



Gefördert durch den
Innovationsfonds
Klima- und Wasserschutz

badenova
Energie. Tag für Tag

Freiburg 
I M B R E I S G A U



Projekt 2019-13

CO2-Land - Regionale Klimakooperation zur Speicherung
von CO2 in landwirtschaftlichen Böden

Abschlussbericht



Erstellungsdatum:
27.10.2021

Autoren und Kontakt:

Michael Schwegler, Schwegler Consulting, Schöneck 1, 79219
Staufen, ms@co2-land.org, 07633-9394342

Dr. Karl Müller-Sämann, cult-tec Agrolutions U.G., Klarastraße 94,
79106 Freiburg, km@co2-land.org, 0761-20 23 23 0

www.co2-land.org

1 Inhalt

2	Projektüberblick.....	3
2.1	Ausgangslage.....	3
2.2	Ziele	3
2.3	Herausforderungen // Chancen und Risiken des Vorhabens	3
3	Projektbeschreibung	4
3.1	Projektablauf.....	4
3.1.1	Terminplan	4
3.1.2	Finanzierungsplan	6
3.2	Umsetzung der Arbeitspakete	6
3.2.1	Analyse bestehender Initiativen und regionale Anpassung	6
3.2.2	Vernetzung mit Partnern und Akteuren.....	7
3.2.3	Erarbeitung eines Maßnahmenpakets zum Humusaufbau	9
3.2.4	Implementierung auf Pilotflächen	16
3.2.5	Skalierung und Monitoring.....	21
3.2.6	Ausgabe von Klimazertifikaten – CO2-Land Programm	30
3.3	Wirkung der Umsetzung auf das CO2-Land Programm	32
3.3.1	Potentialanalyse.....	32
3.3.2	Beispielhafte Wirkkette für ein CO2-Land Programm.....	33
3.4	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit.....	34
3.4.1	Preisgestaltung Klimazertifikate.....	34
3.4.2	Überblick Geschäftsmodell CO2-Land Programm.....	35
4	Öffentlichkeitsarbeit	35
4.1	Vernetzung.....	35
5	Zusammenfassung/Fazit	38
5.1	Humusaufbau als Indikator für vielfältige Ökosystemleistungen	38
5.2	Die signifikante Bedeutung der Landwirtschaft.....	38
5.3	Dualer Ansatz zum Klimaschutz nur mit CO2-Senken machbar	38
6	Ausblick	39
7	Projekterkenntnisse	39
8	Anlagen	40
8.1	Maßnahmenprotokoll.....	40
8.2	Literatur und Quellen.....	44

2 Projektüberblick

2.1 Ausgangslage

Zentrales Anliegen des vorgelegten Projektes ist es, durch die Nutzung von Ackerflächen als bedeutende CO₂ Senken dem Klimawandel zu begegnen und Landwirte und die Zivilgesellschaft für dieses Anliegen zusammen zu bringen und zu mobilisieren. Firmen und Bürger sollen die Landwirte auf freiwilliger Basis durch den Erwerb von CO₂ Zertifikaten für den Humusaufbau in ihren Ackerböden motivieren und unterstützen, um so in einem gemeinsamen Bündnis den Klimaschutz voranzubringen (transparent, überschaubar, im regionalen Kontext).

Konkret sollen durch das Zusammenwirken des Projektteams mit den Landwirten ackerbauliche Maßnahmen erarbeitet werden, die im regionalen Kontext geeignet sind, die Humusgehalte ihrer Böden durch die Festlegung von CO₂ wieder anzuheben. Darüber hinaus sollen die Modalitäten und vertraglichen Grundlagen für den Nachweis und die Sicherstellung der Kohlenstofffestlegung erarbeitet und formuliert werden. Am Ende des Projektes soll ein sich selbst tragendes Geschäftsmodell für den regionalen Handel mit Emissionszertifikaten stehen. Klimaschädliche Emissionen werden von Landwirten kompensiert, die Region profitieren.

2.2 Ziele

Die Hauptziele bestehen aus 3 Komponenten

- a) Entwicklung eines regional angepassten Maßnahmenkatalogs zur Bindung von CO₂ in den Böden
- b) Aufbau eines freiwilligen, regionalen CO₂ Zertifikatehandels und
- c) Vernetzung von Akteuren und Umweltkommunikation.

In der 2-jährigen Projektphase wurde bestehendes Wissen und Erfahrungen zusammengetragen mit dem Ziel, gemeinsam mit den Akteuren in der Region Maßnahmen zu entwickeln und pilothaft zu implementieren und hinsichtlich der betriebswirtschaftlichen und organisatorischen Umsetzbarkeit zu bewerten. Mess- und Nachweismethoden sollten in Pilotanwendungen geprüft und für die praktische Umsetzung präzisiert werden. Die daraus gewonnen Erkenntnisse gehen und gingen ein in die organisatorische und inhaltliche Ausgestaltung einer regionalen Klimakooperation mit Ausgabe von Klimazertifikaten, die in einem schon skizzierten Folgeprojekt ab 2022 realisiert werden soll.

2.3 Herausforderungen // Chancen und Risiken des Vorhabens

Landwirtschaftliche Flächen haben die Besonderheit, dass sie klimaschädliches CO₂ aus der Luft durch Humusaufbau wieder festsetzen können. Humusaufbauende Maßnahmen erhöhen im Boden auch die Bodenfruchtbarkeit, die Wasserspeicherfähigkeit und die Biodiversität (wesentliche Zusatzeffekte). Die entscheidende Frage hinsichtlich der Mobilisierung dieses Potenzials ist, wie Klimaschutzanstrengungen von Landwirten so entlohnt werden können, dass sie attraktiv werden für den Akteur auf dem Feld.

Auf der eine Seite sind die Bauern einem steigenden Preisdruck von immer größeren und weniger Abnehmern im Lebensmittelhandel ausgesetzt, auf der anderen Seite schränken Verbote und zunehmend restriktive ordnungsrechtliche Maßnahmen zum Umweltschutz und administrativer

Mehraufwand die Handlungsspielräume ein und erschweren das wirtschaftliche Überleben vieler Betriebe. Dieser für viele Bauern existenzbedrohende Konflikt lässt sich nur lösen, wenn Umwelt- und Sozialleistungen von der Gesellschaft nicht nur eingefordert, sondern auch entlohnt werden. Notwendig ist eine geldwerte Anerkennung auch der "produzierten" Umweltleistungen auf Basis transparenter und messbarer Ergebnisse. Gesellschaft und Landwirtschaft, Stadt und Land müssen aufeinander zugehen.

Die mit diesem Projekt angestrebte "Regionale Klimakooperation" bietet hierzu eine Gelegenheit. Sie schafft die Möglichkeit für direktes Handeln der Akteure mit der Perspektive auf eine sich selbst tragende Vereinbarung durch direkte Kooperation zwischen Landwirten und Bürgern, Firmen und Institutionen, - jenseits der großen Politik

3 Projektbeschreibung

3.1 Projektlauf

3.1.1 Terminplan

Arbeitspaket	Beschreibung	Ergebnis /Dokumentation
1 Analyse bestehender Initiativen und regionale Anpassung	Analyse und Kurzbeschreibung existierender Initiativen und Bewertung im regionalen Kontext	Bericht 9/2019
2 Vernetzung mit Partnern und Akteuren	Partner definiert aus den Bereichen Landwirtschaft, Verbänden, Initiativen zu Klima- und Umweltschutz, Privatwirtschaft; Wasser- und Energieversorger, Lebensmittelunternehmen, Forschung, Privatpersonen.	Liste von Partnern und Akteuren. Aufstartworkshop mit Akteuren ->Sommer 2019 öffentliche Infoveranstaltung zu Ergebnissen des Projekts und Start des Zertifikatehandels (Frühjahr 2021)
3 Maßnahmenpaket ausarbeiten	Erarbeitung eines Pakets von geeigneten Maßnahmen zur C-Humusanreicherung für die bedeutendsten Kulturen und Fruchtfolgen. Beschreibung	Liste und Beschreibung von 5-8 Maßnahmen mit Abschätzung der Humuswirksamkeit. Liste der teilnehmenden Akteure Dokument4/2020
Arbeitspaket	Beschreibung	Ergebnis /Dokumentation
4 Implementierung auf	Für ca. 30 ha Pilotfläche werden	Bericht mit Schwerpunkt auf

Pilotflächen

5 Landwirte verschiedene ackerbaulichen Maßnahmen zur C-Festlegung in den Böden prüfen und hinsichtlich praktischer Umsetzung bewerten.

Verträge mit Akteuren zur langzeitlichen Durchführung und zum Schutz der Humusgewinne werden gemacht;

der Herausarbeitung von Handlungsempfehlungen a) für die Erfordernisse der betrieblichen Umsetzung und b) Eignung der geprüften Methoden (z. B. Bodenanalytik) für die Dokumentation und Gewährleistung der Humuswirksamkeit der Maßnahmen
Berichtsdokument (3/2021).

5 Skalierung und Monitoring

Methode zur Humusanalyse ist definiert, Humusanalyse zum Anfang und zum Ende des Feldversuches ist durchgeführt, Daten zur Kohlenstoffspeicherung und Anwendbarkeit der Methoden liegen vor.

Bericht mit Analyseergebnissen, Interpretation georeferenzierter Analysewerte und erforderlicher Aufwand; Schätzung der Kosten einer transparenten Überwachung der Humuswerte.
Auswertung 4/2020) & 4/2021

6 Aufbau von CO2 - Zertifikathandel

Geschäftsmodell ausarbeiten, Plattform mit Rechtsform für CO2 Handel wird definiert; Auswertung der Ergebnisse und Empfehlung für Umsetzungsphase, Kooperation mit etablierten Plattformen für Zertifikathandel geprüft (z.B. Atmosfair); Verträge von Landwirten und Kunden zur Sicherstellung der Wirksamkeit der CO2 Einlagerung in den Böden werden ausgearbeitet. Zahlungsmodalitäten geregelt; Öffentliche Abschlussveranstaltung.

Vertragsdokumente (1/2021)
Abschlussverabstaltung (4/2021)
Abschlussbericht (5/2021)

3.1.2 Finanzierungsplan

	Im Jahr 2019	2020	2021	Gesamt- betrag	Förderbeitrag- Badenova*
Personalkosten	64.488,00 €	74.456,00 €	65.760,00 €	204.704,00 €	109.268,00 €
Schwegler Consult	23224	20992	35336	79552	63642
Agentur ANNA	18944	24144	13944	57032	45626
Stadt Freiburg	14080	12160	0	26240	0
Badenova	3840	7040	8960	19840	0
bnNetze	1280	0	0	1280	0
Landwirte	2640	9400	6800	18840	0
Energiepark Hahnnest	480	720	720	1920	0
Kommunikation / Öffentlichkeitsarbeit	2.050,00 €	0,00 €	2.050,00 €	4.100,00 €	1.100,00 €
Schwegler Consult	550	0	550	1100	1100
Stad Freiburg	1500	0	1500	3000	0
Planungskosten	bei Personal - Vorleistungen Projektplanung				
Sachkosten	3.050,00 €	18.850,00 €	11.100,00 €	33.000,00 €	11.400,00 €
Schwegler Consult	2650	6850	3000	12500	11000
Agentur Anna	400	0	0	400	400
bnNetze	0	8100	8100	16200	0
E-Hahnnest	0	3900	0	3900	0
Reisekosten	2.500,00 €	2.980,00 €	1.440,00 €	6.920,00 €	6.560,00 €
Schwegler Consult	1300	800	660	2760	2760
Agentur Anna	1200	2000	600	3800	3800
Energiepark Hahnnest	0	180	180	360	0
Gesamtausgaben	72.088,00 €	96.286,00 €	80.350,00 €	262.164,00 €	128.328,00 €

3.2 Umsetzung der Arbeitspakete

3.2.1 Analyse bestehender Initiativen und regionale Anpassung

Diese Analyse wurde mit dem Bericht vom 25.10.2019 abgeschlossen; Verschiedene CO2-Zertifikathandelsplattformen im deutschsprachigen Raum wurden skizziert und mögliche Anwendung auf das Projekt dargestellt.¹

¹ Analyse bestehender Maßnahmen und Initiativen Projekt „CO₂-Land“ Autoren: Florian Meyer-Busse, Dr. Karl Müller Sämam, Michael Schwegler, Freiburg den 26.09.2019

3.2.2 Vernetzung mit Partnern und Akteuren

Durchgeführte Veranstaltungen, Öffentlichkeitsarbeit und Berichte über die Projektstätigkeit.

Veranstaltung, Veröffentlichungen	Datum	Wo	Format	Agenda	Teilnehmer
Kick-off Veranstaltung	22.07.19	beim Projektpartner Naturgut Siegel, Schallstadt Mengen:	Präsenz	Projektvorstellung, Hofbegehung bei Obstgut Siegel, Gemüse- und Obstbau, der Betrieb stellt seine Maßnahmen zum Humusaufbau vor	Ca. 10, L, F, I
Workshop	25.09.20 19	Veranstaltungsräum Weingut Dilger, Freiburg	Präsenz	8 Fachreferentenbeiträge zu Humusaufbau und Klimaschutz, workshop, Diskussion und Ausblick	Ca. 50, L, F, W, I, K
Sendung	08.10.19	Sendung SWR Aktuell	Radio	Darstellung der Idee von Klimazertifikaten	
Info-Grill Silphie	03.08.20	Feldberg-Müllheim	Präsenz	Feldtag: Vorstellung von durchwachsender Silphie in Zusammenarbeit mit Donau-Silphie	Ca. 20, L, F
Hearing im Landtag Stuttgart	22.09.20	Landtag Stuttgart	Hybrid	7 Expertenreferate, Fragerunde und Diskussion hybrid	Ca. 60, L, F, W, I, K, P
Abschlussveranstaltung	16.07.21	Naturgut Hörnle Schallstadt Mengen	Präsenz	10 Referenten: Vorstellung Projektergebnisse, von regionalen und internationalen Akteuren, von Förderer, von Kunden	Ca. 30, L, F, W, I, K, P
Artikel	24.07.21	Badische Bauernzeitung	Fachzeitung	Vorstellung von Projekt, neuem Verein und Klimazertifikaten	
Internetplattform	Jan. 20	co2-land.org	Webseite	Darstellung vom Projekt, newsletter	
Newsletter	Okt. 20	cleverreach	E-Mail	Informieren über Newsletter	Ca. 150 Empfänger

L=Landwirtschaft, F=Fachverbände, W=Wissenschaft, I=Umwelt und Klimainitiativen, K=Kunden für Klimazertifikate, P=Politik

Aufgebautes Netzwerk, um landwirtschaftliche Akteure zu erreichen und zu mobilisieren:

Cluster	Verband, Organisation	Verbindung zum CO2-Land*
Biolandwirtschaft	Bio-Musterregion	GV
hohe Bandbreite an Landwirtschaftsbetrieben	BLHV Freiburg	GV
Biomasseerzeuger	Silphie-Donau	GV
Flächen in Wasserschutzgebieten	badenova und bnNetze	P
5 Pilotbetriebe mit ca. 200 ha	CO2-Land-Projekt	P
Regenerative Landwirtschaft	DeNae Projekt, Breisach	Ü
Solidarische Landwirtschaft	Ernährungsrat Freiburg	GV
Weinbau	Weingüter	Ü
Miscanthusproduzent mit ca. 500 ha	Misanjo, landwirtschaftl. Dienstleister	P
Aktuell bestehen Absichtserklärungen von landwirtschaftlichen Teilnehmer*innen mit ca. 700 ha Fläche!		

*P=Projektpartner, GV = gemeinsame Veranstaltungen durchgeführt, Ü = Überschneidungen durch gemeinsame Projekte

Mobilisierung von potenziellen Kunden, Erwerb von Klimazertifikaten:

Kunden	Kompensations-Bereiche	Verteiler und Marktplatz	Stand
FWTM Freiburg	Veranstaltungen, Messen	direkt	Unterstützerschreiben liegt vor
badenova	Eigener Energie- und Ressourcenverbrauch	direkt	Unterstützerschreiben liegt vor
Unternehmen und Zivilgesellschaft	Mobilität	App von der DHBW Lörrach: MobilityFootprint4Climate	LOI für App-Entwicklung liegt vor
Zivilgesellschaft	Energie und Ressourcenverbrauch	Ernährungsrat Freiburg	Informelle Kooperation vorhanden
Landeseigene Behörden	Eigener Energie- und Ressourcenverbrauch	Flächenagentur Baden-Württemberg	Unterstützerschreiben liegt vor
Beratungsunternehmen	Veranstaltungen	https://energieagentur-regio-freiburg.eu/	Anfrage existiert

3.2.3 Erarbeitung eines Maßnahmenpakets zum Humusaufbau

In den Böden weltweit deutlich mehr Kohlenstoff gespeichert als in der Atmosphäre und der Vegetation zusammen. Der Erhalt und die Nutzung dieses Speichers für die Einlagerung von CO₂ in Form von Bodenumus ist deshalb von relevanter Bedeutung für den globalen Klimaschutz (FAO,2017). Dies gilt umso mehr als nach jüngeren Untersuchungen (Thünen Institut, 2019) die Böden durch die bereits wirksamen Klimaveränderungen schon heute jährlich 100-200 kg Corg/ha verlieren und dadurch über 400 kg CO₂/ha freisetzen, wenn man bei der Bewirtschaftung nicht aktiv gegensteuert.

3.2.3.1 Allgemeine Richtlinien für eine erfolgreiche Humuswirtschaft

Humus bildet sich aus Pflanzenresten, Wurzelausscheidungen und aus Abbauprodukten des Bodenlebens (Pilze, Bakterien, Kleinlebewesen). Auch durch das Aufbringen tierischer und pflanzlicher Reststoffe und deren Umwandlungsprodukten wie z. B. Stallmist und Kompost wird dem Boden Humus zugeführt. All diesen Stoffen ist gemeinsam und aus Sicht des Klimaschutzes bedeutend, dass sie zunächst durch den Prozess der Photosynthese entstanden sind, bei dem die Pflanzen mithilfe des Lichts CO₂ aus der Atmosphäre einfangen und dieses dann über mehrere Zwischenschritte als Humus im Boden speichern.

Wieviel vom eingefangenen CO₂ als Humus im Boden verbleibt hängt stark ab vom Klima, der Bodenart und der Art der Bewirtschaftung (Kolbe und Zimmer, 2015). Während die ersten zwei Faktoren weitgehend gegeben sind (wir müssen uns allerdings nun gegen den schnellen Wandel des Klimas stemmen) besteht über die Art der Bewirtschaftung die Möglichkeit den Humusgehalt im Boden zu beeinflussen. Innerhalb gewisser natürlicher Grenzen lässt sich ein Boden also in der Weise nutzen, dass durch die Einlagerung von klimaschädlichem CO₂ die Treibhausgase in der Atmosphäre merklich verringert werden.

Damit diese Klimaschutzmaßnahme gelingt, die vor unserer Haustüre mit der Landwirtschaft erfolgreich umgesetzt werden kann, braucht es einen langen Atem. Von zentraler Bedeutung für Humuserhalt und Aufbau ist dabei die langjährige und andauernde Zufuhr organischer Masse und eine angepasste Landnutzung (Harms und Lehrke, 2021).

Wenn der Humusaufbau gelingt, profitieren die Gesellschaft und die Landwirtschaft gleich in mehrfacher Hinsicht davon, denn es dient a) dem Klimaschutz und b) der Verbesserung der Gesundheit unserer Böden. Das Wasserspeichervermögen wird verbessert, sie werden stabiler gegen Erosion, das Bodenleben wird gefördert, die Nährstoffversorgung der Pflanzen und die Lebensmittelqualität verbessern sich. Der Stress durch zunehmend auftretende Klimaextreme wie Trockenheit und Starkregen wird abgemindert und die Ertragsstabilität wird verbessert. Die Biodiversität in der Agrarlandschaft wird mit vielfältigeren Fruchtfolgen zum Humusaufbau verbessert. Untersaaten und Zwischenfrüchte bereichern das Landschaftsbild und fördern die Artenvielfalt. Schadstoffe aus der Umwelt werden über den Bodenumus gefiltert und abgebaut. In der nachfolgenden Abbildung sind die Funktionen der organischen Substanz, die weit über den Klimaschutz hinausreichen noch einmal veranschaulicht.

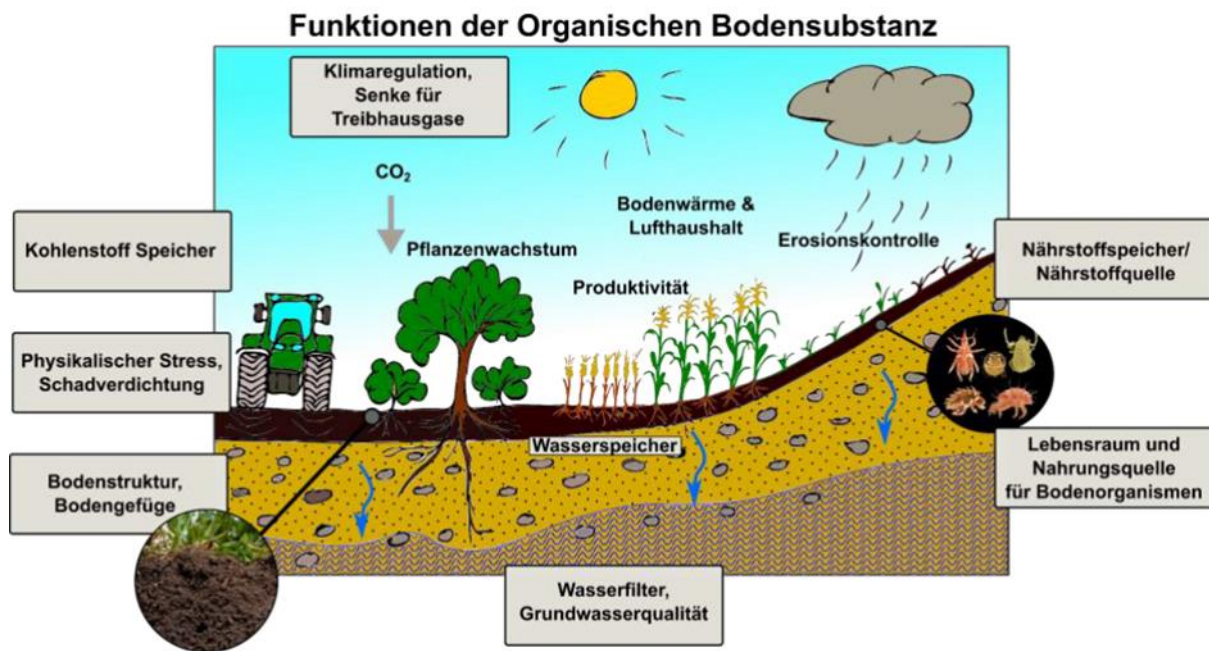


Abbildung 1: Funktionen des Bodenumus im Agrarökosystem (Gentsch, 2018)

Bei der Anwendung von Maßnahmen zum Humusaufbau ist zu beachten, dass Aufbau und Abbau (Mineralisation) von Bodenumus immer gleichzeitig ablaufen und sich bei gleichbleibender Bodenbewirtschaftung in der Regel nach Jahren oder auch erst Jahrzehnten ein standorttypisches Fließgleichgewicht einstellt, bei dem sich Auf- und Abbau die Waage halten. Dieses Gleichgewicht liegt höher in lehmig-tonigen Böden und niedriger bei sandigen und schluffreichen, sogenannten leichten Böden. Bei kühl feuchtem Klima stellen sich höhere Humuswerte ein als bei warmen und eher trockenen Klimabedingungen. Der Unterschied kann 10-30 t Kohlenstoff, allein im Oberboden ausmachen.

In der nachfolgenden Grafik ist der Sachveralt zu Aufbau und Abbau von Humus und dem Erreichen eines neuen Fließgleichgewichts noch einmal grafisch dargestellt. Viele unserer Ackerböden sind nach Jahren intensiver Bodenbearbeitung und zunehmend rein mineralischer Düngung mit langen Brachephasen deutlich unterversorgt, so dass mit anfänglich guten Wirkungen von Maßnahmen zum verstärkten Aufbau organischen Kohlenstoffs (Humus) in den Ackerböden gerechnet werden kann. Siehe auch Kapitel 3.2.5. des Berichts.

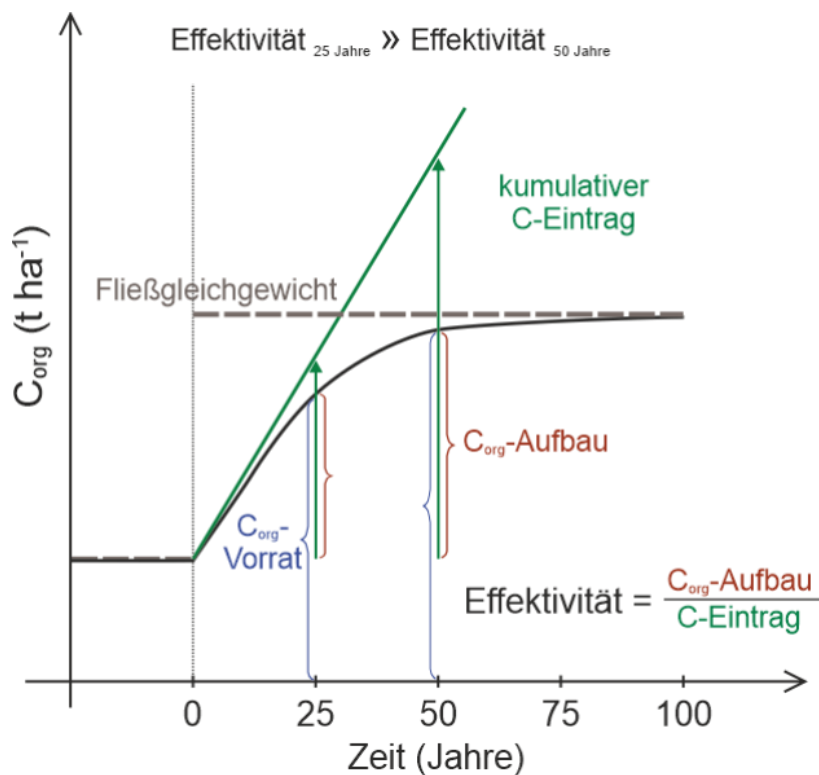


Abbildung 2: Nicht linearer Zusammenhang zwischen dem C-Eintrag (grün) und dem C_{org} -Aufbau (schwarze Kurve) über die Zeit. Die Kurve zeigt eine hohe Aufbauwirkung zu Beginn der humusfördernden Maßnahmen und eine abnehmende Wirkung mit der Annäherung an ein neues Humusgleichgewicht (Wiesmeier et al. 2020).

Intensive Bodenbearbeitung führt in der Regel zum **Abbau von Humus** und zur Freisetzung der darin enthaltenen Nährstoffe. Sie sind wichtig für das Wachstum der Kulturpflanzen und im Biobetrieb die wichtigste Nährstoffquelle. Im konventionellen Betrieb werden Nährstoffe auch vermehrt über leicht lösliche mineralische Düngung zugeführt und die Nachlieferung aus der Mineralisation ist weniger bedeutend. Nur über eine vermehrte Zufuhr lebender und bereits zersetzter organischer Substanz und eine reduzierte Bodenbearbeitung lässt sich das Gleichgewicht in den Böden in Richtung Humuszunahme verschieben. Dieser Prozess ist explizit flächengebunden, d.h. bei einer Umverteilung von C_{org} z.B. durch den Transfer organischer Dünger oder C_{org} -reicher Sedimente von externen Flächen, handelt es sich nicht um eine zusätzliche Sequestrierung von C_{org} (Wiesmeier et al., 2020). Kritisch für den Erhalt und Aufbau von Bodenhumus sind sogenannte Hackkulturen wie zum Beispiel Kartoffel, Kohl und Feldgemüse. Sie führen oft zu einer Abnahme der Kohlenstoffvorräte im Boden und erfordern spezielle Maßnahmen, um dies wieder auszugleichen. Die Humusgehalte nehmen auch ab, wenn Getreidestroh und Erntereste abgefahren werden, anstatt sie auf dem Feld zu belassen oder einzuarbeiten. Aus diesem Grund sollte die Abfuhr von Ernteresten vermieden werden bzw. es sind dann Untersaaten und biomassereiche Zwischenfrüchte zu etablieren, welche die Humusverluste auffangen können.

Förderlich für den Humusaufbau wirken alle Maßnahmen, die auf eine **Beseitigung von Restriktionen und Hemmnissen für das Pflanzen- und Wurzelwachstum** abzielen.

Dazu zählt die Vermeidung und Beseitigung von Bodenverdichtungen (z.B. Tiefenlockerung mit sofort anschließender Zwischenfrucht). Je besser die Durchwurzelbarkeit des Bodens, desto mehr Wurzelbiomasse kommt in den Boden. Gegenüber der oberirdischen Biomasse ist Wurzelbiomasse hinsichtlich der Kohlenstofffestlegung und Humusbildung etwa doppelt so wirksam (Kätterer, 2011). Deshalb kann es bei vorhandenen Verwertungsmöglichkeiten des oberirdischen Aufwuchses als Silage oder Viehfutter sinnvoll sein, die oberirdische frische Biomasse über die Tierhaltung und Stallmistgaben im Kreislauf zu halten und die Wurzel- und Stoppelbiomasse für den Bodenaufbau durch intensiv wurzelnde Kulturen, Gräser und Zwischenfrüchte zu optimieren. Dabei sind Gräser für den Humusaufbau besonders wertvoll, weil ihre feinen Wurzeln viel organisches Material liefern und das Bodenleben füttern. In der Mischung mit Kleearten ist die Humusausbeute besonders hoch und zählt dann zu den wirksamsten Maßnahmen, um im Ackerbau die Humusgehalte zu steigern. Klee-Gras Mischungen können im Rahmen einer Fruchtfolge als ganzjährige Hauptfrucht, als Zwischenfrüchte oder als Untersaaten in die Fruchtfolgen integriert werden.

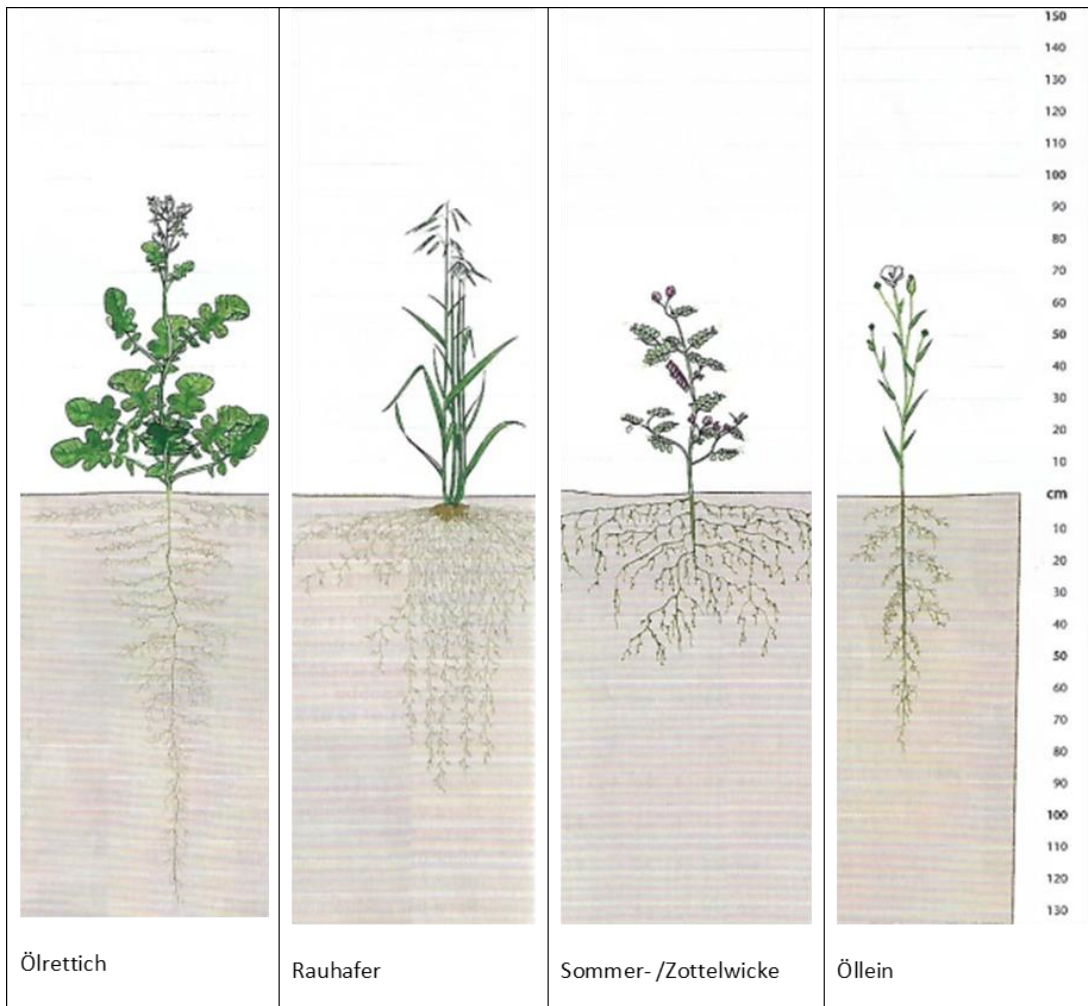


Abbildung 3: Wurzelbilder einiger Zwischenfrüchte (Saatunion, 2021)

Eine ausgewogene Pflanzenernährung mit allen Haupt- und Spurennährstoffen sorgt über hohe Ernten und Biomasseerträge (über und unter der Erde) für einen hohen C-Input / Fläche und damit für ein hohes Angebot an humifizierbarer Biomasse. Sie ist von zentraler Bedeutung für den Erhalt und den Aufbau von Bodenhumus (Riggers, 2021). Weitere Maßnahmen sind der *Erhalt einer guten Bodenstruktur*, die Einstellung eines optimalen Boden pH-Wertes und die Wahl wurzelreicher Kulturen und Sorten.

Stickstoff ist ein wesentlicher Bestandteil von Humus (ca. 6 %) und deshalb braucht es für den Aufbau von Humus ein ausreichendes Angebot im Boden. Stickstoff der über Leguminosen (z.B. in Zwischenfruchtmischungen) in den Boden gelangt ist dabei besonders wirksam (humuswirksamer als mineralisch gedüngter Stickstoff). Mit Depotdüngungsverfahren und ammoniumbetonten Düngerformen kann im konventionellen Betrieb das Wurzelwachstum zusätzlich gefördert werden (Maier und Müller-Sämann, 2018). Einseitig gedüngt, kann Stickstoff den Abbau von Humus auch begünstigen oder, wie bei unausgewogener Nährstoffversorgung allgemein, unwirksam bleiben. So fanden Crowther et al. (2019), dass N und P Dünger alleine oft keinen Zuwachs an Humus im Grünland bewirken konnten und erst mit einer zusätzlichen Kalium- und Mikronährstoffdüngung der Humusgehalt in Grünlandböden deutlich verbessert wurde. Die Humusausbeuten pro Biomasseeinheit waren bei guter Kaliumversorgung höher.

Bei der **Einarbeitung von Biomasse** muss darauf geachtet werden, dass keine Fäulnis entsteht und die Biomasse oberflächlich eingemischt wird. Bisweilen wird im Rahmen von Programmen zur regenerativen Landwirtschaft auch das Ausbringen von Milchsäurebakterien/ Rottelkernen auf die einzuarbeitende Biomasse empfohlen (Näser, 2020), ob dies zur Verbesserung der Humusausbeuten beiträgt, ist aber noch unzureichend untersucht. Das Einmischen mit Strohresten der Vorfrucht ist vorteilhaft. Die Einarbeitung von frischer Zwischenfruchtbiomasse in schon erwärmten Boden im späten Frühjahr kann auch zum Abbau von Humus führen (Roper et al. 2019) und als Folge einer starken Sauerstoffzehrung die Freisetzung von klimawirksamen Lachgas begünstigen (Seitz et al. 2016). Die Einarbeitung in noch kühlen Boden zum Ende des Winters ist günstiger. Auch sollte bis zur Saat der Folgekultur ein ausreichender Abstand von wenigstens drei Wochen eingehalten werden.

Zwischenfruchtmischungen sollten nicht zu viel Leguminosen (kleeartige Pflanzenarten) enthalten, da bei hohen Leguminosenanteilen durch die Kombination von viel Stickstoff und leicht verfügbarem Kohlenstoff (z. B. Stärke und Zuckerverbindungen) mit einhergehender Sauerstoffzehrung im Boden auch hohe Lachgasemissionen (Seitz et al. 2016) und mögliche Nitratausträge ins Grundwasser entstehen können. Sie neutralisieren dann den positiven Effekt der Einsparung von mineralischen Düngern. Deshalb sollte der Kleeanteil in Zwischenfruchtmischungen nicht größer als 30 % sein.



Abbildung 4: Artenreicher Zwischenfruchtbestand

Wo immer möglich sollte der Boden permanent bewachsen sein und es sollten Mischungen unterschiedlicher Zwischenfrüchtpflanzen (Kräuter, Gräser und kleeartige Pflanzen) mit unterschiedlichen Wurzelsystemen und Wuchseigenschaften als Zwischenfrüchte zum Einsatz kommen. Zwischenfruchtbestände und Untersaaten bilden dann ein intensiveres Wurzelwerk und der Humusaufbau verläuft effizienter. Wie Untersuchungen von Gentsch et al. (2018) beim Vergleich einer einfachen Zwischenfrucht mit mehrartigen (4) und vielartigen Zwischenfrüchten (12) zeigen konnten, wurde mit einfachen und komplexen Mischungen 24 % und 33 % mehr Wurzelbiomasse gebildet. Die Menge an CO₂, die aus der Luft zu den Wurzeln und den Mikroorganismen im Boden transferiert wurde, war mehr als doppelt und dreifach so groß (Abbildung unten).

Die Anwendung von **Biokohle** (zugelassen ist nur pyrolytisch - aus unbehandeltem Holz hergestellte Pflanzenkohle), die stets schadstofffrei, zertifiziert (EBC) und nach Möglichkeit auch schon nährstoffbeladen bzw. aktiviert sein sollte, kann auf zweierlei Art zum Aufbau eines C Speichers im Boden beitragen. Zum einen ist die durch Pyrolyse entstandene Kohle nahezu inert und wird im Boden quasi nicht abgebaut, zum anderen und da setzt ihre Rolle beim klimawirksamen und anrechenbaren Humusaufbau an, wirkt sie – vermutlich über raue Oberflächenstrukturen und poröse Eigenschaften- wie ein Katalysator beim Humusaufbau und schützt die an der Oberflächenstruktur gebildeten Huminstoffe vor erneuter Mineralisierung. (Kögel-Knabner et. al. (2008) konnten solche Effekte bei Tonmineralen beobachten. Bei Versuchen in den USA konnte beim Anbau von Biomassepflanzen gezeigt werden, dass nach der Zugabe von 7 t Biokohle diese Böden nach 6 Jahren 7 t zusätzlichen Corg in 0-30 cm Bodentiefe eingelagert hatten, während der Zuwachs ohne Biokohle nur 2,3 t Corg /ha entsprach (Blanco-Canqui et al., 2020). Allerdings ist zertifizierte Biokohle zu teuer, um sie wirtschaftlich in diesen Mengen einsetzen zu können. Als Maßnahme wird deshalb empfohlen die Biokohle zum Beispiel über die Einstreu in Ställen oder als Zuschlag zu Komposten einzusetzen, wo

sie noch zusätzlichen Nutzen durch die Verminderung unerwünschter Emissionen bringt (Manka'abusi et al. 2018). Im Projekt wurde ein Zuschlag von einem Volumen % zum Grünschnitt-Hühnermist-Kompost verabreicht, was in etwa 3,2 kg/m³ Kompost entsprach.

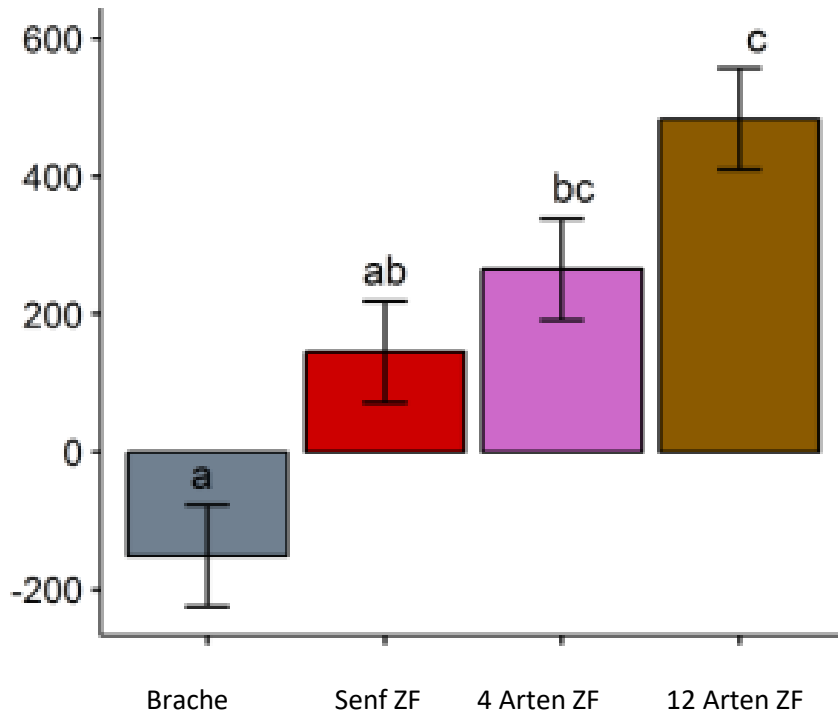


Abbildung 5: Netto C Assimilation (mg C m⁻² h⁻¹) von unterschiedlichen Zwischenfruchtbeständen (ZF) gegenüber einer Schwarzbrache (Gentsch et al., 2018).

Zusammenfassend lassen sich aus den angeführten Studien und Ausführungen, die in der nachfolgenden Info-Box aufgeführten Leitkriterien ableiten.

Leitkriterien für eine humusmehrende Bewirtschaftung von Ackerflächen

- Erntereste auf dem Feld belassen und gut aufbereitet flach einarbeiten
- Organische Düngung nicht vernachlässigen => Kreislaufwirtschaft
- ganzjähriger Bewuchs und Bodenbedeckung (inklusive Zwischenfrüchte, Untersaaten) für hohe Biomasse- und C- Einträge in die Böden
- Beseitigung von Hemmnissen für optimale Erträge und gute Bodendurchwurzelung
- Erhöhung der Biodiversität innerhalb der Fruchtfolge und bei Zwischenfrüchten
- Stimulierung der Mikrobiellen Biomasse / des Bodenlebens
- begrenzter Einsatz von poren- und strukturreicher Pflanzenkohle als Humuskatalysator
- reduziert Bodenbearbeitung

Neben der Erarbeitung allgemeiner Leitkriterien ist von Interesse, wie sich einzelne Maßnahmen auf die Humusdynamik auswirken und ob es gesicherte Daten zur Wirkung konkreter Einzelmaßnahmen

gibt. Nach dem Studium einschlägiger Literatur und unter besonderer Berücksichtigung von Langzeituntersuchungen zur Humuswirkung von Bewirtschaftungs- und Düngungsmaßnahmen konnte diesbezüglich ein vorläufiger Katalog von Maßnahmen mit zu erwartenden Werten für den jährlichen Humusaufbau zusammengestellt werden (nachfolgende Tabelle). Dieser Maßnahmenkatalog diene und dient als Grundlage und Orientierung für die Entwicklung regional angepasster Maßnahmen zum Humusaufbau und wird in den kommenden Jahren bei der Implementierung des regionalen Humuszertifikatehandels nach dem jeweiligen Stand der Wissenschaft laufend aktualisiert- und erweitert werden.

Beispielhafte Maßnahmen zum Humusaufbau und zur Treibhausgasminde rung durch die Schaffung von Senken zur C-Einlagerung in Ackerböden. ¹⁾

Maßnahmen	CO2 Einlagerung pro ha und Jahr (t CO2 äq.)
verbesserte Fruchtfolge	0,6
2 Jahre Ackergras in einer 5 Jahres Fruchtfolge	0,6
Stroh-Einarbeitung; 3.77t TM/ha/Jahr	0,6
Konsequente Gründüngung Mischungen; 4.23t TM/ha/Jahr	1,1
Zwischenfrucht jährlich	1,2
Rotation Legumiosen (Einarbeitung)	1,6
Rotation mit Luzerne Klee gras	2,1
Stallmist frisch; 4.75t TM/ha/Jahr	2,5
Miscanthus (mehrjährig)	3,7
Silphie Dauerkultur für Biogas	2-4 (geschätzt)

1) Quellen: Wiesmeier 2017, Tiedäcker et al. 2014, Wiesmeier et al 2020, Poeplau & Don 2015, Kätterer 2011, Drinkwater et al. 2001, Gregorich et al 2001, Müller-Sämman & Hölscher 2010),

3.2.4 Implementierung auf Pilotflächen

Ziel der Klimakooperation zwischen Käufern von Zertifikaten und den Landwirten vor Ort ist die Mobilisierung des Potenzials ackerbaulich genutzter Böden als CO2-Senken. Dazu müssen die Betriebe die Bewirtschaftung ihrer Ackerflächen modifizieren und zusätzliche, auch kostenwirksame Maßnahmen durchführen, die auf einen Anstieg der Humusgehalte im Boden abzielen. Dazu konnten sie aus den vom Projektteam erarbeiteten Katalog von Maßnahmen zurückgreifen oder auf Basis der erarbeiteten Leitlinien auch zusätzliche und abgewandelte Maßnahmen umsetzen, die dann im Rahmen eines Hofgesprächs zwischen dem Projekt und dem Betrieb in einem Prozess gegenseitiger Beratung präzisiert und definiert wurden.

Dabei galt es zum einen die möglichen Vorteile bestimmter Maßnahmen bezüglich des Humusaufbaus und anderer Nachhaltigkeitsziele aufzuzeigen, zum anderen galt es auf Hemmnisse für die Umsetzung der Maßnahmen einzugehen. Diese berührten organisatorische, technische, finanzielle, rechtliche und rein handwerkliche Aspekte. So musste zum Beispiel bei der Implementierung leistungsfähiger Untersaaten in der Saatmais -Kartoffelfruchtfolge eines Pilotbetriebes zunächst geklärt werden, welche Zwischenfruchtarten aus Sicht einer effizienten Krankheits- und Schädlingskontrolle in dieser Fruchtfolge überhaupt möglich sind. Es galt zu klären, ob

die erforderliche Technik für die Untersaat von Mischungen mit Samen unterschiedlicher Größe vorhanden war. Gibt es dazu dazu bezahlbare Mischungen am Markt zu kaufen und wenn ja, erfüllen diese die rechtlichen Anforderungen an die Agrarumweltprogramme? Können sie im Rahmen der Auflagen, die in einem Wasserschutzgebiet für Saat- und Bodenbearbeitungstermine gelten umgesetzt werden? Gibt es die entsprechende Technik im Betrieb, um die Biomasse auch angemessen und fachgerecht zu zerkleinern und einzumischen, so dass der Humusaufbau gefördert und nachfolgende Kulturen nicht beeinträchtigt werden.

Nur über so einen Dialogprozess gelang es in der Regel zu betrieblich angepassten Lösungsansätzen zu kommen, die im regionalen Kontext auch möglichst langjährig und zielführend umgesetzt werden können.

In der nachfolgenden Abbildung sind tabellarisch die 5 Pilotmaßnahmen zusammengestellt, die im Rahmen des Projekts als Pilotaktivitäten auf den teilnehmenden Betrieben implementiert wurden. Sie dienten auch für die Messungen und den Test des Untersuchungs- und Monitoringprogramms.

Das in der übernächsten Abbildung dargestellte Flussdiagramm zur Saatmais- Kartoffelfruchtfolge zeigt schematisch zusammengefasst die mit dem Betrieb vereinbarte Fruchtfolge. Es ist ein Hilfsmittel zur konkreten Visualisierung der getroffenen Vereinbarungen und erleichtert die Umsetzung humusmehrender Bewirtschaftungsmaßnahmen. Das dabei festgehaltene Vorgehen ist Grundlage für die Teilnahme am Zertifizierungsprogramm und am Zertifikatehandel. Änderungen und Abweichungen, die sich aus veränderten betrieblichen Rahmenbedingungen ergeben, können nach Absprache auch bei einem bereits bestehenden Vertrag vorgenommen werden und werden in einem aktualisierten Protokoll festgehalten.




Pilotmaßnahme	
<p>1. Luzerne - Mais – Kartoffel -Getreide FF mit konsequenter Zwischenfrucht & Biokohle Kompost (Hühnermist /Grünschnitt) <i>Betrieb Bauer Bächle, Albruck –Albert Konv.</i></p>	
<p>2. Regenerationsfläche Wickroggen mit 2 Silageschnitten /Jahr & Silagemulch im angrenzenden Intensiv - Gemüseanbau (Paprika/Zucchini) <i>Betrieb Naturgut Hörnle, J. Siegel Mengen Bio.</i></p>	
<p>3. Saatmais - Saatmais - Frühkartoffel Intensiv- Fruchtfolge mit verbesserter Gemenge-Untersaat & früher Zwischenfrucht nach Frühkartoffel <i>Betrieb R. Müller, Bad Krozingen-Biengen Konv.</i></p>	
<p>4. Klee gras 2-jährig im Milchviehbetrieb mit Weizen – Hafer Fruchtfolge und 1* Mistdüngung und Untersaat <i>Betrieb M. Reichenbach, FR-Ebnet, Bio.</i></p>	
<p>5. Anlage einer Silphie Dauerkultur für Biogas (und Fasergewinnung) <i>Betrieb A. Deckert, Müllheim-Feldberg Konv.</i></p>	

Abbildung 6: Übersicht zu den im CO2-Land Projekt implementierten Pilotmaßnahmen zum Humusaufbau

J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F M A M J J A S O N D J F
 Szenario Saatmais -Kartoffel Fruchtfolge im WSG (viehlos) -Fruchtfolgezyklus-

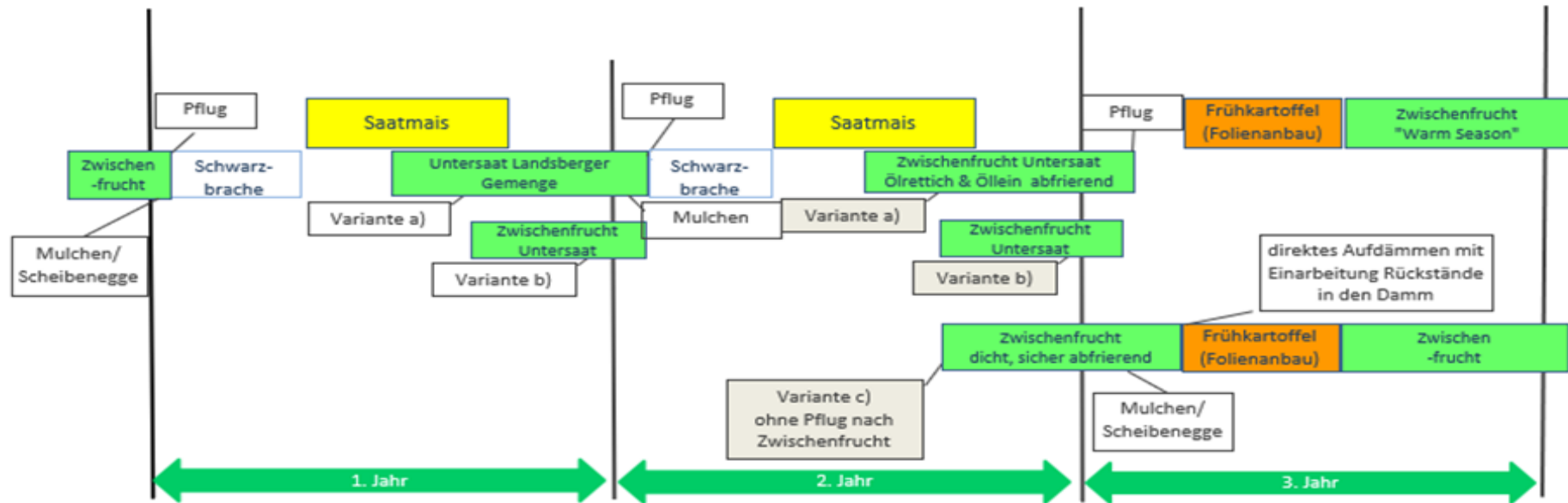


Abbildung 7: Schematische Darstellung zu vereinbarten Maßnahmen zur Verbesserung der Humusbilanz in einer Intensivfruchtfolge mit Saatmais- und Kartoffelanbau. Ernterückstände werden belassen.

Zu jeder Maßnahme wurde ein Protokoll erstellt, in dem die Maßnahmen und Hypothesen zur verbesserten Bewirtschaftung zusammengefasst wurden und das beiden Partnern (Landbewirtschafter und CO₂- Land Projektbearbeiter) in identischer Form zur Orientierung vorliegt. Dies erfolgte mit dem Ziel auf einer gemeinsam vereinbarten, definierten – nicht starren- Grundlage zusammen arbeiten zu können. In Anlage 8.1 des Berichts ist ein solches Protokoll beispielhaft angefügt.



Abbildung 8: Maßnahme Zwischenfruchtuntersat mit Landsberger Gemenge in Saatmais für einen verbesserten Humusaufbau in der Mais-Mais-Kartoffel Fruchtfolge am 10.09.2020 (links) und am 5.11.2020 (rechts). Die Mischung ist winterhart, wächst auch noch an warmen Wintertagen und wird erst im Februar mit dem verbliebenen Maisstroh eingearbeitet.

3.2.5 Skalierung und Monitoring

Auf den sieben Flächen, auf denen bei den teilnehmenden Betrieben die oben beschriebenen Pilotmaßnahmen umgesetzt wurden, fanden auch die Messungen und Erhebungen zur Bestimmung der Humusgehalte statt. Ziel dieser Untersuchungen war es, sich einen Überblick über die Humus-situation auf unterschiedlichen Flächen zu verschaffen. Darüber hinaus sollten die Beprobungs – und Labormethoden im praktischen Einsatz geprüft werden. Ausserdem sollte geprüft werden, ob die Methoden robust genug sind, um reproduzierbare Werte zu liefern und welche Beprobungsdichte notwendig ist, um zu aussagefähigen Ergebnissen zu kommen, die sich im Rahmen eines Humus-monitoring mit Zertifikatehandel anwenden lassen.

Methodisches Vorgehen: Hierbei war zunächst zu beachten, dass die Humusgehalte in einem Ackerboden auch innerhalb eines Feldes starken Schwankungen unterliegen können. Dieser Sachverhalt ist in der nachfolgenden Abbildung am Beispiel einer Ackerfläche in Triesdorf/Bayern deutlich nachvollziehbar dargestellt, auf der die Gehalte zwischen 0,8 und 1,5 % Corg im Oberboden schwankten.

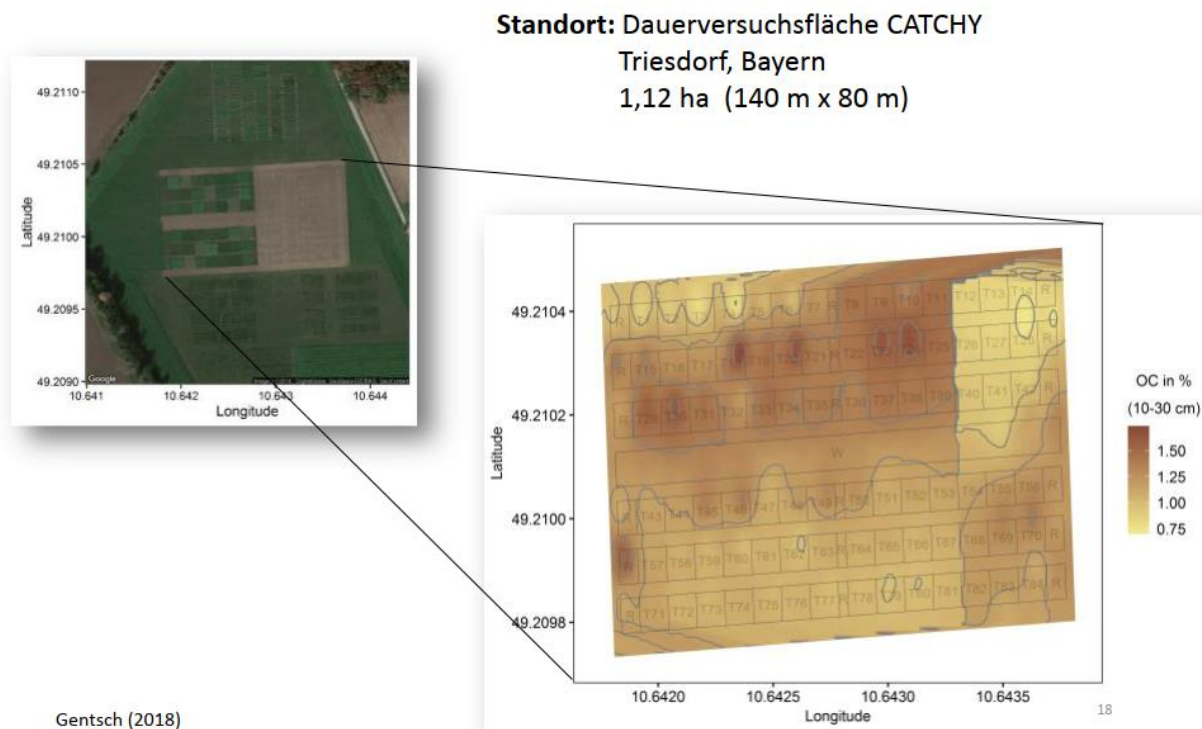


Abbildung 9: Variabilität der Humusgehalte in einem Ackerboden bei Triesdorf (zit. in Gentsch, 2018)

Aus diesem Grund und wegen eines verbleibenden methodischen Messfehlers bei der Analyse, der nach Angaben des beauftragten Labors bei ca. 0,03 % Corg liegt (Siegmond, IAU Freyberg pers. Information) können geringe Veränderungen der Humusgehalte in Ackerböden, die auch nach drei bis vier Jahren häufig bei weniger als 1300 kg Corg ha oder nur 0,04 % des Bodengewichts liegen, nur dann festgestellt werden, wenn die gleichen Messstellen genau wieder gefunden werden.

Mit dem Projektpartner **bnNetze** wurden deshalb alle sieben Pilotflächen mit einem GIS kartiert und die Messtellen wurden präzise georeferenziert eingemessen.

Des Weiteren wurden die Messungen jeweils im ausgehenden Winter (Mitte Februar bis Anfang April) im abgesetzten Boden vor der Durchführung von Düngemaßnahmen und frühestens zwei bis drei Wochen nach einer Bearbeitung durchgeführt. Da es auch jahreszeitliche Schwankungen im Humusgehalt gibt und während der Vegetationszeit auch sehr labile, kurzlebige Humusformen (z. B. Mikroorganismen und Wurzelausscheidungen) auftreten, sind Analysen um diese Jahreszeit ausagekräftiger und lassen sich über die Jahre auch besser vergleichen.

Dieser Sachverhalt konnte im Projekt gut illustriert werden durch den Vergleich der C/N Verhältnisse einer typischen Winterbeprobung (Standort Ebnet) mit einer situationsbedingt späten Beprobung in einem jungen Bestand der Dauerkultur Silphie Anfang September (Standort Feldberg). Während bei der Winterbeprobung unter Klee gras ein relativ typischer C/N Wert des Humus ermittelt wurde, ergaben die Analysen bei der Sommerbeprobung stark streuende Werte und auch untypisch enge C/N Verhältnisse traten vermehrt auf.

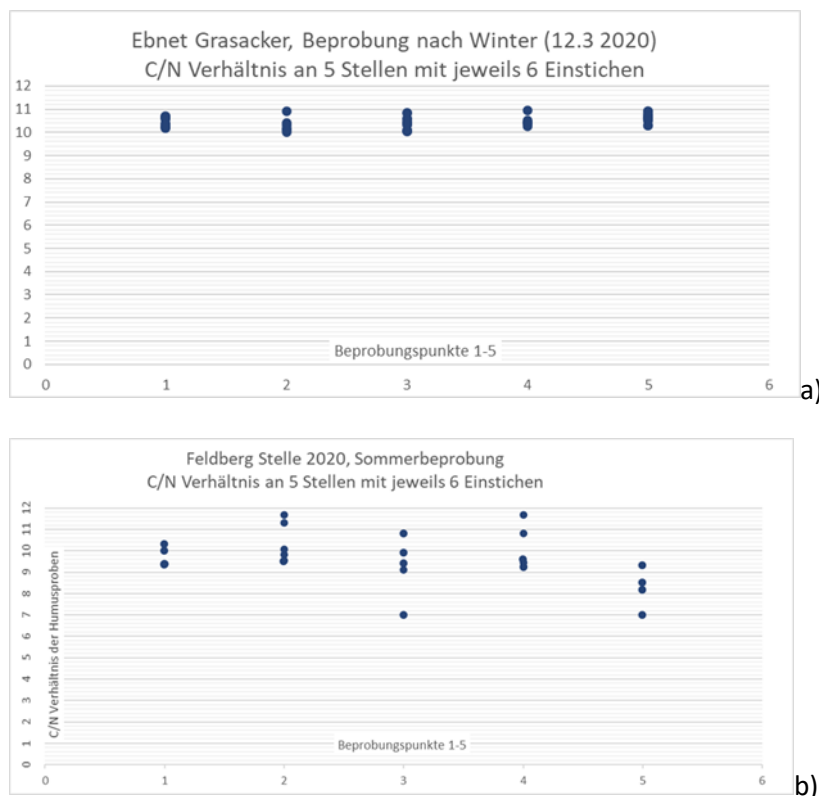


Abbildung 10: Streuung der C/N Verhältnisse der Humusanalysen bei Winter- und Sommerbeprobung auf zwei bewachsenen Pilotflächen des CO₂-Land Projekts.

In Anlehnung an Kartiererfahrungen zur Humusdynamik in Bayern (Capriel, 2010) wurden auf den Pilotflächen jeweils **5 Messpunkte pro Schlag** mit einem DGPS zentimetergenau eingemessen und georeferenziert dokumentiert. Um diese 5 Messpunkte herum wurden mit einer Schablone jeweils 6 Einstichpunkte markiert und einzeln beprobt, so dass pro Schlag 30 Bodenproben in einer Bodentiefe von 0-30 cm ausgewertet werden konnten. (siehe nachfolgende Abbildung).

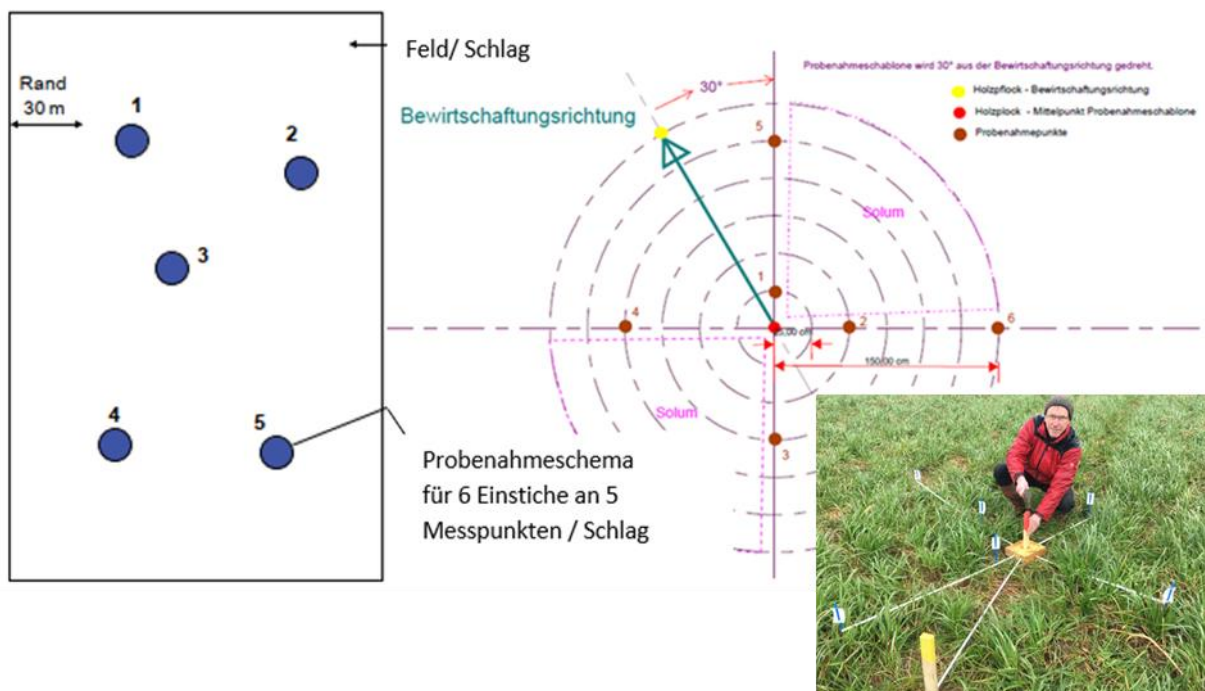


Abbildung 11: Schema der Bodenprobenahme für die Humusuntersuchungen mit Anwendung der Beprobungsschablone im Feld.

An den 5 Messpunkten (in den Feldern mit der Bezeichnung Solum, die nicht betreten wurden) wurde auch die **Lagerungsdichte** der Böden mit Stechzylindern für die Horizonte 0-15 cm und 15-30 cm bestimmt. Die Bestimmung erfolgte mit 2 Wiederholungen an jeder Messstelle durch das Bodenlabor *Solum*, Freiburg. Die ermittelten Werte für die Rohdichte der Böden werden für die Umrechnung der Humusgehalte der Böden auf die Humusmasse in kg/m² bzw. t/ ha benötigt. Da die Ableitung der Lagerungsdichten aus Pedotransferfunktionen fehleranfällig ist, sollte dies bei der Methodenentwicklung im Projekt ausgeschlossen werden. In einem Fall kam dabei wegen der hohen Steinanteile auch die Volumenersatzmethode zum Einsatz, bei der eine Grube ausgehoben wird und dann das Volumen der Grube, die Steinanteile und die Zusammensetzung des Feinbodens bestimmt werden.

Für jeden Messpunkt wurden auch der Steinanteil (Bodenskelett mit Durchmessern > 2mm) und die Anteile von Ton, Schluff und Sand im Feinboden mittels Schlemmanalyse bestimmt. Letzter gibt Auskunft über die Bodenart. Die **Bodenart** (z.B. sandiger Boden oder lehmiger Ton) hat starken Einfluss auf das Vermögen der Böden Humus aufzunehmen und einzulagern und kann herangezogen werden, um abzuschätzen wieviel Humus ein Boden noch aufbauen kann (= Senkenpotenzial für die Aufnahme von CO₂), bis er ein neues Fließgleichgewicht erreicht (siehe dazu auch die Tabelle mit den Abschätzungen der Potenziale auf den untersuchten Pilotflächen in diesem Kapitel). Nach Erreichen eines standorttypischen Fließgleichgewichts wird es ineffektiv oder umweltbelastend, wenn weiterhin versucht wird durch vermehrte Zufuhr organischer Masse noch zusätzliche Gehaltssteigerungen zu bewirken (Wiesmeier et al. 2020).

Neben der Probenahme, die nur bei exakter Wiederfindung der Beprobungspunkte eine mittelfristige Verfolgung kleiner Veränderungen im Humusgehalt eines Ackerbodens erlaubt, ist die Wahl einer geeigneten Labormethode für das Humusmonitoring von entscheidender Bedeutung. Aus Sicht des CO₂-Land Projekts sollte die Methode zur Bestimmung der Humusgehalte bzw. des Corg in den Böden einerseits einfach umsetzbar und kostengünstig sein, andererseits sollte die Methode praxisüblich sein und möglichst genaue und reproduzierbare Werte liefern und einen geringen methodischen Fehler aufweisen.

Als Methode zur Bestimmung der Corg Gehalte im Labor kam die Methode der automatisierten Trockenverbrennung zur Anwendung (englisch ADC Automated Dry Combustion). Hierbei werden die zuvor gründlich aufbereiteten Bodenproben kontinuierlich über einen längeren Zeitraum erhitzt und das dabei freigesetzte CO₂ aus der organischen Substanz wird in einem automatisierten C/N Analysator gemessen (z.B. Elementaranalysator LECO). Die Corg bzw. Humusbestimmung mit der Messung der thermal oxidierten organischen Bodensubstanz (Labormethode nach DIN EN 15936) liefert nach vergleichenden Untersuchungen gut reproduzierbare Ergebnisse und lässt sich auch auf unterschiedlichen Standorten mit vergleichbaren Ergebnissen anwenden (Roper et al. 2019).

Nach Abschluss der zwei Beprobungskampagnen 2020 und 2021 lagen damit zu 216 Beprobungspunkten sehr detaillierte und umfangreiche Analysen von den 7 Standorten vor, die es erlaubten, das methodische Vorgehen zu bewerten, Aussagen zum erforderlichen Beprobungsumfang zu treffen und um die Potenziale der Böden für den Humusaufbau und damit das Senkenpotenzial für den Klimaschutz abschätzen zu können.

Der Vorrat der Böden an Corg bzw. Humus wurde auf Grundlage der eigenen Messungen und Laboranalysen nach der nachfolgenden Formel berechnet:

$$\text{Corg Vorrat} = \text{Corg Gehalt} \times \text{LD} \times \text{T} \times (1-S) \times 100$$

Corg Vorrat (t ha⁻¹), Corg Gehalt (Masse %), Lagerungsdichte LD (g cm⁻³), Beprobungstiefe T (30 cm), Steinanteil S (Partikel größer 2 mm in g kg⁻¹)

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der Bodenuntersuchungen wiedergegeben (Tabellen mit detaillierten Messergebnissen finden sich im Anhang in Kapitel 8.)

Wie in der nachfolgenden Abbildung am Beispiel zweier Projektstandorte gezeigt werden konnte, existieren innerhalb des Projektgebiets Ackerböden mit sehr unterschiedlichen Humusgehalten. Während es bei dem intensiv genutzten, konventionell bewirtschafteten Standort Anzeichen von deutlicher Humusverarmung gibt, liegen die Humuswerte beim extensiver mit einer Feldgras/Acker Fruchtfolge genutzten Standort mit periodischer Stallmistdüngung auf einem sehr hohen Niveau.

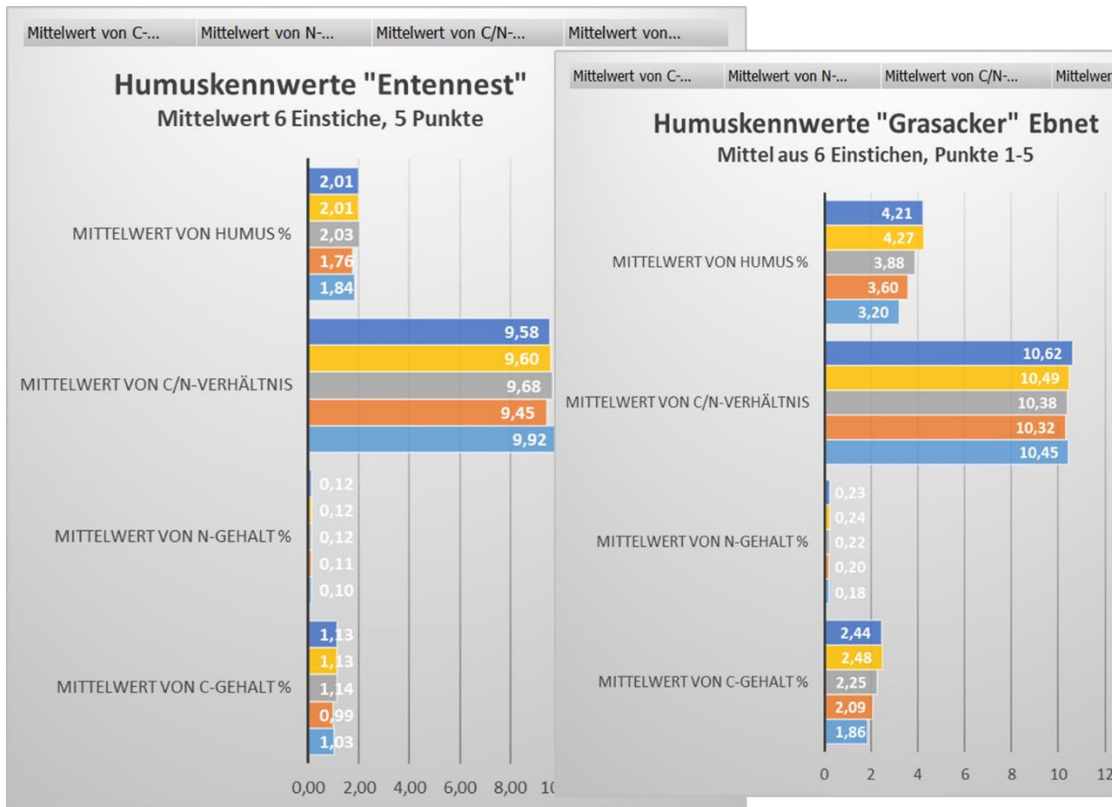


Abbildung 12: Humuswerte an 5 Messpunkten auf einem langjährig konventionell ackerbaulich mit Hackkulturen und Beregnung genutzten Standort (Entennest, sLU) und einem langjährig im Wechsel mit Kleegrasbrachen genutzten Acker eines Bio-Betriebs mit Stallmistdüngung (Grasacker, uLS).

In den nachfolgenden Abbildungen sind die zusammengefassten Analysewerte der Humusgehalte bzw. Corg Gehalte, der N Gehalte und der C/N Verhältnisse der organischen Substanz für alle Projektstandorte mit ihrer Streuung um die 5 Messpunkte (Mittelwert aus sechs Einstichen) wiedergegeben. Sie weisen eine hohe Streubreite zwischen den Standorten und zum Teil auch innerhalb der Felder auf.

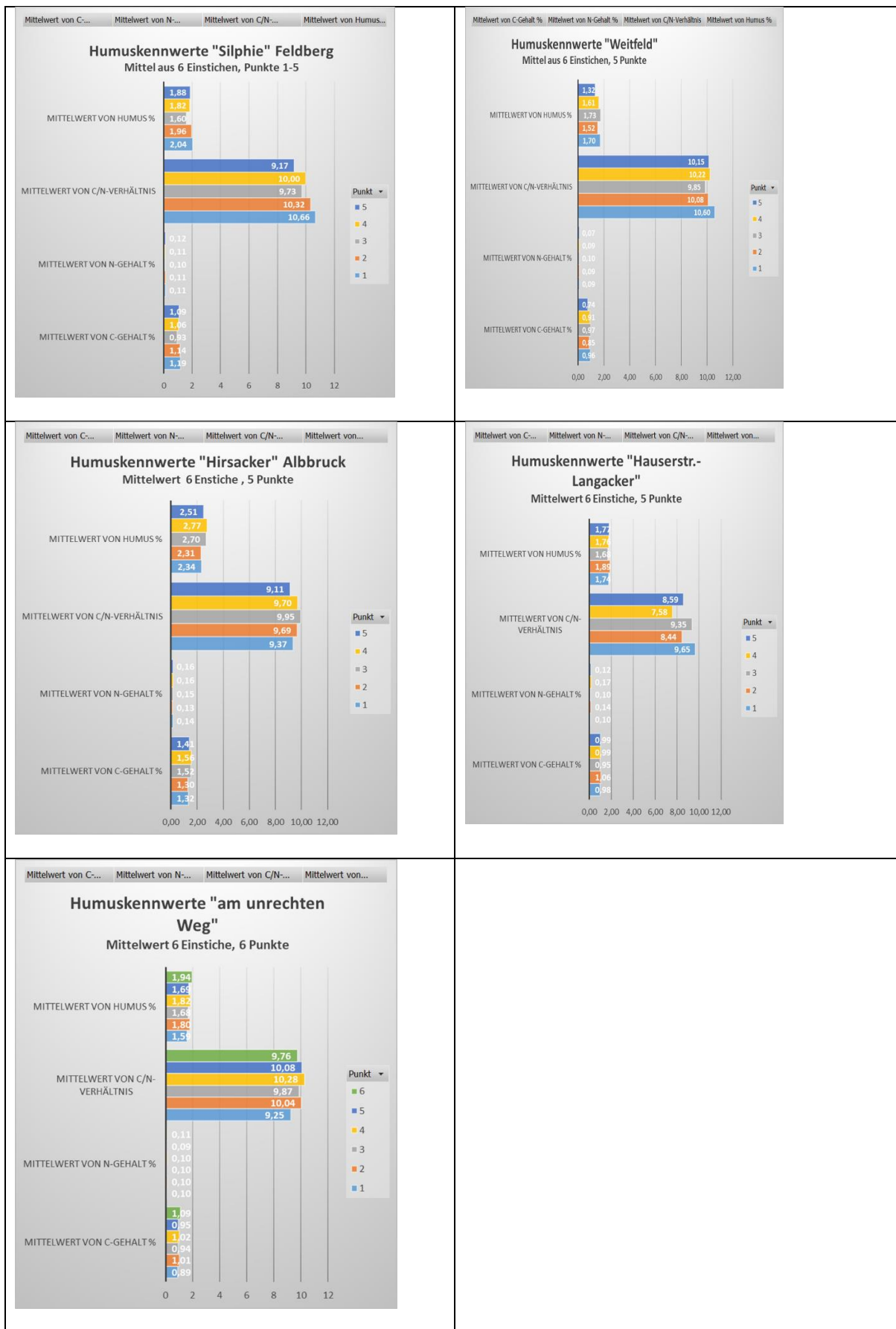


Abbildung 13: Ergebnisse der Humusbestimmungen auf den Pilotflächen

Wie sich bei der Analyse der Messergebnisse der jeweils 30 Messwerte der einzelnen Schläge ferner ergab, können repräsentative Werte, die eine belastbare Einschätzung des Corg Vorrats dieser Flächen ermöglichen auch mit geringerem **Probenumfang** erzielt werden. Wie ein Blick auf die Standardabweichungen in der nachfolgenden Tabelle zeigt, verbessert sich der Wert nicht mehr signifikant, wenn anstelle von 3-4 Einstichen pro Messpunkt 6 Messpunkte beprobt werden. Mit drei bis vier Einstichen lässt sich demnach ein ähnlich aussagefähiges Ergebnis erzielen. Dies deckt sich mit Empfehlungen des Verbands Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V von 1991 (zit. In Wiesmeier et al. 2020), wonach zur Humusbestimmung „eine repräsentative Mischprobe aus mindestens 15 über den Schlag verteilten Einstichen pro Hektar genommen werden sollte“.

Bei Standardbeprobungen zu Bestimmung der Humusgehalte werden deshalb in Zukunft 15- 16 Einstiche pro Schlag empfohlen.

**Humusgehalte auf Pilotflächen und Streuung der Werte
in Abhängigkeit von Anzahl der Teilproben an den 5 Messpunkten**

Pilotstandort	Anzahl der Einstiche	Mittelwert % Humus	Standard- abweichung
Entennest	6	1,93	0,12
Entennest	5	1,92	0,13
Entennest	4	1,92	0,13
Entennest	3	1,89	0,12
Entennest	2	1,89	0,14
Entennest	1	1,91	0,15
Hauser Strasse	6	1,77	0,07
Hauser Strasse	5	1,78	0,09
Hauser Strasse	4	1,76	0,08
Hauser Strasse	3	1,73	0,07
Hauser Strasse	2	1,76	0,05
Hauser Strasse	1	1,74	0,09
Unrechter Weg	6	1,75	0,12
Unrechter Weg	5	1,77	0,12
Unrechter Weg	4	1,76	0,12
Unrechter Weg	3	1,77	0,12
Unrechter Weg	2	1,8	0,18
Unrechter Weg	1	1,83	0,21

Ein weiteres wichtiges Ziel der Untersuchungen war es, anhand der Ergebnisse aus den Messungen die Kohlenstoffvorräte der Ackerböden in 0-30 cm zu beschreiben und das Potenzial abzuschätzen, das die Böden zur Humusanreicherung als CO₂ Senken für den Klimaschutz haben. Dazu wurden Richtwerte aus umfangreichen Feldstudien in Bayern herangezogen, die es erlauben Standort-typische Humuswerte für bestimmte Höhenstufen (Feuchteverhältnisse) und Bodenarten zu formulieren. Sie können, da sie unter historischen Landnutzungsszenarien entstanden sind, als

konservativ geschätzter Bezugsrahmen für einen guten Humusstatus herangezogen und als untere Grenze eines Fließgleichgewichts betrachtet werden. Demnach sind humusaufbauende Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Festlegung von atmosphärischem CO₂ als Bodenumus *zumindest* bis zum Erreichen dieser Werte umsetzbar. Je weiter ein Boden davon entfernt ist, desto schneller und umfangreicher kann er Corg einlagern. Je näher er dem Fließgleichgewicht kommt, desto schwieriger oder langsamer wird der zusätzliche Humusaufbau.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse für die Standorte des CO₂ Land Projekts zusammenfassend dargestellt. In den Spalten mit dem Sättigungsdefizit sind die Schätzwerte für das Sequestrierungsvermögen der Böden ausgewiesen.

Humusstatus von Pilotflächen CO ₂ -Land -- und Sequestrierungspotenziale								
Einschätzung anhand von empirischen C Erwartungswerten in Ackerböden ¹⁾								
Pilotfläche	Rohdichte ^{*)}		Ø C-Gehalt	C-Gehalt	Erwartungs-	Sättigungs-	Sättigungs-	Aufbau-Jahre
	Boden	Bodenart	% TM	t C _{org} /ha	wert	defizit in t C _{org} /ha	defizit in t CO ₂	Annahme
	g/cm ³		0-30 cm	0-30 cm	C-Gehalt ¹⁾	0-30 cm	0-30 cm	+ 0,35 t C _{org} /Jahr
Grasacker	1,39	uIS	2,22	93	2,22	0	0	0
Entennest	1,51	slU	1,08	49	1,3	10	37	28
Hauserstrasse	1,44	slU	0,99	43	1,3	13	49	38
Weitfeld	1,55	tU	0,89	41	1,5	28	104	81
unrechter Weg	1,5	tU	0,99	45	1,5	23	84	66
Hirsacker	1,32	sU	1,42	56	1,4	-1	-3	-2
Feldberg	1,5	Ut	1,02	46	1,6	26	96	75

1) in Anlehnung an Capriel, 2010; *) Mittelwert aus Schichten 0-15 cm und 16-30 cm

Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen, dass auf 5 der sieben Standorte deutliche Sättigungsdefizite vorliegen und dass die Standorte zumindest noch zwischen 10 und 28 t Corg/ha oder zwischen 37 und 104 t CO₂/ha aufnehmen können. Dies würde bei mittleren Zunahmen von 350 kg Corg pro ha oder einer mittleren Einlagerung von 1250 kg CO₂ pro ha einen Humusaufbau über ca. 25 bis 80 Jahre bedeuten.

Das **Potenzial der Böden** am Oberrhein einen Beitrag **zum Klimaschutz** zu leisten ist also **gegeben**.

Schliesslich sollte im Projekt noch die Frage geklärt werden, ob es mit den angewandten Methoden möglich ist **reproduzierbare und belastbare Ergebnisse zum Corg Gehalt der Boden** zu liefern. Aus diesem Grund wurden die Böden im Frühjahr des zweiten Jahres 2021 noch einmal in gleicher Weise beprobt. Wie in der nachfolgenden Abbildung zu erkennen ist, waren die Humusgehalte auf allen Flächen ausnahmenslos abgefallen.

Grund hierfür war eine Methodenwechsel beim beauftragten Labor. In diesem wurde im zweiten Jahr der Corg nach der sogenannten Rampenmethode (DIN EN 19539) bestimmt. Das bedeutet, dass in dem Prozess der Trockenverbrennung nur die Humusfraktion bestimmt wurde, die bis zu einer Temperatur von 400 °C als CO₂ nachgewiesen werden kann, während im Jahr zuvor (2020) der Corg Gehalt bis zur Temperatur von 900 °C nachgewiesen wurde. Nach Berechnung der mittleren Abnahmen durch das Fehlen dieses Humuspools wurden deshalb die Corg Werte mit diesem Korrekturfaktor transformiert. Die transformierten Werte (graue Säulen in der nachfolgenden Abbildung) zeigten nun eine sehr gute Übereinstimmung mit den im Jahr zuvor auf den gleichen Standorten ermittelten Werten.

Die gewählten Methoden der Feldbeprobung und der Laboranalyse ermöglichten es, die Humuswerte mit hoher Präzision zu reproduzieren und wiederzugeben und können damit im Rahmen eines zukünftigen Zertifikatehandels für ein aussagefähiges Monitoring und die Erfolgskontrolle des Humusaufbaus herangezogen werden.

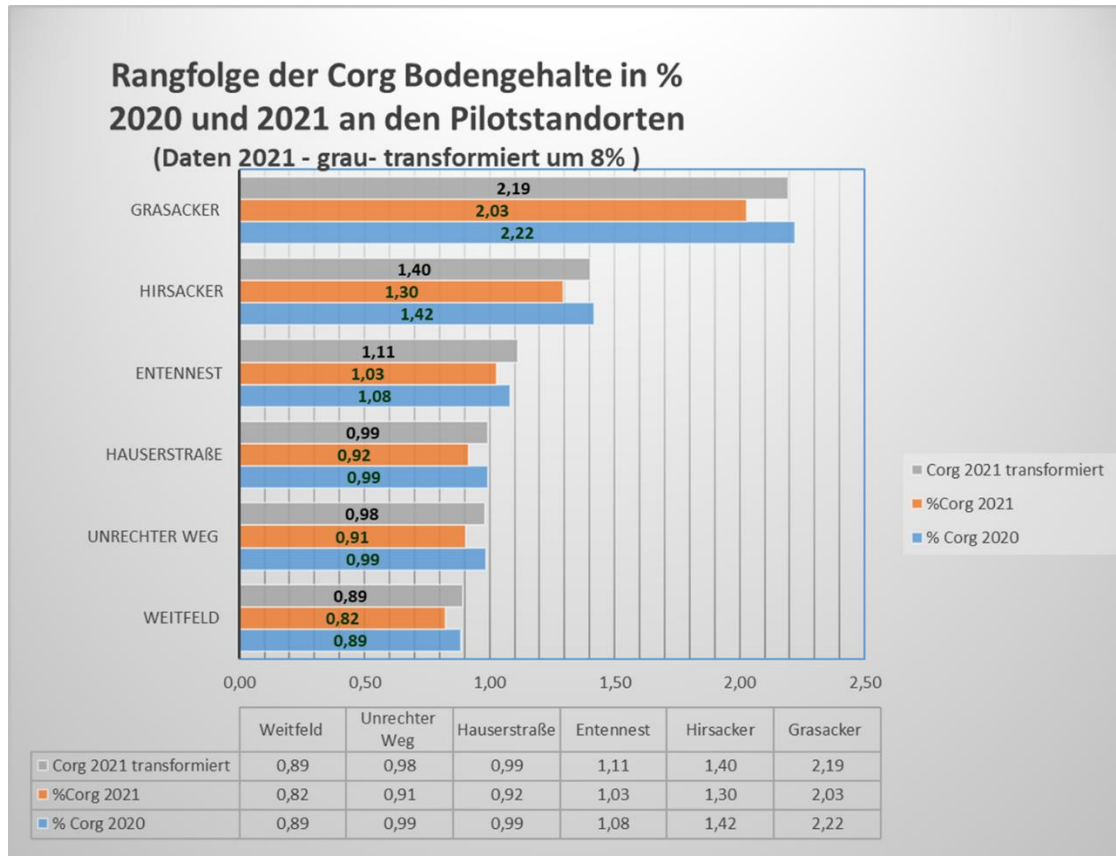


Abbildung 14: Corg Gehalte der Ackerstandorte im CO2-Land Projekt nach Beprobungen 2020 (DIN 15936) und 2021 nach DIN 19539 und Vergleich der Ergebnisse nach Transformation der Messresultate mit einem mittleren Korrekturfaktor für den Methodenfehler. Nach der Transformation zeigen die Werte eine hohe Übereinstimmung an allen Standorten.

3.2.6 Ausgabe von Klimazertifikaten – CO2-Land Programm

3.2.6.1 Modell

Programmziel ist, die Landwirtschaft als Klimaschutzakteur zu gewinnen, indem Kohlenstoffsenken durch Humusaufbau geschaffen werden. Treibender Motor für ein Anreizsystem für Landwirt*innen ist die Ausgabe von Klimazertifikaten.



Abbildung 15: Rollenverteilung bei Erzeugern und Kunden von Klimazertifikaten

3.2.6.2 Organisatorische Struktur

Der CO2-Land Verein wurde in der Schlussphase dieses Projektes mit dem Ziel gegründet, das Programm für Klimaschutz mit und in der Landwirtschaft, in eine vertrauenswürdige organisatorische Struktur einzubinden. Es wurde die gemeinnützige Vereinsstruktur gewählt mit dem Hintergrund eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe zu fördern, nämlich Klimaschutz durch Humusaufbau und Erhalt der Bodenfruchtbarkeit. Der Verein mit 11 Gründungsmitgliedern wurde am 28.07.2021 beim Amtsgericht Freiburg im Vereinsregister eingetragen.

3.2.6.3 Teilnehmer

Teilnehmen können grundsätzlich alle landwirtschaftlichen Betriebe mit Ackerflächen. Der Gesamtbetrieb mit allen Ackerflächen (Ausnahmen gibt es bei Sonder- und Dauerkulturen) soll beim Programm mitmachen. Hierdurch soll ein Verschiebungseffekt vermieden werden, wie das bei Wiesmeier et al² auch gefordert wird: „Nimmt nur ein Teil der Betriebe in einer Region oder ein Teil der Flächen in einem Betrieb an Programmen zum zertifizierten Humusaufbau teil, besteht die Gefahr, dass humusaufbauende Maßnahmen auf diese Flächen konzentriert werden (z.B. der Anbau von humusmehrenden Kulturen oder Zwischenfrüchten, das Ausbringen von organischen Düngern), entsprechendes Management auf den übrigen Flächen dafür aber reduziert wird (Leifeld et al., 2019). Bleibt dadurch die Gesamtmenge der positiven Massnahmen im Betrieb oder in der Region gleich, ist keine positive Klimawirkung zu erwarten“.

² CO2-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen“ von Wiesmeier et al², Bonares Series 2020/1

3.2.6.4 Monitoring

Die Erfahrungen mit den GPS-referenzierten Bodenprobennahmen von den 7 Pilotflächen (siehe 3.2.5.) haben gezeigt, dass die Kosten für Planung und Probenahme sehr hoch sind. Dies muss reduziert werden, damit das Programm finanziell tragfähig werden kann. Die genaue Erfassung der Corg-Vorratsänderungen ist die Berechnungsbasis für die Ausgabe von Klimazertifikaten und für die Entlohnung der Betriebe. Für eine quantitative Bestimmung von Corg-Vorräten (Einheit kg m^{-2} bzw. t ha^{-1} [*Faktor 10]), erfolgt zunächst eine repräsentative Beprobung der Flächen mit anschließender Messung des Corg-Gehalts sowie eine Bestimmung der Lagerungsdichte (Trockenrohddichte) im Labor.

Es stellt sich die Frage, wie die Kosten reduziert werden können. Eine initiale Bestimmung der Ausgangsgehalte, also die Erfassung des „baseline Wertes“ ist unerlässlich.

Lagerungsdichtemessungen, die besonders aufwendig sind und die Berechnung der Masse an organischem C im Oberboden ermöglichen, müssen nach den vorliegenden Erfahrungen aus Kostengründen bis auf wenige Ausnahmen aus der Bodenkartierung und den darin aufgeführten Bodenarten abgeschätzt werden (BGR, 2021). Zu Feststellung der Entwicklung der Corg Vorräte erfolgt nach vier bis fünf Jahren ein zweites Monitoring, nach 8-10 Jahren erfolgt Monitoring 3 zur Feststellung der Veränderungen der Corg Gehalte. Diese sind entscheidend für die Höhe Zahlungsansprüche und auch bei leichten Verzerrungen der absoluten Humusmengen nach Ableitung der Lagerungsdichte aus den Bodenparametern aussagekräftig.

Ausserdem sollen die finanziellen Aufwendungen für das Monitoring 2 und Monitoring 3 durch eine Kombination von Messungen und Modellierung („model & measure-Verfahren“) reduziert werden. Auch ermittelte Messwerte und Gehaltsangaben aus der intelligenten Fernerkundung (Remote sensing) könnten in Zukunft zum Einsatz kommen.

M1: Beim Start Baseline Bodenprobe, von allen Schlägen

M2: nach 3-5 Jahren, Model&Measure, Clusterbildung

M3: nach 6-10 Jahren, Model&Measure, Clusterbildung



Abbildung 16: Bild von einer Probenahmestelle mit Einstichstellen (blaue Stäbe) und Kreis für die Bestimmung der Lagerungsdichte.

3.2.6.5 Standardentwicklung

Ein Standard für die Herausgabe von Senken-Klimazertifikaten aus dem Humusaufbau würde das Programm glaubwürdiger machen und einen weitaus grösseren Kundenkreis erschließen können. Im Rahmen des Projekts wurde deshalb eine Recherche zu bestehenden Standards gemacht. Existierende Standards (z.B. Gold-Standard und Verified Carbon Standard) haben für verschiedene Emissionsprojekte hohe Expertise entwickelt.

Handelt es sich um Humusaufbau und Senkenzertifikate im landwirtschaftlichen Boden, sind diese Standards noch in der Entwicklungsphase. Außerdem ist die Implementierung dieser Standards sehr aufwendig, sehr kostenintensiv und langwierig. Die Folge wäre, dass den Akteuren, den Landwirt*innen, zu wenig Vergütung weitergereicht werden könnte. Stattdessen würde der größte Anteil der Einnahmen von externen Dienstleistern, wie z.B. dem Standardgeber aufgesaugt werden.

Daher ist eine an Mitteleuropa angepasste Methodik, die über die ISO Norm 14064 verifiziert wird, ein erfolversprechender Lösungsweg. Der ISO 14064-2 Standard liefert einen extern überprüfbareren Rahmen, der die wesentlichen Punkte und Vorgehensweisen für ein anerkanntes Klimaschutzprojekt beinhaltet. Methodisch gibt die ISO-Norm nichts vor, da sie ein allgemeiner Rahmen von Klimaschutz-Maßnahmen in verschiedenen Sektoren ist. Sie muss daher methodisch befüllt werden. Dies ist ein großes Stück Arbeit mit hohem Innovationsgrad, da es eine solche Methode für die Landwirtschaft mit Fokus Humusaufbau in dieser Form „von der Stange“ noch nicht gibt. Es braucht dafür zum einen Expertise in Sachen Klimaschutz-Projekte und -zertifikate, die auf den international vom United Nations Framework for Climate Change Council (UNFCCC) gesetzten Regeln für „Clean Development Mechanism“-Projekte gründet. Zum anderen braucht es Klimaexpertise in der Landwirtschaft, um die Methode ausarbeiten zu können, anhand derer die CO₂-Bindung oder –Reduktion durch Agrar-Maßnahmen festgestellt und berechnet werden kann. Methodische Ansätze anderer Standards werden eingearbeitet und berücksichtigt.

3.2.6.6 Vertragsgestaltung

Teilnehmende Landwirte werden mit dem CO₂-Land Programm einen Vertrag abschließen, um die Permanenz der CO₂-Speicherung zu gewährleisten. Inhalte des Vertrags werden sein: Vertragsdauer, Pflichten der Landwirte entsprechend Daten zu liefern, Absprache über Bewirtschaftung der Flächen und Pflichten des Programms über Auszahlungspreise und -lieferung. Wesentlich wird hier sein keinen neuen Bürokratismus aufzubauen, sondern mit einfachen Verfahren bereits bestehende Daten zu erfassen und zu nutzen und keine neuen Daten zu erheben (ausgenommen und unabdingbar ist nur das Monitoringprogramm).

3.3 Wirkung der Umsetzung auf das CO₂-Land Programm

3.3.1 Potentialanalyse

Das Projekt hat eine Potentialanalyse durchgeführt für die Programmregion/badenova-Gebiet für, Baden-Württemberg und für Deutschland. Die Daten dienen zur Veranschaulichung, welche Wirkung Senkenzertifikate im Rahmen der Klimadebatte und der Klimaziele entfalten können. Bei der Analyse wurde unterschieden nach niedrigem Aufwand, mittlerem Aufwand und hohem Aufwand für den Humusaufbau. Ein „mittlerer Aufwand“ bezieht sich auf ackerbauliche Maßnahmen, die mit einem angemessenen zusätzlichen wirtschaftlichen Aufwand von allen Landwirt*innen betrieben werden könnten, wie z.B. konsequent und systematisch eine jährliche Zwischenfrucht in die Fruchtfolge einzubauen. Grundlage der Analyse waren agrarwissenschaftliche Auswertungen. Als Beispiel sei hier die Bedeutung des Potenzials dargestellt: In Baden-Württemberg waren 2019 die gesamten THG Emissionen aus der Landwirtschaft 4,35 Mill CO₂ eq. (Quelle: <https://www.statistik-bw.de/Umwelt/Luft/Treibhausgase.jsp>). Das Senkenpotential für BW beträgt bei mittlerem Aufwand auf 50 % der Ackerfläche 0,49 Mill t CO₂ eq. und bei hohem Aufwand 1,51 Mill t CO₂ eq. Man kann

durch Humusaufbau 11 % bzw. 35 % der gesamten THG-Emissionen aus der Landwirtschaft kompensieren.

Stufe 2/2	Ackerflächenteil	jährliches Potenzial badenova Gebiet in t CO ₂ äq.	jährliches Potenzial Baden-Württemberg in t CO ₂ äq.	jährliches Potenzial Deutschland in t CO ₂ äq.
Mittlerer Aufwand Humusbewirtschaftung	50 % der Fläche	84.000	490.000	7.038.540

3.3.2 Beispielhafte Wirkkette für ein CO2-Land Programm

Nach Projektende sollen die gewonnen Ergebnisse in das CO2-Programm übergehen. Hierzu hat der CO2-Land Verein verschiedene Projektgelder beantragt mit mehrjähriger Laufzeit. Obwohl das Senkenpotenzial zur Einlagerung von CO₂ (siehe Kapitel 3.2.3) je nach gewählter oder umsetzbarer Maßnahme sehr unterschiedlich ausfallen kann, wird für die kommenden Planungen zunächst von Werten ausgegangen, die bei einem mittleren betrieblichen Aufwand wahrscheinlich sind. Daraus ergeben sich die in nachfolgender Tabelle aufgeführten CO₂-Sequestrierungspotenziale

Folgende Flächen und Festlegungspotenziale erwartet der CO2-Land Verein bei aktiver Forderung der Aktivitäten in den ersten 3 Jahren

	Fläche (ha)	Sequestrierungspotential bei mittlerem Aufwand*
1. Jahr	500	500 -1000 t CO ₂
2. Jahr	2000	2000 – 4000 t CO ₂
3. Jahr	7000	7000 – 14000 t CO ₂
Summe		9500 – 19000 t CO ₂

*Geringer Aufwand > 1 t CO₂-eq/ha/j, Mittlerer Aufwand 1-2 t CO₂-eq/ha/j, hoher Aufwand 2-4 t CO₂-eq/ha/j,

Beispielhafte Wirkkette auf 10 Jahre (Vertragszeit)

Landwirtschaftsbetriebe in 3 Jahren	Fläche bei 20 ha /Betrieb	Einsparwert (t CO ₂ eq. /ha/Jahr)	Einsparwert nach 3 Jahren (t CO ₂ eq.)	Einsparwert in Jahren 4-10 (t CO ₂ eq.)	Einsparwert in 10 Jahren (t CO ₂ eq.)
350	7000	1 -2	9500 - 19000	49000 - 98000	58500 – 117000

3.4 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

3.4.1 Preisgestaltung Klimazertifikate

Die Prämisse für die Preisgestaltung ist, dass die Landwirt*innen einen attraktiven finanziellen Anreiz bekommen, um sich an das Programm zu binden. Auf der anderen Seite muss der Preis so gestaltet sein, dass ein Kundenspektrum dafür als Käufer in Frage kommt. Diese beiden Anforderungen auszuloten war auch Teil des Projektes, indem verschieden Analysen und Gespräche durchgeführt wurden.

Ergebnisse einer im Jahr 2020 gemachten kurzen Analyse zu Preisen für Senken-Klimazertifikate, die auf dem Markt existieren sind in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben.

Name	Preis pro t CO2 in Euro	Auszahlung Landwirt	link	Vermarktung
Kaindorf	45	30	https://www.oekoregion-kaindorf.at	direkt
WISBER	50	?	http://wisber.eu	?
Stiftung Lebensraum	45	30	stiftunglebensraum.org	?
Carbocert	52,20	?	www.carbocert.de/humuszertifikate	direkt
Bodenfruchtbarkeitsfond	100 CHF	?	www.Bodenfruchtbarkeitsfond.ch	myclimate, geplant
Moorfuture	78	Nicht relevant	www.moorfutures-bb.de	direkt

Des Weiteren liegt eine Bachelorarbeit vor von Philipp Radetsky mit dem Thema „Relevanz und Bereitschaft von Unternehmen im Marktgebiet der badenova AG & Co. KG für regionale CO₂-Kompensation durch Humusaufbau in der Landwirtschaft“. Diese Arbeit erfolgte 2020 in Zusammenarbeit der DHBW Lörrach und der badenova AG & Co. KG. Es wurde eine Befragung von 17 regionalen Unternehmen durchgeführt über deren Interesse Kompensationszertifikate zu erwerben. Das zusammenfassende Ergebnis war, eine durchschnittliche Bereitschaft 64 Euro pro Tonne CO₂ zu bezahlen, einige Unternehmen haben auch einen Maximalwert von 100 Euro/t angegeben. Auf die differenzierte Frage „Wieviel wäre es ihnen Wert CO₂ global zu kompensieren“ war der mittlere Wert 61 Euro, auf die Frage „Wieviel wäre es ihnen Wert CO₂ regional zu kompensieren?“ war der mittlere Wert 82 Euro (Radetzky 2020).

Demgegenüber müssen die Aufwendungen der Landwirt*innen gestellt werden.

Betriebswirtschaftliche Auswertungen waren bisher nicht Gegenstand des Projektes. Es gibt keine, zuverlässige Daten über die zusätzlichen Kosten, die einem Landwirt entstehen, der an einem Humusprogramm teilnimmt. Sicherlich hängen die Kosten auch von den jeweiligen Maßnahmen ab. Geschätzte Zusatzkosten liegen je nach den durchgeführten Maßnahmen in einem breiten Streubereich von 150 – 500 Euro/ha.

Hier sei nur ein mögliches Beispiel für einem mittlerem Aufwand, ein systematischer Zwischenfruchtanbau, wie z.B. das Landsberger Gemeinde dargestellt. Die Kosten können ganz überschlägig bei 200-300 Euro/ha liegen. Wird der zusätzliche Kostenaufwand für das Szenario Einsaat Gelbsenf versus Einsaat effektive Zwischenfrucht, wie Landsberger Gemeinde gegenübergestellt muss nur die Differenz des Saatgutpreise betrachtet werden. Für Gelbsenf sind das ca. 35 Euro /ha für Landsberger Gemeinde ca. 180 Euro / ha. Daraus ergibt sich eine Differenz von 145

Euro. Mit der Annahme der Bewirtschafter hat mit Humusaufbau auch einen eigenen Nutzen durch Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und Resilienz können 50 % als Eigenmittel eingebracht werden und mit 72,50 Euro / t CO₂ aus dem CO₂-Land Programm wäre die andere Hälfte abgedeckt. Bei durchschnittlicher 1,2 t CO₂ Bindung pro ha wären das 60 Euro pro t CO₂, die der Bewirtschafter braucht, um seine Zusatzkosten kompensieren zu können.

Das geplante CO₂-Land Programm hat laufende Ausgaben wie Sachkosten (z. B. Bodenprobenahmen und Analysen, Kundenwerbung, Fahrtkosten etc.) und Personalkosten (z. B. für Organisation, Flächenverwaltung; Kundenakquise, Dokumentationspflichten...). Etwa 20-25 Euro pro t CO₂ können hierfür angesetzt werden, so dass die Auszahlung an den Landwirt bei einem Klimazertifikatpreis von 80 Euro überschlägig bei etwa 55 Euro liegen würde.

Eine Auszahlung von ca. 55 Euro kann in vielen Fällen die tatsächlichen Mehraufwendungen bei den Landwirt*innen nicht decken. Jedoch kann dieser Preis den wesentlichen Anreiz schaffen, um zumindest für Zusatzaufwendungen eine angemessene Entschädigung zu erhalten, wie an dem obigen Beispiel aufgezeigt ist.

3.4.2 Überblick Geschäftsmodell CO₂-Land Programm

Der Aufbau des Programms kann nur mit Förderungen und Kooperationen geschehen. Ab einem Schwellenwert von ca. 15 000 t Klimazertifikat zur Ausgabe pro Jahr wird sich das Programm selber tragen können (siehe auch 3.3.2). Während der Förderphase soll die Standardentwicklung und die Modellierung ausgearbeitet werden. **Zentrale Herausforderung wird sein die hohen Kosten der Bodenprobenahme und Analyse zum Monitoring teilweise durch eine geeignete Modellierung zu ersetzen, um dabei die Sachkosten deutlich reduzieren zu können.**

Posten	Preis in Euro (pro t CO ₂)	Anmerkung
Klimazertifikat	80	
Ausgabe an Landwirt	55	
Sachkosten	10-15	vor allem Bodenprobe und-analysen
Organisationsstruktur	10-15	vor allem Personal für Öffentlichkeitsarbeit/Mobilisierung von Kunden, Beratung/Mobilisierung von Landwirt*innen Datenverarbeitung und Koordination
Standardentwicklung		wird aus Kooperationen und Förderungen querfinanziert
Modellierung und Kalibrierung		wird aus Kooperationen und Förderungen querfinanziert

4 Öffentlichkeitsarbeit

4.1 Vernetzung

Die Vernetzung mit Partnern und Akteuren war ein wesentlicher Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit (siehe Kapitel 3.2.2). Insgesamt wurden fünf öffentliche Veranstaltungen ausgerichtet inklusive einer Expertenanhörung im Landtag des Landes Baden-Württemberg in Stuttgart. Ziel war es durch den Austausch mit vorrangig regionalen Akteuren verschiedene Ideen und Vorstellungen in das CO₂-

Programm einzubinden, um auf einem breiten gesellschaftlichen Fundament zu stehen mit hoher Akzeptanz. Hierzu gehörten u.a. auch weitere Projekte, gefördert vom Innovationsfond wie das DeNAe-Projekt und das mit Projekt „Anreizangebot für ökologische Bodennutzung“.

Folgende Flyer wurden vom CO2-Land ausgearbeitet und verteilt (digital und/oder analog):

Flyer und Positionspapiere	Zielgruppe
Einladung kick-off Veranstaltung 22.07.19	Landwirt*inne, Initiativen, Kommunen, Wirtschaft
CO2-Land Event und Workshop 09/19	Landwirt*inne, Initiativen, Kommunen, Wirtschaft, Kunden, Förderer
Kurzbeschreibung CO2-Land 12/2019	Landwirt*innen
Flyer Kurzbeschreibung CO2-Land 02/20	Teilnehmer Silphie Feldtag
Kurzbeschreibung CO2-Land 03/20	Landwirt*innen
Silphie-Grill Müllheim-Feldberg 03/20	Landwirt*innen - Erstellt von Donau-Silphie
Kurzbeschreibung CO2-Land Hearing 07/20	Teilnehmer Hearing
CO2-Land Kommentar zum Häusling-Positionspapier 24.11.2020	Policy-Paper, Politik
Kurzbeschreibung CO2-Land Standard 08.04.21	Förderer, Sponsoren
Abschlussveranstaltung CO2-Land Agenda und Referenten 07/21	Landwirt*inne, Initiativen, Kommunen, Wirtschaft, Kunden, Förderer

Presseartikel über die CO2-Land Aktivitäten

Veröffentlichungen	Datum	Wo	Format	Agenda
Sendung	08.10.19	Sendung SWR 4 aktuell	Radio	Darstellung der Idee von Klimazertifikaten
Presse	25.07.20	Badische Bauernzeitung	Druck	Einladung zum Silphie-Tag und Kurzvorstellung CO2-Land
Presse	24.07.21	Badische Bauernzeitung	Druck	Ganzseitige Vorstellung vom neu gegründetem Verein CO2-Land e.V.
Internetplattform	ab Jan. 20	co2-land.org	webseite	Darstellung Projekt, Newsletter
Newsletter	Ab Okt. 20	Email-Verteiler	e-mail	Informieren über Aktuelles durch einen Newsletter

Veröffentlichungen

Wichtigste Ergebnisse des Projektes, Vorträge vom CO2-Land und Vorträge von externen Referenten, die bei Veranstaltungen mitgewirkt haben, sind auf der webseite <https://co2-land.org/downloads/> veröffentlicht. Weitere Projekterkenntnisse und Ergebnisse, siehe Anlagen.

Veröffentlichung	Bezug
Mit Humusaufbau Geld verdienen, Badische Bauernzeitung	Pressebericht 24.07.21

Projektergebnisse 1, Michael Schwegler	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Projektergebnisse 2, Dr. Karl Müller-Sämman	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Erfahrungsbericht Naturgut Hörnle, Joel Siegel und Paul Schwegler	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Erfahrungsbericht, Landwirtschaftsbetrieb Rudolf Müller	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Vereinsvorstellung CO2-Land e.V., Stephen Schrempp	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Interesse der Wirtschaft an regionalen Klimazertifikaten, Energieagentur Regio Freiburg GmbH, Laura Meiser	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Klimaschutzziele und Maßnahmen der Stadt Freiburg, Dr. Sandra Hook	Abschlussveranstaltung 16.07.21
bettersoil /for a better world-Initiative, Azadeh Farajpour-Javazmi, M. Sc.	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Präsentation badenova, Richard Tuth	Abschlussveranstaltung 16.07.21
Einbindung von CO2-Land in die Strukturförderung und Nachhaltigkeitsstrategie vom RegioWIN 2030-Wettbewerb Klimaschutz am Oberrhein e.V., Dieter Sommerhalter	Abschlussveranstaltung 16.07.21
CO2-Speicherung in der Landwirtschaft, CO2-Land, Michael Schwegler und Dr. Karl Müller-Sämman	Hearing 22.09.20
Rede von Rudolf Müller, Projektlandwirt	Hearing 22.09.20
Humusaufbau als gesellschaftliche Aufgabe, Bio Musterregion Freiburg, Sarah Daum	Hearing 22.09.20
Humusaufbau in Deutschland, Thünen Institut, Dr. Axel Don,	Hearing 22.09.20
Humusaufbau in Ackerböden, Universität Hohenheim, Dr. Sven Marhan,	Hearing 22.09.20
Multifunktionalität von Zwischenfrüchten, LRA Karlsruhe, Rolf Kern	Hearing 22.09.20
Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz, Richard Tuth	Hearing 22.09.20
Einführung in das CO2-Land Projekt, Michael Schwegler	Workshop 22.09.19
Analyse zu freiwilligen CO2-Zertifikaten, CO2-Land, Dr.Karl Müller-Sämman und Florian Meyer-Busse	Workshop 22.09.19
Stadt-Land Partnerschaften der Stadt Freiburg, Dr. Sandra Hook	Workshop 22.09.19
Bodenfruchtbarkeitsfond, Mathias Förster	Workshop 22.09.19

5 Zusammenfassung/Fazit

Drei entscheidene Erkenntnisse auf der Makro-Ebene sind aus der gut 2-jährigen Projektarbeit zusammenfassend abzuleiten.

5.1 Humusaufbau als Indikator für vielfältige Ökosystemleistungen

Humusaufbau bringt sehr viele Ökosystemleistungen, die alle für sich im Einzelnen einen hohen Beitrag zur Umwelt- und Klimaverbesserungen leisten; Klimaschutz, Wasserschutz, Artenschutz, Boden- und Erosionsschutz, Bodenfruchtbarkeit und erhöhte Resilienz gegenüber dem Klimawandel. Wünschenswert wäre die Herausstellung aller dieser Leistungen. Die zusätzliche Messung, Quantifizierung und Monetarisierung dieser „Nebenleistungen“ wäre aber sehr aufwändig, weshalb sie sich auf die zentrale Rolle der Schaffung von Senkenleistungen für CO₂ beschränkt. Diese lässt sich über eine Bodenanalyse messen und dadurch auch gegenüber Kunden und Dritten nachvollziehbar darstellen. Wenn das Programm jemals finanziell unabhängig werden soll, muss daher der Humusaufbau der treibende Motor sein, wohlwissend, dass sich hinter dem Humusaufbau ein weit größerer tatsächlicher Mehrwert verbirgt.

5.2 Die signifikante Bedeutung der Landwirtschaft

Akteure in der Landwirtschaft sind sich bewusst, dass sie auf den Klimawandel aktiv reagieren müssen. Aus allen Bereichen der Landwirtschaft wird daher klar Interesse signalisiert an einem Humusprogramm mitzumachen. Daher ist es wichtig ein offenes Programm anzubieten für alle Methoden der Landwirtschaft, für die Biolandwirtschaft (die klar geregelt ist über die Bioverordnung) und für alle anderen nicht so klar standardisierten Methoden der konventionellen Landwirtschaft, der regenerativen Landwirtschaft, des pfluglosen Ackerbaus und weiterer unterschiedlicher agrarökologischer Ansätze. Es ist nicht wichtig, wie es genannt wird, sondern nur was man mit welchem Ergebnis tut. Das Programm will deshalb auch nicht mit weiteren Programmen konkurrieren, sondern soll immer in bestehende Methoden integriert werden können. Bei der Entwicklung des Programms wird von zentraler Bedeutung sein, wie die Landwirtschaft für dieses Ziel mobilisiert werden kann. Dabei muss der Landwirtschaft ein Angebot gemacht werden für die 3 Herausforderungen a) finanzieller Anreize setzen b) Humusberatung / Detailwissen vermitteln und c) einfaches, wenig formalisiertes Programm anbieten.

5.3 Dualer Ansatz zum Klimaschutz nur mit CO₂-Senken machbar

Es gibt einen politischen Paradigmenwechsel. Durch die ambitionierten Klimaschutzziele des Pariser Abkommens muss ein dualer Ansatz gefahren werden: Reduzierung der Treibhausgasemissionen aus fossilen Quellen auf ein Minimum und Entfernung *und* Bindung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre. Beide Ansätze sind notwendig und können sich nicht gegenseitig ersetzen. Dadurch werden Projekte mit freiwilligen Klimazertifikaten aufgewertet. Dieser neue Ansatz wird eine Nachfrage nach freiwilligen Zertifikaten auslösen. Wenn das Klimazertifikat dann noch regional ist, wie beim CO₂-Land, wird es zum Premium-Produkt mit einer grossen Entwicklungsperspektive. Für Abnehmer die grosse Mengen CO₂-Zertifikate brauchen wird das CO₂-Programm weniger attraktiv sein, wegen der Preisgestaltung, jedoch wird es für kleine und mittlere Unternehmen und Einzelpersonen interessant sein.

6 Ausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse während der Projektphase sollten dazu führen ein dauerhaftes Humusprogramm einzurichten.

Darum wurden bereits während der Projektphase verschieden Anträge zur weiteren Förderung gestellt, sowohl bei der öffentlichen Hand als auch bei der Privatwirtschaft. Ab einer gewissen Größe kann sich das Programm selbständig finanzieren, bis dahin braucht es Förderung. Ziel des neu gegründeten Vereins ist es diese kritische Größe in 3-4 Jahren zu erreichen. Ein konkreter Schritt hierzu war und ist die Teilnahme am RegioWIN Wettbewerb unter der Bündelung des Klimapartners Oberrhein e.V. Das Projekt wurde mit Erreichen der Phase 2 als grundsätzlich förderungswürdig eingestuft und es bestehen reale Chancen ab 2022 Förderung zugesprochen zu bekommen. Teilförderungen wurden bereits im Jahr 2021 zugesagt. Dies stellt sicher, dass der gemeinnützige Verein CO2-Land eV. grundsätzlich mit dem CO2-Programm starten kann.

7 Projekterkenntnisse

1. Humusaufbau ist der Indikator für vielfältige Ökosystemleistungen, die alle sichtbar gemacht werden müssen, um den gesamten Wert des CO2-Land Programm darstellen zu können.
2. Die Landwirtschaft ist der alles entscheidene Partner. Sie kann mobilisiert werden, wenn a) ein spürbarer finanziellen Anreiz geschaffen werden kann b) Humusberatung/Detailwissen angeboten wird zur effizienten Umsetzung und c) das Programm minimale formalistische Anforderungen stellt.
3. Ein notwendiger, dualer Ansatz zum Klimaschutz ist nur mit CO2-Senken machbar. Dadurch werden Projekte mit freiwilligen Klimazertifikaten aufgewertet. Dieser neue Ansatz wird eine Nachfrage nach freiwilligen Zertifikaten auslösen.

8 Anlagen

8.1 Maßnahmenprotokoll

Steckbrief Pilotfläche Pflanzkohleeinsatz über Kompostgaben in einer humusmehrenden Fruchtfolge mit Kartoffel.

Akteur/Landwirt:

Name Betrieb	Name
Ansprechpartner	N.N.
Adresse	
Tel.Nr./Email:	

Betrieb

Anbau/Flächen	2019: 35 ha, 5 ha Stein- und Kernobst, 4 ha Kartoffeln, 18 ha Getreide (Weizen, Hafer), 8 ha Wiesen
Tierhaltung	1600 Legehennen
Fruchtfolge	<p>seit ca. 15 Jahren wird mit Zwischenfrüchten, Kompost und Luzerne gearbeitet, reduziertes Pflügen, ca. 1 mal in der F-Folge</p> <p>Mögliche Fruchtfolge</p> <p>1. Kartoffel (oder Mais) Silomais mit Biokohlekompost nach Luzerne mit 2 möglichen Varianten:</p> <p>a) Landsberger Gemenge, winterhart (flach eingearbeitet mit Hacke im 8 bis 10 Blatt-Stadium) oder</p> <p>b) „Streuifix“ Terra Gold 11 nach der Ernte des Silomais bis Ende August.</p> <p>2. Hafer Sommerung mit Zwischenfrucht z.B. Vita Maxx TR mit schnellwüchsigen Komponenten zur Nutzung der relativ kurzen Vegetationszeit vor Wi-Weizen; (gefolgt von Wi. -Weizen)</p> <p>3. W.-Weizen mit nachfolgender Saat von überjähriger Luzerne</p> <p>4. Luzerne und 2 maliger Schnitt (Pflug); Wo möglich pfluglose Bewirtschaftung, Pflug nach Luzerne.</p>
Labels	keine
Vermarktung	Direktvermarktung ab Hof; Eier, Obst und (Erd-)Beeren, Säfte, Destilate (Kleinbrenner), Marmeladen, Eiernudeln,
Soziales und Mitarbeiter	Familienbetrieb

Maßnahme

<p>Pflanzkohleeinsatz über Kompostgaben in einer humusmehrenden Fruchtfolge mit Kartoffel.</p>	<p><u>Grundhypothese:</u></p> <p>Jüngere Forschungen zur Humusdynamik in Ackerböden konnten bestätigen, dass standorttypische Humusgehalte in Ackerböden mit dem Tonanteil in den Böden ansteigen. Die neueren Forschungsergebnisse zeigten darüber hinaus, dass es nicht nur der Tonanteil ist, sondern dass primär der Anteil rauher Oberflächenstrukturen der Tonteilchen zum Aufbau stabiler Humusstrukturen beiträgt (Kögel-Knabner, I. et al., 2008). Im Boden sind diese Strukturen naturgegeben und können nicht modifiziert werden.</p> <p>Auch Pflanzkohle ist reich an rauhen Oberflächenstrukturen und Poren. Sie wird in aktivierter Form auch zur Bodenverbesserung und Sequestrierung von Kohlenstoff in den Böden empfohlen. Zur direkten C-Anreicherung in den Ackerböden ist aktivierte Pflanzkohle sowohl hinsichtlich der Vermeidungskosten, als auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht sehr teuer (um 700-900 €/t). Im Rahmen des Projekts soll sie aufgrund ihrer Eigenschaften indirekt als Katalysator zur Beschleunigung des Humusaufbaus eingesetzt und erprobt werden, indem sie zur Stabilisierung von Bodenhumus und dem darin gebundenen Kohlenstoff beitragen soll (siehe auch Blanco-Canqui et al. 2020).</p> <p>Auf dem Betrieb wird die Pflanzkohle bei der Humusbewirtschaftung gezielt als Maßnahme eingesetzt, um die Bildung von stabilen Humusformen im Boden zu fördern und so zur Dynamisierung und Verbesserung der CO₂-Einlagerung im Ackerboden beizutragen.</p> <p><u>Beschreibung der Maßnahme:</u></p> <p>Der Betrieb setzt Kompost zur Verbesserung der Ertragsfähigkeit und Fruchtbarkeit der Böden ein.</p> <p>Der Kompost besteht aus 1/3 Hühnermist (direkt vom Stall) und 2/3 Grünschnittkompost (aus regionaler Grünschnittkompostierung).</p> <p>Der Kompost wird im Herbst aufgesetzt und im zeitigen Frühjahr im Rahmen der Fruchtfolge mit einer Menge von 30 m³ pro ha zur Kartoffel (zu Mais, 2020) eingesetzt. Ein Einsatz auch im Zweiten Versuchsjahr vor der Zwischenfrucht nach Hafer könnte in Betracht gezogen werden.</p> <p>Im Projekt werden dem Kompost beim erneuten Umsetzen vor Winter 1 Vol. % BAK Pflanzkohle zugesetzt (Bezugsquelle: Caruna, Freiburg, Produktblatt in Anlage 3). Das entspricht bei einer Dichte von 320 kg /m³ 3,2 kg pro m³ Kompost.</p> <p>Nach der Mischung mit der Pflanzkohle lagert der Kompost erneut einige Wochen und wird vor Pflanzung der Kartoffel / des Mais auf dem</p>
--	---

	<p>Feld ausgebracht (Ende Februar/ Anfang April).</p> <p>Für 30 m³/ha Kompost sind 96 kg BAK Pflanzenkohle notwendig.</p> <p>Ergänzend zum Komposteinsatz wird die Fläche im Rahmen der Fruchtfolge humusschonend (z. B. reduzierte Bodenbearbeitung) und humusmehrend bewirtschaftet (Einsatz von Zwischenfrüchten).</p> <p>Mögliche Fruchtfolge (siehe Anlage)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kartoffel (oder Mais) Silomais mit Biokohlekompost nach Luzerne mit Untersaat entweder von a) Landsberger Gemenge, winterhart (flach eingearbeitet mit Hacke im 8 bis 10 Blatt-Stadium) oder b) „Streufix“ Terra Gold 11 nach der Ernte des Silomais bis Ende August. 2. Hafer Sommerung mit Zwischenfrucht z.B. Vita Maxx TR mit schnellwüchsigen Komponenten zur Nutzung der relativ kurzen Vegetationszeit vor Wi-Weizen; (gefolgt von Wi. -Weizen) 3. Wi-Weizen mit nachfolgender Saat von überjährige Luzerne 4. Luzerne und 2 -3 maliger Schnitt (Pflug) <p>Wo Möglich pfluglose Bewirtschaftung, Pflug nach Luzerne. Wenn Sommerhafer angebaut wird, ist zuvor eine abfrierende ZF (z.B. „Beta maxx 30“ oder „Streufix Terra Gold“) mit Mulchsaat vorgesehen. In der Regel erfolgt pfluglose Bewirtschaftung.</p>
<p>Fläche und Flurstücksnummer</p>	<p>Versuchsfläche für die Pilotmaßnahme ist das Flurstück im Gewann „so und so“</p> <p>Fläche und Flurstücknummer: Kernparzelle Teilfläche XX Gemarkung _____ Flurstücke: 1- bis n. 2,28 ha (Lageplan in der Anlage)</p>
<p>Schlagkartei</p>	<p>Die Bewirtschaftungsmaßnahmen werden in einer Schlagkartei dokumentiert.</p>
<p>Bodenproben:</p>	<p>Da es sich bei der skizzierten Fruchtfolge um ein Pilotmaßnahme des Projekts CO₂-Land handelt, in dem Analyse- und Nachweismethoden für den späteren Handel mit Humuszertifikaten zu testen sind, werden zu Versuchsbeginn (zwischen Ende Februar und Anfang März 2020 und 2021) Bodenproben entnommen.</p> <p>An fünf georeferenziert eingemessenen Punkten im Feld werden in beiden Jahren die Humuswerte und die Lagerungsdichte (Rohdichte) bestimmt. Einmalig wird die Bodenart bestimmt (Ton- und Sandanteile).</p>

	Für diese Probenahme erteilt der Betrieb dem Projekt bzw. dem beauftragten Labor eine Begehungserlaubnis (Falls zum Ausbringungszeitpunkt des Komposts oder einer sonstigen organischen Düngung noch keine Humusanalysen des Bodens gemacht sind, soll an fünf Stellen eine 3*3 m große Folie ausgelegt werden). >Abstimmen mit Herrn Müller-Sämann (0176 /600 12 619).
erstellt	KM-S / MS
Datum	13.12.2019 / zuletzt überarbeitet 06.06.2020

Anlagen:

1. Maßnahmen- und Fruchtfolgeskizze
2. Lageplan Flurstück
3. Produktdatenblatt BAT Pflanzenkohle

8.2 Literatur und Quellen

Blanco-Canqui, H., Laird, D.A., Heaton, E.A., Heaton, Emily A., Rathke, S. & Acharya, B.S. 2020. Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: field evidence of negative priming. *GCB Bioenergy*, Vol.12 (4): 240-251. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12665>

Bolinder, M. A., Kätterer, T., Andrén, O., & Parent, L. E. 2012. Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(6): 821-833.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [BGR] 2021. Ermittlung der Rohdichte, trocken im obersten Bodenhorizont bei ackerbaulicher Nutzung. (Aufruf Okt.2021)
https://www.methodenwiki-bodenkunde.de/MethodenWiki/AGBoden:Verkn%C3%BCpfungsregel_1.25

Capriel, P. 2010. Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Schriftenreihe 05, Freising-Weihenstephan, 46 S.

Crowther, T.W. et al. 2019. Sensitivity of global soil carbon stocks to combined nutrient enrichment. doi: 10.1111/ELE.13258.

FAO 2017. Soil Organic Carbon: the hidden potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italien, 90 S. ISBN 978-92-5-109681-9.

Gentsch, 2018. Humus und Bodenfruchtbarkeit für nachhaltige Bewirtschaftungssysteme. Institut für Bodenkunde Leibniz Universität Hannover. online Präsentation, abgerufen 8/2021.
https://1487268856.jimdo.com/app/download/16553498796/Humus_Gentsch.pdf?t=1544799715

Gentsch, N. et al. 2020. Catch crop diversity increases rhizosphere carbon input and soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01475-8>.

Gregorich, E. G., Drury, C. F., & Baldock, J. A. 2001. Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Canadian journal of soil science*, 81(1): 21-31.

Harms, G. & Lehrke, U. 2021. Mehr Humus durch dauerhafte Begrünung. *Innovationsmagazin, DLG Mitteilungen* 7/2021, S.36-39.

Kätterer, T. et al. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141 (2011) 184–192.

Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B. and von Lützow, M. (2008), An integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 171: 5-13.
<https://doi.org/10.1002/jpln.200700215>

Körschens M., Albert E. , Armbruster M.Zorn, W. 2013. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59: 1017-1040.

Kolbe, H. & Zimmer, J. 2015. Leitfaden zur Humusversorgung. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. 64 S. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/25484/documents/35267>

Manka'abusi, D., Steiner, C., Haering, V., Abubakari, A., Marschner, B. and Buerkert, A. (2018), Gaseous carbon and nitrogen losses during composting of carbonized and un-carbonized agricultural residues in northern Ghana. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 181: 886-893. doi:10.1002/jpln.201800225

Maier, J. & Müller-Sämann, K. 2018. Mehr Geld mit weniger Stickstoff. *Badische Bauernzeitung*, Nr.3/2018, S. 20-21.

Müller-Sämann, K., & Hölscher, T. 2010. Miscanthus und Kohlenstoffbindung in ehemaligen Ackerböden. MEG Internationale Miscanthus vereinigung. „Miscanthus–Netzwerke und Visionen“, Tagungsband 6. S. 17-19.

Näser, D. 2020. Regenerative Landwirtschaft. Verlag Eugen Ulmer, 195 S. ISBN 978-3-8186-0695-4.

Radetzky, P. 2020. Relevanz und Bereitschaft von Unternehmen im Marktgebiet der badenova AG & Co. KG für regionale CO₂-Kompensation durch Humusaufbau in der Landwirtschaft. Bachelorarbeit, DHBW Lörrach, Fakultät Wirtschaft, 70 S.

Roper, W.R. et al. 2019. Comparing Four Methods of Measuring Soil Organic Matter in North Carolina Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 83:466–474. doi:10.2136/sssaj2018.03.0105

Saatenunion 2021. Das grosse Wurzelposter. https://www.saatenunion.de/news/10813_Das_grosse_Wurzelposter_mit_den_wichtigsten_Zwischenfruechten. Abruf Sept. 2021.

Seiz, P., Guzman-Bustamante, I., Ruser, R., Müller, T., & LTZ Augustenberg 2016. Abschlussbericht zum FuE-Vertrag: Zwischenfrüchte als ökologische Vorrangflächen – Bedeutung für die Lachgasemission. Technical Report, <https://www.researchgate.net/publication/352694170> (abgerufen September 2021).

Seiz, Perik & Guzman-Bustamante, Ivan & Ruser, Reiner & Müller, Torsten. (2016). Zwischenfrüchte als ökologische Vorrangflächen - Bedeutung für die Lachgasemission.

Tidåker, P., Sundberg, C., Öborn, I., Kätterer, T., & Bergkvist, G. (2014). Rotational grass/clover for biogas integrated with grain production—A life cycle perspective. *Agricultural Systems*, 129, 133-141.

Waldmann F. und Weinzierl W. 2014. Organische Kohlenstoffvorräte der Böden Baden-Württembergs in Abhängigkeit von Bodentyp, Bodenart, Klima und Landnutzung. Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS), LUBW [Hrsg.], Karlsruhe, 64 S.

Wiesmeier, M., Burmeister J., Treisch M. & Brandhuber R. 2017. Klimaschutz durch Humusaufbau- Umsetzungsmöglichkeiten der 4 Promille-Initiative in Bayern. In: *Landwirtschaft im Klimawandel Lösungen, die Geld sparen*, pp. 21-30. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.

Wiesmeier M., Mayer S., Pau C., Helming K., Don A., Franko U., Steffens M. und Kögel-Knabner I. 2020. CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes Series 2020/1* | DOI: 10.20387/BonaRes-F8T8-XZ4H.