Sachbericht BonaRes - Modul A:

SUSALPS | Phase III

Teilprojekt E / FKZ: 031B1067E

Teil I: Kurzbericht

SUSALPS III – Nachhaltige Nutzung von alpinen und voralpinen Grünlandböden unter sich änderndem Klima (Sustainable use of alpine and pre-alpine grassland soils in a changing climate)

Teilprojekt E: Koordination, Dissemination und Entwicklung von Entscheidungshilfe-Systemen, Fernerkundung

Berichtszeitraum / Laufzeit Teilprojekt E: 01.02.2022 – 30.06.2025

Förderkennzeichen: 031B1067E

Zuwendungsempfänger:

WWL Umweltplanung und Geoinformatik GbR
Mozartweg 8
79189 Bad Krozingen

Bearbeitung Teilprojekt E: Alexander Krämer und Johannes Engel

alexander.kraemer@wwl-web.de, Tel.: 07633-8069910

johannes.engel@wwl-web.de, Tel.: 07633-101870

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 031B1067E gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Inhalt

I. Kurzbericht 3

I.1 Aufgabenstellung 3

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 4

I.3 Ablauf des Vorhabens 4

I.4 Wesentliche Ergebnisse 4

I. Kurzbericht

I.1 Aufgabenstellung

Alpine und voralpine Grünlandböden bieten eine wichtige wirtschaftliche Grundlage für die Milch- und Fleischindustrie. Auch die Bedeutung von Grünland für andere regulierende, unterstützende und kulturelle Ökosystemleistungen (ESS), z.B. Kohlenstoff (C)- und Stickstoff (N)-Speicherung sowie Bodenfruchtbarkeit, wird zunehmend anerkannt. Diese ESS sind dabei direkt mit Klimawandel, Biodiversität, Wasserrückhaltung und -filtrat, Erosionsschutz sowie Bereitstellung von Raum für Erholung und Tourismus verbunden. Im Vergleich zu anderen Ökosystemen sind die Bodenfunktionen von Grünland und die damit verbundenen ESS vergleichsweise anfällig für Klima- und Bewirtschaftungsänderungen und variieren stark in Abhängigkeit von einzelnen Klimawandeltreibern (hier: Temperatur und Niederschlag), sowie Geologie, Topographie und Landschaftsstruktur. Das Wissen über Synergien und Trade-offs zwischen Grünland-ESS, z. B. Produktivität vs. Biodiversität, ist von großer Bedeutung für die Anpassung und Optimierung des Grünlandmanagements.

Die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsstrategien auf die ESS sind räumlich und zeitlich sehr variabel und müssen eher auf Betriebs-/Landschaftsebene als auf Schlagebene betrachtet werden. Zudem müssen die Effekte des Klimawandels auf die ESS-Bereitstellung von Grünland mehr berücksichtigt werden, um Bewirtschaftungsoptimierungen für aktuelle und zukünftige Klimabedingungen zu ermöglichen. Neben positiven Effekten des Klimawandels auf das voralpine und alpine Grünland (z.B. höhere Grünlandproduktivität bei ausreichenden Niederschlagsmengen), sind auch negative Auswirkungen auf die Resilienz des Grünlands zu erwarten (z.B. Rückgang der organischen Bodensubstanz (SOM) und Biodiversität). Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass die Entscheidungsfindung der Landwirte stark von EU-Agrarumweltprogrammen (z.B. Anreize für eine extensive Grünlandnutzung) und Anpassungen der maximalen Düngermengen und Ausbringtechniken durch die EU und der deutschen Gesetzgebung beeinflusst werden. Um eine Orientierungshilfe für die Anpassung an den Klimawandel zu bieten, müssen alle landwirtschaftlich relevanten ökologischen und sozioökonomischen Faktoren zusammengefasst werden, die auch die räumliche Bewertung von Synergien und Konflikten bei der Bereitstellung mehrerer ESS beinhaltet. Der Prozess der Bewertung und Kommunikation von Risiken und Nutzen kann durch die Bereitstellung von dringend benötigten Produkten zur Entscheidungsunterstützung (Karten) und Werkzeugen (Modellen) erleichtert werden.

SUSALPS geht diese Herausforderungen für voralpine und alpine Grünlandsysteme an, indem es naturwissenschaftliche und sozioökonomische Forschung kombiniert und dabei gemeinsame Feld-, Fernerkundungs- und Modellierungsstudien auf Parzellen-, Betriebs- und regionale Skalen in enger Interaktion mit verschiedenen Interessenvertretern konzipiert und durchführt. Phase III konzentriert sich auf die Synthese von experimentellen Arbeiten zu den Wechselwirkungen von Pflanzengemeinschaften und des Bodenmikrobioms mit dem C-, N- und P-Kreislauf unter verschiedenen Bewirtschaftungs- und Klimabedingungen. Die Analysen umfassen aktuelle Arbeiten zu Pflanzen-Mikroben-Interaktionen, Pflanzenarten und C-Speicherung, Pflanzen-Mikroben-Boden C/N/P-Stöchiometrie und Nährstoffkreisläufe/ -verluste und Eignung von Pflanzen- und Mikrobenarten und -eigenschaften als Indikatoren für ESS. Die Ergebnisse werden durch den Einsatz von Modellierung und Fernerkundung getestet und auf betriebliche und regionale Skala hochskaliert. SUSALPS entwickelt Produkte (Risikokarten) und Werkzeuge (modellbasierte Entscheidungshilfesysteme), um die Entscheidungsfindung zu unterstützen und es Wissenschaftlern und Praktikern gleichermaßen zu

ermöglichen, Anforderungen von Interessengruppen und biophysikalische Trade-offs besser zu verstehen.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Eine der größten Grünlandregionen in Deutschland ist mit >1 Mio. ha der das alpine/ voralpine Hügelland von Süddeutschland. Diese Grünlandböden, einschließlich noch größerer angrenzender Flächen z.B. in den Europäischen Alpen, werden im Vergleich zu anderen Ökosystemen als besonders vulnerabel gegenüber Auswirkungen des Klimawandels eingestuft. In den letzten Jahrzehnten waren Grünlandökosysteme raschen Landnutzungs- und Managementveränderungen ausgesetzt, die sich derzeit weiter fortsetzen und so zu Verschiebungen in den räumlichen Produktionsmustern führten. Klima-, Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen beeinflussen die Grünlandökosysteme auf unterschiedliche Weise. Vor allem aber verändern sie Bodenbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Nährstoffe), was sich auf die Vegetation und das Bodenmikrobiom auswirkt. All dies beeinflusst die biogeochemischen Stoffkreisläufe von C, N und Wasser mit potenziell nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen. Diese Grünlandböden sind sehr reich an organischem Kohlenstoff, der unter wärmeren Klimabedingungen wahrscheinlich als CO2 freigesetzt werden kann mit negativen Folgen für die Humusbilanz und die Pflanzenproduktion bzw. potentiell erhöhten N Austrägen (z.B. NO3, N2O).

I.3 Ablauf des Vorhabens

Von den fünf thematisch verschiedenen WPs hat WWL folgende Arbeitspakte in enger Kooperation mit den Projektpartnern bearbeitet: WP0: Koordination, WP2 Modellierung, WP3 Regionale Untersuchungen (Fernerkundung) und WP5: Informations- und Wissensverbreitung.

Die Zeit- und Meilensteinplanung für das Projekt konnte eingehalten werden.

I.4 Wesentliche Ergebnisse

Die Projektergebnisse zeigen, dass UAV-Multispektraldaten in Kombination mit maschinellem Lernen ein leistungsfähiges Instrument zur Erfassung und räumlichen Extrapolation zentraler Vegetationsmerkmale in Dauergrünland darstellen. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich in folgenden Kernpunkten zusammenfassen:

- Hohe Vorhersagegenauigkeit: UAV-basierte Schätzungen lieferten zuverlässige Ergebnisse für Biomasse, Stickstoffgehalt, C:N-Verhältnis, Artenreichtum und Shannon-Index. Besonders das Red-Edge- und das NIR-Band erwiesen sich als entscheidend für die ML-Modelle.
- Einfluss von Licht und Jahreszeit: Aufnahmen während der Hauptvegetationszeit (Juni) boten die stabilsten Beziehungen zwischen Spektralindizes und Vegetationsparametern. Uneinheitliche Lichtverhältnisse oder zeitliche Unterschiede zwischen Flügen reduzierten die Modellgüte deutlich.
- Mehrjährige Datensätze: Sie ermöglichen zwar eine bessere Erfassung langfristiger Trends, führen aber ohne strenge radiometrische Harmonisierung zu Genauigkeitseinbußen. Für Anwendungen im Monitoring ist eine standardisierte Erfassung (identische Flugzeiten, Kalibrationstafeln, Sonnensensor) entscheidend.

- Managementeffekte: UAV-Daten erlauben eine präzise räumliche Differenzierung zwischen intensiv und extensiv bewirtschafteten Parzellen und können damit helfen, Bewirtschaftungsmaßnahmen ökologisch zu optimieren.
- Anwendungsrelevanz: Die Integration von UAV-gestützten ML-Modellen in agrarökologische Entscheidungsprozesse bietet großes Potenzial für das Monitoring von Ökosystemdienstleistungen, die Bewertung von Managementmaßnahmen und die Anpassung an Klimaveränderungen.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass UAV-gestützte Ansätze die Lücke zwischen bodenbasierten Messungen und satellitengestützter Fernerkundung schließen können. Sie bieten eine hochauflösende, flexible und kosteneffiziente Möglichkeit, Vegetationsveränderungen auf Betriebs-, Landschafts- und regionaler Ebene zu überwachen.

Darüber hinaus stellen das Entscheidungshilfesystem und die Datenbank wesentliche Projektergebnisse dar. Die Funktionalität und Benutzerfreundlichkeit des Entscheidungshilfesystems wurde im Rahmen zahlreicher Workshops mit Stakeholdern verbessert und in eine Endversion überführt. Teile der finalen SUSALPS-Datenbank werden in die IMKIFU und KIT weite Datenbankstruktur zu Umweltdaten eingebaut.

Schlussbericht BonaRes - Modul A:

SUSALPS | Phase III

Teilprojekt E / FKZ: 031B1067E

Teil II: Eingehende Darstellung

SUSALPS III – Nachhaltige Nutzung von alpinen und voralpinen Grünlandböden unter sich änderndem Klima (Sustainable use of alpine and pre-alpine grassland soils in a changing climate)

Teilprojekt E: Koordination, Dissemination und Entwicklung von Entscheidungshilfe-Systemen, Fernerkundung

Berichtszeitraum / Laufzeit Teilprojekt E: 01.02.2022 – 30.06.2025

Förderkennzeichen: 031B1067E

Zuwendungsempfänger:

WWL Umweltplanung und Geoinformatik GbR
Mozartweg 8
79189 Bad Krozingen

Bearbeitung Teilprojekt E: Alexander Krämer und Johannes Engel

alexander.kraemer@wwl-web.de, Tel.: 07633-8069910

johannes.engel@wwl-web.de, Tel.: 07633-101870

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 031B1067E gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Inhalt

II. Eingehende Darstellung ... 3

II.1 Erzielte Ergebnisse ... 3

II.1.1 Projekt-Server ... 3

II.1.2 Projekt-Homepage / projektinterne Kommunikations- und Datenaustauschplattform ... 4

II.1.3 Projektdatenbank ... 6

II.1.4 Entscheidungshilfesystem ... 7

II.1.5 Drohnenbasierte Fernerkundung ... 8

II.1.6 Informations- und Wissensverbreitung ... 16

II.1.7 Weitere Aktivitäten ... 16

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises ... 16

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten ... 17

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans ... 17

II.5 Aktuelle Entwicklungen und Fortschritte im Fachgebiet ... 17

II.6 Veröffentlichungen ... 19

II. Eingehende Darstellung

II.1 Erzielte Ergebnisse

Die Arbeiten der WWL Umweltplanung und Geoinformatik GbR innerhalb des SUSALPS-Projekts waren in den Arbeitspaketen WP0 (Koordination), WP2 (Modellierung), WP3 (Regionale Untersuchungen / Fernerkundung) und WP5 (Informations- und Wissensverbreitung) angesiedelt.

Die Hauptaufgaben der WWL Umweltplanung und Geoinformatik GbR lagen dabei in folgenden Bereichen:

- Projekt-Server (WP 0.2)
- Projekt-Homepage, projektinterne Kommunikations- und Datenaustauschplattform (WP 0.2)
- Projektdatenbank (WP 0.2)
- Entscheidungshilfesystem (WP 2.3)
- Drohnenbasierte Fernerkundung (WP 3.1)
- Informations- und Wissensverbreitung (WP 5)

II.1.1 Projekt-Server

Zu Beginn des Projekts erfolgte in enger Abstimmung mit dem Projektpartner KIT eine Evaluation des Bedarfs eines eigenen Projekt-Servers und die Ermittlung der notwendigen Ressourcen. Ziel war das performante Hosting der Projekt-Homepage, der Projektdatenbanken sowie der WebGIS-Installationen und des Expertensystems. Im Ergebnis wurde zu Projektbeginn ein eigener Projekt-Server angemietet und aufgesetzt, der folgende Kennwerte aufweist: Intel Core i7-3930K Hexa Core Prozessor mit 64 GB DDR3 Arbeitsspeicher und einer Festplattenkapazität von 2× 3 TB SATA3.

Die Anforderungen an die Systeme wurden fortlaufend überprüft. Im Winter 2020 / 2021 wurden aufgrund der gestiegenen Anforderungen durch das Expertensystem und die Geodatenspeicherung Lasttests auf dem Server durchgeführt und entschieden, dass für die weitere Projektlaufzeit eine neue Serverumgebung nötig ist. Im Mai 2021 wurde daher ein neuer Server mit folgenden Kennwerten angeschafft: Intel Core i9-9900K Octa Core Prozessor mit 64 GB DDR4 Arbeitsspeicher und einer 2× 1024 GB NVMe SSD Festplatten sowie zwei zusätzlichen jeweils 6 TB großen SATA Enterprise Hard Drive Festplatten. Im Anschluss wurde der neue Server aufgesetzt und die Anwendungen und Daten vom alten Server migriert. Seit August 2021 läuft der neue Server produktiv.

Auch in Phase 3 wurde entsprechend der gestiegenen Anforderungen Lasttests anhand der neuen definierten Use-Cases zur Evaluierung des Ressourcenbedarfs durchgeführt. Im Ergebnis konnte die ursprüngliche Server-Struktur beibehalten werden, es wurden aber interne Optimierungen und Umstrukturierungen durchgeführt, um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden.

Weiterhin wurde die GIS-Umgebung für die Speicherung und Analyse der Daten der Drohnenvermessung (vgl. WP 3) weiterentwickelt und in neuer Version auf dem Projekt-Server installiert.

Über die gesamte Projektlaufzeit erfolgte zudem die Wartung und Pflege der Server (Versionspflege, Updates, strukturelle Optimierungen, Backups und Sicherheitsupdates).

II.1.2 Projekt-Homepage / projektinterne Kommunikations- und Datenaustauschplattform

In Abstimmung mit den Projektpartnern erfolgte zu Beginn der dritten Projektphase eine intensive Überprüfung der Projekt-Homepage und der projektinternen Kommunikations- und Datenaustauschplattform. Im Ergebnis wurde eine Überarbeitung der Homepage-Struktur und Anpassungen im Internen Bereich beschlossen und umgesetzt. Ebenso wurden Layoutanpassungen und technische Optimierungen sowie eine weitere Anpassung der Berechtigungsstrukturen vorgenommen. Die neu hinzugekommenen Mitarbeiter wurden in die Homepage integriert. Aufgrund der nun mittlerweile dritten Projektphase wurde zudem eine neue Kategorie für ehemalige Projektmitarbeiter eingeführt.

Die Programmierung der Web-Seite erfolgte weiterhin auf Basis des Open-Source Content-Management-Systems (CMS) Typo3. Die Umsetzung der Homepage erfolgte dabei ebenso weiterhin komplett zweisprachig in Deutsch und Englisch.

Die Projektpartner wurden im Rahmen einer Schulung in die Bedienung des angepassten CMS-Backends eingeführt, sodass sie eigenständig Inhalte für die Homepage einpflegen und ändern können.

Nach der Neustrukturierung und Umsetzung der neuen / angepassten Homepage erfolgten über die gesamte Projektlaufzeit fortlaufende Tätigkeiten zur Optimierung und weiteren Anpassung der Projekthomepage. Vor allem der laufende Projektfortschritt und neue Projektergebnisse wurden auch über die Homepage entsprechend kommuniziert.

Die statistische Analyse der Nutzung der Homepage erfolgt fortlaufend. Im Schnitt erreicht die Seite 1.528 Besuche im Monat (Bezugszeitraum 02/2022 bis 07/2025). Im Vergleich zur Phase II entspricht das einer Steigerung der Besuchszahlen um 74 %. Abbildung 1 zeigt den über die Projektlaufzeit ansteigenden Verlauf der Besucherzahlen der Homepage mit einem Maximum zum Projektende im Zeitraum der Abschlusskonferenz, was für ein stetig zunehmendes Interesse an dem Projekt und der Thematik spricht. Sowohl die Verteilung nach Wochentag, als auch die Verteilung nach Tageszeit legen nahe, dass es sich bei den meisten Seitenbesuchern um „arbeitsbezogene“ bzw. fachliche Seitenbesuche werktags während normaler Büro- / Arbeitszeiten zwischen 10 und 17 Uhr handelt (Abbildung 2 und Abbildung 3).

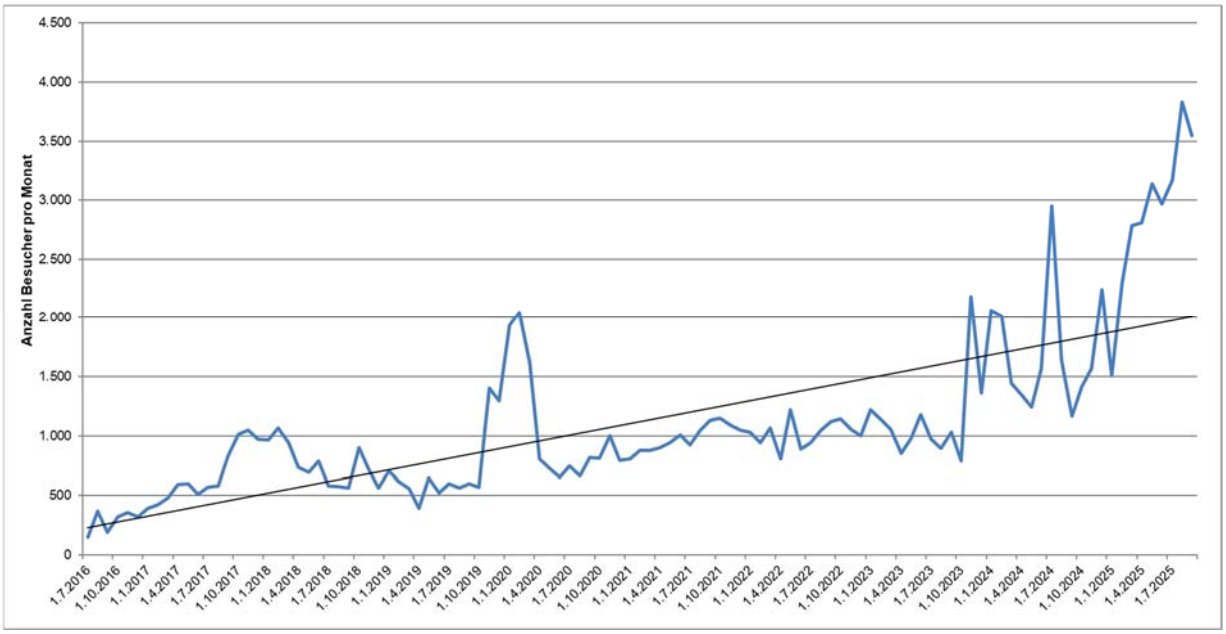

Abbildung 1. SUSALPS-Homepage – Anzahl Besucher pro Monat (Gesamtbesucherzahl über die Projektlaufzeit von Juli 2016 bis Juli 2025: 116.950 Besucher).

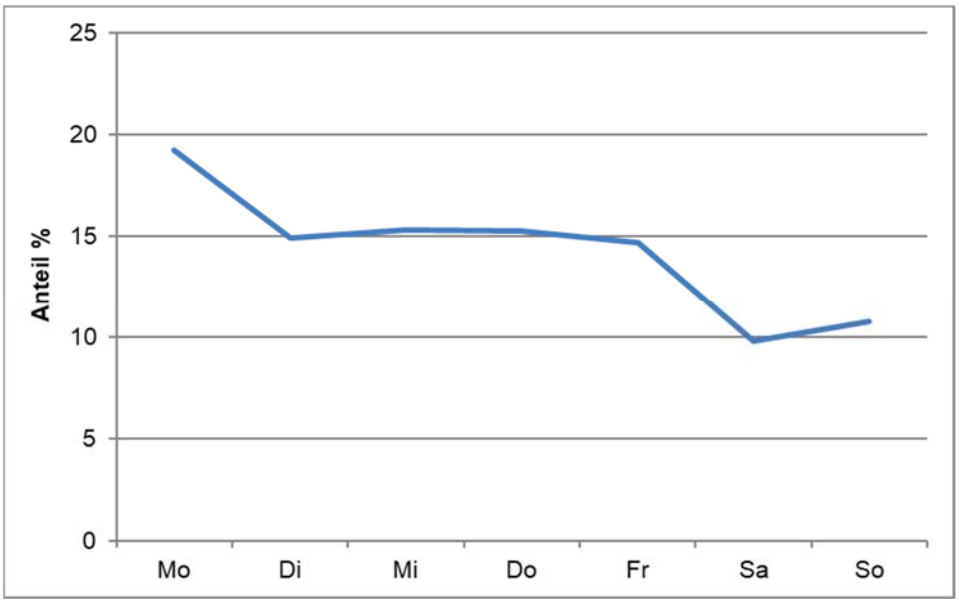

Abbildung 2. SUSALPS-Homepage – Prozentuale Verteilung der Seitenzugriffe auf die Wochentage

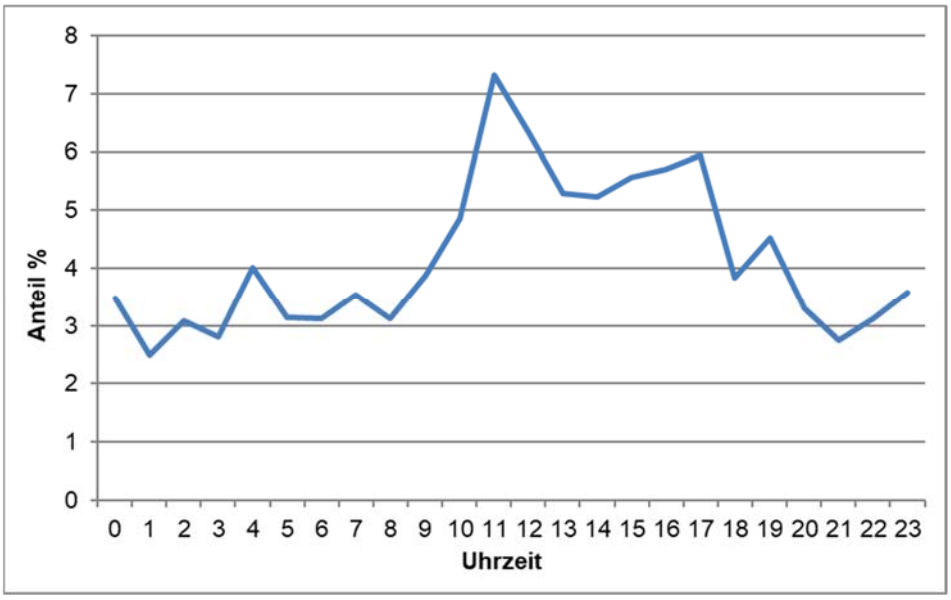

Abbildung 3. SUSALPS-Homepage – Prozentuale Verteilung der Seitenzugriffe nach Tageszeit

II.1.3 Projektdatenbank

Für die Weiterentwicklung der Datenbank erfolgten mehrere Workshops und diverse Abstimmungen mit dem Projektpartner KIT. Die SUSALPS-Datenbank wurde im Anschluss überarbeitet und erweitert. Neben der Entwicklung neuer bzw. der Anpassung bestehender Funktionen (u.a. erweiterte Datenimport- und –exportmöglichkeiten) war vor allem die Entwicklung zusätzlicher GIS-Funktionalitäten für die Verarbeitung der Fernerkundungsdaten aus WP 3 Hauptpunkt der Tätigkeiten. Hierbei wurde die zentrale GIS-Umgebung für die Fernerkundungsdaten aus den verschiedenen Messkampagnen neu strukturiert und als Grundlage für die durchzuführenden Analysen weiterentwickelt. Die aus den Drohnendaten abgeleiteten Produkte (Orthofotos, Oberflächenmodelle, Multispektraldaten, GCPs, etc.) wurden fortlaufend in die GIS-Datenbank integriert. Eine ausgebaute GIS-Projektumgebung ermöglicht die Datenrecherche und Datenansicht sowie einen direkten Zugang zu den Daten (Prozessierung, Dateninput Modellierung, Datenexport/ Schnittstellen BonaRes-Datenzentrum etc.).

Die Abstimmung mit dem BonaRes-Datenzentrum zur Kopplung der Datenbanken und dem fortlaufenden Datenaustausch wurde fortgeführt. Ebenso erfolgte eine Teilnahme am BonaRes Data-Management-Workshop im Mai 2023.

Die Haupttätigkeiten im Bereich der Projektdatenbank lagen v.a. auf Programmiertätigkeiten im Back- und Frontendbereich. Technisch basiert die Datenbank weiterhin auf der Open-Source-Datenbank PostgreSQL mit der raumbezogenen Erweiterung PostGIS. Die Programmierung erfolgte weiterhin v.a. in PHP.

Von den Projektpartnern wurden fortlaufend Datensätze angefordert, technisch geprüft und deren Übernahmemöglichkeit via Schnittstellen implementiert bzw. direkt in die Datenbank integriert. Der Projetkmeilenstein 0-1 wurde fristgerecht erreicht.

Zum Projektende erfolgten intensive Abstimmungen mit dem Projektpartner KIT und dessen Leitungspersonal der IMKIFU AG Dateninitiative bzgl. Weiterführung und Übernahme der Datenbank nach Ende des Förderprojekts. Anhand mehrerer Workshops wurden verschiedene

Varianten evaluiert. Ende 2024 folgte seitens KIT die Entscheidung zur Überführung der bestehenden Datenbank und sämtlicher Daten in eine beim KIT gehostete Sensor-Datenbank mit Kompatibilität zu nationalen Dateninitiativen. Im Anschluss erfolgte der komplette Transfer der Datenbank inklusive aller Daten an das KIT. Für die Projektpartner wurde die Datenbank bis Ende des Förderzeitraums weiterhin auf dem Projektserver gehostet und zugänglich gehalten.

II.1.4 Entscheidungshilfesystem

Das webbasierte Expertensystem wurde inhaltlich und technisch in enger Abstimmung mit KIT und UBT-ES unter Federführung von WWL und in Absprache mit externen Stakeholdern (siehe WP 5 / Informations- und Wissensvermittlung) weiterentwickelt und Ende 2024 in einer finalen Version fertiggestellt (MS 2-6). Besonderes Augenmerk wurde weiterhin auf eine leichte Handhabung und Nutzerfreundlichkeit, den Umfang und Art der benötigten Eingabedaten und die Ergebnisdarstellung gelegt. Unter anderem wurde das Konzept zu differenzierten Zugangsebenen überarbeitet und neue Anpassung im Bereich des Modelloutputs umgesetzt.

Evaluierungen zur inhaltlichen und technischen Weiterentwicklung des Entscheidungshilfesystems erfolgten fortlaufend auf Basis von persönlichen Gesprächen mit Vertretern der LfL und mit bekannten Landwirten aus der Untersuchungsregion. Aus diesen Treffen leiteten sich neue Fragestellungen ab. Neu umgesetzt wurde v.a. der Bereich mit aus den Modellergebnissen abgeleiteten Handlungsempfehlungen. Der Nutzer erhält so in Abhängigkeit der Modellergebnisse für die relevanten Parameter Empfehlungen, um bei Grenzwertüber- oder Unterschreitungen seine Bewirtschaftung anzupassen. Die Auswirkungen dieser Empfehlungen können direkt durch Klick auf eine der empfohlenen Maßnahmen als neuer Modelllauf berechnet und vergleichend evaluiert werden (Abbildung 4).

Sämtliche Modellergebnisse lassen sich zudem zur Weiterverarbeitung direkt herunterladen.

Derzeit wird eruiert, inwieweit das Entscheidungshilfesystem perspektivisch in ein bestehendes, digitales LCA-Programm der LfL für bayerische Landwirte integriert werden kann.

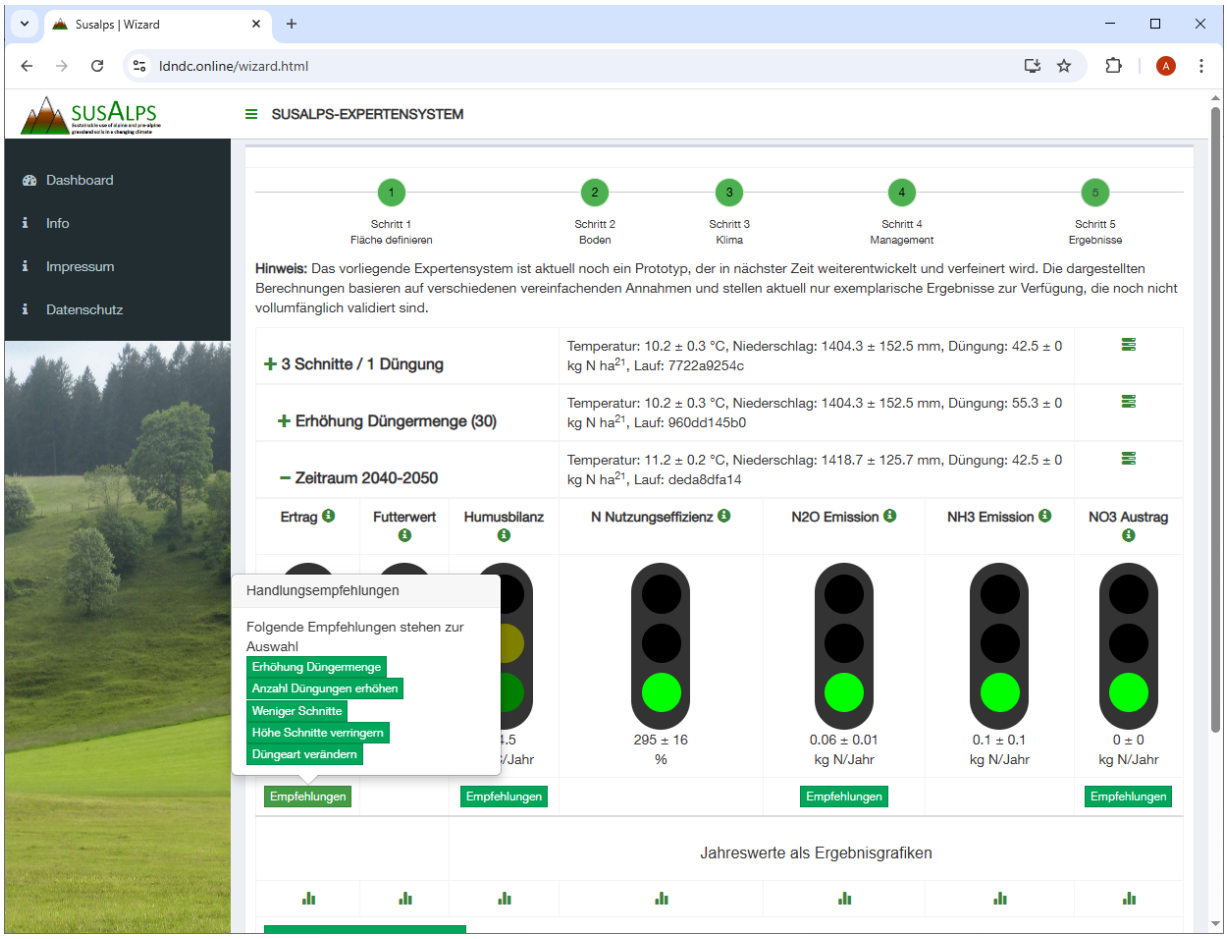

Abbildung 4. Bewertung von Grünlandfunktionen in Ampeldarstellung für Jetztzeit- und Vergleichszeitraum, Ergänzung von Handlungsempfehlungen und Vergleichsbetrachtungen.

II.1.5 Drohnenbasierte Fernerkundung

Das Hauptziel dieses Teilarbeitspaketes ist die Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Schätzung von ausgewählten Grünlandparametern (wie z.B. Trockenbiomasse, Stickstoffgehalt in der Vegetation) auf der Feldskala. Dafür wurden im Projektzeitraum umfangreiche Feldkampagnen zur Erhebung von in-situ Daten sowie parallel stattfindenden Drohnenbefliegungen durchgeführt. Dabei kamen RGB- und Multispektralsensoren mit einer räumlichen Auflösung im Zentimeterbereich zum Einsatz.

Fortlaufend fanden mehrere Workshops und diverse Abstimmungen zwischen den Projektpartnern WWL / KIT / JMU zu den Messmethoden, Feldkampagnen und anschließenden Prozessierungen und Auswertungen statt. Kernpunkt war die Weiterentwicklung des in Projektphase II definierten abgestimmten Vorgehens für die Geländearbeiten (Protocol for SUSALPS remote sensing field work), anhand dessen sämtliche Messkampagnen durchgeführt wurden.

Die Hauptuntersuchungen fanden auf 4 Teilflächen in Fendt und 2 Teilflächen in Rottenbuch statt. Für jede dieser 6 Teilflächen wurden 4 Einzelbefliegungen über die Projektlaufzeit durchgeführt. Zum Monitoring des Wieder-Beweidungsprojekts fanden zudem jährliche Befliegungen zur Flächencharakterisierung auf der Brunnenkopfalm statt.

Für die Untersuchungen zur Ableitung von Biodiversitätsparametern fanden darüber hinaus zwei große Messkampagne in der Fränkischen Schweiz statt. Weiterhin erfolgten

Drohnenbefliegungen auf Grünlandflächen in Nantesbuch und Emmendingen, deren Ergebnisse für vergleichende Analysen benötigt wurden.

Ein Überblick der gesamten im Berichtszeitraum durchgeführten Drohnenkampagnen findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht Drohnenkampagnen SUSALPS Phase III

Fernerkundungskampagne	Anzahl	Standort	Teilflächen
Erfassung Biomasse + Schnittdynamik	4	Fendt	4
Erfassung Biomasse + Schnittdynamik	4	Rottenbuch	2
Erfassung Biomasse + Schnittdynamik + Biodiversität	2	Fränkische Schweiz	30
Effekte der Wiederbeweidung (Vegetation / Erosion)	3	Brunnenkopfalm	1
Geländemodell und Oberflächentemperaturen Moorstandort	1	Nantesbuch	2
Erfassung Biomasse / Biodiversität (RGB und Multispektral)	1	Emmendingen	2

Für jeden einzelnen Flug erfolgte die Flugplanung, die Programmierung der Drohne, sowie die Auswertung und Aufbereitung der Daten. Als Produkte wurden jeweils georeferenzierte Orthophotos, Oberflächenmodelle und Multispektral-Aufnahmen sowie abgeleitete Datensätze (z.B. Vegetationshöhe, NDVI, 3D-Modelle) für jede (Teil-)Fläche und Flugzeitpunkt berechnet. Die Daten wurden in die GIS-Datenbank integriert und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

In Zusammenarbeit mit dem KIT erfolgte eine umfassende Analyse der Daten. Die wichtigsten Ergebnisse sind unter Mitwirkung und Mitautorenschaft von WWL von Dashpurev et al. (2025) in der Fachzeitschrift Ecological Indicators publiziert und werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

Ziel war die systematische Analyse der Möglichkeiten, mithilfe mehrjähriger UAV-Multispektralaufnahmen in Kombination mit begleitenden In-situ-Messungen zentrale Vegetationsmerkmale in intensiv und extensiv bewirtschafteten Dauergrünlandflächen in Bayern zuverlässig zu überwachen und räumlich darzustellen.

Im Fokus stehen dabei folgende Schlüsselindikatoren: die Biomasse (Aboveground Biomass - AGBdry), der Stickstoff- (N) und Kohlenstoffgehalt (C) der Vegetation, das C:N-Verhältnis als Maß für Futterqualität und Nährstoffstatus, die Pflanzenartenzahl (Species Richness) und der Shannon-Diversitätsindex (H-Index).

Diese Parameter sind von hoher Relevanz für die Bewertung von Grünlandqualität, Produktivität und Ökosystemgesundheit unter unterschiedlichen Managementintensitäten. Die Ergebnisse richten sich an Landwirte, Behörden, Naturschutzfachleute und Wissenschaftler, die Entscheidungen zur nachhaltigen Grünlandbewirtschaftung treffen müssen.

Die Studie wurde an fünf Dauergrünlandstandorten in Bayern (Deutschland) durchgeführt: den südlich gelegenen Flächen Fendt und Rottenbuch (Teil des TERENO Pre-Alpine Observatory) sowie den nördlicher gelegenen Standorten Gubitzmoos, Schobertsberg und Obernschreez in der Region Bayreuth. Die beiden südlichen Flächen liegen in einer voralpinen, hügeligen Landschaft mit feuchtem, gemäßigt-kontinentalem Klima (Fendt 595 m ü. NN, Rottenbuch 769 m ü.NN). Die mittlere Jahresniederschlagsmenge beträgt 950–1100 mm, die mittlere Jahrestemperatur etwa 8,8 °C. Dominante Pflanzenarten sind Wiesenrispe (Poa pratensis L.), Rotschwingel (Festuca rubra L.) und Deutsches Weidelgras (Lolium perenne L.) sowie verschiedene Kräuter und Leguminosen wie Trifolium pratense L. und Ranunculus repens L.

Die nördlichen Untersuchungsflächen liegen im Hügelland der Fränkischen Schweiz (340 m ü. NN) mit rund 724 mm Jahresniederschlag und einer mittleren Temperatur von 8,3 °C. Dort überwiegen Taraxacum sect. Ruderalia, Dactylis glomerata, Plantago lanceolata, Holcus lanatus und Elymus repens. Die Bewirtschaftung reichte von extensiv (1–2 Schnitte pro Jahr ohne Düngung) bis intensiv (4–6 Schnitte und 4–5 Gülleanwendungen pro Jahr).

Zwischen 2019 und 2023 wurden mehrjährige UAV-Flüge (vgl. Tabelle 1) mit einem eBee-Starrflügel-UAV (senseFly, Schweiz) durchgeführt. Das Fluggerät war mit einer Parrot Sequoia Multispektralkamera ausgestattet, die vier Spektralbänder aufzeichnete: Grün, Rot, Red-Edge und Nahinfrarot (NIR). Zusätzlich wurde ein Sonnensensor montiert, um die einfallende Strahlung während der Flüge zu erfassen. Die Flugroute wurde in 85 m Höhe mit 80 % Überlappung (lateral und longitudinal) geflogen, was einer Bodenauflösung von etwa 8 cm pro Pixel entsprach.

Die Bildverarbeitung erfolgte mit Pix4DMapper Pro und umfasste:

- Photogrammetrische Rekonstruktion (Structure-from-Motion): Abgleich und Kalibrierung der Aufnahmen mittels Boden-Kontrollpunkte (DGPS-gemessen).
- Erzeugung dichter Punktwolken und Orthomosaike.
- Radiometrische Kalibrierung anhand von Referenztafeln und Sonnensensorwerten, um absolute Reflexionswerte zu erhalten, die zwischen unterschiedlichen Flügen und Sensoren vergleichbar sind.

Anschließend wurden Vegetationsindizes berechnet, u. a. NDVI, NDVI-Red-Edge, NDVI-Green, SAVI, MSAVI, TSAVI und SR-Red-Edge. Diese Indizes wurden auf Basis ihrer Relevanz aus früheren Studien ausgewählt und gemeinsam mit den Reflexionsbändern zu einem multidimensionalen Datensatz in ArcGIS Pro 3.2 kombiniert.

Parallel zu den UAV-Flügen wurden Feldmessungen auf 20 × 20 m-Versuchsflächen durchgeführt. Jede Fläche enthielt vier 0,5 × 0,5 m-Subplots. Nach jedem Flug wurden die Pflanzenhöhe (Platemeter), die Frisch- und Trockenmasse (nach Trocknung bei 65 °C bis Gewichtskonstanz), der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt (Elementaranalyse), sowie die Artenzusammensetzung (zur Berechnung des Shannon-Index) erhoben. Die Positionsdaten wurden mit einem Trimble-DGPS mit Zentimetergenauigkeit bestimmt.

Zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen UAV-basierten Prädiktoren und gemessenen Vegetationsmerkmalen wurden Spearman-Korrelationen und Bestimmtheitsmaße (R^2) berechnet. Dadurch ließ sich bestimmen, welche Spektralbänder und Indizes die stärksten Beziehungen zu Biomasse, C- und N-Gehalten aufwiesen.

Zur Schätzung der Vegetationseigenschaften wurden drei ML-Ansätze genutzt: Random Forest (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost) und AutoML-Ensemblemodelle. Beide Entscheidungsbaumverfahren gehören zur Familie der Ensemble-Lernverfahren. RF nutzt „Bagging“, während XGBoost sequenziell schwache Modelle kombiniert („Boosting“). Die Modelle wurden in R (Version 4.4.2) und ArcGIS Pro 3.2 trainiert. Die Hyperparameteroptimierung erfolgte über Random-Search mit Kreuzvalidierung (z. B. 50–500 Bäume bei RF, 200–400 Boosting-Runden bei XGBoost).

Um die zeitliche und räumliche Variabilität abzubilden, wurden verschiedene Datensubsets definiert:

- Zeitlich: Gesamte Zeitreihe (2019–2023), Hauptvegetationsperiode (Juni 2019–2023), Intra-annuelle Daten (2019), Einzelaufnahmen
- Räumlich: Mehrjährige und einmalige Datensätze für Fendt, Rottenbuch, Gubitzmoos, Obernschreez und Schobertsberg.

So konnte die Modellleistung sowohl zeitlich als auch standortspezifisch bewertet werden.

Für die Validierung wurden 80 % der Daten zum Training und 20 % zur unabhängigen Prüfung genutzt. Bewertungsmetriken waren R^2 (Erklärte Varianz), RMSE (Root Mean Square Error) und MAPE (Mittlere prozentuale Abweichung). Bei den AutoML-Modellen wurde zusätzlich die interne Modellselektion anhand der geringsten RMSE und höchsten R^2 Werte durchgeführt.

Zentrale Ergebnisse:

Die Messungen der Vegetationsmerkmale zeigten über die fünf Jahre (2019–2023) eine deutliche zeitliche und räumliche Variabilität. Die oberirdische Trockenbiomasse (AGBdry) schwankte stark zwischen den Mahdterminen und den Bewirtschaftungsintensitäten. In intensiv bewirtschafteten Flächen lag sie bei Vegetationsmaximum häufig über 300 g m^{-2}, in extensiven Flächen dagegen nur zwischen 80 und 150 g m^{-2} und nach der Mahd fiel sie auf Werte unter 20 g m^{-2}. Der Stickstoffgehalt variierte zwischen 1,2 % und 5,9 %, wobei höhere Werte auf den stärker gedüngten Standorten in Fendt und Rottenbuch gemessen wurden. Das C:N-Verhältnis reichte von 10 bis 35, mit deutlich höheren Werten in extensiv genutzten Wiesen. Der Artenreichtum lag zwischen 14 und 52 Arten pro m², die höchsten Diversitätswerte (Shannon-Index > 2,6) wurden in den weniger gedüngten und seltener gemähten Beständen beobachtet.

Zwischen den Untersuchungsjahren traten markante Schwankungen auf, bedingt durch Unterschiede in Witterung, Düngungshäufigkeit und Vegetationsentwicklung. 2021 war z.B. durch überdurchschnittliche Niederschläge gekennzeichnet, was eine hohe Biomasseproduktion, aber niedrigere Stickstoffgehalte zur Folge hatte.

Die Korrelationsanalyse zeigte, dass Red-Edge- und NIR-Bänder die stärksten Zusammenhänge mit der Biomasse und dem Stickstoffgehalt aufwiesen (ρ = 0,78 – 0,84). Unter den Vegetationsindizes erwiesen sich NDVI, SAVI und insbesondere MSAVI als besonders sensitiv für AGBdry und N-Gehalt. Für Biodiversitätsmerkmale (Artenreichtum, Shannon-Index) zeigten dagegen Indizes mit Anteilen im grünen und roten Spektralbereich eine höhere Korrelation ($\rho \approx 0{,}6$). Die Stärke dieser Zusammenhänge variierte zwischen den Flächen: An den südlichen Standorten (Fendt, Rottenbuch) dominierten hohe NDVI- und NIR-Werte infolge dichter Vegetation, während an den nördlichen, extensiv genutzten Flächen der Red-Edge-Kanal aussagekräftiger war.

Die Modelle RF, XGBoost und AutoML lieferten insgesamt hohe Vorhersagequalitäten, insbesondere für AGBdry, N-Gehalt und C:N-Verhältnis.

Die besten Ergebnisse wurden erzielt für:

- AGBdry: R^2 = 0,81, RMSE = 25,6 g m^{-2}
- N-Gehalt: R^2 = 0,77, RMSE = 0,42 %
- C:N-Verhältnis: R^2 = 0,81, RMSE = 2,9

- Artenreichtum: R^2 = 0,84, RMSE = 4,7
- Shannon-Index: R^2 = 0,86, RMSE = 0,18

Die AutoML-Modelle erzielten ähnlich gute Ergebnisse wie RF, zeigten aber eine leicht höhere Stabilität bei der räumlichen Übertragung. XGBoost reagierte empfindlicher auf nicht standardisierte Lichtbedingungen, was auf eine stärkere Abhängigkeit von Radiometrie und Datennormalisierung hindeutet.

Mehrjährige kombinierte Datensätze führten zu leicht geringeren Modellleistungen (R^2 um 0,05–0,1 niedriger), was auf radiometrische Inkonsistenzen zurückzuführen ist. Am besten schnitten Modelle ab, die auf Einzelaufnahmen während des Vegetationsmaximums (Juni) trainiert wurden, da in diesem Zeitraum homogene Beleuchtung und maximale spektrale Differenzierung zwischen den Vegetationstypen vorlagen.

Die auf Basis der besten Modelle erstellten Karten zeigten eine klare räumliche Differenzierung der Grünlandflächen. Intensiv bewirtschaftete Parzellen (Fendt I, Rottenbuch I) wiesen höhere geschätzte AGBdry- und N-Gehalte auf, extensiv genutzte Flächen (Obernschreez, Schobertsberg) hatten höhere geschätzte C:N-Verhältnisse und Diversitätswerte. Innerhalb einzelner Felder ließen sich Mikrogradienten erkennen, die auf Bodenfeuchte, Relief oder ungleichmäßige Düngerverteilung zurückzuführen waren. Die zeitliche Dynamik zeigte, dass AGBdry nach der Mahd stark abnahm (oft um > 80 %), anschließend aber innerhalb weniger Wochen wieder das Ausgangsniveau erreichte.

Die Übertragbarkeit der Modelle zwischen den Jahren war eingeschränkt, insbesondere bei heterogenen Beleuchtungsbedingungen. Wurden Trainings- und Validierungsdaten aus verschiedenen Jahren kombiniert, sank R^2 um 0,1–0,15, was auf saisonale Unterschiede in Vegetationsstruktur, Wassergehalt und atmosphärische Effekte zurückzuführen ist. Dagegen zeigte sich, dass Modelle, die auf standardisierte NDVI-basierte Indizes trainiert wurden, eine bessere interannuale Stabilität aufwiesen. Insgesamt bestätigte sich das Potenzial mehrjähriger UAV-Datensätze, wenn diese sorgfältig radiometrisch kalibriert und konsistent erfasst werden.

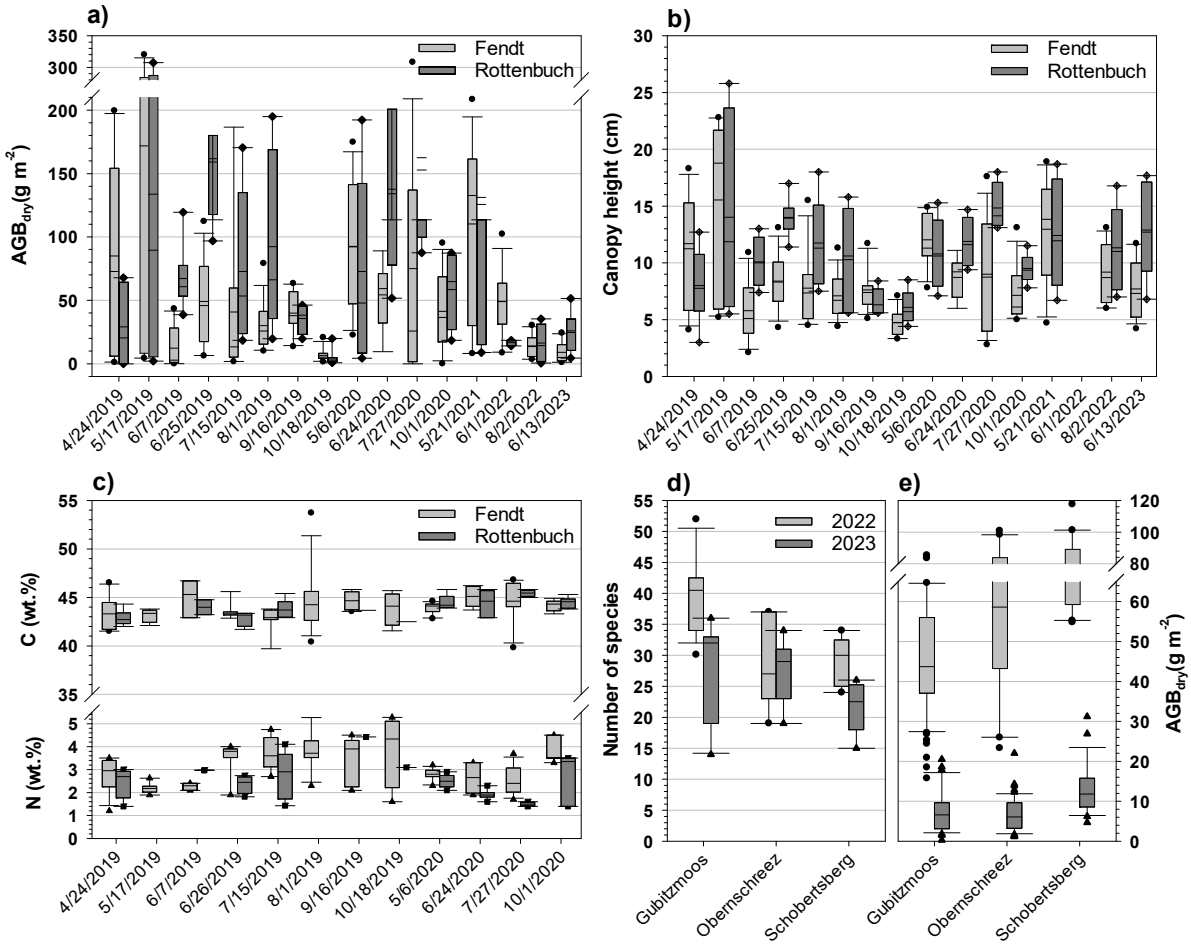

Abbildung 5. Mehrjährige Erfassung von Vegetationsmerkmalen und Variationen in Fendt und Rottenbuch (a-c) sowie an Untersuchungsstandorten rund um Bayreuth (d-e) im Zeitraum 2019–2023.

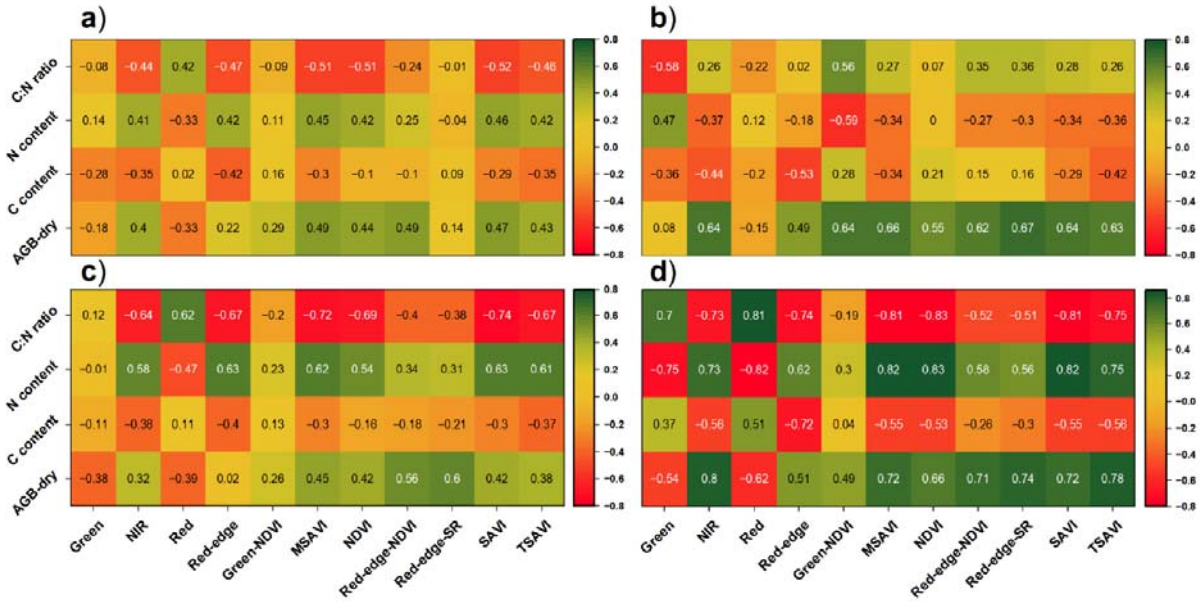

Abbildung 6. Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen UAV-basierten Prädiktorvariablen und Vegetationsmerkmalen über verschiedene Zeiträume hinweg: a) Korrelation für die gesamte Zeitreihe (2019–2023), b) Korrelation für die Hauptwachstums-perioden (Juni 2019–2023), c) Korrelation für Daten innerhalb eines Jahres (2019) und d) Korrelation für einzelne Beobachtungsdaten (24. April 2019).

Diskussion

Die Ergebnisse dieser Studie belegen, dass UAV-Multispektralaufnahmen in Kombination mit maschinellem Lernen eine zuverlässige Methode darstellen, um strukturelle und funktionale Eigenschaften von Dauergrünland zu erfassen. Besonders deutlich zeigte sich, dass Red-Edge- und Nahinfrarot-Bänder (NIR) die stärksten Zusammenhänge zu Biomasse und Stickstoffgehalt aufwiesen – ein Befund, der mit zahlreichen früheren Studien übereinstimmt. Diese Spektralbereiche reagieren empfindlich auf Blattstrukturen, Chlorophyll- und Pigmentgehalte und spiegeln daher physiologische Zustände der Pflanzen exakt wider. Die durchgeführte Modellierung demonstrierte, dass moderne Ensemble-Algorithmen wie Random Forest und XGBoost komplexe, nichtlineare Beziehungen zwischen spektralen Signaturen und Vegetationsmerkmalen zuverlässig abbilden können. Solche Verfahren sind damit klassischen Regressionsansätzen überlegen, insbesondere wenn zahlreiche hochkorrelierte Prädiktoren vorliegen. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse die Notwendigkeit, UAV-Datensätze radiometrisch zu standardisieren. Selbst geringfügige Unterschiede in Sonnenstand, Wolkenbedeckung oder Bodenreflexion können spektrale Signaturen verfälschen und so die Modellübertragbarkeit zwischen verschiedenen Jahren oder Standorten reduzieren. Daher ist es entscheidend, Flüge stets unter möglichst konstanten Beleuchtungsbedingungen durchzuführen und zusätzlich Sonnensensoren sowie Kalibrationstafeln einzusetzen.

Die UAV-basierten Schätzungen korrelierten eng mit den Feldmessungen und ermöglichen so eine erhebliche Zeit- und Arbeitsersparnis gegenüber klassischen Erhebungen. Die räumliche Auflösung von 8 cm pro Pixel erlaubt die Erfassung flächendetaillierter Muster innerhalb der Vegetationsbestände, die in konventionellen Bodenkampagnen kaum abbildbar sind. Während herkömmliche Methoden nur punktuelle Informationen liefern, erfassen UAV-Daten die gesamte Flächenheterogenität. Gleichwohl bleibt die Notwendigkeit punktgenauer Bodenmessungen bestehen, um UAV-Modelle zu kalibrieren und langfristig zu validieren.

Ein zentrales Ziel dieser Arbeit war die Bewertung des Nutzens mehrjähriger UAV-Datensätze. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Modelle, die auf Daten einzelner Vegetationsperioden trainiert wurden, meist durch höhere Genauigkeit auszeichnen als solche, die mehrere Jahre kombinieren. Dies liegt an radiometrischen und phänologischen Inkonsistenzen zwischen Jahren. Gleichwohl bieten mehrjährige Datensätze wertvolle Zusatzinformationen über langfristige Trends, insbesondere für Monitoring-Programme oder Klima-Impact-Analysen. Um die interannuelle Vergleichbarkeit zu verbessern, empfiehlt sich der Einsatz einer radiometrischen Harmonisierung über standardisierte Referenztafeln, die Durchführung zeitlich synchronisierter Flugkampagnen (gleiche Tageszeit, ähnliche Bewölkung) und eine Daten-Normalisierung mithilfe statistischer Verfahren (z. B. Z-Transformation).

Die Analyse verdeutlicht, dass die Managementintensität ein Schlüsselfaktor für die Variabilität der Vegetationsmerkmale ist. Intensive Nutzung – mit häufigen Schnitten und Düngung – führte zu hoher Biomasseproduktion und Stickstoffgehalten, aber zu geringerer Artenvielfalt und geringeren C:N-Verhältnissen. Extensive Nutzung zeigte das entgegengesetzte Muster: geringere Biomasse, aber höhere Diversität und hohe C:N-Verhältnisse. UAV-Daten ermöglichen es, diese Unterschiede objektiv und quantitativ zu erfassen, etwa durch Kartierung des Wiederaufwuchses nach Mahdereignissen oder der Reaktion auf Düngergaben. Dadurch können Landwirtinnen und Landwirte Managementmaßnahmen räumlich gezielt anpassen, um ökologische und ökonomische Ziele besser zu vereinen.

Die Integration von UAV-Daten in langfristige Monitoring-Systeme bietet erhebliches Potenzial für das Umwelt- und Ressourcenmanagement. Die erzeugten raum-zeitlichen Karten können

zur Beurteilung des ökologischen Zustands, zur Identifikation degradierter Flächen oder zur Modellierung von Stoffflüssen verwendet werden. In Kombination mit Bodendaten, Klimaparametern und Fernerkundungsdaten aus Satelliten (z. B. Sentinel-2) könnten UAV-Informationen künftig eine Schlüsselrolle bei der multiskaligen Umweltbewertung spielen. Allerdings bleibt der methodische Aufwand für Datenerfassung, Kalibrierung und Prozessierung hoch. Eine Standardisierung der UAV-Erhebungen und die Entwicklung automatisierter Workflows (etwa auf Basis von AutoML oder Cloud-Prozessen) sind daher zentrale Zukunftsaufgaben.

Gleichzeitig sind UAV-gestützte Ansätze aber weiterhin durch mehrere Faktoren limitiert. Ein Problem bleibt die Wetter- und Lichtabhängigkeit. Bewölkter Himmel oder wechselnde Sonneneinstrahlung beeinflussen die Datenqualität erheblich. Bezüglich der zeitlichen Auflösung können häufige Befliegungen die Aussagekraft erhöhen, sind aber organisatorisch aufwendig. Zudem erfassen multispektrale Sensoren nur relativ wenige Bänder, was zu gewissen spektralen Einschränkungen führt. Hyperspektrale Sensoren könnten hier künftig detailliertere Analysen ermöglichen. Künftige Forschung sollte daher auf die Integration hyperspektraler Sensorik, die Kombination von UAV- und Satellitendaten, ein Langzeit-Monitoring über mehrere Dekaden, sowie die Verknüpfung mit ökonomischen und ökologischen Bewertungsmodellen abzielen.

Die Projektergebnisse zeigen, dass UAV-Multispektraldaten in Kombination mit maschinellem Lernen ein leistungsfähiges Instrument zur Erfassung und Modellierung zentraler Vegetationsmerkmale in Dauergrünland darstellen. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich in folgenden Kernpunkten zusammenfassen:

- Hohe Vorhersagegenauigkeit: UAV-basierte Schätzungen lieferten zuverlässige Ergebnisse für Biomasse, Stickstoffgehalt, C:N-Verhältnis, Artenreichtum und Shannon-Index. Besonders das Red-Edge- und das NIR-Band erwiesen sich als entscheidend für die Modellleistung.
- Einfluss von Licht und Jahreszeit: Aufnahmen während der Hauptvegetationszeit (Juni) boten die stabilsten Beziehungen zwischen Spektralindizes und Vegetationsparametern. Uneinheitliche Lichtverhältnisse oder zeitliche Unterschiede zwischen Flügen reduzierten die Modellgüte deutlich.
- Mehrjährige Datensätze: Sie ermöglichen zwar eine bessere Erfassung langfristiger Trends, führen aber ohne strenge radiometrische Harmonisierung zu Genauigkeitseinbußen. Für Anwendungen im Monitoring ist eine standardisierte Erfassung (identische Flugzeiten, Kalibrationstafeln, Sonnensensor) entscheidend.
- Managementeffekte: UAV-Daten erlauben eine präzise räumliche Differenzierung zwischen intensiv und extensiv bewirtschafteten Parzellen und können damit helfen, Bewirtschaftungsmaßnahmen ökologisch zu optimieren.
- Anwendungsrelevanz: Die Integration von UAV-gestützten ML-Modellen in agrarökologische Entscheidungsprozesse bietet großes Potenzial für das Monitoring von Ökosystemdienstleistungen, die Bewertung von Managementmaßnahmen und die Anpassung an Klimaveränderungen.

Insgesamt verdeutlicht die Studie, dass UAV-gestützte Ansätze die Lücke zwischen bodenbasierten Messungen und satellitengestützter Fernerkundung schließen können. Sie bieten eine hochauflösende, flexible und kosteneffiziente Möglichkeit, Vegetationsveränderungen auf Betriebs-, Landschafts- und regionaler Ebene zu überwachen.

Damit können diese Daten zukünftig sowohl für die Initialisierung als auch für die Validierung von biogeochemischen Prozessmodellen zur Vorhersage von Erträgen (Quantität und Qualität) eine wichtige Rolle spielen.

II.1.6 Informations- und Wissensverbreitung

Ein zentrales Element der Projektarbeiten ist der Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Disziplinen und mit Praktikern aus der Landwirtschaft. Diese Aktivitäten wurden in WP5 gebündelt und durchgeführt.

In enger Zusammenarbeit und unter Federführung des Projektpartners KIT wurden hierzu Schulungen mit ausgewählten Landwirten, landwirtschaftlichen Beratern, Vertretern der Milchindustrie und Behörden zum Testen und Verbessern des webbasierten Entscheidungshilfesystems auf Parzellen-/Betriebsebene durchgeführt. Ebenso fanden Demoworkshops zu Hintergrund und Anwendung des webbasierten Entscheidungsunterstützungssystems statt. Im Zuge dieser Maßnahmen erfolgte auch ein Abgleich mit anderen vergleichbaren Anwendungen der LfL. In mehreren Abstimmungsrunden wurden die vorhandenen Ansätze und Lösungsmöglichkeiten abgeglichen und eine künftig enge Kooperation vereinbart. Da eine parallele Weiterführung mehrerer Anwendungen nicht effizient wäre, wurde zudem vereinbart, dass das originäre SUSALPS-DSS für Grünland (ev. auch für Ackerland) in Bayern perspektivisch in bestehende LCA Modelle der LFG integriert werden könnte. Das Expertensystem wird aber am KIT weiterhin für die Lehre genutzt und kommt in Folgeprojekten (Erweiterung auf andere landwirtschaftliche Systeme wir Ackerbau und organische Böden, Reisanbau mit Anwendungsbeispiel Vietnam) zum Einsatz und wird dort auch direkt weiterverwendet und auch weiterentwickelt.

II.1.7 Weitere Aktivitäten

Teilnahme BonaRes Statuskonferenz in Berlin

Teilnahme an allen SUSALPS-Gesamtprojekttreffen (Präsenzveranstaltungen und Online)

Teilnahme und Präsentation der Projektergebnisse auf Fachtagungen (Intergeo, Bonares Data Management Workshop, Where2B-Konferenz, EGF, Nationales Forum Fernerkundung, Copernicus-Tagung, DLG Feldtage – Präsenzveranstaltung und Online)

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projekts sind Ausgaben in Form von Personalkosten, Reisekosten sowie sonstige unmittelbare Vorhabenkosten angefallen. Die sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten sind für die Anmietung eines Servers für die SUSALPS-Datenbank und –Homepage und das Expertensystem angefallen. Reisekosten fielen für Projektbesprechungen, Geländeeinsätze und Tagungen an.

Im Verwendungsnachweis wurde über diese Ausgaben im Detail berichtet.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die komplexe Aufgabenstellung des Projektes hat die durchgeführten Arbeiten notwendig gemacht. Diese waren in ihrem Umfang zur Erreichung der Projektziele allesamt angemessen und notwendig.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im SUSALPS-Projekt in Phase III erzielten Ergebnisse werden / wurden in wissenschaftlich begutachteten Fachzeitschriften, dem BonaRes Newsletter, regionalen / überregionalen Printmedien, über die SUSALPS-Homepage sowie im Rahmen von Vorträgen und Exkursionen veröffentlicht. Weiterhin sind SUSALPS-Daten über eine projektinterne Datenbank und über eine Schnittstelle über das BonaRes Webportal öffentlich sichtbar und entsprechend der BonaRes Regularien auf Anfrage verfügbar. Die SUSALPS-Ergebnisse wurden fortlaufend mit Experten aus der landwirtschaftlichen Praxis und Behörden (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg) diskutiert. Dieser wichtige Austausch hat wesentlich dazu beigetragen, die Projektziele von SUSALPS gezielt auf die Belange der angewandten Landwirtschaft ausrichten zu können. Dies hat einerseits im experimentellen Bereich dazu geführt, Synergien z.B. mit der LfL zu nutzen und gemeinsame Experimente auf Bodendauerbeobachtungsflächen durchzuführen. Andererseits konnte das Entscheidungshilfewerkzeug inhaltlich und insbesondere bezüglich seiner einfachen Anwendbarkeit optimiert werden und auch für andere Anwendungszwecke weiterentwickelt werden. In Phase III konnte zudem die Eignung unterschiedlicher Indikatoren zur Bewertung von Grünlandökosystemdienstleistungen im regionalen Kontext geprüft werden. Der zusätzliche Nutzen von UAV-gestützten Methoden zur Überwachung von Vegetationsveränderungen auf Betriebs-, Landschafts- und regionaler Ebene konnte dargestellt werden.

II.5 Aktuelle Entwicklungen und Fortschritte im Fachgebiet

Die unbemannte Drohnentechnologie (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) hat sich zu einem wertvollen Werkzeug für die hochauflösende Fernerkundung von Grünlandökosystemen entwickelt. Während satellitengestützte Systeme wie Sentinel-2 räumliche Auflösungen im 10-Meter-Bereich bieten, ermöglichen Drohnen die Erfassung von Daten mit räumlichen Auflösungen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich, was eine detailliertere Charakterisierung von Grünlandflächen erlaubt (Adão et al., 2017; Bendig et al., 2012). Die Kombination von multispektralen und hyperspektralen Sensoren auf Drohnen eröffnet neue Möglichkeiten für die Überwachung von Vegetationsdynamiken, Biomasseabschätzung und Biodiversitäts-monitoring (Anderson & Gaston, 2013).

Ein Schwerpunkt der Drohnenforschung in der Grünlandanalyse liegt auf der Biomasseabschätzung mittels multispektraler Sensoren. Untersuchungen belegen, dass aus Drohnenbildern abgeleitete Vegetationsindizes wie der NDVI starke Korrelationen mit in-situ Biomassemessungen aufweisen (Pi et al., 2021). Pi et al. (2021) demonstrierten mit Random-Forest-Modellen eine Biomasse-Schätzung in Grünland mit hohem R^2 (~0.82). Die hohe

zeitliche Flexibilität von Drohnen ermöglicht wiederholte Messungen in kurzen Abständen, was für die Verfolgung von Mahd-bedingten schnellen Vegetationsveränderungen essenziell ist (Pi et al., 2021). Die Integration von Structure-from-Motion (SfM) Photogrammetrie mit Drohnendaten hat darüber hinaus die Möglichkeit eröffnet, hochauflösende 3D-Oberflächenmodelle (Digital Surface Models, DSM) von Grünlandflächen zu generieren (Brovkina et al., 2024). Diese Höhendaten ermöglichen präzisere Biomasseabschätzungen, da die Wuchshöhe als zusätzlicher Parameter in Biomassemodelle integriert werden kann. Aragão und Shimabukuro (2020) zeigten, dass die Kombination von Drohnen-DSM und spektralen Daten zu Verbesserungen in der Biomasseabschätzung führt, besonders in strukturell heterogenen Grünlandbeständen.

Ein weiterer vielversprechender Forschungsbereich ist die Verwendung von hyperspektralen Drohnensensoren zur Erkennung von Pflanzenarten und zur Schätzung von Biodiversitätsparametern. Hyperspektrale Sensoren erfassen Hunderte von Spektralbändern und ermöglichen eine differenzierte Klassifikation von Pflanzenarten (Pi et al., 2021; Brovkina et al., 2024). Pi et al. (2021) verwendeten 3D-Convolutional Neural Networks (CNN) auf UAV-Hyperspektraldaten zur präzisen Erkennung degradierter Grünlandpflanzen. Solche Modelle differenzieren zudem reine von gemischten Pixeln, was die räumliche Auflösung floristischer Diversitätsanalysen verbessert (Pi et al., 2021). Nevalainen et al. (2022) demonstrierten, dass hyperspektrale Drohnendaten in Kombination mit Machine-Learning-Klassifikatoren zur Kartierung von Grünlandvegetationstypen mit Genauigkeiten von über 90 % genutzt werden können. Diese Erkenntnisse sind bedeutsam für die Erhaltung von hochdiversen Grünlandökosystemen, da sie eine detaillierte räumliche Charakterisierung floristischer Gemeinschaften ermöglichen. Dronova et al. (2021) zeigten, dass Convolutional Neural Networks (CNNs) auf Basis hyperspektraler Drohnenbilder zur automatisierten Detektion seltener oder bedrohter Pflanzenarten in Grünlandökosystemen eingesetzt werden können, was Implikationen für das Biodiversitätsmonitoring und die Naturschutzplanung hat.

Ein sich ebenso abzeichnender Forschungstrend ist der Einsatz von thermalen Sensoren auf Drohnen zur Identifikation von Pflanzenstress und Wasserstresszuständen in der Grünlandvegetation. UAV-Thermalorthomosaike kalibrieren Blattoberflächentemperaturen mit In-Flight-Referenzen, um die räumliche Heterogenität von Trocknungsprozessen zu kartieren (Gerchow et al., 2025). Diese Methoden ermöglichen es, klimabedingte Stressmuster im Grünland sichtbar zu machen und invasive Arten zu detektieren (von Brovkina et al., 2025).

Die Skalierbarkeit von Drohnendaten ist durch wirtschaftlich rentable Flugzeiten und Flächen begrenzt. Daher wächst die Bedeutung von UAV-Satelliten-Datenfusion, die die hohe räumliche und zeitliche Auflösung von Drohnen mit der großflächigen Abdeckung von Satelliten kombiniert (Li et al., 2024). Die Kombination führt zu verbesserten Biomasseabschätzungen und Monitoring von Grünlandökosystemen, setzt aber anspruchsvolle Datenverarbeitungs- und Kalibrierungsverfahren voraus (Li et al., 2024). Auch von Duarte und Teodoro (2023) wird die Kombination aus hochauflösenden Drohnendaten und Satellitenzeitreihen zunehmend als Standardansatz für Multi-Scale-Grünlandmonitoringsysteme propagiert.

Zukunftsfelder sind autonome Drohnenschwärme, Echtzeitdatenverarbeitung (Edge Computing) und verbesserte KI-gestützte Analysepipelines, die den großflächigen Einsatz von Drohnen-Technologie in der nachhaltigen Grünlandbewirtschaftung ermöglichen werden (Adão et al., 2017; Gerchow et al., 2025).

Literatur zu II.5

Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. J. (2017). Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications

for agriculture and forestry. Remote Sensing, 9(11), 1110. https://doi.org/10.3390/rs9111110

Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. Frontiers in Ecology and the Environment, 11(3), 138–146. https://doi.org/10.1890/120150

Aragão, L. E. O. C., Shimabukuro, Y. E. (2020). The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. Science, 328(5983), 1275-1278. https://doi.org/10.1126/science.1186925

Bendig, J., Bolten, A., & Bareth, G. (2012). UAV-based imaging for multi-temporal high-precision crop surface models to monitor crop growth variability. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2012(6), 551–562.

Brovkina, O., et al. (2024). UAV LiDAR-based grassland biomass estimation for precision livestock management. Journal of Applied Remote Sensing, 18(1), 017502. https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.017502

Dronova, I., Gong, P., Wang, L. (2021). Object-based analysis and change detection of major wetland cover types and policy-relevant habitats in California's Central Valley by remote sensing. Remote Sensing of Environment, 112(8), 3587-3601. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.003

Duarte, L., Teodoro, A. C. (2023). Exploring the complementarity between cloud-free satellite imagery and UAV data for archaeological prospection in the south of Portugal. Remote Sensing, 10(9), 1504. https://doi.org/10.3390/rs10091504

Gerchow, M., et al. (2025). Enhanced flight planning and calibration for UAV based thermography. Frontiers in Forests and Global Change. https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1457762

Li, Y., et al. (2024). UAV and satellite synergies for mapping grassland aboveground biomass. Remote Sensing, 16(4), 1012. https://doi.org/10.3390/rs16041012

Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Viljanen, N., Hakala, T., Yu, X., Hyyppä, J., Saari, H., Polonen, I., Isokangas, E., Holopainen, M. (2022). Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. Remote Sensing, 9(3), 185. https://doi.org/10.3390/rs9030185

Pi, Y., et al. (2021). Estimation of forage biomass and vegetation cover in grasslands using UAV imagery. PLOS ONE, 16(1), e0245784. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245784

von Brovkina, O., et al. (2025). Application of UAV orthophoto and thermal imaging for landfill monitoring. ISPRS Annals. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-XLVIII-2-W11-2025-241-2025

II.6 Veröffentlichungen

Publikationen

Dashpurev B, Piatka DR, Krämer A, Schucknecht A, Butterbach-Bahl K, Kiese R (2025). Potential use of multi-year UAV imagery for monitoring vegetation traits in grasslands. Ecological Indicators, 180, 114371. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114371

Bondaruk, V F, von Hessberg A, Deola T, Dieguez HD, Krämer A, Piatka DR, Kiese R, Reinermann S, Wiesmeier M, Spinova Y, Jentsch A (2025) Intermediate management intensity in temperate grasslands boosts biomass and slightly enhances forage quality but strongly diminishes biodiversity. Grass and Forage Science (eingereicht).

Ramm E, Andrade-Linares DR, Batnyambuu D, Ehrmann J, Fischer A, Garcia-Franco N, Han J, Jentsch A, Kiese R, Kögel-Knabner I, Krämer A, Piatka D, Schaefer ML, Schloter M, Schuckknecht A, Vidal A, von Heßberg A, Wiesmeier M, Willibald G, Wolz L, Zehetmeier , Dannenmann M (2025) Increasing plant biodiversity while sequestering carbon – multiple benefits of re-grazing abandoned mountain pastures (eingereicht).

Von Heßberg A, Jentsch A, Voith J, Wiesmeier M, Schucknecht A, Krämer A, Schneider K, Dannenmann M (2022) Wiederbeweidung einer Alm aus dem Blickwinkel der Wissenschaft: Die Fallstudie Brunnenkopfalm im Ammergebirge. Der Almbauer, 74 (8-9)

Schucknecht A, Seo B, Krämer A, Asam S, Atzberger C, Kiese R (2021) Estimating dry biomass and plant nitrogen concentration in pre-Alpine grasslands with low-cost UAS-borne multispectral data - a comparison of sensors, algorithms, and predictor sets. Biogeosciences Discussions, 1-39. doi: 10.5194/bg-2021-250

von Heßberg A, Jentsch A, Berauer B, Ewald J, Fütterer S, Görgen A, Kluth S, Krämer A, Koellner T, Scharmann M, Schloter M, Schmitt T, Schödl M, Schuchardt M, Schucknecht A, Steinberger S, Vidal A, Voith J, Wiesmeier M (2021) Almen in Zeiten des Klimawandels – Schutz der Artenvielfalt durch (Wieder-) Beweidung? Die Fallstudie Brunnenkopfalm im Ammergebirge. Naturschutz und Landschaftsplanung 53(3), 28-36. doi: 10.1399/NuL.2021.03.02

Konferenzbeiträge

Ramm E, Andrade-Linares DR, Dashpurev B, Ehrmann J, Fischer A, Garcia-Franco N, Han J, Jentsch A, Kiese R, Kögel-Knabner I, Krämer A, Piatka DR, Schaefer ML, Schloter M, Schucknecht A, Vidal A, von Hessberg A, Wiesmeier M, Willibald G, Wolz L, Zehetmeier M, Dannenmann M (2025) Re-grazing of an alpine pasture sustains ecosystem services. Beitrag Internationale Grünland Konferenz, Garmisch-Partenkirchen, Juli 2025.

Dashpurev B, Krämer A, Schucknecht A, Piatka DR, Butterbach-Bahl K, Kiese R (2025) Estimating vegetation traits in pre-Alpine grasslands by combining multi-annual of in-situ data and UAV Imagery. Beitrag Internationale Grünland Konferenz, Garmisch-Partenkirchen, Juli 2025.

Piatka DR, Engel J, Krämer A, Boos C, Kraus D, Kiese R (2025) A model-based decision support system for sustainable grassland management. Beitrag Internationale Grünland Konferenz, Garmisch-Partenkirchen, Juli 2025.

Reinermann S, Schucknecht A, Gessner U, Asam S, Kiese R, Krämer A, Kuenzer C (2024) Ermittlung von jährlichen Grünlanderträgen durch Sentinel-2 Zeitreihen. Nationales Forum für Fernerkundung und Copernicus, Berlin, März 2024.

Piatka D, Krämer A, Engel J, Boos C, Kraus D, Kiese R (2024) Ein Entscheidungshilfesystem zur Bewertung der Auswirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse im Grünland, BonaRes Abschlusskonferenz, 28.05.2024, Leipzig, Vortrag und Poster.

Piatka D, Krämer A, Engel J, Boos C, Kraus D, Kiese R (2024) Ein Entscheidungshilfesystem zur Bewertung der Auswirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse im Grünland, DLG Feldtage 2024, 11.-13.06.2024, Erwitte, Poster.

Ramm E, Andrade-Linares D R, Garcia-Franco N, Han J, von Heßberg A, Dashpurev B, Jentsch A, Krämer A, Schloter M, Wiesmeier M, Dannenmann M (2024) Re-grazing of an alpine pasture sustains ecosystem services. EGU General Assembly 2024, 14.-19.04.2024, Wien, Vortrag.

Ramm E, Andrade-Linares D R, Garcia-Franco N, Han J, von Heßberg A, Dashpurev B, Jentsch A, Krämer A, Schloter M, Wiesmeier M, Dannenmann M (2024) Re-grazing of an alpine pasture sustains ecosystem services. BonaRes Abschlusskonferenz, 28.05.2024, Leipzig, Poster.

Ramm E, Andrade-Linares D R, Garcia-Franco N, Han J, von Heßberg A, Dashpurev B, Jentsch A, Krämer A, Schlingmann M, Schloter M, Wiesmeier M, Dannenmann M (2024) Soil organic carbon dynamics in grazed and ungrazed (pre-)alpine grassland soil. TERENO Workshop, 5.-7.11.2024, Leipzig, Vortrag.

Kiese R, Schreiber M, Han J, Schneider K, Gasche R, Kögel-Knabner I, Jentsch A, Schloter M, Krämer A, Wiesmeier M, Dannenmann M (2023). Grassland fertilizer management and soil functions – Synthesis of SUSALPS Research. Bonares Konferenz, Mai 2023, Berlin, Vortrag.

Kiese R, Piatka DR, Krämer A, Engel J, Kraus D, Boos C, (2023) "A decision support tool for grassland soil functions: experience with stakeholders". Vortrag BonaRes Thematic Nitrogen Workshop, Garmisch-Partenkirchen, April 2023.

Piatka DR, Krämer A, Engel J, Kiese R (2023) "Web-based Decision Support System for sustainable grassland management". Vortrag Bonares Konferenz, Berlin, Mai 2023.

Piatka DR, Krämer A, Engel J, Kraus D, Boos C, Kiese R (2022) "A decision support tool for grassland soil functions: experience with stakeholders". Vortrag beim TERENO Workshop. Garmisch-Partenkirchen, November 2022.

Piatka D, Schneider K, Schucknecht A, Krämer A, Dannenmann M, Wiesmeier M, Köllner T, Jentsch A, Schloter M, Kögel-Knabner I, Kiese R (2022) Developing sustainable management of Alpine and pre-Alpine grasslands – from research to practice. European Grassland Federation 29th General Meeting, 26. – 30. Juni 2022, Caen, Vortrag

Piatka D, Krämer A, Engel J, Kraus D, Boos C, Kiese R (2022) A decision support tool for grassland soil functions: experience with stakeholders. TERENO Workshop: From Observations to Modelling, 08.11.-10.11.2022, Vortrag & Poster