LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

Monitoring von Cross-Compliance-Verpflichtungen in der Agrarförderung



3C | Monitoring von Cross-Compliance-Verpflichtungen in der Agrarförderung

Bericht

Dr. Pierre Karrasch, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG);
Nora Egli M. Sc. (LfULG); Prof. Dr. Matthias Forkel, TU Dresden, Professur für Umweltfernerkundung;
Daniel Kinalczyk M. Sc., TU Dresden, Professur für Umweltfernerkundung;
Eric Kosczor M. Sc., TU Dresden, Professur für Umweltfernerkundung;
Dr. Christine Wessollek , TU Dresden, Professur für Umweltfernerkundung

Förderkennzeichen: 50EW2208C

Laufzeit/Berichtszeitraum: 01.07.2023 – 28.02.2026

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
TU Dresden, Professur für Umweltfernerkundung

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **9**
Abstract **10**
1 Kurze Darstellung des Projektes **11**
1.1 Ziele & Aufgabenstellung 11
1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens 13
1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn 13
2 Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse **15**
2.1 Detaillierte Darstellung der Projektarbeit und der Projektergebnisse 15
2.1.1 Cross-Compliance-Analyse und Bewertung 15
2.1.2 Methoden- und Verfahrensentwicklung, Testung und Validierung 27
2.1.3 Implementierung und Dienstbereitstellung 52
2.1.4 Transfer in Verwaltungspraxis 67
2.2 Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes 67
2.2.1 Wirtschaftliche Verwertung: Nutzen für Verwaltungen 67
2.2.2 Wissenschaftliche Verwertung und Anschlussfähigkeit 68
Literaturverzeichnis **70**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Projektstruktur und der Arbeitspakete (AP1–AP5) mit Partnern, Datenquellen und Daten- sowie Implementierungsflüssen. 13
Abbildung 2: Schaubild des methodischen Vorgehens zur Anomaliedetektion in Dauergrünlandflächen.....31
Abbildung 3: Scatterplot mit mittleren IRECI-Werten und mittleren NDVI-Werten aller Dauergrünlandschläge in Sachsen am 15. Mai 2024. Die vom Algorithmus als Anomalie erkannten Datenpunkte sind in rot gekennzeichnet. 37
Abbildung 4: Lage der Untersuchungsregionen für die Feldarbeiten (Validierung) im Freistaat Sachsen.....38
Abbildung 5: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 23.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 31.07.2024 (Kategorie: Schleierwolken) 39
Abbildung 6: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 23.08.2024; Rechts: ..... Sentinel-2-Bild vom 29.07.2024 (Kategorie: Wolkenschatten) 40
Abbildung 7: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 23.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 31.07.2024 (Kategorie: Fehldetektion) 41
Abbildung 8: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 20.08.2024 (Kategorie: Wolkenschatten von Schleierwolke) 42
Abbildung 9: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 12.08.2024; (Kategorie: Nichthomogene Nutzung) 43
Abbildung 10: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme des südlichen Teils vom 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 10.08.2024 (roter Rahmen, Kategorie: Nichthomogene Nutzung) 44
Abbildung 11: .....Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Übersicht über den Gesamtschlag vom 30.08.2024; Mitte: Nahaufnahme der Nutzung (vmtl. Rübe); Rechts: Sentinel-2-Bild vom 12.08.2024 (Kategorie: Andere Nutzung) 44
Abbildung 12: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Zustand der baulichen Veränderung am 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 12.08.2024 (Kategorie: Andere Nutzung) 45
Abbildung 13: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Situation vor Ort am 08.11.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 26.10.2024 (Kategorie: Schlagschatten).....46
Abbildung 14: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Nahaufnahme des Schlages mit organischem Dünger; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 05.11.2024 (Kategorie: Düngung) 47
Abbildung 15: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Nutzung des Schlages am 08.11.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 26.10.2024 (Kategorie: Andere Nutzung) 48
Abbildung 16: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Temporär andere Nutzung des Schlages am 08.11.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 26.10.2024 (Kategorie: Andere Nutzung) 49
Abbildung 18: Startbildschirm des Dauergrünland-Monitors.....54
Abbildung 19: Prozess des Anlegens eines Monitoring-Auftrags 55

Abbildung 20: Möglichkeit der Einbindung von Web Map Services (WMS) für die Digitale Orthophotos der Bundesländer 56
Abbildung 21: Ergebnistabelle im Dashboard des DGL-Monitors 57
Abbildung 22: Detailansicht eines ausgewählten Schlages, der viermal im Monitoringzeitraum als Anomalie detektiert worden ist 58
Abbildung 23: Exportiertes PDF eines ausgewählten Schlages 61
Abbildung 24: Monitoring des gesamten Analyseprozesses (Jobliste) 62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für die Anomaliedetektion verwendete Vegetationsindizes 33

Abkürzungsverzeichnis

AK	Anforderungskategorie
AMS	Area Monitoring System
AP	Arbeitspaket
ARD	Analysis Ready Data
BfUL	Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
BOA	Bottom of Atmosphere
BSI	Bare Soil Index
CNN	Convolutional Neural Network
CODE-DE	Copernicus Data and Exploitation Platform – Deutschland
CSV	Comma-separated values
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DGL	Dauergrünland
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOY	Day of the Year / Tag im Jahr
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWSI	Disease Water-Stress Index
FFH	Fauna-Flora-Habitat(-Richtlinie)
FORCE	Framework for Operational Radiometric Correction for Environmental monitoring
FuE	Forschung und Entwicklung
GAEC	Good agricultural and environmental conditions
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GDDs	Growing Degree Days / Wachstumsgradtage
GeoSN	Sächsisches Landesamt für Geobasisinformationen

GLÖZ	Guter landwirtschaftlicher und ökologischer Zustand
GRVI	Green Red Vegetation Index
GTS	Grünlandtemperatursumme
HOSTRADA	Hochaufgelöster Stündlicher Rasterdatensatz für Deutschland
IALE	International Association for Landscape Ecology
InVeKoS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
IQR	Interquartile Range
IRECI	Inverted Red-Edge Chlorophyll Index
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LSTM	Long short-term memory
LVG	Lehr- und Versuchsgut
ML	Machine Learning
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
PDF	Portable Document Format
QAI	Quality Assurance Information
RGB	Rot-Grün-Blau
SaaS	Software-as-a-Service
SächsWG	Sächsisches Wassergesetz
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SVM	Support Vector Machine

TC_B	Tasseled Cap Brightness
TC_G	Tasseled Cap Greenness
TC_W	Tasseled Cap Whiteness
TZ	Teilziel
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VZÄ	Vollzeitäquivalent
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
VNIR	Visible and Near-Infrared
WMS	Web Map Service
WMTS	Web Map Tile Service

Zusammenfassung

Das Verbundvorhaben „3C | Monitoring von Cross Compliance Verpflichtungen in der Agrarförderung“ verfolgte das Ziel, die Kontrolle ausgewählter GLÖZ-Verpflichtungen durch den Einsatz von Copernicus-Daten, amtlichen Geodaten und modernen fernerkundlichen Analyseverfahren weiterzuentwickeln. Im Mittelpunkt stand die Frage, inwieweit satellitengestützte Monitoringansätze dazu beitragen können, fachlich relevante Veränderungen auf landwirtschaftlichen Flächen frühzeitig zu erkennen und damit bestehende Verwaltungsprozesse in der Agrarförderkontrolle zu unterstützen.

Zu Beginn des Projektes wurden die GLÖZ-Standards systematisch im Hinblick auf ihre fachliche Relevanz, rechtliche Einordnung und technische Eignung für ein satellitenbasiertes Monitoring bewertet. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Priorisierung geeigneter Anwendungsfälle. Einen Schwerpunkt bildete die Erhaltung von Dauergrünland nach GLÖZ 1. Für diesen Anwendungsfall wurde ein mehrstufiger methodischer Ansatz zur Detektion auffälliger Dauergrünlandflächen entwickelt, getestet und validiert. Die Methode basiert auf Sentinel-2-Daten, Vegetationsindizes und einem unüberwachten Verfahren zur Anomalieerkennung. Die Ergebnisse zeigen, dass auffällige Schläge zuverlässig identifiziert und für eine weitergehende fachliche Prüfung priorisiert werden können.

Die entwickelten Methoden wurden in eine webbasierte Anwendung, den Dauergrünland-Monitor, überführt und auf der Plattform CODE-DE bereitgestellt. Damit steht ein funktionsfähiges Werkzeug zur Verfügung, das die Auswertung großer Schlagdatensätze, die Durchführung von Monitoringaufträgen, die Visualisierung auffälliger Flächen sowie den Export von Ergebnissen unterstützt. Die enge Zusammenarbeit zwischen dem LfULG, der Professur für Umweltfernerkundung der TU Dresden, dem technischen Dienstleister und weiteren beteiligten Stellen war ein wesentlicher Erfolgsfaktor des Vorhabens.

Insgesamt konnten die Projektziele erreicht werden. Das Projekt hat gezeigt, dass satellitengestützte Verfahren ein hohes Potenzial für die Unterstützung verwaltungspraktischer Kontrollaufgaben besitzen. Zugleich wurde deutlich, dass der Transfer in den operativen Verwaltungsvollzug weiterer Erprobung, organisatorischer Einbindung und fachlicher Validierung bedarf. Die erzielten Ergebnisse bilden damit eine tragfähige Grundlage für künftige Weiterentwicklungen, insbesondere für eine Ausweitung auf weitere GLÖZ-Standards, andere Bundesländer und bestehende Fachverfahren der Agrarverwaltung.

Abstract

The joint research project “3C | Monitoring of Cross Compliance Obligations in Agricultural Shemes” aimed to further develop the monitoring of selected GAEC obligations through the use of Copernicus data, official geospatial data and advanced remote-sensing analysis methods. The central question was the extent to which satellite-based monitoring approaches can support the early detection of relevant changes on agricultural land and thereby strengthen existing administrative processes in agricultural subsidy control.

At the beginning of the project, the GAEC standards were systematically assessed with regard to their technical relevance, legal context and suitability for satellite-based monitoring. On this basis, suitable use cases were prioritised. A particular focus was placed on the maintenance of permanent grassland under GAEC 1. For this use case, a multi-stage methodological approach for detecting conspicuous permanent grassland parcels was developed, tested and validated. The procedure is based on Sentinel-2 data, vegetation indices and an unsupervised anomaly detection method. The results show that conspicuous parcels can be reliably identified and prioritised for further expert assessment.

The developed methods were transferred into a web-based application, the Permanent Grassland Monitor, and made available on the CODE-DE platform. This provides a tool that supports the analysis of large parcel datasets, the execution of monitoring tasks, the visualisation of conspicuous areas and the export of results. The close cooperation between LfULG, the Chair of Environmental Remote Sensing at TU Dresden, the technical service provider and other participating institutions was a key success factor of the project.

Overall, the project objectives were largely achieved. The project demonstrated that satellite-based methods have considerable potential to support administrative control tasks in practice. At the same time, it became clear that the transfer into operational administrative procedures requires further testing, organisational integration and expert validation. The results therefore provide a sound basis for future development, particularly with regard to extending the approach to additional GAEC standards, other federal states and existing specialist procedures within agricultural administration.

1 Kurze Darstellung des Projektes

Die nachfolgenden Abschnitte bieten zunächst eine kurze Darstellung des Vorhabens. Ziel dieses einleitenden Projektüberblicks ist es, die grundlegenden Aufgabenstellungen, Zielsetzungen, Rahmenbedingungen sowie die geplante Organisation und den Ablauf des Projektes darzustellen. Dieser erste Teil orientiert sich damit vor allem an den formellen und strukturellen Aspekten des Vorhabens und beschreibt die Projektarchitektur, die Verantwortlichkeiten sowie die vorgesehenen Arbeitsschritte in ihrer Gesamtheit. Eine vertiefte inhaltliche Auseinandersetzung mit den wissenschaftlichen Ergebnissen, den entwickelten Methoden und den erzielten Erkenntnissen erfolgt im folgenden Kapitel 2, in dem die tatsächliche Durchführung und die Ergebnisse des Projekts detailliert beschrieben werden.

1.1 Ziele & Aufgabenstellung

Die gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union verknüpft flächenbezogene Agrarzahlungen mit der Einhaltung von Anforderungen in den Bereichen Umwelt und Naturschutz, guter landwirtschaftlicher und ökologischer Zustand der Flächen sowie Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze. Diese Verpflichtungen werden als Cross Compliance bezeichnet und umfassen insbesondere die Standards zum guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand der Flächen, die sogenannten GLÖZ-Vorgaben. Zentral sind dabei die folgenden neun GLÖZ-Standards, die in der aktuellen Förderperiode ab 2023 gelten und den Erhalt landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand absichern sollen. Zu diesen Standards gehören:

- GLÖZ 1: Erhaltung von Dauergrünland
- GLÖZ 2: Schutz von Fachgebieten und Mooren
- GLÖZ 3: Verbot des Abbrennens von Stoppelfeldern
- GLÖZ 4: Schaffung von Pufferstreifen entlang von Gewässern
- GLÖZ 5: Mindestpraktiken der Bodenbewirtschaftung zur Begrenzung von Erosion
- GLÖZ 6: Mindestbodenbedeckung zur Vermeidung vegetationsloser Böden in sensiblen Zeiten
- GLÖZ 7: Fruchtwechsel auf Ackerland
- GLÖZ 8: Erhaltung von Landschaftselementen
- GLÖZ 9: Verbot der Umwandlung oder des Umpflügens von umweltsensiblem Dauergrünland in Natura 2000 Gebiet

Die Einhaltung dieser Standards ist eine zentrale Voraussetzung für die Gewährung von Fördermitteln und wird regelmäßig kontrolliert. Bisher erfolgt die Überprüfung in der Regel über Vor-Ort-Kontrollen in einem stichprobenbasierten Verfahren. Dabei müssen jährlich mindestens ein Prozent der Betriebe kontrolliert werden. Dieses Verfahren ist sehr personalintensiv und bindet erhebliche Ressourcen in den Verwaltungen der Länder. Mit der entsprechenden Verordnung der Europäischen Kommission

wurden Möglichkeiten eröffnet, dieses System weiterzuentwickeln (EU-Durchführungsverordnung 809/2014, Artikel 70). Verfahren der regelmäßigen und systematischen Beobachtung, Verfolgung und Bewertung von Förderkriterien, unter anderem auf Basis von Copernicus-Sentinel-Daten, rücken in den Fokus. Diese Daten erlauben eine flächendeckende und zeitlich dichte Überwachung landwirtschaftlicher Flächen.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Verbundvorhaben *3C | Monitoring von Cross Compliance Verpflichtungen in der Agrarförderung* das Ziel, die Kontrolle ausgewählter GLÖZ-Verpflichtungen auf eine moderne, datenbasierte Grundlage zu stellen. Auf Basis von Copernicus-Daten, ergänzenden amtlichen Geodaten und moderner Methoden des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz sollten GLÖZ-relevante Prüffragen beantwortet werden. Dabei wurden multisensorale und multitemporale Datensätze, insbesondere Sentinel-Daten sowie digitale Orthophotos und weitere landesweite Geodaten ausgewertet.

Die Ziele bzw. Aufgabenstellung des Vorhabens umfassten insbesondere:

- die Analyse und Bewertung der GLÖZ-Verpflichtungen im Hinblick auf ihre Eignung für ein satelliten- und datenbasiertes Monitoring sowie die Identifikation prioritärer Anwendungsfälle,
- die Organisation und Bereitstellung der für die Methodenentwicklung notwendigen amtlichen Daten und deren Aufbereitung für die Nutzung zusammen mit Copernicus-Daten,
- die Entwicklung, Testung und Validierung von Monitoringmethoden auf Basis aktueller Verfahren des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz,
- die Umsetzung dieser Methoden in ein praxistaugliches Werkzeug zur Kontrolle geeigneter GLÖZ-Verpflichtungen und die Bereitstellung als Dienst auf der Plattform CODE-DE sowie
- die Vorbereitung der Einbindung der erzielten Ergebnisse in die bestehenden Verwaltungsprozesse und den Transfer in die Verwaltungspraxis, auch über bestehende Behördennetzwerke und Copernicus Aktivitäten.

Das Projekt sollte damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Flächenmonitorings und der Kontrolle von Cross Compliance Verpflichtungen leisten. Es zielte darauf ab, perspektivisch den Aufwand für Vor-Ort-Kontrollen zu verringern, die Effizienz und Nachvollziehbarkeit der Kontrollen zu erhöhen und zugleich die Umsetzung von Umwelt- und Naturschutzzielen der Agrarförderung im Freistaat Sachsen und perspektivisch auch in anderen Bundesländern zu unterstützen.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Abbildung 1 veranschaulicht die Struktur des Projekts und die Vernetzung der Arbeitspakete (AP).

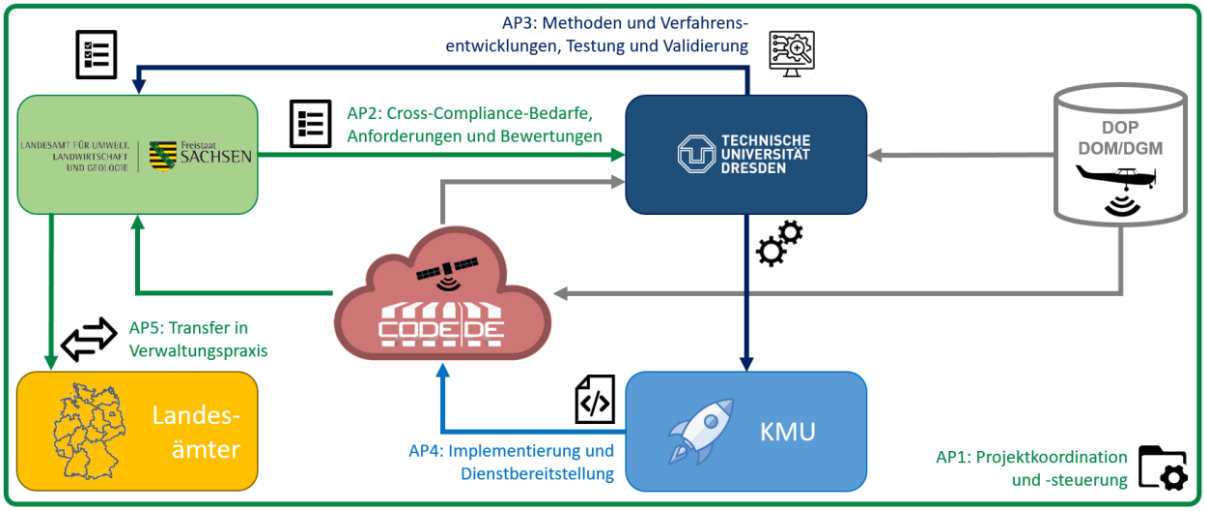


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Projektstruktur und der Arbeitspakete (AP1–AP5) mit Partnern, Datenquellen und Daten- sowie Implementierungsflüssen.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Projektbeginn

Zu Beginn des Vorhabens lag im Bereich der satellitengestützten Überwachung landwirtschaftlicher Aktivitäten bereits eine Reihe von Forschungsergebnissen und Entwicklungen vor, die vor allem durch die zunehmende Verfügbarkeit von Copernicus-Daten ermöglicht wurden. Verschiedene nationale und europäische Projekte hatten gezeigt, dass sich die hohe zeitliche Auflösung der Sentinel-Sensoren für die Erkennung landwirtschaftlicher Nutzungsänderungen und Bewirtschaftungsereignisse nutzen lassen. Beispiele hierfür sind Projekte zur automatisierten Identifikation von Zwischenfrüchten oder zur Erfassung von Mahd- und Bewirtschaftungsereignissen, die demonstrierten, dass aus Zeitreihen von Sentinel-1- und Sentinel-2-Daten belastbare Indikatoren für Prozesse in der Landwirtschaft gewonnen werden können (z. B. Sen4CAP[1]).

Im Jahr 2021 nahm zudem die Entwicklung des europäischen Area Monitoring Systems (AMS) an Bedeutung zu. Das AMS basiert auf der regelmäßigen und systematischen Auswertung von Sentinel-1-Radadaten und optischen Sentinel-2-Daten und wurde bereits von mehreren Mitgliedstaaten pilotiert. Es sollte perspektivisch die Überprüfung landwirtschaftlicher Aktivitäten und die Kontrolle förderrelevanter Anforderungen durch kontinuierliche Beobachtung unterstützen. Die zunehmende institutionelle Verankerung solcher Systeme unterstrich das Potenzial, Fernerkundung und automatisierte Analyseverfahren stärker für Kontrollaufgaben nutzbar zu machen.

[1] https://www.esa-sen4cap.org/

Parallel dazu entwickelten sich in den Jahren vor Projektbeginn Verfahren des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz zu zentralen methodischen Werkzeugen in der Fernerkundung. Machine-Learning- und KI-Methoden wurden zunehmend eingesetzt, um Vegetationszustände, Bodenfeuchte, Ernteerträge oder Nutzungsarten abzuleiten. Insbesondere Deep-Learning-Ansätze, darunter Convolutional Neural Networks (CNN), Fully Convolutional Networks, UNets sowie zeitbasierte Netzarchitekturen wie Recurrent Neural Networks, wurden verstärkt für hochaufgelöste Daten und Sentinel-Zeitreihen angewandt. Die Forschung zeigte, dass die fusionierte Nutzung von Sentinel-1- und Sentinel-2-Daten die Genauigkeit klassischer Einzelsensor-Ansätze deutlich übertreffen und eine robuste Grundlage für das Monitoring und Compliance-Anwendungen liefern kann.

Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Anforderungen an die Kontrolle der Cross-Compliance-Vorgaben teilweise über bestehende Anwendungen hinausgingen. Zwar existierten bereits Werkzeuge zur Kulturartenerkennung oder Mahddetektion, jedoch fehlten für spezifische GLÖZ-Anforderungen geeignete und validierte Verfahren. Herausforderungen ergaben sich insbesondere bei kleinräumigen Strukturen wie Pufferstreifen oder Landschaftselementen, deren räumliche Ausprägung häufig unterhalb der geometrischen Auflösung der Sentinel-Sensoren lag.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zu Projektbeginn eine solide wissenschaftliche und technische Basis vorlag, die jedoch für die spezifischen Anforderungen eines GLÖZ-orientierten Monitorings noch nicht in allen Bereichen ausreichend entwickelt war. Insbesondere die Kombination aus hoher zeitlicher und hoher räumlicher Auflösung sowie die Übertragung bestehender Verfahren auf GLÖZ-spezifische Fragestellungen stellten offene Aufgaben dar. Das Projekt setzte daher an der Schnittstelle zwischen bestehenden methodischen Fortschritten und den konkreten Bedarfen der Agrarförderverwaltung an.

2 Ausführliche Darstellung der Projektergebnisse

2.1 Detaillierte Darstellung der Projektarbeit und der Projektergebnisse

2.1.1 Cross-Compliance-Analyse und Bewertung

Die systematische Analyse der neun GLÖZ-Standards erfolgte auf Grundlage der für Sachsen geltenden rechtlichen Dokumente zur Konditionalität. Um sowohl die fachlichen Anforderungen der Landwirtschaftsverwaltung als auch die methodischen Möglichkeiten der Fernerkundung angemessen zu berücksichtigen, wurde die Bearbeitung von Beginn an interdisziplinär angelegt. Das Projektteam, bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern der Verwaltung sowie der fernerkundlichen Forschung an der TU Dresden, erarbeitete die Inhalte gemeinsam in mehreren Workshops. Als strukturierendes Arbeitsinstrument wurden sogenannte *GLÖZ-Steckbriefe* entwickelt. Jeder Steckbrief folgt einem einheitlichen Aufbau und umfasst folgende Elemente:

- **Kurzbeschreibung** des Standards mit den wesentlichen Regularien und Anforderungen
- **Prüffragen**, die in einem fernerkundlichen Monitoring zu beantworten wären
- **Forschungsfragen**, die sich aus den Prüffragen ableiten; differenziert nach der Perspektive des Forschungspartners (TU Dresden) und der Sichtweise der Landwirtschaftsverwaltung
- **Datenbedarfe** und Datenverantwortlichkeiten, die für eine Bearbeitung der Forschungsfragen erforderlich sind
- **Literaturrecherche** zum Stand der Forschung, dokumentiert in einer projektinternen Zotero-Literaturdatenbank
- **Methodische Ansätze** und Ideen, die als erste Kondensationskerne für spätere Entwicklungsarbeiten dienen, wobei eine detaillierte Ausarbeitung erst nach erfolgter Priorisierung der Standards erfolgt (vgl. Kapitel 2.1.1.10)
- **Interlinks** zwischen verschiedenen GLÖZ-Standards, sowohl hinsichtlich der Prüffragen als auch aus methodischer Sicht, um Synergien zu identifizieren und die Priorisierung zu unterstützen

Die nachfolgenden Abschnitte stellen die Ergebnisse dieser Analyse für jeden der neun GLÖZ-Standards dar und schließen mit einer zusammenfassenden Betrachtung der Priorisierung.

2.1.1.1 Erhaltung von Dauergrünland – GLÖZ 1

GLÖZ 1 betrifft die Erhaltung von Dauergrünland und verpflichtet landwirtschaftliche Betriebe dazu, bestehende Dauergrünlandflächen zu erhalten. Ein mechanischer Umbruch der Grasnarbe ist ohne Genehmigung nicht zulässig. Zulässig sind lediglich Pflegemaßnahmen, die die Grasnarbe nicht zerstören, beispielsweise Schleppen, Walzen, Striegeln oder eine Nachsaat. Eine Umwandlung in andere Nutzungsarten ist nur nach vorheriger Genehmigung erlaubt. Darüber hinaus bestehen Bagatellregelungen

und Flächengrenzen, die regeln, bis zu welcher Größe ein Umbruch möglich wäre, ohne die regionale Dauergrünlandbilanz zu beeinträchtigen.

Aus diesen Vorgaben ergeben sich mehrere **Prüffragen** für ein satellitenbasiertes Monitoring. Besonders relevant ist die Frage, ob ein Umbruchereignis auf einer Dauergrünlandfläche erkannt werden kann. Ebenso stellt sich die Frage, ob eine Umwandlung in eine andere Nutzung sichtbar wird und ob sich der aktuelle Status als Dauergrünland bestätigen lässt. Zusätzlich ist zu klären, ob Pflegemaßnahmen von genehmigungspflichtigen Maßnahmen unterschieden werden können, vor allem dann, wenn Veränderungen nur Teilflächen betreffen.

Die Analyse führt zu einer Reihe von **Forschungsfragen** aus fernerkundlicher und landwirtschaftlicher Sicht. Für die *Fernerkundung* ist maßgeblich, welche spektralen oder zeitlichen Veränderungen auf einen Umbruch hinweisen und wie sich diese von regulären Bewirtschaftungsmaßnahmen unterscheiden. Darüber hinaus ist zu prüfen, welche Rolle die jahreszeitliche Entwicklung der Vegetation für die Interpretation der Satellitendaten spielt. Auch die Frage, wie Beobachtungslücken durch Wolken, insbesondere in den Wintermonaten, überbrückt werden können und ob sich Veränderungen an Schlagrändern oder Teilflächen verlässlich erkennen lassen, ist zentral. Schließlich ist von Interesse, welche Datenarten eine robuste und kontinuierliche Analyse ermöglichen. Aus Sicht der *Landwirtschaft und der Verwaltung* ergeben sich weitere Fragen. Dazu gehört, welche Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Dauergrünland zu welchem Zeitpunkt üblich sind und wie diese sich im Vegetationsbild abzeichnen. Relevanz besitzt außerdem die Abgrenzung zwischen genehmigungsfreien Pflegemaßnahmen und genehmigungspflichtigen Eingriffen. Hinzu kommen betriebliche und rechtliche Besonderheiten, etwa bei der Führung von Ersatzflächen, sowie die Frage, wie stark regionale Bewirtschaftungspraktiken die Interpretation der Fernerkundungsdaten beeinflussen können.

Der **Datenbedarf** für GLÖZ 1 umfasst im Kern Sentinel 1 und Sentinel 2, amtliche Dauergrünlanddaten, Schlaggrenzen sowie digitale Orthophotos. Diese Datengrundlagen bilden die Basis für ein Monitoring, das sowohl zeitliche Veränderungen als auch strukturelle Merkmale der Flächen berücksichtigt.

2.1.1.2 Schutz von Feuchtgebieten und Mooren – GLÖZ 2

GLÖZ 2 umfasst den Schutz von Feuchtgebieten und Mooren. Grundlage ist eine vorgegebene Gebietskulisse, innerhalb derer besondere Anforderungen gelten. In diesen Bereichen ist die Umwandlung oder der Umbruch von Dauergrünland nicht gestattet. Auch auf anderen Flächen innerhalb dieser Kulisse sind Eingriffe, die den Wasserhaushalt oder die Bodenstruktur maßgeblich verändern, eingeschränkt. Dazu gehört insbesondere der Einsatz schwerer Maschinen, wenn dieser Eingriffe verursacht, die tiefer als etwa 30 Zentimeter in den Boden reichen. Ebenso ist die Auf- oder Übersandung von

Flächen untersagt. Die Regelungen beziehen sich auf den gesamten Feldblock, da Feuchtgebiete und Moore als hydrologisch zusammenhängende Einheiten betrachtet werden.

Aus diesen Vorgaben ergeben sich mehrere **Prüffragen** für ein satellitenbasiertes Monitoring. Zu klären ist vor allem, ob auf den betroffenen Flächen ein Umbruch oder eine tiefgreifende Bodenstörung stattgefunden hat. Ebenso stellt sich die Frage, ob der Bestand an Dauerkulturen innerhalb der Kulisse bestätigt werden kann oder ob Veränderungen in der Nutzung erkennbar sind. Darüber hinaus ergibt sich die übergeordnete Frage, ob sich potenzielle Eingriffe in die empfindlichen Böden oder die Vegetationsstruktur der Feuchtgebiete und Moore aus Fernerkundungsdaten ableiten lassen.

Die Analyse führt zu einer Reihe von **Forschungsfragen**. Aus Sicht der *Fernerkundung* ist zu prüfen, ob Verfahren existieren, die Bodenstörungen oder Auf- und Übersandungen in Feuchtgebieten zuverlässig erkennen können. Ebenso ist offen, ob die Detektion von Dauerkulturen über Sentinel-Daten ausreichend stabil ist und ob sich zeitlich abgestimmte Aufnahmen aus optischen oder radarbasierten Sensoren für die Beobachtung solcher Veränderungen eignen. Eine weitere Frage betrifft die Möglichkeit, aus Datensätzen mit niedrigerer zeitlicher oder räumlicher Auflösung dennoch belastbare Informationen abzuleiten, insbesondere wenn hochaufgelöste Orthophotos nur in größeren Intervallen verfügbar sind. Aus Sicht der *Landwirtschaft und der Verwaltung* stehen andere Aspekte im Vordergrund. Dazu gehört die Klärung, warum bestimmte Regelungen für Dauergrünland in GLÖZ 2 zusätzlich genannt sind und in welchem Umfang sie sich von GLÖZ 1 unterscheiden. Die Verwaltung benötigt außerdem eine fachliche Einordnung der Frage, welche Maschinenarten in betroffenen Gebieten zu relevanten Bodenveränderungen führen und wie diese Veränderungen typischerweise aussehen. Gleichzeitig besteht die Notwendigkeit, definitorisch zu klären, was unter Auf- oder Übersandung zu verstehen ist und welche Bedeutung diese Maßnahmen in der landwirtschaftlichen Praxis haben.

Der für GLÖZ 2 notwendige **Datenbedarf** entspricht im Kern den Anforderungen vieler anderer GLÖZ-Prüfungen. Entscheidend sind die Sentinel-1- und Sentinel-2-Daten sowie digitale Orthophotos zur Identifikation von Dauerkulturen oder auffälligen Bodenveränderungen. Ergänzend werden die amtlichen Gebietskulissen der Feuchtgebiete und Moore sowie Feldblockdaten benötigt.

2.1.1.3 Verbot des Abbrennens von Stoppelfeldern – GLÖZ 3

GLÖZ 3 betrifft das Verbot des Abbrennens von Stoppelfeldern. Das Abbrennen von Stroh oder Ernterückständen auf Ackerflächen ist grundsätzlich untersagt. Eine Ausnahme kann nur auf Antrag und bei Vorliegen besonderer Gründe genehmigt werden. Ziel des Standards ist es, Bodenerosion vorzubeugen, Bodenfunktionen zu erhalten und eine zusätzliche Belastung der Umwelt durch Rauch und Verbrennungsrückstände zu vermeiden. Für die Kontrolle spielt vor allem die Frage eine Rolle, ob ein

Brandereignis auf einer landwirtschaftlichen Fläche stattgefunden hat und ob sich die daraus entstehenden Veränderungen im Vegetations- oder Bodenmuster erkennen lassen.

Aus diesen Vorgaben ergibt sich im Wesentlichen eine zentrale **Prüffrage**. Zu prüfen ist, ob ein Brandereignis auf dem jeweiligen Schlag nachweisbar ist. Diese Frage umfasst sowohl die Erkennung des Brandes selbst als auch die Abgrenzung gegenüber anderen Bewirtschaftungsmaßnahmen, die ebenfalls zu plötzlichen Veränderungen in der Vegetationsdecke oder der Bodenstruktur führen können.

Die Analyse führt zu mehreren **Forschungsfragen** aus Sicht der Fernerkundung und der Landwirtschaft. Für die *Fernerkundung* ist von Bedeutung, ob geeignete Referenzdatenquellen für Brandereignisse verfügbar sind und ob sich zeitlich dichte Beobachtungsprogramme entwickeln lassen, die eine verlässliche Dokumentation ermöglichen. Zusätzlich stellt sich die Frage, wie gut sich Brandflächen von anderen Veränderungen unterscheiden lassen, etwa von Pflugereignissen oder Bodenbearbeitung. Auch die Möglichkeit, thermale Sensoren oder entsprechende Produkte einzubinden, spielt eine Rolle, insbesondere wenn zukünftige Sensoren oder externe Dienste genutzt werden können. Weiterhin ist zu klären, ob eine Analyse auf Teilflächen erforderlich ist, da Brandereignisse häufig nicht den gesamten Schlag betreffen. Aus Sicht der *Landwirtschaft und der Verwaltung* geht es darum, die fachliche Bedeutung des Verbots einzuordnen. Dabei steht die Frage im Vordergrund, auf welche Kulturen sich das Verbot bezieht und ob Brandspuren im Rahmen von Vor-Ort-Kontrollen ausreichend lange sichtbar bleiben. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie häufig solche Ereignisse in der Praxis auftreten und ob es verwaltungsseitig historische Daten oder Hinweise auf genehmigte Ausnahmefälle gibt.

Der **Datenbedarf** beschränkt sich im Kern auf Sentinel 1 und Sentinel 2 sowie auf ergänzende Datenquellen, die als Referenzen dienen können. Hinzu kommen Schlagdaten, um potenziell betroffene Flächen eindeutig identifizieren zu können.

2.1.1.4 Schaffung von Pufferstreifen entlang von Gewässern – GLÖZ 4

GLÖZ 4 regelt die Schaffung von Pufferstreifen entlang von Wasserläufen. An Fließgewässern und Standgewässern ist der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Düngemitteln in einem definierten Abstand zur Gewässerkante untersagt. Eine Bewirtschaftung der angrenzenden Flächen bleibt grundsätzlich zulässig, jedoch muss ein Mindestabstand eingehalten werden. Die EU-Vorgabe sieht einen Abstand von drei Metern vor, gemessen ab der Böschungsoberkante. In Sachsen gilt gemäß § 24 Abs. 3 Satz 1 Nr. 1 des Sächsischen Wassergesetzes (SächsWG) ein weitergehender Abstand von fünf Metern. Die Regelung dient dem Schutz der Gewässer vor Stoffeinträgen aus der landwirtschaftlichen Nutzung.

Die zentrale **Prüffrage** lautet, ob an Gewässern ein Pufferstreifen in mindestens ausreichender Breite nachgewiesen werden kann, bzw. ob der Nachweis einer Unterschreitung möglich ist. Diese Frage bezieht sich insbesondere auf die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln und erfordert eine zuverlässige Erfassung sowohl des Vorhandenseins als auch der Breite des Streifens.

Die Analyse führte zu verschiedenen **Forschungsfragen** aus Sicht der Fernerkundung und der Landwirtschaft. Für die *Fernerkundung* stellt sich vor allem die Herausforderung, dass die geforderten Streifenbreiten unterhalb der räumlichen Auflösung von Sentinel 2 liegen. Daraus ergibt sich die Frage, ob Verfahren der Subpixelklassifikation geeignet sind, um dennoch belastbare Aussagen zu treffen. Alternativ ist zu prüfen, ob digitale Orthophotos für die Ableitung von Pufferstreifen herangezogen werden können und ob deren zeitliche Auflösung für ein Monitoring ausreicht. Zusätzlich ist zu klären, inwieweit vorhandene Webdienste für Orthophotos nutzbar sind und welche geometrischen Genauigkeiten sie liefern. Auf Seiten der *Landwirtschaft und der Verwaltung* stellt sich die Frage, ob digitale Orthophotos fachlich geeignet sind, um die Einhaltung der Pufferstreifen zu überprüfen, oder ob die geringe zeitliche Verfügbarkeit dieser Daten ein Hindernis darstellt. Darüber hinaus ist zu klären, welche Referenzdaten zur Nichteinhaltung existieren und wie permanente Pufferstreifen in der Praxis dokumentiert werden.

Der **Datenbedarf** umfasst neben Sentinel 1 und Sentinel 2 vor allem digitale Orthophotos. Ergänzend sind Informationen zu Gewässerverläufen, Böschungsoberkanten und Gewässerbreiten erforderlich. Referenzdaten zu bestehenden Pufferstreifen sowie zu dokumentierten Verstößen wären für eine Validierung hilfreich.

Bei den ersten konzeptionellen Überlegungen wurde vorgeschlagen, die Prüfung in zwei Schritten vorzunehmen: zunächst die Frage, ob überhaupt ein Streifen vorhanden ist, und anschließend die Frage, ob dieser die erforderliche Breite aufweist. Weitere Ansätze betrafen die Möglichkeit, das Abstandsmaß variabel zu gestalten, um unterschiedliche Landesregelungen abbilden zu können, sowie den Einsatz von Verfahren zur spektralen Entmischung. Ob und wie diese Ansätze umgesetzt werden können, war Gegenstand der weiteren Projektarbeit.

2.1.1.5 Mindestpraktiken der Bodenbewirtschaftung zur Begrenzung von Erosion – GLÖZ 5

GLÖZ 5 betrifft Mindestpraktiken der Bodenbewirtschaftung zur Begrenzung von Erosion. Die Regelungen orientieren sich an einer Gebietskulisse, in der landwirtschaftliche Flächen je nach Grad der Wasser- oder Winderosionsgefährdung verschiedenen Klassen zugeordnet werden. In Sachsen sind dies die Klassen $K_{Wasser\,1}$, $K_{Wasser\,2}$ sowie K_{Wind}. Je nach Klassenzugehörigkeit gelten unterschiedliche Vorgaben, die insbesondere das Pflügen in bestimmten Zeiträumen einschränken oder an Bedingungen wie eine unmittelbar folgende Aussaat knüpfen. Auch der Anbau von Reihenkulturen unterliegt in bestimmten

Klassen zusätzlichen Auflagen. Die vollständigen Regelungen sind im Detail komplex und beinhalten zahlreiche Ausnahmen sowie Sonderregelungen für verschiedene Bewirtschaftungssituationen. Eine umfassende Darstellung würde den Rahmen dieses Berichts überschreiten.

Die **Prüffragen** müssen differenziert nach Gebietsklassen formuliert werden, da für jede Kategorie möglicherweise ein eigener Ansatz erforderlich ist. Für die Klasse $K_{Wasser\,1}$ lautet die zentrale Prüffrage, ob ein Nichteinhalten der Pflugverbote nachgewiesen werden kann. Für die Klassen $K_{Wasser\,2}$ und K_{Wind} waren die Prüffragen zum Zeitpunkt der Analyse noch nicht abschließend formuliert, wobei für K_{Wind} zunächst die Relevanz für Sachsen abzuschätzen war.

Die Analyse führte zu verschiedenen **Forschungsfragen**. Aus Sicht der *Fernerkundung* steht die Frage im Vordergrund, ob sich Pflügen mit Hilfe von Satellitenbildern erkennen lässt, und zwar unabhängig von Zeitpunkt und Kulturart. Ebenso ist zu klären, ob sich Pflügen von anderen Verfahren der Bodenbearbeitung, etwa dem Grubbern, zuverlässig unterscheiden lässt. Aus Sicht der *Landwirtschaft und der Verwaltung* ergeben sich weitere Fragen. Dazu gehört, wie sich die verschiedenen Arbeitsgänge auf die Einhaltung von GLÖZ 5 auswirken und wie das landwirtschaftliche Jahr bei unterschiedlichen Kulturarten strukturiert ist. Relevant ist außerdem der Einfluss von Vor- und Folgefrüchten sowie die Frage, welche Fruchtfolgen im konventionellen und ökologischen Landbau typisch sind. Zusätzlich war zu prüfen, ob Grünland für GLÖZ 5 eine besondere Rolle spielt.

Der **Datenbedarf** umfasst auf Seiten der Fernerkundung Sentinel 1 und Sentinel 2 sowie Landsat 8. Von Seiten der Landwirtschaftsverwaltung ist die Erosionskulisse bereitzustellen, um die betroffenen Flächen eindeutig zuordnen zu können.

Die methodischen Vorüberlegungen kamen zu dem Ergebnis, dass aufgrund der Komplexität der Regularien eine vertiefte methodische Auseinandersetzung erst dann sinnvoll erscheint, wenn aus den rechtlichen Vorgaben zunächst verschiedene Szenarien abgeleitet wurden. Zudem bestehen inhaltliche Verbindungen zu GLÖZ 1, da auch dort das Pflügen eine zentrale Rolle spielt.

2.1.1.6 Mindestbodenbedeckung, um vegetationslose Böden in den sensibelsten Zeiten zu vermeide – GLÖZ 6

GLÖZ 6 umfasst Regelungen zur Mindestbodenbedeckung und zum Schutz von Brachflächen. Der Standard gliedert sich in drei wesentliche Bereiche. Auf mindestens 80 % der Ackerflächen eines Betriebes muss im Winterhalbjahr eine Mindestbodenbedeckung sichergestellt werden. Als zulässige Formen gelten unter anderem mehrjährige Kulturen, Winterkulturen, Zwischenfrüchte, Selbstbegrünungen, Stoppelbrachen, Mulchauflagen oder der Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung. Für schwere Böden und Flächen mit geplanten frühen Sommerkulturen gelten verkürzte Verpflichtungszeiträume. Auf brachliegendem oder stillgelegtem Acker- und Dauergrünland ist während der Hauptvegetations-

periode im Frühjahr und Sommer das Mähen oder Zerkleinern des Aufwuchses untersagt. Ausgenommen sind bewirtschaftete Streuobstwiesen. Für nicht bewirtschaftete Ackerflächen gilt ergänzend, dass eine Vegetationsdecke entstehen muss, sei es durch natürlichen Aufwuchs oder durch gezielte Ansaat. Reine Grasansaaten oder die ausschließliche Verwendung einer einzelnen Kulturpflanzenart genügen dabei nicht den Anforderungen. Insgesamt ist GLÖZ 6 durch eine hohe Regelungskomplexität gekennzeichnet, da zahlreiche Ausnahmen und Sonderregelungen für verschiedene Bodenarten, Kulturarten und Bewirtschaftungssituationen bestehen. Diese Vielschichtigkeit stellt besondere Anforderungen an ein satellitengestütztes Monitoring.

Aus diesen Vorgaben ergeben sich mehrere **Prüffragen** für ein satellitenbasiertes Monitoring. Für den ersten Regelungsbereich lautet die zentrale Prüffrage, ob das Fehlen einer Mindestbodenbedeckung auf einer Ackerfläche nachgewiesen werden kann. Für den zweiten Bereich ist zu prüfen, ob im relevanten Zeitraum ein Mahdereignis stattgefunden hat. Für den dritten Bereich stellte sich die Frage, ob das Ausbleiben einer Selbstbegrünung auf neu ausgewiesenen Brachflächen erkennbar ist.

Die Analyse führt zu verschiedenen **Forschungsfragen**. Aus Sicht der *Fernerkundung* ist zunächst zu klären, ob eine Bodenbedeckung unabhängig von Ort und Zeitpunkt zuverlässig festgestellt werden kann. Besonders herausfordernd ist dabei die Unterscheidung zwischen vegetationslosem Boden und abgestorbener Vegetation wie Stoppelbrachen oder Mulchauflagen, da beide im optischen Spektralbereich ähnlich erscheinen können. Für die Wintermonate stellt sich zusätzlich die Frage, ob Radardaten eine belastbare Alternative zu optischen Aufnahmen bieten, wenn Wolkenbedeckung die Verfügbarkeit von Sentinel-2-Daten einschränkt. Hinsichtlich des Mähverbots ist zu untersuchen, mit welchen Methoden eine Mahd detektiert werden kann und ob kohärenzbasierte Radarverfahren dafür geeignet sind. Für die Erkennung von Begrünungsprozessen auf neu ausgewiesenen Brachflächen muss ein Ansatz gefunden werden, der eine schnelle Vegetationsentwicklung zuverlässig anzeigt. Aus Sicht der *Landwirtschaft und der Verwaltung* ergeben sich ebenfalls relevante Fragen. Dazu gehört die Klärung, wie ein geeigneter Ansatz zur betrieblichen Aggregation der Ergebnisse aussehen kann, da die Verpflichtung auf Betriebsebene gilt und nicht auf Einzelflächen. Ebenso ist zu prüfen, ob Referenzdaten für Stoppelfelder oder andere Formen der Bodenbedeckung existieren, die für eine Validierung herangezogen werden können.

Der **Datenbedarf** umfasst auf Seiten der Fernerkundung Sentinel 1, Sentinel 2 sowie Landsat 8. Von der Landwirtschaftsverwaltung werden Bodenkarten zur Identifikation schwerer Böden benötigt sowie eine Unterscheidung der Flächen in Ackerland, brachliegendes oder stillgelegtes Ackerland und Dauergrünland. Für den dritten Regelungsbereich sind zudem Informationen zu neu ausgewiesenen Brachflächen erforderlich.

Im Rahmen der konzeptionellen Vorarbeiten wurden verschiedene Herangehensweisen diskutiert. Für die Beobachtung der Mindestbodenbedeckung wurde vorgeschlagen, vegetationsbezogene Indizes kontinuierlich zu erfassen und für die Wintermonate auf Sentinel-1-Daten zurückzugreifen. Für die Detektion von Mähereignissen wurden kohärenzbasierte Verfahren als vielversprechend eingestuft. Die Erkennung von Stoppelbrachen wurde als besondere Herausforderung identifiziert, da sich abgestorbene Pflanzenreste mittels optischer Fernerkundung nur schwer von vegetationslosem Boden unterscheiden lassen. Diese Überlegungen flossen in die weitere methodische Entwicklung im Projekt ein.

2.1.1.7 Fruchtwechsel – GLÖZ 7

GLÖZ 7 regelt den Fruchtwechsel auf dem Ackerland eines Betriebes. Der Standard verfolgt das Ziel, durch den Wechsel der angebauten Kulturen die Bodenqualität zu erhalten und einseitige Belastungen zu vermeiden. Die Vorgaben gliedern sich in zwei wesentliche Anforderungen. GLÖZ 7 verlangt unter anderem, dass auf jedem Ackerschlag eines Betriebes innerhalb von drei aufeinanderfolgenden Antragsjahren mindestens zwei verschiedene Hauptkulturen angebaut werden. Darüber hinaus ist auf mindestens einem Drittel des betrieblichen Ackerlandes ein jährlicher Wechsel der Hauptkultur vorzunehmen. Alternativ kann auf diesen Flächen vor dem erneuten Anbau derselben Kultur eine Zwischenfrucht angebaut werden, die über das Jahresende hinaus auf der Fläche verbleibt. Als Hauptkultur gilt dabei die Kultur, die im Zeitraum vom 1. Juni bis zum 15. Juli des jeweiligen Jahres am längsten auf der Fläche steht. Die Abgrenzung unterschiedlicher Hauptkulturen folgt grundsätzlich der botanischen Klassifikation. Dabei gelten Kulturen unterschiedlicher Gattungen als verschiedene Hauptkulturen. Für bestimmte Betriebsgrößen, Anbauverfahren und Kulturarten existieren Sonderregelungen.

Aus diesen Vorgaben ergibt sich als zentrale **Prüffrage** für das Monitoring, ob ein Wechsel der Hauptkultur zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren bestätigt werden kann.

Die Analyse führt zu verschiedenen **Forschungsfragen**. Aus Sicht der *Fernerkundung* ist zu klären, mit welcher Methode sich die Kulturart für jedes Flächenelement bestimmen lässt und mit welcher Zuverlässigkeit das Verfahren in Abhängigkeit der Kulturart arbeitet. Zudem stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Aggregation auf Hauptkulturen hat. Aus Sicht *der Landwirtschaft und der Verwaltung* ergeben sich ebenfalls relevante Fragen. Dazu gehört die Klärung, welche landwirtschaftlich-fachliche Zusammenstellung der Hauptkulturen maßgeblich für die Bewertung ist. Ebenso ist zu untersuchen, wie eine betriebliche Auswertung der Fernerkundungsergebnisse erfolgen kann, insbesondere mit Blick auf wechselnde Zuschnitte der Schläge zwischen den Jahren. Schließlich ist von Interesse, welche typischen Fruchtfolgen im konventionellen und ökologischen Landbau zu erwarten sind.

Der **Datenbedarf** umfasst auf Seiten der Fernerkundung Daten der Systeme Sentinel 1, Sentinel 2 sowie Landsat 8. Von der Landwirtschaftsverwaltung werden Schlagdaten über mehrere Jahre benötigt, wobei Dauerkulturen gegebenenfalls vorab zu identifizieren sind.

Im Rahmen der konzeptionellen Vorarbeiten wurde die Kulturartenklassifikation als klassische Aufgabe der Fernerkundung eingeordnet. Diskutiert wurde insbesondere das Verhältnis von schlagbasierter zu pixelbasierter Auswertung sowie die Frage, wie Ergebnisse über mehrere Jahre hinweg konsistent verglichen werden können. Diese Überlegungen flossen in die weitere methodische Entwicklung im Projekt ein.

2.1.1.8 Landschaftselemente – GLÖZ 8

GLÖZ 8 stellt einen Standard dar, der im Verlauf des Projekts erheblichen Änderungen unterworfen war. Im ursprünglichen Projektantrag und den konzeptionellen Vorarbeiten des Jahres 2023 trug der Standard noch die Bezeichnung „Mindestanteil von nichtproduktiven Flächen“ und umfasste zwei wesentliche Regelungsbereiche. Zum einen war vorgesehen, dass 4 Prozent der betrieblichen Ackerfläche als Ackerbrache oder Landschaftselemente vorzuhalten sind. Zum anderen bestand ein Verbot der Beseitigung von Landschaftselementen sowie ein Schnittverbot für Hecken während der Brut und Nistzeit. Diese Konstellation änderte sich jedoch im Projektverlauf grundlegend. Für das Jahr 2024 wurde zunächst eine Ausnahmeregelung beschlossen, die es den Betrieben ermöglichte, von der Verpflichtung zur Vorhaltung nichtproduktiver Flächen abzuweichen. Ab dem Jahr 2025 entfällt die 4-prozentige Pflichtstilllegung auf landwirtschaftlichen Flächen dann vollständig. In der aktuellen Fassung der sächsischen Konditionalitätenbroschüre aus dem Jahr 2025 wird GLÖZ 8 daher nur noch unter der Bezeichnung „Landschaftselemente“ geführt und beschränkt sich auf das Beseitigungsverbot sowie das Schnittverbot (Konditionalitäten, 2025).

Landschaftselemente erfüllen wichtige Funktionen für den Umwelt- und Naturschutz. Für den Erhalt der Artenvielfalt haben diese Strukturen in der Agrarlandschaft eine herausragende Bedeutung, da sie besondere Lebensräume bieten und zugleich das Landschaftsbild bereichern. Zu den geschützten Elementen zählen unter anderem Hecken und Knicks, Baumreihen, Feldgehölze, Einzelbäume, Feldraine, Feuchtgebiete, Trocken und Natursteinmauern, Lesesteinwälle, Fels und Steinriegel sowie Terrassen.

Die im Rahmen der konzeptionellen Vorarbeiten formulierten **Prüffragen** spiegelten noch die ursprüngliche Fassung des Standards wider. Erstens sollte geprüft werden, ob auf einer Brachfläche eine Nutzung nachgewiesen werden kann. Zweitens stellte sich die Frage, ob eine Veränderung eines Landschaftselements erkennbar ist. Drittens war zu klären, ob der Schnitt einer Hecke nachweisbar ist. Mit dem Wegfall der Stilllegungspflicht hat die erste Prüffrage zum Nutzungsnachweis auf Brachflächen ihre unmittelbare Relevanz für das Monitoring der Konditionalitäten verloren. Die verbleibenden

Prüffragen zur Veränderung von Landschaftselementen und zum Heckenschnitt behalten hingegen ihre Gültigkeit.

Auch die ursprünglich formulierten **Forschungsfragen** waren auf beide Regelungsbereiche ausgerichtet. Aus Sicht der *Fernerkundung* wurde gefragt, mit welchen Methoden das Ausbleiben menschlicher Eingriffe auf Brachflächen beobachtet werden kann, während natürliche Prozesse weiterlaufen. Für die Überwachung von Landschaftselementen stellte sich die Frage, ob eine zeitlich dichte Beobachtung mit Hilfe von Sentinel 1 und Sentinel 2 möglich ist, oder ob alternativ die Nutzung von Digitalen Orthophotos in größeren zeitlichen Abständen sinnvoller erscheint. Eine spezifische Fragestellung betraf zudem die Möglichkeit, kleinste Veränderungen durch Heckenschnitte mittels interferometrischer Radarverfahren zu detektieren. Aus Sicht der *Landwirtschaft und der Verwaltung* waren Recherchen zur Charakterisierung von Brachen sowie die Entwicklung eines Verfahrens zur GIS-basierten gesamtbetrieblichen Auswertung unter Berücksichtigung zeitlicher und fachlicher Vorgaben vorgesehen. Im Zuge der regulatorischen Änderungen hätten die auf Brachflächen bezogenen Forschungsfragen einer Anpassung bedurft, da ihr ursprünglicher Anwendungsbezug entfallen ist.

Der **Datenbedarf** umfasste auf Seiten der Fernerkundung Sentinel 1, Sentinel 2, Landsat 8 sowie Digitale Orthophotos. Von der Landwirtschaftsverwaltung sollten Schlagdaten zu Brachflächen sowie die aktuellen Landschaftselemente als Geodatensatz bereitgestellt werden. Zur Feststellung von Veränderungen waren auch historische Daten vorgesehen.

Im Rahmen der Priorisierung wurde GLÖZ 8 als Aufgabe im Schnittbereich zwischen Fernerkundung und GIS eingeordnet, deren Machbarkeit schwer einzuschätzen sei. Der Standard erhielt daher keine hohe Priorität für die unmittelbare Bearbeitung im Projekt. Diese Entscheidung erwies sich angesichts der nachfolgenden regulatorischen Änderungen als sachgerecht, da ein erheblicher Teil der ursprünglich geplanten Untersuchungen durch den Wegfall der Stilllegungspflicht gegenstandslos geworden wäre. Die verbleibenden Aspekte zum Schutz der Landschaftselemente weisen zwar weiterhin ein Potenzial für fernerkundungsbasiertes Monitoring auf, wurden im weiteren Projektverlauf jedoch nicht vertieft behandelt.

2.1.1.9 Verbot der Umwandlung oder des Umpflügens von Dauergrünland, das als um-weltsensibles Dauergrünland in Natura 2000-Gebieten ausgewiesen ist – GLÖZ 9

GLÖZ 9 regelt den Schutz von umweltsensiblem Dauergrünland in Natura-2000-Gebieten und weist einen hohen inhaltlichen Überschneidungsgrad mit GLÖZ 1 auf. Als umweltsensibel gilt Dauergrünland, das aktuell in einem FFH- oder Vogelschutzgebiet liegt und bereits am 1. Januar 2015 als Dauergrünland bestand. Solche Flächen dürfen weder in Ackerland oder Dauerkulturen umgewandelt noch gepflügt werden. Der Standard enthält verschiedene Ausnahmetatbestände und Sonderregelungen, etwa für

Flächen, die zu bestimmten Stichtagen Gegenstand spezifischer Verpflichtungen waren, sowie Vorgaben für zulässige Pflegemaßnahmen. Aufgrund der Detailtiefe dieser Regelungen wird für weiterführende Informationen auf die Konditionalitätenbroschüre des Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft verwiesen (Konditionalitäten, 2025).

Aus der Kurzbeschreibung des Standards ergibt sich als zentrale **Prüffrage**, ob ein Umbruch oder eine Umwandlung auf einer als umweltsensibel eingestuften Dauergrünlandfläche erkannt werden kann. Die methodischen Anforderungen entsprechen dabei weitgehend jenen von GLÖZ 1, da in beiden Fällen eine Veränderung der Grasnarbe zu detektieren ist. Der wesentliche Unterschied liegt in der räumlichen Eingrenzung auf die Natura-2000-Gebietskulisse.

Die **Forschungsfragen** aus Sicht der *Fernerkundung* stimmen daher im Kern mit denen von GLÖZ 1 überein. Es ist zu klären, mit welchen Methoden ein Umbruchereignis auf Dauergrünland erkannt werden kann und mit welcher zeitlichen Auflösung die Detektion erfolgen muss. Aus Sicht der *Landwirtschaft und Verwaltung* ist insbesondere relevant, welche Flächen der Gebietskulisse zuzuordnen sind und wie die Ausnahmetatbestände bei der automatisierten Auswertung berücksichtigt werden können.

Der Datenbedarf entspricht ebenfalls dem von GLÖZ 1 und umfasst auf Seiten der Fernerkundung Sentinel 1 und Sentinel 2 sowie Landsat 8. Von der Landwirtschaftsverwaltung werden die Schlagdaten, die Gebietskulisse der Natura-2000-Gebiete sowie Informationen zu bestehenden Verpflichtungen und Ausnahmetatbeständen benötigt.

Im Rahmen der konzeptionellen Vorarbeiten wurde festgestellt, dass die methodischen Ansätze zur Detektion von Grünlandumbrüchen für beide Standards nahezu identisch sind. Die für GLÖZ 1 entwickelten Verfahren lassen sich daher unmittelbar auf GLÖZ 9 übertragen (vgl. Kapitel 2.1.1.1). Die zusätzliche Anforderung besteht lediglich in der räumlichen Verschneidung der Analyseergebnisse mit der Natura-2000-Gebietskulisse, was primär eine GIS-basierte Aufgabe darstellt und keine eigenständige fernerkundliche Herausforderung bedeutet.

2.1.1.10 Ableitung einer Priorisierung

Auf Grundlage der in den Steckbriefen dokumentierten Erkenntnisse erfolgte eine Priorisierung der neun GLÖZ-Standards. Ziel war es, die verfügbaren Projektressourcen effizient einzusetzen und einen strukturierten Bearbeitungsplan zu entwickeln. Aus Sicht der Projektsteuerung handelt es sich dabei um ein Werkzeug der Entscheidungsfindung, das eine systematische und nachvollziehbare Ressourcenallokation ermöglicht. Die Priorisierung berücksichtigte sowohl methodische Aspekte, etwa vorhandene Expertise und Referenzprojekte, als auch praktische Erwägungen wie die Verfügbarkeit von

Daten und die realistische Einschätzung der Machbarkeit. Die GLÖZ-Standards wurden in drei Phasen sortiert:

- Die **Akutphase** umfasst Standards, mit denen eine unmittelbare Befassung erfolgen sollte. Dies beinhaltet methodische Recherchen, die Aufbereitung von Daten sowie erste Testungen. Standards in dieser Phase zeichnen sich dadurch aus, dass bereits Vorarbeiten, Referenzprojekte oder eigene Erfahrungen vorliegen, die einen schnellen und fundierten Einstieg ermöglichen.
- Die **Vorbereitungsphase** enthält Standards, deren spätere Bearbeitung vorbereitet werden soll. Dies geschieht insbesondere durch die Ausschreibung von Qualifikationsarbeiten, vorzugsweise Masterarbeiten, sowie durch Datenbeschaffung und Datenbereitstellung. Die Betreuung erfolgt dabei in Kooperation zwischen der TU Dresden und dem LfULG.
- Die Phase **Rückstellung** betrifft Standards, die mit geringerer Priorität behandelt und für eine etwaige Bearbeitung in spätere Projektphase verschoben werden. Bei diesen Standards ist die methodische Umsetzung mit erheblichen Herausforderungen verbunden, sodass ein schneller Start nicht sinnvoll erscheint. Gleichwohl sollte ihre Bearbeitung bei entsprechenden Kapazitäten vorbereitet werden.

Akutphase – Hohe Priorität

In die Akutphase wurden GLÖZ 1 (Erhaltung von Dauergrünland), GLÖZ 9 (Erhaltung von Dauergrünland in Natura 2000-Gebieten) sowie GLÖZ 6 (Mindestbodenbedeckung) eingeordnet.

Vorbereitungsphase – Mittlere Priorität

In die Vorbereitungsphase wurden GLÖZ 7 (Fruchtwechsel), GLÖZ 4 (Pufferstreifen an Wasserläufen), GLÖZ 3 (Stoppelbrand) und GLÖZ 8 (Nichtproduktive Flächen) eingeordnet.

Rückstellungsphase – Niedrige Priorität

In die Rückstellung wurden GLÖZ 2 (Schutz von Feuchtgebieten und Mooren) sowie GLÖZ 5 (Erosionsschutz) eingeordnet.

Realisierte Umsetzung im Projektverlauf

Im Verlauf des Projekts wurde die Priorisierung konsequent umgesetzt. Der absolute Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit lag auf GLÖZ 1 (Erhaltung von Dauergrünland) in Zusammenhang mit GLÖZ 9 (Erhaltung von Dauergrünland in Natura-2000-Gebieten). Diese Fokussierung ermöglichte eine intensive methodische Auseinandersetzung mit den Fragestellungen und führte zu belastbaren Ergebnissen, die für einen operationellen Einsatz weiterentwickelt werden konnten. Mit geringerem Ressourcenaufwand wurden Voruntersuchungen im Sinne der Vorbereitungsphase durchgeführt. Diese betrafen die Themen Pufferstreifen an Wasserläufen (GLÖZ 4) sowie Stoppelbrand (GLÖZ 3). Bei beiden Standards wurden erste methodische Erkenntnisse gewonnen, die als Grundlage für eine vertiefte Bearbeitung in

einer möglichen Folgephase des Projekts dienen können. Die Voruntersuchungen hatten daher einen eher explorativen Charakter und zielten darauf ab, die grundsätzliche Machbarkeit fernerkundlicher Ansätze zu prüfen und offene methodische Fragen zu identifizieren.

Aus Sicht der Projektsteuerung stellt diese Aufteilung einen guten Kompromiss zwischen den verfügbaren Ressourcen und dem zu erwartenden Mehrwert dar. Die Konzentration auf GLÖZ 1 und GLÖZ 9 gewährleistete, dass innerhalb der Projektlaufzeit substanzielle Fortschritte erzielt werden konnten, während die Voruntersuchungen zu GLÖZ 3 und GLÖZ 4 das Fundament für zukünftige Arbeiten legten. Diese Vorgehensweise folgte dem Grundsatz, lieber wenige Themen gründlich zu bearbeiten als viele Themen oberflächlich anzureißen.

Die methodischen Entwicklungen, Erkenntnisse und Ergebnisse zu den bearbeiteten Schwerpunktthemen sowie den durchgeführten Voruntersuchungen werden im anschließenden Kapitel detailliert erläutert.

2.1.2 Methoden- und Verfahrensentwicklung, Testung und Validierung

Die folgenden Kapitel dokumentieren die methodischen Arbeiten, die den Kern des Projektes bilden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem hoch priorisierten GLÖZ 1 (Erhalt von Dauergrünland). Zunächst werden in Kapitel 2.1.2.1 die Referenzdaten vorgestellt, die als Grundlage für die Methodenentwicklung herangezogen wurden. Daran anschließend folgt der wesentliche Teil der Methodenentwicklung zur Detektion von Anomalien auf Grünland. Hierbei wird zwischen dem wissenschaftlichen Prozess der Diskussion möglicher Methoden, der in Kapitel 2.1.2.2 dargestellt wird, und der Beschreibung des finalen methodischen Ansatzes in Kapitel 2.1.2.3 unterschieden. In Kapitel 2.1.2.4 erfolgt die Darstellung aller Aktivitäten bezüglich der Validierung durch Feldarbeit und Vor-Ort-Kontrollen.

Neben den hoch priorisierten Aktivitäten rund um GLÖZ 1 wurden, wie bereits erläutert, im Sinne von Vorarbeiten während der Vorbereitungsphase (vgl. Kapitel 2.1.1.10) Analysen zu Randstreifen und zum Stoppelbrand durchgeführt. Die Ergebnisse dieser ergänzenden Untersuchungen werden in Kapitel 2.1.2.5 vorgestellt.

2.1.2.1 Referenzdaten – GLÖZ 1

In der Fernerkundung bilden Referenzdaten eine zentrale Grundlage für die Entwicklung und Validierung von Algorithmen. Sie dienen dazu, die aus Satellitenbildern abgeleiteten Informationen mit der tatsächlichen Situation am Boden abzugleichen und so die Zuverlässigkeit der entwickelten Methoden zu bewerten. Je umfangreicher und qualitativ hochwertiger die verfügbaren Referenzdaten sind, desto belastbarer sind die statistischen Aussagen zur Güte eines Algorithmus. In der klassischen fernerkundlichen Praxis wird daher angestrebt, über einen möglichst großen Bestand an räumlich und zeitlich dokumentierten Referenzfällen zu verfügen.

Für die Entwicklung eines Algorithmus zur Detektion von Anomalien auf Dauergrünland im Kontext von GLÖZ 1 bestand zu Projektbeginn die begründete Erwartung, auf einen substantiellen Bestand an Referenzdaten zurückgreifen zu können. Die Kontrolle der Einhaltung der GLÖZ-Standards erfolgt bereits seit mehreren Jahren, sodass aus den dokumentierten Verstößen der Vergangenheit ein Datenbestand hätte abgeleitet werden können. Für die Jahre 2015 bis 2022 lagen entsprechende Referenzdaten aus den durchgeführten Kontrollen vor. Eine eingehende Prüfung dieser Datenbestände ergab jedoch, dass die verfügbare Anzahl an Referenzfällen deutlich hinter den ursprünglichen Erwartungen zurückblieb. Sämtliche vorliegenden Referenzdaten wurden einzeln gesichtet und hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für die Algorithmenentwicklung bewertet. Dabei zeigte sich, dass ein Großteil der dokumentierten Fälle aus verschiedenen methodischen Gründen nicht für die Überprüfung des Algorithmus zur Anomaliedetektion herangezogen werden konnte. Zu diesen Gründen zählen unter anderem die nachträgliche Änderung von Nutzungscodes, die geringe Größe der betroffenen Schläge sowie die unzureichende zeitliche Dokumentation der Verstöße. Eine detaillierte Erläuterung dieser methodischen Einschränkungen erfolgt im Zusammenhang mit der Beschreibung des entwickelten Ansatzes in Kapitel 2.1.2.3.

Die abschließende Bewertung der Referenzdatensituation fiel daher ernüchternd aus. Weder in qualitativer noch in quantitativer Hinsicht reichten die verfügbaren Daten aus, um als belastbare Grundlage für die Algorithmenentwicklung und -validierung zu dienen. Die wenigen theoretisch nutzbaren Fälle wiesen zudem inhaltliche Defizite auf, die ihre Verwendung weiter einschränkten. De facto musste daher davon ausgegangen werden, dass für die angestrebte Methodenentwicklung keine verwertbaren Referenzdaten zur Verfügung standen.

Aus dieser Ausgangslage ergaben sich weitreichende Konsequenzen für das methodische Vorgehen im Projekt. Erstens musste die Methodenentwicklung grundlegend darauf ausgerichtet werden, einen Ansatz zu entwickeln, der ohne klassische Referenzdaten auskommt. Dies stellte eine erhebliche methodische Herausforderung dar, da etablierte Workflows der Fernerkundung in der Regel auf der Verfügbarkeit solcher Daten aufbauen. Die Entwicklung eines quasi referenzdatenfreien Ansatzes erforderte innovative Lösungen und eine intensive Auseinandersetzung mit den spezifischen spektralen und zeitlichen Eigenschaften von Dauergrünland. Zweitens konnten Überprüfungen der entwickelten Methoden nicht auf historische Datenbestände gestützt werden, sondern mussten ad hoc erfolgen. Dies war nur durch entsprechende Feldarbeiten in Form von Vor-Ort-Kontrollen zu realisieren (vgl. Kapitel 2.1.2.4). Der damit verbundene Aufwand war erheblich, jedoch unverzichtbar, um die Funktionsfähigkeit des entwickelten Algorithmus unter realen Bedingungen zu verifizieren. Dabei war von Beginn an absehbar, dass die klassischerweise in der Fernerkundung angestrebte Anzahl von Referenzfällen auf diesem Wege nicht erreicht werden konnte. Die Validierung musste sich daher auf eine qualitative

Bewertung ausgewählter Fälle stützen, ergänzt durch iterative Verbesserungen des Algorithmus auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse.

Die hier beschriebenen Randbedingungen bildeten letztlich die Leitplanken für die gesamte Methodenentwicklung. Sie definierten den Möglichkeitsraum, innerhalb dessen die wissenschaftliche Arbeit erfolgen konnte. Das folgende Kapitel stellt die methodischen Ansätze vor, die unter diesen anspruchsvollen Voraussetzungen entwickelt wurden.

2.1.2.2 Methodische Ansätze zum Monitoring – Erhalt von Dauergrünland

Im Zuge der Methodenentwicklung für ein Monitoring von Dauergrünland (GLÖZ 1) wurden zunächst diverse Ansätze diskutiert und erprobt. Ausgehend von der vorhandenen Datengrundlage von Schlagdaten und Satellitendaten lag eine permanente Beobachtung der Reflektanz- und/oder Rückstreuungswerte der Grünlandflächen nahe. Analog zu bereits bestehenden Monitoring-Ansätzen in anderen Kontexten wurde zunächst eine Zeitreihenanalyse von Reflektanzwerten oder Vegetationindizes erörtert. Die Idee hierbei ist, dass „harte Brüche“ in der Zeitreihe, bzw. starke Abweichungen von einem mittleren jahreszeitlichen Verlauf, auf einen Umbruch oder anderweitige Abweichungen zu den GLÖZ-1-Regelung hindeuten könnten. Eine Vorhersage des jeweils nächsten zu erwartenden Wertes im zeitlichen Verlauf stand ebenfalls zur Diskussion. Dieser könnte mithilfe eines Kalman-Filters oder einem LSTM-Ansatz (Long short-term memory) unter Einbezug diverser Faktoren und Vorkenntnisse ermittelt werden und dann mit dem jeweils realen Wert aus den Satellitendaten verglichen werden. Ein solches Vorgehen bietet zwar diverse Vorteile, indem z. B. die Phänologie mit in den Prozess einbezogen wird, allerdings ergeben sich auch einige Nachteile. Allen voran würde sich eine große Datenmenge ergeben, da für jeden Dauergrünlandschlag stets eine oder mehrere Zeitreihen generiert werden müssten, welche entweder bis zum nächsten Zeitschritt vorgehalten und mit dem neuen Wert ergänzt oder gänzlich neu ermittelt werden müssten. Außerdem ist dieses Vorgehen anfällig für Fehlerkennungen durch die unweigerliche Präsenz von Datenlücken, die vor allem in multispektralen Sentinel-2-Bildern häufig durch Wolken verursacht werden. Wenn über Perioden von ein bis mehreren Monaten keine ausreichend wolkenfreien Daten vorhanden sind (was vor allem in den Wintermonaten zu erwarten ist), könnte ein Abfall in der Zeitreihe als auffälliger Bruch erkannt werden, obwohl er lediglich jahreszeitlich bedingt ist. Auch Ansätze die die Phänologie einbeziehen, könnten diese aufgrund von Datenlücken in vorhergehenden Jahren evtl. nicht hinreichend akkurat abbilden. Zudem müsste ein Vorgehen entwickelt werden, dass Ausreißer von permanenten Änderungen in der Zeitreihe unterscheidet, welches in der Verwaltungspraxis wohl kein zeitnahes Eingreifen ermöglichen würde.

Im Kontext dieser Limitationen wurde sich zunehmend auf andere methodische Ansätze fokussiert.

Hier wurde schlussendlich die Anomaliedetektion als vielversprechender Ansatz identifiziert, da die Fragestellung des GLÖZ 1-Monitorings weder zwingend Erfahrungswerte aus der Vergangenheit, noch eine Prädiktion von entsprechenden Werten in die Zukunft erfordert. Außerdem ist davon auszugehen, dass Vergehen gegen GLÖZ 1 kurzlebig sein können, und beispielsweise in Fällen der Wiederansaat die betroffenen Flächen visuell zügig in den Ausgangszustand zurückkehren. Ein Ansatz, der nur einen Zeitschritt benötigt, wie eine Anomaliedetektion, wurde somit als zielführend bewertet. Die zentrale forschungsorientierte Fragestellung lautete in der Folge: Wie kann ein Schlag detektiert werden, der an einem bestimmten Aufnahmezeitpunkt signifikant von anderen vergleichbaren Schlägen in seiner Umgebung abweicht?

Für die Entwicklung eines solchen Algorithmus musste zunächst festgelegt werden, welche Schläge mit einem bestimmten Schlag vergleichbar sind. Hier wurde zunächst ein räumlicher Ansatz diskutiert, der wahlweise alle Schläge in einem bestimmten Radius oder die nächsten n Nachbarschläge als Referenz heranzieht. Dies wurde für einen Großteil der Schläge in Sachsen zwar als sinnvoll erachtet, birgt aber auch Risiken, da nicht automatisch davon ausgegangen werden kann, dass räumlich nahe Schläge den gleichen Einflüssen unterliegen (z. B. aufgrund von unterschiedlichen Böden, Landschaftsarten oder Hangneigungen im Gebirge). Dazu gehören auch Schläge in Grenzgebieten, für die stets weniger aussagekräftige Nachbarschläge vorhanden sind. Die beschriebenen Randbedingungen führten zu der Entscheidung, einen unüberwachten, datengetriebenen Clustering-Ansatz, der Schläge gruppiert, die den gleichen meteorologischen Einflüssen unterliegen, zu verfolgen. Der finale methodische Ansatz wird im Folgekapitel 2.1.2.3 erläutert.

Die Wahl des Algorithmus zur Anomalieerkennung beinhaltete mehrere Ansätze. Zunächst wurde die Berechnung des Interquartilsabstandes (Interquartile Range; IQR) erörtert. Hierbei wird für eine bestimmte Variable/Merkmal pro Zeitschritt die IQR berechnet und alle Schläge die unterhalb von 1,5*IQR vom ersten und oberhalb von 1,5*IQR vom dritten Quartil liegen als Anomalie detektiert. Der hier beschriebene erste statistische Ansatz lieferte bereits gute Ergebnisse und bestätigte damit die a-priori-Annahme der grundsätzlichen Nutzbarkeit einer Anomaliedetektion für das Monitoring von GLÖZ 1. Im weiteren Verlauf der Analysen wurden jedoch auch Limitationen deutlich. Das betrifft vor allem Einschränkungen die auf Grund der Verwendung von nur einem Merkmal entstehen können. Weiterhin muss festgehalten werden, dass die IQR für nicht-normalverteilte Datensätze nicht immer praktikabel ist. Es wurden in der Folge weitere Ansätze diskutiert, u. a. die Nutzung von Deep-Learning-Methoden (z. B. Autoencoder) oder von Support Vector Machine (SVM). Schlussendlich wurde die Isolation-Forest-Methode in Kombination mit einer Fallunterscheidung als besonders aussichtsreich identifiziert.

2.1.2.3 Detektion von Anomalien auf Grünland – finaler Ansatz

Der Ansatz, der sich für die Detektion von Anomalien auf Dauergrünland am erfolgreichsten erwies, ist ein mehrstufiger Ansatz bestehend aus einem unüberwachten Isolation Forest mit gruppierten Sentinel-2-Vegetationsindexdaten als Input und einer Fallunterscheidung der Ergebnisse (vgl. Abbildung 2).

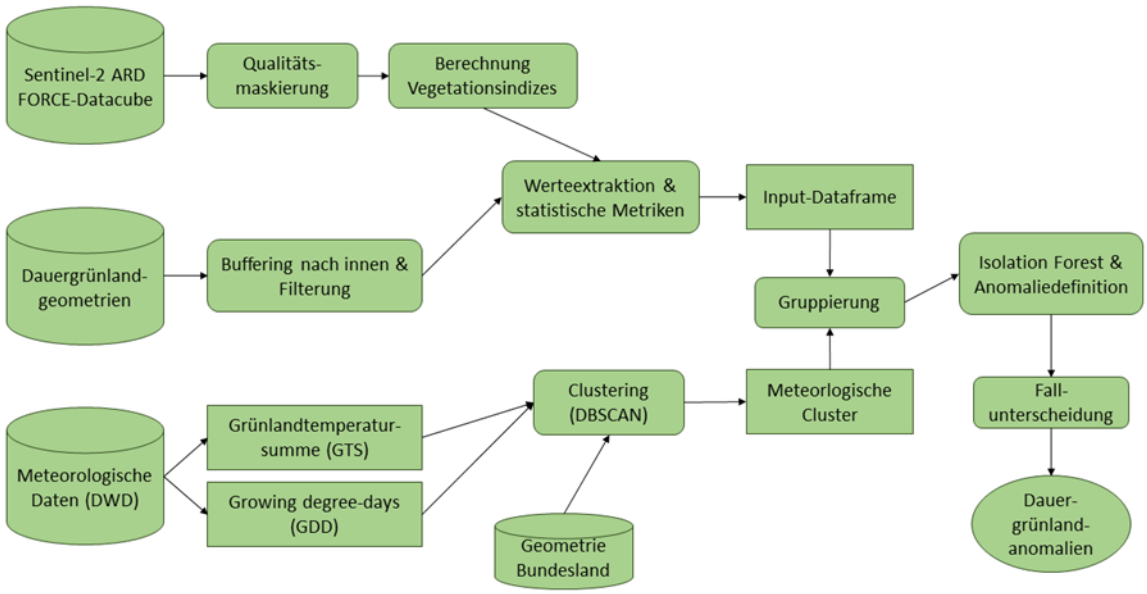


Abbildung 2: Schaubild des methodischen Vorgehens zur Anomaliedetektion in Dauergrünlandflächen

Dies folgt, wie bereits beschrieben, der Annahme, dass Dauergrünlandflächen zu jedem Zeitpunkt ähnliche Merkmale aufweisen sollten, sofern sie denselben natürlichen und anthropogenen Einflüssen ausgesetzt sind. Jede größere Abweichung davon kann als Anomalität angesehen werden und sollte daher für weitere Vor-Ort-Untersuchungen priorisiert werden. Ein solcher unüberwachter Ansatz ist robust und erfordert keine vordefinierten Annahmen oder Schwellenwerte für natürliche oder spektrale Parameter bei der Unterscheidung von Dauergrünland und anderen Landbedeckungen. Der vollständige Algorithmus wird im Folgenden erläutert.

Vorprozessierung

Zunächst ist eine aussagekräftige Liste von Eingabemerkmalen für den Algorithmus erforderlich. Hierfür werden analysefertige multispektrale Sentinel-2-Satellitendaten herangezogen (Analysis Ready Data; ARD), die über den FORCE-Datacube auf der CODE-DE-Plattform bezogen werden. Da FORCE die Sentinel-2-Bilder räumlich in ein eigenes regelmäßiges, nicht überlappendes Kachelraster transformiert, werden für den Algorithmus nur jene Kacheln berücksichtigt, die das Bundesland Sachsen abdecken. Dies führt zu einer leichten Reduzierung der Eingabedaten im Vergleich zum nativen Sentinel-2-Kachelraster. Alle 20-m-Spektralbänder wurden zudem auf 10 m resampelt. Die FORCE-Daten enthalten

neben den entsprechenden Reflektanzwerten für jedes spektrale Band (BOA) außerdem einen Qualitätssicherungslayer (QAI), der Qualitäts-Flags pro Pixel anzeigt. Mit diesem werden die BOA-Daten maskiert, um Pixel niedriger Qualität (z. B. aufgrund von Wolkenbedeckung oder Schnee) zu entfernen. Die Anzahl der Qualitäts-Flags, die in die Maske aufgenommen wurden, wurde zunächst klein gewählt, um nicht zu viele Pixel unnötig zu eliminieren. Letztendlich wurde durch erste Feldbegehungen allerdings festgestellt, dass selbst durch geringfügige Qualitätseinschränkungen, wie z. B. Schleierwolken und Wolkenschatten das Ergebnis der späteren Anomaliedetektion stark beeinflusst wird (siehe Kapitel 2.1.2.4). In der Folge wurde die Qualitätsmaske strenger gefasst, sodass sie nur Pixel zulässt, die entweder keine Qualitäts-Flags oder maximal mittlere Aerosol- und Beleuchtungs-Flags sowie Neigungs-Flags aufweisen. Weiterhin wurde festgelegt, dass für die Anomalieerkennung jeweils nur die Dauergrünlandflächen betrachtet werden sollen, die zu 100 % außerhalb der Qualitätsmaske liegen, um Effekte an Wolkenrändern zu minimieren.

Die Fragestellung der Anomaliedetektion erfordert eine Unterscheidung zwischen vitaler Vegetation und offenem Boden bzw. andersartigen Abweichungen davon. Hierzu können sowohl die rohen Reflektanzwerte der einzelnen spektralen Bänder von Sentinel-2 herangezogen werden, als auch Kombinationen daraus in Form von Vegetationsindizes. Im Prozess der Suche nach geeigneten Merkmalen zur Unterscheidung wurden zunächst die 10 spektralen Bänder von Sentinel-2 und 10 weitere Vegetationsindizes evaluiert. Die untersuchten Indizes sind:

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index),
- BSI (Bare Soil Index), GRVI (Green-Red Vegetation Index),
- GRVI (Green-Red Vegetation Index),
- IRECI (Inverted Red-Edge Chlorophyll Index),
- SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index),
- DWSI (Disease Water-Stress Index),
- NDWI (Normalized Difference Water Index),
- TC_B (Tasseled Cap Brightness),
- TC_G (Tasseled Cap Greenness),
- TC_W (Tasseled Cap Whiteness).

Im Zuge der Evaluation wurde ersichtlich, dass sich die Datenmenge, die pro Schlag abgerufen, berechnet und im Anschluss in einen Dataframe geschrieben werden muss, bei 20 Merkmalen unverhältnismäßig negativ auf Speicherplatz und Prozessierungsdauer auswirkt. Zudem haben Korrelationsanalysen und Literaturrecherche ergeben, dass einige Vegetationsindizes grundsätzlich ähnliche Vegetationsprozesse abbilden und somit redundant für die Analyse sind. Im Zuge dessen wurde die Anzahl der Merkmale etappenweise auf 4 reduziert. Während die Tasseled-Cap-Indizes aufgrund ihrer ursprüng-

lichen Kalibrierung anhand eines anderen Sensors eliminiert wurden, wurden SAVI, DWSI und NDWI aufgrund zu hoher Korrelationen mit anderen Merkmalen nicht weiter betrachtet. Da die rohen spektralen Bandinformationen größtenteils mit in die verbleibenden Indizes einfließen ist auch hier eine gewisse Redundanz gegeben, sodass auch diese ausgeschlossen wurden. Somit wurden die folgenden 4 Indizes als am geeignetsten für die Anomalieerkennung ermittelt: NDVI (populärer Index zur Quantifizierung des Vorhandenseins und der Vitalität grüner Vegetation), BSI (Maß zur Unterscheidung von offenem Boden von anderen Landbedeckungstypen), GRVI (Index zur Erfassung phänologischer Veränderungen), IRECI (Metrik die die Chlorophyllkonzentration in der Vegetation abschätzt). Diese sind in Tabelle 1 gemeinsam mit ihren jeweiligen Formeln zusammengefasst.

Tabelle 1: Für die Anomaliedetektion verwendete Vegetationsindizes

Vegetationsindex	Formel	Formel (Sentinel 2)
NDVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	$\frac{B08 - B04}{B08 + B04}$
BSI	$\frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)}$	$\frac{(B11 + B04) - (B08 + B02)}{(B11 + B04) + (B08 + B02)}$
GRVI	$\frac{Green - Red}{Green + Red}$	$\frac{B03 - B04}{B03 + B04}$
IRECI	$\frac{Rededge3 - Red}{\left(\frac{Rededge1}{Rededge2}\right)}$	$\frac{B07 - B04}{\left(\frac{B05}{B06}\right)}$

Die vier Indizes werden für jedes Pixel extrahiert, welches auf einen Dauergrünlandschlag fällt. Die Geometrien dieser Schläge wurden in einem Polygon-Shapefile vom LfULG bereitgestellt. Dieses enthält rund 78.000 Dauergrünlandflächen in Sachsen und bietet für jede Fläche eine zusätzliche Information zur Nutzungsart als NC-Code, wobei sich auf drei Kulturarten beschränkt wird:

- 451 - Wiesen,
- 452 - Mähweiden und
- 453 - Hutungen und Almen.

Diese Beschränkung ergibt sich aus der geringen Anzahl anderer Nutzungen. Vor der Extraktion der Indizes werden alle Dauergrünlandschläge entsprechend der räumlichen Auflösung der Sentinel-2-ARD-Daten um 10 m nach innen gepuffert, um zu vermeiden, dass Randpixel in die Analyse einfließen, die gemischte Signale/Reflektanzen enthalten können. Dies führt auch dazu, dass Polygone, die kleiner als diese Pufferzone sind, verschwinden oder eine ungültige Geometrie erhalten. Diese werden in der Folge aus der Analyse ausgeschlossen. Darüber hinaus werden alle Geometrien ausgeschlossen, die von

weniger als zehn Sentinel-2-Pixeln abgedeckt sind. Diese Entscheidung wurde getroffen, da der Informationswert einer so geringen Anzahl von Pixeln als zu gering und zu anfällig für Ausreißer erachtet wird, um aussagekräftige Aussagen über den Zustand des Grünlands in solch kleinen Polygonen zu treffen. In diesem Fall führt dies dazu, dass etwa 10 % aller Eingabepolygone für weitere Analyseschritte unberücksichtigt bleiben.

Basierend auf der Verfügbarkeit von Sentinel-2-Daten an einem bestimmten Datum und für eine bestimmte Kachel werden für jeden verbleibenden Schlag Reflektanzwerte extrahiert. Wenn ein Polygon von mindestens einem maskierten Pixel geringer Qualität abgedeckt ist, wird, wie bereits weiter oben beschrieben, der Wert *NA* zurückgegeben. Anschließend werden für alle verbleibenden Schläge die vier Vegetationsindizes berechnet und statistische Kennzahlen für jeden Index abgeleitet. Dazu gehören Mittelwert, Minimum, Maximum und Median der Indexwerte pro Schlag sowie die Standardabweichung und alle Dezile des sortierten Pixelwertvektors. Diese Merkmale wurden gewählt um die Verteilung der Indexwerte innerhalb eines Schlags bestmöglich zusammenzufassen und abzubilden. Anfängliche Überlegungen, weitere Verteilungsparameter bzw. Vergleichsindikatoren der Werteverteilung mit präzisen Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z.B. über Kullback-Leibler-Divergenz) für die Analyse zu bestimmen, wurden aufgrund von verhältnismäßig niedrigem Erkenntnisgewinn und der Einsparung von Speicherplatz wieder verworfen. Die statistischen Kennzahlen werden im Folgenden zusammen mit zusätzlichen Attributen, die die Anzahl und den prozentualen Anteil der NA-Pixel pro Polygon angeben sowie mit dem entsprechenden Bewirtschaftungstyp (NC-Code) in einen Dataframe geschrieben. Dieser Dataframe dient als Input für den Algorithmus zur Anomalieerkennung.

Gruppierung und meteorologisches Clustering

Für die Unterteilung nach meteorologischen/klimatischen Bedingungen werden Cluster berechnet. Grundlage hierfür sind die stündlichen Durchschnittstemperaturdaten für Deutschland, die Teil des HOSTRADA-Datensatzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sind. Um aussagekräftige Merkmale für die Clusterbildung zu erhalten, werden die Daten zunächst zu Tagesmittel-, Minimal- und Maximalwerten aggregiert und dann zwei Variablen berechnet, die sich mit der Grünland-Temperatursumme (GTS) und den Vegetationsgradtagen (GDDs) auf die Vegetationsperiode von Grünland beziehen.

Die GTS ist definiert als die kumulative Summe aller täglichen Durchschnittstemperaturen zu Beginn des Jahres, die über 0 °C liegen. Werte aus dem Januar werden mit 0,5 und diejenigen aus dem Februar mit 0,75 multipliziert, um Prozesse zu berücksichtigen, die das Graslandwachstum in kalten Monaten einschränken. Die Definition besagt, dass Böden, wenn die kumulative Temperatursumme am Beginn des Jahres 200 °C überschreitet, genügend Stickstoff aufnehmen können, um ein nachhaltiges Vegetationswachstum zu ermöglichen (Ernst & Loeper, 1976). Für die Clusterbildung wird der genaue Tag des

Jahres (DOY) bestimmt, an dem dieser GTS-Wert erreicht wird. Diese Datumsangabe wird als Eingabemerkmal verwendet.

GDDs sind ein weiteres Maß für die Vegetationsphänologie (Prentice et al., 1992). Sie werden aus den täglichen Minimal- und Maximaltemperaturwerten abgeleitet. Liegen diese außerhalb des Intervalls zwischen 10 °C (Basistemperatur) und 30 °C (Obergrenze), werden sie auf die jeweiligen Grenzwerte gesetzt. Liegen sie innerhalb des Intervalls, werden sie unverändert übernommen, und die GDDs werden dann wie folgt berechnet:

$$GDD = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} - T_{base} \quad (1)$$

Die GDD-Werte werden anschließend kumulativ summiert. Liegt ein monatlicher Durchschnitt unter einem Schwellenwert von 10 °C, wird der gesamte Monat bei dieser abschließenden Berechnung der GDD-Summe, die als Eingabemerkmal für das Clustering dient, nicht berücksichtigt.

Beide Variablen werden pixelweise und für jedes Jahr separat berechnet. Im vorliegenden Fall werden für ein bestimmtes Jahr die GTS-Schwellenwerte für die DOYs sowie die GDD-Summen der neun diesem Jahr vorausgehenden Jahre einbezogen. Dieser große Zeitraum wurde gewählt, um ein robusteres Clustering-Ergebnis zu erhalten. Der Einfluss möglicherweise extremer Bedingungen in den ein oder zwei vorangegangenen Jahren wird somit minimiert. Diese insgesamt 18 Merkmale (2x9) dienen schlussendlich als Inputs für einen DBSCAN-Clustering-Algorithmus (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). Bei dieser dichtebasierten Clustering-Methode werden Datenpunkte anhand der beiden Parameter ε und *minPts* als Kern-, Rand- und Rauschpunkte klassifiziert. Datenpunkte gelten als Kernpunkte, wenn sich mindestens eine Anzahl von *minPts* Punkten innerhalb einer Entfernung ε von ihnen befinden. Randpunkte sind solche, die innerhalb von ε von einem Kernpunkt liegen, aber den Schwellenwert *minPts* nicht erfüllen. Rauschpunkte sind alle Datenpunkte, die außerhalb dieser Definitionen liegen (Ester et al., 1996). Die Parameterwerte für eine realistische Clusterkarte werden indirekt abgeleitet, indem definierte Faktoren auf ausgewählte Dateneigenschaften angewendet werden. Für ε wird eine Abstandsmatrix berechnet und der dem 3. Perzentil entsprechende Abstand als Parameter-Input verwendet. *minPts* wird durch Multiplikation der Anzahl aller Eingabepixel mit 0,005 bestimmt. Diese beiden Faktoren wurden im Rahmen einer Grid Search optimiert, wobei der Fokus auf der Suche nach einem guten Kompromiss zwischen der Anzahl der Cluster (die weder zu niedrig noch zu hoch sein sollte) und der Anzahl der Rauschpunkte (die niedrig gehalten werden sollte) lag. Dadurch wird final eine verlässliche Clustereinteilung für Sachsen erzeugt.

Um das Ergebnis schlussendlich in die Anomaliedetektion einzubeziehen, wird das Shapefile der Dauergrünlandschläge mit dem Raster der meteorologischen Cluster für Sachsen überlagert und jedem Polygon wird die Nummer des Clusters zugewiesen, die den größten Teil seiner Fläche abdeckt. Auf Grundlage der Clusterzuweisung und des NC-Codes pro Schlag werden Gruppen gebildet, für die die Anomalieerkennung separat durchgeführt wird. Nur Gruppen mit mindestens zehn Schlägen werden weiter berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass für sehr kleine Gruppen meist keine verlässlichen Anomalien bestimmt werden können.

Anomaliedetektion

Das Herzstück des Algorithmus ist der Isolation Forest (Liu et al., 2008). Diese Methode zur Anomaliedetektion nutzt binäre Entscheidungsbäume, um einen Datenraum so lange zu partitionieren, bis ein Datenpunkt vom Rest isoliert ist. Da sich eine Anomalie deutlich von der Mehrheit der anderen Datenpunkte unterscheidet und anomale Punkte selten vorkommen, lässt sie sich mit weniger Partitionen schneller isolieren. Da dieser Teilungsprozess zufällig und wiederholt über alle Attribute und Split-Werte hinweg erfolgt und keine Dichteabschätzung erfordert, ist er robust und schnell. Der Isolation Forest weist jedem Datenpunkt einen Anomaliewert zu, indem er den Mittelwert der Pfadlänge über alle Binärbäume bildet. Dieser Wert liegt bei nicht-anomalen Datenpunkten bei etwa 0,5 und weicht von diesem Wert ab, je kürzer die Pfadlänge ist. Es gibt jedoch keine native Definition eines Schwellenwerts, der Anomalien von Nicht-Anomalien trennt. Liu et al. (2008) geben zwar einen Anomaliewert von 0,6 als potentiellen Schwellwert an, dieser scheint aber nicht methodisch begründet und dürfte lediglich in Fällen mit vergleichbarer Datengrundlage sinnvoll sein. Um sich einem geeigneten Grenzwert für die Anomalieerkennung auf Dauergrünlandflächen anzunähern wurden diverse datengetriebene Vorgehensweisen evaluiert. Eine Bestimmung eines fließenden Schwellwerts auf Grundlage der Datenpunktanzahl ist zwar adaptiv, lässt aber die Anomaliewerte an sich außer Acht. Schlussendlich wurde sich für ein ganzheitliches Vorgehen entschieden, welches die steigenden Abstände zwischen aufsteigend angeordneten Anomaliewerten berücksichtigt. Hierzu werden zunächst alle Datenpunkte mit einem Anomaliewert von 0,6 oder höher betrachtet, in aufsteigender Reihenfolge angeordnet und die Differenzen zwischen zwei jeweils zwei aufeinanderfolgenden Werten berechnet. Der Mittelwert und die Standardabweichung des resultierenden Vektors werden als Verteilungsparameter für die Berechnung der Mahalanobis-Abstände aus den Differenzen verwendet. Der benutzerdefinierte Anomalieschwellenwert wird dann auf den Anomaliewert des ersten Datenpunkts festgelegt, dessen entsprechende Mahalanobis-Distanz den kritischen Wert einer Chi-Quadrat-Verteilung für ein Signifikanzniveau von 0,95 und einem Freiheitsgrad von 1 überschreitet. Alle Datenpunkte, deren Anomaliewert über diesem Schwellenwert liegt, werden als Anomalien gekennzeichnet, unabhängig von ihrem Mahalanobis-Abstand.

Die beschriebene Methodik erkennt anomale Dauergrünlandschläge aller Art. Dazu gehören Grünlandflächen, die im Vergleich zu ähnlichen Flächen außergewöhnlich grüne und gesunde Merkmale aufweisen. Da solche Fälle aus Verwaltungssicht in der Regel keinen Handlungsbedarf im Zusammenhang mit

möglichen Verstößen gegen die GLÖZ-1-Regelung begründen und für das Projektziel daher nicht relevant sind, wurde eine weitere Eingrenzung der Anomalien anhand einer Fallunterscheidung vorgenommen. Dazu werden für jeden Vegetationsindex charakteristische Wertebereiche betrachtet, die typische Nicht-Grünlandflächen erwartungsgemäß aufweisen. Für NDVI, GRVI und IRECI liegen diese Werte niedriger als bei einem typischen Grünlandschlag, während sie für den BSI höher ausfallen. Anschließend werden die mittleren Vegetationsindexwerte jedes anomalen Schlages untersucht. Dabei wird geprüft, ob sie bei NDVI, GRVI und IRECI unterhalb des 31. Perzentils beziehungsweise beim BSI oberhalb des 69. Perzentils liegen. Die Perzentilwerte wurden pragmatisch auf Basis etablierter Erfahrungswerte festgelegt. Wenn dies bei mindestens einem mittleren Indexwert der Fall ist, wird der Schlag als Anomalie beibehalten. Liegen alle mittleren Indexwerte außerhalb der für ihren Index definierten Bereiche, wird der Schlag aus der Liste der Anomalien entfernt. Dieses Verfahren eliminiert eindeutige Fälle unerwünschter Anomalien, behält jedoch gleichzeitig unklare Fälle bei, sodass die endgültige Beurteilung einem potentiellen Nutzer überlassen bleibt.

Das Vorgehen detektiert zuverlässig Verdachtsschläge für weitere Vor-Ort-Kontrollen. Abbildung 3 zeigt beispielhaft, dass nur solche Datenpunkte als Anomalien erkannt werden, die auffällige Werte in den extrahierten Inputmerkmalen in entsprechenden Wertebereichen aufweisen. Diese Ergebnisse bilden somit eine vielversprechende Grundlage für den Einsatz des Algorithmus in der administrativen Praxis.

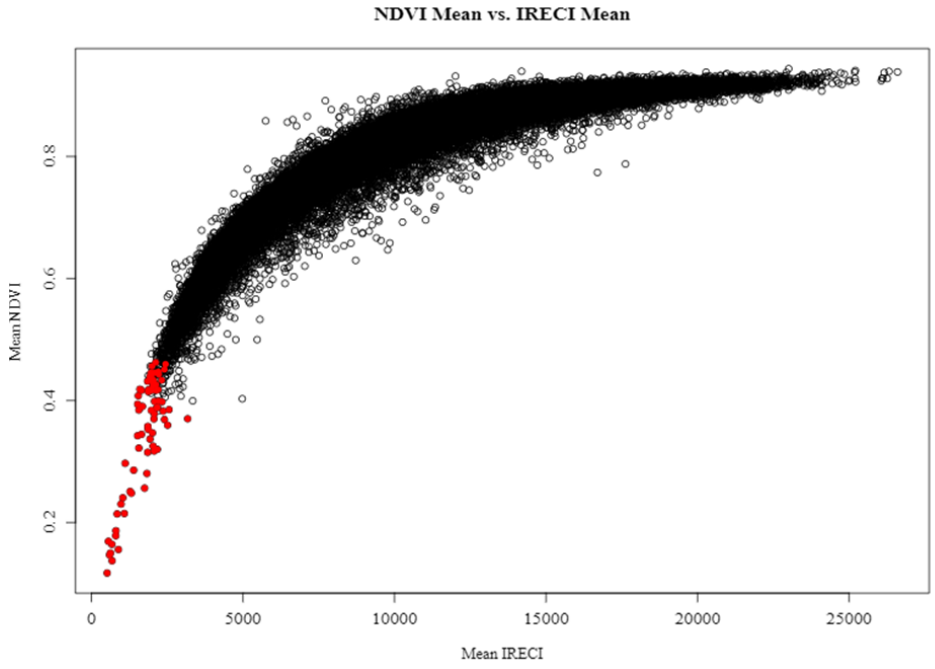


Abbildung 3: Scatterplot mit mittleren IRECI-Werten und mittleren NDVI-Werten aller Dauergrünlandschläge in Sachsen am 15. Mai 2024. Die vom Algorithmus als Anomalie erkannten Datenpunkte sind in rot gekennzeichnet.

Die Berechnungen wurden mit R in der Version 4.4.1 durchgeführt. Dabei kamen vor allem die Pakete terra 1.7-78, dplyr 1.1.4, dbscan 1.2.2 und isotree 0.6.1-1 zum Einsatz.

2.1.2.4 Validierungsprozesse durch Feldkampagnen (Vor-Ort-Kontrollen)

Wie im Kapitel 2.1.2.1 dargelegt, standen für die Entwicklung und Überprüfung des Algorithmus zur Anomaliedetektion auf Dauergrünland de facto keine verwertbaren Referenzdaten zur Verfügung. Eine Bewertung der Wirksamkeit des entwickelten Verfahrens konnte daher ausschließlich durch nachträgliche Validierungen erfolgen, bei denen die vom Algorithmus detektierten Anomalien im Feld überprüft wurden. Dieser Validierungsansatz war von Beginn an als iterativer Prozess angelegt. Auf jede Validierungsphase folgte eine Analyse der Ergebnisse, die in Anpassungen des Algorithmus mündete. Die so modifizierten Verfahren wurden anschließend erneut im Feld überprüft. Durch mehrfaches Durchlaufen dieses Zyklus aus Validierung und Algorithmenanpassung konnten die Ergebnisse der Anomaliedetektion schrittweise verbessert werden.

Die Auswahl der Untersuchungsgebiete orientierte sich im Wesentlichen an zwei Kriterien. Einerseits wurde die Anzahl und räumliche Dichte der detektierten Anomalien berücksichtigt, um eine hinreichende Anzahl an Validierungsfällen in überschaubaren Gebieten vorzufinden. Andererseits spielte im Sinne der Arbeitseffizienz auch die Erreichbarkeit der zu kontrollierenden Schläge eine Rolle, da die Feldarbeiten innerhalb begrenzter Zeitfenster durchgeführt werden mussten. Auf dieser Grundlage wurden zwei Untersuchungsregionen festgelegt. Diese umfassten die Region Dresden/Osterzgebirge sowie die Region Ostsachsen/Oberlausitz (vgl. Abbildung 4). Sämtliche Feldarbeiten wurden durch die Projektmitarbeiterin des LfULG durchgeführt. Dies gewährleistete eine hohe Konsistenz bei der Durchführung der Vor-Ort-Kontrollen und stellte die Vergleichbarkeit der Einschätzungen und Bewertungen über alle drei Validierungsphasen hinweg sicher.

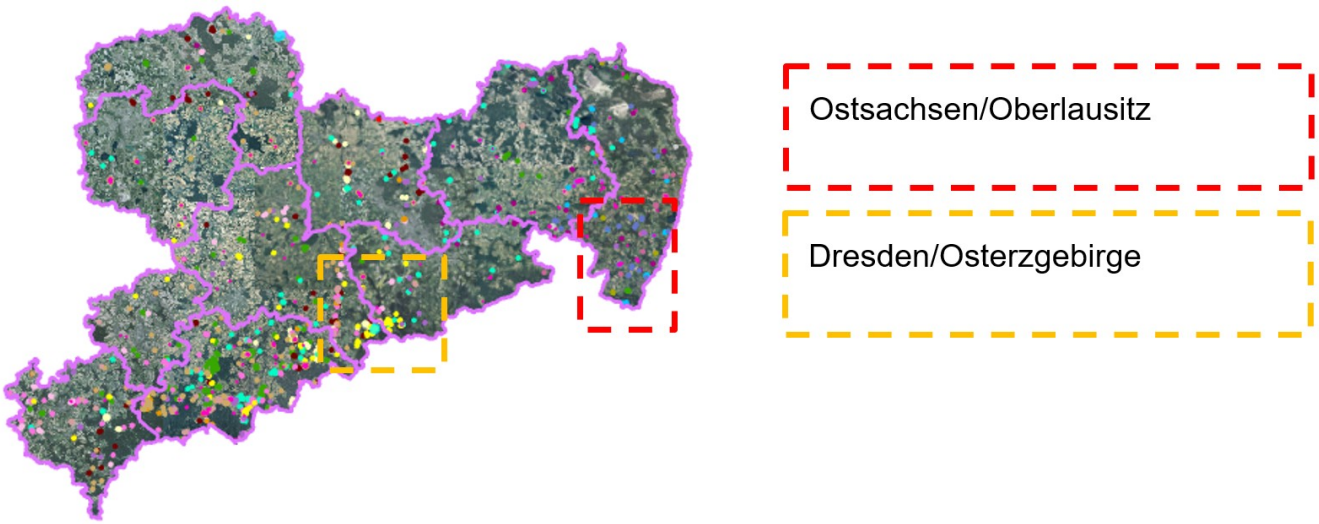


Abbildung 4: Lage der Untersuchungsregionen für die Feldarbeiten (Validierung) im Freistaat Sachsen

Insgesamt fanden drei Validierungsphasen in den zwei Untersuchungsgebieten statt. Diese wurden am 23. August 2024, am 30. August 2024 sowie am 8. November 2024 durchgeführt. Im Rahmen dieser drei Feldkampagnen wurden 23, 29 bzw. 19 Schläge besucht, sodass insgesamt 71 Schläge einer Vor-Ort-Kontrolle unterzogen wurden.

Das methodische Vorgehen bei den Feldarbeiten gliederte sich in mehrere Schritte. Zunächst erfolgte, auf Grundlage der Anomaliedetektion, die Auswahl der zu überprüfenden Schläge durch eine räumliche Selektion innerhalb der festgelegten Untersuchungsregionen. Für jeden ausgewählten Fall wurden anschließend die zur Analyse zugehörigen Satellitenbilder recherchiert und einer visuellen Bildinterpretation unterzogen. Auf dieser Grundlage wurde eine a-priori-Einschätzung vorgenommen, die eine erste Hypothese zur Ursache der detektierten Anomalie formulierte. Im nächsten Schritt wurde der jeweilige Schlag im Rahmen einer Vor-Ort-Kontrolle besucht und der tatsächliche Zustand der Grünlandoberfläche fotografisch und beschreibend dokumentiert. Abschließend erfolgte eine Bewertung der Detektion, bei der einerseits mögliche Ursachen für Fehldetektionen analysiert und andererseits die Nachvollziehbarkeit und Korrektheit der Anomaliedetektion beurteilt wurden.

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der einzelnen Feldkampagnen verdeutlichen den iterativen Charakter des gewählten Validierungsansatzes. Die Erkenntnisse aus jeder Validierungsphase flossen unmittelbar in die Weiterentwicklung des Algorithmus zur Anomaliedetektion ein. Dabei zeigte sich über die drei Kampagnen hinweg eine deutliche Verbesserung der Detektionsergebnisse, die ohne diesen engen Rückkopplungsprozess zwischen Feldvalidierung und Methodenentwicklung nicht hätte erreicht werden können.

Region Ostsachsen/Oberlausitz – 23. August 2024

Insgesamt wurden am 23. August 2024 im Untersuchungsgebiet Ostsachsen/Oberlausitz 23 Grünlandschläge untersucht, die zu diesem Zeitpunkt als Anomalien detektiert worden waren. Abbildung 5 zeigt beispielhaft einen solchen Fall.



Abbildung 5: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 23.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 31.07.2024 (Kategorie: Schleierwolken)

Bei der visuellen Interpretation der zum Detektionszeitpunkt aktuellsten Sentinel-2-Szene wurde erkennbar, dass das Gebiet von Schleierwolken bedeckt ist. Die Erdoberfläche ist zwar sichtbar, jedoch erscheint sie im Vergleich zu anderen Grünlandflächen in der Umgebung, die nicht von einem solchen Phänomen betroffen sind, verändert. Dies wurde als mögliche Ursache für die Kategorisierung als Anomalie eingeschätzt. Die Vor-Ort-Kontrolle bestätigte diese Vermutung. Obwohl zwischen der Sentinel-Aufnahme und der Vor-Ort-Kontrolle etwa drei Wochen lagen, konnte aufgrund der vorgefundenen Wachstumssituation eine tatsächliche Abweichung vom Sollzustand der Fläche ausgeschlossen werden. Es handelte sich somit um eine Fehldetektion, die auf atmosphärische Einflüsse zurückzuführen war.

Die folgende Abbildung 6 steht stellvertretend für ein weiteres Problem, das in dieser Phase der Methodenentwicklung zu Fehldetektionen führte.



Abbildung 6: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 23.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 29.07.2024 (Kategorie: Wolkenschatten)

Insbesondere bei ansonsten wolkenfreiem Himmel zeichnen sich aufgrund des hohen Kontrastes Wolkenschatten auf der Erdoberfläche ab. Da es sich auch hierbei um ein lokal begrenztes Phänomen handelt, wurden betroffene Schläge zu diesem Zeitpunkt der Methodenentwicklung als Anomalien detektiert, da sie einen signifikanten radiometrischen Unterschied zu umgebenden Grünlandschlägen aufwiesen. Auch für diesen Schlag wurde bereits a priori die These einer Fehldetektion aufgestellt, die sich durch die Vor-Ort-Begehung am 23. August bestätigte.

Ein weiteres Beispiel ist in Abbildung 7 dargestellt (roter Rahmen).



Abbildung 7: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 23.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 31.07.2024 (Kategorie: Fehldetektion)

In diesem Fall zeigte die a priori durchgeführte visuelle Interpretation des Sentinel-2-Datensatzes keine erkennbaren Auffälligkeiten, weshalb diesem Grünlandschlag bei der Vor-Ort-Kontrolle besondere Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Auch die Begehung vor Ort ergab keinen Hinweis auf eine tatsächliche Veränderung der Grünlandoberfläche. Die Ursache für die Detektion als Anomalie konnte somit weder durch die Bildinterpretation noch durch die Feldkontrolle abschließend geklärt werden. Die Ursache muss also an anderer Stelle gesucht werden.

Die Vor-Ort-Kontrollen der ersten Feldkampagne zeigen im Ergebnis, dass sich zwei grundlegende Arten von Fehldetektionen unterscheiden lassen. Zum einen handelt es sich um datenbedingte Fehler, die auf atmosphärische Einflüsse wie Wolken oder Wolkenschatten zurückzuführen sind. Zum anderen traten Fehler auf, deren Ursache im Algorithmus zur Anomaliedetektion selbst zu suchen ist. Während im zweiten Fall Anpassungen am Algorithmus erforderlich sind (vgl. Kapitel 2.1.2.3), wird im ersten Fall das Ergebnis maßgeblich durch die Qualität der Eingangsdaten bestimmt. Der hierfür relevante QAI-Layer der Sentinel-Daten wurde bereits in Kapitel 2.1.2.3 erläutert. Die daraus abgeleiteten Anpassungen zur Verbesserung der Datenvorverarbeitung wurden ebenfalls dort beschrieben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Algorithmus zur Anomaliedetektion in dieser Entwicklungsphase eine hohe Sensitivität gegenüber Schleierwolken aufwies. Die Robustheit des Verfahrens gegenüber derartigen atmosphärischen Störungen war zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend gegeben. Von den 23 überprüften Schlägen waren bei sieben Wolkenschatten die Ursache für die Fehldetektion, bei elf Schlägen Schleierwolken und bei fünf Schlägen konnte keine eindeutige Ursache benannt werden. Bemerkenswert ist dabei, dass die Schleierwolken bei der visuellen Interpretation der Satellitenbilder teilweise erst dann als solche erkannt wurden, nachdem die Detektion bereits erfolgt war. Ohne dieses Vorwissen wäre die visuelle Bildinterpretation möglicherweise zu dem Schluss

gekommen, dass tatsächliche Veränderungen auf den betroffenen Flächen vorlagen. Dies unterstreicht einerseits die Notwendigkeit einer verbesserten Vorverarbeitung der Eingangsdaten, zeigt andererseits aber auch, dass der Algorithmus radiometrische Veränderungen erfasst, die bei der visuellen Bildinterpretation zunächst unbemerkt bleiben.

Region Ostsachsen/Oberlausitz – 30. August 2024

Die zweite Feldkampagne fand am 30. August 2024 statt, lediglich eine Woche nach der ersten Begehung. Aufgrund dieses kurzen Zeitraums waren keine grundlegenden Anpassungen am Algorithmus zur Anomaliedetektion möglich. Vielmehr befand sich das Verfahren zu diesem Zeitpunkt in einem fortlaufenden Entwicklungsprozess. Die zweite Kampagne ist daher vorrangig als Ergänzung zur ersten Feldbegehung zu verstehen. Dennoch soll im Folgenden auf ausgewählte Ergebnisse etwas detaillierter eingegangen werden.

Abbildung 8 zeigt einen weiteren Fall, bei dem die Ursache für die Detektion ebenfalls bei der Beschattung durch Schleierwolken zu suchen ist.



Abbildung 8: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 20.08.2024 (Kategorie: Wolkenschatten von Schleierwolke)

Im Unterschied zum vorherigen Beispiel (vgl. Abbildung 6) fällt der Schatten hier jedoch deutlich diffuser auf die Erdoberfläche und grenzt sich damit weniger scharf von der umgebenden Landschaft ab. Die Vor-Ort-Kontrolle am 30. August 2024 bestätigte, dass keine tatsächliche Veränderung der Grünlandoberfläche vorlag. Dieser Fall unterstreicht erneut die hohe Sensitivität des Algorithmus gegenüber atmosphärischen Einflüssen, auch dann, wenn diese diffus ausgeprägt sind und sich nicht klar von der Umgebung abgrenzen.

In Abbildung 9 ist ein Schlag dargestellt, bei dem das Satellitenbild zwei deutlich voneinander abweichende Oberflächenzustände innerhalb der Schlaggrenzen erkennen lässt. Diese räumliche Heterogenität ist als wahrscheinliche Ursache für die Detektion als Anomalie anzusehen.

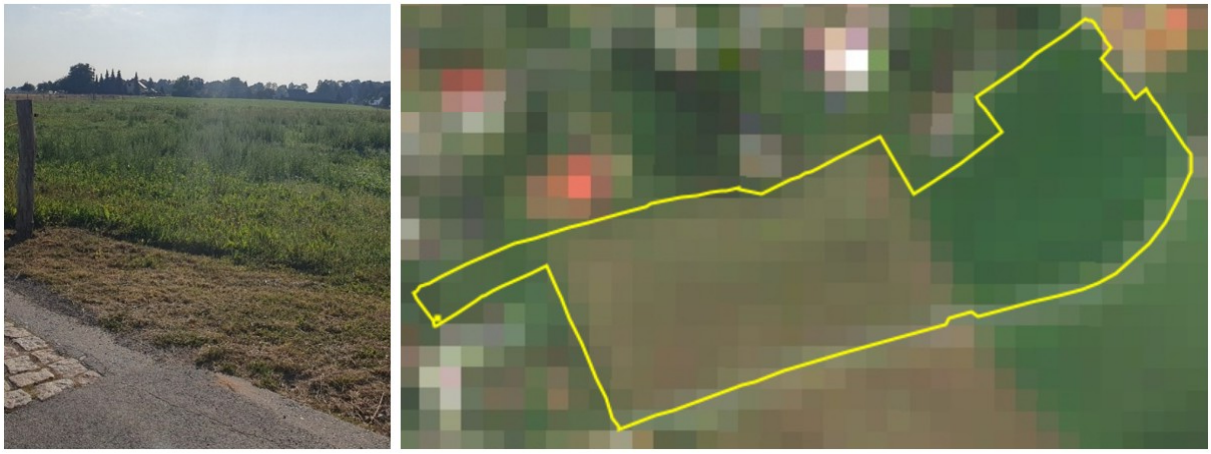


Abbildung 9: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme vom 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 12.08.2024; (Kategorie: Nichthomogene Nutzung)

Eine Beurteilung, ob ein Vergehen im Sinne von GLÖZ 1 vorliegt, war allein auf Grundlage der Fernerkundungsdaten jedoch nicht möglich. Erst die Vor-Ort-Begehung lieferte eine plausible Erklärung für das beobachtete Muster. Es entstand vor Ort der Eindruck, dass es sich um eine Portionsweide handeln könnte, bei der die Beweidung sukzessive auf unterschiedlichen Teilflächen erfolgte. Aus fernerkundlicher Sicht war die Detektion somit korrekt, da eine tatsächliche radiometrische Abweichung vorlag. Aus fachlicher, landwirtschaftlicher Perspektive stellt ein solches Ergebnis jedoch nur einen Zwischenschritt dar. Der Algorithmus lenkt die Aufmerksamkeit auf eine potenzielle Auffälligkeit, kann die abschließende Bewertung aber nicht ersetzen. In derartigen Fällen bedarf es weiterführender Klärung. Der Begriff der Anomalie ist hier daher eher im Sinne von *auffällig* zu verstehen und nicht mit Vergehen der Landwirte gleichzusetzen.

Ein weiteres Beispiel verdeutlicht, dass der Algorithmus zur Anomaliedetektion bei zunehmender Heterogenität der Oberflächenreflektanzen innerhalb eines Schlages zu reagieren beginnt. In Abbildung 10 ist ein Grünlandschlag dargestellt, der neben der eigentlichen Grünlandnutzung auch vom Schlagschatten einer Wolke beeinflusst wird (nördlicher Teil). Darüber hinaus fällt im südlichen Bereich eine außergewöhnlich helle Oberflächenfärbung auf (roter Rahmen). Die Vor-Ort-Kontrolle ergab, dass es sich dabei um einen Lagerplatz für Baustoffe handelte.



Abbildung 10: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Vor-Ort-Aufnahme des südlichen Teils vom 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 10.08.2024 (roter Rahmen, Kategorie: Nicht-homogene Nutzung)

Auch in diesem Fall erfüllte die Anomaliedetektion ihre Funktion. Aus Sicht einer Landwirtschaftsverwaltung muss jedoch geprüft werden, ob die veränderte Nutzung dieser Teilfläche ein Vergehen nach GLÖZ 1 darstellt oder ob gegebenenfalls eine Genehmigung für die Umnutzung vorliegt. Ein Werkzeug, das in Verwaltungsprozesse eingegliedert werden soll, muss dieser Problematik gerecht werden (vgl. Kapitel 2.1.3).

Abbildung 11 zeigt ein weiteres Beispiel, bei dem der Algorithmus eine Anomalie detektierte. Anders als in den zuvor beschriebenen Fällen handelt es sich hier um einen im Satellitenbild sehr homogen erscheinenden Schlag.



Abbildung 11: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Übersicht über den Gesamtschlag vom 30.08.2024; Mitte: Nahaufnahme der Nutzung (vmtl. Rübe); Rechts: Sentinel-2-Bild vom 12.08.2024 (Kategorie: Andere Nutzung)

Auch die visuelle Interpretation, die im Vorfeld der Feldkampagne durchgeführt wurde, ließ nicht unmittelbar auf eine Anomalie schließen. Die Vor-Ort-Kontrolle zeigte jedoch ein eindeutiges Ergebnis. Die Fläche wurde nicht mehr als Dauergrünland genutzt (vmtl. Rübe). Die weiterführenden Analysen ergaben aber auch, dass dieser Schlag nicht in allen Zeitschnitten als Anomalie erkannt wurde. Daraus lässt sich ableiten, dass neben der räumlichen Analyse, wie sie vom entwickelten Algorithmus durchgeführt wird, auch zeitliche Aspekte eine wesentliche Rolle spielen. Auch dieser Anforderung muss ein operationelles Werkzeug gerecht werden (vgl. Kapitel 2.1.3). Wie bereits mehrfach angemerkt, stellt eine bestätigte Auffälligkeit noch kein Vergehen dar. In einem weiteren Schritt der Verwaltungskontrolle muss geprüft werden, ob gegebenenfalls eine Genehmigung für die veränderte Nutzung vorliegt.

In die gleiche Kategorie (Andere Nutzung) fällt das abschließende Beispiel der zweiten Feldkampagne. Bereits bei der visuellen Interpretation des Satellitenbildes vom 12. August 2024 deutete sich an, dass auf diesem Schlag keine typische Grünlandnutzung zu erwarten war. Dies bezog sich einerseits auf die fehlende Homogenität des Schlages, andererseits auf dessen radiometrische Eigenschaften. Auch die Interpretation der unmittelbaren Umgebung ließ vermuten, dass bauliche Veränderungen stattgefunden haben könnten. Die Vor-Ort-Kontrolle bestätigte diese a priori getroffenen Annahmen. Offensichtlich fanden Teile der Bautätigkeiten auf der als Grünland deklarierten Fläche statt. Diese Veränderung wird in allen verfügbaren Zeitschnitten erkannt (vgl. Abbildung 12).



Abbildung 12: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Zustand der baulichen Veränderung am 30.08.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 12.08.2024 (Kategorie: Andere Nutzung)

Neben der Erkenntnis, dass der Algorithmus an dieser Stelle genau die Arbeit leistet, für die er konzipiert wurde, verdeutlicht dieser Fall auch den Wert einer kontextbezogenen Betrachtung. Das Umfeld des jeweils untersuchten Schlages in die Analyse einzubeziehen, kann für die Bearbeitung eines Falles entscheidende Hinweise liefern (vgl. Kapitel 2.1.3).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass von den 29 besuchten Schlägen 14 aufgrund von Wolkenschatten und vier aufgrund von Schleierwolken detektiert wurden. Bei acht Schlägen konnte keine eindeutige Ursache für die Detektion festgestellt werden. Bei drei Schlägen hingegen bestätigte die Vor-Ort-Kontrolle eine tatsächliche Änderung der Nutzung.

Region Dresden/Osterzgebirge – 8. November 2024

Zwischen den beiden Feldkampagnen im August und der dritten Kampagne im November lagen mehr als zwei Monate. Dieser Zeitraum ermöglichte es, den Algorithmus zur Anomaliedetektion auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse anzupassen. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich somit auf eine überarbeitete Version des Verfahrens. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass die Detektion im November mit einem veränderten Erscheinungsbild der Grünlandflächen einhergeht. Der phänologische Zustand des Grünlands unterschied sich grundlegend von dem der Sommermonate. Im Folgenden wird daher nur insofern auf Einzelergebnisse eingegangen, als dass diese im Vergleich zu den vorangegangenen Feldkampagnen einen Erkenntniszugewinn darstellen.

Ein neuer Aspekt, der in den vorangegangenen Kampagnen nicht beobachtet wurde, ist der Einfluss von Schlagschatten durch Bäume. Bei schmalen Grünlandschlägen kann der Anteil der von Schlagschatten beeinflussten Pixel bezogen auf die Gesamtfläche des Schlages erheblich sein. Dieser Effekt verstärkt sich im Herbst durch den flacheren Sonnenstand zusätzlich. Ein solcher Schlag erscheint im Vergleich zu seiner Umgebung als Anomalie, obwohl alle Schläge bei der Verarbeitung nach innen gepuffert werden. Abbildung 13 zeigt exemplarisch einen derartigen Fall.



Abbildung 13: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Situation vor Ort am 08.11.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 26.10.2024 (Kategorie: Schlagschatten)

Für die Umsetzung als Werkzeug einer Verwaltung wäre es daher wichtig, dass Mitarbeiter der Behörde, die vor der Entscheidung stehen, entsprechende Maßnahmen einzuleiten, die Möglichkeit erhalten, sich einen Eindruck von der Umgebung zu verschaffen. Die räumliche Auflösung der Sentinel-Daten reicht hierfür nicht aus. Die zusätzliche Bereitstellung von Digitalen Orthophotos (DOPs) stellt daher eine wesentliche Anforderung an ein solches System dar (vgl. Kapitel 2.1.3).

Die Beobachtungen der dritten Kampagne zeigten zudem, dass Grünlandschläge, die kurz zuvor mit organischem Dünger aus der Tierproduktion behandelt wurden, vom Algorithmus häufig als Anomalien detektiert wurden. Je nach Ausbringungsverfahren, etwa mittels Schleppschlauch oder im Scheibenschlitzverfahren, kann der visuelle Zustand eines Grünlandschlages in direkter zeitlicher Nähe zur Düngung deutlich von dem der umgebenden Flächen abweichen. Abbildung 14 zeigt einen solchen Fall. Das ausgebrachte Material nimmt hier einen erheblichen Anteil der Gesamtfläche ein, was die radiometrische Abweichung erklärt.

Auch in diesem Fall ist festzuhalten, dass der Algorithmus im Sinne seiner Zielsetzung korrekt arbeitet und die betreffenden Schläge zurecht als auffällig markiert. Der Umgang mit dieser Einschränkung obliegt den Nutzerern in der Verwaltung. In einer solchen Situation wäre es empfehlenswert, eine Entscheidung gegebenenfalls aufzuschieben und die Analyseergebnisse eines späteren Satellitenüberflugs abzuwarten. Düngeereignisse wirken sich nur temporär auf die Reflektanzen der Oberfläche aus und sind nach kurzer Zeit nicht mehr im Satellitenbild sichtbar. Ein entsprechendes Werkzeug sollte daher die Möglichkeit bieten, einem Schlag den Status einer zurückgestellten Entscheidung zuzuweisen, um zu einem späteren Zeitpunkt eine fundierte Beurteilung vornehmen zu können (vgl. Kapitel 2.1.3).

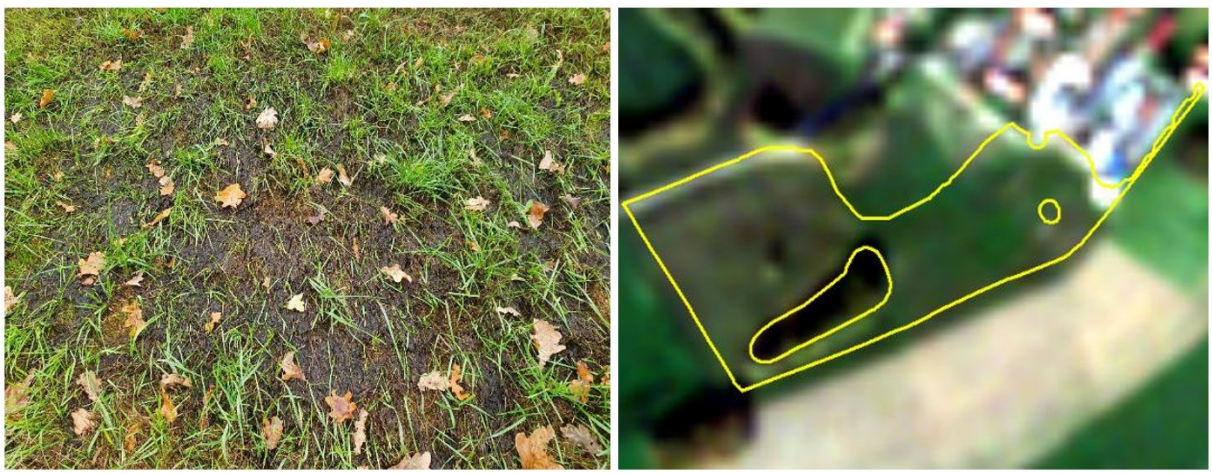


Abbildung 14: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Nahaufnahme des Schlages mit organischem Dünger; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 05.11.2024 (Kategorie: Düngung)

Abbildung 15 zeigt einen Schlag, auf dem erkennbar kein Grünland mehr vorhanden war. Was konkret auf der Fläche geschehen war, ließ sich nicht abschließend klären. Denkbar wäre etwa eine Neuansaat. Bereits die visuelle Interpretation der Sentinel-Daten vom 26. Oktober 2024 deutete auf diesen Befund hin, der sich im Rahmen der Vor-Ort-Kontrolle bestätigte. Im Rahmen des Projektes konnte nicht abschließend eruiert werden, ob es sich im vorliegenden Fall um ein Vergehen im Sinne von GLÖZ 1 handelte. Im konkreten Anwendungsfall wäre dies durch die Nutzer eines zu entwickelnden Werkzeugs zu prüfen.



Abbildung 15: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Nutzung des Schlages am 08.11.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 26.10.2024 (Kategorie: Andere Nutzung)

Das abschließende Beispiel der insgesamt drei Feldkampagnen ist in Abbildung 16 dargestellt. Bereits die visuelle Interpretation des Satellitenbildes legte den Schluss nahe, dass zumindest auf einer Teilfläche kein Grünland mehr vorhanden war. Der Algorithmus zur Anomaliedetektion schlug somit korrekterweise an. Im vorliegenden Fall wurde der Schlag zwischen dem 9. Oktober 2024 und dem 26. Oktober 2024 insgesamt dreimal als auffällig detektiert. Die im Rahmen der Feldkampagne durchgeführte Vor-Ort-Kontrolle bestätigte diesen Befund. Ein Teil des Grünlandschlages wurde als Lagerstätte für Silageballen genutzt.



Abbildung 16: Als Anomalie detektierter Grünlandschlag. Links: Temporär andere Nutzung des Schlages am 08.11.2024; Rechts: Sentinel-2-Bild vom 26.10.2024 (Kategorie: Andere Nutzung)

Ob aus Sicht der Landwirtschaftsverwaltung in einem solchen Fall ein Verstoß seitens des Landwirts vorliegt, kann nicht Gegenstand der fernerkundlichen Datenanalyse sein. Eine solche Bewertung erfordert das Eingreifen und die Entscheidung fachkundiger Mitarbeiter. Im vorliegenden Fall dürfte die Lagerung von Silageballen auf Grünland im Freistaat Sachsen im Hinblick auf GLÖZ 1 jedoch unschädlich sein, sofern keine Entnahme vor Ort erfolgt.

Abschließend lässt sich feststellen, dass alle drei Feldkampagnen einen unmittelbaren Einfluss auf die Methodenentwicklung hatten, deren Validierung sie in erster Linie dienten. Im Verlauf der Feldkampagnen zeigte sich, dass die Qualität der Datenanalyse durch die gewonnenen Erkenntnisse deutlich gesteigert werden konnte. Dem bereits ausführlich erörterten Problem der mangelnden Referenzdaten konnte auf diesem Wege wirksam begegnet werden (vgl. Kapitel 2.1.2.1). Auch wenn die Durchführung der Feldkampagnen mit einem erheblichen Arbeitsaufwand verbunden war, hat sich diese Maßnahme des Projektmanagements als lohnend erwiesen. Darüber hinaus trugen die Vor-Ort-Kontrollen maßgeblich dazu bei, das grundsätzliche Verständnis der Projektmitarbeiter für die landwirtschaftliche Praxis zu vertiefen. Die unmittelbare Konfrontation mit den tatsächlichen Gegebenheiten auf Grünlandflächen, den dort stattfindenden Arbeitsschritten und Bewirtschaftungsmaßnahmen, erwies sich als äußerst wertvoll. Sowohl im Hinblick auf die Methodenentwicklung als auch mit Blick auf die künftige Entwicklung eines operationellen Werkzeuges ist der Wert der Feldkampagnen daher nicht zu unterschätzen. Die gewonnenen Erfahrungen flossen nicht nur in die Verbesserung der Algorithmen ein, sondern schärften auch das Bewusstsein dafür, welche Anforderungen ein praxistaugliches System erfüllen muss.

2.1.2.5 Vorbereitende GLÖZ-Analysen – Ergebnisse der Vorbereitungsphase

Wie bereits in Kapitel 2.1.1.10 erläutert, erfolgte im Projekt eine Priorisierung. Dennoch wurden im Sinne einer Vorbereitungsphase verschiedene Themen behandelt, die abschließend nicht in das Online-Werkzeug implementiert worden sind (vgl. Kapitel 2.1.3).

Verbot des Abbrennens von Stoppelfeldern – GLÖZ 3

Im Rahmen einer Qualifikationsarbeit an der Professur für Umweltfernerkundung der TU Dresden wurde die Erkennungsrate von Ackerbränden in Mitteldeutschland im Sommer 2023 durch die Satellitensensoren VIIRS und MODIS untersucht. Dazu wurden zunächst 46 Ackerbrände im Juli 2023 in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen im Rahmen einer umfangreichen Medienrecherche (Zeitung, Social Media) ermittelt und wesentliche Daten wie Brandort, Startzeit, Branddauer, Feldbedeckung und Brandfläche zu den Brandereignissen zusammengetragen. Anschließend wurde ermittelt, welche dieser Ackerbrände durch VIIRS und MODIS detektiert wurden. Weiterhin erfolgte eine umfangreiche Analyse der Einflussfaktoren für die Nicht-Detektion (Unterschätzung) von Brandereignissen. Von 46 untersuchten Ackerbränden wurden 17 Brände (etwa 37 %) durch VIIRS erkannt. Nur einer dieser Brände wurde auch durch MODIS detektiert.

Hauptgründe für nicht erkannte Brände waren ungünstige Überflugzeiten der Satelliten (bei 15 Bränden) sowie Wolkenbedeckung und niedrige Intensität der Brände. Viele Brände traten am Nachmittag auf, außerhalb der Überflugfenster der Satelliten. VIIRS hat durch häufigere Überflüge eine höhere Detektionswahrscheinlichkeit als MODIS. Eine weitere Ursache für die niedrige Detektionsrate von MODIS gegenüber VIIRS liegt in der geringeren räumlichen Auflösung begründet. Die Wahrscheinlichkeit der Erkennung wurde durch teilweise dichte Wolkenbedeckung an den Brandtagen zusätzlich reduziert. Wie erwartet, hatte auch die Intensität der Brandereignisse einen Einfluss auf deren Erkennungsrate. Brände auf bewachsenen Feldern wurden häufiger erkannt als Brände auf abgeernteten Feldern, da diese intensivere Feuerfronten mit höherer Infrarotstrahlung erzeugen. Kleinere und kürzer andauernde Brände wurden seltener erkannt. Die Brandfläche hat indirekt Einfluss auf die Detektion, da größere Brände eher unter Wolkenlücken sichtbar sind. Brände, bei denen Erntemaschinen, Kleingartenanlagen oder Waldstücke ebenfalls betroffen waren, wurden häufiger erkannt. Waldstücke trugen jedoch nur dann zur Detektion bei, wenn auch Baumkronen Feuer fingen. Diese Beispielstudie konnte zeigen, dass VIIRS im Vergleich zu MODIS eine deutlich höhere Genauigkeit bei der Detektion von Ackerbränden aufweist. Dennoch bleiben zahlreiche Brände unerkannt, insbesondere durch Einschränkungen in der zeitlichen und räumlichen Abdeckung. Beide Sensoren können daher für die Überprüfung von GLÖZ 3 nicht zuverlässig in Betracht gezogen werden. Ob in Zukunft Daten von Anbietern wie OroraTech oder constellr hierbei eine Rolle spielen können, bleibt zu überprüfen.

Schaffung von Pufferstreifen entlang von Gewässern – GLÖZ 4

Bevor eine Methodenentwicklung auf Grundlage von Sentinel-Daten erfolgen kann, ist zunächst zu prüfen, ob und in welcher Form sich das Vorhandensein eines Pufferstreifens in höchstauflösenden Daten abbildet. Aus diesem Grund wurde eine Voranalyse zur Erkennbarkeit von Pufferstreifen in höchstauflösenden Daten vorgeschaltet. Die Planung und Durchführung von UAV-Befliegungen ist Bestandteil des Curriculums im Bachelorstudiengang *Geodäsie und Geoinformation* an der TU Dresden. Für die Umsetzung der Voranalyse konnte die Juniorprofessur für Geosensorsysteme gewonnen werden. Im Sommersemester 2024 planten und realisierten Studierende im Rahmen eines Projektseminars die Befliegung eines Pufferstreifens.

Ein geeigneter Schlag mit Pufferstreifen wurde durch das LVG Köllitsch bereitgestellt. Dabei handelte es sich um einen konventionell bewirtschafteten Maisschlag, auf dem Pflanzenschutzmittel und Düngung eingesetzt wurden. Innerhalb des Pufferstreifens erfolgte hingegen eine mechanische Unkrautbeseitigung. Der Untersuchung lag die Arbeitshypothese zugrunde, dass sich infolge der unterschiedlichen Bewirtschaftung Unterschiede im Aufwuchs, insbesondere hinsichtlich Wuchshöhe und Vitalität, sowie im Boden, etwa bezüglich Rauigkeit und Reflexionsgrad, erkennen lassen. Die Testflächen wurden im Rahmen des Projektseminars sowohl mit einem LiDAR-Instrument als auch mit einem Multispektralscanner beflogen. Die erhobenen Daten stehen für weiterführende Auswertungen zur Verfügung.

Weitere Ergebnisse der Vorbereitungsphase

Im weiteren Projektverlauf wurden die grundlegenden Überlegungen aus der Priorisierungsphase zur Mindestbodenbedeckung erneut aufgegriffen und fachlich weiter eingeordnet. Auf Basis der im Projekt gewonnenen Erfahrungen wurden mögliche Lösungsansätze diskutiert und hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit bewertet. Im Mittelpunkt stand dabei die Frage, ob und unter welchen Voraussetzungen sich eine fehlende oder unzureichende Bodenbedeckung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten zuverlässig erkennen lässt. Dabei wurde insbesondere betrachtet, welche Referenzdaten für eine belastbare Methodenentwicklung erforderlich wären, welche Datenquellen und Beobachtungszeiträume einbezogen werden müssten und welche fachlichen Kriterien zur Bewertung der Bodenbedeckung herangezogen werden können. Von besonderer Bedeutung sind dabei jahreszeitliche Unterschiede, Bewirtschaftungsereignisse, Kulturarten, Zwischenfrüchte sowie Zeiträume, in denen eine Mindestbodenbedeckung fachlich oder rechtlich relevant ist.

Als mögliche methodische Ansätze wurden unter anderem Zeitreihenanalysen und Verfahren des maschinellen Lernens diskutiert. Beide Ansätze bieten grundsätzlich Potenzial, stellen jedoch unterschiedliche Anforderungen an Datenbasis und Umsetzung. Zu berücksichtigen sind insbesondere die Menge und Qualität geeigneter Referenzdaten, der Prozessierungsaufwand sowie die Robustheit der Methode

gegenüber wechselnden Witterungsbedingungen, regionalen Standortunterschieden, Bewirtschaftungsvarianten und Datenlücken. Auf dieser Grundlage konnten erste Ansatzpunkte für eine mögliche fernerkundungsbasierte Bewertung der Mindestbodenbedeckung abgeleitet und zugleich zentrale Voraussetzungen für eine Weiterentwicklung benannt werden.

2.1.3 Implementierung und Dienstbereitstellung

2.1.3.1 Grundlegende Aspekte der Implementierung und Dienstbereitstellung

Obwohl es sich beim vorliegenden Vorhaben um ein Forschungsprojekt handelte, war es von Beginn an das erklärte Ziel, am Ende der Projektlaufzeit ein funktionsfähiges Werkzeug zur Verfügung zu stellen. Diesem Anspruch wurde durch die Einrichtung eines eigenständigen Arbeitspaketes 4 Rechnung getragen. Die Federführung dieses Arbeitspaketes lag beim Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, wodurch die behördliche Perspektive in der Umsetzung sichergestellt wurde. Die eigentliche Implementierung sollte durch einen externen IT-Dienstleister erfolgen, der nicht Teil des Projektkonsortiums war.

Strukturell stellte das Arbeitspaket 4 eine bewusst eingeplante Sollbruchstelle dar. Die Freigabe der entsprechenden Mittel für die Implementierungsleistung erfolgte erst im Projektverlauf, nachdem hinreichend belegt werden konnte, dass die Methodenentwicklung erfolgreich abgeschlossen wurde (vgl. Kapitel 2.1.2.3).

Als Dienstleister konnte die PIKOBYTES GmbH[2] gebunden werden. Der Auftrag wurde erfolgreich abgeschlossen und mündete in die Implementierung des sogenannten *DGL-Monitors* am 6. Februar 2026 auf der CODE-DE. Die wesentlichen Anforderungen, die diesem Werkzeug zugrunde lagen, werden im folgenden Kapitel erläutert.

2.1.3.2 Soll-Konzept – Anforderungen an den Dienst

Die Beauftragung eines externen IT-Dienstleisters zur Implementierung des angestrebten Werkzeugs erforderte die Erstellung einer detaillierten Leistungsbeschreibung. Diese diente als verbindliche Grundlage für die öffentliche Ausschreibung und musste sowohl die funktionalen Anforderungen an das System als auch die technischen Rahmenbedingungen präzise definieren. Ein sorgfältig ausgearbeitetes Soll-Konzept war dabei unerlässlich, um einerseits den Bietern eine klare Vorstellung des

[2] https://pikobytes.de

gewünschten Ergebnisses zu vermitteln und andererseits eine objektive Bewertung der eingereichten Angebote zu ermöglichen.

Die Anforderungen an das Werkzeug wurden innerhalb des Projektteams erarbeitet, um sowohl die methodisch-technischen als auch die landwirtschaftlich-fachlichen Aspekte gleichermaßen zu berücksichtigen. Dabei flossen die Perspektiven der wissenschaftlichen Einrichtungen ebenso ein wie die praktischen Erfordernisse der behördlichen Anwendung. In einem ersten Schritt wurden sämtliche Anforderungen zunächst offen gesammelt und anschließend thematisch geordnet. Durch diese Strukturierung ließen sich sechs Anforderungskategorien (AK) definieren, die das gesamte Spektrum der gewünschten Funktionalitäten abdecken:

- Technische Infrastruktur & Betrieb
- Datengrundlagen & Datenquellen
- Prozessierung & Algorithmus
- Benutzeroberfläche & Interaktion
- Visualisierung & Kartenelemente
- Workflow & Statusverwaltung

2.1.3.3 Der „Dauergrünland-Monitor“

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, stellen die kategorisierten Einzelanforderungen eine ideale Zielvorstellung dar, die sich nicht in allen Teilen realisieren ließ. Die Gründe hierfür sind vielfältig und werden im Folgenden für die jeweiligen Anforderungskategorien erläutert. Entscheidungen, die von der ursprünglich formulierten „Idealvorstellung“ abweichen, erfolgten in erster Linie als Ergebnis des Abstimmungsprozesses zwischen den Projektpartnern und waren stets fachlich begründet. Dabei spielten sowohl technische Machbarkeit als auch verfügbare Ressourcen und zeitliche Rahmenbedingungen eine Rolle. Die folgenden Ausführungen dienen dazu, die finale Anwendung in ihrer tatsächlich umgesetzten Form vorzustellen. Dabei wird bewusst nicht eine rein funktionale Beschreibung gewählt, sondern die Darstellung orientiert sich am praktischen Arbeitsablauf einer Verwaltungsmitarbeiterin bzw. eines Verwaltungsmitarbeiters. Dieses Vorgehen soll das Gesamtverständnis der Arbeitsmöglichkeiten der Software eingängiger vermitteln und die Anwendung aus Nutzerperspektive nachvollziehbar machen. Schritt für Schritt wird dabei aufgezeigt, wie die entwickelte Anwendung die satellitengestützte Anomaliedetektion auf Dauergrünland in den behördlichen Arbeitsalltag integrieren kann.

Abbildung 17 zeigt den Startbildschirm nach erfolgter Anmeldung. Dieser enthält grundlegende Erläuterungen zum Dienst sowie eine Darstellung der verfolgten Ziele. Entgegen der ursprünglich formulierten Anforderungen in AK1.4 und AK4.2 wurde kein automatisierter Registrierungs- und Anmeldeprozess

implementiert. Die Entscheidung hierfür basierte auf einer Abwägung zwischen Funktionalität und Sicherheitsanforderungen.

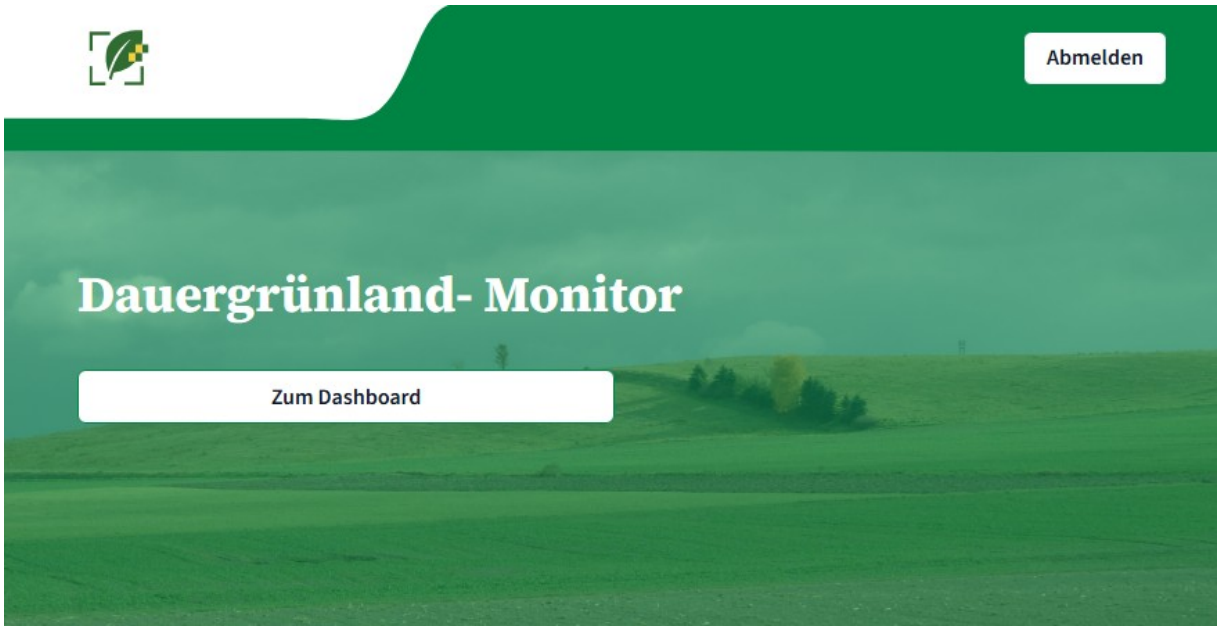


Abbildung 17: Startbildschirm des Dauergrünland-Monitors

Bei der zu erwartenden Anzahl potenzieller Nutzerinnen und Nutzer erschienen die für einen automatisierten Prozess notwendigen sicherheitstechnischen Maßnahmen unverhältnismäßig. Stattdessen erfolgt die Registrierung im System über einen direkten Kontakt per E-Mail mit dem Referat 22 des LfULG[3]. Interessierte Personen wenden sich an diese Stelle und werden nach Prüfung ihrer Berechtigung durch das LfULG freigeschaltet. Dieses Verfahren gewährleistet einerseits einen kontrollierten Zugang zur Anwendung und ermöglicht andererseits eine direkte Kommunikation zwischen Betreibern und Nutzern bereits im Vorfeld der ersten Verwendung.

Das Dashboard bildet das zentrale Element der gesamten Anwendung. Sofern bereits Aufträge ausgeführt wurden, ist an dieser Stelle einer der Aufträge vorausgewählt und die zugehörige Ergebnistabelle wird im zentralen Bereich der Anwendung angezeigt (vgl. Abbildung 20).

Der allgemeine Arbeitsprozess beginnt mit dem Anlegen eines neuen Auftrages (vgl. Abbildung 18).

[3] E-Mail: Referat22@lfulg.sachsen.de

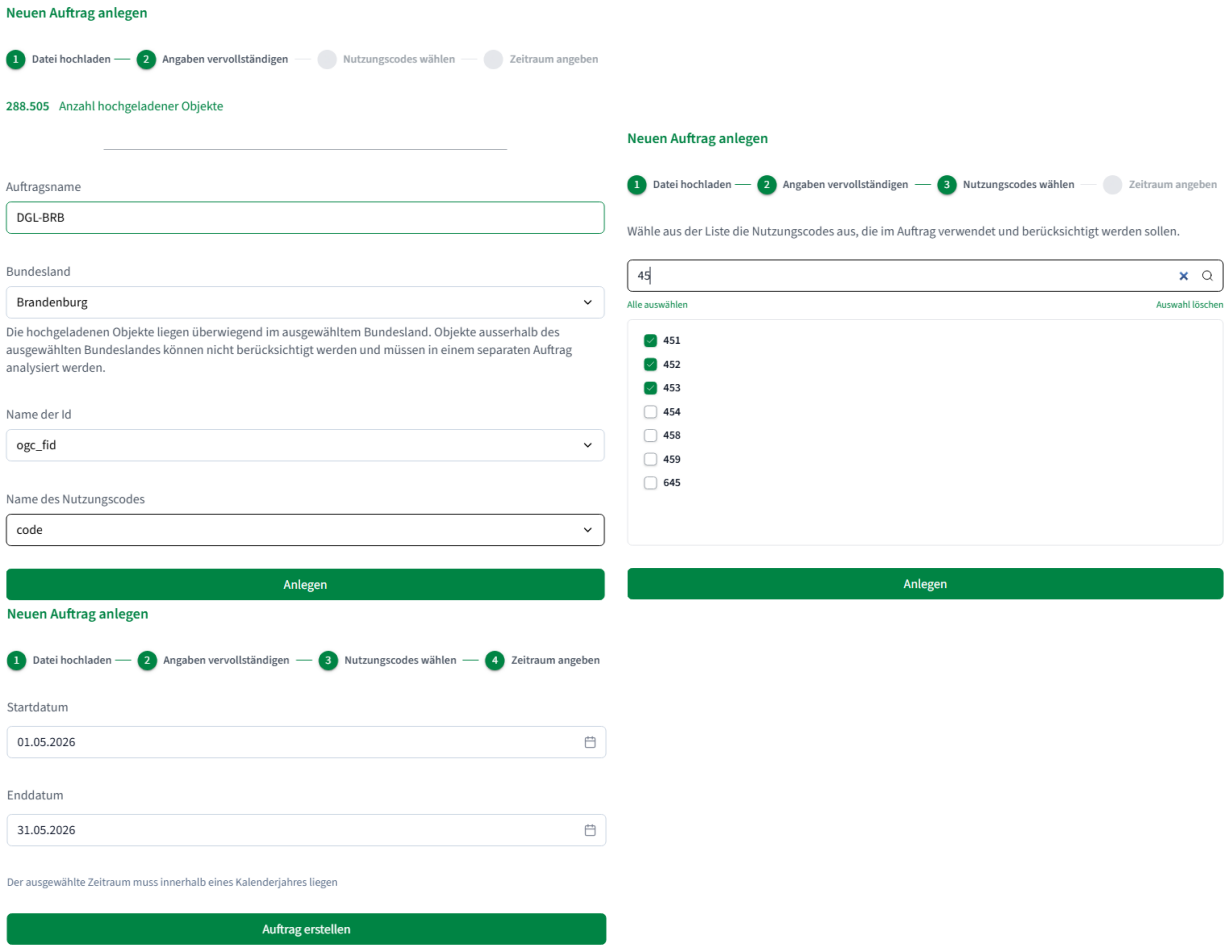


Abbildung 18: Prozess des Anlegens eines Monitoring-Auftrags

Dabei werden zunächst die zu analysierenden Flächendaten als komprimierte Shape-Datei hochgeladen (ZIP-Archiv). Die Anwendung prüft diese Daten automatisch und ermittelt, in welchem Bundesland die bereitgestellten Flächen überwiegend liegen. Gleichzeitig wird die Struktur des Datensatzes ausgewertet. In diesem ersten Schritt wird ein Name für den Auftrag vergeben und die benötigten Informationen aus dem Datensatz werden zugeordnet. Konkret muss angegeben werden, in welcher Spalte die eindeutige Kennung jeder Fläche zu finden ist und unter welchem Attributnamen der Nutzungscode hinterlegt ist. Im nächsten Schritt wird ausgewählt, welche Nutzungscodes tatsächlich analysiert werden sollen. Technisch kann die Anomaliedetektion zwar auf beliebige Nutzungscodes angewendet werden. Die im Projekt entwickelte Methode wurde jedoch gezielt für Grünlandflächen entwickelt und liefert für diese die zuverlässigsten Ergebnisse.

Den Abschluss der Auftragserstellung bildet die Festlegung des Monitoringzeitraums durch Angabe eines Start- und Enddatums. Innerhalb dieses Zeitraums findet ein permanentes Monitoring statt, ohne dass weitere manuelle Eingriffe erforderlich sind. Der Prozess überwacht eigenständig die Verfügbarkeit neuer Satellitendaten im FORCE-Data-Cube und startet bei Vorliegen aktualisierter Daten automatisch eine Neuberechnung. Damit handelt es sich um ein echtes Monitoringsystem, das kontinuierlich

und ohne wiederholtes manuelles Auslösen arbeitet. Nach der Erstellung erscheint der Auftrag in der Auftragsliste auf der linken Seite der Benutzeroberfläche. Ein entsprechendes Symbol zeigt an, wenn die Berechnung aktuell läuft. Das Symbol passt sich nach Abschluss der Berechnung entsprechend an.

Bevor die Ergebnisse im Detail betrachtet werden, soll zunächst auf die Möglichkeit der Einbindung zusätzlicher Datenquellen eingegangen werden. Über den Bereich Profil in der oberen rechten Ecke der Webseite können weitere Daten in die Anwendung integriert werden. Konkret besteht hier die Möglichkeit, Web Map Services (WMS) einzubinden, die Orthophotos bereitstellen. Diese Einbindung kann für jedes Bundesland separat konfiguriert werden. Abbildung 19 zeigt beispielhaft die Einstellungen mit WMS-Diensten für die Bundesländer Sachsen und Brandenburg.

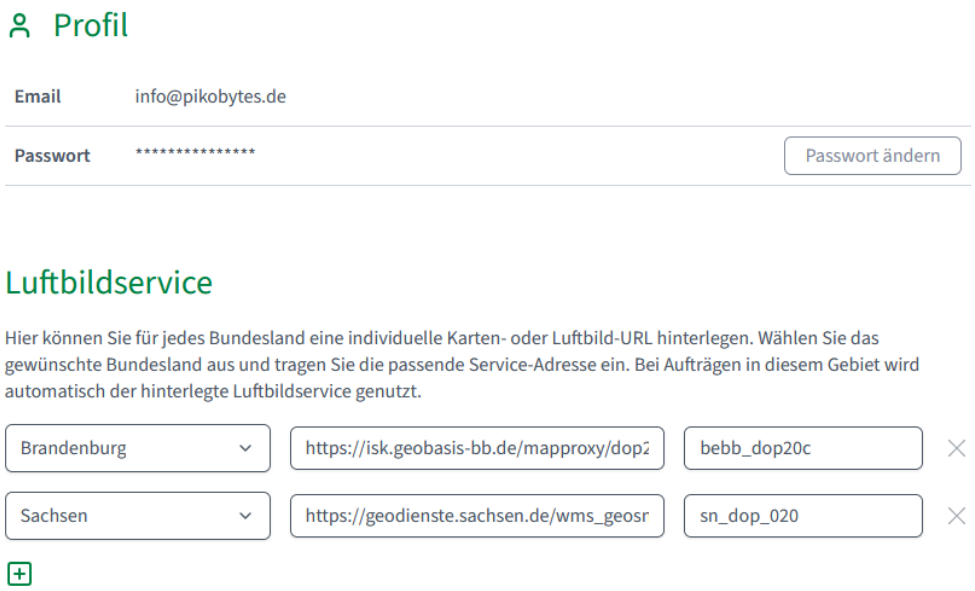


Abbildung 19: Möglichkeit der Einbindung von Web Map Services (WMS) für die Digitale Orthophotos der Bundesländer

Wichtig ist dabei, dass diese Orthophotos nicht Teil der Datenanalyse zur Anomaliedetektion sind, sondern ausschließlich der visuellen Darstellung und Interpretation der Ergebnisse dienen (vgl. AK2.5). Sie stellen eine zusätzliche Kontextinformation bei der Bewertung detektierter Anomalien zur Verfügung.

Die Dauer der Berechnung eines Auftrages kann vorab nicht exakt bestimmt werden. Sie wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, insbesondere durch die Anzahl der einbezogenen Schläge, den Umfang des rückwirkend zu analysierenden Zeitraums sowie dadurch, ob das meteorologische Clustering für die entsprechende Region bereits vorhanden ist oder erst durchgeführt werden muss. Sobald die Berechnung abgeschlossen ist, erscheint ein Glockensymbol neben dem entsprechenden Auftrag in der Übersicht auf der linken Seite der Anwendung.

Während der Entwicklung wurde erwogen, ein automatisiertes Benachrichtigungssystem zu implementieren, das per E-Mail über neu detektierte Anomalien informiert. Von dieser Lösung wurde jedoch aus Sicherheitserwägungen Abstand genommen. Die Umsetzung hätte den Betrieb eines eigenen, öffentlich zugänglichen Mailservers erfordert. Solche Server sind besonders gefährdet, da sie ein attraktives Angriffsziel darstellen. Sicherheitslücken in der Serverkonfiguration oder nicht zeitnah eingespielte Updates können dazu führen, dass Angreifer das System kompromittieren, für Spam-Versand missbrauchen oder als Ausgangspunkt für weiterführende Attacken nutzen. Der sichere und zuverlässige Betrieb eines Mailservers erfordert zudem ständige Überwachung und regelmäßige Wartung, was personelle und technische Ressourcen bindet. Vor diesem Hintergrund wurde auf ein E-Mail-basiertes Benachrichtigungssystem verzichtet. Nutzerinnen und Nutzernde müssen daher eigenständig in die Anwendung gehen und anhand des *Glockensymbols* überprüfen, ob neue Detektionen vorliegen.

Die Ergebnistabelle stellt das zentrale Element zur Verwaltung und Steuerung der Arbeitsprozesse dar (vgl. Abbildung 20). Sie verschafft einen unmittelbaren Überblick über die Anzahl und den Umfang der detektierten Anomalien. Durch integrierte Filter- und Sortierfunktionen lässt sich die Arbeit mit großen Datenmengen erheblich vereinfachen und beschleunigen. Bereits in dieser Übersicht sind wesentliche Bewertungsparameter für jeden Schlag erkennbar. Dazu zählen die statistischen Parameter des Monitorings „Aufgefallen“ und „Betrachtet“ sowie die Statusangaben zur aktuellen und zur vorherigen Prüfung. Sofern eine Bewertung bereits auf Basis der Tabelleninformationen möglich ist, kann der Status eines Schlages direkt in der Übersicht angepasst werden. Dadurch entfällt das zeitaufwendigere Laden von Satellitenbildern und Orthophotos, was den Arbeitsablauf merklich effizienter gestalten kann.

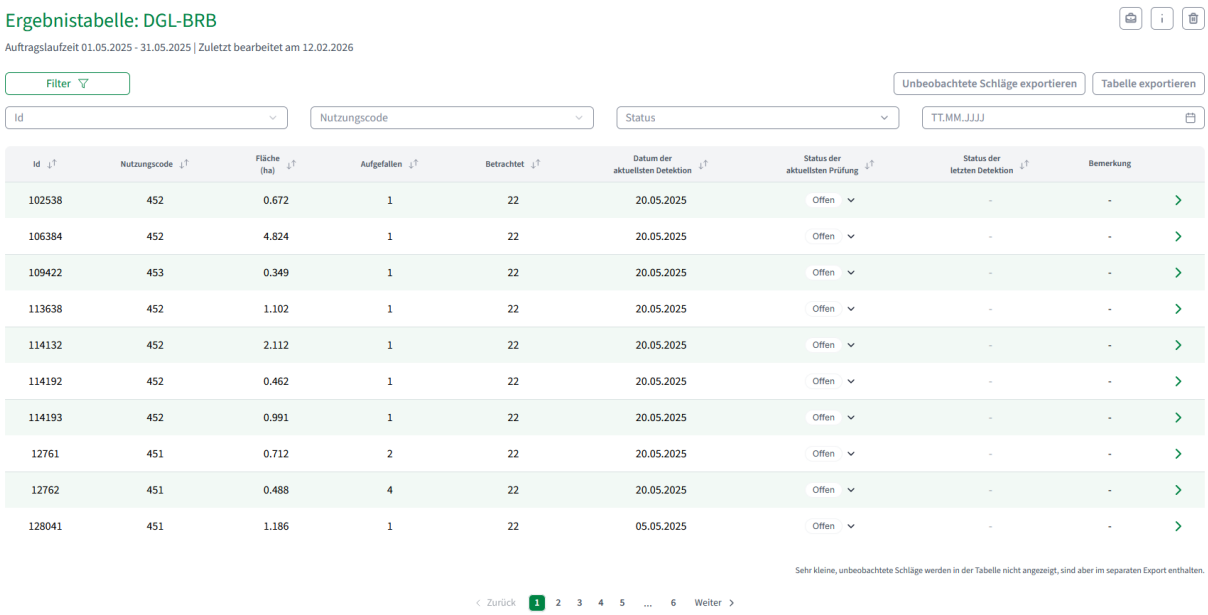


Abbildung 20: Ergebnistabelle im Dashboard des DGL-Monitors

Wenn eine schnelle Bewertung auf Basis der Ergebnistabelle nicht möglich ist, muss eine detaillierte Prüfung auf Einzelschlagebene erfolgen. Hierfür steht die Detailansicht zur Verfügung, die umfassende Informations- und Analysemöglichkeiten bietet. Abbildung 21 zeigt diese Detailansicht für einen Schlag, der im Verlauf des Monitoringzeitraums insgesamt viermal als auffällig identifiziert wurde.

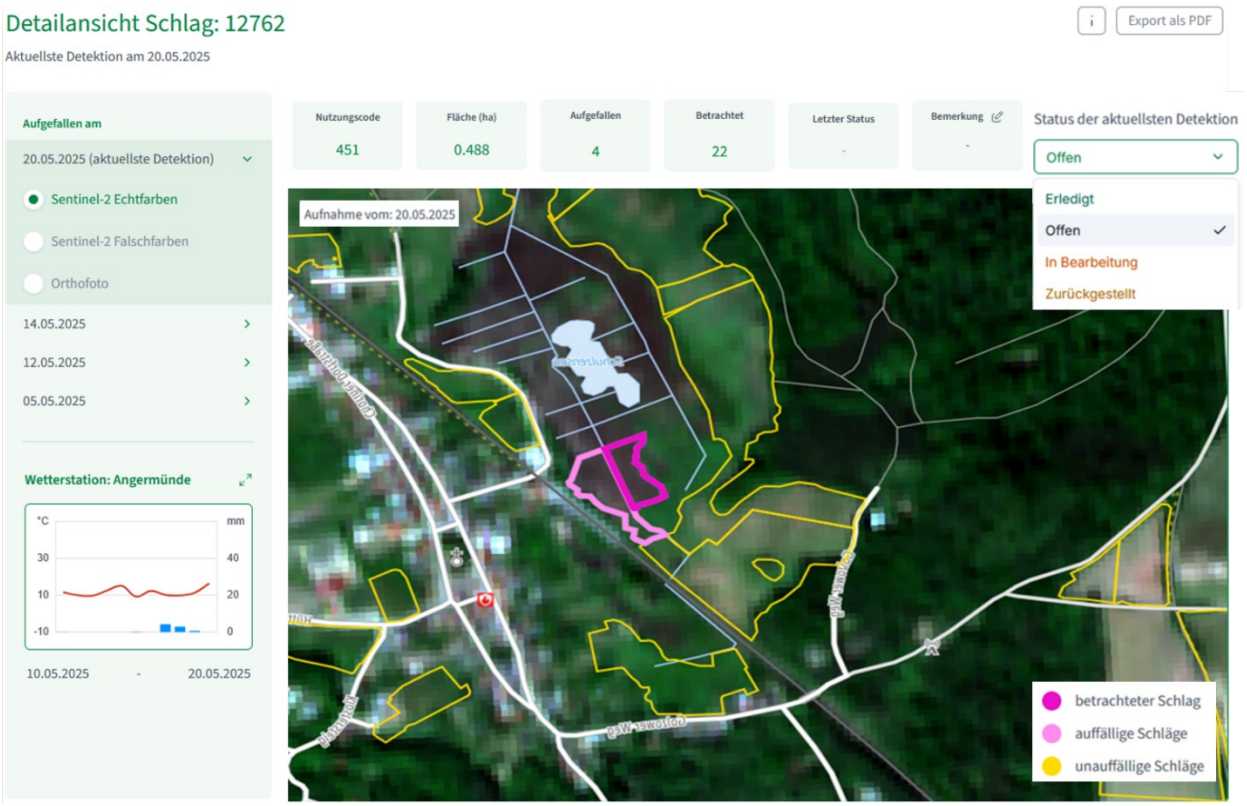


Abbildung 21: Detailansicht eines ausgewählten Schlages, der viermal im Monitoringzeitraum als Anomalie detektiert worden ist

Im linken Bereich der Ansicht können die einzelnen Detektionszeitpunkte ausgewählt werden. Zu jedem dieser Zeitpunkte werden die entsprechenden Satellitenbilder geladen, wodurch eine visuelle Analyse über verschiedene Zeitschnitte hinweg möglich wird. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die phänologische Entwicklung des Grünlandschlages und kann wertvolle Hinweise für die Interpretation liefern. Neben der klassischen Darstellung als RGB-Satellitenbild besteht auch die Möglichkeit, ein sogenanntes Falschfarbenbild (VNIR) anzuzeigen, welches die Interpretation des Vegetationszustandes zusätzlich erleichtern kann. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, steht auch das aktuellste digitale Orthophoto zur Verfügung.

Im Gegensatz zur ursprünglichen Anforderung AK 4.7 setzt die finale Anwendung kein umfassendes fernerkundliches Fachwissen mehr voraus. Zwar ist die Fähigkeit zur Interpretation der Bilddaten wichtig und hilfreich, tiefgreifende Kenntnisse beispielsweise über spektrale Signaturen oder Bandoperationen wie Vegetationsindizes sind jedoch nicht erforderlich. Die Zielgruppe der Verwaltungsangestellten

wurde bei der Umsetzung des Werkzeugs klar adressiert und die Bedienbarkeit entsprechend ausgerichtet.

Zur besseren räumlichen Orientierung und um gegebenenfalls notwendige Vor-Ort-Kontrollen zu erleichtern, wurde ein Vektor-Straßendatensatz in die Kartenansicht integriert. Die Anzeige beschränkt sich dabei nicht allein auf den betroffenen Schlag. Vielmehr werden auch weitere detektierte Schläge in der Umgebung sowie nicht als auffällig klassifizierte Nachbarschläge dargestellt. Letztere ermöglichen einen relativen Vergleich zwischen unauffälligen und detektierten Flächen, was die Bewertung einer Anomalie erheblich unterstützen kann. Das Kartenfenster verfügt über die geforderten Navigationselemente zur intuitiven Steuerung der Ansicht.

Im linken Bereich finden sich zudem Informationen zu den meteorologischen Bedingungen. Für jede Detektion werden spezifisch Daten zu Temperatur und Niederschlag der zehn vorangegangenen Tage angezeigt. Diese Informationen können helfen, die farbliche Erscheinung (z.B. Helligkeit) der Grünlandfläche besser einzuordnen, erfordern jedoch neben fernerkundlichen auch landwirtschaftliche Grundkenntnisse. Die meteorologischen Daten stammen von der dem Schlag am nächstgelegenen Wetterstation und werden über den Dienst SENSOTO[4] bereitgestellt.

SENSOTO greift dabei auf verschiedene Datenquellen zurück, darunter unter anderem das agrarmeteorologische Messnetz sowie das Messnetz des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Die Detailansicht enthält erneut die wesentlichen Attribute der Ergebnistabelle. Ein zusätzliches Feld für Bemerkungen ermöglicht es, kurze Notizen zu einzelnen Schlägen zu speichern. Dieses Feld ist ausdrücklich nicht für ausführliche Begründungen vorgesehen, sondern dient der schnellen Dokumentation einzelner Beobachtungen. Die zentrale Aufgabe der Detailansicht besteht darin, eine fundierte Entscheidung über das weitere Vorgehen zu treffen. Dies erfolgt durch die Festlegung eines Status, wofür vier verschiedene Optionen zur Verfügung stehen. Nach einer Anomaliedetektion ist der Status standardmäßig auf "Offen" gesetzt, was bedeutet, dass bisher keine Entscheidung über das weitere Vorgehen getroffen wurde.

Der Status *Erledigt* kann gewählt werden, wenn eine abschließende Maßnahme ergriffen wurde. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn ein tatsächliches Vergehen festgestellt und aus Verwaltungssicht abschließend bearbeitet wurde. Ebenso kann dieser Status gesetzt werden, wenn zwar eine Anomalie vorliegt, die Ursache jedoch von der Art ist, dass keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind, etwa weil eine behördliche Genehmigung für die beobachtete Abweichung vorliegt. Die im

[4] https://sensoto.io

Projektverlauf durchgeführten Feldkampagnen haben gezeigt, dass in einigen Fällen mit hinreichender Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass solche genehmigten Abweichungen vorliegen (vgl. Kapitel 2.1.2.4). Bei Vergabe des Status *Erledigt* erfolgt keine weitere Analyse des betreffenden Grünlandschlages.

Der Status *In Bearbeitung* signalisiert, dass der Schlag bereits gesichtet wurde und gegebenenfalls innerhalb der Verwaltung zusätzliche Informationen eingeholt werden, die den Entscheidungsprozess unterstützen. Dieser Status bleibt so lange erhalten, bis eine abschließende Bewertung erfolgt. Das Monitoring des Schlages wird unabhängig davon fortgesetzt. Der Status *Zurückgestellt* verhält sich in Bezug auf das fortlaufende Monitoring vergleichbar, unterscheidet sich jedoch im dahinterliegenden Verwaltungsprozess. Während *In Bearbeitung* anzeigt, dass bereits konkrete Verwaltungsschritte unternommen werden, dient *Zurückgestellt* dazu, zunächst keine Entscheidung treffen zu müssen. Ein solcher Status soll immer dann vergeben werden, wenn eine Bewertung auf Grundlage der im System vorliegenden Informationen noch nicht möglich oder nicht sinnvoll erscheint. Er entspricht einem bewussten „Abwarten“, bis weitere Analyseergebnisse aus dem fortlaufenden Monitoring vorliegen, die eine fundiertere Entscheidung ermöglichen.

Sollte im Rahmen der visuellen Überprüfung die Notwendigkeit einer Vor-Ort-Kontrolle erkennbar werden, besteht die Möglichkeit, ein PDF-Dokument zu generieren und zu exportieren (vgl. Abbildung 22).

Detailansicht Schlag: **12762**

DGL-Monitor

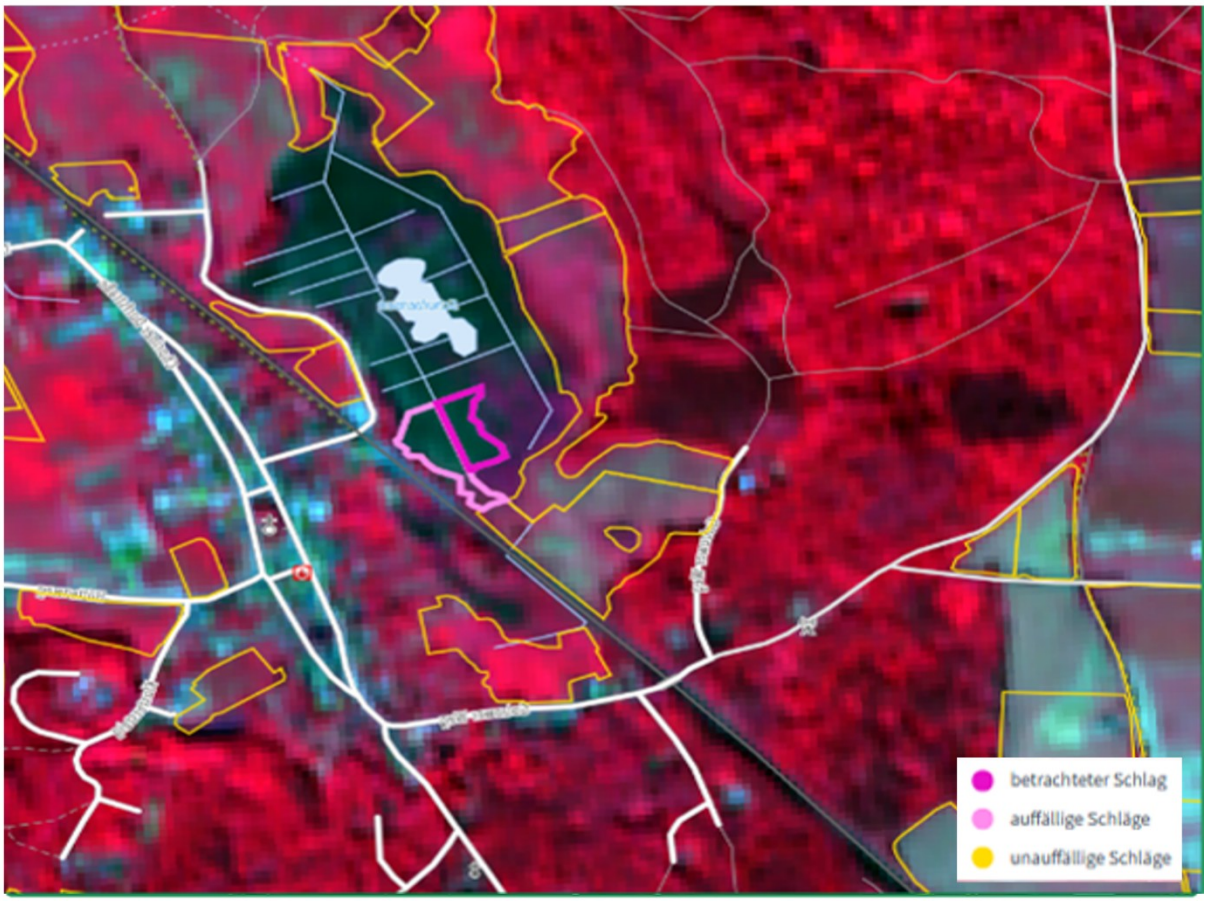
Auftrag: DGL-BRB

Status der aktuellsten Detektion: Offen

Aktuellste Detektion am 20.05.2025

Kartenansicht: Sentinel-2 Falschfarben

Nutzungscode	Fläche (ha)	Aufgefallen	Betrachtet	Letzter Status	Bemerkung
451	0,5	4	22	-	-



Schlaghistorie

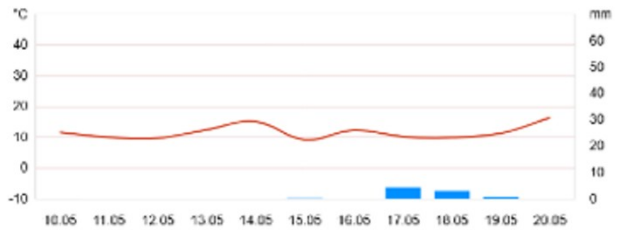
Dieser Schlag ist bereits an folgenden Daten aufgefallen

- 20.05.2025
- 14.05.2025
- 12.05.2025
- 05.05.2025

Wetterverlauf der letzten 10 Tage

Wetterverlauf der letzten 10 Tage ab dem Datum, an dem der Schlag aufgefallen ist.

Wetterstation: Angermünde 10.05.2025 - 20.05.2025



Datenquelle: sensoto

Abbildung 22: Exportiertes PDF eines ausgewählten Schlages

Das zentrale Element dieses Exports bildet die kartographische Darstellung des betreffenden Schlages und seiner unmittelbaren Umgebung. Darüber hinaus enthält das PDF alle wesentlichen Informationen zum Schlag, einschließlich der relevanten Attribute und des Detektionsdatums. Die Auswahl des im PDF dargestellten Zeitschnitts erfolgt unmittelbar durch die zuvor in der Detailansicht getroffene Auswahl, sodass gezielt der relevante Detektionszeitpunkt dokumentiert werden kann.

Der Zweck dieses PDF-Exports liegt vor allem darin, dem Verwaltungspersonal, das gegebenenfalls in Kommunikation mit betroffenen Landwirten tritt, die notwendigen Informationen bereitzustellen. Das Dokument dient damit einem Prozess der Transparenz, indem es nachvollziehbar macht, aus welchem Grund eine Kontrolle veranlasst wurde und auf welcher Datengrundlage die Verwaltung zu diesem Zeitpunkt handelt. Diese Dokumentation erleichtert nicht nur die interne Nachvollziehbarkeit, sondern unterstützt auch die Kommunikation mit den Betroffenen durch eine objektive und fachlich fundierte Darstellung der Ausgangssituation.

Der Monitoringprozess erfolgt vollautomatisiert und erfordert während der Laufzeit eines Auftrages kein manuelles Eingreifen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass Anwender nachvollziehen können, ob die Prozesse ordnungsgemäß ablaufen oder gegebenenfalls technische Schwierigkeiten auftreten. Zu diesem Zweck wurde eine Jobliste implementiert, in der alle Analyseprozesse systematisch dokumentiert werden (vgl. Abbildung 23).



Abbildung 23: Monitoring des gesamten Analyseprozesses (Jobliste)

Die Jobliste enthält Informationen darüber, an welchen Tagen Analysen durchgeführt wurden und ob für die jeweiligen Zeitpunkte überhaupt auswertbare Satellitendaten vorlagen. Weiterhin werden grundlegende Informationen zur Anzahl der in die Berechnung einbezogenen Schläge sowie zur Anzahl

der als auffällig identifizierten Flächen bereitgestellt. Diese Übersicht ermöglicht es, die Aktivität des Systems zeitlich nachzuvollziehen und mögliche Unterbrechungen oder Datenlücken zu erkennen.

Die Jobliste schafft Vertrauen in den Analyseprozess und ermöglicht gleichzeitig eine frühzeitige Identifikation möglicher technischer Probleme.

Abschließend sollen einige allgemeine Funktionen der Anwendung erläutert werden, die das Arbeiten mit dem System unterstützen und zusätzliche Möglichkeiten zur Datenverarbeitung bieten. Auf allen Seiten der Anwendung stehen kontextbezogene Informationen zur jeweiligen Ansicht zur Verfügung. Diese verbergen sich hinter den sogenannten Informationsbuttons, die durch ein „i"-Symbol gekennzeichnet sind. Sie ermöglichen es, sich bei Bedarf über die Funktionen und Bedeutung der angezeigten Elemente zu informieren, ohne auf externe Dokumentation zurückgreifen zu müssen. Dies trägt wesentlich zur Benutzerfreundlichkeit bei und erleichtert insbesondere neuen Nutzerinnen und Nutzern den Einstieg in die Arbeit mit der Anwendung.

Darüber hinaus stehen zwei verschiedene Exportmöglichkeiten zur Verfügung. Die Anomaliedetektion setzt eine gewisse Mindestgröße der Schläge sowie eine günstige Lage der Flächen im Pixelraster der Satellitenbilder voraus. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, werden die betreffenden Schläge nicht in die Analyse einbezogen. Für diese Teilmenge des Datensatzes besteht die Möglichkeit eines separaten Exports, sodass nachvollziehbar bleibt, welche Flächen aus methodischen Gründen nicht bewertet werden konnten. Weiterhin kann die Ergebnistabelle eines jeden Auftrages exportiert werden, um die Analyseergebnisse außerhalb der Anwendung weiterzuverarbeiten oder zu archivieren. Beide Exportformate liegen als CSV-Dateien vor. Es wurde bewusst entschieden, ein einfaches und standardisiertes Dateiformat zu verwenden, das einen niederschwelligen Import in andere Systeme ermöglicht und eine hohe Kompatibilität mit verschiedenen Softwarelösungen gewährleistet. Dies unterstützt die Integration der Anomaliedetektion in bestehende Verwaltungsabläufe und ermöglicht eine flexible Weiterverarbeitung der Daten entsprechend den spezifischen Anforderungen der jeweiligen Behörde.

Die vorgestellte Anwendung zeigt, dass es gelungen ist, nahezu alle Anforderungen aus dem erarbeiteten Katalog in eine funktionsfähige und praxistaugliche Lösung zu überführen. Mit nur wenigen, fachlich begründeten Ausnahmen wurden die ursprünglich formulierten Anforderungen erfolgreich umgesetzt. Entstanden ist ein Werkzeug, das die komplexe Methodik der satellitengestützten Anomaliedetektion für die behördliche Praxis nutzbar macht. Besonders hervorzuheben ist dabei die konsequente Ausrichtung auf die Zielgruppe der Verwaltungsmitarbeiter, für die kein tiefgreifendes fernerkundliches Fachwissen vorausgesetzt wird. Die Anwendung verbindet wissenschaftliche Methodik mit einer intuitiv nutzbaren Benutzeroberfläche und ermöglicht damit einen niederschwelligen Zugang zu den Analyseergebnissen. Das folgende Kapitel widmet sich der Testphase des Systems.

2.1.3.4 Testphase des Dienstes

Eine Testphase im Sinne einer intensiven Erprobung des *DGL-Monitors* durch verschiedene Behörden konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisiert werden. Obwohl sowohl die Methodenentwicklung als auch die Implementierung in sehr kompakter Form erfolgten, erlaubte der zeitliche Rahmen von ca. 2,5 Jahren keine umfassende Nutzervalidierung. Die Übergabe der Applikation durch den beauftragten Dienstleister erfolgte erst ca. drei Wochen vor Projektabschluss, sodass für einen operationellen Test mit Endanwendern keine ausreichende Zeit verblieb. Während der Entwicklungs- und Übergabephase wurden begleitende Tests durchgeführt, die sich primär auf die technische Umsetzung konzentrierten. Im Vordergrund standen funktionale Tests der Benutzeroberfläche, Integrationstests der Backend-Komponenten sowie Performance-Tests der Datenverarbeitung. Diese Qualitätssicherungsmaßnahmen zielten darauf ab, die fehlerfreie Lauffähigkeit der Anwendung sicherzustellen und grundlegende Anforderungen wie Systemstabilität, korrekte Datenflüsse und Responsivität der Oberfläche zu verifizieren.

Innerhalb der Projektlaufzeit konnte somit lediglich die technische Funktionsfähigkeit in den Mittelpunkt gestellt werden. Eine weiterführende Testphase des Dienstes mit den vorgesehenen Endnutzern aus den Verwaltungen muss sich dem Projekt anschließen. Die dafür vorgesehenen Transferaktivitäten werden in Kapitel 2.1.4 erläutert (Arbeitspaket 5).

2.1.3.5 Möglichkeiten der technischen Weiterentwicklung

Die im Projekt entwickelte Anwendung zur satellitengestützten Anomaliedetektion auf Dauergrünland bietet vielfältige Ansatzpunkte für eine technische und methodische Weiterentwicklung. Diese lassen sich in zwei wesentliche Richtungen unterscheiden. Eine erste Perspektive betrifft die inhaltliche Erweiterung der Monitoringfunktionalität auf weitere GLÖZ-Standards und Prüffragen. Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Priorisierung der GLÖZ-Standards hat ergeben, dass neben des im DGL-Monitor umgesetzten Monitorings von GLÖZ 1 weitere Standards grundsätzlich für eine satellitengestützte Kontrolle geeignet sein könnten. Die Erkenntnisse der wissenschaftlichen Analysen der Prüffragen die beispielsweise im Rahmen der Vorbereitungsphase durchgeführt worden sind, zeigen für mehrere GLÖZ-Standards Potenziale für eine fernerkundungsbasierte Auswertung (vgl. Kapitel 2.1.2.5). Die Entwicklung entsprechender Methoden würde weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfordern, um die fachlichen Anforderungen der jeweiligen Standards mit geeigneten Algorithmen und Datenquellen zu verbinden. Ob eine solche Weiterentwicklung technisch in einer Erweiterung der bestehenden DGL-Monitor-Anwendung oder in einem separaten modularen System erfolgen sollte, ist eine offene Frage. Die grundsätzliche Architektur der Anwendung müsste gegebenenfalls überprüft und angepasst werden, um weitere Prüffragen zu integrieren. Eine Diskussion, ob zukünftig eine umfassendere Anwen-

dung in Form eines *GLÖZ-Analyzers* entstehen könnte, erscheint möglich, soll an dieser Stelle jedoch nicht vertieft werden.

Die zweite Perspektive bezieht sich auf die technische Optimierung und funktionale Erweiterung der bereits implementierten Anwendung. Hier lassen sich mehrere Ansatzpunkte identifizieren, die sowohl die Robustheit und Performance des Systems betreffen als auch die Bedienfreundlichkeit verbessern können.

Im Bereich der Robustheit und Performance werden fünf konkrete Verbesserungsmöglichkeiten gesehen. Ein erstes Handlungsfeld ist die Verbesserung der Fehlerbehandlung. In der aktuellen Version der Anwendung sind Fehlermeldungen nur begrenzt aussagekräftig und geben wenig Orientierung. Ziel wäre es, Fehlermeldungen zu entwickeln, die ein konkretes visuelles Feedback zur Art des aufgetretenen Fehlers liefern und gleichzeitig Hinweise zum empfohlenen weiteren Vorgehen geben. Dies würde die Bedienbarkeit der Anwendung deutlich erhöhen und Supportaufwände reduzieren.

Ein zweiter Ansatzpunkt betrifft die räumliche Präzision bei der Ausführung des Detektionsalgorithmus. Der aktuelle Verarbeitungsprozess berechnet für jeden Auswertungstag die Anomaliedetektion für die gesamte Landesfläche (z. B. Bundesland), auch wenn die ausgewählten Schläge nur in einem begrenzten Teilbereich liegen. Eine gezielte räumliche Eingrenzung der Berechnungen auf diejenigen Flächen, die tatsächlich für die betrachteten Schläge relevant sind, würde die Berechnungsgeschwindigkeit deutlich verbessern. Gleichzeitig würde die Robustheit des Gesamtsystems gesteigert und die Testbarkeit der Anwendung erhöht.

Der dritte Punkt betrifft die grundlegende Optimierung des verwendeten R-Codes. Die Berechnungen für die Anomaliedetektion und die Berechnung der meteorologischen Cluster basieren auf R-Skripten, die derzeit den Flaschenhals der Verarbeitungsgeschwindigkeit darstellen. Insbesondere läuft der Code ausschließlich in einem einzelnen Prozess und weist einen hohen Arbeitsspeicherbedarf auf. Eine Optimierung könnte verschiedene Wege umfassen, etwa die Migration einzelner Funktionen in die Programmiersprache Python, eine bessere Nutzung der verfügbaren Prozessorkerne oder eine effizientere Verwaltung des Arbeitsspeichers. Die tatsächlich erreichbaren Performanzgewinne sind zwar schwer abschätzbar, eine systematische Prüfung der Optimierungsmöglichkeiten erscheint jedoch sinnvoll.

Ein vierter Aspekt ist die organisatorische Entkopplung der meteorologischen Clusterberechnung vom eigentlichen Detektionsprozess. Die Berechnung der meteorologischen Cluster ist ein eigenständiger Schritt, der nur einmal pro Kalenderjahr durchgeführt werden muss. Aktuell ist dieser Schritt jedoch technisch nicht vollständig unabhängig von der Anomaliedetektion ausführbar. Durch eine Umstrukturierung des Codes könnte die Clusterberechnung als eigenständiger Prozess implementiert werden, der

zeitgesteuert zu Jahresbeginn oder zu Zeiten geringer Systemauslastung ausgeführt werden kann. Dies würde die Lastverteilung im System verbessern.

Der fünfte Punkt betrifft die Visualisierung der Satellitenbilddaten. Für die Darstellung der Echt- und Falschfarbenbilder werden aktuell feste Skalierungswerte verwendet, die auf Basis einer Stichprobe von FORCE-Daten ermittelt wurden. Ein dynamischer Ansatz, der statistische Informationen der jeweils einbezogenen Szenen berücksichtigt, könnte die Bildqualität und Robustheit der Visualisierung verbessern. Eine entsprechende Evaluierung und gegebenenfalls Umsetzung wären zu prüfen.

Neben diesen technischen Optimierungen bestehen auch Möglichkeiten zur funktionalen Erweiterung der Anwendung im Bereich des Daten-Uploads. Aktuell unterstützt die Anwendung ausschließlich den Upload von Schlaggeometrien als ZIP-komprimierte Shapefiles. Eine benutzerfreundlichere Lösung würde auch den Upload unkomprimierter Shapefiles sowie die Unterstützung von Drag-and-Drop-Funktionalität umfassen. Damit könnten die Dateien direkt durch ziehen mit der Maus in die Anwendung übertragen, was den Arbeitsablauf vereinfacht. Darüber hinaus könnte die Anwendung um eine Validierung der Nutzungscodes erweitert werden. Beim Anlegen neuer Aufträge und dem Hochladen von Schlaggeometrien würde das System automatisch prüfen, ob die angegebenen Nutzungscodes strukturell korrekt sind. Bei fehlerhaften Codes würde eine entsprechende Rückmeldung erfolgen. Zusätzlich könnten Informationen wie Kulturart oder Kulturartengruppe zu den Nutzungscodes angezeigt werden, was die Transparenz erhöht und Eingabefehler bereits im Vorfeld reduziert.

Die beschriebenen Optimierungsbausteine und neuen Funktionen stellen konkrete, im Rahmen des Projekts identifizierte Verbesserungspotenziale dar, deren Umsetzung die Robustheit, Performance und Nutzerfreundlichkeit des DGL-Monitors deutlich steigern würde. Darüber hinaus wurden im Projektverlauf weitere Ansatzpunkte für zukünftige Weiterentwicklungen identifiziert, die hier nicht im Detail ausgeführt werden können. Dazu zählen unter anderem die Implementierung eines systematischen Monitoring- und Logging-Systems zur proaktiven Fehlererkennung, die Entwicklung einer API-Schnittstelle für die automatisierte Integration in bestehende Verwaltungssysteme, erweiterte Exportfunktionalitäten für detektierte Anomalien, ein Benachrichtigungssystem bei Abschluss längerer Berechnungen, die Versionierung von Analysen zur besseren Nachvollziehbarkeit sowie optimierte Batch-Verarbeitungsmechanismen für parallele Nutzeranfragen. Diese Aspekte zeigen, dass das entwickelte Werkzeug erhebliches Potenzial für künftige technische und funktionale Erweiterungen bietet, die je nach Anforderungen der nutzenden Verwaltungen priorisiert und umgesetzt werden könnten.

2.1.4 Transfer in Verwaltungspraxis

Dem Transfer der Projektergebnisse in die Verwaltungspraxis wurde von Beginn an ein hoher Stellenwert beigemessen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, war im Projektantrag ein eigenes Arbeitspaket (AP 5) für diese Aufgabe vorgesehen. Die praktische Umsetzung dieses Vorhabens erwies sich jedoch als anspruchsvoller als ursprünglich antizipiert und erforderte eine strategische Anpassung der Kommunikation im Projektverlauf. Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, erfolgte die finale Implementierung des DGL-Monitors erst gegen Ende der Projektlaufzeit. Diese zeitliche Entwicklung machte eine sorgfältige Abwägung erforderlich. Einerseits bestand das berechtigte Interesse, bereits während der Forschungs- und Entwicklungsphase gegenüber der sächsischen Landesverwaltung sowie anderen Bundesländern zu kommunizieren, welche Zielstellungen das Projekt verfolgt und welche Werkzeuge perspektivisch zur Verfügung stehen könnten. Andererseits wäre es wenig seriös gewesen, zu früh konkrete Versprechungen zu einem Zeitpunkt zu formulieren, an dem das Werkzeug noch nicht tatsächlich nutzbar war.

Vor diesem Hintergrund wurde, dem klaren Forschungscharakter des Gesamtvorhabens entsprechend, eine eher zurückhaltende und auf wissenschaftliche Fundierung ausgerichtete Kommunikationsstrategie gewählt. Im Fokus der zahlreichen Präsentationen standen daher primär die Zielstellungen, methodischen Ansätze und wissenschaftlichen Grundlagen des Projekts. Die umfassende Kommunikation des fertigen Werkzeugs selbst kann erst im Nachgang des formellen Projektabschlusses erfolgen, wenn der DGL-Monitor vollständig verfügbar und erprobt ist.

2.2 Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes

Die Verwertbarkeit der Projektergebnisse wurde bereits im ursprünglichen Antrag als zentrales Kriterium für den Projekterfolg formuliert. Im Sinne des dort beschriebenen Verwertungsplanes werden nachfolgend die wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Erfolgsaussichten sowie die fortbestehenden Nutzungsmöglichkeiten der entwickelten Methoden und Dienste dargestellt.

2.2.1 Wirtschaftliche Verwertung: Nutzen für Verwaltungen

Die wirtschaftliche Verwertbarkeit des DGL-Monitors ergibt sich vor allem aus seinem direkten Nutzen für die öffentliche Verwaltung bei der Erfüllung rechtlich verpflichtender Aufgaben im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP). Bereits im Antrag wurde hervorgehoben, dass die Kontrolle der Konditionalität (früher: 'Cross Compliance', GLÖZ-Standards) eine obligatorische Aufgabe ist, die von den zuständigen Stellen in allen deutschen Bundesländern wahrgenommen werden muss. Die hohen Kosten und der erhebliche personelle Aufwand für Vor-Ort-Kontrollen bildeten den zentralen Ausgangspunkt für die Entwicklung satellitengestützter Monitoringverfahren.

Das im Projekt entwickelte Werkzeug bietet konkrete Kosteneinsparungspotenziale durch die Reduzierung aufwändiger Vor-Ort-Kontrollen. Durch die automatisierte Anomaliedetektion können verdächtige Flächen gezielt identifiziert und priorisiert werden, sodass Kontrollressourcen effizienter eingesetzt werden können. Diese Effizienzsteigerung war von Anfang an ein Kernargument der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten. Darüber hinaus wurde die Implementierung als betriebsfähiger Dienst auf der Plattform CODE-DE realisiert, wodurch das Werkzeug grundsätzlich für alle Verwaltungen in Deutschland verfügbar ist. Die technische Umsetzung erfolgte über ein beauftragtes KMU, das die Algorithmen als anwendbare Anwendung implementierte. Zur Absicherung der Dienstebereitstellung in den kommenden Monaten, befindet sich das LfULG aktuell in der Vergabe eines entsprechenden Servicevertrages.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit liegt neben der direkten Anwendung in der Agrarkontrolle auch in der Weiterverwendung der entwickelten Methoden für andere Bereiche des landwirtschaftlichen Monitorings. Dazu gehören beispielsweise Öko-Regelungen, Gewässerschutz oder das Grünlandmonitoring. Dies erhöht den wirtschaftlichen Gesamtnutzen erheblich, da entwickelte Komponenten mehrfach verwendet werden können.

Ein Transfer in andere Bundesländer und Verwaltungen war ebenfalls im Verwertungsplan vorgesehen. Die Projektergebnisse wurden dazu in verschiedenen Gremien und Fachveranstaltungen vorgestellt, darunter das Nationale Forum Fernerkundung und Copernicus sowie die AG Copernicus der Landesumweltverwaltungen. Diese Aktivitäten bilden die Grundlage für eine künftige breite Nutzung durch weitere Verwaltungen.

2.2.2 Wissenschaftliche Verwertung und Anschlussfähigkeit

Die im Projekt entwickelten Methoden und gewonnenen Erkenntnisse besitzen erheblichen wissenschaftlichen Wert, der über die unmittelbare Anwendung in der Verwaltungspraxis hinausgeht. Die methodischen Innovationen, insbesondere im Bereich der KI-gestützten Grünlanderkennung ohne klassische Referenzdaten, stellen einen originären Beitrag zur fernerkundlichen Agrarforschung dar und bieten vielfältige Anschlussmöglichkeiten für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten. Ein zentrales Element der wissenschaftlichen Verwertung ist die Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften und auf Konferenzen.

Die entwickelten Verfahren zur zeitreihenbasierten und räumlich differenzierten Klassifikation von Dauergrünland (Detektion von Anomalien) liefern methodische Erkenntnisse, die auch für andere Anwendungsfelder der Landschaftsbeobachtung relevant sind.

Das Projekt hat zur Stärkung der wissenschaftlichen Kompetenz der Professur für Umweltfernerkundung an der TU Dresden beigetragen, indem es die Forschungsschwerpunkte im Bereich KI-basierter

Methoden in der Agrarfernerkundung vertieft hat. Im Rahmen des Projekts wurden eine Qualifikationsarbeit betreut und Projektinhalte in ein Seminar eingebettet, die zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses beitragen. Einen besonderen Stellenwert für die wissenschaftliche Verwertung nimmt ein Promotionsvorhaben ein, das im Projektumfeld entstanden ist und die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse systematisch aufgreift und vertieft. Die Projektergebnisse bilden dabei eine wesentliche methodische und empirische Grundlage für die Dissertation. Ein aus diesem Kontext hervorgegangenes wissenschaftliches Paper befindet sich derzeit im Publikationsprozess und wird voraussichtlich im zweiten Halbjahr 2026 in einer Fachzeitschrift veröffentlicht. Diese Publikation dokumentiert nicht nur die methodischen Fortschritte des Projekts, sondern etabliert die entwickelten Ansätze auch im internationalen, wissenschaftlichen Diskurs und trägt zur Sichtbarkeit der Ergebnisse in der Fachcommunity bei.

Zusätzlich eröffnen die Projektergebnisse unmittelbare Perspektiven für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten. Die im Projekt gewonnenen Datensätze, die entwickelten KI-basierten Methoden zur Anomaliedetektion sowie die Ergebnisse der Feldvalidierungen bilden eine tragfähige empirische und methodische Grundlage für künftige Forschungsvorhaben. Diese Erkenntnisse können in nachfolgenden Arbeiten vertieft, methodisch verallgemeinert und in weiterführenden Publikationen sowie Folgeanträgen verwertet werden. Sie tragen damit zur langfristigen Anschlussfähigkeit der Projektergebnisse bei.

Insgesamt zeigt sich, dass die im Projekt entwickelten Methoden und Werkzeuge sowohl in wirtschaftlicher als auch in wissenschaftlicher Hinsicht über das Projektende hinaus nutzbar und weiterentwickelbar sind. Die Bereitstellung des DGL-Monitors auf CODE-DE schafft die technische Grundlage für eine breite Anwendung in der öffentlichen Verwaltung, während die methodischen Innovationen im Bereich der KI-gestützten Fernerkundung eine tragfähige Basis für weiterführende Forschungsarbeiten bilden. Die bereits initiierten Transferaktivitäten sowie die laufenden wissenschaftlichen Qualifikationsarbeiten belegen, dass die im ursprünglichen Verwertungsplan formulierten Ziele erreicht wurden und die Projektergebnisse ihre Wirkung in Praxis und Wissenschaft nachhaltig entfalten können.

Literaturverzeichnis

ERNST, P. & LOEPER, E.-G. (1976): Temperaturentwicklung und Vegetationsbeginn auf dem Grünland. Das Wirtschaftseigene Futter 22: 5-11

ESTER, M., KRIEGEL, H.-P., SANDER, J. AND XU, X. (1996): A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, 2-4 August 1996, 226-231. https://dl.acm.org/doi/10.5555/3001460.3001507

KONDITIONALITÄTEN (2025): Konditionalität 2025, Informationen über die einzuhaltenden Verpflichtungen bei der Konditionalität, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 2026

LIU, F. T., TING, K. M., & ZHOU, Z.-H. (2008): Isolation Forest. 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, 413–422. https://doi.org/10.1109/icdm.2008.17

PRENTICE, I. C., CRAMER, W., HARRISON, S. P., LEEMANS, R., MONSERUD, R. A., & SOLOMON, A. M. (1992): Special Paper: A Global Biome Model Based on Plant Physiology and Dominance, Soil Properties and Climate. Journal of Biogeography, 19(2), 117–134. https://doi.org/10.2307/2845499

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

Autoren
Pierre Karrasch, Nora Egli
Referat 22
August-Böckstiegel-Straße 3, 01326 Dresden Pillnitz
E-Mail: Referat22@lfulg.sachsen.de

Christine Wessollek, Eric Kosczor, Daniel Kinalcyk, Matthias Forkel,
Technische Universität Dresden, Professur für Umweltfernerkundung
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

Redaktion
Dr. Sebastian Goihl
Referat 22
Baumeisterallee 13-15, 04442 Zwenkau
Telefon: + 49 351 2612-2202;
E-Mail: sebastian.goihl@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Technische Universität Dresden
Die Autoren.

Redaktionsschluss
19.08.2026

Bestellservice
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