



Gefördert durch den
Innovationsfonds
Klima- und Wasserschutz

badenova
Energie. Tag für Tag

Abschlussbericht Humus-Sensing

Projekt Nummer 2022-10

Projekttitel: Remote-Sensing als Instrument für regionales Humusaufbau-Monitoring

Kurztitel: Humus-Sensing

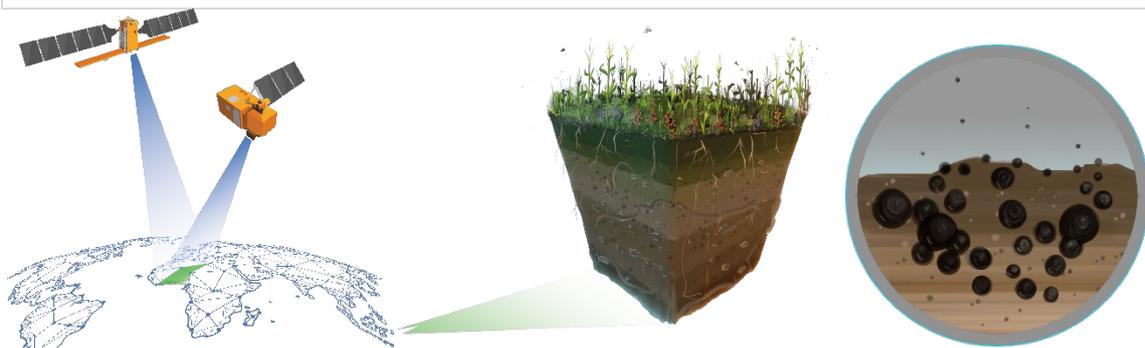
Projektträger: CO2-Land e.V.

Projektpartner: SmartCloudFarming GmbH, GIT HydroS Consult GmbH

Laufzeit: 2022 - 2024

Projektleiter: Michael Schwegler

Autoren: Michael Schwegler, Dr. Karl Müller-Sämman, Stephen Schrempp,
Staufen i.Br., Januar 2025



1 Inhalt

2	Projektüberblick.....	3
2.1	Ausgangslage.....	3
2.2	Ziele	4
2.3	Herausforderungen, Chancen und Risiken des Vorhabens.....	4
3	Projektbeschreibung	5
3.1	Projekttablauf.....	5
3.1.1	Arbeitspakete	5
3.1.2	Finanzierungsplan	7
3.2	Umsetzung Arbeitspakete	7
3.2.1	AP1: Mobilisierung Landwirte	7
3.2.2	AP2: Beratung und Vereinbarung	8
3.2.3	AP3: Datenmanagement	8
3.2.4	AP4: Bodenprobepfanung	12
3.2.5	AP5: Bodenprobenkampagne	13
3.2.6	AP6: Kalibrierung.....	17
3.2.7	AP7: Übertragung und Vorhersage	19
3.2.8	AP8: Auswertung.....	21
3.2.9	AP9: Projektleitung.....	25
4	Zusammenfassung/Fazit	26
4.1	Anwendung für das CO ₂ -Land Programm	26
4.2	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit.....	29
5	Projekterkenntnisse	31
6	Anlagen	32

2 Projektüberblick

2.1 Ausgangslage

In dem Vorgängerprojekt „CO₂-Land“ haben sich entscheidende Chancen und Herausforderungen für das Projekt Klimaschutz durch Humusaufbau herauskristallisiert. Neben dem Aufbau eines Standards für Klimazertifikate aus dem Humusaufbau, welcher in einem separaten Projekt des Vereins mit Fördermitteln aus der Industrie bereits bearbeitet wurde, sind das Monitoring und die Quantifizierung der Speicherleistung von organischem Kohlenstoff (Corg) im Boden von zentraler Bedeutung. Das Monitoring geschieht aktuell durch wiederholte Bodenprobenahmen und -Analysen und ist mit einem großen logistischen Aufwand und hohen Kosten verbunden. Darum sollte das Monitoring durch innovative Vorhersagemodelle und Diagnoseinstrumente ergänzt und teilweise ersetzt werden.

Hierzu bieten sich neben der ebenfalls datenaufwendigen Modellierung der Humusdynamik Fernerkundungsverfahren (sogenannte Remote-Sensing Technologien) an. Sie haben ein großes Potenzial, um großräumlich und kostengünstig über Satelliten Daten in der Fläche zu erfassen und über Algorithmen mit Informationen aus mehreren Spektralbereichen und Röntgenstrahlung präzise Aussagen zu Bodeneigenschaften und zur Flächennutzung zu liefern.

Projektpartner Remote-Sensing: Smart Cloud Farming GmbH (SCF)

Die SmartCloudFarming GmbH wurde 2019 als Projekt von drei Hochschulabsolventen in Berlin/Deutschland ins Leben gerufen. Ihr Ziel: die Erdbeobachtung zu nutzen, um die Landwirtschaft produktiv, widerstandsfähig und nachhaltig zu machen. In den Anfangsmonaten der Tätigkeit dieses Start-up Unternehmens ergaben sich immer wieder neue Fragen und Herausforderungen und das Unternehmen fokussierte sich schließlich auf die Themen Bodengesundheit und Produktivität.

Während dieser herausfordernden Zeit brachte Michele Bandecchi SmartCloudFarming voran, indem er ein neues Team aufbaute, für Sichtbarkeit sorgte und in den renommierten Copernicus Incubator aufgenommen wurde. Im Jahr 2019 wurde SmartCloudFarming von der Indigo AG als einer von drei europäischen Halbfinalisten für die globale Terraton Challenge ausgewählt. Heute wird das neue und wachsende Team von SmartCloudFarming von einem internationalen Team aus spezialisierten Mitarbeitern und erfahrenen Mentoren unterstützt.

Projektpartner Datenmanagement: GIT HydroS Consult

GIT HydroS Consult mit Sitz in Freiburg ist bereits seit 18 Jahren GE Solutions-Provider für wasserwirtschaftliche Fachanwendungen auf Basis von Smallworld GIS des Herstellers General Electric Digital (GE Digital) und verfügt als Fachbüro für angewandte Hydrologie und Hydrogeologie u.a. auch über langjährige Erfahrung im Bereich der Modellentwicklung und Modellierung unterschiedlicher hydrologischer Systeme (Bodenwasser, Grundwasser, Agrarökosysteme Boden-Pflanze).

2.2 Ziele

Primäres Ziel des Projekts ist die Prüfung der Möglichkeiten der Nutzung von Fernerkundungstechnologie für die flächenhafte Etablierung einer klimafreundlichen und nachhaltigeren Landnutzung. Dabei können *Remote-Sensing* Verfahren zum Beispiel dabei helfen Kosten des Humusmonitorings als Nachweis für die Einlagerung von CO₂ in die Böden zu reduzieren. Mit den eingesparten Mitteln blieben dann in einem *Carbon Farming* Projekt mehr Mittel zur Honorierung der Senkenleistung für teilnehmende Betriebe verfügbar. Die Möglichkeiten zur Schaffung eines spürbaren finanziellen Anreizes für den Humusaufbau und damit für die Teilnahme an Programmen zur klimafreundlichen Bewirtschaftung würden dadurch befördert. Die Gewinnung von Kunden, die diese Leistungen durch den Kauf von Zertifikaten honorieren, würde durch geringere Nachweiskosten ebenfalls erleichtert, denn die Mittel für Klimaschutz durch Humusaufbau könnten noch effektiver eingesetzt werden.

Konkret erreicht werden soll dies durch das in diesem Projekt formulierte Ziel ein kostengünstiges Fernerkundungswerkzeug für das Humusmonitoring zu schaffen. Es sollte nach Möglichkeit, - ergänzt mit stichprobenhaften Realmessungen- kostengünstig und transparent für Landwirte und Käufer von Zertifikaten flächengenau Auskunft geben über die Wirkung der pflanzenbaulichen Nutzungshistorie und die Entwicklung der Humusgehalte im Boden.

Sekundäres Projektziel und operatives Rückgrat für die praktische Nutzung der Fernerkundungsdaten ist die parallel verlaufende Entwicklung und Realisierung einer zentralen Fachanwendung „CO₂-Land DBMS“ oder des „CO₂-Land Monitor“ für ein optimiertes Datenmanagement mit Unterstützung der wichtigsten Prozesse; der Erfassung und Kommunikation der gewonnenen Daten für Planung, Analyse, Berichte und Registratur.

2.3 Herausforderungen, Chancen und Risiken des Vorhabens

Remote-Sensing (RS) zum Monitoring von Bodeneigenschaften war zu Beginn des Projektes noch in den Kinderschuhen. Inzwischen setzte eine dynamische Entwicklung ein, die viele *Start-ups* hervorgebracht hat, die ein Monitoring für Pflanzenbau und Boden in Pilotvorhaben durchführen. Wo noch große Unsicherheiten bestehen, ist die Genauigkeit von RS speziell für den Bodenkohlenstoff. Weitere Herausforderungen ergeben aus der Datenbeschaffung zur Kalibrierung der Algorithmen. Hierzu braucht es große Datensätze mit Humuswerten, die zum Trainieren der Modelle und Algorithmen eingespeist werden müssen.

Drei Erwartungen wurden zum Projektbeginn aufgestellt:

- Das RS liefert direkte Werte zum Bodenkohlenstoff und kann Bodenproben ersetzen. Dies setzt sehr präzise Daten voraus.
- Das RS liefert rückwirkende Daten zur Entwicklung der Bodendynamik. Daraus können aus der jüngeren Nutzungshistorie Bewirtschaftungspraktiken in Hinblick darauf bewertet werden, inwieweit sie zum Humusaufbau bzw. zum Humusabbau beitragen.
- Das RS liefert eine flächenhafte Darstellung vom Humuszustand und kann dazu genutzt werden einheitliche Bodencluster zu identifizieren und den Aufwand für eine repräsentative Beprobung der Flächen zu reduzieren.

3 Projektbeschreibung

3.1 Projektablauf

3.1.1 Arbeitspakete

Arbeitspaket	Beschreibung	Ergebnis /Dokumentation
1 Mobilisierung Landwirte	Mobilisierung von Flächen und Landwirte für das Klimaprogramm mit 300 ha und ca. 15 landwirtschaftlichen Betrieben. Diese Betriebe nehmen neben dem Klimaprogramm zusätzlich an dem Kalibrierungs- und Validierungsprogramm zum RS teil. Räumlicher Schwerpunkt soll der Oberrheingraben sein mit Flächen in Wasserschutzgebieten.	Stand Mai 2024: 29 Betriebe mit einer teilnehmenden Fläche von 2040 ha
2 Beratung und Vereinbarung	Bei den teilnehmenden Betrieben findet ein Hofgespräch statt. Hofgespräche sind ein Beratungsdialog und führen die Kenntnisse der Betriebe und Detailwissen von CO ₂ -Land e.V. zusammen und münden in eine verpflichtende Vereinbarung zur Umsetzung humusfördernder Maßnahmen im Betrieb.	Mind. 29 Beratungen und Vereinbarungen wurden durchgeführt
3 Datenmanagement	3.1 Die transparente Verarbeitung und Verwaltung aller -im Rahmen einer regionalen Klimakooperation erforderlichen Informationen erfordert ein dauerhaftes, umfassendes, transparentes und effizientes, digitales Geodaten-Management und -Auskunftssystem mit einer kompletten	„CO ₂ -Monitor“ eingerichtet

	<p>Historienverwaltung. Dies bezieht sich auf alle in Raum- und Zeitbezug durchgeführten Maßnahmen zur Speicherung von CO₂ durch landwirtschaftliche Bewirtschaftung.</p> <p>3.2 Aufbau landwirtschaftliches Geoinformationssystem (GIS) mit Basisdaten (z.B. Bodenkarten, Flurkarten), mit den erforderlichen hinterlegten Sach- und Fachkatalogen (CO₂-Land DBMS)</p>	
4 Bodenprobeplanung	Bodenprobekampagne für 300 ha planen, 2 Kampagnen: 1. Herbst 2022, 2. Frühjahr 2023	März 2023: 166 Proben
5 Bodenprobe-kampagne	GIS verortete Bodenprobeentnahme und Analyse wird von externen Dienstleistern durchgeführt und an ein zertifiziertes Labor vergeben. Untersuchungsparameter sind: Corg, Bodentextur und Grund-nährstoffe (NPK).	166 Bodenproben für die Kalibrierung, 41 Bodenproben für den Blind-test
6 Kalibrierung	Kalibrierung mit boden-echten Daten zum organischen Kohlenstoff im Boden, Erfassung, Verarbeitung und Analyse von Satellitendaten, Produktion der visuellen Ausgabe: Bodenkarten Corg im Dateiformat und optional in einem digitalen Front-End-Interface (Visualisierungstool)	Juni 2023, AP6 Calibration Report SCF_06_2023
7 Übertragung und Vorhersage	Die Humuswerte (Corg-Gehalt) der letzte fünf Jahre vor Kampagne werden über das aktuell kalibrierte und validierte Bodenhumus Monitoring und Erkennungsmodell generiert und CO ₂ -Land zur Verfügung gestellt als alphanumerische Werte (Zeitreihen) jeweils mit Raumbezug	April 2024, AP7 Übertragung und Vorhersage SCF_04_2024

8 Auswertung Vorhersage	Daten aus RS werden ausgewertet und mit erfasster Feld-Historie bzw. der daraus abgeleiteten rückwärts gerichteten Prognose auf Basis Erwartungswerte für Maßnahmen und ggf. vereinzelt erhobenen Humusuntersuchungen verglichen	Abschlussbericht 3.2.8
9 Projektleitung	Sicherstellung, dass alle Arbeitspaket abgearbeitet werden, Sicherstellung Kommunikation zwischen Projektpartner und externen Dienstleistern, Sicherstellung von Datenaustausch, Sicherstellung von Einhaltung des Budgetplans	Abschlussbericht 3.2.9

3.1.2 Finanzierungsplan

	Im Jahr 2022	2023	2024	Gesamt-betrag	Förderbeitra-g-badenova
Personal-kosten	83.973,33	125.960,00	41.986,67	251.920,00	122.788,00
Kommuni-kation / Öffentlich-keit sarbeit (kleiner Anteil bei AP9 enthalten)					
Sachkosten	24.167,00	19.750,00	3.083,00	47.000,00	22.850,00
Gesamt-ausgaben	108.140,33	145.710,00	45.069,67	298.920,00	145.638,00

3.2 Umsetzung Arbeitspakete

3.2.1 AP1: Mobilisierung Landwirte

Parallel zur der Projektdurchführung ist auch das CO₂-Land Programm dynamisch gewachsen und die geplante Mobilisierung von Betrieben konnte umgesetzt werden. Das Programm arbeitete dabei auch überregional mit Partnern zusammen und es sind bisher 5 regionale Cluster entstanden.

Insgesamt konnten bis zum Frühjahr 2024 29 Betriebe mit einer teilnehmenden Fläche von 2040 ha mobilisiert werden. Davon sind 9 Betriebe am Oberrhein mit einer Fläche von 758 ha.

Tabelle 1: Für das Klimahumusprogramm mobilisierte Betriebe. Die Betriebe sind als regionale *Cluster* organisiert, was den fachlichen Austausch und die Sichtbarkeit in den Regionen befördert.

Cluster	Fläche (ha)	Anzahl Betriebe
Südbaden und Ba-Wü.	894	11
Bodensee	387	6
Niederrhein	415	4
Nordhessen	278	6
CH-Thurgau	66	2
Summe	2040	29

3.2.2 AP2: Beratung und Vereinbarung

Im Rahmen eines individuellen Hofgesprächs wurde ein Fruchtfolge- und Maßnahmenplan mit den Betrieben und durch eine Vereinbarung rechtlich die Teilnahme am Programm beschlossen. Bei allen unter AP1 genannten Betrieben konnten Hofgespräche geführt und Vereinbarungen zur Teilnahme am Programm abgeschlossen werden. Für die Cluster Nordhessen und Thurgau (CH) wurden gesonderte Vereinbarungen getroffen.

Zu Beginn des Projekts, im Frühjahr 2022 konnten auf 3 Betrieben auf 210 ha Fläche die initialen Bodenproben zur Bestimmung der Ausgangssituation entnommen werden. Bis zum Jahresende konnte die Programmfläche auf 7 Betriebe mit 436 ha ausgeweitet werden.

Da aufgrund des Klimawandels mit langen warmen Herbsttagen die Humuswerte im Oberboden im Herbst 2022 noch stark vom Pflanzenwachstum und relativ kurzlebigen Kohlenstoffverbindungen im Oberboden geprägt waren, musste bei einigen Betrieben die Bodenprobenahme im Spätherbst auf Anfang 2023 geplant werden, um zuverlässige Humuswerte bestimmen zu können.

3.2.3 AP3: Datenmanagement

Für das Datenmanagement im Projekt *Humus-Sensing* wurde der *CO₂-Land Monitor* entwickelt. Im Humus-Monitoring unterstützt der *CO₂-Land Monitor* mit seinem Entwicklerteam die landwirtschaftlichen Berater und die teilnehmenden Betriebe bei ihren Projektaufgaben. Alle im Monitoring inbegriffenen Prozessabfolgen und Rechenvorschriften sind im *CO₂-Land Programm* definiert, das parallel zum *Humus-Sensing* Projekt validiert und zertifiziert wurde.

Der *CO₂-Land Monitor* ist eine Weiterentwicklung der bewehrten und lizenzierten Smallworld Fachanwendung „Kooperationsmanagement Landwirtschaft“, kurz Agrar. Im Kontext der in Abbildung 1 dargestellten *CO₂-Land Software* Architektur, steht der *CO₂-Land Monitor* im Zentrum. Alle Daten aus dem Programm und Monitoring werden über eine Web-Plattform erfasst, bearbeitet und qualitätsgesichert in die Smallworld Agrar Fachschale geschrieben. Dem angefügt ist der *CO₂-Land Verkauf* für den Vertrieb und die Auszahlung der Humusaufbauleistung, der in den teilnehmenden Betrieben erzielt wurde.

CO₂-Land Software Architektur Weiterentwicklung aus Smallworld Agrar Fachschale

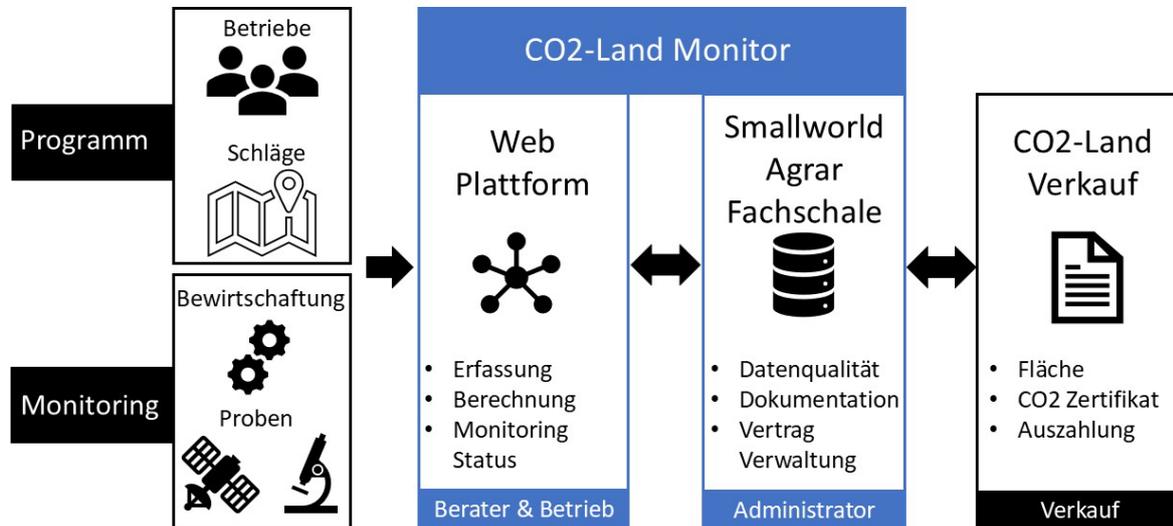


Abbildung 1: Die CO₂-Land Architektur umfasst (1) die Webplattform, (2) die Smallworld Agrar Fachschale und (3) den CO₂-Land Verkauf. Alle drei Anwendungen sind auf die Benutzergruppen (1) Berater & Betrieb, (2) Administrator und (3) Verkauf zugeschnitten.

Die Projektaufgaben im *Humus-Sensing* und das Humusmonitoring im *Co₂-Land Programm* wurden durch den *CO₂-Land Monitor* mit Entwicklerteam unterstützt. Die Hauptfunktionen des *CO₂-Land Monitor* und ihre Anwendung fasst Tabelle 1 zusammen. Im Folgenden sind die Hauptfunktionen und ihre Anwendung im Projekt jeweils in einem Absatz beschrieben.

Zu Erfassung und Bearbeitung ist der aktuelle Monitoring Status mit offenen und abgeschlossenen Aufgaben für den gesamten Projektzeitraum einsehbar und prozessgesteuert abzarbeiten. Dafür zeigt Abbildung 2 die moderne Nutzeroberfläche. Automatische Arbeitsberichte sind auf Grundlage der Datenbank angelegt und für das Arbeitsmanagement abrufbar. Landwirtschaftliche Berater und Betriebe behalten damit den Überblick im Projektmanagement. In der Betriebserfassung der teilnehmenden Landwirte, können alle wesentlichen Betriebsdaten hochgeladen werden. Dafür wurden Schnittstellen zu den öffentlichen Antragsplattformen der Landwirtschaftsverwaltung wie zum Beispiel FIONA in Baden-Württemberg oder ELAN (in NRW) eingerichtet. In diesen Plattformen liegt die jährliche Bewirtschaftung auf den Betriebsfläche bereits gebündelt vor. Darauf aufbauend kann der landwirtschaftliche Berater prozessgestützt und datenbasiert die Beratung der Humusmaßnahmen planen und anlegen und die durchgeführten Humusmaßnahmen beim Landwirt jährlich abfragen. Als Beispiel für die Nutzeroberfläche in der Erfassung, zeigt Abbildung 3 die Erfassung der jährlichen Bewirtschaftung.

Bodenproben liefern den gemessenen Nachweis für den Humusaufbau. Dafür müssen auf der Betriebsfläche geeignete, repräsentative Schläge ausgewählt und an den Probenehmer mit Methodik und digitalen Raumdaten beauftragt werden. Die Ergebnisse werden in die Datenbank

qualitätsgesichert zurückgeführt und in den Bodenkohlenstoffvorrat umgerechnet. Bei Betriebsflächen bis zu 200 ha macht es erst die Software möglich, durch Standardisierung und Semi-Automatisierung die Bodenbeprobung effizient zu bearbeiten.

Sind alle Daten aus Programm, Bewirtschaftung und Bodenproben erfasst, erfolgt die Berechnung des Humusaufbaus und die draus resultierenden vermiedenen und entzogenen CO₂ Mengen. Der Verkauf von Humusfläche (Ackerflächen auf denen zusätzliche Maßnahmen zum Humusaufbau realisiert werden) oder CO₂ Äquivalente (im Bodenumus festgelegte CO₂ Senkenleistung) bilden die Grundlage für die finanzielle Unterstützung der Betriebe bei Umsetzung spezieller Maßnahmen zum Humusaufbau.

Tabelle 2: Beschreibung und Anwendung der Hauptfunktionen des CO₂-Land Monitors

Kategorie	Hauptfunktionen des CO ₂ -Land Monitor	Umgesetzte Projektaufgaben in	
		Humus-Sensing	CO ₂ - Land Programm
Projekt-management	Monitoring Aufgaben Status	Übersicht zu den aktuellen Aufgaben und dem jeweiligen Bearbeitungsstatus in unterschiedlichen Wirtschaftsjahren und Betrieben. Zusammenfassung und Visualisierung der Ergebnisse für Berichtspflichten.	
	Automatische Berichte		
Betriebserfassung	Humusmaßnahmen Beratung	-	Anhand von Fruchtfolgen, Böden und Betriebsausstattung für Betriebe spezifische Maßnahmen zum Humusaufbau beraten
	Jährliche Erfassung der FlächenbewirtschaftungsB	Jährliche Betriebsdaten für die statistische Auswertung der Humus Sensing Ergebnisse	Dokumentationspflicht im Monitoring des Humusaufbaus
	Vertragsschläge für Humusmonitoring Auswahl	-	Grundlage für den vertraglichen Humusaufbau
Bodenproben	Beprobungsschläge Auswahl	Bodenproben sind die Grundlage zur Bestimmung des Bodenkohlenstoffvorrats. Die Beauftragung der Bodenproben erfordert die Zusammenführung von Betriebs- und Bodendaten, damit die Ergebnisse fachlich korrekt und effizient erzielt werden. Für Humus-Sensing sind es die Kalibrierung und Validierungsdaten und für das CO ₂ Land Programm der gemessene Leistungsnachweis.	
	Beprobungsauftrag Vergabe		
	Bodenproben Import und Prozessierung		
Humusaufbau	Humusaufbau Berechnung	-	Basierend auf den bestätigten Maßnahmen und den Bodenproben wird der Humusaufbau berechnet und in kg oder Tonnen CO ₂ Äquivalenten
	Berechnung und Verbuchung der CO ₂ -Leistung		

			als Senkenleistung ausgewiesen.
--	--	--	---------------------------------

Im Projektverlauf wurden die in Tabelle 2 dargestellten Datenbestände aufgebaut und zur finalen Auswertung des *Humus-Sensing* bereitgestellt. Das dafür benötigte Datenmanagement erfolgte über den *CO2-Land Monitor*, in dem die Aufgaben überwacht und abgearbeitet wurden. Die Anwendungsbetreuung des *CO2-Land Monitors* durch das Entwicklerteam stellt einen wesentlichen Projektanteil da. Im Projektverlauf ergaben sich neue Anforderungen, die in einer kontinuierlichen Weiterentwicklung eingebaut wurden. Zusammenfassend konnte mit dem *CO2-Land Monitor* eine digitale Datenmanagement Plattform aufgebaut werden, welche die Projektarbeit im *Humus-Sensing* mit großen Datenbeständen erst ermöglichte.

Tabelle 3: Datenbestand im CO2-Land Monitor für die Auswertung in Humus-Sensing

Datenbestand	Beschreibung
Betriebsdaten	Schlag Geometrien, Grundwassereinfluss, Höhenlage, Naturraum, Fruchtfolgen, Bodenbearbeitung, Betriebsausstattung
Bewirtschaftung	Hauptkulturen, Humusmaßnahmen zu Düngung, Bodenbearbeitung, Zwischenfrüchten und Untersaaten seit 2022 und davor als Business as usual Vorgehen des Landwirts
Bodenproben	Kohlenstoffgehalt, Humusqualität Kohlenstoffvorrat, Kohlenstoffsättigung, Bodenart, Steingehalt.
Boden-/Klimadaten	Ergänzungen aus der lizenzierten Smallworld Agrar Fachschale.

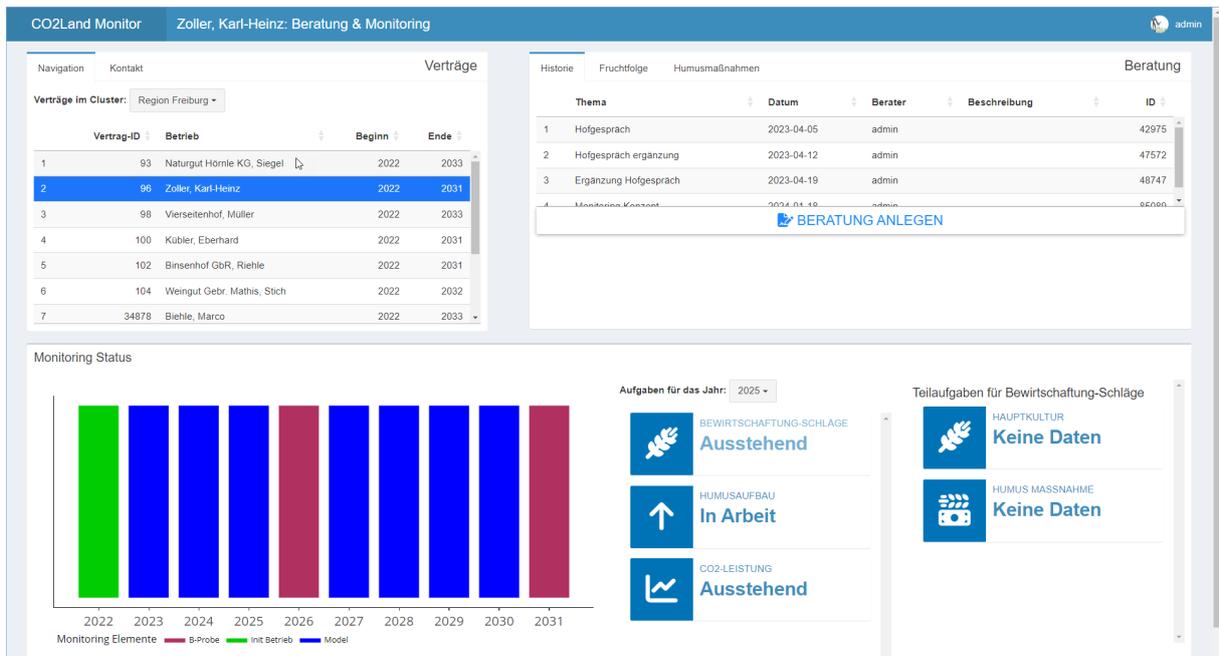


Abbildung 2: Moderne Nutzeroberfläche zur Aufgabenverwaltung im Monitoring.



CO₂Land Monitor Zoller, Karl-Heinz: Bewirtschaftungsschläge in Wirtschaftsjahr 2022

Kultur

Bewirtschaftungsschläge Gesamt

Schlagnummer	Name	Fläche [ha]	Status	Kultur
1	2 Bahlingen - Hecke	0.758	bestätigt	Winterweichweizen
2	2 Bahlingen Hecke Feldrand	0.048	bestätigt	Ackerrandstreifen
3	5 Bahlingen - Ried groß	1.04	bestätigt	Winterweichweizen
4	5 Bahlingen Ried Landschaftsel	0.016	bestätigt	Ackerrandstreifen
5	8 Forchheim - alter Sportplatz	0.307	bestätigt	Winterweichweizen

KONTEXT Rückgemeldete Bewirtschaftung für 2022

BETRIEBSFLÄCHE [HA] 72.7

KULTUR- / BETRIEBSFLÄCHE [HA] 72.7 / 72.7

Abbildung 3: Moderne Nutzeroberfläche für die Erfassung der jährlichen Bewirtschaftungen auf den landwirtschaftlichen Schlägen.

3.2.4 AP4: Bodenprobeplanung

Zunächst war die Datenerhebung (Bodenprobenahme) für die Kalibrierung des Modells zur Humus-Vorhersage auf Ende November 2022 geplant. Der Herbst 2022 war, wie bereits unter Punkt 3.2.2 erwähnt, gekennzeichnet durch ungewöhnliche Wärme und gute Wuchsbedingungen, - ideal für die Entwicklung der Zwischenfrucht-Kulturen; - jedoch nicht ideal für eine Bodenprobenahme. Die Humusdynamik (z. B. Wurzelausscheidungen mit kurzlebigen Kohlenstoffverbindungen) war sehr aktiv und die Werte waren damit nicht aussagekräftig für die Feststellung des initialen Dauerhumus-Niveaus, das als Ausgangswert benötigt wurde. Daher wurde die Messkampagne auf das zeitige Frühjahr 2023 verschoben, weil die flüchtigen Kohlenstoffverbindungen im zeitigen Frühjahr vom Boden weitgehend *verdaut* sind und bessere Bedingungen für Reproduktion vergleichbarer Messwerte gegeben sind.

Datengrundlage für Bodenprobenahme sind in Baden-Württemberg die Felddaten aus der FIONA-Datenbank des MLR Baden-Württemberg. Hieraus stellt der Betrieb über eine Exportfunktion die Geodaten (Shape-Dateien) und die dazugehörige Liste der Feldschläge (Bewirtschaftungseinheiten) zur Verfügung. Diese werden dann in die Geodatenbank des *CO₂-Land Monitor* eingepflegt. Die nachgelagerte Gruppierung der Betriebsflächen nach Lage und Größe bildet dann die Grundlage für eine repräsentative Bodenbeprobung. Dabei werden - in Abstimmung mit den Betriebsleitern- Kleinflächen mit vergleichbarer Bodengüte und Bewirtschaftung größeren Nachbarschlägen zugeordnet, um so die Probenzahl und den Aufwand auf das notwendige Maß zu begrenzen. Das auf diese Weise gewonnene Flächenkollektiv wurde dann als digitaler Geodatensatz an den Partner für Bodenbeprobungen übermittelt.

Anfang März 2023 sollte mit der Beprobung der Flächen durch den beauftragten Dienstleister begonnen werden. Dazu kam aus dem Raum Stuttgart ein Probennehmer der technisch in der Lage war, georeferenzierte Bodenproben von den Flächen zu nehmen. Leider wurde sein Fahrzeug gleich beim ersten Einsatz beschädigt, so dass der Probennehmer, der eine weite Anfahrt hatte, die

Kampagne abbrechen musste und daraufhin wegen langwieriger Reparaturen und Termindruck den Auftrag vollständig stornierte.

Infolgedessen musste das Projektteam umplanen und es wurde entschieden die Proben in Eigenregie händisch zu nehmen. Währenddessen hatte auch der Kooperationspartner SCF vorgeschlagen das Bodenprobe-Design zu ändern und im Interesse eines optimierten Datensatzes für die Kalibrierung von unserem Standardverfahren für die Probenahmen abzuweichen. Das geänderte Bodenprobe-Design orientierte sich nun an der Sentinel 2 Satellitentechnik und an der damit möglichen Auflösung. Viele Einzelbeobachtungen mit hoher Auflösung auf einer begrenzten Anzahl räumlich verstreuter Flächen sollten nun die Grundlage für die Kalibrierung des Modells liefern. Mit Hilfe von zwei Hilfskräften und einer geschulten GIS-Fachkraft konnte die Kampagne schließlich bei drei Betrieben, die im Projektgebiet liegen durchgeführt werden (Rheinebene südlich und nördlich von Freiburg und Schwarzwald, Vorberge bei Müllheim-Feldberg). Auf 43 ha Fläche wurden im April 2023 166 Proben entnommen. Die Kampagne orientierte sich an einer bereits erfolgten Bodenprobekampagne im Jahr 2021, wobei allerdings in Italien eine andere Labormethode (Walkley-Black) zur Anwendung kam, so dass die Werte nicht direkt verglichen werden konnten.

3.2.5 AP5: Bodenprobenkampagne

Nachfolgend sind das methodische Vorgehen bei der Beprobung und die Ergebnisse der Humusbeprobungen näher beschrieben und erläutert.

Beispiel für eine Flächenbeprobung mit dem hinterlegten Beprobungsdesign.

- a) Auswahl der Flächen aus dem digitalen Flurstückskataster (hier z.B. H 2850)

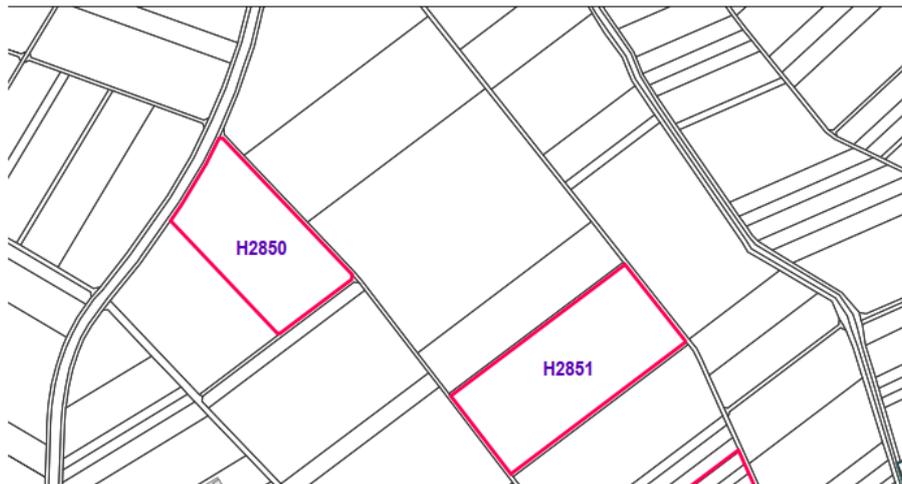


Abbildung 4: Auswahl der Flächen

- b) Verschnitt der Flächengeometrie mit dem durch die Fernerkundung vorgegebenen Raster (GRID) mit einer eindeutigen Raster ID und einer zentralen Punkt ID. An den jeweils zentralen Punkten wurden dann die Bodenproben genommen und die Geoposition überprüft und dokumentiert.

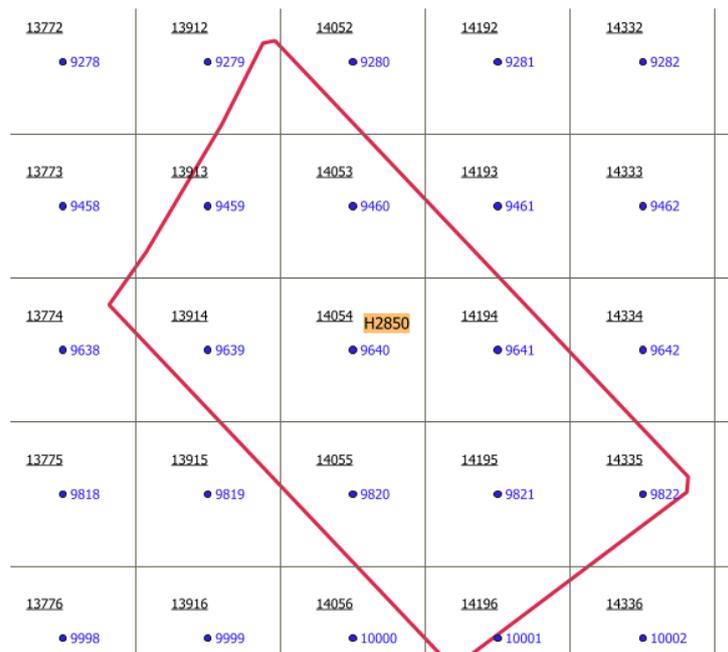


Abbildung 5: Schema zur Entnahme der Bodenproben für die Kalibrierung der Fernerkundungsdaten (Entnahmen jeweils um die blau markierten Zentralpunkte der Gitterkacheln).

Die Punkte zur Probenentnahme waren in einem GIS hinterlegt und wurden mit einer Abweichung kleiner als 5 cm mit einer Antenne mit DGPS einzeln angesteuert. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine solche Antenne mit zugeordnetem Tablet, auf dem die digitalen Karten hinterlegt sind.



Abbildung 6: GPS Antenne zur Auffindung der Geoposition der kartierten Messpunkte (links) und Entnahme der Bodenprobe in 0-30 cm Tiefe mit einem Pürckhauer Bohrstock (rechts).

Nachdem an jedem zentralen Gitterpunkt (blau in obiger Grafik) in allen vier Himmelsrichtungen (jeweils 10 Schritte vom zentralen Messpunkt entfernt-) eine Probe gezogen war, wurden die vier Proben in einem Eimer gemischt und zu einer repräsentativen Laborprobe zusammengefasst und in eine Kunststofftüte abgepackt (Abbildung unten). Diese wurde, um Fehler auszuschließen bzw. um durch eine Rekonstruktion des Vorgangs mögliche Fehler korrigieren zu können, im Feld mit der jeweiligen Grid-Nummer, der Punkt-ID und einer fortlaufenden Probennummer versehen (siehe Tabelle 4). Danach wurden die Proben in eine Kühlbox überführt, mit der sie zunächst in ein gekühltes Lager und danach ins Labor transportiert wurden.



Abbildung 7: Zusammenführung der vier Teilproben zu einer repräsentativen Punktprobe durch Vermischen im Probeneimer und anschließende Verpackung mit dreifacher Beschriftung.

Parallel zur Probenahme wurden alle Beprobungen in einem Feldprotokoll festgehalten. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung eines Ausschnitts aus der Tabelle der Protokollabschrift zu sehen.

Tabelle 4: Beispiel für einige Datensätze aus dem Feldprotokoll der Bodenbeprobung.

Gitter-ID / grid ID	Punkt - ID / point ID	Schlagnummer / plot number	cluster	Nutzung / use / state of Farmland	Anmerkung/ comment	date of soil sampling
6668	15707	2848	Biengen	black fallow		2023-03-16
6808	15708	2848	Biengen	black fallow		2023-03-16
6807	15528	2848	Biengen	black fallow		2023-03-16
6667	15527	2848	Biengen	black fallow		2023-03-16
15607	11991	2922	MENGEN	grass fallow newly planted		2023-03-29
15466	11810	2922	MENGEN	grass fallow newly planted		2023-03-29
15467	11990	2922	MENGEN	grass fallow newly planted		2023-03-29

Die Analyse der Bodenproben erfolgte in einem amtlich akkreditierten Labor für Humusuntersuchungen, dem Landwirtschaftlichen Bodenlabor der Familie Lehle GmbH in Laichingen-Machtolsheim.

Die Bodenproben wurden nach der Methode DIN 15936 (Elementaranalyse mit Trockenverbrennung) analysiert ¹⁾. Diese Methode stellt den aktuell empfohlenen Standard bei Humusuntersuchungen dar und wird deutschlandweit und auch in vielen Ländern der EU angeboten und verwendet. Bei der Ausführung kam das direkte Bestimmungsverfahren zur Anwendung bei dem die homogenisierten und gemahlene Proben zunächst angesäuert werden, um eventuell vorhandenen mineralischen Kohlenstoff (TIC) - wie etwa Ca-Carbonat- zu entfernen. Nachfolgend wird der verbliebene Gehalt an organischem Kohlenstoff (Corg) durch Trockenverbrennung und gaschromatografische Analyse des verbliebenen Kohlenstoffs (TC) als organischer Kohlenstoff gemessen.

TOC = TC (TIC wurde zuvor entfernt!)

Wie die in Anlage 1 vollständig wiedergegebenen Messergebnisse zeigen, lagen die gemessenen Corg Gehalte der durchgängig viehlos bewirtschafteten Betriebe bei mäßigen 1,03 % Corg. Das entsprach nach gängiger Umrechnung der Werte einem mittleren Humusgehalt von 1,8 %.

Aus mehreren Gründen war bei den Analysen auch die Frage von Interesse mit welcher Genauigkeit im Labor die Corg Gehalte bestimmt und reproduziert werden können und wie hoch der mittlere, methodisch bedingte Fehler bei der angewandten Laboranalysen ist.

Dazu wurden die Bodenproben jedes Messpunktes doppelt analysiert und die Ergebnisse miteinander verglichen (siehe dazu Auszug aus der Ergebnisliste in nachfolgender Abbildung und die Ergebnistabelle in Anlage 1).

Bodenbeprobung CO₂-Land Baden Pilot 2023

Nr.	grid ID	point ID	landuse / Zustand bei Beprobung	Corg % Analyse1	Corg % Analyse 2	Delta % Corg	Delta Corg(%) ABS
158	9205	13851	winter wheat	1,1441	1,1183	0,03	0,03
159	9089	15890	winter wheat	0,8871	0,8989	-0,01	0,01
160	9090	16070	winter wheat	1,1710	1,1825	-0,01	0,01
161	9995	16975	winter wheat	1,1108	1,1206	-0,01	0,01
162	10175	16976	winter wheat	1,1476	1,0207	0,13	0,13
163	10355	16977	winter wheat	1,0382	1,0326	0,01	0,01
164	10356	17157	winter wheat	0,9474	0,9398	0,01	0,01
165	10357	17337	winter wheat	0,7925	0,8614	-0,07	0,07
166	10536	17158	winter wheat	0,9089	0,9414	-0,03	0,03

Tabelle 5: Auszug aus Ergebnistabelle der Corg Laboruntersuchungen der Bodenproben 2023.

Der Vergleich der zwei Labormessreihen ergab über alle 166 Proben gemittelt den exakt gleichen Mittelwert. Das heißt für die Praxis, dass bei einer großen Zahl von beobachteten Flächen in der Regel mit einem zuverlässigen Ergebnis für die Gesamtheit der Flächen gerechnet werden kann.

Bei Betrachtung der einzelnen Flächen ergaben sich beim Vergleich der Messwerte jedoch im Einzelfall positive und negative Abweichungen, die durchaus relevant sind und die als analytisch bedingte Fehlerquelle im Einzelfall berücksichtigt werden müssen.

Im unbereinigten Datensatz kam es in einem Fall zu einer Abweichung von 0,35 % Corg, was einem Corg Gehalt von 13 t/ha oder 48 t CO₂ /ha entsprechen würde. Bei zwei weiteren Ausreißern bewegte sich der Fehler um 7 t Corg/ha bzw. 26 t CO₂/ha. Bereinigt von diesen Extremwerten ergab sich bei der Einzelbetrachtung von Messwerten noch eine mittlere Abweichung von 0,029 % Corg für den Mittelwert und von 0.024 % Corg für den Median der Messungen, was einem Wert von 0,9-1,1 t Corg/ha oder 3,3 -4 tCO₂/ha entspricht.

Ungeachtet der Tatsache, dass sich die Fehler der Analysemethode mit Abweichungen nach oben und unten bei großer Beprobungszahl egalisieren, folgt daraus, dass es bei Beprobungen einzelner Parzellen keinen Sinn macht in kürzeren Abständen als alle 4-5 Jahre zu beprobieren, da ansonsten der Fehler der Labormethode im Einzelfall in der gleichen Größenordnung liegt, wie der im Mittel beim *Carbon Farming* mit gängigen Maßnahmen zu erwartende Anstieg der Corg Gehalte, der sich in diesem Zeitraum um plus 0,3 t Corg bzw. 1,2 t CO₂/ha /Jahr bewegt.

¹⁾ Klostermeier, A. (o.J.) Analysengerechte Probenvorbereitung und Bestimmung von TOC/TIC Gehalten in Bodenproben mittels Elementaranalyse. ELTRA Elemental Analysers, Produktbeschreibung, 21 S.

3.2.6 AP6: Kalibrierung

SCF übernahm den Datensatz von 2 mal 166 Bodenproben als Grundlage für die Kalibrierung. Der Kalibrierungsbericht wurde im August 2023 erstellt. Ein 2-phasiger Durchlauf wurde gemacht:

„SmartCloudFarming begann mit der Erfassung von Multispektralbildern des Gebietes zum Zeitpunkt der Probenahme (zwischen der dritten, vierten und fünften Märzwoche 2023). Die Satellitenbilder wurden als Eingabe für das Deep-Learning-Modell verwendet und 192 einzigartige Merkmalsvektoren wurden extrahiert. Die Leistungsüberprüfung des Arbeitspakets AP6 wurde in zwei Phasen durchgeführt:

Phase 1 - die 192 einzigartigen Merkmale, die aus dem Gebiet extrahiert wurden, wurden mit einem *SmartCloudFarming*-Referenzdatensatz zusammengeführt und verwendet, um Vorhersagen zu den 166 Standorten der Kalibrierungspunkte (die in dieser Phase als *100 % Blindtest* verwendet wurden) zu machen.

Phase 2 - die 192 einzigartigen Merkmale, die aus dem Gebiet extrahiert wurden, wurden mit *SmartCloudFarming*-Referenzdatensatz und 50% der Kalibrierungspunkte zusammengeführt und das resultierende Modell wurde dann dazu verwendet, um Vorhersagen zu machen für die 83 anderen Positionen (*50% Blindtest*).

Leistungsergebnisse der Kalibrierung:

Die Kalibrierung mit zweifachem maschinellem Lernen und 83 Kalibrierungspunkten ist die effizienteste und präziseste Kalibrierung, die eine MAPE-Verbesserung von 28,84 % ergab. Dieser Ansatz wurde ausgewählt, um das *tiefe neuronale Modell* von SmartCloudFarming lokal zu kalibrieren, um dann 100% des Kalibrierungsdatensatzes (166 Stichprobenpunkte) zum Scannen, Messen und Kartieren einer Fläche von 2500 Hektar zu verwenden. (für Arbeitspaket AP7 Übertragung und Vorhersage).

	Mean absolute error (MAE)	Mean squared error (MSE)	Mean absolute percentage error (MAPE)
Phase 2	0,14869	0,03383	14,508
	0,14056	0,03107	13,7744
	0,13358	0,02741	13,1507
	0,13579	0,02815	13,3793
	0,13274	0,02844	13,0501
	0,14494	0,03162	14,2558
	0,14275	0,03054	14,1419
	0,13925	0,02864	13,8248
	0,14191	0,02936	13,9807
	0,14067	0,02956	13,848
	Phase 2 average	0,14009	0,02986

Table 2: Performances of the local calibrated model. The model predicted the soil organic carbon of randomly picked 83 soil samples (out of the total 166 available in the calibration dataset) and the predictions were assessed against the remaining 83 soil samples ground truth. We randomly picked 83 soil samples for 10 times and we calculated the averaged as performed metrics.

Tabelle 6: Statistische Auswertung der Fehlergenauigkeit des Vorhersagemodells beim Abgleich mit den gemessenen Kohlenstoff Messwerten.

Visualisierung des Ergebnisses :

Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt über eine GIS Anwendung. Ersichtlich sind Differenzierungen innerhalb eines Schrages heruntergebrochen auf eine Fläche von 307 m². Dadurch ist schon ein Mehrwert gegeben, wo durch Satellitenauswertung genauere Daten räumlich verteilt geliefert werden, als mit einer repräsentativen Bodenprobe, die nur *einen* durchschnittlichen Wert für einen Schlag liefern kann.

Der vollständige Bericht von SCF findet sich in der Anlage: AP6 Calibration_Report SCF_06_2023.



Abbildung 8: Visualisierung der vom Kalibrierungsmodell mit Satellitenfernerkundung ermittelten Corg Gehalte und der Variabilität der Corg Gehalte einiger Flächen im Projektgebiet

3.2.7 AP7: Übertragung und Vorhersage

Die Übertragung und Vorhersage hat SCF in einem technischen Bericht dargestellt. Es wird darin die zuerst die Methodik dargestellt. Desweiteren wird die Visualisierung über eine Open-Source Plattform ermöglicht. Als Übertragungsgebiet wurden drei Gebietsflächen ausgewählt in denen das CO₂-Land Programm im Rahmen seiner Betriebserfassungen bereits Bodenproben und Corg Messwerte erhoben hatte, oder im Rahmen seines Programms zukünftig Bodenproben entnehmen wird. Dies mit dem Ziel, beobachtete Werte mit Vorhersagenwerten abzugleichen (blind test). Damit kann die Genauigkeit des Modells evaluiert werden und Schlüsse zur Anwendbarkeit und Genauigkeit der Fernerkundungswerte können gezogen werden. Die drei unten aufgelisteten Gebiete, auf die das Modell angewendet wurde, haben zusammen genommen eine Fläche von 2500 ha.

- Staufferer Bucht
- Rheinebene angrenzend an den nördlichen Kaiserstuhl
- Vorbergzone Müllheim-Feldberg.



Abbildung 9: Auswahl der Gebiete (links) und Details der Flächen im Gebiet Rheinebene für die Überprüfung der Modell-Vorhersagen

Dargestellt wurden nur Flächen mit Ackerbaustatus; ausgesondert sind Besiedlung, Dauergrünland und Wald. Die Visualisierung liegt vor als

- Zeitreihen-Karte (2018-2022), siehe Kapitel 3.2.8
- Hexagonale Karte für 2500 ha (alle drei Testgebiete)
- Zusammenfassende Karte für 2500 ha (alle drei Gebiete)

Hexagonale Karte:

Außerdem wurde eine systematische Gitterstruktur mit einer räumlichen Auflösung von 30 Metern erstellt, um die Schätzung des SOC-Anteils an 27.229 Stellen im Projektgebiet zu erleichtern. Dieses Raster diente als Grundlage für die Anwendung von Algorithmen für tiefe neuronale Netze zur Ableitung von SOC%-Werten und ermöglichte es die SOC%-Werte für die gesamten 2450 Hektar zu modellieren. Dabei wurden multispektrale Bilder der 2450 Hektar zwischen der dritten, vierten und fünften Märzwoche 2023 aufgenommen und als *Input* für das *Deep-Learning*-Modell verwendet und 192 einzigartige Merkmalsvektoren wurden extrahiert. Die 192 aus dem AOI extrahierten eindeutigen Merkmale wurden mit dem globalen Referenzdatensatz von *SmartCloudFarming* und den 166 Standortwerte der regionalen Kalibrierungspunkte zusammengeführt.

Zusammenfassende Karte:

Bei der zusammenfassenden Karte ist die räumliche Verteilung der SOC-Werte in % des Bodengehalts innerhalb der einzelnen Betriebsgrenzen darstellt. Diese Karte nutzt die Betriebsgrenzen als räumliche Einheiten zur Darstellung des Gehalts an organischem Kohlenstoff und bietet Einblicke in die Variabilität der Bodengesundheit auf Betriebsebene. Die Visualisierung der SOC-Werte innerhalb der Betriebsgrenzen erlaubt es den Beteiligten die Auswirkungen von Landbewirtschaftungspraktiken auf den organischen Kohlenstoffgehalt des Bodens zu erkennen und besser einzuschätzen, wodurch die Entscheidungsgrundlagen für ein nachhaltiges Humusmanagement verbessert und unterstützt werden.

3.2.8 AP8: Auswertung

1 Vorhersagedaten, Blind-Test

Zur Überprüfung der Qualität der Vorhersagedaten des Fernerkundungswerkzeugs wurden die ausgewiesenen Corg Gehalte (% SOC) noch einmal einer Überprüfung unterzogen. Dazu wurden im Untersuchungsgebiet im zeitigen Frühjahr 2024 im Rahmen des CO₂-land Programms auf teilnehmenden Betrieben 41 Bodenproben genommen. SCF wurde in diesem Zusammenhang zusätzlich beauftragt für März 2024 die Corg Werte für diese 41 Datensätze zu simulieren (*blind-test*). Dieser *blind-test* war im Projekt zunächst nicht vorgesehen gewesen, erwies sich aber als notwendig, um das Modell zu evaluieren. Die mittlere Abweichung betrug wiederum 0,14 % Corg. Dies bestätigt die Robustheit des Fernerkundungswerkzeugs und der Auswertungen durch SmartCloudFarming.

Die Aussage des Blind-Tests muss dahingehend noch etwas relativiert werden, dass der ausgewiesene Mittelwert für den Corg Gehalt im Boden eines Feldes sich nicht exakt auf identische Messpunkte bezieht, sondern er vergleicht das Laborergebnis einer Mischprobe von Bodenproben an 16 repräsentativen Entnahmestellen pro Schlag mit dem Mittelwert von 100 Rasterpunkten pro ha auf dem gleichen Schlag in der Simulation mit dem Fernerkundungswerkzeug (siehe Rasterpunkte in der nachfolgenden Abbildung). Beispielhaft wurden für den Schlag S5 F9 mit einer Größe von 1,245 ha 124 Simulationswerte ermittelt und daraus ein Mittelwert von 1,288 % Corg gebildet. Der entsprechende Laborwert aus der Mischprobe der 16 Bodenproben betrug 1,416 % Corg (Abweichung 0.128 % Corg, siehe Abbildung 10).

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Zusammenfassung dieser Ergebnisvergleiche für alle untersuchten 41 Schläge (Bewirtschaftungseinheiten).

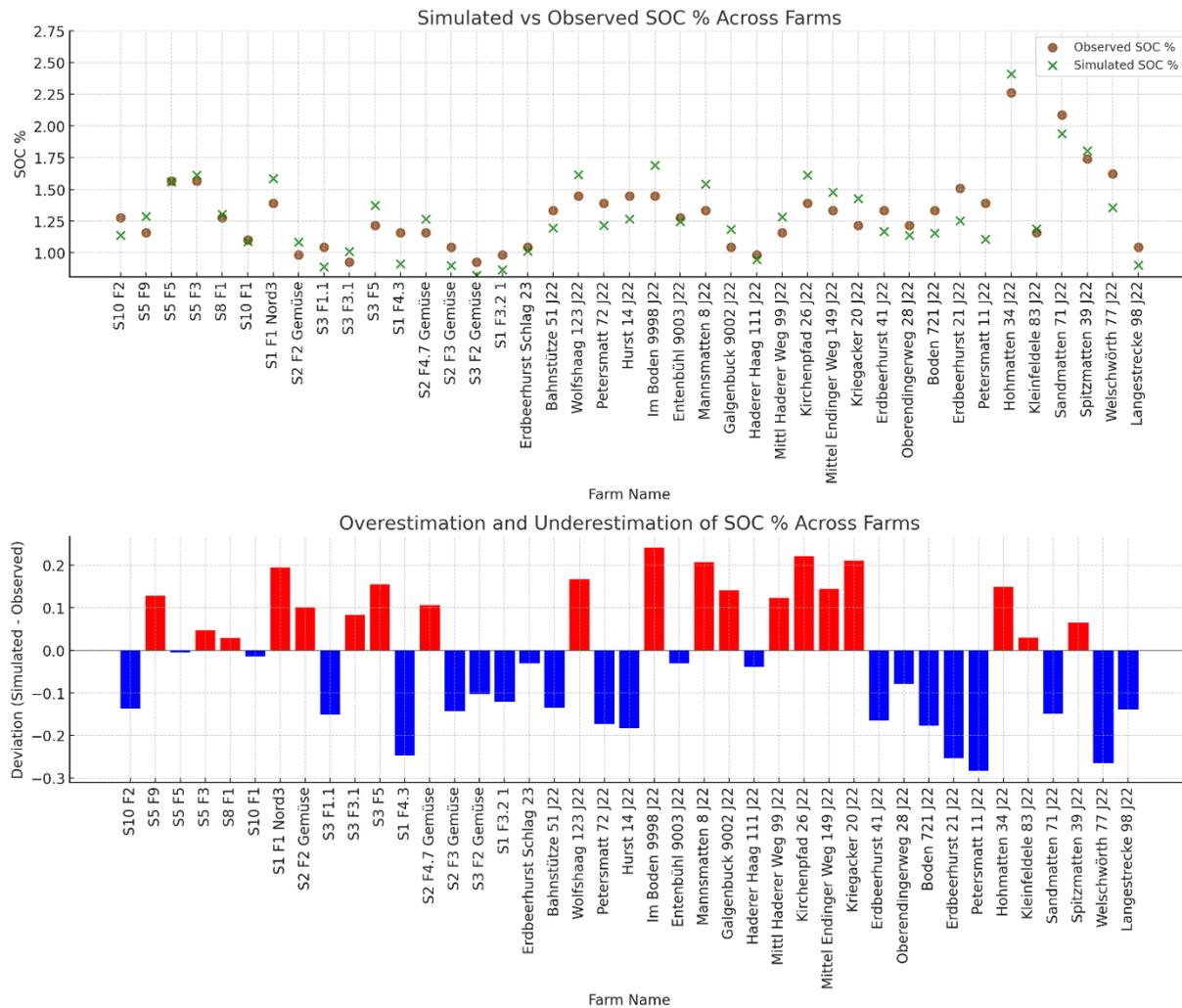


Abbildung 11: Statistische Auswertung *Blind-Test*

Nach der statistischen Auswertung sind zwei Größen von Bedeutung, der MAE und der MAPE.

Definition:

MAE: Der Mean Absolute Error (deutsch: Mittlere absolute Fehler), kurz MAE, ist definiert als der Durchschnitt der absoluten Differenz zwischen prognostizierten Werten und wahren Werten).

MAPE: Der Mean Absolute Percentage Error, kurz MAPE, ist definiert als der mittlere prozentuale Fehler der absoluten Differenz zwischen prognostizierten Werten und wahren Werten, geteilt durch den wahren Wert

Der MAE liegt bei 0,14 % Corg. Anders ausgedrückt, die mittlere absolute Ungenauigkeit eines vorhergesagten Wertes von Corg im Boden liegt bei 0,14 %. Auf einen ha Fläche umgerechnet sind

das ca. 5-6 t Corg/ha oder die in Humus festgelegte Menge von ca. 19 t CO₂. Der MAPE liegt bei 14 %. Bei einem durchschnittlichen Beobachtungswerte der 166 Proben von 1,03 % Corg sind das Abweichungen von +/- 0,14 Corg. Diese Werte liegen für eine Anwendung als zeitlich hoch aufgelöstes Monitorinwerkzeug zu hoch, da der Fehler im Einzelfall bei einer Parzelle der Humusaufbauleistung entspricht, die in einem Zeitraum von 10-15 Jahren zu erwarten ist. Er liegt damit um das etwa fünffache höher als der Fehler bei der Laboranalytik (siehe Kapitel 3.2.5)¹⁾

Ungeachtet dieses Sachverhaltes, der gegen den Einsatz des Messverfahrens für den Nachweis kurzfristig auftretender Veränderungen im Humusgehalt spricht, zeigt der weitgehend parallele Verlauf der mittels Fernerkundung simulierten Werte und der Laborwerte, dass die Methode ein großes Potenzial besitzt, um schnell und großflächig den Humusstatus von Feldern zu bestimmen, wenn sich die Differenzen boden- oder bewirtschaftungsbedingt stärker unterscheiden. In Abbildung 11 bildet auch das Remote Sensing recht zuverlässig und mit hoher räumlicher Auflösung ab, ob es sich um humusreiche oder eher humusarme Böden handelt.

Dies macht das Instrument zu einem attraktiven Werkzeug um Corg.-Trends und -Veränderungen über längere Zeiträume großflächig mit hoher räumlicher Auflösung zu erkennen und zu dokumentieren.

¹⁾ Im Bezug auf den Vergleich der mittleren Fehler von Labormethoden zu RSM muss darauf verwiesen werden, dass auch Labormessungen mit größerem Fehler behaftet sein können, wenn Wiederholungs- und Vergleichsmessungen in unterschiedlichen Laboren durchgeführt werden. Even et al. 2024, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1470>

2 Zeitreihen

SCF lieferte eine rückwirkende Zeitreihe von Herbst 2018 bis Herbst 2022, jeweils mit Daten für den Herbst und für das Frühjahr. Die Zeitreihe zeigt den durchschnittlichen Wert aller simulierten 166 Datensätze (S). Für 2023 wurden unserer Bodenprobenergebnisse / Beobachtungen (B) hinzugefügt.

Während von 2018 bis Frühjahr 2020 die Werte noch ziemlich konstant sind fangen sie ab Herbst 2021 an relativ stark zu schwanken, im Herbst nach oben im Frühjahr nach unten. Die Vergleichbarkeit zwischen S und B ist beschränkt, da unsere Bodenprobekampagne zwischen 15. und 29. März 2023 durchgeführt wurden, die simulierten Werte selbst im Frühjahr sich auf 1. Mai beziehen, also auf einen anderen Zeitraum im Jahr mit einer anderen Humusdynamik. Bei der Auswertung einzelner Schläge ergibt sich ein differenzierteres Bild mit Humusstabilität, -Zunahme und -Abnahmen. Wir sehen jedoch aus dem Gesamtbild, dass Zeitreihen je nach Zeitpunkt der Simulation massiv variieren können und daher das Design der Parameter so exakt wie möglich gesetzt werden muss. Das heisst für unsere Verwendung, dass die Frühjahrs-Simulation gleichermaßen im März gemacht werden müssten und nicht mit einem Vergleich am 1. Mai, womit dann die Dynamik besser abgebildet und verglichen werden könnte. Aus diesem Grund wird eine vertiefte Diskussion und Interpretation dieses Teilergebnisses an dieser Stelle unterlassen.

Die Ergebnisse der Satellitenfernerkundung können somit in zweierlei Hinsicht ausgelegt werden:

- a) Geht man davon aus, dass die Simulationswerte zu unterschiedlichen Jahreszeiten mit unterschiedlichen Deckungsgraden und Kulturen von ähnlicher Qualität sind, dann würde dies bedeuten, dass die Humusgehalte im Oberboden sehr stark variieren.
- b) Es kann vermutet werden, dass durch Veränderungen des Deckungsgrads und des Bodenbewuchses auch die „Messung“ über die Auswertung multispektraler information und des dabei angewandten Algorithmus beeinflusst wird und dass dies die großen Schwankungen erklärt.

Da einiges für letzte Annahme spricht kann noch keine eindeutige Zu- oder Abnahme des Humus für unsere Schläge daraus gefolgert werden. „Messungen“ über Zeitreihen mit ähnlicheren Bedingungen (z. B. offener Boden, gleicher Zeitraum mit ähnlichen Wetterbedingungen etc. lassen hier vermutlich bessere Aussagen zum Humusgehalt erwarten).

Tabelle 7: Zeitreihe durchschnittlicher Werte des Corg Gehaltes in % auf den untersuchten 41 Standorten zwischen November 2018 und März 2023 (S=Simulation, B=Beobachtung).

	S	S	S	S	S	S	S	S	S	B
Datum	01.11. 2018	01.05. 2019	01.11. 2019	01.05. 2020	01.11. 2020	01.05. 2021	01.11. 2021	01.05. 2022	01.11. 2022	15- 29.03. 2023
Corg %	1,06	0,99	1,02	1,07	1,21	1,05	1,27	0,92	1,52	1,03

Visualisierung der Datenreihe siehe: <https://studio.foursquare.com/public/299e4857-119c-4ed5-b72b-b40cafefafdd>

3.2.9 AP9: Projektleitung

Während des laufende Vorhabens mussten zwei grundsätzliche Lernschleifen genommen werden; Technische Adaptationen und Reaktionen auf natur- und wetterbedingte Vorgaben.

Im ersten Fall bedeutete dies, dass wir ursprünglichen Beprobungsmuster abgerückt werden musste. (siehe Kapitel 3.2.4). Nach ausführlicher Absprache mit unserem Dienstleister SCF wurde ein Muster aufgesetzt, welches auf die genauere Kalibrierung des Vorhersagemodells abgestimmt wurde, ein geändertes Bodenprobe-Design welches sich nun an der Sentinel 2 Satellitentechnik orientierte wurde mit dem Ziel adaptiert damit eine bessere Auflösung zu erreichen. Außerdem fiel ein Standardprobenehmer wegen technischer Probleme aus, so dass die Probennahme kurzfristig durch das CO₂-Land Team erfolgen musste. Auch war die Probenahme ursprünglich auf Spätherbst 2022 angesetzt worden. Der warme Witterungsverlauf mit spät noch aktivem Pflanzenbestand und einem starken Einfluss von Wurzelausscheidungen auf das Beprobungsergebnis machten eine Verschiebung des Beprobungstermins notwendig. Die Humusdynamik war dadurch noch zu instabil, um ein

zuverlässige Basis-Messung der über einen längeren Zeitraum gehaltsbestimmenden Humuswerte durchzuführen. Daher wurde die Bodenbeprobung zur Modellkalibrierung auf März 2023 verschoben.

Anfang 2024 ergab sich die Möglichkeit die simulierten *Remote-Sensing* - Werte mit den Ergebnissen von Bodenanalysen auf Betriebsflächen im Projektgebiet zur vergleichen (siehe Kapitel 3.2.8). Dies war ein zusätzlicher Aufwand, der bei der Projektplanung nicht einkalkuliert war, sowohl für das Team von CO₂-Land, um die Daten aufzubereiten, als auch für das SCF-Team für einen zusätzlichen Blind-Test. Anhand des zusätzlichen Datenvergleichs bei diesem zweiten Blind-Test konnte die früher ermittelte Fehlergenauigkeit erfreulicherweise bei der statistischen Auswertung noch einmal bestätigt werden. Die mittlere Abweichung von 0,14 (Corg in %) des Modells wurde durch den zweiten Blind-Test reproduziert.

Essentiell für die Projektdurchführung war auch die enge und stetige Abstimmung zwischen CO₂-Land und dem SCF-Team, sowohl bei der Planung des Probe-Designs, als auch bei der Auswertung und Kalibrierung des Simulationsmodells.

4 Zusammenfassung/Fazit

4.1 Anwendung für das CO₂-Land Programm

Ausgehend von den eingangs getroffenen Annahmen und Hypothesen (Kapitel 2.3) können die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeit für das Humus-Programm wie folgt bewertet werden:

1. Das RS liefert direkte Werte zum Bodenkohlenstoff und kann Bodenproben ersetzen. Dies setzt sehr präzise Daten voraus.

Ergebnis unseres Blind-Tests sind ein MAE von 0,14 Corg (%). Auf einen ha Fläche umgerechnet sind das ca. 19 t CO₂eq. Vergleichen wir dies mit unseren zwei Labormessreihen (siehe 3.2.8) haben wir hier eine mittlere Abweichung (MAE) von 0,029% . Auf einen ha Fläche umgerechnet sind das ca. 4 t CO₂eq, also ca. 1/5 des Blind-Tests.

Bei einem angenommenen Humuszuwachs durch systematische Humuswirtschaft von 1- 2 t CO₂ eq/ha dauert es mind. 10 Jahre um diese Ungenauigkeit auszugleichen. Diese Spannweite ist zu ungenau, um sie für das Humusmonitoring des Programms verwenden zu können, da hier eine höhere zeitliche Auflösung von 4-5 Jahren gefordert ist und das Programm vertraglich nur über einen garantierten Zeitraum von 10 Jahren läuft.

In dem Fall des Humus-Programms kann die direkte RS-Humusmessung für die Erfolgskontrolle nach 4 und 10 Jahren daher aktuell noch nicht genutzt werden. Warum? Weil der Bezug zu den Einzelproben nicht genau aufeinander abgestimmt wurde. Die Bodenproben mit 16 Einzelproben basieren auf einer anderen Methodik wie die Sentinel Punkte aus der RS-Simulation.

Würde jedoch von Anfang an, also für die Baseline-Messung die RS-Technologie eingesetzt werden könnte dies als Grundlage dienen, um darauffolgende Erfolgsmessung zu machen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Kalibrierung mit einem hinreichend großen Datensatz mit demselben Raumbezug, für dieselbe Lokalität, oder zumindest Region vorausgehen muss. Zusätzlich müssen die Zeitpunkte und Messbedingungen genau präzisiert sein.

Für das Humus-Programm könnte das bedeuten in Zukunft mit einem geänderten Design zu starten. D.h. bei neuen teilnehmenden Betrieben sofort für die Baseline-Messung die RS-Daten als Grundlage zu nehmen, wenn für das Gebiet eine präzise Kalibrierung vorliegt.

2. Das RS liefert rückwirkende Daten zur Entwicklung der Bodendynamik. Daraus können aus der jüngeren Nutzungshistorie Bewirtschaftungspraktiken in Hinblick darauf bewertet werden, inwieweit sie zum Humusaufbau bzw. zum Humusabbau beitragen.

Bei den im Projekt betrachteten Zeitreihen von 5 Jahren wurden nicht einzelne Schläge ausgewertet, sondern nur die durchschnittliche Entwicklung im Projektgebiet. Diese zeigt ein uneinheitliches Bild. Dabei wurde gelernt, dass für eine Zeitreihe das RS genau zur gleichen Zeit angesetzt werden muss wie die Beobachtungswerte, was in unserem Fall nicht eingehalten war. Daher ist die Humusentwicklung nicht zuverlässig über die verschiedenen Zeitpunkte vergleichbar. Dessen ungeachtet zeigen die Ergebnisse aus der Kalibrierung und dem nachfolgenden Vergleich der Simulations- und Analyseergebnisse, dass die Fernerkundung bei korrekter Anwendung das Potenzial hat in zeitlich gröberer Auflösung über längere Zeiträume Humusgehalte und Humustrends kostengünstig und großräumig abzubilden. Hierzu bedarf es aber im Idealfall größerer Datensätze, längerer Zeitreihen, vergleichbarer Messtermine und einer guten Abstimmung auf die Muster der Landnutzung im Jahresverlauf.

3. Das RS liefert eine flächenhafte Darstellung vom Humuszustand und kann (bei vergleichbarem Nutzungsregime) dazu genutzt werden einheitliche Bodencluster zu identifizieren und den Aufwand für eine repräsentative Beprobung der Flächen zu reduzieren



Abbildung 12: Hexagonale Karte Simulation

Siehe online: <https://studio.foursquare.com/public/f437cb80-5e2e-4007-af78-28f5af3c7080>

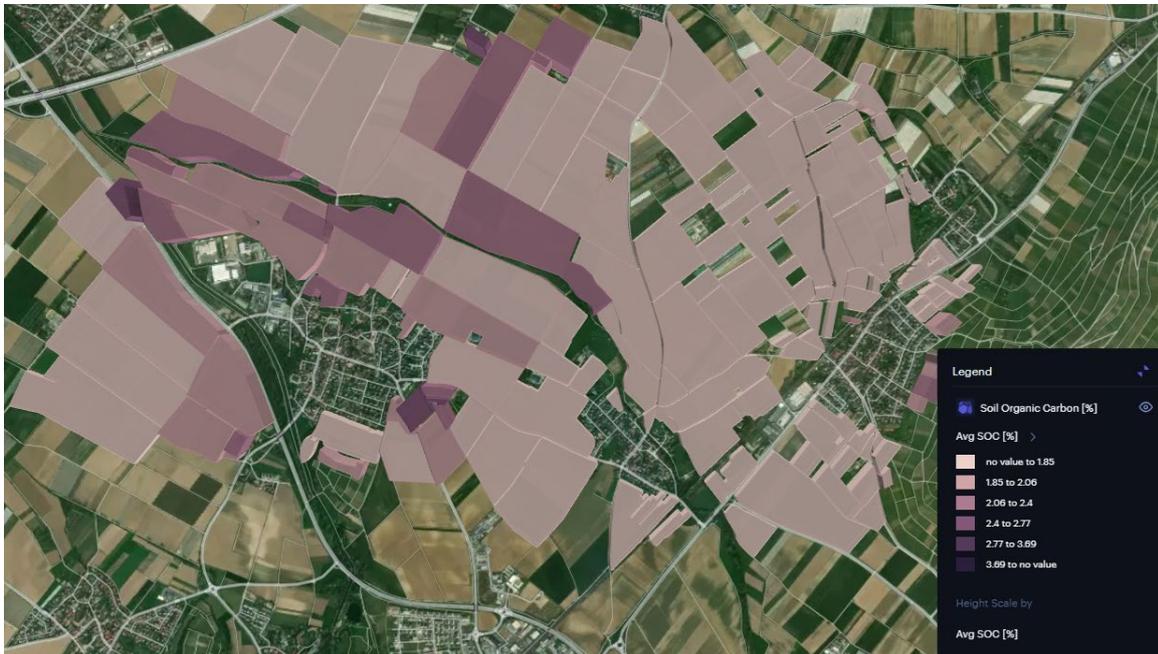


Abbildung 13: zusammenfassende Karte, Simulation, gleicher Ausschnitt wie Abbildung 12

Siehe online: <https://studio.foursquare.com/public/5a39e221-05f5-4c42-af62-9ad2387d89f1>

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen eines der drei Projektgebiete. Es ist der gleiche Kartenausschnitt nur mit einer anderen Auflösung. Die Hexagonale Karte hat eine Auflösung von 30 m. Bei der zusammenfassende Karte wurden manuell mehrere Schläge aggregiert zu einem Cluster.

Interpretiert man beide Karten, lassen sich verschiedene Muster erkennen. Es gibt Gebiete mit sehr ähnlichem Humusgehalten, die wir noch deutlicher durch die Aggregation erfassen. Diese Gebiete kennzeichnen sich durch sehr ähnliche Bewirtschaftung, wie z.B. Saatmaisbau, welcher meist in größere Gebiete zusammengefasst werden muss. Mitten durch das Kartengebiet verläuft ein Bach, die Möhlin. Angrenzend sehen wir teilweise deutlich höhere Humusgehalte. Diese ergeben sich durch Anschwemmung von Feinmaterial, dies sind historische Schwemmlandgebiete mit historischer Wiesennutzung, was zu einem höheren Humusniveau führte. Dies wurde durch Umbruch in Ackerland umgenutzt in der 2. Hälfte des letzten Jahrhunderts. Die heutigen Ackerflächen zehren noch von dem Humusaufbau während der Wiesennutzung. Außerdem gibt es singuläre Muster, wie einzelne Flächen/Cluster, die hervortreten, z.B. ein Cluster am süd-westlichen Ortsrand. Hier stand eine historische Mühle. Womöglich kann auch hier durch Anschwemmungen oder Vernässungen der Humusgehalt historisch angehoben worden sein.

Im dargestellten Projektgebiet Abbildung 13 wurden 116 Proben für die Kalibrierung gezogen. Durch die Aggregation/Clusterbildung konnte gezeigt werden, dass eine Clusterbildung von 3-4 Gruppen gut möglich ist, dadurch könnte der Probeaufwand (bei vergleichbarem Landnutzungsmuster) deutlich reduziert werden um ca. 80 %. Diese Möglichkeiten sind naturgegeben regional unterschiedlich. Jedoch unter Einbezug von Ortskenntnissen kann das auch auf andere Regionen übertragen werden. **Daraus resultiert, dass durch die Anwendung von Remote-Sensing der Aufwand für klassische Bodenbeprobung und -analyse über eine Clusterbildung der Böden deutlich reduziert werden kann. Der Umfang dieser möglichen Einsparungen variiert standortabhängig nach dem Grad der möglichen Aggregation unter Berücksichtigung örtlicher Besonderheiten.**

4.2 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

Bei Beauftragung von klassischen Bodenproben (BP) beziffern sich (Stand 2024) die Kosten für Probenahme, Laboranalyse und Datenauswertung im Programm pro Schlag bisher auf mindestens 70 -80 Euro. Grundsätzlich werden diese Kosten in Zukunft eher steigen. Zudem müssen die digitalen Schlagdaten bereitgestellt werden über Shape-Dateien, die z.B. aus den Datenbanken der Landwirtschaftsbehörden herausgezogen werden können. Auf jeden Fall braucht das Humus-Programm eine eigene GIS-Bearbeitung, um die Daten aufzubereiten. Dieser Aufwand wird jedoch bei Beauftragung eines RS-Monitoring (RSM) in etwa gleich groß bleiben, kann also als neutral bezeichnet werden.

Die Wirtschaftlichkeit wird für die Clusterbildung dargestellt. Wie in der Auswertung unter 4.1.3. sehen wir hier eine direkte Nutzungsmöglichkeit der RS Technologie für das Humus-Programm.

Tabelle 7: Kosten verschiedener Monitoring Methoden in TEURO in Abhängigkeit von der Anzahl der Schläge / Flächen und mögliches Einsparpotential

Kosten Bodenprobe (BP) pro Schlag 80 Euro, Durchschnittliche Größe Schlag 2,5 ha, BP=Bodenprobe, RSM=Remote-Sensing Technologie, Preise SCF für RSM ab 2500 ha 2,89 €/ha, ab 10000 ha 2,69 €/ ha.

	Anzahl Schläge Fläche (ha)	100 - 250	500- 1250	1000 2500	10000 25000
M1	Kosten BP	8,0	40,0	80,0	800,0
M2	Kosten BP nur 20 % der Flächen	1,6	8,0	16,0	160,0
M3	Differenz M1 zu M2 Kosten	6,4	32,0	64,0	640,0
M4	Kosten RSM pro Schlag / pro 2,5 ha	?	?	7,2	67,3
M5	Kosten M4 und M2			23,2	227,3
M6	Einsparungen M2+M4 zu M1			56,8	572,8
M7	Einsparpotential M6 in %			71,0	71,6

Die Kosten für RSM sind aus der Preisliste 2024 von SCF entnommen. In der Liste sind nur Preise ab einer Monitoringfläche von 2500 ha erfasst, dies entspricht ca. 1000 Schlägen. Je kleiner die Projektfläche, desto höher werden die Kosten pro Fläche bzw. pro Schlag.

Der Ablauf vom Monitoring mit RS könnte folgender sein:

- Lokalisierung der zu untersuchenden Schläge wird an den RS-Dienstleister übermittelt.
- RSM wird durchgeführt und die Daten werden an das Programm geliefert.
- Daten werden hinsichtlich Clusterbildung ausgewertet unter Einbezug von Bodentyp, Nutzung und Feldhistorie
- Nach der Clusterbildung kann die Anzahl der zu beprobenden Schläge deutlich (geschätzt zwischen 50 und 80 %) reduziert werden.
- Bei z. B. 20 % liegen Daten für BP (M1) und RSM (M4) vor
- Gleichzeitig kann das Modell durch die Überschneidung von den beispielhaft angenommenen 20 % der Flächen (M1 + M4) ständig kalibriert, evaluiert (Blind-Test) und nachjustiert werden.

Vorteile des RSM ergeben sich aus zusätzlichen Informationen über die Bodentextur. Diese können mit leicht erhöhten Kosten ebenfalls ermittelt werden. Beim RSM lagen pro Schlag durchschnittlich 11 Datensätze Corg vor, was eine Differenzierung innerhalb des Feldes möglich macht. Bei der Entnahme der BP ist das nicht möglich, es liegt nur ein Mischwert vor.

Einschränkend muss gesagt werden, dass das RSM nur bei Humuserfassung ab einer bestimmten Anzahl von Flächengrößen wirtschaftlich ist. D.h. für größere Betriebe, bzw. für große zusammenhängenden Beprobungsregionen mit relativ homogenen Bodenverhältnissen.

Bei Reduzierung der klassischen Bodenproben um 80 % einer Probezahl ab 1000 Schlägen würden sich die die Kosten der Bodenbeprobung durch Zuhilfenahme von RSM um mindestens 71 % reduzieren lassen. Weitere Synergien können sich ergeben durch zusätzliche Informationen zum Boden, wie Bodentextur und Differenzierung innerhalb der Schläge/ Fläche, durch den Vergleich mit anderen Nutzungen und Betrieben und durch Ausweitung der Datenerfassung über längere Zeitreihen (Trendermittlung).

5 Projekterkenntnisse

1. Die Humusdynamik im Boden hängt von sehr vielen Faktoren ab und kann im Laufe der Jahre schwanken. Wichtigste Einflussfaktoren sind zum Beispiel Bewirtschaftungsmaßnahmen, Wetter und Klima, die Bodenart, Vorbewirtschaftung und historische Nutzung.
2. Die RS-Technologie für das Monitoring von Bodeneigenschaften, hier im Projekt vom Humusgehalt, ist vielversprechend. Allerdings müssen dafür viele Rahmenbedingungen erfüllt sein.
3. Eine enge Zusammenarbeit mit dem RS-Dienstleister muss gewährleistet sein.
4. Eine präzise Kalibrierung der Algorithmen in einem Anwendungsgebiet ist Voraussetzung für eine aussagefähige RS-Messung. Je mehr Daten vorliegen, desto genauer kann die Kalibrierung erfolgen. Präzise Erhebungen und Referenzwerte bilden die Grundlage für die Simulation bzw. Baseline-Messung und spätere Erfolgsmessung.
5. Probennahme-Design und Zeitpunkt der Kalibrierung müssen exakt abgestimmt werden. Für die Simulation müssen vergleichbare Zeitpunkte gewählt werden. Der Raumbezug muss für eine exakte Reproduktion identisch sein.
6. Bester Zeitpunkt für eine Kalibrierung der Fernerkundungsmessungen und die parallel durchgeführten Bodenbeprobungen ist die kälteste Periode im Jahr im Januar/Februar, wenn die Humusdynamik am stabilsten ist.
7. Für die zukünftige Nutzung von RS-Technologie für das Humus-Programm müsste das Bodenprobedesign hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse angepasst werden.
8. RS-Technologie für das Boden-Monitoring kann sehr wirtschaftlich werden mit deutlich geringeren Kosten als die klassischen Bodenproben. Diese Möglichkeit besteht insbesondere dann, wenn eine hohe Anzahl an Monitoring-Daten gebraucht wird (bei größeren Flächen, großen Betrieben, oder mehreren Betrieben in einem zusammenhängenden Gebiet)
9. Die Daten der im Projekt untersuchten Zeitreihen konnten nicht exakt ausgewertet werden, da räumliche und zeitliche Differenzen zwischen Beobachtung und Simulation bestanden. Dies konnte erst bei der finalen Auswertung erkannt und nicht mehr korrigiert werden.

10. Die RS-Technologie wird sich weiter entwickeln, da immer mehr Daten ausgewertet werden und durch Lernen und Weiterentwicklung Ungenauigkeiten reduziert werden. Es kann nach den Projekterfahrungen davon ausgegangen werden, dass satellitengestützte Fernerkundungsverfahren in wenigen Jahren auch für die direkte Messung von Humus eingesetzt werden können. Allerdings müssen einige Rahmenbedingungen wie Kalibrierung, zeitliche und räumlicher Reproduktion und geeignete Wetterbedingungen beim Scannen vorliegen. In der neuen VERORDNUNG (EU) 2024/3012 „Schaffung eines Unionsrahmens für die Zertifizierung von dauerhaften CO₂-Entnahmen, kohlenstoffspeichernder Landbewirtschaftung“ wird die Fernerkundung als Monitoring-Instrument namentlich zugelassen und könnte somit auch beim Programm des CO₂-Land Vereins in Zukunft offiziell zum Einsatz kommen.
11. RSM ist ein Instrument um Corg.-Trends und -Veränderungen über längere Zeiträume großflächig mit hoher räumlicher Auflösung zu erkennen und zu dokumentieren.

6 Anlagen

AP6 Calibration_Report SCF_06_2023
AP7 Übertragung und Vorhersage SCF_04_2024
2023_03_CO2-Land_Soil_Sampling_pilot_Baden2023_06_06_delta
Co2land-blindtest 2 für 41 Datensätze SCF
2024-3012 EU VO Kohlenstoffspeichernde Landbewirtschaftung
SCF_PricingList_2024