

Fernerkundungsdaten in der Landwirtschaft

Schriftenreihe, Heft 8/2025



Übersichtskatalog – Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Entscheidungs- unterstützung in der Landwirtschaft

Hannah Boedeker, PIKobytes GmbH

Dr. Matthias Müller, PIKobytes GmbH

Jacob Mendt, PIKobytes GmbH

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	12
1 Zielstellung und Methodik	13
1.1 Zielstellung	13
1.2 Methodik	13
2 Agronomische Maßnahmen	16
3 Indikatoren und Datenprodukte	19
3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	20
3.1.1 Indexbeschreibung NDVI	20
3.1.2 Datenprodukt - NDVI basierend auf Sentinel 2	22
3.3 Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	24
3.3.1 Indexbeschreibung GNDVI	24
3.3.2 Datenprodukt - GNDVI basierend auf Sentinel 2 - L2A	25
3.3.3 Datenprodukt - GNDVI basierend auf Landsat 8	27
3.4 Normalized Difference Red Edge (NDRE)	28
3.4.1 Indexbeschreibung NDRE	28
3.4.2 Datenprodukt - NDRE basierend auf Sentinel 2 - L2A	29
3.5 Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	31
3.5.1 Indexbeschreibung SAVI	31
3.5.2 Datenprodukt - SAVI basierend auf Sentinel 2 - L2A	32
3.5.3 Datenprodukt - SAVI basierend auf Landsat-8	34
3.6 Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)	36
3.6.1 Indexbeschreibung MSAVI2	36
3.6.2 Datenprodukt - MSAVI2 basierend auf Sentinel 2 – L2A	37
3.7 Leaf Area Index (LAI)	39
3.7.1 Indexbeschreibung LAI	39
3.7.2 Datenprodukt - LAI basierend auf Sentinel-2	41
3.8 Red Edge Inflection Point (REIP)	42
3.8.1 Indexbeschreibung REIP	42
3.8.2 Datenprodukt - REIP basierend auf Sentinel 2 – L2A	44
3.9 Bodentemperatur	46
3.9.1 Allgemeine Beschreibung Bodentemperatur	46
3.9.2 Datenprodukt - Bodentemperatur des Deutschen Wetterdienst (DWD)	47
3.10 Müncheberger Soil Quality Rating (SQR)	48
3.10.1 Allgemeine Beschreibung des Verfahrens SQR	48

3.10.2	Datenprodukt - Müncheberger Soil Quality Rating vom BKG.....	49
3.11	Beschaffenheit des Bodens.....	50
3.11.1	Allgemeine Beschreibung der Beschaffenheit des Bodens	50
3.11.2	Datenprodukt - Bodenschätzung des LfULG	51
3.11.3	Datenprodukt - Bodenkarte des LfULG	52
3.12	Erosionsgefahr durch Wind oder Wasser	54
3.12.1	Allgemeine Beschreibung der Erosionsgefahr durch Wind oder Wasser	54
3.12.2	Datenprodukt - Erosionsgefährdungskarten des LfULG	54
3.13	Bodenfeuchte	56
3.13.1	Allgemeine Beschreibung der Bodenfeuchte	56
3.13.2	Datenprodukt - UFZ-Dürremonitor	57
3.13.3	Datenprodukt - DWD Bodenfeuchteviewer – Bodenfeuchteanalyse	59
3.14	Plant Phenology Index (PPI)	60
3.14.1	Indexbeschreibung PPI	60
3.14.2	Datenprodukt - PPI basierend auf Sentinel-2	61
3.15	Normalized Difference Water Index (NDWI).....	64
3.15.1	Indexbeschreibung NDWI	64
3.15.2	Datenprodukt - NDWI basierend auf Sentinel 2 – L2A	65
3.15.3	Datenprodukt - NDWI basierend auf Landsat 8	67
3.16	Normalized Difference Drought Index (NDDI)	68
3.16.1	Indexbeschreibung NDDI	68
3.16.2	Datenprodukt - NDDI basierend auf Sentinel 2 – L2A.....	69
3.16.3	Datenprodukt - NDDI basierend auf Landsat 8	71
3.17	Vegetation Health Index (VHI).....	72
3.17.1	Indexbeschreibung VHI.....	72
3.17.2	Datenprodukt - VHI basierend auf Landsat 8.....	74
3.18	Crop Water Stress Index (CWSI)	76
3.18.1	Indexbeschreibung CWSI.....	76
3.18.2	Datenprodukt - Berechnung des CWSI basierend auf Landsat 8	77
3.19	Sonnenscheindauer in bestimmtem Zeitraum.....	79
3.19.1	Allgemeine Beschreibung der Sonnenscheindauer in bestimmtem Zeitraum	79
3.19.2	Datenprodukt – Sonnenscheindauer von DWD	79
3.19.3	Datenprodukt – Sonnenscheindauer von CM SAF (The Satellite Application Facility on Climate Monitoring).....	80
3.20	Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI).....	82
3.20.1	Indexbeschreibung CCCI.....	82

3.20.2	Datenprodukt - CCCI basierend auf Sentinel 2 - L2A	84
3.21	Enhanced Vegetation Index (EVI)	86
3.21.1	Indexbeschreibung EVI	86
3.21.2	Datenprodukt - EVI basierend auf Sentinel 2 - L2A	87
3.21.3	Datenprodukt - Berechnung des EVI basierend auf Landsat 8	89
3.22	Sentinel-2 Red Edge Position (S2REP)	91
3.22.1	Indexbeschreibung S2REP	91
3.22.2	Datenprodukt - Berechnung des S2REP basierend auf Sentinel 2 - L2A	92
3.23	Excess Green Index (ExG)	94
3.23.1	Indexbeschreibung ExG	94
3.24	Standardized Precipitation Index (SPI)	95
3.24.1	Indexbeschreibung SPI	95
4	Produkt-Nutzen-Paare	97
4.1	Übersicht der identifizierten Produkt-Nutzen-Paare	97
4.2	Berechnungsmethodik für die ausgewählten Indizes	100
4.2.1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	100
4.2.2	Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	101
4.2.3	Normalized Difference Red Edge Index (NDRE)	102
4.2.4	Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI).....	104
4.2.5	Red Edge Inflection Point (REIP)	106
4.2.6	Second Modified Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)	107
4.3	Anwendung der Datenprodukte in der landwirtschaftlichen Praxis.....	109
4.3.1	NDVI für N-Düngung nach HAGN et al. (2024) und LI et al. (2014)	110
4.3.2	GNDVI für N-Düngung nach (KAYAD et al., 2019) und (SULLIVAN et al., 2004)	115
4.3.3	NDRE für N-Düngung nach LI et al. (2014).....	117
4.3.4	CCCI für N-Düngung nach LI et al. (2014) und FITZGERALD et al. (2010)	118
4.3.5	REIP für N-Düngung nach STETTNER et al. (2022)	120
4.3.6	MSAVI für N-Düngung nach ALMEIDA-ÑAÑAY (2023)	121
5	Fachkonzept zum Einsatz fernerkundlicher Datenprodukte für die N-Düngung....	122
5.1	Organisatorische und technische Rahmenbedingungen für die Bereitstellung fernerkundlicher Datenprodukte	123
5.1.1	Allgemeine Rahmenbedingungen für die Nutzung neuer fernerkundlicher Datengrundlagen	123
5.1.2	Mengengerüste und Ressourcen für Datenübernahme und Datenverarbeitung	124
5.1.3	Definition der Betriebsumgebung für Datenverarbeitung und Datenbereitstellung	126

5.1.4	Bewertung der ausgewählten Datengrundlagen hinsichtlich der genannten Rahmenbedingungen	126
5.1.5	Aufbau und Bereitstellung eines homogenen „lebenden“ Datenarchivs	127
5.2	Bereitstellung von Datenprodukten in Diensten und standardisierten Datenformaten .	128
5.3	Aufbau einer Knowledge Base für Landwirte zu den Datenprodukten.....	129
5.4	Bereitstellung allgemeiner Web-Anwendungen für die Datenexploration	130
5.5	Bereitstellung kontextspezifischer Anwendungen, Empfehlungswerkzeuge und Apps .	131
6	Literaturverzeichnis	133
7	Projektbeteiligte.....	148

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Vorgehensmodell für die Umsetzung der Machbarkeitsstudie	13
Abbildung 2: Darstellung eines Zeitschnittes des NVDI für Europa.	20
Abbildung 3: Beispiel des LAI-Produktes vom August 1990.	39
Abbildung 4: Beispielkarte der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe.	46
Abbildung 5: Karte des Ackerbaulichen Ertragspotential der Böden in Deutschland.	49
Abbildung 6: Beispieldarstellung der verschiedenen Datenprodukte des Dürremonitors	58
Abbildung 7: Übernahme und Vorverareitung der Senstinel-Daten für die ADP-SN	128

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kurzbeschreibung ausgewählter agronomischer Maßnahmen	16
Tabelle 2: Beschreibung des Indikators Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).....	20
Tabelle 3: Datenprodukt: Berechnung des NDVI basierend auf Sentinel 2	22
Tabelle 4: Beschreibung des Indikators Green Normalized Vegetation Index (GNDVI)	24
Tabelle 5: Datenprodukt: Berechnung des GNDVI basierend auf Sentinel 2 - L2A	25
Tabelle 6: Datenprodukt: Berechnung des GNDVI basierend auf Landsat 8	27
Tabelle 7: Beschreibung des Indikators Normalized Difference Red Edge (NDRE)	28
Tabelle 8: Datenprodukt: Berechnung des NDRE basierend auf Sentinel 2 - L2A	29
Tabelle 9: Beschreibung des Indikators Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	31
Tabelle 10: Datenprodukt: Berechnung SAVI basierend auf Sentinel 2 - L2A	32
Tabelle 11: Datenprodukt: Berechnung des SAVI basierend auf Landsat-8	34
Tabelle 12: Beschreibung des Index Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2).....	36
Tabelle 13: Datenprodukt: Berechnung des MSAVI2 basierend auf Sentinel 2 – L2A.....	37
Tabelle 14: Beschreibung des Index Leaf Area Index (LAI)	39
Tabelle 15: Datenprodukt: Berechnung des LAI basierend auf Sentinel-2	41
Tabelle 16: Beschreibung des Index Red Edge Inflection Point (REIP)	42
Tabelle 17: Datenprodukt: Berechnung des REIP basierend auf Sentinel 2 – L2A	44
Tabelle 18: Allgemeine Beschreibung der Bodentemperatur	46
Tabelle 19: Datenprodukt: Bodentemperatur des Deutschen Wetterdienstes (DWD)	47
Tabelle 20: Allgemeine Beschreibung des Verfahrens SQR.....	48
Tabelle 21: Datenprodukt: Müncheberger Soil Quality Rating vom BKG	49
Tabelle 22: Allgemeine Beschreibung der Beschaffenheit des Bodens	50
Tabelle 23: Datenprodukt - Bodenschätzung des LfULG	51
Tabelle 24: Datenprodukt - Bodenkarte des LfULG	52

Tabelle 25: Allgemeine Beschreibung der Erosionsgefahr durch Wind oder Wasser	54
Tabelle 26: Datenprodukt - Erosionsgefährdungskarten vom LfULG	54
Tabelle 27: Allgemeine Beschreibung der Bodenfeuchte	56
Tabelle 28: Datenprodukt - UFZ-Dürremonitor	57
Tabelle 29: Datenprodukt - DWD Bodenfeuchteviewer – Bodenfeuchteanalyse.....	59
Tabelle 30: Beschreibung des Index Plant Phenology Index (PPI)	60
Tabelle 31: Datenprodukt - Berechnung des PPI basierend auf Sentinel 2	61
Tabelle 32: Beschreibung des Index Normalized Difference Water Index (NDWI).....	64
Tabelle 33: Datenprodukt - Berechnung des NDWI basierend auf Sentinel 2 – L2A.....	65
Tabelle 34: Datenprodukt - Berechnung des NDWI basierend auf Landsat 8	67
Tabelle 35: Beschreibung des Index Normalized Difference Drought Index (NDDI)	68
Tabelle 36: Datenprodukt - Berechnung des NDDI basierend auf Sentinel 2 – L2A	69
Tabelle 37: Datenprodukt - Berechnung des NDDI basierend auf Landsat 8	71
Tabelle 38: Beschreibung des Index Vegetation Health Index (VHI)	72
Tabelle 39: Datenprodukt - Berechnung des Vegetation Health Index (VHI) basierend auf Landsat 8	74
Tabelle 40: Beschreibung des Index Crop Water Stress Index (CWSI)	76
Tabelle 41: Datenprodukt - Berechnung des Crop Water Stress Index (CWSI) basierend auf Landsat 8	77
Tabelle 42: Allgemeine Beschreibung der Sonnenscheindauer in bestimmtem Zeitraum	79
Tabelle 43: Datenprodukt – Sonnenscheindauer von DWD	79
Tabelle 44: Datenprodukt – Sonnenscheindauer von CM SAF (The Satellite Application Facility on Climate Monitoring)	80
Tabelle 45: Beschreibung des Index Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI)	82
Tabelle 46: Datenprodukt - Berechnung des Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) basierend auf Sentinel 2 - L2A	84
Tabelle 47: Beschreibung des Index Enhanced Vegetation Index (EVI)	86
Tabelle 48: Datenprodukt - Berechnung des Enhanced Vegetation Index (EVI) basierend auf Sentinel 2 - L2A.....	87
Tabelle 49: Datenprodukt - Berechnung des Enhanced Vegetation Index (EVI) basierend auf Landsat-8...	89
Tabelle 50: Beschreibung des Index Sentinel-2 Red Edge Position (S2REP)	91
Tabelle 51: Datenprodukt - Berechnung des Sentinel-2 Red Edge Position (S2REP) basierend auf Sentinel 2 - L2A.....	92
Tabelle 52: Beschreibung des Index Excess Green Index (ExG).....	94
Tabelle 53: Beschreibung des Index Standardized Precipitation Index (SPI)	95
Tabelle 54: Übersicht der Produkt-Nutzen-Paare	98
Tabelle 55: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares <i>NDVI für N-Düngung</i> hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen	110

Tabelle 56: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares <i>GNDVI für N-Düngung</i> hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen	115
Tabelle 57: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares <i>NDRE für N-Düngung</i> hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen	117
Tabelle 58: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares <i>CCCI für N-Düngung</i> hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen	118
Tabelle 59: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares <i>REIP für N-Düngung</i> hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen	120
Tabelle 60: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares <i>MSAVI für N-Düngung</i> hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen	121

Abkürzungsverzeichnis

BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BKR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BT	Brightness Temperature
CLMS	Copernicus Land Monitoring Service
CCCI	Canopy Chlorophyll Content Index
CWSI	Crop Water Stress Index
DVI	Difference Vegetation Index
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEA	European Environment Agency bzw. Europäische Umweltagentur
EVI	Enhanced Vegetation Index
ExG	Excess Green Index
ExGR	Excess Green-Red Index
ExR	Excess Red Index
GERICS	Climate Service Center Germany
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GPCC-DI	Global Precipitation Climatology Centre Drought Index
GRVI	Green-Red Vegetation Index
HR-VPP	Angebot des CLMS, welches drei Produktgruppen (Raw Vegetation Indices, Seasonal Trajectories, Vegetation Phenology Parameters) umfasst
IDW	Inverse Distance Weight. Ein Verfahren zur Interpolation von Werten in die Fläche
IRECI	Inverted Red Edge Chlorophyll Index
ISIP	Von der öffentlichen Hand entwickeltes Informationssystem für den integrierten Pflanzenbau
GLÖZ	Im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union formulierte Standards für den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand von Flächen
L2A	Produktkategorie der Sentinel-2-Daten
LAI	Leaf Area Index oder Blattflächenindex
LCC	Leaf Chlorophyll Concentration bzw. Chlorophyllkonzentration im Blatt
LUIS	Landwirtschaft- und Umweltinformationssystem für Geodaten
PPI	Plant Phenology Index bzw. Pflanzenphänologie-Index
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption Reflectance Index
MSAVI2	Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index
NDDI	Normalized Difference Drought Index

NDI45	Normalized Difference Index
NDRE	Normalized Difference Red Edge
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Nahinfrarot
N-Gabe	Düngung landwirtschaftlicher Flächen mit Stickstoff (N)
OLI	Operational Land Imager. Ein Fernerkundungsinstrument an Bord von Landsat 8
PSSR	Pigment Specific Simple Ratio
REIP	Red Edge Inflection Point
S2REP	Sentinel-2 Red Edge Position Index
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SMI	Soil Moisture Index bzw. Bodenfeuchteindex
SPI	Standardized Precipitation Index
SWIR	Kurzwelliges Infrarotlicht (short wavelength infrared)
TCI	Temperature Condition Index
TIRS	Thermaler Infrarotsensor
UAV	Unmanned Aerial Vehicle bzw. Unbemanntes Luftfahrzeug. In der Landwirtschaft sind damit in der Regel Drohnen gemeint
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
USGS	United States Geological Survey
VCi	Vegetation Condition Index
VHI	Vegetation Health Index
VI	Vegetationsindizes
WeKEO	Der Name WeKEO (pronounced [wikio]) beschreibt eine Datenplattform, die Zugang zu Daten der Organisationen EUMETSAT, ECMWF, EEA und MERCATOR OCEAN ermöglicht
XARVIO	Digitales Farmmanagement System des Unternehmens BASF
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung

Zusammenfassung

Die fortschreitende Digitalisierung in der Landwirtschaft bietet erhebliche Potenziale zur Effizienzsteigerung, Ressourcenschonung und nachhaltigen Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen. Insbesondere Fernerkundungsdaten ermöglichen eine präzisere Analyse von Boden- und Pflanzenzuständen, wodurch gezielte betriebliche Entscheidungen unterstützt werden können. Um die praktische Anwendung dieser Daten für Landwirte zu erleichtern, ist es essenziell, einen systematischen Überblick über existierende Datenprodukte zu erstellen und deren Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis zu bewerten.

Im Rahmen dieses Projektes wurde zunächst ein Übersichtskatalog relevanter Fernerkundungsdatenprodukte, sowie weiterer Geodaten, erstellt und hinsichtlich ihres praktischen Mehrwerts für landwirtschaftliche Betriebe analysiert. Anschließend wurden die Methoden zur Erzeugung dieser Produkte detailliert betrachtet. Abschließend erfolgten konzeptionelle Überlegungen zur Integration von Fernerkundungsdaten in bestehende IT-Infrastrukturen, insbesondere mit Blick auf deren Nutzung für die optimierte Stickstoffdüngung. Ziel war es, eine Grundlage für die Bereitstellung eines operativen Systems auf LfULG-IT-Infrastrukturen zu schaffen, das Fernerkundungsinformationen für Landwirte nutzbar macht und so eine datenbasierte, präzise Düngestrategie unterstützt.

1 Zielstellung und Methodik

1.1 Zielstellung

Im Rahmen der Erstellung der Machbarkeitsstudie „Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Entscheidungsunterstützung von Landwirten“ sollen fernerkundliche Datenprodukte identifiziert werden, die einen konkreten Mehrwert in der landwirtschaftlichen Praxis ergeben und unter Berücksichtigung rechtlicher und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen als Informationsangebot über einen zukünftigen Geodatendienst des Freistaats Sachsen bereitgestellt werden könnten.

Im Zuge der Bearbeitung in der Projektgruppe wurde beschlossen, den Kreis der „fernerkundlichen Datenprodukte“ inhaltlich weit zu fassen, sodass z. B. neben klassischer Vegetationsindizes auch Datenprodukte mit hineinfallen, die auf komplexeren Modellen basieren und nur vereinzelt fernerkundliche Datenprodukte als Eingangsdaten integrieren. Ferner sollen nicht-fernerkundliche Datenprodukte, die in der Zielgruppe der Landwirte eine große praktische Relevanz haben, ebenfalls mitprotokolliert werden.

1.2 Methodik

Die Erstellung der Machbarkeitsstudie folgt einem inkrementellen Vorgehen, welches sich in drei Arbeitspakete (Phasen) gliedert (Abbildung 1).

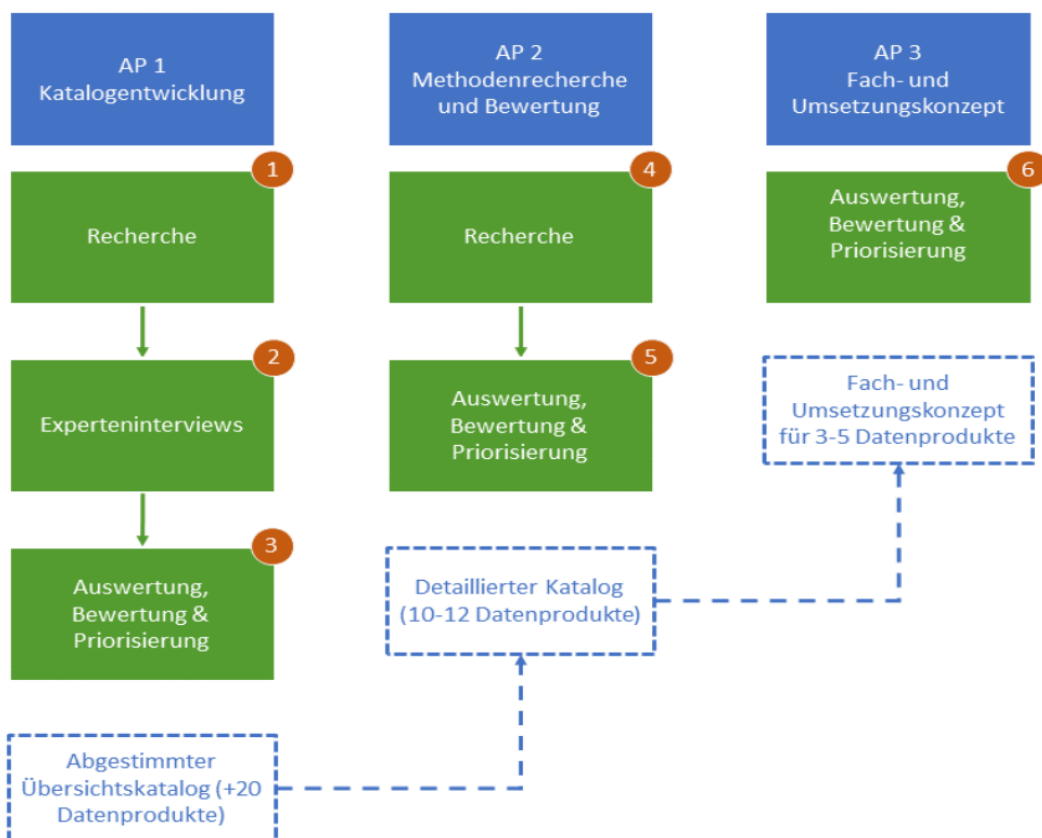


Abbildung 1: Darstellung des Vorgehensmodell für die Umsetzung der Machbarkeitsstudie

Im **AP 1** wird ein Übersichtskatalog erstellt, der einen Überblick über existierende und mögliche Datenprodukte gibt und deren Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis einordnet. Nach Priorisierung der Datenprodukte des Übersichtskataloges aus AP 1, werden im **AP 2** für einen Teil der Datenprodukte Detailfragen bzgl. der Methodik sowie der Einordnung in die landwirtschaftliche Praxis analysiert und bewertet. Nach Abschließender Priorisierung werden in **AP 3** Fach- und Umsetzungskonzepte für einzelne Datenprodukte und für die Bereitstellung der Datenprodukte über eine IT-Dateninfrastruktur des Freistaats Sachsen diskutiert.

Zur Systematisierung der Rechercheergebnisse wurden die in Kapitel 2 beschriebenen **agronomischen Maßnahmen** in mehreren Expertenworkshop identifiziert und in den Experteninterviews validiert. Diesen Maßnahmen werden im Zuge der Recherche sinnvolle bzw. nützliche Indikatoren und Datenprodukte zugeordnet.

Die Identifikation und Bewertung der Indikatoren und Datenprodukte wurde im Rahmen einer umfangreichen Literaturrecherche sowie teilstandardisierter und offener Experteninterviews durchgeführt.

Für die Literaturrecherche wurden in den Expertenworkshops und -interviews verschiedene potenzielle Indizes, Datenprodukte oder Forschungsprojekte identifiziert und anschließend entsprechende Literaturquellen recherchiert und ausgewertet. Für die Literaturrecherche wurden u. a. die Suchmaschinen Scopus¹ und Sciencedirect² eingesetzt. Daneben wurden über einschlägige Recherchewerkzeuge Metastudien zu dem Einsatz von fernerkundlichen Produkten in der Landwirtschaft identifiziert und analysiert.

Für die Experteninterviews wurden drei Wissenschaftler mit Bezug zu Fernerkundung und Landwirtschaft, drei landwirtschaftliche Dienstleister und drei Landwirte interviewt. Die Interviewzeiten waren jeweils für 60 Minuten geplant und wurden in Präsenz durchgeführt. Die Interviews wurden genutzt, um

1. die ermittelten agronomischen Maßnahmen auf Vollständigkeit zu validieren
2. weitere Anhaltspunkte für die Literaturrecherche im Hinblick auf potenzielle Datenprodukte für die Landwirtschaft zu bekommen
3. das Anwendungspotenzial der identifizierten Datenprodukte abzuschätzen und zusammen mit den agronomischen Maßnahmen zu priorisieren.

¹ [Link zur Suchmaschine Scopus \(https://www.scopus.com/\)](https://www.scopus.com/)

² [Link zur Suchmaschine Sciencedirect \(https://www.sciencedirect.com/\)](https://www.sciencedirect.com/)

Abschließend wurden die Ergebnisse aus der Recherche, den Workshops sowie den Experteninterviews in diesem Dokument zusammengeführt und konsolidiert.

2 Agronomische Maßnahmen

Die vorliegende Recherche identifiziert Indikatoren und Datenprodukte (siehe Kapitel 3), die Praktiker aus der Landwirtschaft einen Mehrwert bieten. Der Schwerpunkt liegt dabei, aber nicht ausschließlich, auf fernerkundlichen Indizes. Die Systematisierung des Nutzens in der landwirtschaftlichen Praxis erfolgt auf Basis ausgewählter agronomischer Maßnahmen, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Die so generierten Produkt-Nutzen-Paare werden in Kapitel 4 übersichtlich dargestellt.

Tabelle 1: Kurzbeschreibung ausgewählter agronomischer Maßnahmen

Agronomische Maßnahmen	
Aussaat	Umfasst jene Maßnahmen, die sich mit der Ausbringung von Saatgut, z. B. Getreide, Raps, Mais, mithilfe spezieller Agrartechniken beschäftigen. Die Aussaat im Herbst, z. B. Winterweizen oder -roggen, wird als Winteraussaat und die Aussaat im Frühjahr, z. B. Hafer oder Zuckerrüben, als Frühljahrsaussaat bezeichnet (BALDENHOFER, 1999).
Bewässerung	Die Bewässerung dient dem Ausgleich der für die Bodennutzung jahreszeitlich oder ganzjährig fehlenden Niederschläge. Sie ermöglicht den Anbau von Kulturarten jenseits der Grenze des Regelfeldbaus und ermöglicht eine höhere Flächenproduktivität durch eine reichlichere und regelmäßige Wasserversorgung (BALDENHOFER, 1999). Voraussetzung für den Einsatz von Bewässerungstechniken ist das Vorhandensein entsprechender Infrastruktur sowie in Deutschland eine wasserrechtliche Genehmigung zum Betrieb einer Bewässerungsanlage (DÖHLER, 2009).
Bodenbearbeitung	Die Bodenbearbeitung umfasst Tätigkeiten, die versuchen gute physikalische Wachstumsbedingungen für die folgende Feldfrucht zu schaffen (DÖHLER, 2009). Wesentliche Ziele der Bodenbearbeitung sind die „[...] Einmischung von Ernteresten und organischen Düngern zur Aktivierung des Bodenlebens und der Rotte, Beseitigen von Struktur- und Spurschäden zur Wiederherstellung einer hohen Durchlässigkeit für Luft und Wasser im Boden, Bereiten eines optimalen Saatbettes zur exakten Ablage des Saatgutes, mechanische Bekämpfung von Unkräutern, Ungräsern und Schädlingen sowie Krankheitserregern zur Absicherung von Ertrag und Qualität.“ (MUNZERT & FRAHM, 2006).
Ertragsprognose	Die frühzeitige Vorhersage von relativen und absoluten Erträgen bildet eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Planung verschiedener agronomischer Maßnahmen, z. B. N-Düngung oder Ernteplanung (MUNZERT & FRAHM, 2006; SCHAUBERGER et al., 2020). Über längere Zeiträume bildet Sie auch eine wichtige Eingangsgröße für Investitionsentscheidungen (BALDENHOFER, 1999).

Agronomische Maßnahmen

Krankheits- und Schädlingsbekämpfung

Die Krankheits- und Schädlingsbekämpfung gehört zu den Aufgaben des Pflanzenschutzes. Letzterer umfasst Maßnahmen „die Schäden an Kulturpflanzen durch Krankheitserreger und andere Schädlinge niedrig halten oder verhindern sowie Beeinträchtigungen durch die unbelebte Umwelt abwehren“ (BALDENHOFER, 1999). Die Krankheits- und Schädlingsbekämpfung umfasst vorbeugende Maßnahmen, die die Schadenswahrscheinlichkeit durch Krankheiten oder Schädlinge herabsetzen sowie Bekämpfungsmaßnahmen mit chemischen und nicht-chemischen Pflanzenschutzmitteln. Der Einsatz von Insektiziden und Fungiziden unterliegt entsprechenden rechtlichen Rahmenvorgaben (MUNZERT & FRAHM, 2006).

Makro-Nährstoffversorgung

Makronährstoffe sind essenzielle Stoffe, z. B. Phosphor, Kalium, Stickstoff oder Magnesium, die die Pflanzen zum Überleben benötigen. Intensive Ackerbauliche Nutzung führt zum Entzug von Makro- und Mikronährstoffen aus dem Boden. Dementsprechend müssen über Düngung regelmäßig entzogene Nährstoffe dem Boden verabreicht werden. Um den Eintrag von Düngemittel in die Grund- und Oberflächengewässer sowie die Ökosysteme zu regulieren und negative Effekte zu vermeiden, unterliegt die Düngung auch entsprechenden rechtlichen Vorgaben. (BALDENHOFER, 1999; MUNZERT & FRAHM, 2006). Unter den Makronährstoffen hat die Versorgung mit Stickstoff den größten Einfluss auf Mindererträge und Qualitätseinbußen. Die kontinuierliche und stabile Stickstoffversorgung innerhalb der Vegetationsperiode bildet daher einen eigenen Aufgabenkomplex, welcher durch die agronomischen Maßnahme N-Düngung zusammengefasst wird (MUNZERT & FRAHM, 2006).

Melioration / Bodenfruchtbarkeit

„Melioration bezeichnet alle Bodenkulturmaßnahmen zur Verbesserung des Bodenwasser-, Bodenluft- und Nährstoffhaushaltes mit dem Ziel der Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und der Ertragssteigerung sowie der Verhinderung von Bodenerosion, Bodenversauerung und Bodenversalzung“ (BALDENHOFER, 1999).

N-Düngung

Stickstoff (N) ist ein wichtiges Bauelement der Pflanze. Es beeinflusst wesentlich den Proteingehalt sowie den Stoffwechsel der Pflanze. Die N-Düngung bildet daher eine wichtige agronomische Maßnahme mit einem großen Einfluss auf Ertrag und Qualität der entsprechenden Kulturarten. Die N-Düngung kann mehrfach in einer Vegetationsperiode durchgeführt werden. In diesem Fall spricht man von der ersten, zweiten und n-ten N-Gabe. Um den Eintrag von Düngemittel in die Grund- und Oberflächengewässer sowie die Ökosysteme zu regulieren und negative Effekte zu vermeiden, unterliegt die Düngung entsprechenden rechtlichen Rahmenvorgaben (MUNZERT & FRAHM, 2006).

Agronomische Maßnahmen

Unkrautbekämpfung

Die Unkrautbekämpfung gehört zu den Aufgaben des Pflanzenschutzes. Die Unkrautbekämpfung, weitgehend synonym zu Unkrautregulierung und Unkrautmanagement, beschäftigt sich mit Maßnahmen zur Regulierung oder Bekämpfung von Unkräutern in den Schlägen. Ziel ist eine fachgerechte Unkrautregulierung und damit die Vermeidung von negativen Effekten auf den Ertrag und die Qualität der Ernte. Die Unkrautbekämpfung umfasst mechanische, biologische und chemische Verfahren. Der Einsatz von Unkrautbekämpfern unterliegt entsprechenden rechtlichen Rahmenvorgaben (BALDENHOFER, 1999, MUNZERT & FRAHM, 2006).

Wachstumsregler

Der Einsatz von Wachstumsregler gehört zu den Aufgaben des Pflanzenschutzes. Wachstumsregler sind Wirkstoffe, die in den Hormonhaushalt der Pflanzen eingreifen und die Morphologie der Pflanze beeinflussen. Sie werden in der Regel eingesetzt um die Standfestigkeit und Ertragsunterschiede in der Bestockung der Pflanzen zu verbessern und helfen bei schwierigen Umgebungsparametern die Erträge abzusichern (BALDENHOFER, 1999; MUNZERT & FRAHM, 2006).

Im Rahmen der Workshops und Experteninterviews wurden auch weitere agronomische Maßnahmen wie die Ernteplanung, die Transportoptimierung bei der Ernte, die Planung der Fruchtfolge und die Planung von GLÖZ-Maßnahmen diskutiert. Da diese Fragestellungen aber noch einen erhöhten Forschungsbedarf haben, sollen diese nicht weiter in diesem Dokument verfolgt werden.

3 Indikatoren und Datenprodukte

Den in Kapitel 2 beschriebenen Maßnahmen wurden im Zuge der Recherche solche Datenprodukte zugeordnet, die den Landwirten bei konkreten agronomischen Fragestellungen unterstützen können, zum Beispiel bei der Wahl des optimalen Zeitpunktes für Aussaat oder der teilflächenspezifischen N-Düngung.

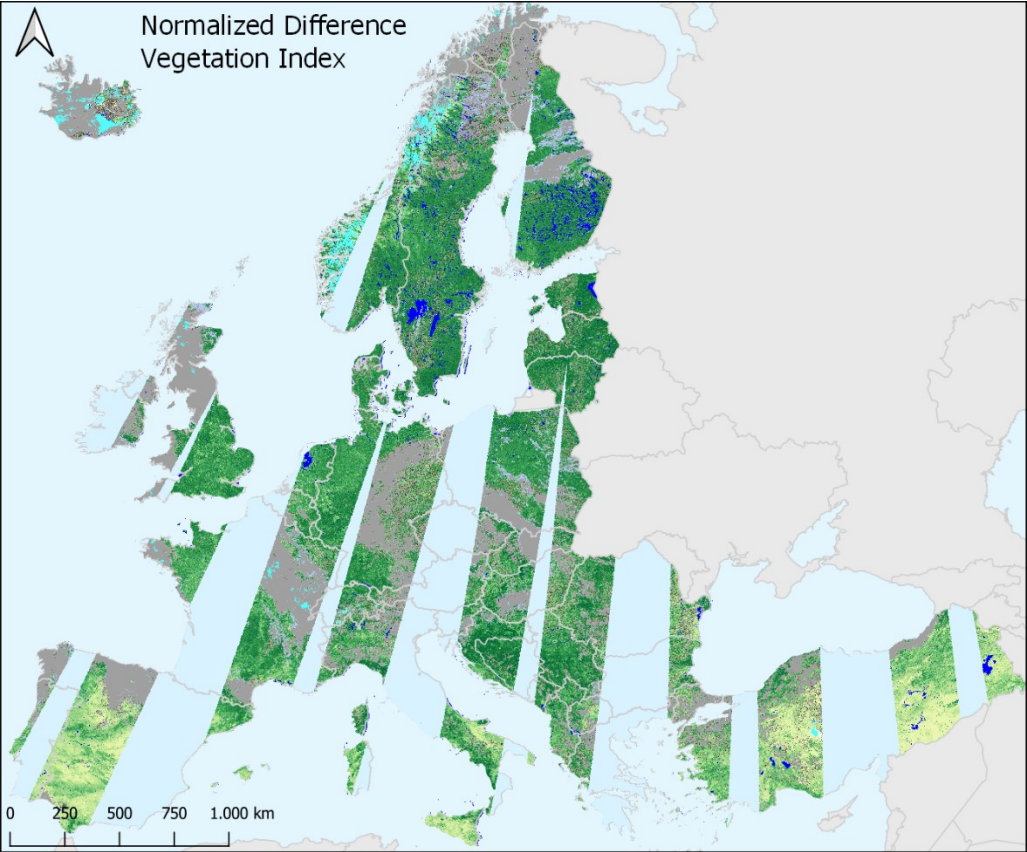
In den durchgeführten Workshops und Experteninterviews wurde von allen Seiten betont, dass Robustheit, Verlässlichkeit, sowie räumlich und zeitliche Verfügbarkeit der Datenprodukte gegeben sein muss. Ist eine dieser Eigenschaften nicht gegeben oder unsicher, ist der Einsatz entsprechender Datenprodukte in der landwirtschaftlichen Praxis fraglich. Die nachfolgende katalogartige Übersicht berücksichtigt daher nur solche Datenprodukte, die die genannten Eigenschaften mit großer Wahrscheinlichkeit auch erfüllen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden nun einzelne Datenprodukte, basierend auf Fernerkundungsdaten und Geoinformation, mit dem Zielfokus auf den Nutzungswert für die landwirtschaftliche Praxis wertfrei katalogisiert.

3.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

3.1.1 Indexbeschreibung NDVI

Tabelle 2: Beschreibung des Indikators Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Allgemeine Beschreibung
Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) wird im Pflanzenbau häufig eingesetzt, um Unterschiede in der Vitalität der Pflanzen und der Biomasse festzustellen. Er dient als Proxy für den Chlorophyllgehalt in den Blättern der Pflanzen und deren Photosyntheseaktivität. Er steht auch in engem Zusammenhang mit der Vegetationsdichte und korreliert deshalb mit dem Leaf Area Index (LAI). Der NDVI nutzt die spektralen Eigenschaften grüner Pflanzen, die einerseits hohe Reflektanzwerte im Bereich des nahen Infrarots und andererseits niedrige Reflektanzen im Bereich des sichtbaren Rots aufweisen (PEREYRA et al., 2022; TANDA & CHIARABINI, 2019). Der NDVI wird im Wertebereich zwischen -1 und +1 angegeben. Im Allgemeinen sind die Werte für Gewässer negativ, für Felsen, Sande oder Betonoberflächen nahe Null und für Vegetation, einschließlich Pflanzen, Sträucher, Gräser und Wälder, positiv (HUANG et al., 2021).

Quelle: EEA geospatial data catalogue, 2021
Abbildung 2: Darstellung eines Zeitschnittes des NVDI für Europa.

Allgemeine Beschreibung
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis Der NDVI wird sowohl in der satellitengestützten Fernerkundung wie auch in der Nahbereichsfernerkundung für die Überwachung des Pflanzenwachstums sowie die Identifikation von Managementzonen eingesetzt (MULLA, 2013; YANG et al., 2000). Damit bildet eine relevante Entscheidungsgröße für eine Reihe verschiedener agronomischer Maßnahmen. Makro-Nährstoffversorgung: Ableitung des relativen Biomassepotentials und darauf basierend Identifikation von kulturpflanzenpezifischen Ertragsmustern (HAGN et al., 2024). Eingangsgröße für die Planung der Düngung mit Makro-Nährstoffen. Bewässerung: Der NDVI kann auch für die Überwachung des Wasserstatus der Pflanzen und damit als Planungsgröße für die Bewässerungsplanung verwendet werden (GAUTAM & PAGAY, 2020). N-Düngung: Kann für die zielgerichtete teilflächenspezifische Applikation der N-Düngung eingesetzt werden. Funktioniert als Proxy für die N-Aufnahme der Pflanzen und damit als Eingangsgröße für die N-Düngung (GUAN et al., 2019). In Gesprächen mit Experten, wurde der NDVI insbesondere für die teilflächenspezifische Applikation der ersten N-Gabe empfohlen (BOIARSKII & HASEGAWA, 2019). Ertragsprognose: Identifikation von kulturpflanzenpezifischen Ertragsmustern und relativen Ertragsunterschieden innerhalb eines Schläges oder zwischen vergleichbaren Schlägen (DORAISWAMY et al., 2003; KAYA & POLAT, 2023; HAGN et al., 2024).
Berechnungsmethode Berechnungsmethode nach ROUSE et al. (1974): $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$ <i>NIR ($\lambda = 700 - 900 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>RED ($\lambda = 610 - 680 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Allgemeine Beschreibung

Die Sättigung des NDVI ist teils durch den Normalisierungseffekt in seiner Berechnungsformel bedingt und teils durch die unterschiedliche Durchlässigkeit der Blätter des Pflanzendaches gegenüber roter und NIR-Strahlung. Daher kann dieser Sättigungseffekt durch den Ersatz der Wellenlängen des roten Frequenzspektrums (die bei geschlossenem Blätterdach stark von der oberen Blattschicht absorbiert werden) durch Wellenlängen, die eine ähnliche Eindringtiefe wie die NIR-Strahlung aufweisen, reduziert werden (Li et al., 2014; Van Niel & McVicar, 2004).

Das relative Biomassepotenzial ist ein neuerer und abgeleiteter Index aus dem NDVI nach (Hagn et al., 2024). Er soll sich robuster als der NDVI verhalten und ebenfalls bei der Identifikation von Managementzonen und der Erstellung von Ertragsprognosen unterstützen.

In der Literatur finden sich auch Arbeiten, die den NDVI für die Bestimmung der Krankheitsschwere im Pflanzenschutz nutzen. Dies geschieht allerdings in Kombination mit Bildaufnahmen von Drohnenbasierten (UAV) Aufnahmesystemen (ZHANG et al., 2018).

3.1.2 Datenprodukt - NDVI basierend auf Sentinel 2

Tabelle 3: Datenprodukt: Berechnung des NDVI basierend auf Sentinel 2

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Daneben werden einzelne Datenprodukte, wie der NDVI direkt vorprozessiert und über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) bereitgestellt (SENTINEL HUB, 2024a). Bereitgestellt als Teil der High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity Product Suite (HR-VPP).
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Berechnungsmethode nach SENTINEL HUB (2024b): $NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$ <i>B04 ($\lambda = 665,6 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>B08 ($\lambda = 832,8 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i>
Räuml. Abdeckung	Europa

Eigenschaft	Beschreibung
Räuml. Auflösung	10 m x 10 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Oktober 2016.
Zeitl. Auflösung	Bereitstellung aller 5 Tage. Der NDVI wird von Copernicus innerhalb von 12 Stunden, nachdem die Satellitendaten zur Verfügung stehen, in Fast-Echtzeit berechnet und bereitgestellt. Einfluss durch Bewölkung: Copernicus weist darauf hin, dass Wolken-, Schatten- und Wasserpixel nicht maskiert werden und damit die Aussagequalität der Produkten reduzieren. Es wird daher empfohlen Masken zur Qualitätssicherung auf die verwendeten Produkte anzuwenden. Wichtig: Für den NDVI stellt das CLMS auch eine Reihe von Zeitreihen, in Teilen bis in das Jahr 1998 bereit.
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. 4. Die Lizenz kann über den CLMS³ im Original abgerufen werden.

³ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.2 Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

3.2.1 Indexbeschreibung GNDVI

Allgemeine Beschreibung

Tabelle 4: Beschreibung des Indikators Green Normalized Vegetation Index (GNDVI)

Allgemeine Beschreibung
Der Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) ähnelt stark dem NDVI, nutzt allerdings Werte des sichtbaren Grüns statt des sichtbaren Rots. Der Index ist insbesondere nützlich für die Berechnung der Photosyntheseleistung und zur Überwachung des Pflanzenstress (KAYA & POLAT, 2023). Besonders geeignet ist er für den Einsatz in dichter Vegetation oder in weiter fortgeschrittenen Entwicklungsphasen (VIDICAN et al., 2023). Die Werte des GNDVI bewegen sich zwischen -1 und 1. Werte zwischen -1 und 0 indizieren Wasseroberflächen oder nackten Boden. Je mehr sich die Werte +1 annähern, desto dichter und gesünder ist die Vegetation (MOON, 2024).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Makro-Nährstoffversorgung: Kann auf Unterschiede in der Pflanzenvitalität hinweisen und damit Bereiche identifizieren, die von Stress betroffen sind. Dies kann wiederum bei der Bestimmung von Managementzonen helfen (KAYAD et al., 2021; GITELSON & MERZLYAK, 1998). N-Düngung: Kann zur Bestimmung der N-Variabilität innerhalb eines Schläges genutzt werden (SULLIVAN et al., 2004). Ertragsprognose: Abschätzung des relativen Ernteertrages während der Blütephase der Pflanzen (KAYA & POLAT, 2023; SULLIVAN et al., 2004). Bewässerung: Abschätzen des Trockenstresses und entsprechendes Bewässerungsmanagement (ESPINOZA et al., 2017; HELMAN et al., 2018).
Berechnungsmethode
Berechnungsmethode nach GITELSON et al. (1996): $GNDVI = \frac{NIR - GRN}{NIR + GRN}$ <i>NIR (λ = 700 – 900 nm) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>GRN (λ ≅ 560 nm) spektrale Reflexion im grünen Frequenzbereich</i>

Allgemeine Beschreibung
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren
Dieser Index ist sensibler in Bezug auf die Chlorophyllkonzentration der Pflanzen. Außerdem ist die Sensibilität gegenüber atmosphärischen Bedingungen und Bodenreflexion geringer. Die Sättigung tritt hier später ein als beim NDVI, so dass der GNDVI länger/bis zu einem weiteren Entwicklungsstadium zum Vegetationsmonitoring eingesetzt werden kann (GITELSON & MERZLYAK, 1998).

3.2.2 Datenprodukt - GNDVI basierend auf Sentinel 2 - L2A

Tabelle 5: Datenprodukt: Berechnung des GNDVI basierend auf Sentinel 2 - L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Die Spektralbänder reichen vom sichtbaren Licht bis zum kurzwelligen Infrarot. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der NDRE Index berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar (SENTINEL HUB, 2024a). L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Die Berechnung des GNDVI kann auf Basis von zwei Spektralbändern von Sentinel-2 erfolgen (SENTINELHUB, 2024): $GNDVI = \frac{B08 - B03}{B08 + B03}$ <i>B08 ($\lambda = 832,8 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>B03 ($\lambda = 559,8 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im grünen Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Welt
Räuml. Auflösung	10 m x 10 m
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die GNDVI Berechnung gleichzusetzen ist.

Eigenschaft	Beschreibung
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS⁴ im Original abgerufen werden.

⁴ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.2.3 Datenprodukt - GNDVI basierend auf Landsat 8

Tabelle 6: Datenprodukt: Berechnung des GNDVI basierend auf Landsat 8

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Landsat-Satelliten sind Teil der Erdbeobachtungsmission von der NASA. Sie sind mit einem Operational Land Imager (OLI) und einem Thermalen Infrarotsensor (TIRS) ausgestattet. Der OLI erfasst unter anderem Spektralbänder im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot. Der TIRS demgegenüber Spektralbänder im thermalen Infrarot (SENTINEL HUB, 2024c). Die Datenprodukte der Landsat-Mission sind über den EarthExplorer des United States Geological Survey (USGS) verfügbar.
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Die Berechnung des GNDVI kann auf Basis von zwei Spektralbändern von Landsat-8 erfolgen (SENTINELHUB, 2024): $GNDVI = \frac{B05 - B03}{B05 + B03}$ <i>B05 ($\lambda = 865 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>B03 ($\lambda = 561,5 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im grünen Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Weltweit
Räuml. Auflösung	30 m x 30 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Februar 2013.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 16 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die GNDVI Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	GeoTIFF
Datenzugang	Zugang über den EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) des USGS (USGS, 2024b).
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Nutzung von Landsat-Daten unterliegt keiner Einschränkung. Sie können nach Belieben verwendet oder weiterverteilt werden. Bei der Verwendung soll allerdings die Datenquellen entsprechend den Vorgaben des USGS korrekt zitiert und angegeben werden (USGS, 2024a; USGS, 2024c)

3.3 Normalized Difference Red Edge (NDRE)

3.3.1 Indexbeschreibung NDRE

Tabelle 7: Beschreibung des Indikators Normalized Difference Red Edge (NDRE)

Allgemeine Beschreibung
Der Normalized Difference Red Edge Index (NDRE) misst den Chlorophyllgehalt in der Pflanze und ist eine Weiterentwicklung des NDVI. Der Wertebereich des NDRE reicht von -1 bis +1. Die Interpretation ähnelt der des NDVI (BOIARSKII & HASEGAWA, 2019).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
N-Düngung: Kann für die teilflächenspezifische Applikation verwendet werden, da er Informationen zur Stickstoffaufnahme liefert. Eignet sich als Indikator insbesondere in mittleren und späteren Wachstumsstadien der Pflanze, wenn die Chlorophyllkonzentration hoch ist (BOIARSKII & HASEGAWA, 2019; LI et al., 2014).
Berechnungsmethode
Berechnungsmethode nach BARNES et al. (2000): $NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$ <i>NIR (700 – 900 nm) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>RE (690 – 730 nm) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i>
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren
Durch die Verwendung des Red-Edge-Bereichs statt des Red-Bereichs im elektromagnetischen Spektrum ist der Index im Vergleich zum NDVI (Kapitel 3.1) empfindlicher gegenüber Veränderungen der Chlorophyllkonzentration und damit besser geeignet in mittleren und späteren Vegetationsperioden, in denen die Pflanzen bereits reif sind. Die erhöhte Empfindlichkeit ergibt sich aus dem Umstand, dass der Red-Edge-Anteil des Lichtes tiefer in die Blätter dringt, als rotes Licht und daher der NDRE auch noch bei hoher Chlorophyllkonzentration Veränderungen wahrnehmen kann (BOIARSKII & HASEGAWA, 2019). Der Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) ist ein abgeleiteter Index aus dem NDRE und hat unter den Red Edge basierten Indizes nach LI et al. (2014) und FITZGERALD et al. (2010) die beste Aussagekraft zur N-Aufnahme für spezifische Kulturarten.

3.3.2 Datenprodukt - NDRE basierend auf Sentinel 2 - L2A

Tabelle 8: Datenprodukt: Berechnung des NDRE basierend auf Sentinel 2 - L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der NDRE berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar. L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Die Berechnung des NDRE kann auf Basis von zwei Spektralbändern von Sentinel-2 erfolgen (SENTINEL HUB, 2024d): $NDRE = \frac{B08 - B05}{B08 + B05}$ <i>B08 ($\lambda = 832.8 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>B05 ($\lambda = 704.1 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m In der Literatur werden Ansätze beschrieben, wie man die räumliche Auflösung des NDRE, basierend auf Daten von Sentinel-2, auf 10x10m steigern kann (MARQUES KAI et al., 2021; BITTENCOURT, 2024). Die Ansätze sind allerdings mit Nachteilen bei der Aussagequalität verknüpft.
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug alle 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die NDRE-Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF

Eigenschaft	Beschreibung
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS⁵ im Original abgerufen werden.

⁵ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.4 Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

3.4.1 Indexbeschreibung SAVI

Tabelle 9: Beschreibung des Indikators Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Allgemeine Beschreibung
Der Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) nach (HUETE, 1988) ist ein an den Boden angepasster Vegetationsindex. Dafür wird ein Korrekturfaktor (L) verwendet, der die Bodenreflexion bei geringer Vegetationsbedeckung integriert. Der Wertebereich des SAVI geht von -1 bis +1, die Interpretation ist ähnlich dem NDVI. Der anwendungsrelevante Wertebereich des SAVI reicht von -1 bis +1. Nach Kareem et al. (2023) ist ein Wert kleiner 0,2 als sehr geringe Vegetationsbedeckung zu interpretieren. Es handelt sich dann meist um urbane Regionen oder Gewässer. Nähert sich der SAVI einem Wert von 0,5 an, weist dies auf eine mittlere Vegetationsbedeckung hin. Ein Wert von 1 indiziert dichte Vegetation.
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Entwicklungsstadium: Die Bestimmung des Entwicklungsstadiums der Pflanzen, insbesondere bei geringer Vegetationsbedeckung, kann bei der Entscheidung unterstützen, welcher Index zur Ertragsbestimmung genutzt werden sollte (KAYA & POLAT, 2023). Bewässerung: HELMAN et al. (2018) testen den Index zur Bestimmung des Wasserbedarfs von Rebpflanzen. FARG et al. (2012) nutzen ihn zur Bestimmung des Crop Coefficient (Kc) in Getreide, der wiederum genutzt werden kann, um den Wasserstatus zu bestimmen. Ertragsprognose: Identifikation von kulturpflanzenpezifischen Ertragsmustern und relativen Ertragsunterschieden innerhalb eines Schläges bzw. zwischen vergleichbaren Schlägen (KAYA & POLAT, 2023).
Berechnungsmethode

Allgemeine Beschreibung	
Berechnung nach KAREEM et al. (2023) und KAYA & POLAT (2023):	
$SAVI = (1 + L) \times \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}$	
NIR	spektrale Reflexion im nahen Infrarot
RED	spektrale Reflexion im roten Frequenzbereich
L	Korrekturfaktor, der je nach Vegetationsdichte angepasst werden kann: <i>L=0,5</i> wird verwendet, wenn der Bedeckungsgrad unbekannt ist. In Regionen mit dichter Vegetation sollte der <i>L</i> Wert nahe 0 liegen. In Regionen mit geringer Vegetationsdichte bei einem Wert nahe 1 Mit <i>L=0</i> entspricht der SAVI dem NDVI.
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren	
Vegetationsindizes wie der NDVI sind abhängig vom Bedeckungsgrad der Vegetation und von der Rückstrahlung durch die so freiliegende Bodenoberfläche. Letztere ist wiederum abhängig vom Bodentyp, welcher sich auch kleinteilig innerhalb eines Schlages ändern kann. Der SAVI soll dieses Problem als an den Boden angepasster Vegetationsindex mitberücksichtigen (HUETE, 1988).	

3.4.2 Datenprodukt - SAVI basierend auf Sentinel 2 - L2A

Tabelle 10: Datenprodukt: Berechnung SAVI basierend auf Sentinel 2 - L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Die Spektralbänder reichen vom sichtbaren Licht bis zum kurzwelligen Infrarot. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der NDRE Index berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar . L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten, die aus Sentinel-2-Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig

Eigenschaft	Beschreibung
Berechnungsmethode	Die Berechnung des GNDVI kann auf Basis von zwei Spektralbändern von Sentinel-2 erfolgen (SENTINEL HUB, 2024d): $SAVI = (1 + L) \times \frac{B08 - B04}{B08 + B04 + L}$ <i>B08 ($\lambda = 842 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>B04 ($\lambda = 665 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die SAVI Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.

Eigenschaft	Beschreibung
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS⁶ im Original abgerufen werden.

3.4.3 Datenprodukt - SAVI basierend auf Landsat-8

Tabelle 11: Datenprodukt: Berechnung des SAVI basierend auf Landsat-8

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Landsat-Satelliten sind Teil der Erdbeobachtungsmission von der NASA. Sie sind mit einem Operational Land Imager (OLI) und einem Thermalen Infrarotsensor (TIRS) ausgestattet. Der OLI erfasst unter anderem Spektralbänder im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot. Der TIRS demgegenüber Spektralbänder im thermalen Infrarot (SENTINEL HUB, 2024c). Die Datenprodukte der Landsat-Mission sind über den EarthExplorer des United States Geological Survey (USGS) verfügbar.

⁶ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

Eigenschaft	Beschreibung
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Die Berechnung des SAVI kann auf Basis von zwei Spektralbändern von Landsat-8 erfolgen (SENTINEL HUB, 2024e): $SAVI = (1 + L) \times \frac{B05 - B04}{B05 + B04 + L}$ <i>B05 ($\lambda = 865 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>B04 ($\lambda = 654 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Weltweit
Räuml. Auflösung	30 m x 30 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Februar 2013.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 16 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die SAVI Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	GeoTIFF
Datenzugang	Zugang über den EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) des USGS (USGS, 2024b).
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Nutzung von Landsat-Daten unterliegt keiner Einschränkung. Sie können nach Belieben verwendet oder weiterverteilt werden. Bei der Verwendung soll allerdings die Datenquellen entsprechend den Vorgaben des USGS korrekt zitiert und angegeben werden (USGS, 2024a; USGS, 2024c).
Anmerkung	Grundsätzlich sollte die Berechnung dieses Indizes auch mit Sentinel-2 in höherer Auflösung möglich sein.

3.5 Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)

3.5.1 Indexbeschreibung MSAVI2

Tabelle 12: Beschreibung des Index Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)

Allgemeine Beschreibung
Bereits durch die Entwicklung des Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) durch HUETE (1988) wurde die Empfindlichkeit einiger Indizes, wie beispielsweise dem NDVI, gegenüber der Vegetation durch Berücksichtigung der Auswirkungen von Atmosphäre und Boden verbessert. Dabei wurde ein Bodenanpassungsfaktor als Konstante L in die Gleichung des NDVI aufgenommen. Für eine optimale Anpassung des Bodeneffekts sollte der Faktor L jedoch umgekehrt zur Menge der vorhandenen Vegetation variieren. So wird in der Gleichung des Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2) die Konstante L durch eine variable Funktion ersetzt und es entfällt die Notwendigkeit, den NDVI vorzuberechnen oder die Bodenlinie zu identifizieren (QI et al., 1994; EUROPEAN SPACE AGENCY, 2024). Der MSAVI2 wird in Wertebereich zwischen -1 und +1 angegeben. Vereinfacht beschrieben signalisiert ein Wert in der Nähe von +1 eine hohe Vegetation und ein Wert unter 0.2 keine Vegetation bzw. nackten Boden. Interessant sind insbesondere Werte zwischen 0.2 und 0.6, da diese Hinweise auf das Keimstadium oder die Blattentwicklung der Pflanze geben (KAREEM et al., 2023).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
N-Düngung: Kann für die zielgerichtete teilflächenspezifische Applikation der N-Düngung eingesetzt werden. Interessant insbesondere bei der ersten N-Gabe, wenn ggf. noch keine oder nur spärliche Vegetation vorhanden ist und man bereits teilflächenspezifisch N-Düngung ausbringen möchte (ANTUNES DALDEGAN et al., 2020; VOITIK et al., 2023). Ertragsprognose: Identifikation von kulturpflanzenpezifischen Ertragsmustern und relativen Ertragsunterschieden innerhalb eines Schläges oder zwischen vergleichbaren Schlägen (ALMEIDA-ÑAUÑAY et al., 2022).
Berechnungsmethode
Berechnung nach QI et al. (1994) und EUROPEAN SPACE AGENCY (2024): $MSAVI2 = \frac{\left(2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - RED)}\right)}{2}$ <i>NIR (700 – 900 nm) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>RED (610 – 680 nm) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Allgemeine Beschreibung
Der MSAVI2 ist, genau wie der NDVI, ein Indikator für die Detektion des Chlorophyllgehalts der Pflanze. Gegenüber dem NDVI bleibt er allerdings bei Pflanzenwachstum länger robust (HABOUDANE et al., 2004). Der MSAVI2 kann als Indikator für die Detektion des Chlorophyllgehalts der Pflanze sowie deren Nährstoffstatus zum Anfang der Vegetationsperiode eingesetzt werden. Er reagiert dabei auf Probleme beim Pflanzenwachstum früher als der NDRE und der NDVI (VOITIK et al., 2023).

3.5.2 Datenprodukt - MSAVI2 basierend auf Sentinel 2 – L2A

Tabelle 13: Datenprodukt: Berechnung des MSAVI2 basierend auf Sentinel 2 – L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der MSAVI2 berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar . L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnung nach Qi et al. (1994) und EUROPEAN SPACE AGENCY (2024): $MSAVI2 = \frac{(2 \times B08 + 1 - \sqrt{(2 \times B08 + 1)^2 - 8 \times (B08 - B04)})}{2}$ <i>B08 (λ = 832.8 nm) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>B04 (λ = 665.6 nm) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Europa und Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die MSAVI Berechnung gleichzusetzen ist.

Eigenschaft	Beschreibung
Datenformat	- NetCDF - GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS⁷ im Original abgerufen werden.

⁷ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

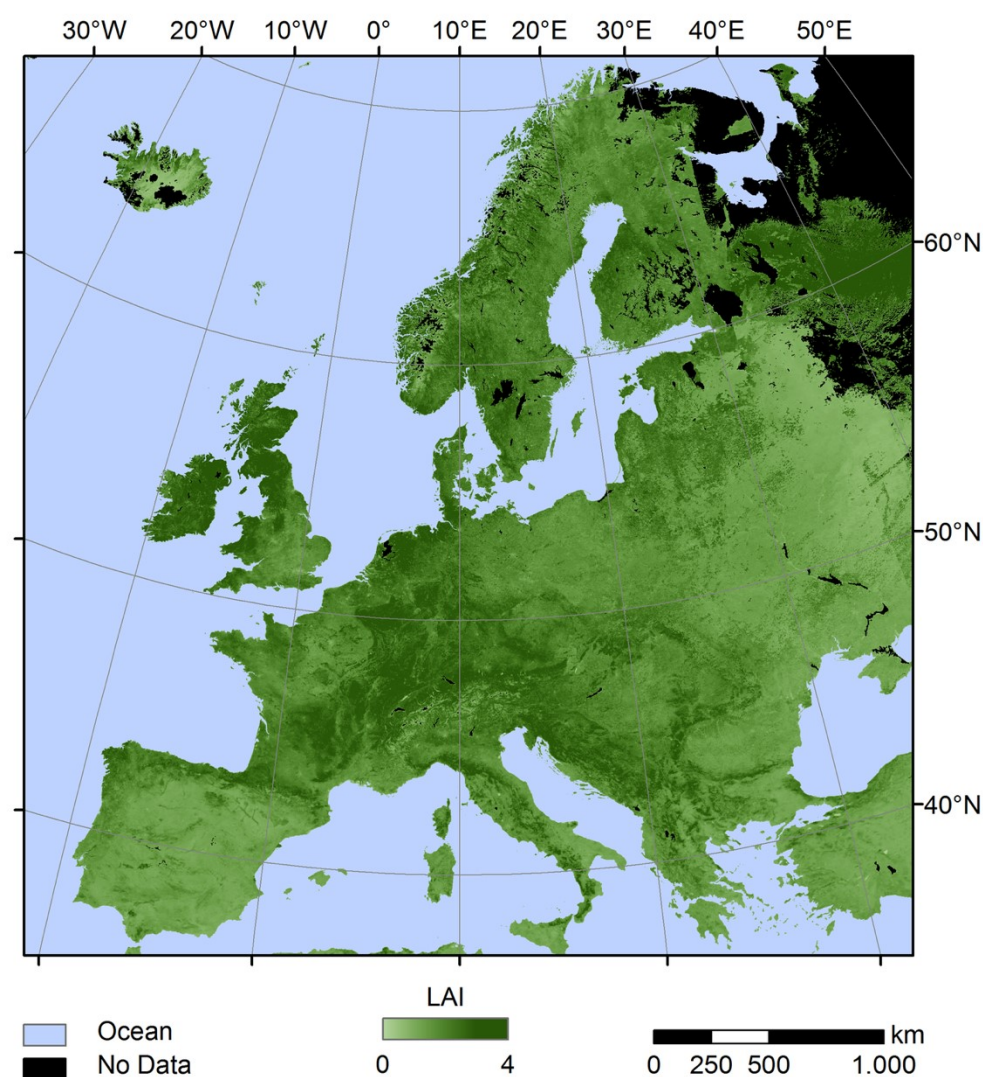
3.6 Leaf Area Index (LAI)

3.6.1 Indexbeschreibung LAI

Tabelle 14: Beschreibung des Index Leaf Area Index (LAI)

Allgemeine Beschreibung

Der Leaf Area Index (LAI) ist eine dimensionslose Variable, die das Verhältnis der Blattfläche grüner Blätter (in m^2) pro Bodenoberfläche (in m^2) beschreibt. Der LAI beinhaltet nicht nur die sichtbaren Blätter der obersten Vegetationsschicht, sondern schließt auch Blätter unterer Vegetationsschichten mit ein. Einen LAI von 4 würde man in der Form interpretieren, dass 1 m^2 Bodenoberfläche von 4 m^2 Blattfläche (in verschiedenen Ebenen) überdeckt wird (BAUER, 2019).



Quelle:

Abbildung 3: Beispiel des LAI-Produktes vom August 1990.

Allgemeine Beschreibung

Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis

Der LAI bildet für die Landwirtschaft einen wichtigen Indikator für den Pflanzenzustand. Er erlaubt Rückschlüsse auf das Photosynthesepotenzial von Pflanzen, ihre Transpiration und die Interaktion der Pflanze mit der Atmosphäre (BAUER, 2019). Damit bietet er einen wichtigen Indikator für die Planung des Einsatzes von Dünger, Wachstumsreglern oder Pflanzenschutz sowie die Prognose von Erträgen (KAYAD et al., 2022).

Bewässerung: Trockenheit beeinträchtigt bei Kartoffeln den Knollenertrag durch einen niedrigen Blattflächenindex ($LAI < 4$), da die reduzierte Blattfläche die Strahlungsaufnahme und somit die Photosyntheseleistung des Bestandes verringert. Besonders bei Sorten mit niedrigem LAI ist es in Trockenperioden sinnvoll, bereits vor der Blüte zu bewässern, um die Blattentwicklung zu fördern und die Strahlungsaufnahme zu maximieren (BUGGLE et al., 2018).

Ertragsprognose: Eingangsgröße für die verschiedene Modelle für die Ertragsmodellierung (ITTERSUM et al., 2003; INES et al., 2013).

Berechnungsmethode

Siehe LAI-Produkt des CLMS.

Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Bei einem LAI von weniger als 0,5 ist der Pflanzenbedeckungsgrad noch nicht ausreichend und der Vegetationsindex wird noch stark von der Bodenreflexion beeinflusst. In diesem Fall eignen sich andere Indikatoren, z. B. MSAVI2, ggf. besser für die genannten Anwendungsmöglichkeiten (GRENZDÖRFER, 2022).

Der LAI stellt in der Literatur einen wichtigen Indikator zur Beurteilung der Sensibilität verschiedener Indizes dar. Je nach Ausprägung des LAI, kann die Aussagekraft von Vegetationsindizes wie NDVI, SAVI, NDRE oder REIP, besser beurteilt werden (LILIENTHAL, 2014).

3.6.2 Datenprodukt - LAI basierend auf Sentinel-2

Tabelle 15: Datenprodukt: Berechnung des LAI basierend auf Sentinel-2

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Daneben werden einzelne Datenprodukte, wie der LAI direkt vorprozessiert und über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) bereitgestellt (Sentinel Hub, 2024a). Bereitgestellt als Teil der High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity Product Suite (HR-VPP).
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Berechnung basierend auf dem Neuronalen Netzwerk HR-VPP BIOPAR-VI (SMETS et al., 2023). Weitere Informationen zu den Trainingsdaten des Modells sowie dessen Anwendung im Betrieb finden sich bei CLMS (CLMS, 2024).
Räuml. Abdeckung	Europa
Räuml. Auflösung	10 m x 10 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Oktober 2016
Zeitl. Auflösung	Bereitstellung aller 5 Tage. Der LAI wird von Copernicus innerhalb von 12 Stunden, nachdem die Satellitendaten zur Verfügung stehen, in Fast-Echtzeit berechnet und bereitgestellt. Einfluss durch Bewölkung: Copernicus weist darauf hin, dass Wolken-, Schatten- und Wasserpixel nicht maskiert werden und damit die Aussagequalität der Produkten verwässern. Es wird daher empfohlen Masken zur Qualitätssicherung auf die verwendeten Produkte anzuwenden.
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.

Eigenschaft	Beschreibung
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS⁸ im Original abgerufen werden.

3.7 Red Edge Inflection Point (REIP)

3.7.1 Indexbeschreibung REIP

Tabelle 16: Beschreibung des Index Red Edge Inflection Point (REIP)

Allgemeine Beschreibung
Der Red Edge Inflection Point (REIP) ist ein Indikator für das Chlorophyllgehalt und dem Gesundheitszustand der Pflanzen. Der Index basiert auf der reflektierten Strahlung im roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Der REIP wird im Wertebereich zwischen 700 und 760 angegeben. Vereinfacht beschrieben signalisieren Werte in der Nähe von 700 eine niedrige Vegetationsdichte und höhere Werte eine höhere Vegetationsdichte (LILIENTHAL, 2014).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis

⁸ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

Allgemeine Beschreibung

N-Düngung: Kann für die teilflächenspezifische Applikation verwendet werden, da er Informationen zur Stickstoffaufnahme liefert (STETTNER et al., 2022; SCHUSTER et al., 2023; MISTELE et al., 2004). In den Expertenworkshops wurde der Einsatz des REIP insbesondere für die zweite N-Gabe empfohlen.

Ertragsprognose: Abschätzung des relativen Ernteertrages während bestimmter morphologischer Entwicklungsstadien der Pflanze (MAIDL et al., 2019; MARSZALEK et al., 2022; SCHUSTER et al., 2023). Bessere Ertragsprognosen können, nach Aussagen in den Experteninterviews u. a. helfen, die Lagerplanung zu verbessern.

Berechnungsmethode

Berechnungsmethode nach GUYOT et al. (1988):

$$REIP = 700 + 40 \times \frac{\frac{RED_{670} + RE_{780}}{2} - RE_{700}}{RE_{740} - RE_{700}}$$

RED_{670} ($\lambda = 670 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum

RE_{700} ($\lambda = 700 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im Red-Edge 700-nm-Band

RE_{740} ($\lambda = 740 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im Red-Edge 740-nm-Band

RE_{780} ($\lambda = 780 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im Red-Edge 780-nm-Band

Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Indizes, die wie der REIP auf mehr als zwei Wellenlängen basieren, zeigen eine deutlich höhere Vorhersagegenauigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Indizes wie dem NDVI (Kapitel 3.1). Während diese traditionellen Indizes ihre Sensitivität bereits bei niedrigen LAI-Werten (ab 2,5 bis 3,5) verlieren, bleibt der REIP bis zu einem LAI von etwa 4 empfindlich (LILIENTHAL, 2014).

3.7.2 Datenprodukt - REIP basierend auf Sentinel 2 – L2A

Tabelle 17: Datenprodukt: Berechnung des REIP basierend auf Sentinel 2 – L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der REIP berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar (SENTINEL HUB, 2024a). L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnungsmethode nach GUYOT et al. (1988): $REIP = 700 + 40 \times \frac{\frac{B04 + B07}{2} - B05}{B06 - B05}$ <i>B04 (λ = 664.6 nm) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>B05 (λ = 704.1 nm) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i> <i>B06 (λ = 740.5 nm) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i> <i>B07 (λ = 782.8 nm) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Europa und Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die REIP Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	 NetCDF  GeoTIFF

Eigenschaft	Beschreibung
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS⁹ im Original abgerufen werden.

⁹ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.8 Bodentemperatur

3.8.1 Allgemeine Beschreibung Bodentemperatur

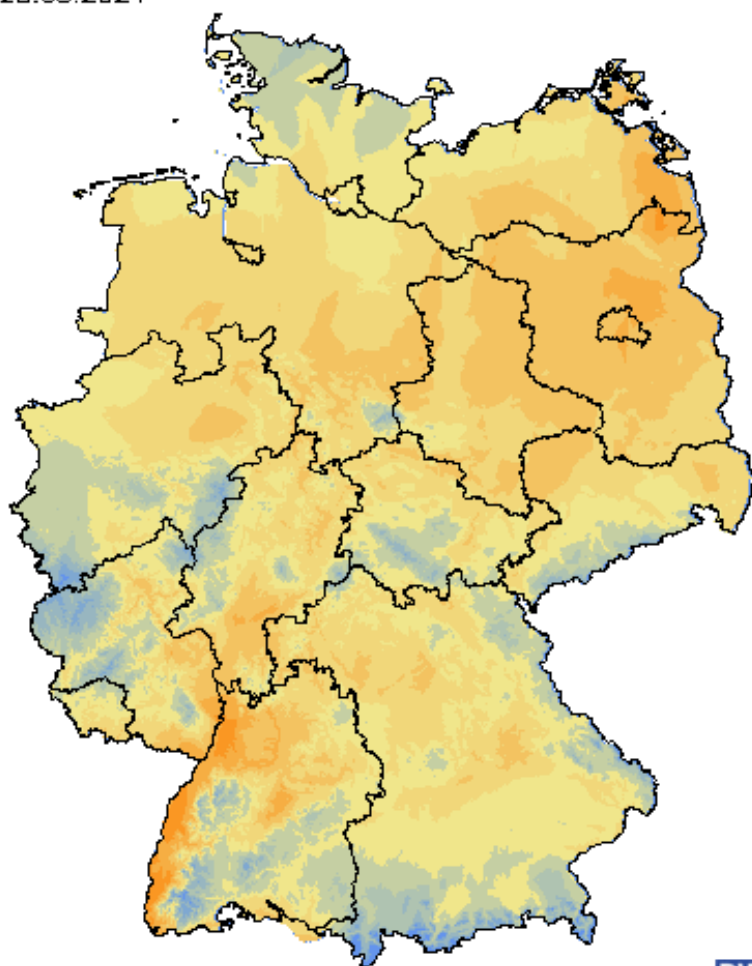
Tabelle 18: Allgemeine Beschreibung der Bodentemperatur

Allgemeine Beschreibung

Die Bodentemperatur bzw. Erdbodentemperatur ist die Temperatur in verschiedenen Bodentiefen unterhalb der Bodenoberfläche. Sie hat einen Einfluss auf chemische, physikalische und biologische Prozesse und Reaktion im Boden. Im Vergleich zur Lufttemperatur, weist die Bodentemperatur eine höhere Trägheit auf und schwankt im Tagesgang deutlich geringer (DWD, 2022a).

Die Bodentemperatur wird in Grad Celsius angegeben und bezieht sich immer auf eine bestimmte Bodentiefe.

Bodentemperaturmittel 5 cm, unbew. sandiger Lehm
28.05.2024



13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 °C

Deutscher Wetterdienst (erstellt 28.5.2024 8:31 UTC)

Geobasisdaten © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (www.bkg.bund.de)



Quelle: DWD (2024a)

Abbildung 4: Beispielkarte der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe.

Allgemeine Beschreibung
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Aussaat: Bei Kulturarten wie Mais oder Kartoffeln, hat die Bodentemperatur einen Einfluss auf den Zeitpunkt der Keimung und die Qualität der Keimung. Die Aussaat bei falscher Bodentemperatur kann daher einen negativen Einfluss auf die Erträge der entsprechenden Kultur haben (RILEY, 1981; KHAEM et al., 2022; AMIN et al., 2024).
Berechnungsmethode
Siehe Bodentemperatur vom DWD.
Abgrenzung zu anderen Indikatoren und Einordnung
Für die Planung des optimalen Aussaattermins, ist die aktuelle Bodentemperatur eine von vielen Entscheidungsgrößen. Weitere Entscheidungsgrößen sind die Bodenfeuchtigkeit, die Wettervorhersage und die eigentliche Kapazität- und Arbeitsplanung des Betriebes.

3.8.2 Datenprodukt - Bodentemperatur des Deutschen Wetterdienst (DWD)

Tabelle 19: Datenprodukt: Bodentemperatur des Deutschen Wetterdienstes (DWD)

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt eine Reihe von agrarmeteorologischen Produkte über das Climate Data Center bereit (DWD, 2024b). Mit Hilfe des agrarmeteorologischen Modell AMBETI/BEKLIMA wird die Bodentemperatur für verschiedene Bodentiefen berechnet und in Grad Celsius angegeben. Bereitgestellte Bodentemperaturen sind: ■ mittlere Bodentemperatur eines typischen unbewachsenen Bodens in 5 cm Tiefe ■ mittlere Bodentemperatur eines typischen unbewachsenen Bodens in 10 cm Tiefe ■ mittlere Bodentemperatur eines typischen unbewachsenen Bodens in 20 cm Tiefe ■ mittlere Bodentemperatur eines typischen unbewachsenen Bodens in 50 cm Tiefe ■ mittlere Bodentemperatur eines typischen unbewachsenen Bodens in 1 m Tiefe ■ mittlere Bodentemperatur in 5 cm Tiefe bei unbewachsenem lehmigem Sand (BEKLIMA) ■ mittlere Bodentemperatur in 5 cm Tiefe bei unbewachsenem lehmigen Schluff (BEKLIMA)

Eigenschaft	Beschreibung
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Mit dem agrarmeteorologische Modell AMBETI werden Bodentemperaturen für alle Standorte von Wetterstationen des DWD berechnet, die seit 1991 Daten erfassen und melden. In weiteren Schritten werden diese punktuellen Bodentemperaturen in die Fläche interpoliert, wobei für die flächenhafte Interpolation ein multiples lineares Regressionsmodell in Kombination mit einer abschließenden Triangulation eingesetzt wird (BRADEN, 2012).
Räuml. Abdeckung	Deutschland
Räuml. Auflösung	1 km x 1 km
Zeitl. Abdeckung	01.01.2019 bis Heute (-1 Tag) für punktuelle Stationsdaten. 01.01.1991 bis Ende des vorletzten Monats für interpoliertes flächenhaftes Produkt
Zeitl. Auflösung	Täglich
Datenformat	ASCII-Raster und Stationsdaten als ASCII
Datenzugang	Climate Data Center des DWD. Direkter Zugriff auf die tagesscharfen ASCII-Raster über verzeichnisbasierten HTTP-Zugang.
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Geodaten des DWD dürfen entsprechend der Creative Commons BY 4.0-Lizenz (CC BY 4.0) unter Beigabe eines Quellenvermerks weiterverwendet werden.

3.9 Müncheberger Soil Quality Rating (SQR)

3.9.1 Allgemeine Beschreibung des Verfahrens SQR

Tabelle 20: Allgemeine Beschreibung des Verfahrens SQR

Allgemeine Beschreibung
Das Müncheberger Soil Quality Rating (SQR) ist ein Verfahren zur Bewertung der Eignung von Standorten für die landwirtschaftliche Nutzung und dient der Abschätzung des Ertragspotentials im globalen Maßstab. Es wurde vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) entwickelt (BGR, 2024a). Die Rasterzellen des SQR bewerten die ackerbaulichen Standorte in einer numerischen Skala von 0 bis 102. Je höher der Wert, umso höher wird das Ertragspotential des Standortes eingeschätzt.
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Ertragsprognose: Indikator für die Bewertung der Eignung von Böden für die landwirtschaftliche Nutzung und zur Abschätzung des Ertragspotenzial (BALDENHOFER, 1999). Kann als Parameter für die Bewertung von Investitionsentscheidung in der Landwirtschaft genutzt werden.

3.9.2 Datenprodukt - Müncheberger Soil Quality Rating vom BKG

Tabelle 21: Datenprodukt: Müncheberger Soil Quality Rating vom BKG

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die SQR-Methode wurde für die Anwendung auf Bodenkarten von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) modifiziert und ist in der Methodendokumentation der Ad-hoc-AG Boden aufgenommen. Die mit der Methode erzeugte Karte, zeigt die Ackerböden in Deutschland auf Basis der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte von Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 (BGR, 2024a).  Quelle: BGR, 2024a Abbildung 5: Karte des Ackerbaulichen Ertragspotential der Böden in Deutschland.
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Das SQR bewertet einen Standort zunächst mit Hilfe von acht Basisindikatoren wie dem Bodensubstrat oder der effektiven Durchwurzelungstiefe. Die Punktzahlen der Basisindikatoren werden unter Verwendung unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren zu einem Summenwert zusammengefasst. Anschließend erfolgt die Bewertung von ertragslimitierenden Gefährdungsindikatoren wie der Durchwurzelungstiefe oder der Trockenheitsgefährdung. Nur der Gefährdungsindikator, der die höchste Gefährdung anzeigt, geht in die Berechnung ein. Das finale SQR bewertet die Standorte in einer Skala zwischen 0 und 102 Punkten. Je höher der Wert, desto größer ist das Ertragspotential des Standorts (BGR, 2024a).
Räuml. Abdeckung	Deutschland
Räuml. Auflösung	250 m x 250 m
Zeitl. Abdeckung	Veröffentlicht am 24.10.2013

Eigenschaft	Beschreibung
Zeitl. Auflösung	Stichtag
Datenformat	GeoTIFF und weitere Bildformate.
Datenzugang	Geoportal der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
Verfügbarkeit & Lizenz	Es gelten die Allgemeine Geschäftsbedingungen des BGR (BGR, 2024b) Grundsätzlich erlauben die Allgemeinen Geschäftsbedingungen die Verwendung (BGR, 2024b) und die Nutzung der Datenprodukte. Eine Bereitstellung über eigene Dienste für Dritte, müsste allerdings geprüft und ggf. mit BGR abgestimmt werden.

3.10 Beschaffenheit des Bodens

3.10.1 Allgemeine Beschreibung der Beschaffenheit des Bodens

Tabelle 22: Allgemeine Beschreibung der Beschaffenheit des Bodens

Allgemeine Beschreibung
Bodenschätzungen und Bodenkarten stellen Informationen über die Beschaffenheit des Bodens bereit. Sie bilden eine wichtige Informationsgrundlage für Beurteilung der natürlichen Ertragsfähigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. (LfULG, 2024a).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Die Beschaffenheit und Art des Bodens hat einen wesentlichen Einfluss auf die Ertragspotenziale eines Schläges. Gleichzeitig wirken agronomische Maßnahmen innerhalb des naturgegebenen Rahmens auf die Gefügeeigenschaften der Böden ein (MUNZERT & FRAHM, 2006).
Ertragsprognose: Indikator für die Bewertung der Eignung von Böden für die landwirtschaftliche Nutzung und zur Abschätzung des Ertragspotenzial. Kann als Parameter für die Bewertung von Investitionsentscheidung in der Landwirtschaft genutzt werden.

3.10.2 Datenprodukt - Bodenschätzung des LfULG

Tabelle 23: Datenprodukt - Bodenschätzung des LfULG

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Das Landwirtschafts- und Umweltinformationssystem für Geodaten (LUIS) des LfULG stellt u. a. das Datenprodukt - Bodenschätzung - bereit. Die Bodenschätzung des LfULG stellt u. a. Informationen zur Bodenart, der Feldkapazität (FK), der Nutzbaren Feldkapazität (nFK), der Grundzahl sowie Klassenzeichen und Wertzahlen. Die Werte beschreiben den Boden dabei bis in 1 Meter tiefe. Parameter: Bodenart: Beschreibt die Eigenschaft eines Bodens in Bezug auf die Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Bodensubstanzen. Feldkapazität (FK): Beschreibt die Wassermenge, die ein durchwurzelbarer Boden gegen die Schwerkraft im Porenraum im Boden speichert. Nutzbare Feldkapazität (nFK): Beschreibt die pflanzenverfügbare Wassermenge, die ein durchwurzelbarer Boden gegen die Schwerkraft im Porenraum im Boden speichert. Grundzahl: Basieren auf dem Ackerschätzungsrahmen und geben an, wie gut die natürliche Ertragsfähigkeit des Boden ist. Eine vollständige Liste der Parameter des Datenprodukt Bodenschätzung kann auf der Seite des LUIS eingesehen werden (BRÄUNIG, 2023).
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Ableitung der einzelnen Informationsprodukte aus der Bodenschätzung, die unter der Regie der Finanzverwaltung und auf Basis des Bodenschätzungsgesetz durchgeführt wird.
Räuml. Abdeckung	Sachsen
Räuml. Auflösung	1:1.000 bis 1:5.000
Zeitl. Abdeckung	Letzte Aktualisierung im Dezember 2022.
Zeitl. Auflösung	Stichtag
Datenformat	■ Shapefile ■ WMS ■ WFS ■ ArcGIS FeatureService
Datenzugang	Portal "Landwirtschaft- und Umweltinformationssystem für Geodaten" (LUIS).

Eigenschaft	Beschreibung
Verfügbarkeit & Lizenz	1. Werden die vom LfULG zur Verfügung gestellten Daten oder aus diesen Daten abgeleitete Daten für Präsentations-, Informations- oder Veröffentlichungszwecke verwendet, so ist bei jeder Präsentation und auf jeder Darstellung die Herkunft der Daten an deutlich sichtbarer Stelle wie folgt anzuzeigen: »Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie«. 2. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Vollzähligkeit, Konsistenz und Genauigkeit der zur Verfügung gestellten Daten im Einzelnen wird vom LfULG keine Gewähr übernommen. 3. Das LfULG ist nicht aus irgendwelchen Schäden ersatzpflichtig, die aufgrund der Verwendung der Daten oder der Unfähigkeit, sie zu verwenden, entstehen. 4. Die Bereitstellung der Daten im Internet begründet keinerlei Anspruch auf weitere oder künftige Datenbereitstellungen dieser oder anderer Art. 5. Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie behält sich vor, die Daten ohne Ankündigung und jeder Zeit zu ändern.

3.10.3 Datenprodukt - Bodenkarte des LfULG

Tabelle 24: Datenprodukt - Bodenkarte des LfULG

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Das Landwirtschafts- und Umweltinformationssystem für Geodaten (LUIS) des LfULG stellt u. a. das Datenprodukt – Bodenkarte BK50 – bereit (LfULG, 2024b). Die Bodenkarte des LfULG stellt in Abgrenzung zur Bodenschätzung, räumlich gröbere, aber dafür im Informationsgehalt umfangreiche Daten zur Verfügung. Dazu gehören verschiedene laboranalytische Parameter, Bodentyp, Substrattyp sowie Parameter zur Zusammensetzung des Bodens.
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Beruht auf der bodenkundlichen Landesaufnahme.

Eigenschaft	Beschreibung
Räuml. Abdeckung	Sachsen
Räuml. Auflösung	1:50.000
Zeitl. Abdeckung	Letzte Aktualisierung im Mai 2020
Zeitl. Auflösung	Stichtag
Datenformat	■ Shapefile ■ WMS ■ WFS ■ ArcGIS FeatureService
Datenzugang	Portal „Landwirtschaft- und Umweltinformationssystem für Geodaten“ (LUIS).
Verfügbarkeit & Lizenz	■ Werden die vom LfULG zur Verfügung gestellten Daten oder aus diesen Daten abgeleitete Daten für Präsentations-, Informations- oder Veröffentlichungszwecke verwendet, so ist bei jeder Präsentation und auf jeder Darstellung die Herkunft der Daten an deutlich sichtbarer Stelle wie folgt anzuzeigen: »Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie«. ■ Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Vollzähligkeit, Konsistenz und Genauigkeit der zur Verfügung gestellten Daten im Einzelnen wird vom LfULG keine Gewähr übernommen. ■ Das LfULG ist nicht aus irgendwelchen Schäden ersatzpflichtig, die aufgrund der Verwendung der Daten oder der Unfähigkeit, sie zu verwenden, entstehen. ■ Die Bereitstellung der Daten im Internet begründet keinerlei Anspruch auf weitere oder künftige Datenbereitstellungen dieser oder anderer Art. ■ Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie behält sich vor, die Daten ohne Ankündigung und jeder Zeit zu ändern.

3.11 Erosionsgefahr durch Wind oder Wasser

3.11.1 Allgemeine Beschreibung der Erosionsgefahr durch Wind oder Wasser

Tabelle 25: Allgemeine Beschreibung der Erosionsgefahr durch Wind oder Wasser

Allgemeine Beschreibung
Erosionsgefährdungskarten zeigen in welchem Maß die Böden bei Starkregen von Abschwemmung betroffen oder wie empfindlich Böden gegen über Winderosion sind
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Aus landwirtschaftlicher Sicht muss die langfristige Verringerung der Bodenfruchtbarkeit durch einen regelmäßigen Bodenabtrag, verhindert werden. Neben Maßnahmen im Bereich der Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit oder der Bodenbearbeitung, kann auch durch die Auswahl der Fruchtfolge, der Bewirtschaftungsform oder von Maßnahmen wie dem Anlegen von Dämmen oder Ranken, die Bodenerosion bekämpft werden (MUNZERT & FRAHM, 2006).
Melioration / Bodenfruchtbarkeit: Planung von Maßnahmen zu Erhöhung des Humusgehalt auf Flächen mit zu hoher Bodenerosion (MUNZERT & FRAHM, 2006).
Bodenbearbeitung: Reduzierung von Bodenbearbeitung auf Flächen mit zu hoher Bodenerosion (MUNZERT & FRAHM, 2006).

3.11.2 Datenprodukt - Erosionsgefährdungskarten des LfULG

Tabelle 26: Datenprodukt - Erosionsgefährdungskarten vom LfULG

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Das Landwirtschafts- und Umweltinformationssystem für Geodaten (LUIS) des LfULG stellt u. a. das Produkt „Erosionsgefährdungskarten“ bereit. Die Erosionsgefährdungskarten für Wasser zeigen, in welchem Maß die Böden bei Starkregen von Abschwemmungen betroffen sein können. Dafür werden verschiedene Wirkungsfaktoren für die Beurteilung der Bodenerosion, z. B. erosionsgefährdete Steillagen, erosionsgefährdete Abflussbahnen, bereitgestellt (LfULG, 2024c). Die Erosionsgefährdungskarten für Wind, gibt Auskunft über die Empfindlichkeit der Bodenart gegenüber Winderosion unter der Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit (LfULG, 2024c).
Bereitstellung	Direkt nutzbar

Eigenschaft	Beschreibung
Berechnungsmethode	Ableitung aus verschiedenen Datenprodukten des LfULG.
Räuml. Abdeckung	Sachsen
Räuml. Auflösung	Erorsionsgefährdungskarte für Wind: 1 km x 1 km Raster Erorsionsgefährdungskarte für Wasser: 5 m x 5 m Raster
Zeitl. Abdeckung	Eingangsdaten stammen aus verschiedenen Zeiträumen von 1981 bis 2020.
Zeitl. Auflösung	Stichtag
Datenformat	■ Shapefile ■ WMS ■ WFS ■ ArcGIS FeatureService
Datenzugang	Portal „Landwirtschaft- und Umweltinformationssystem für Geodaten“ (LUIS).
Verfügbarkeit & Lizenz	1. Werden die vom LfULG zur Verfügung gestellten Daten oder aus diesen Daten abgeleitete Daten für Präsentations-, Informations- oder Veröffentlichungszwecke verwendet, so ist bei jeder Präsentation und auf jeder Darstellung die Herkunft der Daten an deutlich sichtbarer Stelle wie folgt anzuzeigen: »Darstellung auf der Grundlage von Daten und mit Erlaubnis des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie«. 2. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Vollzähligkeit, Konsistenz und Genauigkeit der zur Verfügung gestellten Daten im Einzelnen wird vom LfULG keine Gewähr übernommen. 3. Das LfULG ist nicht aus irgendwelchen Schäden ersatzpflichtig, die aufgrund der Verwendung der Daten oder der Unfähigkeit, sie zu verwenden, entstehen. 4. Die Bereitstellung der Daten im Internet begründet keinerlei Anspruch auf weitere oder künftige Datenbereitstellungen dieser oder anderer Art. 5. Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie behält sich vor, die Daten ohne Ankündigung und jeder Zeit zu ändern.

3.12 Bodenfeuchte

3.12.1 Allgemeine Beschreibung der Bodenfeuchte

Tabelle 27: Allgemeine Beschreibung der Bodenfeuchte

Allgemeine Beschreibung
Informationsprodukte zur Bodenfeuchte, geben Auskunft zum Zustand der Bodenfeuchte im Boden, zum pflanzenverfügbaren Wasser oder ob der Boden sich aktuell in einem Dürrezustand befindet.
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Langjährige Zeitreihen zur nutzbaren Feldkapazität, können als Eingangsinformation für die Planung von Maßnahmen zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit bzw. des Wasserhaltevermögens eingesetzt werden.
Aussaat: Für einzelne Kulturarten ist die Bodenfeuchte ein relevanter Indikator für die Aussaat, da Sie ein Einfluss auf die Keimung und die Nährstoffaufnahme hat (KHAEIM et al., 2022).
Bewässerung: Bodenfeuchteindikatoren können als Eingangsgröße für verschiedene Modelle zur Planung von Bewässerungsmaßnahmen eingesetzt werden (ZINKERNAGEL et al., 2020).
N-Düngung: Trockenheit bzw. eine niedrige Bodenfeuchte, hat eine negative Auswirkung auf die N-Aufnahme, da Wasser für die Auflösung des mineralischen Düngers fehlt und dieser damit nicht durch die Pflanzen aufgenommen werden. Eine Berücksichtigung der Bodenfeuchte bei der Planung der N-Gabe, kann damit die Effektivität der N-Gabe erhöhen und gleichzeitig N-Dünger sparen (MUNZERT & FRAHM, 2006).

3.12.2 Datenprodukt - UFZ-Dürremonitor

Tabelle 28: Datenprodukt - UFZ-Dürremonitor

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Der UFZ-Dürremonitor liefert täglich flächendeckende Informationen zum Bodenfeuchtezustand in Deutschland. U. a. stellt er Karten mit dem tagesaktuellen Dürrezustand des Gesamtbodens und des Oberbodens, der schneller auf kurzfristige Niederschlagsereignisse reagiert, sowie das pflanzenverfügbare Wasser im Boden bereit. Indikatoren: Dürre im Gesamtboden bis ca. 1,8 m Tiefe über die letzten 30 Tage. Angabe der Werte in Dürremagnituden, welche die Stärke der Dürre beschreibt. Die Zahl steigt mit zunehmender Dürredauer und zunehmender negativer Abweichung vom 20-Perzentil des Bodenfeuchteindex SMI. Dürre im Oberboden bis 25 cm über die letzten 30 Tage. Angabe der Werte in Dürremagnituden, welche die Stärke der Dürre beschreibt. Die Zahl steigt mit zunehmender Dürredauer und zunehmender negativer Abweichung vom 20-Perzentil des Bodenfeuchteindex SMI. Pflanzenverfügbares Wasser bis 25 cm bzw. nutzbare Feldkapazität (nFK), tagesaktuell. Die nutzbare Feldkapazität beschreibt den Wassergehalt des Bodens zwischen dem Welkepunkt und der Feldkapazität in Prozent. Da der Boden mehr Wasser aufnehmen kann als die Feldkapazität angibt, liegt der Wertebereich zwischen 0 und (je nach Bodenart) >250 Prozent. Soil moisture Index (SMI). Angabe der Werte von 0 bis 1, wobei Werte zwischen 0 und 0,3 Trockenheit und Dürre signalisieren. Der SMI bildet den Basisindikator für die Berechnung des pflanzenverfügbaren Wasser sowie der Dürremagnituden (MARX, 2024).

	Dürre im Gesamtboden bis ca. 1.8m über die letzten 30 Tage Dürre im Oberboden bis 25cm über die letzten 30 Tage Pflanzenverfügbares Wasser bis 25cm, tagesaktuell Quelle: Marx, 2024 Abbildung 6: Beispieldarstellung der verschiedenen Datenprodukte des Dürremonitors
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Basiert auf Simulationen mit dem am UFZ entwickelten mesoskaligen hydrologischen Modell mHM (SAMANIEGO et al., 2010; KUMAR et al., 2013; THOBER et al., 2019).
Räuml. Abdeckung	Deutschland
Räuml. Auflösung	4 km x 4 km
Zeitl. Abdeckung	Pflanzenverfügbares Wasser bis 25 cm Tiefe und SMI: ■ Tagesaktuell für die letzten 14 Tage ■ Monatlich für den Zeitraum 1951 bis 2022 Dürremagnituden und -intensität in der Vegetationsperiode (April - Oktober): ■ 1952 bis 2022.
Zeitl. Auflösung	Pflanzenverfügbares Wasser bis 25 cm Tiefe und SMI: ■ letzte 14 Tage: täglich ■ 1951-2022: monatlich Dürremagnituden und -intensität in der Vegetationsperiode (April - Oktober): ■ 1952 bis 2022: jährlich/ gesamte Vegetationsperiode
Datenformat	NetCDF
Datenzugang	Download als Dateien über das Portal „Dürremonitor Deutschland“
Verfügbarkeit & Lizenz	Nicht ersichtlich auf der Webseite.

3.12.3 Datenprodukt - DWD Bodenfeuchteviewer – Bodenfeuchteanalyse

Tabelle 29: Datenprodukt - DWD Bodenfeuchteviewer – Bodenfeuchteanalyse

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Der Bodenfeuchteviewer bietet eine Sammlung von Produkten zur Bodenfeuchte und Wasserhaushaltsgrößen des DWD (DWD, 2024d). Unter anderem bietet der Bodenfeuchteviewer aktuelle berechnete Werte der Bodenfeuchte für die Kulturen Gras, Mais und Winterweizen für unterschiedliche Bodenschichten bis in 2m Tiefe an. Sie wird in % der nutzbaren Feldkapazität angegeben (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2021; (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2021b; DWD CLIMATE DATA CENTER, 2021c).
Bereitstellung	Direkt nutzbar.
Berechnungsmethode	Die Berechnung der Bodenfeuchteparameter beruht auf dem Modell AMBAV 2.0 (DWD, 2024e). Dieses beruht auf einer Reihe verschiedener Messdaten sowie der Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte (BÜK1000N).
Räuml. Abdeckung	Deutschland
Räuml. Auflösung	1 km x 1 km
Zeitl. Abdeckung	Von Januar 1991 bis heute.
Zeitl. Auflösung	Täglich
Datenformat	NetCDF
Datenzugang	Climate Data Center (DWD, 2024b) des DWD. Direkter Zugriff auf die tagesscharfen ASCII-Raster über verzeichnisbasierten HTTP-Zugang.
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Geodaten des DWD dürfen entsprechend der Creative Commons BY.40 - Lizenz (CC BY 4.0) unter Beigabe eines Quellenvermerks weiterverwendet werden (DWD, 2024c).

3.13 Plant Phenology Index (PPI)

3.13.1 Indexbeschreibung PPI

Tabelle 30: Beschreibung des Index Plant Phenology Index (PPI)

Allgemeine Beschreibung
Der Plant Phenology Index (PPI) ist ein Produkttyp aus der Produktgruppe der Raw Vegetation Indices (VIs) der High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity product suite (HR-VPP) des Copernicus Land Monitoring Service. Dort stellt der PPI den Basis-Vegetationsindex dar, aus dem Saisonale Verläufe und Vegetationsphänologische Parameter sehr gut abgeleitet werden können. Besonders gut geeignet ist er für die Ableitung des Beginnes der Saison (PACSKÓ et al., 2024). Vegetationsphänologie beschreibt den zeitlichen Ablauf sich regelmäßig wiederholender biologischer Events wie z. B. das Entfalten der Blätter, die Blüte, Farbe der Blätter, und Blattabwurf. Diese Prozesse können durch äußere Faktoren beeinflusst werden wie z. B. durch Temperatur (TIAN et al., 2021). So ist die Bestimmung und das Monitoring der Phänologie insbesondere in Bezug auf den Klimawandel interessant, da sich die Vegetationsperioden verschieben können und dies wiederum Einfluss auf die Landwirtschaft nimmt (JIN & EKLUNDH, 2014). Der PPI ist ein physikalisch basierter Vegetationsindex, entwickelt aus einer vereinfachten Strahlungstransportgleichung. Er steht weiterhin in linearem Zusammenhang mit dem Green Leaf Area Index (LAI) und weist eine hohe Korrelation zur Brutto-Primärproduktivität auf. So kann er die Dichte der Vegetationsdecke gut wiedergeben (SMETS et al., 2021; JIN & EKLUNDH, 2014).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Der PPI kann eingesetzt werden, um pflanzenphänologische Ereignisse, während der Vegetationsperiode zu bestimmen und zu überwachen. Auch der Vergleich der aktuellen Vegetationsperiode mit historischen Daten ist möglich, um eine Verschiebung der Vegetationsperiode bzw. dem Beginn der Vegetationsperiode zu beobachten. Gleichzeitig wird eine Annäherung an die Vegetationsdichte und Produktivität gewährleistet. All diese Aspekte können durch Pflanzenstress wie z. B. Dürren, beeinflusst werden und es können Zeitpunkte für beispielweise Düngung und Bewässerung angepasst werden (PACSKÓ et al., 2024; GESSNER et al., 2023; SMETS et al., 2021).
Berechnungsmethode
Siehe PPI basierend auf Sentinel-2.
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Allgemeine Beschreibung

Der Einsatz des PPI wird aktuell durch die schlechte Verfügbarkeit historischer Datenreihen begrenzt. Datenreihen für den PPI existieren bisher für den Zeitraum von 2017 bis heute. Für die Anwendung in der mitteleuropäischen Landwirtschaft sind diese Datenreihen in der Regel zu kurz – insbesondere, da diese durch einen regelmäßigen Fruchtwechsel gekennzeichnet ist (GOIHL, 2023). Bisher wird der PPI in nördlicheren schneebedeckten Regionen oder ariden Gebieten mit geringer Vegetationsbedeckung eingesetzt (SMETS et al., 2021).

3.13.2 Datenprodukt - PPI basierend auf Sentinel-2

Tabelle 31: Datenprodukt - Berechnung des PPI basierend auf Sentinel-2

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Daneben werden einzelne Datenprodukte, wie der PPI direkt vorprozessiert und über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) bereitgestellt (SENTINEL HUB, 2024a). Bereitgestellt als Teil der High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity Product Suite (HR-VPP).
Bereitstellung	Direkt nutzbar

Eigenschaft	Beschreibung
Berechnungsmethode	Berechnungsmethode nach JIN & EKLUNDH (2014): $PPI = -K \times \ln\left(\frac{MDVI - DVI}{MDVI - DVI_{soil}}\right)$ <i>K</i> Ein gain factor, der als eine Funktion von der Vegetationsstruktur, diffusem Anteil der Sonnenstrahlung und Einfallswinkel der Sonne gebildet wird. <i>MDVI</i> Standortspezifischer maximaler Difference Vegetation Index (DVI) für das Blätterdach, der auf verschiedene Weise geschätzt werden kann. U. a. aus langjährigen Messungen einer nicht dichten Vegetation, aus Modellsimulationen der Kronenreflexion mit einem LAI von mehr als 8 m²*m⁻², aus der theoretischen Albedo oder Absorption der Einzelstreuung von Blättern oder durch Schätzung aus gemessenen roten und NIR-Reflexionen für einen Standort mit bekanntem LAI und Hintergrundreflexion. <i>DVI_{soil}</i> DVI des Bodens. Wird geschätzt basierend auf dem spektralen Reflexionsgrad des Bodens der öffentlich zugänglichen ASTER-Spektralbibliothek (Meerdink et al., 2019). <i>DVI</i> tatsächlicher DVI-Wert für die Beobachtung. Der DVI wird definiert nach Richardson und Wiegand (1977) durch: $DVI = NIR - RED$ <i>NIR</i> (λ = 700 – 900 nm) spektrale Reflexion im Nahen Infrarot <i>RED</i> (λ = 610 – 680 nm) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum
Räuml. Abdeckung	Europa
Räuml. Auflösung	10 m x 10 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Bereitstellung alle 5,5 Tage. Der PPI wird von Copernicus innerhalb von 12 Stunden, nachdem die Satellitendaten zur Verfügung stehen, in Fast-Echtzeit berechnet und bereitgestellt. Einfluss durch Bewölkung: Copernicus weist darauf hin, dass Wolken-, Schatten- und Wasserpixel nicht maskiert werden und damit die Aussagequalität der Produkten verwässern. Es wird daher empfohlen Masken zur Qualitätssicherung auf die verwendeten Produkte anzuwenden.
Datenformat	 NetCDF  GeoTIFF

Eigenschaft	Beschreibung
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS¹⁰ im Original abgerufen werden.

¹⁰ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.14 Normalized Difference Water Index (NDWI)

3.14.1 Indexbeschreibung NDWI

Tabelle 32: Beschreibung des Index Normalized Difference Water Index (NDWI)

Allgemeine Beschreibung
Der Normalized Difference Water Index (NDWI) wird zur Hervorhebung von offenen Gewässern in einem Satellitenbild verwendet, so dass sich ein Wasserkörper vom Boden und der Vegetation abhebt (EOS DATA ANALYTICS, 2023). Der NDWI wird aus zwei Kanälen abgeleitet, dem NIR- und dem kurzwelligen Infrarotkanal (SWIR); die Absorption der SWIR-Strahlung reagiert auf Abweichungen im Wassergehalt, während die Reflexion der NIR-Strahlung mit dem schwammigen Mesophyll der Vegetationsdecke zusammenhängt (GAO, 1996). NDWI-Werte reichen von -1 bis +1, abhängig von der Vegetation und dem Landbedeckungstyp und dessen Zustand. Negative Werte deuten auf Bereiche mit geringer Vegetationsdichte oder abgestorbener Vegetation hin, während positive Werte auf grüne Vegetation, hohen Pflanzenwassergehalt sowie möglicherweise Wasser und Schnee hinweisen (PATIL et al., 2024).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Bewässerung: Indikator zur Überwachung des Wassergehalts von Pflanzen und zur Erkennung von Wasserstress und trockenheitsbedingten Auswirkung auf die Vegetation (GAO, 1996; GU et al., 2008; PATIL et al., 2024).
Berechnungsmethode
Berechnungsmethode nach Patil et al. (2024): $NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$ NIR (λ = 700 – 900 nm): spektrale Reflexion im nahen Infrarot SWIR (λ = 1000 – 2500 nm): spektrale Reflexion im kurzwelligen Infrarot
Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Allgemeine Beschreibung

Die Untersuchungen von POUSSIN et al. (2021) und PATIL et al. (2024) verdeutlichen die Besonderheiten des NDWI im Vergleich zu anderen Indizes zur Überwachung des Wassergehalts der Vegetation. POUSSIN et al. (2021) heben hervor, dass der NDWI wertvolle Einblicke bietet, betonen jedoch auch, dass für eine umfassende Charakterisierung zusätzliche Faktoren wie Bodenbedeckung und Evapotranspiration berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz dazu zeigen PATIL et al. (2024) dass der NDWI schneller auf Trockenheit reagiert als der NDVI, und dass seine Korrelation mit Bodenart und Bodenbedeckung variabel ist. Diese Studien unterstreichen somit die spezifische Sensitivität des NDWI für Änderungen im Wassergehalt der Vegetation im Vergleich zu anderen Indizes wie dem NDVI.

3.14.2 Datenprodukt - NDWI basierend auf Sentinel 2 – L2A

Tabelle 33: Datenprodukt - Berechnung des NDWI basierend auf Sentinel 2 – L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der NDWI berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar (SENTINEL HUB, 2024a). L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnung nach MARUSIG et al. (2020): $NDWI = \frac{(B08 - B11)}{(B08 + B11)}$ B08 ($\lambda = 832,8$ nm): spektrale Reflexion im nahen Infrarot B11 ($\lambda = 1613,7$ nm): spektrale Reflexion im kurzwelligen Infrarot
Räuml. Abdeckung	Europa und Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die NDWI Berechnung gleichzusetzen ist.

Eigenschaft	Beschreibung
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS¹¹ im Original abgerufen werden.

¹¹ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.14.3 Datenprodukt - NDWI basierend auf Landsat 8

Tabelle 34: Datenprodukt - Berechnung des NDWI basierend auf Landsat 8

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Landsat-Satelliten sind Teil der Erdbeobachtungsmission von der NASA. Sie sind mit einem Operational Land Imager (OLI) und einem Thermalen Infrarotsensor (TIRS) ausgestattet. Der OLI erfasst unter anderem Spektralbänder im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot. Der TIRS demgegenüber Spektralbänder im thermalen Infrarot (SENTINEL HUB, 2024c). Die Datenprodukte der Landsat-Mission sind über den EarthExplorer des United States Geological Survey (USGS) verfügbar.
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnungsmethode nach Patil et al. (2024): $NDWI = \frac{B05 - B07}{B05 + B07}$ B05 ($\lambda = 865 \text{ nm}$): spektrale Reflexion im nahen Infrarot B07 ($\lambda = 2200,5 \text{ nm}$): spektrale Reflexion im kurzwelligen Infrarot
Räuml. Abdeckung	Weltweit
Räuml. Auflösung	30 m x 30 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Februar 2013.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 16 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die GNDVI Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	GeoTIFF
Datenzugang	Zugang über den EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) des USGS (USGS, 2024b).
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Nutzung von Landsat-Daten unterliegt keiner Einschränkung. Sie können nach Belieben verwendet oder weiterverteilt werden. Bei der Verwendung soll allerdings die Datenquellen entsprechend den Vorgaben des USGS korrekt zitiert und angegeben werden (USGS, 2024a; (U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS), 2024c).
Anmerkung	Grundsätzlich sollte die Berechnung dieses Indizes auch mit Sentinel 2 in höherer Auflösung möglich sein.

3.15 Normalized Difference Drought Index (NDDI)

3.15.1 Indexbeschreibung NDDI

Tabelle 35: Beschreibung des Index Normalized Difference Drought Index (NDDI)

Allgemeine Beschreibung
Der Normalized Difference Drought Index (NDDI) beruht auf einer Kombination der Indizes Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) und Normalized Difference Water Index (NDWI). Er kann insbesondere für die Überwachung von Dürren eingesetzt werden. Der NDDI wird im Wertebereich zwischen -1 und +1 angegeben. Die Klassifizierung der NDDI-Werte ist wie folgt: Werte unter -1.0 deuten auf Wasserflächen hin, -1 bis 0.2 auf keine Dürre, 0.2 bis 0.3 auf milde Dürre, 0.3 bis 0.4 auf moderate Dürre, 0.4 bis 0.5 auf schwere Dürre, 0.5 bis 1.0 auf extreme Dürre und Werte über 1.0 sind unklassifiziert (PATIL et al., 2024).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Bewässerung: Detektion von Trockenstress und damit Indikation für den Einsatz von Bewässerung (PATIL et al., 2024).
Berechnungsmethode
Berechnungsmethode nach PATIL et al. (2024): $NDDI = \frac{(NDVI - NDWI)}{(NDVI + NDWI)}$ NDVI: Normalized Difference Vegetation Index NDWI: Normalized Difference Water Index

3.15.2 Datenprodukt - NDDI basierend auf Sentinel 2 – L2A

Tabelle 36: Datenprodukt - Berechnung des NDDI basierend auf Sentinel 2 – L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Die Spektralbänder reichen vom sichtbaren Licht bis zum kurzwelligen Infrarot. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der NDDI Index berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar (SENTINEL HUB, 2024a). L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten, die aus Sentinel-2-Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnungsmethode nach SENTINEL HUB (2024b): $NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$ Berechnungsmethode nach MARUSIG et al. (2020) : $NDWI = \frac{(B08 - B11)}{(B08 + B11)}$ $NDDI = \frac{(NDVI - NDWI)}{(NDVI + NDWI)}$ B04 ($\lambda = 665,6$ nm): spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum B8 ($\lambda = 832,8$ nm): spektrale Reflexion im nahen Infrarot B11 ($\lambda = 1613,7$ nm): spektrale Reflexion im kurzwelligen Infrarot
Räuml. Abdeckung	Europa
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Oktober 2016.
Zeitl. Auflösung	Bereitstellung aller 5 Tage. Der NDVI wird von Copernicus innerhalb von 12 Stunden, nachdem die Satellitendaten zur Verfügung stehen, in Fast-Echtzeit berechnet und bereitgestellt. Einfluss durch Bewölkung: Copernicus weist darauf hin, dass Wolken-, Schatten- und Wasserpixel nicht maskiert werden und damit die Aussagequalität der Produkten reduzieren. Es wird daher empfohlen Masken zur Qualitätssicherung auf die verwendeten Produkte anzuwenden.

Eigenschaft	Beschreibung
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: ■ Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. ■ Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. ■ Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS¹² im Original abgerufen werden.

¹² [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.15.3 Datenprodukt - NDDI basierend auf Landsat 8

Tabelle 37: Datenprodukt - Berechnung des NDDI basierend auf Landsat 8

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Landsat-Satelliten sind Teil der Erdbeobachtungsmission von der NASA. Sie sind mit einem Operational Land Imager (OLI) und einem Thermalen Infrarotsensor (TIRS) ausgestattet. Der OLI erfasst unter anderem Spektralbänder im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot. Der TIRS demgegenüber Spektralbänder im thermalen Infrarot (SENTINEL HUB, 2024c). Die Datenprodukte der Landsat-Mission sind über den EarthExplorer des United States Geological Survey (USGS) verfügbar.
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Mehrstufiges Berechnungsverfahren nach PATIL et al. (2024): $NDVI = \frac{(B05 - B04)}{(B05 + B04)}$ $NDWI = \frac{(B05 - B07)}{(B05 + B07)}$ $NDDI = \frac{(NDVI - NDWI)}{(NDVI + NDWI)}$ <i>B05 ($\lambda = 865 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>B04 ($\lambda = 654 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>B07 ($\lambda = 2200,5 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im kurzwelligen Infrarot</i>
Räuml. Abdeckung	Weltweit
Räuml. Auflösung	30 m x 30 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Februar 2013.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 16 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die NDDI Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	GeoTIFF
Datenzugang	Zugang über den EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) des USGS (USGS, 2024b).
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Nutzung von Landsat-Daten unterliegt keiner Einschränkung. Sie können nach Belieben verwendet oder weiterverteilt werden. Bei der Verwendung soll allerdings die Datenquellen entsprechend den Vorgaben des USGS korrekt zitiert und angegeben werden (USGS, 2024a; USGS, 2024c).
Anmerkung	Grundsätzlich sollte die Berechnung dieses Indizes auch mit Sentinel 2 in höherer Auflösung möglich sein.

3.16 Vegetation Health Index (VHI)

3.16.1 Indexbeschreibung VHI

Tabelle 38: Beschreibung des Index Vegetation Health Index (VHI)

Allgemeine Beschreibung
Der Vegetation Health Index (VHI) stellt den Vegetationszustand im Vergleich zu langfristigen Veränderungen dar. So umgeht dieser Index Probleme andere Indizes, die lediglich Zustände eines Momentes widerspiegeln oder auch in ihrer Empfindlichkeit gegenüber Vegetationsdichte und Bodenreflexion eingeschränkt sind. Der VHI ist ein gewichteter Durchschnitt aus zwei Teilindizes: dem Vegetation Condition Index (VCI) und dem Temperature Condition Index (TCI) nach KOGAN (1995). Er ist dabei eine Erweiterung des NDVI und bietet einen robusteren Vergleich saisonaler Dürrezustände als der NDVI. Er wurde entwickelt, um die wetterbedingte Komponente des NDVI von ökologischen Faktoren zu trennen (WEST et al., 2019; SHOLIAH et al., 2016). Der TCI nutzt Informationen des thermalen Infrarot-Bereiches (TIR). Indizes, die Informationen des TIR nutzen, haben eine höhere Sensitivität gegenüber des Wasserstatus im Boden und sind gut geeignet für das Monitoren von Pflanzenstress und Dürreereignissen (WEST et al., 2019; KOGAN, 1997). SHOLIAH et al. (2016) teilen die Werte des VHI in extreme Dürre ($VHI < 10$), ausgeprägte Dürre ($VHI = 10-20$), moderate Dürre ($VHI = 20-30$), leichte Dürre ($VHI = 30-40$) und keine Dürre ($VHI > 40$) ein.
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Bewässerung: Der VHI wird eingesetzt, um Dürren zu erkennen und zu beobachten (FAOUR et al., 2015). Auch kann er genutzt werden, um die Dauer und Intensität von Trockenereignissen sowie die davon betroffene Fläche, die Auswirkungen auf die Pflanze abzuschätzen (ROJAS et al., 2011).
Berechnungsmethode

Allgemeine Beschreibung

Der VHI ist ein gewichteter Durchschnitt aus dem VCI und dem TCI. Für die Berechnung des VCI ist außerdem die Berechnung des NDVI nötig. Die hier angegebenen Formeln entsprechen den Berechnungen nach WEST et al. (2019).

In einem ersten Schritt werden die Teilindizes (WEST et al., 2019; SHOLIAH et al., 2016; ROJAS et al., 2011; ZENG et al., 2023) für jedes Pixel über einen gegebenen Messzeitraum innerhalb eines Jahres berechnet:

$$VCI = \frac{((NDVI - NDVI_{min}) \times 100)}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$$

NDVI eines Pixels als geglätteter Mittelwert über den Messzeitraum (wöchentlich/monatlich), stehen jeweils für die absoluten Min- und Max-Werte aller Pixel und gegebenen Messzeiträume.

$$TCI = \frac{((BT_{max} - BT) \times 100)}{(BT_{max} - BT_{min})}$$

BT steht für Brightness Temperature die mittels thermalen Sensors gemessen wird und ebenfalls ein geglätteter wöchentlich/monatlicher Mittelwert ist.

BTmin oder BTmax stehen jeweils für die Min- und Max-Werte der Pixel.

In einem zweiten Schritt wird dann der VHI berechnet:

$$VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI$$

Der VHI ist zu dem VCI und dem TCI über die Wichtung α (auch bezeichnet als w) verbunden. In einigen Studien werden dem VCI und dem TCI auch verschiedene Wichtungen zugeschrieben.

Wenn Zustände zu Feuchtigkeit und Temperatur während des Erntezyklus jedoch nicht bekannt sind, kann die Wichtung gleichgesetzt werden (ROJAS et al., 2011). In diesem Fall kann eine Wichtung von $\alpha = 0.5$ angenommen werden (SHOLIAH et al., 2016; ROJAS et al., 2011)

3.16.2 Datenprodukt - VHI basierend auf Landsat 8

Tabelle 39: Datenprodukt - Berechnung des Vegetation Health Index (VHI) basierend auf Landsat 8

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Landsat-Satelliten sind Teil der Erdbeobachtungsmission von der NASA. Sie sind mit einem Operational Land Imager (OLI) und einem Thermalen Infrarotsensor (TIRS) ausgestattet. Der OLI erfasst unter anderem Spektralbänder im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot. Der TIRS demgegenüber Spektralbänder im thermalen Infrarot (SENTINEL HUB, 2024c) . Die Datenprodukte der Landsat-Mission sind über den EarthExplorer des United States Geological Survey (USGS) verfügbar.
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Die Berechnung des VHI beruht auf einem mehrstufigen Berechnungsverfahren nach FAOUR et al. (2015). Als Eingangsgrößen werden der NDVI und die Brightness Temperature (BT) bzw. die Land Surface Temperature (LST) benötigt: $NDVI = \frac{B05 - B04}{B05 + B04}$ Die BT wird in 3 Teilschritten berechnet: 1. Umwandlung der Digital Number in die Brightness Temperature 2. Berechnung der LST 3. Umwandlung von Kelvin in Grad Celsius Aufsetzend auf der BT und dem NDVI werden die Teilindizes berechnet: $VCI = \frac{(NDVI - NDVI_{min}) \times 100}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$ $TCI = \frac{100 \times (BT_{max} - BT)}{(BT_{max} - BT_{min})}$ In einem letzten Schritt wird dann der VHI berechnet: $VHI = \alpha \times VCI + (1 - \alpha) \times TCI$ <i>Der VHI ist zu dem VCI und dem TCI über die Wichtung α (auch bezeichnet als w) verbunden. In einigen Studien werden dem VCI und dem TCI auch verschiedene Wichtungen zugeschrieben. Wenn Zustände zu Feuchtigkeit und Temperatur während des Erntezyklus jedoch nicht bekannt sind, kann die Wichtung gleichgesetzt werden (Rojas et al., 2011). In diesem Fall kann eine Wichtung von $\alpha = 0.5$ angenommen werden (SHOLIAH et al., 2016; ROJAS et al., 2011)</i>

Eigenschaft	Beschreibung
Räuml. Abdeckung	Weltweit
Räuml. Auflösung	30 m x 30 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Februar 2013.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 16 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die VHI-Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	GeoTIFF
Datenzugang	Zugang über den EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) des USGS (USGS, 2024b).
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Nutzung von Landsat-Daten unterliegt keiner Einschränkung. Sie können nach Belieben verwendet oder weiterverteilt werden. Bei der Verwendung soll allerdings die Datenquellen entsprechend den Vorgaben des USGS korrekt zitiert und angegeben werden (USGS, 2024a; USGS, 2024c).
Anmerkung	Grundsätzlich sollte die Berechnung dieses Indizes auch mit Sentinel 2 in höherer Auflösung möglich sein.

3.17 Crop Water Stress Index (CWSI)

3.17.1 Indexbeschreibung CWSI

Tabelle 40: Beschreibung des Index Crop Water Stress Index (CWSI)

Allgemeine Beschreibung
Der CWSI ist ein in der Wissenschaft etablierter und häufig genutzter Index, um auf den Wasserstatus von Pflanzen zu schließen (ARAÚJO-PAREDES et al., 2022; GAUTAM & PAGAY, 2020; KANDYLAKIS et al., 2020). So wird er beispielsweise als Proxy für das Blattwasserpotential (Ψ_{leaf}), Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) oder die stomatäre Leitfähigkeit (gs) genutzt (GAUTAM & PAGAY, 2020). Der Index beruht auf einem Verhältnis der tatsächlichen Blatttemperatur der Pflanze zu einer virtuellen Minimaltemperatur oder feuchten Temperatur (T_{wet}) und einer virtuellen Maximaltemperatur oder trockenen Temperatur (T_{dry}) der Blätter. Die T_{dry} repräsentiert die theoretische Temperatur der Blattoberfläche bei ausbleibender Transpiration und geschlossenen Stomata. Die T_{wet} stellt die theoretische Temperatur der Blattoberfläche dar, wenn die Stomata voll geöffnet sind und transpirieren, die Pflanze also gut mit Wasser versorgt ist (KATIMBO et al., 2022; GAUTAM & PAGAY, 2020; KANDYLAKIS et al., 2020; AGAM et al., 2013). Durch die Normalisierung der Werte bewegt sich der Wert des Indexes zwischen 0 (kein Trockenstress) und 1 (maximaler Trockenstress) (ARAÚJO-PAREDES et al., 2022; GAUTAM & PAGAY, 2020). Für eine gut mit Wasser versorgte Pflanze bewegt sich deren Oberflächentemperatur nahe der T_{wet}. Die Oberflächentemperatur einer trockengestressten Pflanze nähert sich hingegen dem T_{dry}-Wert an (AGAM et al., 2013).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Bewässerung: Der CWSI kann als Trockenstressindikator eingesetzt werden und gibt Auskunft über bereits kleine Wasserdefizite während des Tages (d. h. während die Pflanze transpiriert). So können bereits kleinere Wasserdefizite detektiert werden und daraufhin die Bewässerungsplanung angepasst werden (BALUJA et al., 2012).
Berechnungsmethode

Allgemeine Beschreibung

Berechnung des CWSI nach JACKSON et al. (1981), JONES (1992) und BALUJA et al. (2012):

$$CWSI = \frac{(T_{canopy} - T_{wet})}{(T_{dry} + T_{wet})}$$

T_{canopy} *Oberflächentemperatur der Pflanze in °C.*

T_{wet} *theoretische Temperatur der Blattoberfläche bei geöffneten Stomata in °C.*

T_{dry} *theoretische Temperatur der Blattoberfläche bei geschlossenen Stomata in °C.*

Für die Bestimmung der unteren und oberen Temperaturgrenzen (T_{wet} und T_{dry}) gibt es verschiedene Methoden. Typischerweise werden Referenzflächen ins Feld gelegt oder Berechnungen auf Grundlage von Klimadaten vorgenommen (ALCHANATIS et al., 2010; ZHOU et al., 2021).

Eine alternative Berechnungsmethode ist die Ermittlung des CWSI nach (IDSO, 1981). Für diese müssen allerdings Feldmessungen mit Infrarotthermometer durchgeführt werden.

3.17.2 Datenprodukt - Berechnung des CWSI basierend auf Landsat 8

Tabelle 41: Datenprodukt - Berechnung des Crop Water Stress Index (CWSI) basierend auf Landsat 8

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Landsat-Satelliten sind Teil der Erdbeobachtungsmission von der NASA. Sie sind mit einem Operational Land Imager (OLI) und einem Thermalen Infrarotsensor (TIRS) ausgestattet. Der OLI erfasst unter anderem Spektralbänder im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot. Der TIRS demgegenüber Spektralbänder im thermalen Infrarot (SENTINEL HUB, 2024c). Die Datenprodukte der Landsat-Mission sind über den EarthExplorer des United States Geological Survey (USGS) verfügbar.
Bereitstellung	Berechnung notwendig

Berechnungs- methode	Berechnung des CWSI auf Grundlage von Satellitendaten nach Veysi et al. (2017): $CWSI = \frac{(T_s - T_{cold})}{(T_{hot} + T_{cold})}$ <i>T_s (alternativ auch LST)</i> <i>Blattoberflächentemperatur.</i> <i>T_{cold}: (Cold Pixel)</i> <i>Temperatur eines gut bewässerten Pixels, welches fast ganz durch Vegetation bedeckt ist.</i> <i>T_{hot} (Hot Pixel)</i> <i>Temperatur eines Pixels, dessen Vegetation einem Maximum an Wasserstress ausgesetzt ist.</i> Die Ermittlung des Cold Pixel und des Hot Pixel erfolgt nach spezifischen Ableitungsregeln aus dem NDVI. Um das Cold Pixel zu finden, wird der Grenzwert von NDVI > 0.5 auf die Bilder angewendet, um Pixel zu identifizieren, die voll mit Vegetation bedeckt sind. 10% dieser Pixel mit der niedrigsten Temperatur werden ausgewählt und so das Cold Pixel identifiziert. Für das Hot Pixel wird der Grenzwert NDVI > 0.2 angewendet, um die Fläche zu identifizieren, die durch Vegetation bedeckt ist. 10% dieser Pixel mit der höchsten Temperatur werden ausgewählt, um den Hot Pixel zu bestimmen.
Räuml. Abdeckung	Weltweit
Räuml. Auflösung	30 m x 30 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Februar 2013.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 16 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die CSWI Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	GeoTIFF
Datenzugang	Zugang über den EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) des USGS (USGS, 2024b).
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Nutzung von Landsat-Daten unterliegt keiner Einschränkung. Sie können nach Belieben verwendet oder weiterverteilt werden. Bei der Verwendung soll allerdings die Datenquellen entsprechend den Vorgaben des USGS korrekt zitiert und angegeben werden (USGS, 2024a; USGS, 2024c)
Anmerkung	Grundsätzlich sollte die Berechnung dieses Index auch mit Sentinel 2 in höherer Auflösung möglich sein.

3.18 Sonnenscheindauer in bestimmtem Zeitraum

3.18.1 Allgemeine Beschreibung der Sonnenscheindauer in bestimmtem Zeitraum

Tabelle 42: Allgemeine Beschreibung der Sonnenscheindauer in bestimmtem Zeitraum

Allgemeine Beschreibung
In der Meteorologie bezeichnet man als Sonnenscheindauer die tatsächliche Dauer der direkten Sonnenstrahlung an einem bestimmten Ort innerhalb eines definierten Zeitraumes (DWD, 2024f)..
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
Ertragsprognose: Die Anzahl der Sonnenstunden hat einen Einfluss auf die Länge der Wachstumsperiode der Pflanze das Wachstum und kann für die Prognose von Erträgen verwendet werden (SONG & JIN, 2020).

3.18.2 Datenprodukt – Sonnenscheindauer von DWD

Tabelle 43: Datenprodukt – Sonnenscheindauer von DWD

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Sonnenscheindauer, aggregiert auf Monate, wird als Rasterprodukt vom (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2018) bereitgestellt. Jede Rasterzelle beschreibt dabei die Monatssumme der Sonnenscheindauer in Stunden für den repräsentierten Raumausschnitt.
Bereitstellung	Direkt nutzbar
Berechnungsmethode	Entsprechend der Spezifikation des (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2018), beruhen die Raster auf Stationsdaten des DWD. Im ersten Schritt werden die relativen Abweichungen vom langjährigen Monatsmittel Referenzperiode für die Stationsdaten bestimmt. Diese werden anschließend mit einem Inverse Distance Weight (IDW) Verfahren in die Fläche interpoliert. Im letzten Schritt werden die interpolierten Abweichungen mit dem entsprechenden Raster der Referenzperiode multipliziert.
Räuml. Abdeckung	Deutschland
Räuml. Auflösung	1 km x 1 km
Zeitl. Abdeckung	01.01.1951 - aktuell
Zeitl. Auflösung	Monatlich
Datenformat	ESRI-ASCII-Grid-Format
Datenzugang	Climate Data Center (DWD, 2024b) des DWD. Direkter Zugriff auf die monatliche ASCII-Raster über verzeichnisbasierten HTTP-Zugang.

Eigenschaft	Beschreibung
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Geodaten des DWD dürfen entsprechend der Creative Commons BY.40 - Lizenz (CC BY 4.0) unter Beigabe eines Quellenvermerks weiterverwendet werden (DWD, 2024c).

3.18.3 Datenprodukt – Sonnenscheindauer von CM SAF (The Satellite Application Facility on Climate Monitoring)

Tabelle 44: Datenprodukt – Sonnenscheindauer von CM SAF (The Satellite Application Facility on Climate Monitoring)

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die tägliche oder monatliche Sonnenscheindauer (SDU) ist die Zeit pro Tag in der die <i>Direct Normal Irradiance at Surface</i> (DNI) den Schwellenwert der World Meteorological Organization (WMO) von 120 W/m ² überschreitet. Die SDU-Daten werden als Tages- und Monatssummen in Stunden angegeben; um die Monatssummen der Sonnenscheindauer in mittlere Tagessummen für den jeweiligen Monat umzuwandeln, muss die Monatssumme durch die Anzahl der Tage im jeweiligen Monat geteilt werden. Die Anzahl der Tage pro Monat wird als Variable in den SDU-Datendateien für die Monatssummen angegeben (EUMETSAT, 2024; EUMETSAT, 2024b).
Bereitstellung	Direkt nutzbar

Eigenschaft	Beschreibung
Berechnungsmethode	Grundlage für die Ermittlung der satellitengestützten SDU sind die SARA-H-3 DNI-Daten und der WMO-Schwellenwert für Sonnenschein, der durch DNI (direct normal irradiance at surface) $\geq 120 \text{ W/m}^2$ definiert ist. Die SDU ergibt sich aus dem Verhältnis der Sonnenscheindauer zu allen Tageslichtdauerwerten multipliziert mit der Tageslänge. Die Tageslänge wird in Abhängigkeit von Datum, Längen- und Breitengrad mit Hilfe eines vereinfachten Strahlungstransfermodells für den klaren Himmel und klimatologischen Wasserdampf- und Aerosolinformationen berechnet. Die sonnigen Slots werden in Abhängigkeit von der Anzahl der umgebenden bewölkten und sonnigen Gitterpunkte gewichtet, was in Abschnitt 3.5.2.2 und in RD 2 näher erläutert wird. Die Anzahl der Tageslichtslots beschreibt die maximale Anzahl von Meteosat-Beobachtungen (Slots) pro Gitterpunkt und pro Tag bei Tageslicht. Tageslicht ist definiert als die Zeit, in der der SEA $2,5^\circ$ und der DNI am Klarsichthimmel 120 W/m^2 übersteigt (EUMETSAT, 2024a; EUMETSAT, 2024b).
Räuml. Abdeckung	Latitude: -65.00° S to 65.00° N Longitude: -65.00° W to 65.00° E
Räuml. Auflösung	$0.05^\circ \times 0.05^\circ$
Zeitl. Abdeckung	1983-01-01 bis heute.
Zeitl. Auflösung	■ Täglich ■ Monatlich
Datenformat	NetCDF
Datenzugang	Bereitstellung über die EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Change Plattform (EUMETSAT, 2024c). Für die Bezug der Datenprodukte ist eine Registrierung bei EUMETSAT notwendig.
Verfügbarkeit & Lizenz	Alle geistigen Eigentumsrechte an den CM SAF-Produkten liegen bei EUMETSAT. Die Nutzung dieser Produkte wird jedem interessierten Nutzer kostenlos gewährt. Wenn Sie diese Produkte verwenden möchten, müssen Sie die Urheberrechte von EUMETSAT anerkennen, indem Sie die Worte „Copyright (Jahr) EUMETSAT“ auf jedem der verwendeten Produkte anbringen. (EUMETSAT, 2024c)

3.19 Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI)

3.19.1 Indexbeschreibung CCCI

Tabelle 45: Beschreibung des Index Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI)

Allgemeine Beschreibung
Der Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) wurde von BARNES et al. (2000) und CLARKE et al. (2001) entwickelt. Er ist ein spektraler Vegetationsindex, der Unterschiede in der Bodenbedeckung bei der Schätzung des Stickstoffgehalts (N) von Pflanzen berücksichtigt. Er berechnet sich aus den Indizes NDVI und NDRE, wobei der NDVI Informationen über den Vegetationsbedeckungsgrad liefert und der NDRE Aufschluss über die Stickstoffkonzentration in den Pflanzen gibt (BARNES et al., 2000; CAMMARANO et al., 2011). Der CCCI wird im Wertebereich zwischen -1 und +1 angegeben. Ein CCCI-Wert von 0 deutet typischerweise auf Stress bei den Pflanzen hin, was mit einem niedrigen Chlorophyllgehalt einhergeht, während ein Wert von 1 auf einen hohen Chlorophyllgehalt und geringen Stress hinweist (BARNES et al., 2000).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
N-Düngung: Kann für die zielgerichtete teilflächenspezifische Applikation der N-Düngung eingesetzt werden. N-Düngung: Eine frühzeitige Schätzung des Stickstoffgehalts im Kronendach im Wachstumsstadium der Stängelstreckung (DC 30), erlaubt eine zielgerichtetere N-Gabe (CAMMARANO et al., 2011). Auch haben RODRIGUEZ et al. (2006) und FITZGERALD et al. (2006) gezeigt, dass der CCCI ein genauer Indikator für den räumlichen N-Status von Weizen ist, der weitgehend unabhängig vom Wasserzustand und von der Bestandsdichte ist.

Allgemeine Beschreibung

Der Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) ist ein spektraler Vegetationsindex, der Unterschiede in der Bodenbedeckung bei der Schätzung des Stickstoffgehalts (N) von Pflanzen berücksichtigt. Die Berechnung des CCCI nach FITZGERALD et al. (2006), beruht auf den Einsatz des NDVI als Ersatz für die Bodenbedeckung und des NDRE als Maß für den Stickstoffgehalt der Pflanzendecke. Sowohl NDVI als auch NDRE messen die Reflexion von Pflanzen im nahen Infrarotbereich (NIR), wobei sie die Reflexionswerte im roten Spektralbereiches (RED) und Red Edge (RE) Spektralbereiches als Referenzpunkte verwenden, um spektrale Signale vom Boden zu minimieren (PALKA et al., 2021).

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

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$$

NIR ($\lambda = 700 - 900 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot

RED ($\lambda = 610 - 680 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum

RE ($\lambda = 690 - 730 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum

Der CCCI reicht von 0 bis 1 und skaliert die NDVI-Datenpunkte zwischen den minimalen und maximalen Grenzwerten des NDRE. Die Indexparameter K_{min} und K_{max} werden durch Anpassung der linearen Beziehung ermittelt, um die NDRE-Daten gegen den NDVI aufzutragen (PALKA et al., 2021).

$$NDRE_{min/max} = NDVI \times K_{min/max}$$

$$CCCI = \frac{NDRE - NDRE_{min}}{NDRE_{max} - NDRE_{min}}$$

Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Da der CCCI von den Indizes NDRE und NDVI abgeleitet ist und der NDVI dazu neigt, sich in dichter Vegetation zu sättigen, könnten die CCCI-Werte durch eine fehlerhafte Zuordnung zu Pflanzenvariablen, wie dem Stickstoffgehalt, beeinträchtigt werden. Zudem wurde in Studien beobachtet, dass der Index die n-Konzentration der Pflanzen vor dem Wachstumsstadium DC30 nicht gut abschätzt. Dies ist vermutlich auf Einflüsse der Bodenreflexion zurückzuführen (CAMMARANO et al., 2011; RODRIGUEZ et al., 2006).

3.19.2 Datenprodukt - CCCI basierend auf Sentinel 2 - L2A

Tabelle 46: Datenprodukt - Berechnung des Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) basierend auf Sentinel 2 - L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der MSAVI berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar. L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnungsformel nach SONOBE et al. (2018): $CCCI = \frac{NDRE}{NDVI} = \frac{\left(\frac{B08 - B05}{B08 + B05}\right)}{\left(\frac{B08 - B04}{B08 + B04}\right)}$ <i>B04 ($\lambda = 665,6 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>B05 ($\lambda = 704,1 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im Red-Edge- Frequenzspektrum</i> <i>B08 ($\lambda = 832,8 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im Nahen Infrarot</i>
Räuml. Abdeckung	Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m In der Literatur werden Ansätze beschrieben, wie man die räumliche Auflösung des NDRE, basierend auf Daten von Sentinel-2, auf 10 m x 10 m steigern kann (BITTENCOURT, 2024). Die Ansätze sind allerdings mit Nachteilen bei der Aussagequalität verknüpft.
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug alle 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die NDRE-Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	 NetCDF  GeoTIFF

Eigenschaft	Beschreibung
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS¹³ im Original abgerufen werden.

¹³ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.20 Enhanced Vegetation Index (EVI)

3.20.1 Indexbeschreibung EVI

Tabelle 47: Beschreibung des Index Enhanced Vegetation Index (EVI)

Allgemeine Beschreibung
Der von (HUETE et al., 1994) vorgeschlagene Enhanced Vegetation Index (EVI) ist ein Indiator für die Schätzung der Biomasse insb. bei höherer Vegetationsdichte (Huete et al., 2002). Der Wertebereich für den EVI liegt zwischen -1 und 1, wobei ein Wert zwischen 0,2 und 0,8 auf eine gesunde Vegetation hinweist (SENTINEL HUB, 2024f).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
N-Düngung: Kann für die zielgerichtete teilflächenspezifische Applikation der N-Düngung eingesetzt werden (GRENZDÖRFFER, 2022).
Berechnungsmethode
Berechnungsmethode nach WARDLOW & EGBERT (2010): $EVI = G \times \frac{NIR - RED}{NIR + (C_1 \times RED) - (C_2 \times BLUE) + L}$ <i>NIR (λ = 700 – 900 nm) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i> <i>RED (λ = 610 – 680 nm) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>BLUE (λ = 450 – 495 nm) spektrale Reflexion im blauen Frequenzspektrum</i> <i>L Anpassung des Hintergrundsignals der Vegetationsdecke (L = 1)</i> <i>G Verstärkungsfaktor (G = 2.5)</i> <i>C₁ und C₂ Koeffizienten des Aerosolwiderstandsterms, Verwendung des blauen Bands zur Korrektur von Aerosoleinflüssen im roten Band (C₁ = 6 und C₂ = 7.5).</i>
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Allgemeine Beschreibung

Der EVI wurde entwickelt, um atmosphärische und Kronenhintergrundeffekte zu reduzieren, die den NDVI häufig kontaminieren (HUETE et al., 1997). Er nutzt die Reflexion im roten, nahinfraroten Licht und im blauen Bereich. Durch die Nutzung des blauen Bereichs eliminiert der EVI atmosphärische Einflüsse. Dadurch reduziert er den Bodeneinfluss und geht nicht so schnell in die Sättigung, was bei dichter oder hoher Biomasse für zuverlässigere Korrelationen mit dem Chlorophyllgehalt sorgt (GRENZDÖRFFER, 2022). Daneben optimiert der EVI das Signal der grünen Vegetation, wobei die Empfindlichkeit bei höherer grüner Biomasse höher ist als bei der herkömmlichen NDVI-Messung (HUETE et al., 2002). GAO et al. (2000) stellten auch fest, dass der NDVI stärker auf Chlorophyllveränderungen reagiert und bei hoher Biomasse in die Sättigung geht, während der EVI stärker auf Veränderungen der Baumkronenstruktur reagiert und seine Empfindlichkeit auch an Orten mit hoher Biomasse beibehält.

Sowohl WARDLOW et al. (2007) als auch GITELSON et al. (2007) beobachteten eine geringere Empfindlichkeit des NDVI gegenüber Vegetationsveränderungen bei Spitzengrün für mehrere Kulturen. Infolgedessen wird der EVI aufgrund dieser verbesserten Indexmerkmale zunehmend für die Klassifizierung von Kulturpflanzen verwendet (SAKAMOTO et al., 2006; BROWN et al., 2007; POTGIETER et al., 2007; GALLFORD et al., 2008).

3.20.2 Datenprodukt - EVI basierend auf Sentinel 2 - L2A

Tabelle 48: Datenprodukt - Berechnung des Enhanced Vegetation Index (EVI) basierend auf Sentinel 2 - L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der EVI berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar (Sentinel Hub, 2024a). L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (Copernicus, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig

Eigenschaft	Beschreibung
Berechnungsmethode	Berechnungsformel nach SONOBE et al. (2018): $EVI = 2.5 \times \frac{B08 - B04}{B08 + (6 \times B04) - (7.5 \times B02) + 1}$ <i>B02 ($\lambda = 490 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im blauen Frequenzspektrum</i> <i>B04 ($\lambda = 665.6 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>B08 ($\lambda = 842 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i>
Räuml. Abdeckung	Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug alle 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die NDRE-Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	■ NetCDF ■ GeoTIFF
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.

Eigenschaft	Beschreibung
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS¹⁴ im Original abgerufen werden.

3.20.3 Datenprodukt - Berechnung des EVI basierend auf Landsat 8

Tabelle 49: Datenprodukt - Berechnung des Enhanced Vegetation Index (EVI) basierend auf Landsat 8

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Die Landsat-Satelliten sind Teil der Erdbeobachtungsmission von der NASA. Sie sind mit einem Operational Land Imager (OLI) und einem Thermalen Infrarotsensor (TIRS) ausgestattet. Der OLI erfasst unter anderem Spektralbänder im nahen Infrarot und im kurzwelligen Infrarot. Der TIRS demgegenüber Spektralbänder im thermalen Infrarot (SENTINEL HUB, 2024c). Die Datenprodukte der Landsat-Mission sind über den EarthExplorer des United States Geological Survey (USGS) verfügbar.

¹⁴ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\).](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnungsformel nach USGS (2024d): $EVI = 2.5 \times \frac{B05 - B04}{B05 + (6 \times B04) - (7.5 \times B02) + 1}$ <i>B02 ($\lambda = 450 - 510 \text{ nm}$): spektrale Reflexion im blauen Frequenzspektrum</i> <i>B04 ($\lambda = 654 \text{ nm}$): spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>B05 ($\lambda = 865 \text{ nm}$): spektrale Reflexion im Nahen Infrarot</i>
Räuml. Abdeckung	Weltweit
Räuml. Auflösung	30 m x 30 m
Zeitl. Abdeckung	Seit Februar 2013.
Zeitl. Auflösung	Überflug aller 16 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die SAVI Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	GeoTIFF
Datenzugang	Zugang über den EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/) des USGS (USGS, 2024b).
Verfügbarkeit & Lizenz	Die Nutzung von Landsat-Daten unterliegt keiner Einschränkung. Sie können nach Belieben verwendet oder weiterverteilt werden. Bei der Verwendung soll allerdings die Datenquellen entsprechend den Vorgaben des USGS korrekt zitiert und angegeben werden (USGS, 2024a; USGS, 2024c).
Anmerkung	Grundsätzlich sollte die Berechnung dieses Indizes auch mit Sentinel 2 in höherer Auflösung möglich sein.

3.21 Sentinel-2 Red Edge Position (S2REP)

3.21.1 Indexbeschreibung S2REP

Tabelle 50: Beschreibung des Index Sentinel-2 Red Edge Position (S2REP)

Allgemeine Beschreibung
Der Sentinel-2 Red-Edge Position Index (S2REP) ist ein Indikator für den Stickstoff- und Chlorophyllgehalt der Pflanzen. Daneben kann er für die Beurteilung des Wachstumsstatus der Pflanze eingesetzt werden. Ein höher S2REP-Wert verweist in der Regel auf einen höheren Chlorophyllgehalt (GUYOT & BARET, 1988).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
S2REP kann für die Quantifizierung des Chlorophyllgehalt verwendet werden. Darüber hinaus ist dieser Index sehr nützlich, um die Blattstreuung im Inneren zu unterscheiden und eine starke Chlorophyllabsorption anzuzeigen. Der Anstieg des S2REP ist ein Hinweis auf zunehmenden Chlorophyllgehalt und somit auch auf den Beginn der Wachstumsperiode, aber auch den grundlegenden Nährstoffgehalt und somit Gesundheitszustand der Pflanze (IMRAN et al., 2020).
Berechnungsmethode
S2REP basiert auf der von GUYOT & BARET (1988) vorgestellten linearen Interpolation, bei der die Reflexion hoch aufgelöst im Bereich des Red Edge geschätzt wird und somit der genaue Wendepunkt oder auch Red Edge Position (REP) innerhalb dieses spektralen Versatzes wiederum durch Interpolation der Bänder 5 und 6, die sich im Red Edge Bereich befinden, ermittelt wird (FRAMPTON et al., 2013). $S2REP = 705 + 35 \times \frac{\left(\frac{NIR_{783} + RED_{665}}{2} - RE_{705}\right)}{RE_{740} - RE_{705}}$ $RED_{665} (\lambda = 665 \text{ nm})$ <i>Spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> $RE_{705} (\lambda = 705 \text{ nm})$ <i>Spektrale Reflexion im Red-Edge Frequenzspektrum</i> $RE_{740} (\lambda = 740 \text{ nm})$ <i>Spektrale Reflexion im Red-Edge Frequenzspektrum</i> $NIR_{783} (\lambda = 783 \text{ nm})$ <i>Spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i>
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren
Während die meisten Vegetationsindizes nur schwach mit der Blattchlorophyllkonzentration (LCC) korrelieren, weist der S2REP-Index eine deutlich stärkere Korrelation auf. Dieser Vergleich stammt aus der Studie von FRAMPTON et al. (2013) und hebt die überlegene Fähigkeit des S2REP-Index zur genauen Bestimmung der LCC im Vergleich zu anderen etablierten Indizes hervor.

3.21.2 Datenprodukt - Berechnung des S2REP basierend auf Sentinel 2 - L2A

Tabelle 51: Datenprodukt - Berechnung des Sentinel-2 Red Edge Position (S2REP) basierend auf Sentinel2 - L2A

Eigenschaft	Beschreibung
Beschreibung	Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u. a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Basierend auf diesen Spektralkanälen kann der MSAVI berechnet werden. Alle von Sentinel-2 erfassten Daten sind über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) verfügbar (Sentinel Hub, 2024a). L2A beschreibt eine Kategorie von Datenprodukten die aus Sentinel-2 Daten generiert werden. Auf Datenprodukte dieser Kategorie, wurden bereits verschiedene Nachprozessierungs und Korrekturverfahren angewendet (COPERNICUS, 2024).
Bereitstellung	Berechnung notwendig
Berechnungsmethode	Berechnungsformel nach FRAMPTON et al. (2013): $S2REP = 705 + 35 \times \frac{\left(\frac{B07 + B04}{2} - B05\right)}{B06 - B05}$ <i>B04 (λ = 665,6 nm) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i> <i>B05 (λ = 704,1nm) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i> <i>B06 (λ = 740 nm) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i> <i>B07 (λ = 783 nm) spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum</i>
Räuml. Abdeckung	Welt
Räuml. Auflösung	20 m x 20 m
Zeitl. Abdeckung	Europa seit Oktober 2016. Weltweit seit Januar 2017.
Zeitl. Auflösung	Überflug alle 5 Tage. Bewölkung hat allerdings einen negativen Einfluss auf den Index, wodurch eine Überfliegung nicht mit einem nutzbaren Eingangssignal für die NDRE-Berechnung gleichzusetzen ist.
Datenformat	 NetCDF  GeoTIFF

Eigenschaft	Beschreibung
Datenzugang	Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) Daneben können Teilausschnitte (räuml. / zeitl.) vereinfacht via Map Viewer ausgewählt und heruntergeladen werden. Die Anwendung WEkEO (WEkEO, 2024) ist daneben ein weiteres Angebot der Europäischen Kommission, die den programmatischen Zugriff auf die Daten über einen Python-Client erlaubt.
Verfügbarkeit & Lizenz	Freier, voller und offener Zugang zu den Produkten und Services des CLMS unter Berücksichtigung der folgenden Bedingungen: 1. Bei der Verteilung oder Weitergabe von Produkten und Diensten des Copernicus Land Monitoring Service (Daten, Softwareskripte, Webdienste, Benutzer- und Methodendokumentation und ähnliches) an die Öffentlichkeit müssen die Nutzer die Öffentlichkeit über die Quelle dieser Produkte und Dienste informieren und bestätigen, dass die Produkte und Dienste des Copernicus Land Monitoring Service „mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union“ erstellt wurden. 2. Wenn die Produkte und Dienstleistungen des Copernicus Land Monitoring Service vom Nutzer angepasst oder verändert wurden, muss der Nutzer dies deutlich angeben. 3. Die Nutzer dürfen in der Öffentlichkeit nicht den Eindruck erwecken, dass die Aktivitäten des Nutzers von der Europäischen Union offiziell gebilligt werden. Die Lizenz kann über den CLMS¹⁵ im Original abgerufen werden.

¹⁵ [Link zur Erklärung der CLMS-Datenpolitik \(https://land.copernicus.eu/en/data-policy\)](https://land.copernicus.eu/en/data-policy)

3.22 Excess Green Index (ExG)

3.22.1 Indexbeschreibung ExG

Tabelle 52: Beschreibung des Index Excess Green Index (ExG)

Allgemeine Beschreibung
Der Excess Green Index (ExG) ist ein Kontrastindex und gehört zu den am häufigsten verwendeten Indizes im visuellen Spektrum (LARRINAGA & BROTONS, 2019). Er wurde von WOEBBECKE et al. (1995) entwickelt, um Bilder basierend auf den Farbmerkmalen von Pflanzen zu segmentieren (ZHAO, 2021).
Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis
N-Düngung: Die ExG-Bildfunktion zeigte Potenzial für die Bewertung der Auswirkungen einer variablen N-Gabe auf das Pflanzenwachstum (ZHANG et al., 2020).
Krankheits- und Schädlingsbekämpfung: Der ExG wird in Kombination mit anderen Vegetationsindizes wie dem Excess Red (ExR), dem Excess Green-Red (ExGR), dem Green-Red Vegetation Index (GRVI) sowie Deep-Learning-Ansätzen zur Detektion von Pflanzenkrankheiten in UAV-Bildern eingesetzt (KERKECH et al., 2018).
Darüber hinaus wird ExG häufig eingesetzt, um Pflanzen von unbedecktem Boden oder Stroh zu unterscheiden, da der Index einen deutlichen Kontrast zwischen Pflanzen und Boden erzeugt und nahezu binäre Bilder liefert (GRENZDÖRFFER, 2022).
Berechnungsmethode
Berechnungsmethode nach WOEBBECKE et al. (1995): $ExG = 2 \times g - r - b$ <i>R, G und B stehen für die digitale Anzahl der roten, grünen bzw. blauen Kanäle.</i> $r = \frac{R}{R + G + B}$ $g = \frac{G}{R + G + B}$ $b = \frac{B}{R + G + B}$
Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Allgemeine Beschreibung

Der ExG, wie andere RGB-Indizes auch, weist Schwächen im Falle von Schatten in den Szenen auf. Je nach Wetter und Sonnenstand können Pflanzen, Blätter oder andere Objekte Schatten erzeugen. Dieser führt zu unbrauchbaren Werten, da sich bei herkömmlichen RGB-Kameras die Verhältnisse zwischen den Rot-, Grün- und Blauanteilen des reflektierten Lichts bei besonnten und beschatteten Pflanzenflächen stark unterscheiden (GRENZDÖRFFER, 2022).

Die Schattenproblematik können Besitzer einer Drohne mit einer normalen RGB-Kamera umgehen, indem sie bei möglichst gleichmäßig bedecktem Himmel arbeiten. Dann reduziert sich der Einfluss der Schatten und die abgeleiteten Vegetationsindizes gewinnen an Genauigkeit. Muss bei Sonnenschein geflogen werden, empfiehlt es sich, die Daten vorab deutlich zu vergrößern, z. B. auf eine Rasterweite von $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ bis $5\text{ m} \times 5\text{ m}$. So können die negativen Effekte bei der Berechnung der RGB-Vegetationsindizes verringert werden (GRENZDÖRFFER, 2022).

3.23 Standardized Precipitation Index (SPI)

3.23.1 Indexbeschreibung SPI

Tabelle 53: Beschreibung des Index Standardized Precipitation Index (SPI)

Allgemeine Beschreibung

Der standardisierte Niederschlag-Index (SPI) ist ein robuster Index zur Beschreibung von Dürren. Er wurde vom Colorado-Climate-Center entwickelt, um Dürreereignisse definieren und überwachen zu können (McKEE et al., 1993; GERICS, 2024).

Ein negativer SPI-Wert zeigt einen Zeitraum, der trockener war als normal, ein positiver SPI-Wert zeigt einen Zeitraum, der feuchter war als normal (DWD, 2022b).

Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis

Bewässerung: Die Berücksichtigung unterschiedlich langer Zeitskalen liefert Hinweise auf landwirtschaftlich relevante Dürren (Zeitraum ≤ 6 Monate) oder hydrologisch relevante Dürren (Zeitraum > 6 Monate) (DWD, 2022b).

Berechnungsmethode

Allgemeine Beschreibung

Der SPI dient hierbei der Bewertung und Charakterisierung der Niederschlagsverhältnisse eines Monats, Quartals bzw. Halbjahres in Relation zu den jeweiligen Normalwerten.

Die Verteilungsfunktion der Niederschlagswerte wird hierbei in eine Standard-Normalverteilung (Glockenkurve) transformiert. Für jeden Niederschlagswert kann die in Standardabweichungen angegebene Position in der Verteilungsfunktion angegeben werden, was dem SPI-Wert entspricht. Es wird dann von einer Dürre gesprochen, wenn der Niederschlagswert kleiner als minus eine Standardabweichung ist (DWD, 2022b).

Die Berechnung des SPI ist auch für über mehrere Monate aggregierte Niederschlagssummen möglich, was die Detektion von verschiedenen Dürrearten ermöglicht. Ein negativer SPI-Wert zeigt einen Zeitraum, der trockener war als normal, ein positiver SPI-Wert zeigt einen Zeitraum, der feuchter war als normal (DWD, 2022b).

Dürre-Klassifikation auf SPI-Basis (LOUCKS et al., 2005):

$SPI \geq 2,0$	Extrem nass
SPI 1,5 bis 1,99	Sehr nass
SPI 1,0 bis 1,49	Mäßig feucht
SPI -0,99 bis 0,99	Normalzustand
SPI -1,49 bis -1,0	Mäßig trocken
SPI -1,99 bis -1,5	Schwere Dürre
$SPI \leq -2,00$	Extreme Dürre

Diskussion und Abgrenzung zu anderen Indikatoren

Der SPI liefert in kalten Regionen Ergebnisse, bei denen die potenzielle Evapotranspiration aufgrund der nahezu in Echtzeit verfügbaren Daten nicht zuverlässig geschätzt werden kann. In warmen und trockenen Gebieten hingegen ist der SPI weniger geeignet, während der Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) hier seine Stärken zeigt. Der Global Precipitation Climatology Centre Drought Index (GPCC-DI) kombiniert die Vorteile von SPI und SPEI, indem er sowohl auf Niederschlags- als auch auf Temperaturdaten basiert und erlaubt eine fast globale Abdeckung.

4 Produkt-Nutzen-Paare

In Kapitel 3 wurden Indikatoren und Datenprodukte für den Einsatz in landwirtschaftlichen Anwendungen identifiziert. Diese ergeben für die in Kapitel 2 identifizierten agronomischen Maßnahmen einen konkreten Nutzen.

In diesem Kapitel werden entsprechende Produkt-Nutzen-Paare zunächst überblicksartig definiert und bestimmte Produkt-Nutzen-Paare für eine genauere Charakterisierung ausgewählt (Kapitel 4.1). Basierend auf der getroffenen Auswahl werden dann die dort priorisierten Paarungen methodisch näher charakterisiert. Die methodische Charakterisierung hat dabei zwei Dimensionen:

- Die mathematisch-physikalische Bestimmung des Datenprodukts (i.d.R. ein Index) und
- die Darstellung der Anwendungsmethodik in der landwirtschaftlichen Praxis

Eine detaillierte Beschreibung der Berechnungsmethodik findet sich in 4.2. Die Anwendung des Datenproduktes in der landwirtschaftlichen Praxis ist Gegenstand von Kapitel 4.3

4.1 Übersicht der identifizierten Produkt-Nutzen-Paare

Aufsetzend auf den in Kapitel 3 identifizierten Indikatoren und Datenprodukten gibt „Tabelle 54: Übersicht der Produkt-Nutzen-Paare“ einen Überblick über potenzielle Produkt-Nutzen-Paare aufsetzend auf den in Kapitel 2 entwickelten agronomischen Maßnahmen.

In der Tabelle farblich markiert sind Produkt-Nutzen-Paare, die im Zuge dieser Studie genauer untersucht werden sollten. Die Auswahl bzw. Priorisierung findet anhand folgender Kriterien statt:

- Höhe des erwartbaren Nutzens in der landwirtschaftlichen Anwendung bzw. der praktischen Relevanz
- Reifegrad der Methodik (es sollen nur etablierte Methoden eingesetzt werden, reine Erkenntnisse aus der Forschung ohne breiteren Anwendungsnachweis sind zunächst auszuklammern) und ausreichend konkrete und möglichst eindeutige Quellenlage
- Einschränkung auf solche Datenprodukte, die vom LfULG kostenfrei genutzt und weitergegeben werden dürfen
- Einschränkung auf rein fernerkundliche Datenprodukte, die durch einschlägig bekannte Satellitenmissionen fortlaufend gewonnen werden
- Verfügbarkeit der benötigten Datenprodukte und Datenvorprodukte in der erforderlichen räumlichen Auflösung und der erforderlichen zeitlichen Aktualität

Für künftige Arbeiten und benachbarte Vorhaben ist es grundsätzlich wünschenswert, auch die übrigen Produkt-Nutzen-Paare genauer zu untersuchen. Die beschriebenen Einschränkungen werden lediglich mit Blick auf die eingangs beschriebene Zielstellung dieses Vorhabens getroffen (vgl. Kapitel 1.1).

Tabelle 54: Übersicht der Produkt-Nutzen-Paare

Agronomische Maßnahme	Nutzen	Produkt
Melioration / Bodenfruchtbarkeit	Planung von Maßnahmen zur Verhinderung von Bodenerosion	<u>Erosionsgefahr durch Wind und Wasser</u>
Makro-Nährstoffversorgung	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der Düngung mit Makro-Nährstoffen und Ausweisung von Managementzonen.	<u>NDVI, S2REP</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der Düngung mit Makro-Nährstoffen.	<u>GNDVI</u>
Bodenbearbeitung	Reduzierung von Bodenbearbeitung in erosionsgefährdeten Lagen	<u>Erosionsgefahr durch Wind oder Wasser</u>
	Planung des Einsatzes von Landmaschinen bzgl. Befahrbarkeit.	<u>Bodenfeuchte</u>
Aussaat	Planung des optimalen Aussaatzeitpunktes und Ausweisung von Managementzonen zur Bestimmung der teilflächenspezifischen Saattiefe.	<u>Bodentemperatur</u>
	Planung des optimalen Aussaatzeitpunktes.	<u>Bodenfeuchte</u>
Bewässerung	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>Bodenfeuchte</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>NDVI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>GNDVI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>SAVI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>LAI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>NDWI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>NDDI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>VHI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>CSWI</u>
	Planung und Einsatz von Bewässerung.	<u>SPI</u>

Agronomische Maßnahme	Nutzen	Produkt
N-Düngung	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung (1. Gabe).	<u>NDVI</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung (ab 2. Gabe).	<u>NDRE</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung.	<u>MSAVI2</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung (alle Gaben).	<u>REIP</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung.	<u>Bodenfeuchte</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung.	<u>CCCI</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung.	<u>EVI</u>
	Verbesserung der teilflächenspezifischen Applikation bei der N-Düngung.	<u>ExG</u>
Krankheits- und Schädlingsbekämpfung	Detektion von Pflanzenkrankheiten mit UAV-Aufnahmen.	<u>ExG</u>
Ertragsprognose	Verbesserung der Ertragsprognose für einzelne Schläge.	<u>GNDVI</u>
	Verbesserung der Ertragsprognose für einzelne Schläge.	<u>SAVI</u>
	Verbesserung der Ertragsprognose für einzelne Schläge.	<u>MSAVI2</u>
	Verbesserung der Ertragsprognose für einzelne Schläge.	<u>LAI</u>
	Verbesserung der Ertragsprognose für einzelne Schläge.	<u>REIP</u>
	Verbesserung der Ertragsprognose für einzelne Schläge.	<u>Sonnenscheindauer</u>
	Abschätzung des langfristigen Ertragspotenzial von landwirtschaftlichen Flächen	<u>Beschaffenheit des Bodens</u>
	Abschätzung des langfristigen Ertragspotenzial von landwirtschaftlichen Flächen	<u>Müncheberger Soil Quality Rating (SQR)</u>

4.2 Berechnungsmethodik für die ausgewählten Indizes

4.2.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) wird im Pflanzenbau zur Quantifizierung von beispielsweise der Biomasse, dem Chlorophyll- oder Stickstoffgehalt der Blätter oder der Photosyntheseaktivität (GAUTAM & PAGAY, 2020; KIM et al., 2022).

Es handelt es sich um einen Reflektanz-basierten Index, welcher sich den spektralen Eigenschaften von Blättern bedient. Das in den Blättern angereicherte Chlorophyll, dem wichtigsten photosynthetischen Blattfarbstoff (GITELSON et al., 1996), sorgt für eine Absorption photosynthetisch aktiver Strahlung im Bereich des sichtbaren Rot (RED, ~680 nm) und einer hohen Reflektanz im Bereich des Nahen Infrarot (NIR; ~780 nm) (FUENTE et al., 2020; GATES et al., 1965). Mit Werten zwischen -1 und 1 quantifiziert der Index den relativen Unterschied zwischen diesen Reflektanzwerten und damit des allgemeinen Gesundheitszustandes der betrachteten Vegetation (KIM et al., 2022). So kann der NDVI durchaus Stress indizieren, die sich jedoch alle gleichfalls auf den Pflanzenzustand auswirken. Deshalb ist es bei der Betrachtung dieses Indizes schwierig, einen einzelnen Stress-Faktor zu identifizieren ohne weitere Informationen in Betracht zu ziehen (BARET et al., 2007).

Beispielsweise ist Stickstoff stark mit dem Chlorophyllgehalt korreliert, da er der Hauptnährstoff eines Enzyms ist, das an der Chlorophyllbildung beteiligt ist (MAGNEY et al., 2017). So wirkt sich der Stickstoffgehalt durch seine Verbindung zum Chlorophyll auf den Zustand der Pflanze aus und kann durch den NDVI indiziert werden.

Berechnungsmethode nach ROUSE et al. (1974):

In seiner allgemeinen Form wird der NDVI nach folgender Formel berechnet:

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

NIR ($\lambda = 700 - 900 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot

RED ($\lambda = 610 - 680 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum

Sentinel-2 liefert Daten für die Copernicus Dienste und ist u.a. mit multispektralen Bildgebungsinstrumenten mit 13 Spektralkanälen ausgestattet. Daneben werden einzelne Datenprodukte, wie der NDVI direkt vorprozessiert und über den Copernicus Land Monitoring Service (CLMS, 2024) als Teil der High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity Product Suite (HR-VPP) bereitgestellt. Die Berechnung des NDVI erfolgt hier auf Grundlage folgender Formel:

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$$

B04 ($\lambda = 665,6 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum

B08 ($\lambda = 832,8 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im nahen Infrarot

Der NDVI ist als atmosphärisch korrigiertes Produkt im CLMS als fertig gerechnetes Datenprodukt verfügbar. Ein letzter Test im November 2024 hat jedoch gezeigt, dass zu dieser Zeit der Datenbestand stark veraltet war und nur Szenen bis Juli 2024 verfügbar waren. Um etwaige Verfügbarkeitsrisiken zu minimieren sollte erwogen werden, den NDVI selbst zu rechnen.

Um ideale Ergebnisse zu erzielen, sind atmosphärenkorrigierte und wolkenfreie Aufnahmen erforderlich. Da ein Großteil der verfügbaren Satellitenszenen zumindest stellenweise mehr oder weniger starke Bewölkungsanteile enthält, ist diese Forderung in der Praxis unrealistisch. Zur Abschätzung des Bewölkungseinflusses und zur nachträglichen Filterung der Daten auf Pixelebene muss für nachgelagerte Anwendungen zusätzlich ein korrespondierender Datensatz zur Wolkenbedeckung bereitgestellt werden.

Die Berechnung der Daten erfolgt Szenenweise nach folgendem Vorgehen:

1. Download der Szene als Sentinel L2A-Produkt (Orthorectified Surface Reflectance, bottom of atmosphere) mit räumlicher Auflösung von 20m
2. Pixelweise Berechnung des NDVI aus entsprechenden Bändern nach oben stehender Formel
3. Extraktion und Bereitstellung der Wolkenmaske aus der gleichen L2A-Szene

4.2.2 Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Der Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) ähnelt stark dem NDVI (siehe Kapitel 4.2.1), betrachtet allerdings statt der Absorption im Bereich des sichtbaren Rot (RED, ~680 nm) die in diesem Bereich ihr Minimum erreichende Absorption des sichtbaren Grün (GRN, ~560 nm) im Wellenlängenspektrum. Letztere ist hier dominiert durch den Blattfarbstoff Chlorophyll. Im Gegensatz zum NDVI ist dieser Index also sensibler gegenüber den Variationen in der Chlorophyllkonzentration (GITELSON et al., 1996; GITELSON & MERZLYAK, 1998). So handelt es sich beim GNDVI um einen Index, der besonders gut geeignet ist, die photosynthetische Aktivität der Pflanzen insbesondere in dichtem Bewuchs oder fortgeschrittenen Entwicklungsstadien einzuschätzen (VIDICAN et al., 2023).

Berechnungsmethode nach Gitelson et al. (1996):

$$GNDVI = \frac{NIR - GRN}{NIR + GRN}$$

NIR ($\lambda = 700 - 900 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot

GRN ($\lambda \cong 560 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im grünen Frequenzbereich

Um ideale Ergebnisse zu erzielen, sind atmosphärenkorrigierte und wolkenfreie Aufnahmen erforderlich. Da ein Großteil der verfügbaren Satellitenszenen zumindest stellenweise mehr oder weniger starke Bewölkungsanteile enthält, ist diese Forderung in der Praxis unrealistisch. Zur Abschätzung des Bewölkungseinflusses und zur nachträglichen Filterung der Daten auf Pixelebene muss für nachgelagerte Anwendungen zusätzlich ein korrespondierender Datensatz zur Wolkenbedeckung bereitgestellt werden.

Die Berechnung der Daten erfolgt Szenenweise nach folgendem Vorgehen:

1. Download der Szene als Sentinel L2A-Produkt (Orthorectified Surface Reflectance, bottom of atmosphere) mit räumlicher Auflösung von 20m
2. Pixelweise Berechnung des GNDVI aus entsprechenden Bändern (SENTINELHUB, 2024):

$$GNDVI = \frac{B08 - B03}{B08 + B03}$$

B08 ($\lambda = 832.8 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im nahen Infrarot

B03 ($\lambda = 559.8 \text{ nm}$) spektrale Reflexion im grünen Frequenzspektrum

3. Extraktion und Bereitstellung der Wolkenmaske aus der gleichen L2A-Szene

4.2.3 Normalized Difference Red Edge Index (NDRE)

Der Normalized Differende Red Edge Index (NDRE) wird eingesetzt, um den Chlorophyllgehalt der Pflanze zu bestimmen (BOIARSKII & HASEGAWA, 2019). Dieser kann ein Indikator für Nährstoffdefizite, photosynthetische Aktivität und Entwicklungsstatus bzw. Seneszenz sein (FILELLA & PENUELAS, 1994). Dabei wirkt sich vor allem der N-Status der Pflanze auf die Chlorophyllmenge aus (FILELLA & PENUELAS, 1994; MAGNEY et al., 2017).

Die grundlegenden Reflexionseigenschaften der Vegetation werden durch die innere Struktur der Blätter beeinflusst. Charakteristisch ist starke Reflexion durch pflanzliches Chlorophyll im Bereich des Nahen Infrarot (NIR; ~780 nm) und niedrige Reflexion aufgrund starker Absorption durch pflanzliches Chlorophyll im Bereich des Roten Lichts (~680 nm) (JU et al., 2010; BARNES et al., 2000). So kommt es zu einem starken Anstieg der Reflektanzwerte zwischen dem sichtbaren Rot und dem NIR. Dieser Bereich wird als *Red Edge* bezeichnet und liefert wichtige Informationen zur biochemischen Zusammensetzung der Vegetation und damit auch den Chlorophyllgehaltes der Blätter (JU et al., 2010; FILELLA & PENUELAS, 1994).

So reagiert der NDRE, der den Bereich des Red Edge nutzt, auf die Färbung der Blätter in Abhängigkeit von der Chlorophyllkonzentration und der N-Versorgung von gelb (defizitäre Blätter) bis grün (gesunde Blätter) (KERRY & ESCOLÀ, 2021). Auf der Grundlage der dargestellten Zusammenhänge können so mit Hilfe des NDRE Aussagen über Pflanzenstress, insbesondere ausgelöst durch N-Defizite, getroffen werden.

Berechnungsmethode nach BARNES et al. (2000):

In seiner allgemeinen Form wird der NDRE nach folgender Formel berechnet:

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$$

NIR (700 – 900 nm)

spektrale Reflexion im nahen Infrarot

RE (690 – 730 nm)

spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum

Um ideale Ergebnisse zu erzielen, sind atmosphärenkorrigierte und wolkenfreie Aufnahmen erforderlich. Da ein Großteil der verfügbaren Satellitenszenen zumindest stellenweise mehr oder weniger starke Bewölkungsanteile enthält, ist diese Forderung in der Praxis unrealistisch. Zur Abschätzung des Bewölkungseinflusses und zur nachträglichen Filterung der Daten auf Pixelebene muss für nachgelagerte Anwendungen zusätzlich ein korrespondierender Datensatz zur Wolkenbedeckung bereitgestellt werden.

Die Berechnung der Daten erfolgt Szenenweise nach folgendem Vorgehen:

1. Download der Sentinel L2A-Daten (atmosphärisch korrigiert) mit räumlicher Auflösung von 20m für Untersuchungsgebiet und Untersuchungszeitraum (inklusive Sentinel Cloud Mask)
2. Pixelweise Berechnung des NDRE aus entsprechenden Bändern (Sentinel Hub, 2024d):

$$NDRE = \frac{B08 - B05}{B08 + B05}$$

B08 ($\lambda = 832.8$ nm)

spektrale Reflexion im nahen Infrarot

B05 ($\lambda = 704.1 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum

3. Extraktion und Bereitstellung der Wolkenmaske aus der gleichen L2A-Szene

4.2.4 Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI)

Neben vielen weiteren Umwelt- und Kultivierungseinflüssen beeinflusst besonders die Verfügbarkeit von Wasser sowie Stickstoff (N) und weiteren Nährstoffen im Boden Wachstum und Morphologie von Pflanzen. Dabei beeinflussen sich all diese Faktoren auch gegenseitig. Dadurch ist die Unterscheidung zwischen Wasserstress und N-Stress erschwert (FITZGERALD et al., 2010). Der CCCI wurde auf Grundlage von BARNES et al. (2000) und CLARKE et al. (2001) entwickelt, um diese beiden Stressfaktoren unterscheiden und unabhängig der störenden Effekte durch die Vegetationsdichte betrachten zu können (FITZGERALD et al., 2010; LI et al., 2014). Er nutzt eine Kombination von Reflektanzen in drei Bereichen des Wellenlängenspektrums (Red Edge (RE) 690 – 730 nm, Near infrared (NIR) 700 – 900 nm, sichtbares Rot (RED) 610 – 680 nm), gefasst in verschiedenen anderen Indizes (NDVI, NDRE), um den Chlorophyllgehalt von Blättern abzuschätzen (BARNES et al., 2000).

Um die Aussage zum N-Stress zu normalisieren, werden obere und untere Grenzen der N- bzw. Chlorophyll-Versorgung in Form minimaler und maximaler NDRE-Werte festgelegt. Der NDVI wird eingesetzt, um den Bedeckungsgrad der vegetationsdecke abschätzen zu können (EL-SHIKHA et al., 2008) BARNES et al., 2000). So kann der CCCI sehr gut als Indikator für N-Stress eingesetzt werden, welcher weitgehend unabhängig von der Wasserverfügbarkeit und der Dichte der Vegetationsdecke ist (EL-SHIKHA et al., 2008).

Berechnungsmethode nach SONOBE et al. (2018):

In seiner allgemeinen Form wird der NDRE nach folgender Formel berechnet:

$$CCCI = \frac{NDRE}{NDVI} = \frac{\left(\frac{NIR - RE}{NIR + RE}\right)}{\left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED}\right)}$$

RED ($\lambda = 610 - 680 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum

RE ($\lambda = 690 - 730 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum

NIR ($\lambda = 700 - 900 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im nahen Infrarot

Um ideale Ergebnisse zu erzielen, sind atmosphärenkorrigierte und wolkenfreie Aufnahmen erforderlich. Da ein Großteil der verfügbaren Satellitenszenen zumindest stellenweise mehr oder weniger starke Bewölkungsanteile enthält, ist diese Forderung in der Praxis unrealistisch. Zur Abschätzung des Bewöl-

kungseinflusses und zur nachträglichen Filterung der Daten auf Pixelebene muss für nachgelagerte Anwendungen zusätzlich ein korrespondierender Datensatz zur Wolkenbedeckung bereitgestellt werden.

Die Berechnung der Daten erfolgt Szenenweise nach folgendem Vorgehen:

1. Download der Sentinel L2A-Daten (atmosphärisch korrigiert) mit räumlicher Auflösung von 20m für Untersuchungsgebiet und Untersuchungszeitraum (inklusive Sentinel Cloud Mask)
2. Pixelweise Berechnung des CCCI aus entsprechenden Bändern (SENTINEL HUB, 2024a) auf Grundlage der Formel von (SONOBE et al., 2018):

$$CCCI = \frac{NDRE}{NDVI} = \frac{\left(\frac{B08 - B05}{B08 + B05}\right)}{\left(\frac{B08 - B04}{B08 + B04}\right)}$$

B04 ($\lambda = 665.6 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum

B05 ($\lambda = 704.1 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im Red-Edge-Frequenzspektrum

B08 ($\lambda = 832.8 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im nahen Infrarot

3. Extraktion und Bereitstellung der Wolkenmaske aus der gleichen L2A-Szene.

4.2.5 Red Edge Inflection Point (REIP)

Der Red Edge Inflection Point (REIP) liefert Informationen zum Chlorophyllgehalt und dem Gesundheitszustand der Pflanzen (LILIENTHAL, 2014; ERDLE et al., 2011; GUYOT et al., 1988). Er wird oft als Indikator für den N-Gehalt von Pflanzen eingesetzt (LI et al., 2014).

Ähnlich dem NDRE (siehe Kap. 5.1.3) werden auch hier die spektralen Eigenschaften von Blättern im Bereich des *Red Edge* und sichtbaren Rot des Wellenlängenspektrums genutzt. Ein grundlegender Unterschied zum NDRE ist jedoch, dass eine hohe spektrale Auflösung im Bereich des Red Edge besteht. Es werden dementsprechend 3 unterschiedliche Wellenlängen betrachtet (LILIENTHAL, 2014; GUYOT et al., 1988). Dies erlaubt eine besonders gute Charakterisierung dieses spektralen Versatzes, so dass der genaue Wendepunkt (*inflection point*) gut bestimmt werden kann. Denn der *inflection point* verschiebt sich je nach Chlorophyllgehalt in Richtung kürzerer Wellenlängen bei geringem und in Richtung längerer Wellenlängen bei steigendem Chlorophyllgehalt (GUYOT et al., 1988).

Berechnungsmethode nach nach GUYOT et al. (1988):

In seiner allgemeinen Form wird der REIP nach folgender Formel berechnet:

$$REIP = 700 + 40 \times \frac{\frac{RED_{670} + RE_{780}}{2} - RE_{700}}{RE_{740} - RE_{700}}$$

$RED_{670} (\lambda = 670 \text{ nm})$	<i>spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>
$RE_{700} (\lambda = 700 \text{ nm})$	<i>spektrale Reflexion im Red-Edge 700-nm-Band</i>
$RE_{740} (\lambda = 740 \text{ nm})$	<i>spektrale Reflexion im Red-Edge 740-nm-Band</i>
$RE_{780} (\lambda = 780 \text{ nm})$	<i>spektrale Reflexion im Red-Edge 780-nm-Band</i>

Um ideale Ergebnisse zu erzielen, sind atmosphärenkorrigierte und wolkenfreie Aufnahmen erforderlich. Da ein Großteil der verfügbaren Satellitenszenen zumindest stellenweise mehr oder weniger starke Bewölkungsanteile enthält, ist diese Forderung in der Praxis unrealistisch. Zur Abschätzung des Bewölkungseinflusses und zur nachträglichen Filterung der Daten auf Pixelebene muss für nachgelagerte Anwendungen zusätzlich ein korrespondierender Datensatz zur Wolkenbedeckung bereitgestellt werden.

Die Berechnung der Daten erfolgt Szenenweise nach folgendem Vorgehen:

1. Download der Sentinel L2A-Daten (atmosphärisch korrigiert) mit räumlicher Auflösung von 20m für Untersuchungsgebiet und Untersuchungszeitraum (inklusive Sentinel Cloud Mask)
2. Pixelweise Berechnung des REIP aus entsprechenden Bändern (SENTINEL HUB, 2024d):

$$REIP = 700 + 40 \times \frac{\frac{B04 + B07}{2} - B05}{B06 - B05}$$

<i>B04 ($\lambda = 664.6 \text{ nm}$)</i>	<i>spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>
<i>B05 ($\lambda = 704.1 \text{ nm}$)</i>	<i>spektrale Reflexion im RE_{700}</i>
<i>B06 ($\lambda = 740.5 \text{ nm}$)</i>	<i>spektrale Reflexion im RE_{740}</i>
<i>B07 ($\lambda = 782.8 \text{ nm}$)</i>	<i>spektrale Reflexion im RE_{780}</i>

3. Extraktion und Bereitstellung der Wolkenmaske aus der gleichen L2A-Szene

4.2.6 Second Modified Adjusted Vegetation Index (MSAVI2)

Für viele Vegetationsindizes wurde festgestellt, dass die Vegetationseigenschaften schlechter beschrieben werden konnten, wenn unbewachsener Boden einen großen Teil der betrachteten Fläche einnimmt (BENITO et al., 2021). Bereits durch die Entwicklung des Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) durch HUETE (1988) wurde die Empfindlichkeit einiger Indizes, wie beispielsweise dem NDVI, gegenüber der Vegetation durch Berücksichtigung der Auswirkungen von Atmosphäre und Boden verbessert. Dabei wurde ein Bodenanpassungsfaktor als Konstante L in die Gleichung des NDVI aufgenommen. Für eine optimale Anpassung des Bodeneffekts sollte der Faktor L jedoch umgekehrt zur Menge der vorhandenen Vegetation variieren. So wird in der Gleichung des Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2) die Konstante L durch eine variable Funktion ersetzt und es entfällt die Notwendigkeit, den NDVI vorzuberechnen oder die Bodenlinie zu identifizieren (Qi et al., 1994; EUROPEAN SPACE AGENCY, 2024; vgl. Kapitel 3.5.1).

Der MSAVI2 ist dementsprechend besonders geeignet, um den Vegetationszustand in Gebieten mit geringer Vegetationsbedeckung zu bestimmen. Dies trifft beispielsweise auf aride oder semi-aride Regionen zu oder auch auf Vegetation in noch frühem Entwicklungsstadium. Gleichzeitig setzt beim MSAVI2 im Gegensatz zum NDVI (vgl. Kapitel 4.2.1) kein Sättigungseffekt bei hohem LAI ein. So kann der Index sowohl bei geringer als auch bei hoher Vegetationsdichte verlässlich eingesetzt werden (HABOUDANE et al., 2004).

Berechnungsmethode nach Qi et al. (1994) und European Space Agency (2024):

In seiner allgemeinen Form wird der MSAVI2 nach folgender Formel berechnet:

$$MSAVI2 = \frac{\left(2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - RED)}\right)}{2}$$

<i>NIR (700 – 900 nm)</i>	<i>spektrale Reflexion im nahen Infrarot</i>
<i>RED (610 – 680 nm)</i>	<i>die spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum</i>

Um ideale Ergebnisse zu erzielen, sind atmosphärenkorrigierte und wolkenfreie Aufnahmen erforderlich. Da ein Großteil der verfügbaren Satellitenszenen zumindest stellenweise mehr oder weniger starke Bewölkungsanteile enthält, ist diese Forderung in der Praxis unrealistisch. Zur Abschätzung des Bewölkungseinflusses und zur nachträglichen Filterung der Daten auf Pixelebene muss für nachgelagerte Anwendungen zusätzlich ein korrespondierender Datensatz zur Wolkenbedeckung bereitgestellt werden.

Die Berechnung der Daten erfolgt Szenenweise nach folgendem Vorgehen:

1. Download der Sentinel L2A-Daten (atmosphärisch korrigiert) mit räumlicher Auflösung von 20m für Untersuchungsgebiet und Untersuchungszeitraum (inklusive Sentinel Cloud Mask)
2. Pixelweise Berechnung des MSAVI2 aus entsprechenden Bändern (SENTINEL HUB, 2024d):

$$MSAVI2 = \frac{(2 \times B08 + 1 - \sqrt{(2 \times B08 + 1)^2 - 8 \times (B08 - B04)})}{2}$$

B08 ($\lambda = 832.8 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im nahen Infrarot

B04 ($\lambda = 665.6 \text{ nm}$)

spektrale Reflexion im roten Frequenzspektrum

3. Extraktion und Bereitstellung der Wolkenmaske aus der gleichen L2A-Szene

4.3 Anwendung der Datenprodukte in der landwirtschaftlichen Praxis

Die ausgewählten Produkt-Nutzen-Paare werden nachfolgend hinsichtlich ihrer Anwendung über den Lebenszyklus bestimmter Nutzpflanzen systematisiert. Dieser Lebenszyklus kann in unterschiedliche Entwicklungsstadien unterteilt werden; gängig ist die Einteilung in 10 Stadien, an welche Managementaufgaben angepasst werden können (AHDB, 2023). Im deutschen Sprachraum gängig ist das BBCH-Schema (auch BBCH-Notation) nach MEIER (2018).

Die Systematisierung anhand eines einheitlichen Schemas bringt später große Vorteile in der Anwendung von Planungs- und Entscheidungsunterstützungssystemen. Da allerdings nicht alle Studien die gewählte Notation nutzen, sind Unschärfen in der Übersetzung nicht ausgeschlossen. Einige Publikationen nutzen darüber hinaus englische Begriffe, die weitere Übersetzungsunschärfen mit sich bringen. Deshalb werden in der nachfolgenden Zusammenstellung die ursprünglichen Begriffe / Systematisierungen grundsätzlich mitgeführt und bestmöglich nach BBCH „übersetzt“. Unschärfen in der Einordnung gemäß BBCH werden wie folgt annotiert:

- * Übersetzung der Notationen nicht eindeutig
- ** Übersetzung des verwendeten englischen Begriffes nicht eindeutig

4.3.1 NDVI für N-Düngung nach HAG et al. (2024) und LI et al. (2014)

Tabelle 55: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares NDVI für N-Düngung hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
Biomassepotential BMP → Ertragsvariabilität Das BMP wird für ein Jahr als arithmetisches Mittel des relativen NDVI jeder Rasterzelle zu den untersuchten Entwicklungsstadien berechnet. Das BMP dient dabei als Indikator für Ertragszonen und kann über mehrere Jahre berechnet werden,	Winterweizen	Wachstumsstadien oder Growth stages (GS) von Getreide nach dem Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB, 2023)	GS 30- 32	BBCH 30-32	Beginn des Schosses über 1-Knoten-Stadium bis 2-Knoten-Stadium	-
			GS 39	BBCH 39	Ligula (Blatthäutchen)-Stadium** (Joining*)	-
			GS 65	BBCH 65	Mitte der Blüte	+++
	Wintergerste		GS 30- 32	BBCH 30- 32	Beginn des Schosses: Haupttrieb und Bestockungstriebe stark auf- gerichtet, beginnen sich zu strecken. Ährenspitzen mind. 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt bis 2-Knoten-Stadium: 2. Knoten wahrnehmbar, mind. 2 cm vom 1. Knoten entfernt	-
			GS 39	BBCH 39	Ligula (Blatthäutchen)-Stadium** (Joining*)	-
			GS 65	BBCH 65	Mitte der Blüte	+++
	Raps		GS 50	BBCH 50	Ähren-/Rispen schieben	+++

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
um unterschiedliche Ertragszonen zu definieren. Daran kann die Menge der N-Gabe angepasst werden und eine Überdüngung vermieden werden.		Wachstumsstadien oder Growth stages (GS) von Raps nach dem Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB, 2023) nach SYLVESTER-BRADLEY (1985)	GS 60	BBCH 60	Beginn der Blüte, noch keine Gelbfärbung sichtbar	+++
			GS 70	BBCH 70	Fruchtentwicklung, keine Gelbfärbung der Blüten mehr	-
	Mais	Wachstumsstadien oder Growth stages (GS) von Getreide nach dem Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB, 2023) nach Meier (2001)	GS 39	BBCH 39	9 und mehr Stengelknoten wahrnehmbar	-
			GS 65	BBCH 65	männliche Infloreszenz: Vollblüte: obere und untere Rispen- äste in Blüte, weibliche Infloreszenz: Narbenfäden vollständig geschoben	-
	Soja		V5	BBCH 16*	5. Laubblatt entfaltet*	+++
			R2	BBCH 65*	Mitte der Blüte	+++

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
		Wachstums-und Entwicklungsstadien oder growth and development stages (V und R); zuerst definiert durch FEHR & CAVINESS (1977), hier basierend auf WRIGHT & LENSSEN (2013)	R5	BBCH 72 – BBCH 74*	20% der Hülсен haben endgültige Länge erreicht (15-20 mm; für determinante Sorten), Beginn der Hülсенfüllung für nicht-determinante Sorten bis 40% der Hülсен haben endgültige Länge erreicht (15-20 mm; für determinante Sorten), Beginn der Hülсенfüllung für nicht-determinante Sorten	+
N-Aufnahme in kg N ha ⁻¹ (ergibt sich aus der N-Konzentration in der Pflanze in %)	Sommermais	Iowa State University; erstmals formuliert durch ABENDROTH et al.	V6 und V7	BBCH 18 und BBCH 19	8. und 9 oder mehr Laubblätter entfaltet	- Hier ist der CCCI besser geeignet

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
multipliziert mit der Trockenbiomasse)		(2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	V10-V12	BBCH 19*	9 und mehr Laubblätter entfaltet	- Stadium eher schlecht geeignet, trifft auch zu auf CCCI und NDRE; hier ist der GNDVI besser geeignet
			V6-V12	BBCH 18 - BBCH 19*	Haupt-Wachstumsphase bis kurz vor Ende Wachstumsphase	+ gut geeignet, aber besser ge- eignet sind hier NDRE oder CCCI
N-Konzentration in der Pflanze	Sommermais	Iowa State University; erstmalig formuliert durch ABENDROTH et al.	V6 and V7	BBCH 18 und BBCH 19*	6. und 7. Laubblatt entfaltet (zw. Mai-Juni)	- Hier ist der CCCI besser ge- eignet

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
		(2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	V10-V12	BBCH 19*	9 oder mehr Laubblätter entfaltet	- Stadium eher schlecht geeignet, trifft auch zu auf CCCI und NDRE; hier ist der GNDVI besser geeignet
			V6-V12	BBCH 16 - BBCH 39*	Haupt-Wachstumsphase bis kurz vor Ende Wachstumsphase	- nicht gut geeignet

4.3.2 GNDVI für N-Düngung nach (KAYAD et al., 2019) und (SULLIVAN et al., 2004)

Tabelle 56: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares *GNDVI für N-Düngung* hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen

Abgeleiteter / betrachteter Parameter	Kultur- art	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
räumliche Variabilität des Kornertrags (Senti- nel-2-Bilder zu verschiedenen Zeit- punkten wurden auf Korrelation mit den gemessenen Ertrags-da- ten untersucht)	Mais	Iowa State University; erstmalig formuliert durch ABENDROTH et al. (2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	R4	BBCH 75	Milchreife: Körner in Kolbenmitte sind weiß-gelblich; Inhalt milchig; ca. 40 % Trockensubstanz im Korn	+ Besser geeig- net als NDVI zu diesem Zeitpunkt
			R5	BBCH 83 / BBCH 85	Frühe Teigreife: Körner teigartig; am Spindelansatz noch feucht; ca. 45 % Trockensubstanz im Korn / Teigreife (= Siloreife): Körner gelblich bis gelb (sortenabhängig); teigige Konsistenz; ca. 55 % Trockensubstanz im Korn	++ Besser geeig- net als NDVI zu diesem Zeitpunkt
			R6	BBCH 87	Physiologische Reife: schwarze(r) Punkt/Schicht am Korngrund; ca. 60 % TS im Korn	+++ Besser geeig- net als NDVI zu diesem Zeitpunkt

Abgeleiteter / betrachteter Parameter	Kultur- art	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
Variabilität des N-Ge- halts von Kulturpflan- zen auf Feldebene	Mais	Iowa State University; erstmalig formuliert durch ABENDROTH et al. (2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	V4	BBCH 16	6. Laubblatt entfaltet	-
			R2	BBCH 71	Beginn der Kornbildung: Körner sind zu erkennen; Inhalt wässrig; ca. 16 % TS im Korn	/ keine Aussage
			V8 - V10	BBCH 19*	9 und mehr Laubblätter entfaltet	+++ Besser geeig- net als NDVI zu diesem Zeitpunkt
			V6	BBCH 18	8. Laubblatt entfaltet	+

Anmerkungen

SULLIVAN et al. (2004) verweisen darauf, dass es hilfreich sein kann, den LAI in die Betrachtung mit einzubeziehen, da die Bestimmung des N-Gehaltes mit zunehmend geschlossener Vegetationsdecke höhere Korrelationen zeigt.

Außerdem wird in der Studie eine starke Beeinflussung der Ergebnisse durch Trockenheit und die gewählte Datenquelle der Satellitendaten gezeigt. Letzteres bezieht sich auf die Wahl der Wellenlängenbereiche, um den GNDVI zu berechnen.

4.3.3 NDRE für N-Düngung nach Li et al. (2014)

Tabelle 57: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares *NDRE für N-Düngung* hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen

Abgeleiteter / betrachteter Parameter	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
N-Aufnahme in kg N ha ⁻¹ (ergibt sich aus der N-Konzentration in der Pflanze in % multipliziert mit der Trockenbiomasse)	Sommermais	Iowa State University; erstmals formuliert durch ABENDROTH et al. (2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	V6 und V7	BBCH 18 und BBCH 19	8. und 9. oder mehr Laubblätter entfaltet	- besser geeignet ist hier der CCCI
			V10–V12	BBCH 19*	9 und mehr Laubblätter entfaltet	++ gut geeignet, aber besser geeignet ist hier der CCCI
			V6-V12	BBCH 18 - BBCH 39*	8. Laubblatt entfaltet bis 9 und mehr Stengelknoten wahrnehmbar	++ ähnlich gut geeignet wie der CCCI
N-Konzentration in der Pflanze	Sommermais	Iowa State University; erstmals formuliert durch ABENDROTH et al. (2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	V6 and V7	BBCH 18 und BBCH 19*	8. und 9. oder mehr Laubblätter entfaltet	-
			V10–V12	BBCH 19*	9 und mehr Laubblätter entfaltet	-
			V6-V12	BBCH 18 - BBCH 39*	8. Laubblatt entfaltet bis 9 und mehr Stengelknoten wahrnehmbar	-

4.3.4 CCCI für N-Düngung nach Li et al. (2014) und FITZGERALD et al. (2010)

Tabelle 58: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares CCCI für N-Düngung hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
N-Konzentration in der Pflanze	Sommermais	Iowa State University; erstmals formuliert durch ABENDROTH et al. (2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	V6 und V7	BBCH 18 und BBCH 19	8. und 9. oder mehr Laubblätter entfaltet	+++ Am besten geeignet
			V10–V12	BBCH 19*	9 und mehr Laubblätter entfaltet	-
			V6-V12	BBCH 18 - BBCH 39*	8. Laubblatt entfaltet bis 9 und mehr Stengelknoten wahrnehmbar	-
N-Aufnahme in kg N ha ⁻¹ (ergibt sich aus der N-Konzentration in der Pflanze in % multipliziert)	Sommermais	Iowa State University; erstmals formuliert durch ABENDROTH et al. (2011); hier basierend auf ARVALIS (2024)	V6 und V7	BBCH 18 und BBCH 19	8. und 9. oder mehr Laubblätter entfaltet	+++ Am besten geeignet
			V10–V12	BBCH 19*	9 und mehr Laubblätter entfaltet	+++ Am besten geeignet

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
mit der Trockenbio- masse)			V6-V12	BBCH 18 - BBCH 39*	8. Laubblatt entfaltet bis 9 und mehr Stengelknoten wahrnehmbar	+++ Am besten ge- eignet
N-Status der Pflanze (g m ⁻²)	Weizen	ZADOKS et al. (1974)	Z30-Z33	BBCH 30-33	Beginn des Schosses: Haupttrieb und Be- stockungstriebe stark auf- gerichtet, be- ginnen sich zu strecken. Ährenspitzen mind. 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt bis 3-Knoten-Stadium: 3. Knoten mind. 2 cm vom 2. Knoten entfernt	+++

4.3.5 REIP für N-Düngung nach STETTMER et al. (2022)

Tabelle 59: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares *REIP für N-Düngung* hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
N-Aufnahme der Pflanze in kg N ha ⁻¹ für betrachtete Zonen im Feld	Winterweizen	BBCH (Quelle nicht spezifiziert)	BBCH 31	BBCH 31	1-Knoten-Stadium: 1. Knoten dicht über der Bodenoberfläche wahrnehmbar, mind. 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt	Generell schlechte Performance, weil in der relevanten Jahreszeit grundsätzlich eine starke Bewölkung herrscht und sehr wenige verwertbare (= weitgehend wolkenfreie) Bilder vorliegen
			BBCH 39	BBCH 39	Ligula (Blatthäutchen)-Stadium: Blatthäutchen des Fahnenblattes gerade sichtbar, Fahnenblatt voll entwickelt	+++
			BBCH 55	BBCH 55	Mitte des Ähren-/Rispen-schiebens: Basis noch in der Blattscheide	+++
			BBCH 65	BBCH 65	Mitte der Blüte: 50 % reife Staubgefäße	+

4.3.6 MSAVI für N-Düngung nach ALMEIDA-ÑAÑAY (2023)

Achtung: Abweichend zu den übrigen Datenprodukten, wurde aufgrund der schwächeren Quellenlage eine Publikation zum MSAVI (statt MSAVI2) ausgewertet. (SÖDERSTRÖM et al., 2017) stellen eine gute Korrelation zwischen MSAVI2-Karten und Karten der N-Aufnahme im Weizen fest. Diese Untersuchung erfolgte in den Wachstumsstadien BBCH 30-45. Dies lässt im Vergleich mit den hier folgenden Tabellen auf eine grundlegende Übereinstimmung der beiden Indizes schließen.

Tabelle 60: Systematisierung des Produkt-Nutzen-Paares MSAVI für N-Düngung hinsichtlich seiner Anwendung über den Lebenszyklus verschiedener Nutzpflanzen

Abgeleiteter / betrachteter Indikator	Kulturart	Phänologisches Stadium				Eignung
		Originalnotation	Notation in Publikation	BBCH (MEIER, 2018)	Bedeutung	
N output: beschreibt die Gesamtreaktion von Ertrag und Proteingehalt; es wurden Flächen mit unterschiedlicher N-Ausbringung untersucht	Weizen	Growth Stages (GS; Quelle nicht spezifiziert)	GS 32	BBCH 32	2-Knoten-Stadium: 2. Knoten wahrnehmbar, mind. 2 cm vom 1. Knoten entfernt	++ Dieser Index ist in frühen Phasen der Entwicklung, geprägt durch einen großen Einfluss den noch freiliegenden Boden, sehr gut geeignet
			GS 39	BBCH 39	Ligula (Blatthäutchen)-Stadium: Blatthäutchen des Fahnenblattes gerade sichtbar, Fahnenblatt voll entwickelt	+
			GS 65	BBCH 65	Mitte der Blüte: 50 % reife Staubgefäße	-

5 Fachkonzept zum Einsatz fernerkundlicher Datenprodukte für die N-Düngung

Entsprechend der eingangs erläuterten Methodik (Kapitel 1.2) werden aus den in Kapitel 4 im Detail ausspezifizierten Produkt-Nutzen-Paaren wesentliche Aspekte für ein entsprechendes Fachkonzept ausgearbeitet. Mit Blick auf die gesicherte Quellenlage in der wissenschaftlichen Literatur konnte der Komplex „N-Düngung“ sehr gut ausgeleuchtet und in Form entsprechender Produkt-Nutzen-Paare für die Indizes NDVI, GNDVI, REIP, CCCI, MSAVI2 und NDRE darin genauer untersucht werden. Für viele andere in Kapitel 3 diskutierte Indikatoren und Datenprodukte lassen sich mit ähnlichen methodischen Ansätzen ebenfalls Fachkonzepte erstellen. Allerdings ist in diesen Bereichen – insbesondere unter Einschränkung auf den Einsatz *fernerkundlicher* Daten – die Erkenntnis- und Quellenlage deutlich dünner, weniger belastbar und mit Blick auf die vorgeschlagene Struktur entlang von Fruchtarten und Wachstumsphasen derzeit nicht ausreichend detailliert verfügbar.

Für den Aufbau des Fachkonzeptes wird die in Kapitel 4 betrachtete Menge an Indikatoren auf die Indizes und Datenprodukte zu **NDVI, NDRE, REIP und CCCI** eingeschränkt, da diese derzeit die größte praktische Relevanz und in dieser Reihenfolge die größte Verbreitung in der Anwendung haben. Aufgrund der guten und langfristig gesicherten freien Verfügbarkeit über die Copernicus-Plattform und die Sentinel-Satellitenmissionen der Europäischen Union ist das Umsetzungsrisiko für diese Datenprodukte insgesamt sehr gering und eine Umsetzung entsprechender Anwendungen wäre im Prinzip ab sofort möglich.

Die nachfolgenden Kapitel zu einem Fachkonzept gliedern sich wie folgt:

1. Organisatorische und technische Rahmenbedingungen für die Bereitstellung fernerkundlicher Datenprodukte innerhalb einer IT-Infrastruktur : Beschreibung allgemeiner Rahmenbedingungen für die Bereitstellung neuer fernerkundlicher Datenprodukte und datenbezogener Anwendungen innerhalb einer eigenen IT-Infrastruktur.
2. Aufbau und Bereitstellung eines homogenen „lebenden“ Datenarchivs: Beschreibung der Eigenschaften eines Datenarchivs mit Möglichkeiten zur zeitnahen Fortschreibung der Daten.
3. Bereitstellung von Datenprodukten in Diensten und standardisierten Datenformaten: Beschreibung und Darstellung geeigneter Schnittstellen und Datenformate zur Bereitstellung der Datenprodukte für nachgelagerte Anwendungen innerhalb und außerhalb der eigenen IT-Infrastruktur.
4. Bereitstellung allgemeiner Web-Anwendungen für die Datenexploration: Beschreibung der Eigenschaften allgemeiner Anwendungen („Datenbrowser“) mit Fokus auf die Recherche, Darstellung und einfache visuelle Analyse von Datenprodukten.

5. Aufbau einer Knowledge Base für Landwirte zu den Datenprodukten: Beschreibung von Aufbau und Inhalt einer Knowledge Base, die Landwirten Anwendungsleitfäden und Hintergrundinformationen zu den verfügbaren Datenprodukten bereitstellen soll.
6. Bereitstellung kontextspezifischer Anwendungen, Empfehlungswerkzeuge und Apps: Möglichkeiten und Anknüpfungspunkte für zusätzliche Einzelanwendungen, die Landwirte und landwirtschaftliche Betriebe in konkreten Nutzungskontexten Daten, Informationen und Entscheidungshilfen bereitstellt.

5.1 Organisatorische und technische Rahmenbedingungen für die Bereitstellung fernerkundlicher Datenprodukte

5.1.1 Allgemeine Rahmenbedingungen für die Nutzung neuer fernerkundlicher Datengrundlagen

Für die Nutzung fernerkundlicher Datenprodukte innerhalb eines Informationsangebotes für die sächsischen Landwirte muss sichergestellt sein, dass die dort angebotenen Datenprodukte für den Nutzerkreis in gleichbleibender Qualität zukunftsicher und rechtssicher angeboten werden können. Für die in diesem Kapitel betrachteten Datenprodukte ist dieser Nachweis bereits erfolgt. Da dieses Konzept ggf. künftig als Vorlage für den Aufbau weiterer Datenprodukte dient, werden hier wesentliche Anforderungen an die bereitgestellten Datenprodukte noch einmal wiedergegeben.

Die Bereitstellung für die Zielgruppe der Landwirte muss rechtssicher und zu angemessenen Kosten für den Freistaat Sachsen als Betreiber möglich sein. Dieses Kriterium ist am einfachsten zu bedienen, wenn für die Datengrundlage solche Datenprodukte zum Einsatz kommen, die gebührenfrei und über eine Open-Data-Lizenz (ohne Einschränkung der kommerziellen Nutzung und Weiterverarbeitung) durch die öffentliche Hand bereitgestellt werden. In diesem Fall ist klar, dass für die Überlassung der Daten keine Kosten entstehen und die Weitergabe (einschließlich abgeleiteter Datenprodukte) an beliebige Nutzer erfolgen darf.

Für alle anderen Datenarten ist eine eingehendere Prüfung erforderlich und hier sind ohne genauere Kenntnis zur Lizenzierung keine allgemeinen Aussagen möglich.

Die bereitgestellten Datengrundlagen müssen dauerhaft, aktuell und rechtzeitig verfügbar sein.

Für den Einsatz in der Landwirtschaft ist es zwingend erforderlich, dass die Datengrundlagen dauerhaft und angemessen aktuell verfügbar sind. Dauerhaft bedeutet, dass die daraus abgeleiteten Datenprodukte auf mehrere Jahre in die Zukunft verfügbar sein werden, sodass landwirtschaftliche Anwendungen und Beratungsangebote nachhaltig darauf aufgebaut werden können. Aktuell bedeutet, dass die Daten regelmäßig und rechtzeitig bereitgestellt werden, dass die Daten von den Landwirten sinnvoll für die Bewirtschaftung der Flächen eingesetzt werden können.

Im Einzelfall muss mit Blick auf die agronomischen Maßnahmen eine Qualifizierung erfolgen, was genau „aktuell“ oder „rechtzeitig“ bedeutet. Die zugrundeliegenden Überflugzeiten und -häufigkeiten der jeweiligen Satelliten sind durch die Betreiber vorgegeben. Für die gelegentliche Bewertung von Beständen sind Daten, die mit einer wöchentlichen Wiederholrate erhoben und bereitgestellt werden oftmals ausreichend. Für eine akute Bewertung der Bodenfeuchte oder des Trockenstresses wäre dieser Zeitraum aber oft zu lang.

Weiterhin ist zwingend erforderlich, dass die Daten zeitlich aufgelöst und auch für vergangene Zeitpunkte verfügbar sind. Damit sind vielfältige Re-Analysen, Auswertungen und Flächenmonitorings möglich.

Die Datengrundlagen müssen in gleichbleibender Qualität bereitgestellt werden. Die Qualität der bereitgestellten Datengrundlagen muss zum Zeitpunkt der Einbindung feststehen und muss auch für künftige Zeitpunkte in gleichbleibender Qualität bereitgestellt werden. Bei der Auswahl der Datengrundlagen ist zumindest abzuklären, dass sich Datenqualitäten künftig nicht maßgeblich verschlechtern werden. „Datenqualität“ meint damit insbesondere Wertunsicherheiten in den Daten, räumliche Auflösung, Aktualität bzw. Häufigkeit der Aufnahme sowie Aufnahmezeitpunkte innerhalb des Tages.

Sollten sich Datenqualitäten in Laufe der Zeit tendenziell verbessern, ist den ursprünglichen Anforderungen an räumliche und zeitliche Auflösung sowie Wertunsicherheiten i. d. R. immer noch genüge getan. Verschlechterungen sind dagegen problematisch und erfordern in jedem Fall eine Neubewertung der abgeleiteten Datenprodukte und nachgelagerter Anwendungen. Je nach Ergebnis muss dann entschieden werden, ob eine Weiterführung der Datenreihen noch sinnvoll erscheint.

Die Bereitstellung der Daten muss maschinenlesbar, automatisiert und robust erfolgen. Da die Datengrundlagen in der IT-Infrastruktur in einem vollständig digitalen Verfahren gepflegt und aktualisiert werden, müssen auch die externen Quellen für Datengrundlagen über einen entsprechend automatisiert anzusteuernenden Übertragungsweg bereitgestellt werden. Normalerweise ist das bei allen Anbietern von externen Daten auch der Fall.

5.1.2 Mengengerüste und Ressourcen für Datenübernahme und Datenverarbeitung

Die bereitgestellten Daten müssen hinsichtlich des zu erwartenden Datenaufkommens charakterisiert werden. Weiterhin sind die benötigten Ressourcen für die Datenbereitstellung abzuschätzen.

1. **Bestimmung von Mengengerüsten der Datengrundlagen.** Aus betrieblicher Sicht sind Anzahl der Datensätze und mittlere Größe eines einzelnen Datensatzes (z. B. einer Szene) zu erfassen. Diese haben fundamentalen Einfluss auf die benötigten Ressourcen für Datenübernahme und Datenverarbeitung.

2. **Speicherbedarf für die heruntergeladenen Rohdaten.** Die heruntergeladenen Daten müssen zumindest temporär gespeichert werden, bevor eine Weiterverarbeitung oder Bereitstellung über Schnittstellen stattfindet. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Datenverarbeitungsprozesse Datenbestände inkrementell aufbauen können und der Download kompletter Archive vom Datenanbieter nicht zwingend erforderlich ist. In diesem Fall sollte sich der erforderliche Speicherplatz für heruntergeladene Rohdaten grob an 10..20 Einzeldatensätzen des Anbieters orientieren. Ist aus betrieblichen Gründen eine Sicherung der originalen Rohdaten erforderlich¹⁶, muss entsprechender Speicherplatz für alle ab einem Stichtag aufgelaufenen Daten vorgesehen werden. Der Speicherbedarf für die kommenden 5..10 Jahre ist quantitativ abzuschätzen.
3. **Erforderliche Ressourcen für die Berechnung von Datenprodukten.** Für die Ableitung von Datenprodukten sind i. d. R. zusätzliche Berechnungsschritte erforderlich. Je nach Implementierung der Verarbeitungsprozesse sind hierfür ausreichende Systemressourcen einzuplanen.
4. **Speicherbedarf für bereitgestellte Datenprodukte.** Für die Bereitstellung der Datenprodukte ist entsprechend von Größe und Anzahl einzelner Aufnahmen bzw. Szenen ausreichend Speicherplatz einzuplanen. Das zu planenden Volumen umfasst historische und künftige Daten. Es muss entsprechender Speicherplatz für alle ab einem Stichtag aufgelaufenen Daten vorgesehen werden. Der Speicherbedarf für die kommenden 5...10 Jahre ist quantitativ abzuschätzen. Je nach Art und Anzahl der bereitgestellten Datendienste ist ggf. eine redundante Datenbereitstellung erforderlich. Weiterhin sind entsprechende Storage-Kapazitäten für ein Backup des Datenbestandes zu planen.
5. **Ressourcen für die Bereitstellung von datengetriebenen Anwendungen.** Die Abschätzung dieser Ressourcen ist ohne genaue Kenntnis der nachgelagerten Anwendungen nicht möglich. Eine entsprechende Abschätzung muss im Rahmen der Konzeption und Spezifikation dieser Einzelanwendungen erfolgen. Ggf. haben die Anforderungen einzelner Anwendungen Rückwirkungen auf die Berechnung (3) und Speicherung (4) von Datenprodukten. In diesem Fall sind die vorhandenen Abschätzungen zu prüfen und ggf. anzupassen.

Aussagen bezüglich Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit von IT-Ressourcen für die beschriebenen Aufgaben sind derzeit nicht möglich. Maßgebliche Kenngrößen dafür sind Art und Intensität der Nutzung

¹⁶ Da die Übertragung größerer Datenmengen vom CLMS in die eigene IT-Infrastruktur signifikant Zeit in Anspruch nehmen kann, ist ein lokales Vorhalten der Rohdaten im Sinne einer internen Nachnutzung am LfULG ggf. von Vorteil.

sowie eine Bewertung der Kritikalität solcher Anwendungen. Diese Größen sind erfahrungsgemäß starken Unsicherheiten behaftet und müssen im Zweifelsfall empirisch abgeschätzt werden.

In jedem Fall ist es von Vorteil, die entsprechenden Komponenten in Rechenzentren bzw. Hosting-Anbietern mit ausreichenden Kapazitäten zu Skalierung der Anwendungs- und Infrastrukturkomponenten zu betreiben. Hier sind im Zuge der Umsetzungsplanung angemessene Spielräume für Nutzungsintensitäten und Service Level Agreements zu definieren. Je nach Organisation des Betriebs sind die entsprechenden Zielgrößen entweder durch den Eigenbetrieb oder durch externe Dienstleister zu bedienen. In Abhängigkeit der dadurch entstehenden Aufwände bzw. Kosten sind die Planungsgrößen anhand wirtschaftlicher Rahmenbedingungen zu justieren.

5.1.3 Definition der Betriebsumgebung für Datenverarbeitung und Datenbereitstellung

Wo und wie die Bereitstellung der Betriebsumgebung im Zuge einer Umsetzung erfolgen soll, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vollständig geklärt. Je nach Aufgaben und Möglichkeiten des Eigenbetriebs bzw. potenzieller externer Dienstleister kommen vielfältige Umgebungen infrage.

Mit Blick auf typische Verarbeitungsprozesse und Softwarewerkzeuge zur Verarbeitung und Bereitstellung von fernerkundlichen Datenprodukten ist der Betrieb in einer Linux-Umgebung vorteilhaft. Die in Kapitel 4 beschriebenen Rechenwege sind recht simpel und durchgängig mit Open Source Software wie z. B. GDAL effizient zu bewerkstelligen. Auch Standardlösungen für die Datenbereitstellung (z. B. Cloud Optimized GeoTIFF, OGC-Dienste u. ä.) sind in Linux-Umgebungen besser verfügbar.

Aus Gründen der Skalierbarkeit und Ausfallsicherheit kann der Betrieb in einer Container-Umgebung (z. B. Docker, Kubernetes) von Vorteil sein.

Die Betriebsumgebungen für einzelne Anwendungen können nicht pauschal beschrieben werden. Eine Konzeption und Spezifikation muss für die Einzelanwendungen erfolgen. Allerdings sind Linux-Grundsysteme auch für die Bereitstellung von Web-Anwendungen am weitesten verbreitet und bringen viele erforderliche Softwarewerkzeuge schon von Hause aus mit.

5.1.4 Bewertung der ausgewählten Datengrundlagen hinsichtlich der genannten Rahmenbedingungen

Alle benötigten Daten werden über den Copernicus Land Monitoring Service (CMLS) bezogen. Für Recherche- und Suchaufgaben bietet der dort integrierte HRVPP-Katalogdienst eine OpenSearch-Schnittstelle, über die alle vegetationsbezogenen Datenprodukte und Satellitenszenen anhand verschiedener Kriterien recherchiert werden können. Für die Auswertung im Untersuchungsraum Sachsen wird die Bounding Box [11.909, 50.193, 15.047, 51.695] angenommen.

Die eingangs in der Auswahl genannten Indizes **NDVI, NDRE, REIP und CCCI** werden entsprechend den in Kapitel 4.2 beschriebenen Rechenwegen aus den Level-2A-Produkten der Sentinel-Satelliten abgeleitet. Für das Jahr 2023 ergeben sich folgende Eingangsgrößen für das Mengengerüst:

Anzahl der Szenen 2023:	ca. 2.500
Einzelgröße einer vollständigen L2A-Szene¹⁷:	ca. 1 .. 1,5 GB, je nach Bewölkungsgrad
Gesamtes Datenvolumen (L2A/SN) 2023:	3 .. 4,5 TB
Geschätztes Datenvolumen auf 10 Jahre:	30 .. 45 TB

Die gerechneten Indizes sollten dagegen deutlich kompakter sein und sich im Bereich von 30-50MB pro Index und Szene bewegen. Für eine genauere Quantifizierung sind ggf. Vorversuche erforderlich. Einsparungen durch eine effizientere Codierung und Rundung können ggf. weitere Datenersparnisse ermöglichen.

5.1.5 Aufbau und Bereitstellung eines homogenen „lebenden“ Datenarchivs

Für die Bereitstellung der fernerkundlichen Datenprodukte soll ein lebendes Datenarchiv entstehen, welches Zugriff auf die für die N-Düngung vorgesehenen Indikatoren bietet. Dieses Datenarchiv ist auf Grundlage der verfügbaren historischen Datengrundlagen in der Copernicus-Plattform

- initial zu befüllen,
- täglich auf neu verfügbare Daten zu prüfen und
- in diesem Fall entsprechend fortzuschreiben.

Die dafür notwendigen Komponenten sind:

- ein Index der bereits verfügbaren Datensätze (Szenenindex),
- eine Toolchain für den Datendownload und die Datenaufbereitung und
- eine Verzeichnisstruktur (Datenarchiv) für die Ablage der vollständig aufbereiteten Daten.

Abbildung 7 zeigt eine grafische Darstellung dieses Prozesses und der genannten Komponenten. Unter Einsatz eines Schedulers oder Cron-Jobs kann dieser Prozess beliebig oft ausgeführt werden. Grund-

¹⁷ Die vollständigen Daten einer Szene werden für die Berechnung von NDVI, NDRE, REIP und CCCI nicht benötigt. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist jedoch davon auszugehen, dass diese Daten künftig auch noch für andere Aufgaben oder neue Indizes benötigt werden, sodass es lokales Vorhalten der vollständigen Szenen durchaus sinnvoll sein kann.

sätzlich bietet es sich an den Prozess so anzulegen, dass bei jedem Aufruf geprüft wird, ob auf Anbieterseite (in diesem Fall Copernicus) Szenen vorliegen, die im lokalen Index noch nicht gespeichert sind. Werden fehlende Szenen erkannt, werden diese nacheinander heruntergeladen und aufbereitet. In dieser Form kann der Prozess auch für das initiale Befüllen des Datenbestandes eingerichtet werden.

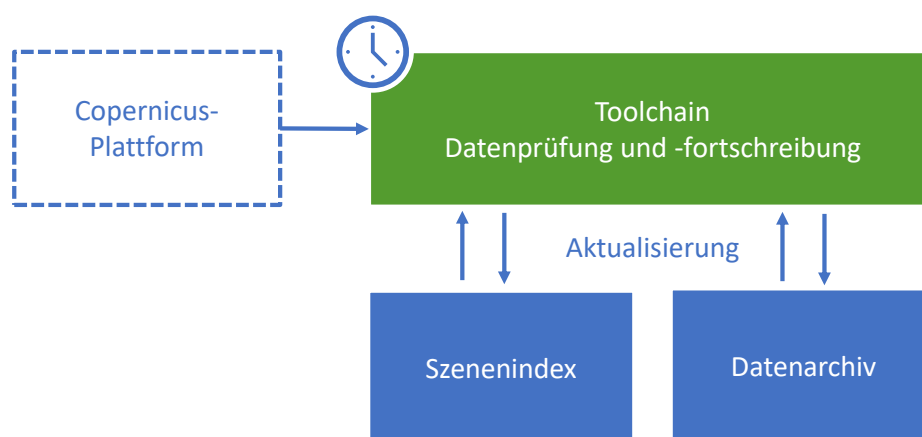


Abbildung 7: Übernahme und Vorverarbeitung der Senstinel-Daten für die ADP-SN

Die notwendigen Berechnungen für das jeweilige Datenprodukt lassen sich Kapitel 4.2 entnehmen. Da die Eingangsdaten für alle Indizes gleich sind, kann die Berechnung szenenweise in einem Durchgang erfolgen. Auch die Wolkenmaske muss lediglich einmal extrahiert werden. Als Zielformat sollen Dateien im GeoTiff-Format im originalen Raumbezugssystem erzeugt werden. Zusätzliche Raumbezugssysteme (z. B. UTM32/ETRS89 oder WebMercator sind ggf. im Zuge nachgelagerter Anwendungen bzw. Datendienste) bereitzustellen.

5.2 Bereitstellung von Datenprodukten in Diensten und standardisierten Datenformaten

Nachgelagerte Anwendungen benötigen Schnittstellen, um auf die bereitgestellten Daten zuzugreifen. Typische Desktop-GIS können die Daten z. B. über die einschlägigen OGC-Diensteschnittstellen (WMS, WCS, künftig ggf. auch via OGC API) einbinden. Als neuere Alternative kommt inzwischen auch vermehrt Cloud Optimized GeoTiff (COG) zum Einsatz. Die klassischen OGC-Dienste benötigen zusätzliche Server-Infrastruktur (z. B. Geoserver, Mapserver), für die Bereitstellung von COG reicht ein einfacher Webserver in der Regel aus. Parallel dazu sollten die Daten im Download angeboten werden, sodass sie für anspruchsvollere Aufgaben auch offline bzw. lokal zur Verfügung stehen. Zielgruppe für diese Art der Datenbereitstellung sind vorwiegend technisch erfahrene Angestellte in landwirtschaftlichen Betrieben und beratende Unternehmen im Bereich der Landwirtschaft.

Um die Datensätze über das Web auffindbar zu machen, sollte eine gängige Katalog- oder Portallösung eingebunden werden. Insbesondere ist abzustimmen, ob eine Kataloglösung des LfULG oder des

GeoSN mitgenutzt werden kann. Sollte für die Geodaten-Anwendung die Einrichtung eines eigenen Katalogs erforderlich werden, ist der Einsatz gängiger, frei verfügbarer Kataloglösungen (z. B. CKAN) und mit Unterstützung der STAC¹⁸- und OpenSearch¹⁹-Spezifikationen zu erwägen.

Aufgrund der technischen Randbedingungen der Datenerfassung ist es voraussichtlich erforderlich, jede Szene als eigene Entität im jeweiligen Dienst zu pflegen. Eine ggf. erforderliche Mosaikierung muss dann in der nachgelagerten Anwendung erfolgen. Grundsätzlich entscheidet die Art der Nutzung und der vorherrschenden Witterung darüber, ob es beispielsweise akzeptabel ist, die Daten aus zwei aufeinanderfolgenden Tagen überlagert darzustellen und damit eine größere Fläche abzudecken.

5.3 Aufbau einer Knowledge Base für Landwirte zu den Datenprodukten

Das Wissen um den Einsatz fernerkundlicher Datenprodukte in der landwirtschaftlichen Praxis ist bei den Landwirten in unterschiedlicher Tiefe vorhanden. Einige Landwirte sind schon verstärkt mit diesen Datenprodukten in Kontakt gekommen und nutzen etablierte und weitverbreitete Indikatoren wie den NDVI vielleicht schon regelmäßig für bestimmte Aufgaben. Andere Landwirte wiederum haben kaum Erfahrungen mit derartigen Datenprodukten und binden im besten Fall landwirtschaftliche Beratungsunternehmen ein, die fernerkundliche Expertise haben und auf entsprechende Datenprodukte zurückgreifen.

Um möglichst vielen Nutzern in der Zielgruppe den Einsatz fernerkundlicher Datenprodukte zu ermöglichen und auch neueres und neuestes Wissen schneller und wissenschaftlich fundiert in die praktische Anwendung zu bringen, ist es sinnvoll eine Knowledge Base („Wissensbasis“) zur Nutzung fernerkundlicher Datenprodukte in der Landwirtschaft aufzubauen. Dafür kann und soll an bestehende Web-Portale und Informationsangebote angeknüpft werden. Gleichzeitig ist es aber auch erstrebenswert, diese Inhalte mit Datenangeboten zu verknüpfen, sodass landwirtschaftliche Akteure Erläuterungen und Nutzungshinweise zu fernerkundlichen Produkten innerhalb einzelner Anwendungen eines Geodatenportals erhalten. Die in Kapitel 4 erstellten „Steckbriefe“ für die einzelnen Indizes sowie die tabellarischen Ansichten zur Anwendung für einzelne Fruchtarten und Wachstumsphasen sind dafür die ersten inhaltlichen Grundlagen.

¹⁸ <https://stacs.spec.org>

¹⁹ <https://opensearch.org/>

5.4 Bereitstellung allgemeiner Web-Anwendungen für die Datenexploration

Komplementär zur Dienstinfrastruktur aus Kapitel 5.3 sollten die Fernerkundungsprodukte in einer allgemeinen Anwendung zur Datenexploration mit einer zeitgemäßen Nutzerinterface und hohem Bedienkomfort bereitgestellt werden, in der enthaltene Datensätze und Datenprodukte interaktiv recherchiert und dargestellt werden können.

So sind die Definitionen von Anforderungen an eine allgemeine Anwendung (z. B. Geodatenportal, Webinterface), um die Zielgruppe der landwirtschaftlichen Akteure adäquat zu bedienen nachfolgend aufgeführt:

- Eine Datenauswahl, die der Anwender spezifisch an seinen Bedarf anpassen kann, ist einer allgemeinen Datenpräsentation vorzuziehen, um den Fokus auf relevante Datensätze zu lenken.
- Um die an sich relativ abstrakten Datenprodukte in einen angemessenen landwirtschaftlichen Anwendungskontext zu rücken, ist eine interaktive und kontextsensitive Verknüpfung mit der in Kapitel 5.3 beschriebenen Knowledge Base sinnvoll und erforderlich.
- Eine flache hierarchische Gliederungsstruktur zur einfachen Orientierung innerhalb der Anwendung
- Anwenderorientierte Datenproduktbezeichnung
- Es ist eine möglichst intuitive Suchfunktion nach Datenprodukten vorzusehen und eine möglichst passende und zielgruppengerechte Verschlagwortung der Inhalte vorzunehmen.
- Der Zugriff auf aktuelle Datensätze soll leicht zugänglich sein. Ggf. ist eine Filterfunktion vorzusehen, die für einen gewählten Raumausschnitt (z. B. eine Ackerfläche oder ein größeres Gebiet) die verfügbaren Daten zeigt. Die Filterung soll sich dabei auch auf Inhalte der Datenprodukte beziehen, sodass z. B. für kleine Raumausschnitte solche Datensätze ausgeblendet werden, die über der relevanten Fläche nur NoData-Values (z. B. aufgrund lokaler Wolkenbedeckung) enthalten würden.
- Ein Stepping durch die Zeit, z. B. um schnell zwischen einer gewählten und zeitlich vorangegangenen bzw. nachfolgenden Szenen zu wechseln, soll leicht möglich sein.
- Satellitenszenen und Schläge sind räumlich begrenzte Gebiete. Unter Umständen kann es erforderlich sein, mehrere Satellitenszenen zu mosaikieren, um einen Schlag oder ein größeres Gebiet vollständig abzudecken. Da jede Szene einen eigenen Aufnahmezeitpunkt hat, und sich die Aufnahmezeitpunkte ggf. auch um einige Tage unterscheiden, muss dem Anwender überlassen werden, für

solche Fälle einen geeigneten „Überlagerungszeitraum“ zu wählen. Wie bereits in Kapitel 5.2 ausgeführt, ist dieser zulässige bzw. sinnvolle Zeitraum abhängig von der Auswerteaufgabe und der Witterung²⁰ im Aufnahmezeitraum.

- Einzelne Bereiche von Satellitenaufnahmen sind häufig von mehr oder weniger starker Bewölkung bedeckt. Diese Wolkendecke hat Einfluss auf die Interpretierbarkeit der Daten und auch auf die „Güte“ der daraus abgeleiteten Indizes. Pauschal einen Schwellwert abzuleiten ist problematisch, unter anderem auch deshalb, weil Werte an einzelnen Pixel aufgrund unterschiedlicher Bewölkungsdichte nicht zwangsläufig vergleichbar sind. Aus diesem Grund sollte (1) die räumlich aufgelöste Bewölkungsinformation als Overlay zum jeweiligen Datenprodukt mit zuschaltbar sein, (2) Gebiete mit erhöhter Wolkendichte für unterfahrene Nutzer mit einer Warnung markiert werden und (3) in der Vorauswahl eine Filterung nach der Bewölkungsdichte im gewünschten Gebiet möglich sein²¹.
- Pixel, die mit einer dichten Wolkendecke belegt sind, sollten im Viewer vollständig maskiert werden.

5.5 Bereitstellung kontextspezifischer Anwendungen, Empfehlungswerkzeuge und Apps

Klassische Kartenanwendungen und GIS- oder GIS-ähnliche Software für Desktop-Umgebungen und Internetbrowser sind für Fachnutzer Stand der Technik. Auch Landwirte nutzen einzelne Fach- und Expertensysteme, um den landwirtschaftlichen Betrieb zu organisieren und zu planen. Ein Trend der letzten Jahre, der stark durch die Industrie getrieben wird, ist der Aufbau sog. Farm Management Information Systems (FMIS)²², in denen betrieblichen Informationen gebündelt und an zentraler Stelle vorliegen. Dem gegenüber werden Landwirten zunehmenden Anzahl digitale Werkzeuge von Herstellern landwirtschaftlicher Maschinen und von Agrardienstleistern bereitgestellt. Werkzeuge von Landmaschinenherstellern ermöglichen z. B. die Übertragung von räumlich aufgelösten Daten zur Ausbringung von Saatgut, Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln auf landwirtschaftliches Gerät. Digitale Lösungen von Agrardienstleistern und technischer Geräte bieten u. a. Funktionen zur Abschätzung von Erträgen oder zur Bewertung von Trockenstress.

²⁰ Zeitlich aufgelöste Informationen zur Witterung und zum Niederschlagsgeschehen sind nicht zuletzt vor diesem Hintergrund wertvolle Kontextgrößen, deren Einbindung ggf. sinnvoll sein könnte.

²¹ Hierfür reicht es nicht aus, den Gesamtbewölkungsgrad der Szene zu verwenden. Aus Nutzersicht ist eine Filterung innerhalb des betrachteten Gebietes sinnvoll

²² Link zum Nachschlagewerk FarmWiki (<https://farmwiki.de/Glossar/F/FMIS>)

Alle diese Anwendungen bedienen unterschiedliche Nutzungskontexte, die in einigen Fällen auch Schnittmengen mit fernerkundlichen Datenprodukten haben. Für den Bereich der N-Düngung können z. B. aus flächendifferenzierten Verteilungen der beschriebenen Indizes teilschlagspezifische Verteilungen von Düngemitteln generiert werden, die nach entsprechender Konvertierung z. B. auch auf landwirtschaftliche Geräte aufgespielt werden können.

Eine weitere Anwendungsgruppe sind kontextspezifischen Vorschlags- und Entscheidungsunterstützungssysteme. Diese Art von Anwendungen haben den Charakter von Apps: Sie bieten in sehr engen Anwendungskontexten maßgeschneiderte Werkzeuge und Lösungen, die wenig Spielraum für Bedienungsfehler lassen und aufgrund ihres begrenzten Funktionsumfangs z. B. auch auf mobilen Endgeräten und Smartphones eingesetzt werden können.

Anhand der in Kapitel 4.3 tabellarischen Übersichten lässt sich z. B. eine geführte Anwendung entwickeln, die Landwirte hinsichtlich der Ausbringung von Stickstoffdünger berät und führt: Über die

- Auswahl der bewirtschafteten Flächen sowie
- die Angabe der dort stehenden Fruchtart und
- dem Wachstumsstadium

können auf Knopfdruck Auswertungen gerechnet und den Anwendern priorisiert nach ihrer Eignung präsentiert und vergleichend dargestellt werden.

6 Literaturverzeichnis

- ABENDROTH, LORI, ELMORE, ROGER, BOYER, MATTHEW UND MARLAY, STEPHANIE (2011): *IN CORN GROWTH AND DEVELOPMENT*.
- AGAM, NURIT, COHEN, Y., ALCHANATIS, VICTOR UND BEN-GAL, ALON (2013): „How sensitive is the CWSI to changes in solar radiation?“. *International Journal of Remote Sensing*. (34) (2013), 6109–6120. doi:10.1080/01431161.2013.793873
- AHDB (2023): *Oilseed rape growth guide*. Agriculture and Horticulture Development Board Verfügbar unter: [https://projectblue.blob.core.windows.net/media/Default/Imported%20Publication%20Docs/AHDB%20Cereals%20&%20Oilseeds/General/Oilseed%20rape%20growth%20guide%20\(2023\).pdf](https://projectblue.blob.core.windows.net/media/Default/Imported%20Publication%20Docs/AHDB%20Cereals%20&%20Oilseeds/General/Oilseed%20rape%20growth%20guide%20(2023).pdf) [12.09.2024].
- ALCHANATIS, VICTOR, COHEN, Y., COHEN, SHAUL, MOLLER, M., SPRINSTIN, M., MERON, MOSHE ET AL. (2010): „Evaluation of different approaches for estimating and mapping crop water status in cotton with thermal imaging“. *Precision Agriculture*. (11) (2010), 27–41. doi:10.1007/s11119-009-9111-7
- ALMEIDA-ÑAÚÑAY, ANDRÉS, TARQUIS ALFONSO, ANA, HERRERA, JUAN, PÉREZ-MARTÍN, ENRIQUE, PANCORBO, JOSE LUIS, RAYA-SERENO, MARÍA DOLORES ET AL. (2022): „Optimization of soil background removal to improve the prediction of wheat traits with UAV imagery“. *Computers and Electronics in Agriculture*. (205), 107559. doi:10.1016/j.compag.2022.107559
- AMIN, FAZAL, SHAH, FAKHRA, ULLAH, SAMI, SHAH, WADOOD, AHMED, IFTIKHAR, ALI, BABER ET AL. (2024): „The germination response of Zea mays L. to osmotic potentials across optimal temperatures via halo-thermal time model“. *Scientific Reports*. (14), Nr. 1 (2024), 3225. Nature Publishing Group doi:10.1038/s41598-024-53129-6
- ANTUNES DALDEGAN, G., GONZALEZ-ROGLICH, M., NOON, M. UND ZVOLEFF, A. I. (2020): „Assessing the performance of NDVI, 2-band EVI and MSAVI vegetation indices for land degradation monitoring across variable biomass cover at global scale.“, SY003-0008. Gehalten auf der AGU Fall Meeting Abstracts
- ARAÚJO-PAREDES, CLÁUDIO, PORTELA, FERNANDO, MENDES, SUSANA UND VALÍN, M. ISABEL (2022): „Using Aerial Thermal Imagery to Evaluate Water Status in Vitis vinifera cv. Loureiro“. *Sensors*. (22), Nr. 20 (2022), 8056. Multidisciplinary Digital Publishing Institute doi:10.3390/s22208056
- ARVALIS (2024): *Scales of corn stages*. Institut du végétal Verfügbar unter: https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/scales_of_corn_stages2467039553806431025.pdf [22.08.2024].
- BALDENHOFER, K. (1999): *Lexikon des Agrarraums*. (1. Aufl.). Gotha: Klett-Perthes.
- BALUJA, JAVIER, DIAGO, MARIA P., BALDA, PEDRO, ZORER, ROBERTO, MEGGIO, FRANCO, MORALES, FERMIN et al. (2012): „Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV)“. *Irrigation Science*. (30), Nr. 6 (2012), 511–522. doi:10.1007/s00271-012-0382-9
- BARET, F, HOULÈS, V UND GUÉRIF, M (2007): „Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management“. *Journal of Experimental Botany*. (58)Nr. 4 (2007), 869–880. doi:10.1093/jxb/erl231

- BARNES, EDWARD, CLARKE, T.R., RICHARDS, S.E., COLAIZZI, PAUL, HABERLAND, JULIO, KOSTRZEWSKI, M. et al. (2000): „Coincident detection of crop water stress, nitrogen status, and canopy density using ground based multispectral data“.
- BAUER, JAN (2019): Drahtlose Sensornetze zur Erfassung des Blattflächenindex in der Präzisionslandwirtschaft. Osnabrück: Universität Osnabrück Verfügbar unter: <https://osnadocs.ub.uni-osnabrueck.de/handle/urn:nbn:de:gbv:700-202007173328> [15.11.2024].
- BENITO, ROSA M., CHERIFI, CHANTAL, CHERIFI, HOCINE, MORO, ESTEBAN, ROCHA, LUIS MATEUS UND SALES-PARDO, MARTA (Hrsg.) (2021): *Complex Networks & Their Applications IX: Volume 1, Proceedings of the Ninth International Conference on Complex Networks and Their Applications COMPLEX NETWORKS 2020*. Reihe: Studies in Computational Intelligence (Band 943). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-65347-7
- BGR (2024a): Ackerbauliches Ertragspotential der Böden in Deutschland 1:1.000.000. Verfügbar unter: <https://geoportal.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoportal/index.html?lang=de#/data-sets/portal/3DBC11EE-81E9-41A2-916E-1281DDD6C7A8> [21.11.2024].
- BGR (2024b): Allgemeine Geschäftsbedingungen. Verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/produkte_agb.html [21.11.2024].
- BITTENCOURT, MÁRIO (23.05.2024): Resampling of the Red Edge for NDRE calculation in Sentinel-2. *Medium*. Verfügbar unter: <https://medium.com/@mariovisk/resampling-of-the-red-edge-for-nd-re-calculation-in-sentinel-2-a07e65343e56> [29.08.2024].
- BOIARSKII, BORIS UND HASEGAWA, HIDEO (2019): „Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content“ *JOURNAL OF MECHANICS OF CONTINUA AND MATHEMATICAL SCIENCES*. (spl1) (2019). doi:10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003
- BRADEN, HARALD (2012): „The model AMBETI - A detailed description of a soil-plant-atmosphere model“ Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/monthly/frost_depth/AMBETI.pdf [21.11.2024].
- BRÄUNIG, ARNDT (2023): „Erläuterung der Datenfelder: Bodenschätzung Flächendaten“. Verfügbar unter: https://luis.sachsen.de/boden/download/Bodenschaetzungsdaten_Erlaeuterung_202302.pdf [18.11.2024].
- BROWN, J. CHRISTOPHER, JEPSON, WENDY, KASTENS, JUDE, WARDLOW, BRIAN, LOMAS, J. UND PRICE, KEVIN (2007): „Multitemporal, Moderate-Spatial-Resolution Remote Sensing of Modern Agricultural Production and Land Modification in the Brazilian Amazon“. *GIScience & Remote Sensing*. (44) (2007), 117–148. doi:10.2747/1548-1603.44.2.117
- BUGGLE, SONJA, ANTER, JANO, HEIDECHE, CLAUDIA, LANGE, STEFAN, RÖTTCHER, KLAUS UND BITTNER, FLORIAN (2018): Bewässerung in der Landwirtschaft Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg Field irrigation in agriculture – *Proceedings from an expert conference held on 11th/12th September 2017 in Suderburg*. doi:10.3220/WP1515755414000
- CAMMARANO, DAVIDE, FITZGERALD, GLENN, BASSO, BRUNO, O’LEARY, GARRY, CHEN, DELI, GRACE, PETER ET AL. (2011): „Use of the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) for Remote Estimation of Wheat Nitrogen

- Content in Rainfed Environments“. *Agronomy Journal*. (103)Nr. 6 (2011), 1597–1603. doi:10.2134/agronj2011.0124
- CLARKE, T.R., MORAN, M.S., BARNES, E.M., PINTER, P.J. UND QI, J. (2001): Planar domain indices: a method for measuring a quality of a single component in two-component pixels. *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No.01CH37217)*. (Band 3, S. 1279–1281). Gehalten auf der IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, NSW, Australia: IEEE. doi:10.1109/IGARSS.2001.976818
- CLIMATE SERVICE CENTER (GERICS) (2024): „Vergleichendes Lexikon - Dürre, Index“ Verfügbar unter: https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/062862/index.php.de [05.12.2024].
- CLMS (2024): „Copernicus Land Monitoring Service“ Verfügbar unter: <https://land.copernicus.eu/en> [14.11.2024].
- COPERNICUS (2024): „SentiWiki: Sentinel-2“ Verfügbar unter: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/sentinel-2> [14.11.2024].
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (o. J.): „CDC (Climate Data Center)“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html [21.11.2024].
- DLR - Earth Observation Center (EOC) (2024): „Leaf Area Index (LAI)“. Verfügbar unter: <https://www.dlr.de/de/eoc/forschung-transfer/projekte-und-missionen/timeline/produkte/landoberflache/leaf-area-index-lai> [15.11.2024].
- DÖHLER, H. (2009): *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. (14. Aufl.). Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL).
- DORAISWAMY, PAUL, MOULIN, SOPHIE, COOK, PAUL UND STERN, ALAN (2003): „Crop Yield Assessment from Remote Sensing“. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. (69) (2003), 665–674. doi:10.14358/PERS.69.6.665
- DWD (2022a): „Erläuterungen zur Bodentemperatur“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/basis_bodentemperatur_doku.html?nn=16102 [21.11.2024].
- DWD (2022b): „Erläuterungen zum Standardized Precipitation Index (SPI)“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/spi_doku.html [01.12.2024].
- DWD (2024a): „Bodentemperatur in 5 cm (Deutschlandkarte)“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/bodentemperatur5_dl/bodentemperatur5dl.html [28.05.2024].
- DWD (2024b): „CDC (Climate Data Center)“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html [21.11.2024].
- DWD (2024c): „Häufig gestellte Fragen - Open Data“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/faqs_opendata.html# [18.11.2024].

- DWD (2024d): „Bodenfeuchteviewer“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/bofeu_viewer/bofeuviewer.html [18.11.2024].
- DWD (2024e): „Dokumentation AMBAV 2.0 (v.1.3)“ Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/ambav-20_v13_doku.html?nn=732680 [18.11.2024].
- DWD (2024f): „Wetter- und Klimalexikon - Sonnenscheindauer“ Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=102532&lv2=102248> [05.12.2024].
- DWD Climate Data Center (CDC) (2018): Datensatzbeschreibung - Raster der Monatssumme der Sonnenscheindauer für Deutschland (v1.0). Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/monthly/sunshine_duration/BESCHREIBUNG_gridsgermany_monthly_sunshine_duration_de.pdf [19.11.2024].
- DWD Climate Data Center (CDC) (2021a): Datensatzbeschreibung - Tägliche Raster der mittleren Bodenfeuchte unter Mais für Deutschland (v2.0). Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/soil_moist_layers/maize/BESCHREIBUNG_GRD_DEU_P1D_BF_MRB_de.pdf [18.11.2024].
- DWD Climate Data Center (CDC) (2021b): Datensatzbeschreibung - Tägliche Raster der mittleren Bodenfeuchte unter Gras für Deutschland (v2.0). Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/soil_moist_layers/grass/BESCHREIBUNG_GRD_DEU_P1D_BF_GRB_de.pdf [18.11.2024].
- DWD Climate Data Center (CDC) (2021c): Datensatzbeschreibung - Tägliche Raster der mittleren Bodenfeuchte unter Weizen für Deutschland (v2.0). Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/daily/soil_moist_layers/winterwheat/BESCHREIBUNG_GRD_DEU_P1D_BF_WRB_de.pdf [18.11.2024].
- EEA geospatial data catalogue (2021): „High Resolution Vegetation Phenology and Productivity: Normalized Difference Vegetation Index (raster 10m) - version 1 revision 1, Sep. 2021“. Verfügbar unter: <https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/srv/eng/catalog.search#/metadata/5d5f72ce-80bc>
- EL-SHIKHA, D.M., BARNES, E.M., CLARKE, T.R., HUNSAKER, D.J., HABERLAND, J.A., PINTER JR., P.J., ET AL. (2008): „Remote Sensing of Cotton Nitrogen Status Using the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI)“ *Transactions of the ASABE*. (51)Nr. 1 (2008), 73–82. doi:10.13031/2013.242284c90-80ed-f135596533e2 [05.12.2024].
- EOS Data Analytics (2023): „Normalized Difference Water Index (NDWI)“. Verfügbar unter: <https://eos.com/make-an-analysis/ndwi/> [18.11.2024].
- ESPINOZA, CARLOS, KHOT, LAV, SANKARAN, SINDHUJA UND JACOBY, PETE (2017): „High Resolution Multispectral and Thermal Remote Sensing-Based Water Stress Assessment in Subsurface Irrigated Grapevines“, *Remote Sensing*. (9) (2017), 961. doi:10.3390/rs9090961
- EUMETSAT (2024a): „Details of product - SDU - Sunshine Duration (Daily)“. Verfügbar unter: https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktDetails?eid=22193_22476&fid=36 [21.11.2024].

- EUMETSAT (2024b): „Details of product - SDU - Sunshine Duration (Monthly)“. Verfügbar unter: <https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktDetails?eid=22477&fid=36> [21.11.2024].
- EUMETSAT (2024c): „CM SAF Product navigator“. Verfügbar unter: <https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewProduktSearch> [05.12.2024].
- EUROPEAN SPACE AGENCY (2024): „MSAVI2 Algorithm Specification“, *Science Toolbox Exploitation Platform*. Verfügbar unter: <https://step.esa.int/main/wp-content/help/versions/10.0.0/snap-toolboxes/eu.esa.opt.opttbx.radiometric.indices.ui/msavi2/Msavi2AlgorithmSpecification.html> [10.07.2024].
- FAOUR, GHALEB, MARIO, MHAWAJ UND NAJEM, SANDRA (2015): „Regional Landsat-Based Drought Monitoring from 1982 to 2014“, *Climate*. (2015) (2015), 563–577. doi:10.3390/cli3030563
- FARG, ESLAM, ARAFAT, SAYED, ABD-ELWAHED, MOHAMMED UND EL-GINDY, AM (2012): „Estimation of Evapotranspiration ET_c and Crop Coefficient K_c of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data“. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. (15) (2012), 83–89. doi:10.1016/j.ejrs.2012.02.001
- FEHR, W. R UND CAVINESS, C. E. (1977): *Stages of soybean development*. Nr. 80. (S. 1–12)
- FILELLA, I. UND PENUELAS, J. (1994): „The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status“, *International Journal of Remote Sensing*. (15), Nr. 7 (1994), 1459–1470. Taylor & Francis doi:10.1080/01431169408954177
- FITZGERALD, G. J., RODRIGUEZ, D., CHRISTENSEN, L. K., BELFORD, R., SADRAS, V. O. UND CLARKE, T. R. (2006): „Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments“ *Precision Agriculture*. (7) Nr. 4 (2006), 233–248. doi:10.1007/s11119-006-9011-z
- Fitzgerald, GLENN, RODRIGUEZ, DANIEL UND O’LEARY, GARRY (2010): „Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI)“ *Field Crops Research*. (116) (2010), 318–324. doi:10.1016/j.fcr.2010.01.010
- FRAMPTON, WILL, DASH, JADUNANDAN, WATMOUGH, GARY UND MILTON, EDWARD (2013): „Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation“. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. (82) (2013), 83–92. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007
- FUENTE, CAROLINA PAÑITRUR-DE LA, VALDÉS-GÓMEZ, HECTOR, ROUDET, JEAN, VERDUGO-VÁSQUEZ, NICOLÁS, MIRABAL, YANERIS, LAURIE, V. FELIPE ET AL. (2020): „Vigor thresholded NDVI is a key early risk indicator of Botrytis bunch rot in vineyards“, *OENO One*. (54), Nr. 2 (2020), 279–297. doi:10.20870/oenone.2020.54.2.2954
- GALFORD, GILLIAN, MUSTARD, JOHN, MELILLO, JERRY, GENDRIN, A., CERRI, CARLOS UND CERRI, CARLOS EDUARDO (2008): „Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil“, *Remote Sensing of Environment*. (112) (2008), 576–587. doi:10.1016/j.rse.2007.05.017
- GAO, BO-CAI (1996): „NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space“, *Remote Sensing of Environment*. (58), Nr. 3 (1996), 257–266. doi:10.1016/S0034-4257(96)00067-3

- GAO, XIANG, HUETE, ALFREDO, NI, W UND MIURA, TOMOAKI (2000): „Optical-Biophysical Relationships of Vegetation Spectra Without Background Contamination“, *Remote Sensing of Environment*. (74) (2000), 609–620. doi:10.1016/S0034-4257(00)00150-4
- GATES, DAVID M., KEEGAN, HARRY J., SCHLETER, JOHN C. UND WEIDNER, VICTOR R. (1965): „Spectral Properties of Plants“, *Applied Optics*. (4), Nr. 1 (1965), 11–20. Optica Publishing Group doi:10.1364/AO.4.000011
- GAUTAM, DEEPAK UND PAGAY, VINAY (2020): „A Review of Current and Potential Applications of Remote Sensing to Study the Water Status of Horticultural Crops“, *Agronomy*. (10), Nr. 1 (2020), 140. doi:10.3390/agronomy10010140
- GESSNER, URSULA, REINERMANN, SOPHIE, ASAM, SARAH UND KUENZER, CLAUDIA (2023): „Assessment of Drought and Temperature-Related Effects on Vegetation in Germany Analyzing MODIS Time Series over 23 Years“. *Remote Sensing*. (15), Nr. 5428 (2023). Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/22/5428> [11.07.2024].
- GITELSON, ANATOLY A., MERZLYAK, MARK N. UND LICHTENTHALER, HARTMUT K. (1996): „Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm“. *Journal of Plant Physiology*. (148), Nr. 3 (1996), 501–508. doi:10.1016/S0176-1617(96)80285-9
- GITELSON, ANATOLY, KAUFMAN, YORAM UND MERZLYAK, MARK (1996): „Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS“. *Remote Sensing of Environment*. (58) (1996), 289–298. doi:10.1016/S0034-4257(96)00072-7
- GITELSON, ANATOLY A., WARDLOW, BRIAN D., KEYDAN, GALINA P. UND LEAVITT, BRYAN (2007): „An evaluation of MODIS 250-m data for green LAI estimation in crops“. *Geophysical Research Letters*. (34)Nr. 20 (2007). doi:10.1029/2007GL031620
- GITELSON, ANATOLY UND MERZLYAK, MARK (1998): „Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves“. *Advances in Space Research - ADV SPACE RES*. (22) (1998), 689–692. doi:10.1016/S0273-1177(97)01133-2
- GOIHL, SEBASTIAN (2023): „Determining the usefulness of the Copernicus High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity Product (HR-VPP) with official agricultural data on cropland in case of the 2018 drought in the Federal State of Saxony, Germany“. *Journal of Water and Climate Change*. (14), Nr. 11 (2023), 3931–3949. doi:10.2166/wcc.2023.501
- GRENDÖRFFER, GÖRRES (2022): *Grundlagen der landwirtschaftlichen Fernerkundung*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) Verfügbar unter: https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Pflanzenbau/Drohnenfernerkundung/Drohnenfernerkundung.pdf [15.11.2024].
- GU, YINGXIN, HUNT, ERIC, WARDLOW, BRIAN, BASARA, JEFFREY, BROWN, JESSLYN UND VERDIN, JAMES (2008): „Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data“. *Geophysical Research Letters*. (35) (2008). doi:10.1029/2008GL035772
- GUAN, SENLIN, FUKAMI, KOICHIRO, MATSUNAKA, HITOSHI, OKAMI, MIDORI, TANAKA, RYO, NAKANO, HIROSHI ET AL. (2019): „Assessing Correlation of High-Resolution NDVI with Fertilizer Application Level and Yield of Rice

- and Wheat Crops Using Small UAVs“ *Remote Sensing*. (11), Nr. 2 (2019), 112. Multidisciplinary Digital Publishing Institute doi:10.3390/rs11020112
- GUYOT, G. UND BARET, FREDERIC (1988): „Utilisation de la Haute Resolution Spectrale pour Suivre L’etat des Couverts Vegetaux“, *Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing Aussios, France, 18-22 January 1988*. (287) (1988), 279.
- GUYOT, G., FREDERIC, BARET UND MAJOR, DAVID (1988): „High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and the near infrared“, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. (11) (1988), 750–760.
- HABOUDANE, DRISS, MILLER, JOHN, PATTEY, ELIZABETH, ZARCO-TEJADA, PABLO UND STRACHAN, IAN (2004): „Hyperspectral vegetation indices and Novel Algorithms for Predicting Green LAI of crop canopies: Modeling and Validation in the Context of Precision Agriculture“. *Remote Sensing of Environment*. (90) (2004), 337–352. doi:10.1016/j.rse.2003.12.013
- HAGN, LUDWIG, SCHUSTER, JOHANNES, MITTERMAYER, MARTIN UND HÜLSBERGEN, KURT-JÜRGEN (2024): „A new method for satellite-based remote sensing analysis of plant-specific biomass yield patterns for precision farming applications“. *Precision Agriculture*. (2024). doi:10.1007/s11119-024-10144-x
- HELMAN, DAVID, BAHAT, IDAN, NETZER, YISHAI, BEN-GAL, ALON, ALCHANATIS, VICTOR, PEETERS, AVIVA ET AL. (2018): „Using Time Series of High-Resolution Planet Satellite Images to Monitor Grapevine Stem Water Potential in Commercial Vineyards“. *Remote Sensing*. (10) (2018). doi:10.3390/rs10101615
- HUANG, SHA, TANG, LINA, HUPY, JOSEPH P., WANG, YANG UND SHAO, GUOFAN (2021): „A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing“, *Journal of Forestry Research*. (32), Nr. 1 (2021), 1–6. doi:10.1007/s11676-020-01155-1
- HUETE, A, JUSTICE, C UND LIU, H (1994): „Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS“. *Remote Sensing of Environment*. (49), Nr. 3 (1994), 224–234. doi:10.1016/0034-4257(94)90018-3
- HUETE, A. R (1988): „A soil-adjusted vegetation index (SAVI)“, *Remote Sensing of Environment*. (25), Nr. 3 (1988), 295–309. doi:10.1016/0034-4257(88)90106-X
- HUETE, A. R., LIU, H. Q., BATCHILY, K. UND VAN LEEUWEN, W. (1997): „A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS“. *Remote Sensing of Environment*. (59), Nr. 3 (1997), 440–451. doi:10.1016/S0034-4257(96)00112-5
- HUETE, ALFREDO, DIDAN, K., MIURA, TOMOAKI, RODRIGUEZ, EDNA, GAO, X UND FERREIRA, L.G. (2002): „Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices“. *Remote Sensing of Environment*. (83) (2002), 195–213. doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2
- IDSO, SHERWOOD B. (1981): „A set of equations for full spectrum and 8- to 14- μ m and 10.5- to 12.5- μ m thermal radiation from cloudless skies“. *Water Resources Research*. (17), Nr. 2 (1981), 295–304. doi:10.1029/WR017i002p00295
- IMRAN, A. B., KHAN, K., ALI, N., AHMAD, N., ALI, A. UND SHAH, K. (2020): „Narrow band based and broadband derived vegetation indices using Sentinel-2 Imagery to estimate vegetation biomass“. *Global Journal of Environmental Science and Management*. (6), Nr. 1 (2020), 97–108. GJESM Publisher (Professor J. Nouri) doi:10.22034/GJESM.2020.01.08

- INES, AMOR, DAS, NARENDRA, HANSEN, JAMES UND NJOKU, ENI (2013): „Assimilation of remotely sensed soil moisture and vegetation with a crop simulation model for maize yield prediction“. *Remote Sensing of Environment*. (138) (2013), 149–164. doi:10.1016/j.rse.2013.07.018
- ITTERSUM, MARTIN K., LEFFELAAR, P.A, KEULEN, H, KROPFF, MARTIN, BASTIAANS, L. UND GOUDRIAAN, JAN (2003): „On approaches and applications of the Wageningen crop models“. *European Journal of Agronomy*. (18) (2003), 201–234. doi:10.1016/S1161-0301(02)00106-5
- JACKSON, R.D., IDSO, S., REGINATO, ROBERT UND PINTER, PAUL (1981): „Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator“. *Water Resources Research*. (17) (1981). doi:10.1029/WR017i004p01133
- JIN, HONGXIAO UND EKLUNDH, LARS (2014): „A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology“. *Remote Sensing of Environment*. (152) (2014), 512–525. doi:10.1016/j.rse.2014.07.010
- JONES, H. G. (1992): *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. (2. Aufl.). Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- JU, CHANG-HUA, TIAN, YONG-CHAO, YAO, XIA, CAO, WEI-XING, ZHU, YAN UND HANNAWAY, DAVID (2010): „Estimating Leaf Chlorophyll Content Using Red Edge Parameters“. *Pedosphere*. (20) (2010), 633–644. doi:10.1016/S1002-0160(10)60053-7
- KANDYLAKIS, ZACHARIAS, FALAGAS, ALEXANDROS, KARAKIZI, CHRISTINA UND KARANTZALOS, KONSTANTINOS (2020): „Water Stress Estimation in Vineyards from Aerial SWIR and Multispectral UAV Data“. *Remote Sensing*. (12), Nr. 15 (2020), 2499. Multidisciplinary Digital Publishing Institute doi:10.3390/rs12152499
- KAREEM, HAYDER, ATTAEE, MUAMMAR UND OMRAN, ZAINAB (2023): „Evaluation the Soil-Adjusted Vegetation Indices SAVI and MSAVI for Bristol City, United Kingdom using Landsat 8-OLI Through Geospatial Technology“. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. (24), Nr. 7 (2023), 89–97. doi:10.12912/27197050/169749
- KATIMBO, ABIA, RUDNICK, DARAN R., DEJONGE, KENDALL C., LO, TSZ HIM, QIAO, XIN, FRANZ, TRENTON E. ET AL. (2022): „Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics“. *Agricultural Water Management*. (266) (2022), 107575. doi:10.1016/j.agwat.2022.107575
- KAYA, YUNUSUND POLAT, NIZAR (2023): „A linear approach for wheat yield prediction by using different spectral vegetation indices“. *International Journal of Engineering and Geosciences*. (8)Nr. 1 (2023), 52–62. Murat YAKAR doi:10.26833/ijeg.1035037
- KAYAD, AHMED, RODRIGUES, FRANCELINO, NARANJO, SERGIO, SOZZI, MARCO, PIROTTI, FRANCESCO, MARINELLO, FRANCESCO ET AL. (2022): „Radiative transfer model inversion using high-resolution hyperspectral airborne imagery – Retrieving maize LAI to access biomass and grain yield“. *Field Crops Research*. (282) (2022), 108449. doi:10.1016/j.fcr.2022.108449
- KAYAD, AHMED, SOZZI, MARCO, GATTO, SIMONE, MARINELLO, FRANCESCO UND PIROTTI, FRANCESCO (2019): „Monitoring Within-Field Variability of Corn Yield using Sentinel-2 and Machine Learning Techniques“. *Remote Sensing*. (11), Nr. 23 (2019), 2873. Multidisciplinary Digital Publishing Institute doi:10.3390/rs11232873

- KAYAD, AHMED, SOZZI, MARCO, GATTO, SIMONE, WHELAN, BRETT, SARTORI, LUIGI UND MARINELLO, FRANCESCO (2021): „Ten years of corn yield dynamics at field scale under digital agriculture solutions: A case study from North Italy“. *Computers and Electronics in Agriculture*. (185) (2021), 106126. doi:10.1016/j.compag.2021.106126
- KERKECH, MOHAMED, HAFIANE, ADEL UND CANALS, R. (2018): „Deep leaning approach with colorimetric spaces and vegetation indices for vine diseases detection in UAV images“. *Computers and Electronics in Agriculture*. (155) (2018), 237–243. doi:10.1016/j.compag.2018.10.006
- KERRY, RUTH UND ESCOLÀ, ALEXANDRE (HRSG.) (2021): *Sensing Approaches for Precision Agriculture*. Reihe: Progress in Precision Agriculture. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-78431-7
- KHAEIM, HUSSEIN, KENDE, ZOLTÁN, JOLÁNKAI, MÁRTON, KOVÁCS, GERGŐ PÉTER, GYURICZA, CSABA UND TARNAWA, ÁKOS (2022): „Impact of Temperature and Water on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (*Zea mays* L.)“ *Agronomy*. (12), Nr. 2 (2022), 397. Multidisciplinary Digital Publishing Institute doi:10.3390/agronomy12020397
- KIM, KYEONG, SHAWON, MD RAYHAN, AN, JIN, LEE, HYOUN, KWON, DONG, HWANG, IN-CHUL ET AL. (2022): „Effect of Shade Screen on Sap Flow, Chlorophyll Fluorescence, NDVI, Plant Growth and Fruit Characteristics of Cultivated Paprika in Greenhouse“. *Agriculture*. (12) (2022), 1405. doi:10.3390/agriculture12091405
- KOGAN, FELIX N. (1995): „Droughts of the Late 1980s in the United States as Derived from NOAA Polar-Orbiting Satellite Data“ *Bulletin of the American Meteorological Society*. (76) Nr. 5 (1995), 655–668. American Meteorological Society. doi:10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2
- KOGAN, FELIX N. (1997): „Global Drought Watch from Space“. *Bulletin of the American Meteorological Society*. (78), Nr. 4 (1997), 621–636. American Meteorological Society. doi:10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2
- KUMAR, ROHINI, SAMANIEGO, LUIS UND ATTINGER, SABINE (2013): „Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations“. *Water Resources Research*. (49) Nr. 1 (2013), 360–379. doi:10.1029/2012WR012195
- LARRINAGA, ASIER R. UND BROTONS, LLUÍS (2019): „Greenness Indices from a Low-Cost UAV Imagery as Tools for Monitoring Post-Fire Forest Recovery“. *Drones*. (3) (2019), 6. doi:10.3390/drones3010006
- LFULG (2024a): „LUIS-Portal - Bodenschätzung“, Verfügbar unter: <https://luis.sachsen.de/boden/bodenschaetzung.html> [18.11.2024].
- LFULG (2024b): „LUIS-Portal - Bodenkarte 1:50.000“, Verfügbar unter: <https://luis.sachsen.de/boden/bk50.html> [18.11.2024].
- LFULG (2024c): „LUIS-Portal - Erosionsgefährdungskarten“, Verfügbar unter: <https://luis.sachsen.de/boden/erosion.html> [18.11.2024].
- LI, FEI, MIAO, YUXIN, GUOHUI, FENG, YUAN, FEI, YUE, SHANCHAO, GAO, XIAOWEI ET AL. (2014): „Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices“ *Field Crops Research*. (157) (2014), 111–123. doi:10.1016/j.fcr.2013.12.018

- LILIENTHAL, HOLGER (2014): „Optische Sensoren in der Landwirtschaft: Grundlagen und Konzepte“, *Journal für Kulturpflanzen* 66(2) 2014. (2014), 988 KB, 34–41. Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen doi:10.5073/JFK.2014.02.01
- LOUCKS, PETE, BEEK, EELCO, STEDINGER, JERY, DIJKMAN, JOZEF UND VILLARS, MONIQUE (2005): *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models And Applications*. UNESCO.
- MAGNEY, TROY, EITEL, JAN UND VIERLING, LEE (2017): „Mapping wheat nitrogen uptake from RapidEye vegetation indices“. *Precision Agriculture*. (18) (2017), 429–451. doi:10.1007/s11119-016-9463-8
- MAIDL, FRANZ-XAVER, SPICKER, ANDREAS, WENG, ANDREAS UND HÜLSBERGEN, KURT-JÜRGEN (2019): *Ableitung des teilflächenspezifischen Kornertrags von Getreide aus Reflexionsdaten*. Bonn: Gesellschaft für Informatik
- MARQUES KAI, PRISCILA, OLIVEIRA, BRUNA, VIEIRA, GABRIEL, SOARES, FABRIZIO UND COSTA, RONALDO (2021): *Effects of resampling image methods in sugarcane classification and the potential use of vegetation indices related to chlorophyll*. (S. 1531) doi:10.1109/COMPSAC51774.2021.00227
- MARSZALEK, MICHAEL, KÖRNER, MARCO UND SCHMIDHALTER, URS (2022): „Prediction of multi-year winter wheat yields at the field level with satellite and climatological data“. *Computers and Electronics in Agriculture*. (194) (2022), 106777. doi:10.1016/j.compag.2022.106777
- MARUSIG, DANIEL, PETRUZZELLIS, FRANCESCO, TOMASELLA, MARTINA, NAPOLITANO, ROSSELLA, ALTABELLI, ALFREDO UND NARDINI, ANDREA (2020): „Correlation of Field-Measured and Remotely Sensed Plant Water Status as a Tool to Monitor the Risk of Drought-Induced Forest Decline“. *Forests*. (11), Nr. 1 (2020), 77. doi:10.3390/f11010077
- MARX, ANDREAS (2024): „Dürremonitor Deutschland“ Verfügbar unter: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>
- MCKEE, THOMAS B, DOESKEN, NOLAN J UND KLEIST, JOHN (1993): The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. (S. 179–184). Gehalten auf der 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim
- MEERDINK, SUSAN K., HOOK, SIMON J., ROBERTS, DAR A. UND ABBOTT, ELSA A. (2019): „The ECOSTRESS spectral library version 1.0“, *Remote Sensing of Environment*. (230) (2019), 111196. doi:10.1016/j.rse.2019.05.015
- MEIER, UWE (2001): *Entwicklungsstadien mono-und dikotyler Pflanzen: BBCH Monografie*. (2. Aufl.). Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Verfügbar unter: https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00010429/BBCH-Skala_de.pdf [12.09.2024].
- MISTELE, B., GUTSER, R. UND SCHMIDHALTER, U. (2004): *Program book of the joint conference ICPA*. (S. 1187–1195). Minneapolis Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1304805/1304805.pdf> [17.11.2024].
- MOON, GWIHWAN (2024): „Optimizing Vegetation Index Calculations: The GNDVI Approach“, Verfügbar unter: <https://www.deepblock.net/blog/gndvi>

- MULLA, D.J. (2013): „Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps“, *Biosystems Engineering*. (114)Nr. 4 (2013), 358–371. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
- MUNZERT, M UND FRAHM, J (2006): *Pflanzliche Erzeugung-Grundlagen des Acker-und Pflanzenbaus-der guten fachlichen Praxis-der Verfahrenstechnik Produktions- und Verfahrenstechnik und Kulturpflanzen-Dauergrünland-Sonderkulturen-Nachwachsende Rohstoffe-Ökologischer Landbau-Naturschutz und Landschaftspflege*. (12. Aufl.). München: BVL Buchverlag GmbH & Co. KG.
- PACSKÓ, VIVIEN, BIRINYI, EDINA, PETRIK, OTTO UND BARCZA, ZOLTÁN (2024): Estimating onset of vegetation growth for croplands and grasslands using Copernicus HR-VPP phenology data.
- PALKA, MARLENE, MANSCHADI, AHMAD M., KOPPENSTEINER, LUKAS, NEUBAUER, T. UND FITZGERALD, G.J. (2021): „Evaluating the performance of the CCCI-CNI index for estimating N status of winter wheat“. *European Journal of Agronomy*. (130) (2021), 126346. doi:10.1016/j.eja.2021.126346
- PATIL, PRITAM P., JAGTAP, MEGHA P., KHATRI, NARENDRA, MADAN, HAKKA, VADDURI, ADITYA ABHIRAM UND PATODIA, TARUN (2024): „Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote sensing-based study“ *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. (9) (2024), 100573. doi:10.1016/j.cscee.2023.100573
- PEREYRA, GUSTAVO, PELLEGRINO, ANNE, GAUDIN, REMI UND FERRER, MILKA (2022): „Evaluation of site-specific management to optimise *Vitis vinifera* L. (cv. Tannat) production in a vineyard with high heterogeneity“, *OENO One*. (56)Nr. 3 (2022), 397–412. doi:10.20870/oenone.2022.56.3.5485
- POTGIETER, ANDRIES, APAN, ARMANDO, DUNN, PETER UND HAMMER, G. (2007): „Estimating crop area using seasonal time series of Enhanced Vegetation Index from MODIS satellite imagery“, *Australian Journal of Agricultural Research*. (58) (2007). doi:10.1071/AR06279
- POUSSIN, CHARLOTTE, MASSOT, ALEXANDRINE, GINZLER, CHRISTIAN, WEBER, DOMINIQUE, CHATENOUX, BRUNO, LACROIX, PIERRE ET AL. (2021): „Drying conditions in Switzerland – indication from a 35-year Landsat time-series analysis of vegetation water content estimates to support SDGs“ *Big Earth Data*. (5) (2021), 1–31. doi:10.1080/20964471.2021.1974681
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR, Y. H. UND SOROOSHIAN, S. (1994): „A modified soil adjusted vegetation index“. *Remote Sensing of Environment*. (48)Nr. 2 (1994), 119–126. doi:10.1016/0034-4257(94)90134-1
- RILEY, G. J. (1981): „Effects of high temperature on the germination of maize (*Zea mays* L.)“. *Planta*. (151)Nr. 1 (1981). doi:10.1007/BF00384239
- RODRIGUEZ, DUBASKA, FITZGERALD, GLENN, BELFORD, R. UND CHRISTENSEN, L. (2006): „Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts“. *Australian Journal of Agricultural Research*. (57) (2006). doi:10.1071/AR05361
- ROJAS, OSCAR, VRIELING, ANTON UND REMBOLD, FELIX (2011): „Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery“. *Remote Sensing of Environment*. (115) (2011). doi:10.1016/j.rse.2010.09.006

- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. UND DEERING, D.W. (1974): Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS-1 symposium NASA, NASA SP-351*. (Band DC, S. 309–317). Washington
- SAKAMOTO, TOSHIHIRO, NGUYEN, NHAN, OHNO, HIROYUKI, ISHITSUKA, NAOKI UND YOKOZAWA, MASAYUKI (2006): „Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers“. *Remote Sensing of Environment*. (100) (2006), 1–16. doi:10.1016/j.rse.2005.09.007
- SAMANIEGO, LUIS, KUMAR, ROHINI UND ATTINGER, SABINE (2010): „Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale“. *Water Resour. Res.* (46) (2010). doi:10.1029/2008WR007327
- SCHAUBERGER, BERNHARD, JÄGERMEYR, JONAS UND GORNOTT, CHRISTOPH (2020): „A systematic review of local to regional yield forecasting approaches and frequently used data resources“. *European Journal of Agronomy*. (120) (2020), 126153. doi:10.1016/j.eja.2020.126153
- SCHUSTER, JOHANNES, HAGN, LUDWIG, MITTERMAYER, MARTIN, MAIDL, FRANZ-XAVER UND HÜLSBERGEN, KURT-JÜRGEN (2023): „Using Remote and Proximal Sensing in Organic Agriculture to Assess Yield and Environmental Performance“. *Agronomy*. (13), Nr. 7 (2023), 1868. doi:10.3390/agronomy13071868
- SENTINEL HUB (2024): About sentinel-2 L2A data. Verfügbar unter: <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/>
- SENTINEL HUB (2024a): „Sentinel-2 L2A“. Verfügbar unter: <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/> [14.11.2024].
- SENTINEL HUB (2024b): „Custom scripts: Normalized difference vegetation index“. Verfügbar unter: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndvi/> [05.12.2024].
- SENTINEL HUB (2024c): „Landsat 8-9 Level 1“, Verfügbar unter: <https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/landsat-8/> [05.12.2024].
- SENTINEL HUB (2024d): „Custom scripts: Normalized Difference NIR/Rededge Normalized Difference Red-Edge (abbrv. NDRE)“. Verfügbar unter: https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/indexdb/id_223.js [15.11.2024].
- SENTINEL HUB (2024e): „Custom scripts: SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)“ Verfügbar unter: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/savi/> [05.12.2024].
- SENTINEL HUB (2024f): „EVI (Enhanced Vegetation Index)“ *Sentinel Hub custom scripts*. Verfügbar unter: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/evi/> [21.11.2024].
- SHOLIAH, RIZQI I., TRISASONGKO, BAMBANG H., SHIDDIQ, DIAR, IMAN, LA ODE S., KUSDARYANTO, SELAMET, MANIJO et al. (2016): „Identification of Agricultural Drought Extent Based on Vegetation Health Indices of Landsat Data: Case of Subang and Karawang, Indonesia“ (The 2nd International Symposium on LAPAN-IPB Satellite (LISAT) for Food Security and Environmental Monitoring). *Procedia Environmental Sciences*. (33) (2016), 14–20. doi:10.1016/j.proenv.2016.03.051
- SMETS, BRUNO, CAI, ZHANZHANG, EKLUND, LARS, TIAN, FENG, BONTE, KASPER, VAN HOOST, ROEL ET AL. (2021): *Copernicus Land Monitoring Service - HIGH RESOLUTION VEGETATION PHENOLOGY AND PRODUCTIVITY*

- (HR-VPP), *Daily Raw Vegetation Indices User Manual*. European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2021, European Environment Agency (EEA)
- SMETS, BRUNO, CAI, ZHANZHANG, EKLUND, LARS, TIAN, FENG, BONTE, KASPER, VAN HOOST, ROEL ET AL. (2023): *Copernicus Land Monitoring Service: High Resolution Vegetation Phenology and Product (HR-VPP) – Algorithm Theoretical Base Document*. VITO, LUND University Verfügbar unter: <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/algorithm-theoretical-base-document-for-vegetation-indices/@download/file> [15.11.2024].
- SÖDERSTRÖM, MATS, PIIKKI, KRISTIN, STENBERG, MARIA, STADIG, HENRIK UND MARTINSSON, JOHAN (2017): „Producing nitrogen (N) uptake maps in winter wheat by combining proximal crop measurements with Sentinel-2 and DMC satellite images in a decision support system for farmers“. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. (67), Nr. 7 (2017), 637–650. Taylor & Francis doi:10.1080/09064710.2017.1324044
- SONG, LIBING UND JIN, JIMING (2020): „Effects of Sunshine Hours and Daily Maximum Temperature Declines and Cultivar Replacements on Maize Growth and Yields“. *Agronomy*. (10) (2020), 1862. doi:10.3390/agronomy10121862
- SONOBE, REI, YAMAYA, YUKI, TANI, HIROSHI, WANG, XIUFENG, KOBAYASHI, NOBUYUKI UND MOCHIZUKI, KAN-ICHIRO (2018): „Crop classification from Sentinel-2-derived vegetation indices using ensemble learning“. *Journal of Applied Remote Sensing*. (12) Nr. 02 (2018), 1. doi:10.1117/1.JRS.12.026019
- STETTNER, MATTHIAS, MAIDL, FRANZ-XAVER, SCHWARZENSTEINER, JÜRGEN, HÜLSBERGEN, KURT-JÜRGEN UND BERNHARDT, HEINZ (2022): „Analysis of Nitrogen Uptake in Winter Wheat Using Sensor and Satellite Data for Site-Specific Fertilization“. *Agronomy*. (12), Nr. 6 (2022), 1455. Multidisciplinary Digital Publishing Institute doi:10.3390/agronomy12061455
- SULLIVAN, D. G., SHAW, J. N., MASK, P. L., RICKMAN, D., LUVALL, J. UND WERSINGER, J. M. (2004): „Evaluating Corn Nitrogen Variability via Remote-Sensed Data“. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. (35), Nr. 17–18 (2004), 2465–2483. Taylor & Francis. doi:10.1081/LCSS-200030339
- SYLVESTER-BRADLEY, R. (1985): „Revision of a code for stages of development in oilseed rape (*Brassica napus* L.)“. *Aspects of applied biology*. (1985).
- TANDA, G. UND CHIARABINI, V. (2019): „Use of multispectral and thermal imagery in precision viticulture“, *Journal of Physics: Conference Series*. (1224), Nr. 1 (2019), 012034. IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1224/1/012034
- THOBER, STEPHAN, CUNTZ, MATTHIAS, KELBLING, MATTHIAS, KUMAR, ROHINI, MAI, JULIANE UND SAMANIEGO, LUIS (2019): „The multiscale routing model mRM v1.0: simple river routing at resolutions from 1 to 50 km“. *Geoscientific Model Development*. (12), Nr. 6 (2019), 2501–2521. doi:10.5194/gmd-12-2501-2019
- TIAN, FENG, CAI, ZHANZHANG, JIN, HONGXIAO, HUFKENS, KOEN, SCHEIFINGER, HELFRIED, TAGESSON, TORBERN ET AL. (2021): „Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe“. *Remote Sensing of Environment*. (260) (2021), 112456. doi:10.1016/j.rse.2021.112456

- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2024a): „Are there any restrictions on the use or redistribution of Landsat data? | U.S. Geological Survey“. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/faqs/are-there-any-restrictions-use-or-redistribution-landsat-data> [15.11.2024].
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2024b): „EarthExplorer“. Verfügbar unter: <https://earthexplorer.usgs.gov/> [15.11.2024].
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2024c): „Copyrights and Credits“. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/information-policies-and-instructions/copyrights-and-credits> [15.11.2024].
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS) (2024d): „Landsat Enhanced Vegetation Index“. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index> [21.11.2024].
- VAN NIEL, THOMAS UND MCVICAR, TIM (2004): „Current and potential uses of optical remote sensing in rice-based irrigation systems: A review“. *Australian Journal of Agricultural Research*. (55) (2004), 155–185. doi:10.1071/AR03149
- VEYSI, SHADMAN, NASERI, ABD ALI, HAMZEH, SAEID UND BARTHOLOMEUS, HARM (2017): „A satellite based crop water stress index for irrigation scheduling in sugarcane fields“. *Agricultural Water Management*. (189) (2017), 70–86. doi:10.1016/j.agwat.2017.04.016
- VIDICAN, ROXANA, MĂLIŢĂ, ANAMARIA, RANTA, OVIDIU, MOLDOVAN, CRISTINA, MARIAN, OVIDIU, GHEŢE, ALEXANDRU ET AL. (2023): „Using Remote Sensing Vegetation Indices for the Discrimination and Monitoring of Agricultural Crops: A Critical Review“. *Agronomy*. (13), Nr. 12 (2023), 3040. Multidisciplinary Digital Publishing Institute doi:10.3390/agronomy13123040
- VOITIK, ANDRII, KRAVCHENKO, VASYL, PUSHKA, OLEXANDR, KUTKOVETSKA, TETYANA, SHCHUR, TARAS UND KOCIR, SŁAWOMIR (2023): „Comparison of NDVI, NDRE, MSAVI and NDSI Indices for Early Diagnosis of Crop Problems“. *Agricultural Engineering*. (27), Nr. 1 (2023), 47–57. doi:10.2478/agriceng-2023-0004
- WARDLOW, BRIAN UND EGBERT, STEPHEN (2010): „A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: a case study for southwest Kansas“. *International Journal of Remote Sensing*. (31) (2010), 805–830. doi:10.1080/01431160902897858
- WARDLOW, BRIAN, EGBERT, STEPHEN UND KASTENS, JUDE (2007): „Analysis of Time-Series MODIS 250 m Vegetation Index Data for Crop Classification in the U.S. Central Great Plains“. *Remote Sensing of Environment*. (108) (2007), 290–310. doi:10.1016/j.rse.2006.11.021
- WEKEO (2024): „WEKEO: The Copernicus DIAS Platform“, Verfügbar unter: <https://www.wekeo.eu/> [15.11.2024].
- WEST, HARRY, QUINN, NEVIL UND HORSWELL, MICHAEL (2019): „Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities“. *Remote Sensing of Environment*. (232) (2019), 111291. doi:10.1016/j.rse.2019.111291
- WOEBBECKE, D. M., MEYER, G. E., VON BARGEN, K. UND MORTENSEN, D. A. (1995): „Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions“. *Transactions of the ASAE*. (38) Nr. 1 (1995), 259–269. doi:10.13031/2013.27838
- WRIGHT, DAVID UND LENSSEN, ANDREW (2013): *Staging Soybean Development*. Department of Agronomy, Iowa State University

- YANG, C., EVERITT, J., BRADFORD, J. UND ESCOBAR, D. (2000): „Mapping grain sorghum growth and yield variations using airborne multispectral digital imagery“. *Transactions of the ASAE*. (43) (2000), 1927–1938. doi:10.13031/2013.3098.
- ZADOKS, J. C., CHANG, T. T. UND KONZAK, C. F. (1974): „A decimal code for the growth stages of cereals“ *Weed Research*. (14), Nr. 6 (1974), 415–421. doi:10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x
- ZENG, JINGYU, ZHOU, TAO, QU, YANPING, BENTO, VIRGÍLIO A., QI, JUNYU, XU, YIXIN ET AL. (2023): „An improved global vegetation health index dataset in detecting vegetation drought“. *Scientific Data*. (10) Nr. 1 (2023), 338. Nature Publishing Group doi:10.1038/s41597-023-02255-3
- ZHANG, D., ZHOU, X., ZHANG, J., LAN, Y., XU, C. UND LIANG, D. (2018): „Detection of rice sheath blight using an unmanned aerial system with high-resolution color and multispectral imaging“. *PLOS ONE*. (13) (2018), 0187470. doi:10.1371/journal.pone.0187470.
- ZHANG, MEINA, ZHOU, JIANFENG, SUDDUTH, KENNETH A. UND KITCHEN, NEWELL R. (2020): „Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery“. *Biosystems Engineering*. (189) (2020), 24–35. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.11.001
- ZHAO, Y. (2021): The segmentation of plants on RGB images with index-based color analysis. *2021 5th international conference on robotics and automation sciences (ICRAS)*. (S. 221–225). IEEE. doi:10.1109/ICRAS52289.2021.9476331.
- ZHOU, ZHENG, MAJEED, YAQOUB, DIVERRES NARANJO, GERALDINE UND GAMBACORTA, ELENA M. T. (2021): „Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications“. *Computers and Electronics in Agriculture*. (182) (2021), 106019. doi:10.1016/j.compag.2021.106019
- ZINKERNAGEL, J., MAESTRE, J., SERESTI, Y., S., INTRIGLIOLO, UND D. (2020): „New technologies and practical approaches to improve irrigation management of open field vegetable crops“. *Agricultural Water Management*. (242) (2020), 106404. doi:10.1016/j.agwat.2020.106404.

7 Projektbeteiligte

Folgende Personen sind am Projekt beteiligt:

Einrichtung	Name, Vorname	Org. Einheit	Rolle*
LfULG	Goihl, Sebastian	Ref. 22	PL
LfULG	Karrasch, Pierre	Ref. 22	PT
LfULG	Schurig, Michael	Ref. 72	PT
PIKobytes	Mendt, Jacob		PT
PIKobytes	Müller, Matthias		PT
PIKobytes	Rezaei, Pouria		PT
PIKobytes	Boedeker, Hannah		PT
EXAgT	Schmidt, Andreas		ePT
EXAgT	Grabo, Arnim		ePT
TU Dresden	Forkel, Matthias		ePT

* Projektsteuerer (PS), Projektleiter (PL), Projektteam (PT), Erweitertes Projektteam / Extern (ePT)

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: + 49 351 2612-0

Telefax: + 49 351 2612-1099

E-Mail: Poststelle.LfULG@smekul.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

Autor:

PIKobytes GmbH

Zittauer Straße 16, 01099 Dresden

Telefon: +49 351 850 901 00

info@pikobytes.de

Redaktion:

Sebastian Goihl

Abteilung 2/Referat 22

August-Böckstiegel-Straße 3, 01326 Dresden-Pillnitz

Telefon: + 49 351 2612-2202

Telefax: + 49 351 261-0010

E-Mail: sebastian.goihl@smekul.sachsen.de

Bildnachweis:

Titelbild: Collage (ESA Standard Lizenz; Foto Burkhard Lehmann)

Redaktionsschluss:

18.02.2025

ISSN:

1867-2868

Bestellservices:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de