Kazmierzak, Philipp Schulze

GeoJMU: Thorsten Dahms, Jörn von Uslar, Hendrik Flock, Amelie Broszeit, Marlene Wolf, Margit Straubinger

UFZ: Sebastian Preidl, Maxi Pape

4 Literaturverzeichnis

- Boschetti, M., Stroppiana, D., Brivio, P. A. & Bocchi, S., 2009. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *International journal of remote sensing*, Band 30, pp. 4643-4662.
- Dierenbach, J., Badeck, F.-W. & Schaber, J., 2013. The plant phenological online database (PPODB): an online database for long-term phenological data.. *International journal of biometeorology* 57(5), pp. 805-812.
- Feilhauer, H. et al., 2013. Assessing floristic composition with multispectral sensors—A comparison based on monoseasonal and multiseasonal field spectra. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21, pp. 218-229.
- Förster, S., Kaden, K., Förster, M. & Itzerott, S., 2012. Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. *Computers and Electronics in Agriculture*, Band 89, pp. 30 {--} 40.
- Hänninen, H. & Kramer, K., 2007. A framework for modelling the annual cycle of trees in boreal and temperate regions. *Silva Fennica*, Band 41, pp. 167 {--} 205.
- Le Maire, G. et al., 2008. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, Band 112, pp. 3846-3864.
- McMaster, G. S. & Wilhelm, W. W., 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, Band 87, pp. 291 {--} 300.
- Menzel, A., 2007. Phänologische Modelle - Phenological Models. *promet*, Band 33, pp. 20 {--} 27.
- Möller, M., Gläßer, C. & Birger, J., 2011. *Automatic interpolation of phenological phases in Germany*. Trento/Italy, s.n., pp. 37 {--} 40.
- Möller, M., Müller, S., Doktor, D. & Gläßer, C., 2012. *Phenological structuring of multi-temporal RapidEye imagery*. s.l., s.n., pp. 4934 {--} 4937.
- Odenweller, J. B. & Johnson, K. I., 1984. Crop identification using Landsat temporal spectral profiles. *Remote Sensing of Environment* 14(1-3), pp. 39-54.
- Ramoelo, A. et al., 2012. Regional estimation of savanna grass nitrogen using the red-edge band of the spaceborne RapidEye sensor. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Band 19, pp. 151-162.
- Réaumur, M., 1735. Observations du thermomètre faites à Paris pendant l'année 1735 comparées avec celles qui ont été faites sous la ligne à l' Ile de France, à Alger et en quelques-unes de nos îles de l'Amérique. *Académie Royale des Sciences*, pp. 545 {--} 576.
- Schaber, J. & Badeck, F.-W., 2003. Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany. *International Journal of Biometeorology*, Band 47, pp. 193 {--} 201.

Siebert, S. & Ewert, F., 2012. Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. *Agricultural and Forest Meteorology*, Band 152, pp. 44 {-} 57.

Team, R. C., 2015. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna: s.n.

Wetterdienst, D., 2015. *Vorschriften und Betriebsunterlagen für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes*, Offenbach: s.n.

White, M. A. et al., 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, Band 15, pp. 2335-2359.

Halle, den 25. Juli 2017
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

.....
Prof. Dr. Cornelia Gläßer
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Professorin für Geofernerkundung und Thematische Kartographie am Institut für Geowissenschaften
und Geographie