

Schleswig-Holsteins Böden als CO₂-Senke

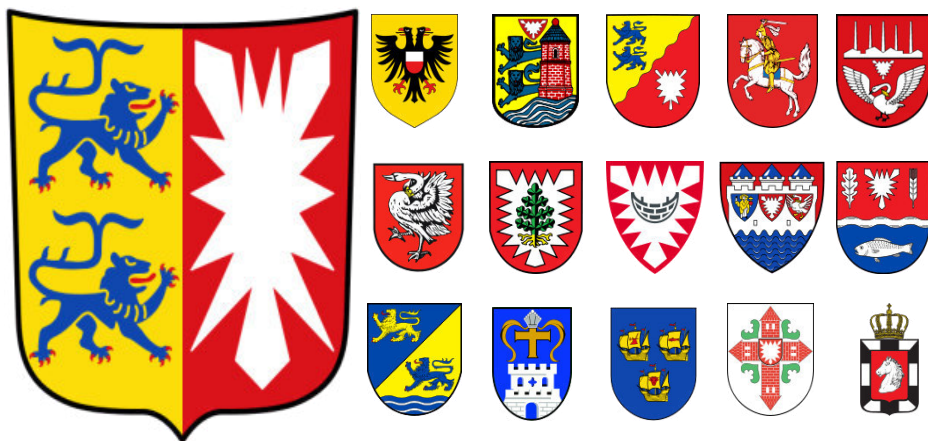


Ein Leitfaden zum Aufbau von
Humus und dem Handel mit
regionalen Klimaschutzzertifikaten



Schleswig-Holsteins Böden als CO₂-Senke

Ein Leitfaden zum Aufbau von
Humus und dem Handel mit regionalen
Klimaschutzzertifikaten



Impressum

Herausgeber

BobenOp
Klima- & Energiewende e.V.
<http://bobenop.de/>

Verfasser

B. Eng. Kaja Juulsgaard
B. Eng. Anneke Quast
B. Eng. Sylvia Schimanek
B. Eng. Ramona Schott

Masterstudenten der Fachrichtung
„Energie- und Umweltmanagement“
an der Europa-Universität Flensburg

Kontakt

Ulf Ehlers
1. Vorsitzender von BobenOp e.V.
Mühlenstraße 14, 24975 Hürup
<http://bobenop.de/kontakts>

Henning Knutzen
Stellvertretener Vorsitzender von BobenOp e.V.
Hauptstr. 64
24975 Hürup
Tel: + 49 (0) 4634 1366

1. Auflage
Flensburg, Mai 2017

Inhalt

I Verzeichnisse.....	II
II Abbildungsverzeichnis	II
III Tabellenverzeichnis	II
Vorwort.....	III
1 Vom Humusaufbau zum Klimaschutzzertifikathandel.....	1
1.2 Mehrwert für den Landwirt	1
2 Grundlegendes.....	2
2.1 Was ist Humus?	2
2.2 Nähr- und Dauerhumus	2
2.3 Prozesse im Humuskreislauf.....	2
2.4 Bedeutung von Humus für den Landwirt.....	2
2.5 Maßstäbe für den Humusgehalt.....	2
2.6 Humusqualität - C/N-Verhältnis	4
Kohlenstoffspeicherung im Boden.....	4
3 Einflussfaktoren auf den Humusaufbau.....	5
3.1 Einfluss des Standortes.....	6
3.1.1 Standort Schleswig-Holstein	6
Marsch	7
Hohe Geest.....	7
Vorgeest	7
Östliches Hügelland.....	8
3.2 Einfluss der Bewirtschaftungsweise	8
3.2.1 Bearbeitungsmaßnahmen	8
3.2.2 Bewirtschaftungsmaßnahmen	8
Wahl der Kulturen und Anbaufolge.....	9
Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln	9
Einbringung von organischen Materialien.....	10
Kompost.....	10
Biokohle.....	11
4 Einschätzungsmöglichkeiten zum Humusaufbau.....	12
4.1 Spatendiagnose.....	12
4.2 Humusbilanzierung	12
4.3 Humusuntersuchung im Labor	13
5 Einstieg in den Handel mit regionalen Klimaschutzzertifikaten.....	14
5.1 Voraussetzungen.....	14
5.2 Ablauf und Zuständigkeiten	15
5.3 Probenahme und -analyse.....	15
5.4 Auswertung im Labor	16
5.5 Das Geschäftsmodell	16
5.6 Beispielrechnung für Klee- bzw. Weidegras	18
5.7 Business Model Canvas.....	20
6 Zukunftsperspektive Biokohle.....	22
6.1 Herstellung von Biokohle.....	22
Pyrolyse.....	22
HTC – Hydrothermale Karbonisierung.....	22
6.2 Anwendung von Biokohle.....	23
7 Rechtliche Grundlage zum Humusaufbau.....	24
Rechtliche Grundlage für Biokohle.....	24
III Anhang.....	IV
IV Literaturverzeichnis.....	IX

I Verzeichnisse

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundlegendes Konzept.....	1	Tabelle 5: Parameter bei Ausgangsstoffen für Biokohlen und ihr Einfluss.....	24
Abbildung 2: Prozesse im Humuskreislauf.....	2	Tabelle 6: Kosten für Probenentnahme und Analyse1	
Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des Abbaus organischer Materialien im Boden mit zugehörigen C/N-Verhältnissen	4	Tabelle 7: Kosten der Umstellung der Fruchtfolge(1)	26
Abbildung 4: Hauptnaturräume (SH)	7	Tabelle 8: Kosten der Umstellung der Fruchtfolge (2)	26
Abbildung 5: Beispielfoto einer Spatendiagnose 1VIII		Tabelle 9: Nährstoffgehalte von Biokohlen aus diversen Rohstoffen und verschiedenen Prozessen	28
Abbildung 6: Materieller, immaterieller und personeller Ressourcenbedarf.....	15		
Abbildung 7: Ablauf und Zuständigkeiten	16		
Abbildung 8: GPS-Koordinaten der. Referenzfläche in Google Earth Ansicht	17		
Abbildung 9: Value Chain.....	18		
Abbildung 10: Business Model Canvas.....	21		
Abbildung 11: SWOT-Analyse.....	22		
Abbildung 12: REM – Bild von Pyrolysekohle aus Holz (langsame Pyrolyse)	21		
Abbildung 13: REM – Bild von HTC-Kohle aus Gerstenstroh	21		

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stufen der Humusgehalte.....	2
Tabelle 2 Eigenschaften von Böden in Abhängigkeit von der Bodenart	6
Tabelle 3: Beispielrechnung.....	20
Tabelle 4: Unterschiede zwischen Pyrolyse- und HTC-Biokohlen.....	21

Vorwort

Der erhöhte Ausstoß von CO₂ in der Landwirtschaft ist ein aktuelles und vielseitig diskutiertes Thema. Durch die intensive, humuszehrende Bewirtschaftung landwirtschaftlich genutzter Böden kommt es zur Freisetzung der klimaschädigenden CO₂-Emissionen.

Dabei stellen die Böden weltweit betrachtet das größte Kohlenstoff-Reservoir dar. In ihnen ist mit einer Kohlenstoffmenge von ca. 1.580 Gigatonnen etwa doppelt so viel Kohlenstoff gebunden wie dieser im Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre vorkommt (ca. 790 Gt C). Da ein Großteil der im Boden gebundenen Kohlenstoffmenge im Humus der oberen Bodenschichten gespeichert ist, ist die Verantwortung der nachhaltigen Bewirtschaftung entsprechend hoch. Außerdem wird mit dem Humusabbau nicht nur Kohlenstoff freigesetzt, der in der Atmosphäre zu CO₂ reagiert sondern vor allem wird dem Boden eine wichtige Grundlage zur Bodenfruchtbarkeit entzogen.

Mit dem Ziel des Boden- und gleichzeitig des Klimaschutzes wurde das Konzept entwickelt - durch die Humusanreicherung Kohlenstoff im Boden zu binden und diesen anschließend in Form von CO₂-Zertifikaten zu handeln. Dieses Konzept wird bereits erfolgreich in Bayern vom Verein Wisber sowie in der Ökoregion Kaindorf in Österreich praktiziert.

Um dieses Konzept auch in Schleswig-Holstein zu etablieren, hat eine studentische Gruppe von „Energie und Umweltmanagement“ Masterantinnen der Universität Flensburg in Zusammenarbeit mit dem Verein BobenOp den vorliegenden Leitfaden ausgearbeitet.

Dabei soll dieser zum einen die wichtigsten Grundlagen liefern und zum anderen als Anleitung dienen. Entsprechend enthält der vorliegende Leitfaden sowohl allgemeingültiges Wissen für die humus-mehrende Bewirtschaftung als auch eine ausführliche Analyse und Vorstellung des Geschäftsmodells.

Vor dem Hintergrund, dass in Schleswig-Holstein im Jahr 2016 insgesamt 63% der Gesamtfläche (≅. ca. 988.900 ha) landwirtschaftlich genutzt wurden, besteht entsprechend großes Potenzial, die Kohlenstoff-Freisetzung zu verhindern und gleichzeitig eine Kohlenstoff-Einspeicherung zu bewirken. Für den Landwirt besteht das Potenzial im Schutz des Bodens und somit in der Sicherung und Steigerung des Ertrags. (Schleswig-Holstein, 2017, S. S. 1)

Der Verein BobenOp

Bei BobenOp – Klima und Energiewende e.V. handelt es sich um einen Verein, der klimaschützende Projekte auf regionaler Ebene initiiert und umsetzt. Das Hauptanliegen liegt dabei in der Reduktion des regionalen CO₂-Fußabdrucks, der Umsetzung von Klimaschutzprojekten sowie dem Schutz des Bodens.



1 | Vom Humusaufbau zum Klimaschutzzertifikathandel

1.1 Das Konzept



Abbildung 1: Grundlegendes Konzept

Über die Anreicherung von Humus im Boden kann Kohlenstoff gebunden werden. Da dieser nicht mehr als Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre vorhanden ist, kommt dies einer „Einsparung“ von CO₂ gleich. In Form von „Klimaschutzzertifikaten“ können die eingespeicherten bzw. vermiedenen CO₂-Emissionen an interessierte Parteien verkauft werden. Aus den Einnahmen der Zertifikate fließt ein Teil als Ausgleichszahlung (für den Mehraufwand zum Humusaufbau) an die Landwirte zurück – der Rest wird in weitere Klimaschutzprojekte reinvestiert.

Durch das steigende Umweltbewusstsein erwerben aktuell immer mehr Unternehmen und Privatpersonen klassische CO₂-Zertifikate um entweder ihre Dienstleistungen bzw. Produkte als klimaneutral anpreisen zu können oder den privaten Ausstoß (z.B. von Flugreisen) zu kompensieren. Auf regionaler Ebene soll in diesen (freiwilligen) Emissionshandelsmarkt, mit den „Klimaschutzzertifikaten“ von dem Verein BobenOp, eingetreten werden.

Im Gegensatz zu klassischen CO₂-Zertifikaten, handelt es sich bei den Klimaschutzzertifikaten, die von BobenOp e.V. für die Anreicherung von Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden ausgestellt werden, um eine erweiterte Form der Emissionskompensation. Anders als bei den klassischen CO₂-Zertifikaten werden nach der CO₂-Einsparung noch weitere regionale Projekte finanziert. Über die Beteiligung an diesen Projekten fließen kontinuierlich Gewinne zurück zu BobenOp e.V., die wiederum in den Klimaschutz, den Bodenschutz und in die CO₂-Kompensation reinvestiert werden. Somit wird ein langfristiger Beitrag zum Klimaschutz geleistet. (Ehlers, 2017)

Aus einer Marktsegmentierung ergibt sich, dass es bisher nur zwei ähnliche Konzepte gibt, die jedoch nicht, auch noch zusätzlich, Klimaschutzprojekte aus den Einnahmen fördern. Da es demnach bisher keine direkte Konkurrenz gibt und sich das dargestellte Konzept aufgrund der Regionalität und Transparenz auszeichnet, bietet dieses großes Potenzial auf dem regionalen Markt.

1.2 Mehrwert für den Landwirt

Für den Landwirt besteht der Mehrwert bei dem Konzept vorrangig in der langfristigen Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit.

Die Ergebnisse aus Dauerversuchen in Mitteleuropa haben gezeigt, dass sich der Humusgehalt im Boden positiv auf die Bodenstruktur, die Nährstoffdynamik, die Wasserhaltekapazität und Nährstoffspeicherkapazität auswirkt (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 4). Entsprechend ist Humus sowohl für die Bodenfruchtbarkeit als somit auch für die Ertragssicherheit von großer Bedeutung. Außerdem kann sich der Landwirt durch die Teilnahme am Konzept ein positives Image verschaffen.

2 | Grundlegendes

2.1 Was ist Humus?

Per Definition ist Humus „die Gesamtheit der toten organischen Substanz des Bodens“. (Scheffer, et al., 2016, S. 52). Um beim Humusaufbau auf landwirtschaftlich genutzten Flächen jedoch auszuschließen, dass z.B. Stroh, welches auf dem Boden liegt, bereits als Humus gilt, wird dieser im Folgenden definiert als:

Die Gesamtheit der toten organischen Substanz aus tierischer, pflanzlicher und mikrobieller Herkunft, die im Boden integriert ist

(Kolbe & Zimmer, 2015, S. 5).

2.2 Nähr- und Dauerhumus

Grundlegend ist Humus in zwei Arten - den Nährhumus und Dauerhumus zu unterscheiden:

Nährhumus versorgt die Pflanzen im Boden mit wichtigen Nährstoffen, wie z.B. Stickstoff und Phosphor. Die überwiegend instabilen organischen Verbindungen werden oft von Mikroorganismen angegriffen und demzufolge ist er nicht so langlebig wie der Dauerhumus. Je nach Bodenart, hat der Nährhumus einen Anteil von 20-50%. (Dunst, 2011, S. 32) Vom Nährhumus im Boden folgt ein fließender Übergang zum Dauerhumus.

Im **Dauerhumus** sind die stabilen, schwer zersetzbaren Humusstoffe vorhanden. Mit 50-80% nimmt dieser den größeren Anteil im Boden ein. Dauerhumus ist verantwortlich für die vorherrschende Bodenstruktur und ist nur bedingt durch die Landwirtschaft beeinflussbar. (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 5; Dunst, 2011, S. 32)

2.3 Prozesse im Humuskreislauf

Hauptsächlich besteht Humus aus den Elementen Kohlenstoff (C), gefolgt von Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Phosphor (P) und Schwefel (S). Im Durchschnitt liegt der Kohlenstoffgehalt bei etwas mehr als der Hälfte (58%), variiert zum Teil jedoch stark (Scheffer, et al., 2016, S. 52).

Im Boden durchläuft Humus zu jeder Zeit bestimmte Aufbau- Abbau- und Umbauprozesse

(Kolbe & Zimmer, 2015, S. 5)

Diese sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

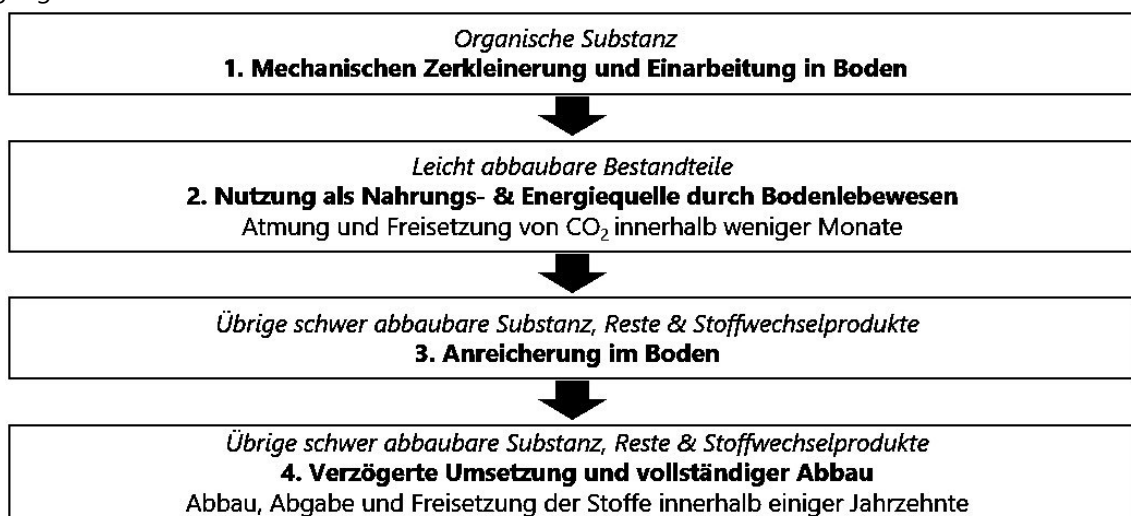


Abbildung 2: Prozesse im Humuskreislauf

Demnach folgen nach der *mechanischen Zerkleinerung und Einarbeitung* (1.) der zugeführten organischen Substanz zuerst der Abbau der biochemisch instabilen Bestandteile von den Bodenlebewesen, wie Tiere, Pilze und Mikroorganismen. Innerhalb weniger Monate *nutzen diese das Material als Nahrungs- und Energiequelle* (2.) und veratmen daraufhin Kohlenstoffdioxid (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 6). Die verbliebene, schwer abbaubare Substanz (z.B. mit hohem Ligningehalt) sowie die Stoffwechselendprodukte der Bodenlebewesen können nur verzögert umgesetzt werden. Daher *reichern sie sich vorerst im Boden an* (3.) und werden *schließlich nach einigen Jahrzehnten auch abgebaut* (4.) (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 6). Die abgebauten Stoffe dienen als Nahrung für die Pflanzen, die nach dem Absterben wiederum die organische Masse für neuen Humusaufbau bilden. Somit schließt sich der Humuskreislauf. (Dunst, 2011, S. 33)

Im einem intakten Humuskreislauf unterliegen alle zugeführten organischen Materialien einem vollständigen Abbau (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 6):

- » Kohlendioxid und Wasser werden in Atmosphäre und Boden abgegeben
- » Pflanzliche Funktionselemente, wie Kalium und Natrium, sind nicht in den Zellstrukturen der organischen Substanz eingebaut und werden daher früh freigesetzt
- » Abhängig von der Stabilität der chemischen Bindung werden die organisch gebundenen Grundnährstoffe N, P, S sowie einige Spurenelemente mit der Zeit freigesetzt und für das pflanzliche Wachstum verfügbar

Als **Humifizierung** werden alle Mechanismen zur Zerkleinerung; Zersetzung, bzw. Umsetzung der abgestorbenen organischen Substanz im Boden und die gleichzeitige Bildung von Huminstoffen verstanden..

Als Gegenstück zur Humifizierung beschreibt die **Mineralisierung** die vollständige Zerkleinerung und der Abbau von Humus zu mineralischen Endprodukten unter Freisetzung von Energie.

(www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de, 2016)

2.4 Bedeutung von Humus für den Landwirt

Als wichtiger Indikator für die Bodenfruchtbarkeit bringt der Aufbau von Humus für den Landwirt positive Auswirkungen mit sich.

- + Steigerung des Porenvolumens und Aggregatstabilität
→ *Verbesserung der Tragfähigkeit und Erosionsanfälligkeit*
→ *Verbesserung Aufnahme- und Speicherefähigkeit von Wasser*
- + Anregung des Bodenlebens
→ *Anstieg mikrobieller Biomasse*
→ *Anstieg Regenwurmbesatz*
- + Speicher für Nährstoffe und Spurenelemente
- + Höhere Mineralisation
- + Höhere Pflanzengesundheit

(VDLUFA, 2004, S. 3; Kolbe & Zimmer, 2015, S. 9; Dunst, 2011, S. 23)

2.5 Maßstäbe für den Humusgehalt

Für den Humusaufbau ist es wichtig, den aktuellen Gehalt im Boden zu messen. Um die organischen Komponenten im Boden, also den Humus, von den anderen anorganischen Verbindungen im Boden zu unterscheiden, ist nur eine analytische Trennung für Kohlenstoff und bedingt für Stickstoff möglich. Daher bildet der organische Kohlenstoff (C_{org}) die Maßeinheit und durch diese Messung kann der Humusgehalt festgestellt werden. (Rippel & Beck, 2017)

Tabelle 1: Stufen der Humusgehalte

Stufe	Bezeichnung	Humus [%TM]	C_{org} [% TM]
H1	sehr schwach humos	<1	<0,58
H2	schwach humos	1-2	0,58-1,15
H3	mittel humos	2-4	1,16-2,31
H4	stark humos	4-8	2,32-4,63
H5	sehr stark humos	8-15	4,64-8,69
H6	Extrem humos	15-30	8,70-15,00
H7	Organisch (Torf)	>30	>15,00

Dabei ist zu berücksichtigen, dass sowohl die Erhöhung des Versorgungsgrades von Böden mit organischer Substanz, als auch die Erhöhung von Humusgehalten begrenzt ist. Schwach humose Flächen verzeichnen Anteilig größere Erfolge bezüglich des Humusaufbaus als Böden, die bereits von vornherein hohe Humusgehalte aufweisen. (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 10)

2.6 Humusqualität - C/N-Verhältnis

Stabiler Humus hat einen Kohlenstoffanteil (C) von fast 60 % und Stickstoffanteil (N) von 6 % – somit einem Verhältnis von 10.

Das C/N-Verhältnis im Boden ist ein Maß für den Abbaugrad der organischen Substanzen im Boden.

Mit fortschreitender mechanischen Zersetzung, also

der Humifizierung und dem mikrobiellen Abbau, von beispielsweise zugefügten organischen Materialien, wird CO₂ freigesetzt und andere Abbauprodukte gebildet. Dies beeinflusst das C/N-Verhältnis. Ein kleines C/N-Verhältnis (<9) im Humus führt zur Freisetzung von Stickstoff, während dieser bei einem weiten Verhältnis >11 im Humus gebunden wird. Je nach Art haben die organischen Materialien, welche in den Boden eingearbeitet werden, unterschiedliche C/N-Verhältnisse (ca. 20-100) und können durch eine gezielte Auswahl den Wert im Humus beeinflussen und ausgleichen. So können beispielsweise organische Materialien mit weitem C/N-Verhältnis Böden mit geringem C/N-Verhältnis positiv beeinflussen. (Dunst, 2011, S. 43 f.)

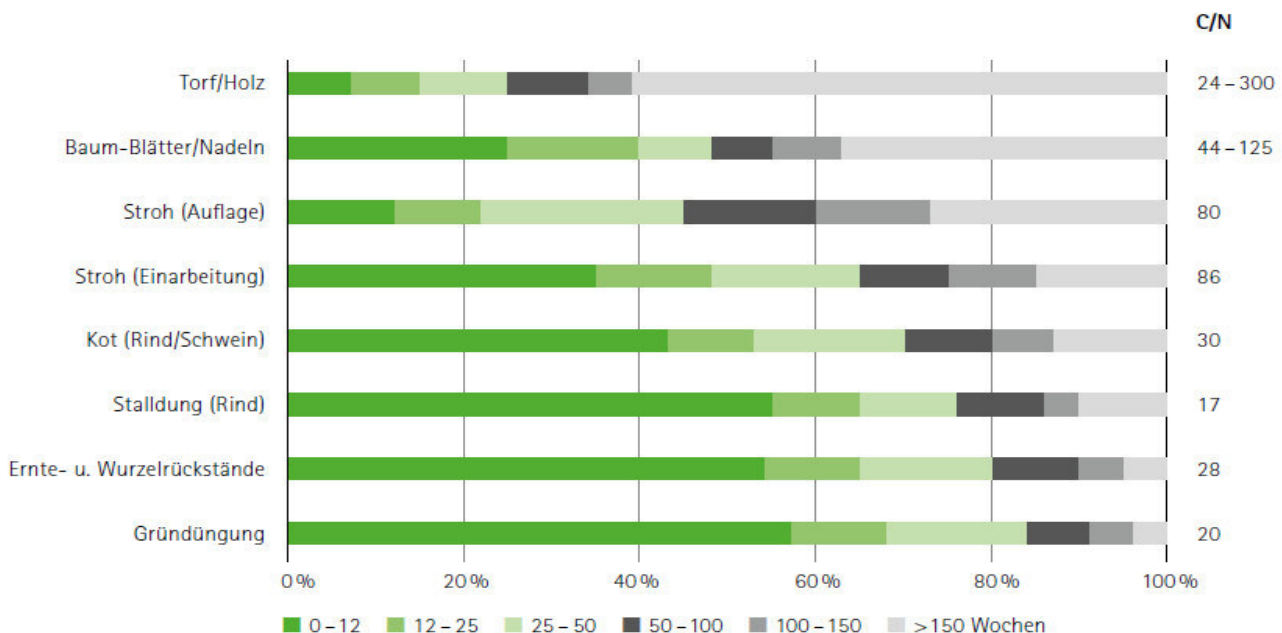


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des Abbaus organischer Materialien im Boden mit zugehörigen C/N-Verhältnissen

Kohlenstoffspeicherung im Boden

Wie bereits im Kapitel 2.3, Abschnitt Prozesse im Humuskreislauf dargestellt, unterliegen die organischen Substanzen im Boden einem vollständigen Abbau und es entsteht ein offenes Fließgewicht zwischen Zufuhr und Abfuhr. Aus Mineralisation freigesetzter Kohlenstoff von der organischen Substanz reagiert zu CO₂ und gelangt in die Atmosphäre. (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 6)

Die Geschwindigkeit des Abbaus der organischen Substanz und damit der Freisetzung von Kohlenstoff wird von Standort- und Umwelteinflüssen, also Klima, Boden und Bewirtschaftung, beeinflusst.

Ziel dieses Leitfadens ist es, durch gezielte Maßnahmen dem Abbau von Humus entgegenzuwirken und somit langfristig Kohlenstoff zu speichern und die Bodeneigenschaften zu verbessern.

Das folgende Kapitel behandelt jede Einflussgröße bezüglich des Humusaufbaus im Einzelnen

3 | Einflussfaktoren auf den Humusaufbau

Die Anreicherung von Humus auf landwirtschaftlich genutzten Böden ist durch ein komplexes Wirkungsgefüge aus standort- und nutzungstypischen Faktoren bedingt. Zusammenfassend lassen sich die einzelnen Faktoren den drei Oberbegriffen „Klima“, „Boden“ und „Bewirtschaftung“ zuordnen. Wie stark die Klima-, Boden- und Bewirtschaftungsfaktoren sich auf den Aufbau und die Erhaltung von organischer Substanz im Boden auswirken, zeigt die folgende Gewichtung:

Klima:	Boden:	Bewirtschaftung:
> 50%	20 - 30 %	5 - 30%

(Kolbe & Zimmer, 2015, S. 12)

Aus den Forschungsergebnissen von ca. 240 Dauerversuchen in Mitteleuropa wird deutlich, dass standorttypische Faktoren den größten Einfluss auf den Humusgehalt im Boden nehmen (Kolbe und Zimmer 2015, S. 12). Als gar nicht bis kaum beeinflussbare Größen geben die klimatischen Bedingungen und die Eigenschaften des Bodens die Voraussetzungen und Grenzen für die Humusanreicherung vor. In Abhängigkeit von den Klima- und Bodengegebenheiten ist die Einflussnahme von nutzungstypischen Faktoren entsprechend begrenzt. Darunter fallen z.B. unterschiedliche Landnutzungsformen oder Bewirtschaftungsmaßnahmen. Allerdings sind die Bedingungen für den Humusaufbau und dessen Erhaltung nur in den seltensten Fällen im Boden selbst gegeben. (Dunst 2011, S. 64)

Daher ist dem Faktor der „Bewirtschaftung“ als einzig beeinfluss- und anpassbare Größe eine besondere Wirkung beizumessen. Dies wird bereits anhand der typischen Humusgehalte je Landnutzungsform deutlich. Einer Status-Quo Analyse über die „Gehalte an organischer Substanz Oberböden in Deutschland“ zufolge, stellen sich in den oberen Schichten landwirtschaftlich genutzter Böden langfristig die folgenden Humusgehalte ein:

Ackerland:	Forstland:	Grünland:
1-4%	2-8%	4-15%

(Düwel, et al. 2007, S. 19)

Demnach werden Ackerböden mit typischen Humusgehalten zwischen 1-4% als „*schwach bis mittel humos*“ eingestuft. Durch die intensive Bewirtschaftung weisen Ackerböden damit in der Regel die geringsten Humusgehalte auf. Grünland hingegen fällt aufgrund der schonenden Bewirtschaftung in die Einteilung „*mittel bis sehr stark humos*“. Auf Forstland stellt sich je nach Intensität der Bewirtschaftung typischerweise ein „*mittel bis stark humoser*“ Gehalt ein. Neben den standorttypischen Voraussetzungen wird das Potenzial beim Humusaufbau auch durch die Wahl der Landnutzungsform massiv beeinflusst und entsprechend begrenzt. Um innerhalb der vorgegebenen Grenzen eine möglichst hohe Mengen stabilen Humus aufzubauen gilt es auf die klimatischen Bedingungen und Bodeneigenschaften angepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen zu ergreifen. Für die Bestimmung geeigneter Bewirtschaftungsmaßnahmen sind die Untersuchung des Bodens und die Kenntnis über die klimatischen Bedingungen essentiell. (Kolbe und Zimmer 2015, S. 9-10)

Obwohl die einzelnen Faktoren stark standort- und nutzungstypisch bedingt sind, lassen sich die folgenden allgemeingültigen Grundsätze formulieren:

2.7 Einfluss des Standortes

Für langfristig stabilen Humusaufbau muss der Boden eine gleichmäßige Nährstoff-, Sauerstoff- und Feuchtigkeitsversorgung gewährleisten können und einen neutralen pH-Wert aufweisen (Dunst 2011, S. 84).

Um diese Bedingungen zu erfüllen sollte der Boden über die folgenden Eigenschaften verfügen:

- + Gute Durchlüftung
- + Gute Durchwurzelbarkeit
- + Hohe Speicherkapazität von Wasser und Nährstoffen
- + Gutes Führungsvermögen von Wasser und Nährstoffen

Welche Eigenschaften im Boden selbst gegeben sind wird durch die vertretenden Bodenarten definiert. Vereinfacht ergibt sich für die vier Hauptbodenarten; Sand, Schluff, Ton und Lehm die nachstehende Bewertung der oben genannten Eigenschaften:

Tabelle 2 Eigenschaften von Böden in Abhängigkeit von der Bodenart (Bundesverband Boden e.V. o. A., Boku o. A.)

Eigenschaft	Sand	Schluff	Ton	Lehm
Ø Korngrößen [µm]	63 - 2000	2 - 63	<2	<2 - 2000
Durchlüftung	++	+	-	+
Durchwurzelbarkeit	++	+	+	-
Wasserspeicherkapazität	--	+	++	+
Nährstoffspeicherkapazität	--	-	++	+
Wasserführungsvermögen	-	++	-	+
Nährstoffführungsvermögen	-	+	+	++
	++ Sehr gut	+ Gut	0 Mittel	- Schlecht

Je nachdem mit welchem Anteil die jeweilige Bodenart im Ober- und Unterboden vertreten ist, überwiegen die zugehörigen Eigenschaften. Entsprechend neigen Böden, in denen eine Bodenart besonders dominiert, oft zur Verdichtung, Versauerung, Verschlämmung oder Erosion durch Wind und Wasser. So zeichnen sich Böden mit einem hohen Sandanteil zwar durch gute Wasserführung aus, trocknen durch die geringe Speicherkapazität und der gleichzeitig guten Durchlüftung jedoch schnell aus. Somit sind stark sandige Böden besonders anfällig für Wind- und Wassererosion. Schwere Ton- und Lehmböden hingegen neigen aufgrund ihrer schlechten Wasserführung oft zur Verdichtung. Für den Humusaufbau gilt daher:

Je ausgeglichener die Mischung verschiedener Bodenarten ist, desto höher ist das Potenzial langfristig stabilen Humus aufzubauen.

(Schiller o.A.)

So sind beispielsweise sandige Lehmböden oder Böden mit einer hohen Ton-Schlufffraktion besonders günstig. Durch die Bindung von Humuspartikeln an die Ton- oder Schlufffraktion werden diese gegen die weitere Mineralisierung stabilisiert (Kolbe und Zimmer 2015, S. 13, Scheffer, et al. 2016, S. 61)

Neben den bereits behandelten Bodeneigenschaften ist außerdem der Skelettanteil im Boden zu beachten. Mit Korngrößen von über 2mm (nach Siebung) können Komponenten wie etwa Gestein- oder Mineralbruchstücke nicht humifiziert werden. Entsprechend gilt:

Je höher der Skelettanteil im Boden ist, desto weniger Humus kann im Vergleich zu einer Fläche mit identischen Voraussetzungen aber geringerem Skelettanteil aufgebaut werden.

(Stahr 2014)

2.7.1 Standort Schleswig-Holstein

In Schleswig-Holstein unterscheidet sich das Potenzial für den Humusaufbau stark in Abhängigkeit der vier Hauptnaturräume.



Abbildung 4: Hauptnaturräume Schleswig-Holsteins (LLUR 2006, S. 58 ff)

Durch die regionsspezifischen geographischen, geologischen und topographischen Voraussetzungen, unterscheiden sich die Böden Marsch, der Vorgeest, der hohen Geest und dem Östlichen Hügelland hinsichtlich ihrer Eigenschaften:

Marsch

Mit einer überwiegend hohen bis sehr hohen Nährstoffverfügbarkeit im effektiven Wurzelraum von überwiegend 600 bis 1.200 kmolc/ha gelten die Böden der Marsch grundsätzlich als sehr fruchtbar (LLUR o.A.). Aufgrund der unmittelbaren Nähe zur Küste und dem damit einhergehenden hohen Grundwasserspiegel ist die stetige Wasserversorgung garantiert. Auf den als Ackerland genutzten Marschböden können daher hohe Erträge erzielt werden. Den Vorteilen steht allerdings der Nachteil entgegen, dass die Marschböden stark vom Wassergehalt bestimmt werden. Oftmals sind die Böden sehr nass und neigen selbst bei geringen Niederschlägen zur Verdichtung. Um aufwendigen Drainage-Arbeiten zu entgehen, wird ein Großteil der Marschböden daher als Grünland genutzt. Obwohl die Humusgehalte in Abhängigkeit vom Wassergehalt stark variieren, bieten die Böden der Marsch insgesamt gute Voraussetzungen für den Humusaufbau. Dies gilt auch in Hinblick auf den Skelettanteil. (Stürner 2001, S. 6 ff., LLUR 2006, S. 60-73, LLUR 2011, S. 11-13) Aufgrund des hohen Tonanteils im Boden liegt der Skelettanteil in

der Marsch laut dem LLUR durchschnittlich bei 0%. (Burbaum 2017)

Hohe Geest

Im Gegensatz zur Marsch sind die Böden in der hohen Geest im Durchschnitt weniger reich an Nährstoffen. Überwiegend liegt die Nährstoffverfügbarkeit im effektiven Wurzelraum zwischen 150 bis 600 kmolc/ha. (LLUR o.A.) Bei hohen Sandanteilen im Boden ist die Speicherkapazität sowohl von Nährstoffen als auch von Wasser entsprechend begrenzt. Von sich aus bieten die Böden der hohen Geest im Durchschnitt demnach weniger gute Voraussetzungen für den Humusaufbau als die Böden der Marsch. Durch die gute Bearbeitbarkeit können die Defizite jedoch durch angepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen ausgeglichen werden. (LLUR 2006, S. 73-73, LLUR 2011, S. 13-16) Natürlich begrenzt wird Potenzial bei der Humifizierung allerdings durch ein höheres Bodenskelett. Laut Angabe des LLUR liegt der Skelettanteil in der hohen Geest zwischen 2 und 10%. (Burbaum 2017)

Vorgeest

Durch die geographische Lage sind die Böden der Vorgeest von Wasserarmut geprägt. Mit einem charakteristisch geringen Ton- und Schluffanteil von unter 20% ist die Fähigkeit der sandigen Böden von sich aus Wasser zu halten begrenzt. Gleiches gilt für die Speicherkapazität von Nährstoffen. Entsprechend neigen die Vorgeestböden zur Auswaschung von Nährelementen. (LLUR 2011, S. 19, LLUR 2006, S. 76-77) Wie die Böden der hohen Geest weisen jene der Vorgeest eine geringere Nährstoffverfügbarkeit (150 bis 600 kmolc/ha) als die Marschböden auf (LLUR o.A.). Aufgrund der unrentablen, landwirtschaftlichen Nutzung als Ackerland eignen sich die Vorgeestböden eher als Forst- oder Grünland. Durch die gute natürliche Durchlüftung und mithilfe geeigneter Bewirtschaftungsmaßnahmen bieten die Böden dennoch gute Voraussetzungen für ein intensives Bodenleben und somit dem Aufbau von Humus. (LLUR 2011, S. 19-22, LLUR 2006, S. 76-77) Wie auch bei der hohen Geest begrenzt der Skelettanteil zwischen

2 und 10% das quantitative Potenzial beim Humusaufbau. (Burbaum 2017)

Östliches Hügelland

Charakteristisch für die Böden des östlichen Hügellands ist der hohe Anteil der Ton- und Schluff-fraktion. Entsprechend gelten die Böden als leistungsstark und nährstoffreich mit einer durchschnittlichen Nährstoffverfügbarkeit zwischen 600 und 1.200 kmolc/ha im effektiven Wurzelraum (LLUR o.A.). Neben der guten Versorgung mit Nährstoffen, kann das östliche Hügelland aufgrund der Küsten- und Grundwassernähe außerdem die stetige Wasserversorgung gewährleisten. Die Böden sind daher für die landwirtschaftliche Nutzung als Ackerböden prädestiniert. Aufgrund der gegebenen Bodeneigenschaften bieten die östlichen Hügellandböden von sich gute Voraussetzungen für den Aufbau von Humus. (LLUR 2011, S. 28-31, LLUR 2006, S. 68-70) Allerdings ist auch bei den Böden des östlichen Hügellands ein Skelettanteil zwischen 2 bis 10 % zu beachten. (Burbaum 2017)

2.8 Einfluss der Bewirtschaftungsweise

Durch die dauerhafte und meist intensive Bewirtschaftungsweise ist die Biologie von landwirtschaftlich genutzten Böden in der Regel stark beansprucht. Dies gilt insbesondere für intensiv bewirtschaftete Ackerböden. Entsprechend ist die gleichmäßige und ausreichende Versorgung mit Sauerstoff, Feuchtigkeit und Nährstoffen nur in den seltensten Fällen gegeben. (Dunst 2011, S. 84) Laut dem zusammengetragenen Wissen zum Humusaufbau von Gerald Dunst ist ein langfristig stabiler Humusaufbau demnach nur „durch eine Änderung der Wirtschaftsweise möglich.“ (Dunst 2011, S. 80) Welche Änderungen im Allgemeinen humusmehrend wirken zeigen die nachfolgenden Grundsätze:

2.8.1 Bearbeitungsmaßnahmen

Wie durch die landnutzungsformtypischen Humusgehalte bereits deutlich geworden ist (siehe 0.), gilt im Allgemeinen:

Je weniger intensiv der Boden bearbeitet wird, desto höhere Humusgehalte lassen sich erzielen und erhalten.

(Dunst 2011, S.85)

Da Landnutzungsänderungen prinzipiell reversibel sind können sich Humusgehalte bei einer Umstellung von intensiv bearbeiteten Ackerland zu schonend bearbeiteten Grünland um 20% bis zu 80% erhöhen (Kolbe und Zimmer 2015, S. 11). Auf grundlegend humusarmen Böden ist ein gewisses Maß der Bearbeitung insbesondere in der Anfangsphase des Humusaufbaus jedoch unabdingbar ((Dunst 2011, S. 85)

Bei der Bearbeitung ist allgemein zu beachten, dass Böden immer von unten nach oben bearbeitet werden. Für die Einbringung von organischer Substanz beispielsweise heißt das, diese nur so tief einzuarbeiten wie der vorherrschende Humusgehalt im Boden bereits aufgebaut ist. Die Abschätzung der geeigneten Bearbeitungstiefe kann über regelmäßige Spatendiagnosen an mehreren Stellen erfolgen (S. 45). Für die erste Bearbeitung ist je nach Bodenart eine Tiefe von 5-10 cm zu empfehlen. Für die nachfolgenden Bearbeitungen kann je nach Erfolg um bis zu 5 cm tiefer gearbeitet werden. In der Praxis haben sich dafür insbesondere der Grubber und die Kreiselegge bewährt. (Dunst 2011, S. 85-86)

Um die eingebrachte organische Substanz im Boden zu erhalten sollte auf das stetige Umwälzen des Bodens durch den Pflug oder die Bodenfräse sowie auf die Unkrautvernichtung mittels Hake verzichtet werden. Die Auflockerung und Durchmischung verschiedener Bodentiefen beeinträchtigt die jeweils vorherrschende Bodenbiologie erheblich. Dabei wird der Bestand von unverzichtbaren Organismen wie den Regenwürmern massiv reduziert. Durch die zerstörte Bodenbiologie und -struktur können weitere ungewollte Reaktionen wie eine Sauerstoffversorgung, Bodenversauerung, Verschlämmung, Verdichtung oder Erosion hervorgerufen werden. (Dunst 2011, S. 85-86)

2.8.2 Bewirtschaftungsmaßnahmen

Um langfristig stabilen Humus aufzubauen gilt es die richtige, humusaufbauende Biologie aufs Feld zu bringen und das Überleben dieser zu gewährleisten. Eine stetige „Fütterung“ und der

Verzicht auf humuszehrende Düngung und Bepflanzung sind dafür essentiell. Entscheidend ist daher, die nachfolgenden Bewirtschaftungsmaßnahmen an die Bedürfnisse des Bodens anzupassen:

Wahl der Kulturen und Anbaufolge

Vielerorts steht das Generieren eines möglichst hohen Ertrags pro Hektar im Vordergrund. Entsprechend werden oft „humuszehrende“ Kulturen wie Mais als Haupt- oder gar als Monokultur angepflanzt. Insbesondere von dem Anbau reiner Monokulturen ist jedoch abzuraten. Durch die einseitige Versorgung und lange Zeiträume ohne Pflanzendecke verursachen Monokulturen eine Unterversorgung und periodisches „Hungern“ der vorherrschenden Bodenbiologie. Auch das Einbringen verbleibender Ernte- und Wurzelrückstände kann die Unterversorgung der Biologie nicht kompensieren und es kommt stetig zum Humusabbau. Um eine positive Humusbilanz zu erreichen ist die Wahl der Kulturen und die Anbaufolge dieser von großer Bedeutung. (Dunst 2011, S. 91-92;99)

Durch das periodische Anbauen „humusmehrender“ Kulturen kann langfristig stabiler Humus aufgebaut werden. Zu den „humusmehrenden“ Kulturen zählen jene, die eine hohe Menge Ernte- und Wurzelreste von hoher Qualität bilden. Anders als bei „humuszehrenden“ Kulturen können die Reste „humusmehrender“ Kulturen auf den Feldern den Humusabbau kompensieren. Obwohl die humifizierende Wirkung jeder Kultur von standorttypischen Faktoren wie dem Klima oder den Bodengegebenheiten abhängt, weisen Feldfutter, Untersaaten und Körnerleguminosen im Allgemeinen hohe Ernte- und Wurzelreste auf. Je mehr der „humusmehrenden“ Kulturen in die Anbaufolge eingebracht werden, desto positiver fällt die Humusbilanz aus. (Kolbe und Zimmer 2015, S. 14-15, Dunst 2011, S. 91-92) Unabhängig vom Standort gilt insgesamt:

Je vielfältiger die Fruchtfolge und je mehr „humusmehrende“ Fruchtarten enthalten sind, desto mehr Humus kann angereichert werden und überleben.

Mit einer vielfältigen Fruchtfolge wird nicht nur eine vielseitige Versorgung für die Mikrobiologie gewährleistet sondern auch das periodische „Hungern“ durch

eine dauerhafte Pflanzendecke vermieden. Bereits eine zweigliedrige Fruchtfolge kann den Humusaufbau auf ein höheres Niveau anheben. Statt Mais als Monokultur zu pflanzen, verbessert eine Mais-Wintergetreide-Mais Fruchtfolge die Humusbilanz erheblich. (Dunst 2011, S. 89-92)

Neben der Erweiterung der Fruchtfolge um reine Kulturen, ist die Einbindung von Untersaaten und Mischkulturen zu empfehlen. Die Vorteile der Untersaaten liegen in dem geringen Zusatzaufwand, der dauerhaften Bedeckung des Bodens, der Bereitstellung weiterer Wurzelmasse und nicht zuletzt in der Unterdrückung von Unkraut. Bei dem Anbau von Mais oder Getreide als Hauptkultur hat sich in der Praxis Weißklee als Untersaat bewährt. (Dunst 2011, S. 92-93)

Wie auch bei den Untersaaten liegt der Vorteil bei Mischkulturen vor allem in der vielfältigen Wurzelmasse. Durch den gleichzeitigen Anbau von mindestens zwei sich ergänzenden Kulturen auf einer Fläche kann in Summe außerdem ein hoher Ertrag erzielt werden. Der Mehraufwand für Mischkulturen gegenüber dem Anbau von Monokulturen entscheidet sich in Abhängigkeit der Anzahl und Art der Kulturen. Gering ist der Mehraufwand beispielsweise bei Mischkulturen, die gemeinsam geerntet werden und anschließend über Siebe voneinander getrennt werden können. Daher hat sich in der Praxis unter anderem die Mais-Käferbohne-Mischkultur bewährt. (Dunst 2011, S. 92)

» Empfehlung:

Als Hilfestellung bei der Wahl geeigneter Kulturen und organischer Substanzen kann ein Blick auf Humusbilanzierungsrichtwerte helfen:

<http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf>

Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln

Hinsichtlich des Einsatzes von Pestiziden und Düngemitteln gilt unabhängig von den Bodeneigenschaften;

Ob Pestizide, wasserlösliche Mineraldünger oder Gülle; allesamt bringen sie das Gleichgewicht der Bodenbiologie durcheinander.

(Dunst 2011, S. 100-102)

Bei dem Einsatz von Pestiziden können bestimmte Gruppen im Boden langfristig durch die enthaltenen chemischen Substanzen absterben und somit den Humusaufbau massiv hemmen. Entsprechend ist der Pestizideinsatz so weit wie möglich zu reduzieren und besten Falls zu unterlassen. Bei wasserlöslichen Mineraldünger und Gülle hingegen wird ein Ungleichgewicht im Boden unter anderem durch die hohe Salzkonzentration hervorgerufen. Zusätzlich wirken sich die Fäulnisstoffe und löslichen Stickstoffe in Gülle negativ auf die Bodenbiologie aus. Dies gilt insbesondere für Biogasgülle. Wie bei dem Einsatz von Pestiziden ist also auch eine Reduktion oder gar ein Verzicht von wasserlöslichen Mineraldüngern und Gülle zu empfehlen. Auch von einer Mischung aus Kompost und wasserlöslichem Mineraldüngern ist abzuraten (Dunst 2011, S. 82-86;96-97;100-102)

Während auf wasserlösliche Mineraldünger und „scharfe“ Gülle zu verzichten ist, wirken sich organische Mineraldünger und aufbereitete Gülle durchaus positiv auf die Bodenbiologie aus. Allgemein ist der Einsatz von aufbereiteten, organischen Düngemitteln für den effizienten Humusaufbau unabdingbar. Dabei richtet sich die Aufbereitung der Düngemittel wieder nach den Bodenbedürfnissen. Generell gilt allerdings:

Statt dem Einsatz von löslichen Düngemitteln und Pestiziden ist auf organische Düngung mittels Kompost, Gründüngung und Biokohle zu setzen.

Einbringung von organischen Materialien

Die Einbringung von organischem Material wird als wichtigste Maßnahme zum Aufbau von Humus beschrieben. Dabei wird zwischen Stroh, Stallmist, Gülle und Kompost unterschieden. Welche Form von Düngung verwendet wird hängt vom Boden und den darin enthaltenen Nährstoffen ab. (Dunst, 2011, S. 96) Insgesamt gilt für die Einbringung:

Je vielfältiger das Ausgangsmaterial ist, desto mehr stabile Humusstoffe können entstehen.

Dennoch ist nicht jedes organische Düngemittel für den Aufbau von langfristig stabilem Humus geeignet. Auf Grund unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen, wie z.B. Lignin, Stickstoff usw., weisen organische Materialien nach Ausbringung auf dem Feld unterschiedliche Abbauverhalten auf. (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 16) Aufgrund der hohen Relevanz der organischen Düngung hinsichtlich des Humusaufbaus werden nachfolgend zum einen das gängste Ausbringungsmaterial –der Kompost und zum anderen eine zukunftsweisendes Material – die Biokohle vorgestellt:

Kompost

Im Vergleich zu anderen Düngemitteln, wie Gründüngung, Mist und Gülle weist Kompost eine hohe Humusreproduktion; sowohl bei Betrachtung von Frisch-, als auch Trockenmasse, auf. (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 16)

Neben der humumehrenden Wirkung hat die Zufuhr von Kompost auch andere positive chemische, biologische und physikalische Wirkungen wie z.B.:

-
- + Düngewirkung
 - + Steigerung der biologischen Aktivität
 - + Verminderung der Auswaschung von Nährstoffen
 - + Erhöhung des Porenvolumens und der Wasserkapazität
 - + Erhöhung der Aggregatstabilität und damit Vorbeugung gegen Erosion
 - + Verbessert die Erwärmung des Bodens
-

(Baumgarten, 2010, S. 6)

Neben den positiven Einflüssen können jedoch auch negative Wirkungen bei der Verwendung von Kompost auftreten, wenn dieser beispielsweise falsch angewandt wird:

-
- Organische und anorganische Schadstoffe können angereichert werden
 - Immobilisierung von Stickstoff
 - Wasserbelastungen durch Nähr- und Schadstoffausträge
 - Weitere negative Effekte durch minderwertige Komposte, wie z.B. unreife Komposte, zu hohe Gehalte an leicht löslichen Salzen und enthaltene Schadorganismen oder Ballaststoffe, wie Kunststoff oder Glas.
-

(Baumgarten, 2010, S. 7)

Bei der Anwendung sind grundsätzlich drei Faktoren zu beachten:

-
- Ausbringungszeitpunkt, entsprechend der Jahreszeit und der Bodenbewirtschaftung
 - Ausbringungsmenge, entsprechend dem Bedarf im Boden und unter Einhaltung gesetzlicher Vorschriften
 - Kompostart dem Zweck entsprechend
-

(Baumgarten, 2010, S. 7)

Insgesamt gilt:

Die Eigenschaften und somit die Wirkung von Kompost als Endprodukt ergibt sich in Abhängigkeit von den Kompost-Rohstoffen und dem Kompostierungsprozess

(Baumgarten, 2010, S. 12)

Entsprechend bestimmen die Zusammensetzung und die Struktur der im Kompost vorhandenen Rohstoffe beispielsweise über den Nährstoff-, Salz- und Schadstoffgehalt. Außerdem über Schadstoffverunreinigungen, den pH-Wert, die Humusäquivalente und nicht zuletzt das C/N-verhältnis.

Mit dem zunehmenden Rottegrad von Kompost erfolgt gleichzeitig eine Zunahme der Stabilität der organischen Substanzen sowie der Kohlenstoffgehalte.

Biokohle

Um Böden mit stabilen Kohlenstoffverbindungen anzureichern und langfristig Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu entfernen (C-Sequestrierung), wird derzeit die

Verwendung von Biokohle viel diskutiert. Per Definition gilt:

Biokohle ist „[...]ein durch pyrolytische Verkohlung hergestelltes Produkt aus unbelasteten organischen Ausgangsstoffen...“, wie Stroh, Grünschnitt, Gärreste o. Ä.

(Möller & Höper, 2014, S. 6) (Teichmann, 2014, S. 3; Haubold-Rosar, et al., 2016, S. 36)

Der wesentliche Vorteil von Biokohle hinsichtlich der Speicherung von Kohlenstoff im Humus liegt darin, dass Kohlenstoff in Biokohle wesentlich später in CO₂ umgewandelt wird. Entsprechend Biokohle im Boden daher der Fraktion des Dauerhumus zuzuordnen. (Teichmann, 2014, S. 4) Zusätzlich hat Biokohle die nachfolgenden bodenverbessernden Wirkungen:

-
- + Große Speicherkapazität für Nährstoffe und Wasser
 - + Verringerung der Trockenrohdichte → Verbesserung der Durchwurzelung
 - + Verringerung der N-Auswaschung durch Sickerwasser
 - + Düngemittel oder Trägermittel für Nährstoffe
 - + Höhere Sorption, Bindung und Einlagerung von Nährstoffionen, anorganischen und organischen Verbindungen
-

Diesen Vorteilen sind jedoch auch Nachteile gegenüberzustellen:

-
- Höhere Sorption, Bindung und Einlagerung gilt auch für Schadstoffe
 - Immobilisierung von Stickstoff
-

(Haubold-Rosar, et al., 2016, S. 71 - 88)

Da Biokohle aufgrund seiner überwiegend positiven Wirkung als Chance für den effektiven Aufbau von langfristig stabilen Humus gesehen wird widmet sich das Kapitel 6 der näheren Untersuchung der Zukunftsperspektive – Biokohle, Hierbei stehen die Anwendung und Herstellung von Biokohle im Fokus.

4 | Einschätzungsmöglichkeiten zum Humusaufbau

Zur Ermittlung des Potenzials und später zur Überprüfung des Erfolgs der Humifizierung können unterschiedlich präzise Untersuchungsmethoden angewendet werden.

a. Spatendiagnose

Für die Abschätzung des Humifizierungspotenzials ist es im ersten Schritt zu empfehlen eine Spatendiagnose an mehreren Stellen durchzuführen. Über die rein optische Analyse lassen sich bereits erste Erkenntnisse hinsichtlich der bestehenden Menge und Qualität des Humus im Boden ziehen. Hochwertiger Humus zeichnet sich durch eine dunkelbraun bis schwarze Färbung, eine krümelige Struktur, eine hohe Durchwurzelung und einen hohen Anteil von lebenden Organismen aus. Neben den optischen Eigenschaften gibt auch der Geruch Auskunft über die Qualität. Je intensiver der Humus nach Waldboden riecht desto hochwertiger und stabiler ist er. Über die Spatendiagnose kann außerdem eine erste Abschätzung bezüglich des Skelettanteils im Boden gemacht werden. Als nicht humifizierbarer Anteil im Boden begrenzt dieser den Humusaufbau. (Dunst 2011, S. 74-76)

Anhand der Erkenntnisse aus der Spatendiagnose können erste Schlüsse auf die geeignete Bewirtschaftungsweise gezogen werden. Wie bei der Analyse der Bodenbearbeitung deutlich wurde, ist unter anderem die Bearbeitungstiefe für den Humusaufbau zu beachten. Je nach Qualität des Humus können auf den Boden angepasste Mängel durch entsprechende Bewirtschaftungsmaßnahmen reduziert oder gar behoben werden. Entsprechend ist die Durchführung einer regelmäßigen Spatendiagnose vor dem Ergreifen jeder Maßnahme zu empfehlen. Um die Vergleichbarkeit zu garantieren und den Erfolg messen zu können sollte die Spatendiagnose fotografisch mit sichtbarem Maßband dokumentiert werden. (Dunst 2011, S. 74-76)



Abbildung 5: Beispielfoto einer Spatendiagnose

b. Humusbilanzierung

Während die Spatendiagnose eher der Verschaffung eines ersten Eindrucks dient, können mittels Humusbilanzierung statistisch sensible Aussagen über die Veränderung des Humusvorrates gemacht werden. Da sich jede Kultur hinsichtlich der Bearbeitungsanforderung und dem Bedarf an organischer Substanz unterscheidet, dient eine Humusbilanzierung außerdem der Beurteilung der Bewirtschaftungsweise. Als Grundlage für die Durchführung einer Humusbilanzierung dienen kulturspezifische Richtwerte. Diese basieren auf den Ergebnissen mehrerer Dauerversuche in Mitteleuropa. Laut VDLUFA-Definition geben die Richtwerte einzelner Kulturen und verschiedener organischer Substanzen dabei die Humusmengen an, „die im Boden nutzungsbedingt durch Abbau verloren gehen und durch organische Düngung ersetzt werden sollen“ (VDLUFA, 2004). Durch die vereinheitlichte Angabe in „Humusäquivalenten“ lassen sich beim Vergleich der Richtwerte für den Humusaufbau geeignete organische Substanzen und Kulturen identifizieren.

Unter Berücksichtigung der Reproduktionsleistung der eingebrachten organischen Substanz sowie des standort- und nutzungstypischem Humusabbaus ergibt sich für die Bestimmung des Humussaldo das folgende Prinzip:

Humussaldo	=	Humuszufuhr	-	Humusabbau
Veränderung des Humusvorrats im Boden		Reproduktionsleistung organischer Substanz		Wirkung standort- und nutzungstypischer Faktoren

(Kolbe & Zimmer, 2015, S. 19)

Durch die mehrfache Überprüfung ist die Genauigkeit von Humusbilanzierungsmethoden inzwischen nachgewiesen. Dabei ist die Bilanzierung mit einer der nachfolgenden Methoden zu empfehlen:

VDLUFA

STAND - Standortangepasste Bilanzierungsmethode (Weiterentwicklung der VDLUFA-Methode)

CCB - Candy Carbon Balance

Im Einzelnen unterscheiden sich diese Methoden primär in der Genauigkeit der Ergebnisse und im Erhebungsaufwand. Entsprechend der Auflistungsreihenfolge steigen sowohl die Qualität der Ergebnisse als auch der Erhebungsaufwand an. So zählt die VDLUFA-Methode zu den einfachen, beschreibenden Verfahren. Entsprechend werden Ergebnisse mit hoher statistischer Streuung generiert, die keine Aussagen über die Veränderung der Humusgehalte zulassen. Als Weiterentwicklung der VDLUFA-Methode, sind im STAND-Verfahren auch Standortfaktoren berücksichtigt. Entsprechend höher ist die Genauigkeit der Ergebnisse jedoch auch gleichzeitig der Erhebungsaufwand. Die quantitative Candy Carbon Balance-Methode zeichnet sich durch die hohe Genauigkeit der Ergebnisse und den entsprechend höheren Erhebungsaufwand aus. Neben den anbauspezifischen Richtwerten sind für die Nutzung der CCB-Methode außerdem Angaben über die Bodenarten, Korngrößen, C/N-Verhältnis erforderlich (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 23)

Welche Methode letztlich gewählt wird, entscheidet sich in Abhängigkeit der Ansprüche an die Genauigkeit der Methode.

Empfehlung:

Für die Anwendung der einzelnen Humusbilanzierungsmethoden und die Interpretation der jeweiligen Ergebnisse ist auf die folgenden Internetquellen zu verweisen:

VDLUFA & STAND:	http://orgprints.org/13626/1/kolbe-2008-13626-VeroeffProgramm_BEFU_BerechnungHumusbilanz.pdf
----------------------------	---

CCB:	http://www.ufz.de/index.php?de=39729
-------------	---

c. Humusuntersuchung im Labor

Neben der unabhängig durchführbaren Spatendiagnose und Humusbilanzierung gibt es verschiedene Labormethoden um den Humusgehalt im Boden präzise nachzuweisen. Dabei gilt in der Regel das Verhältnis von Kohlenstoff (Corg) zu Stickstoff (N) im Boden – also das sogenannte C/N-Verhältnis als Maßstab. (Kolbe und Zimmer 2015, S. 17-19)

Die Bestimmung des stabilen Humusgehalts beschränkt sich ausschließlich auf den Teil toter Organismen mit einer Korngröße von maximal 2 mm. Für eine präzise Humusuntersuchung im Labor muss die Probe demnach erst gesiebt und in der Regel getrocknet werden. Bei der Probenahme ist generell darauf zu achten, diese beim nächsten Mal möglichst identisch zu wiederholen. Im Labor werden die Proben in der Regel mittels der nachfolgenden Methoden untersucht:

-
- » Elementaranalyse-Methode nach der DIN ISO 10964, VDLUFA, 2012
 - » Glühverlust-Methode nach der DIN ISO 19684 Teil 3
-

(Kolbe und Zimmer 2015, S. 17-19)

5 | Einstieg in den Handel mit regionalen Klimaschutzzertifikaten

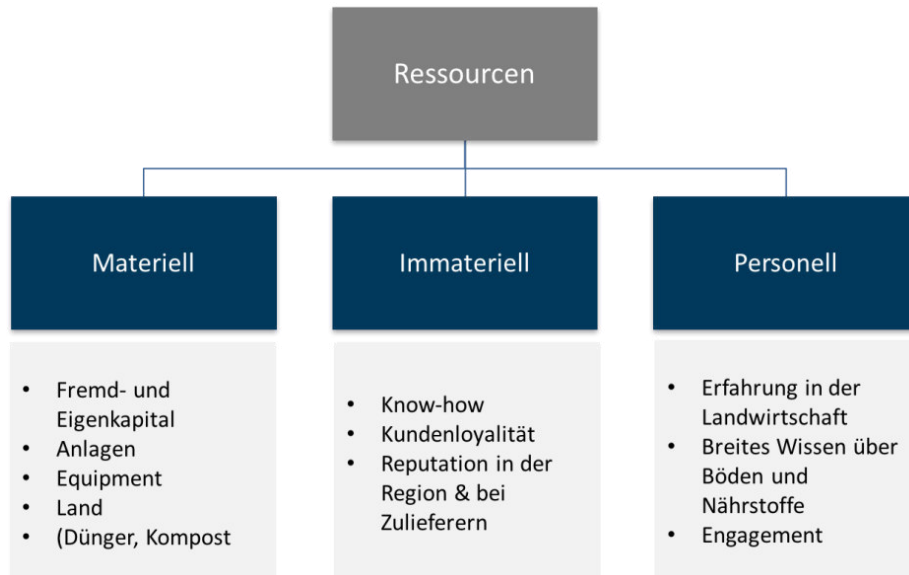


Abbildung 6: Materieller, immaterieller und personeller Ressourcenbedarf

5.1 Voraussetzungen

Wie bereits aus den Einflussfaktoren deutlich wurde, bedarf es für den Aufbau von Humus einiger grundlegender Ressourcen. Diese lassen sich in materielle, immaterielle und personelle Ressourcen unterteilen (siehe Abbildung 6).

Die wohl wichtigste materielle Ressource ist landwirtschaftlich nutzbares Land, auf dem der Humusaufbau betrieben werden kann. Außerdem sind landwirtschaftliche Anlagen und Equipment von Vorteil, um den Boden damit schonend bearbeiten zu können. Auch Kompost oder eigener Dünger sind hilfreiche Ressourcen. Wichtig zudem ist ein gewisser finanzieller Spielraum, denn die Humusanreicherung geht häufig mit zusätzlichen Düngemitteln oder einem zunächst verminderten Ertrag durch die Änderung der Bewirtschaftungsweise einher. Hierfür sind Rücklagen des Eigenkapitals oder auch die Beschaffung von Fremdkapital denkbar.

Die wichtigste immaterielle Ressource ist das Knowhow über die standortspezifischen Gegebenheiten und die daran anzupassende, humusmehrnde Bewirtschaftungsweise.

Dazu zählt auch das Knowhow über die gesetzlichen Rahmenbedingungen.

Zudem kann ein bereits vorhandener Bekanntheitsgrad in der Region von Vorteil sein, um so mögliche Käufer für die Klimaschutzzertifikate interessieren zu können. Auch eine gute Reputation bei Zulieferern von bspw. Düngemitteln oder Kompost ist hilfreich für die potenzielle Vergabe von Mengenrabatten o.Ä.

Als personelle Ressource gelten zum Beispiel geschultes und motiviertes Personal, welches dem Ziel, Humus aufzubauen, offen gegenübersteht und engagiert und mit dem nötigen Wissen an das Projekt herangeht.

Sind diese Voraussetzungen gegeben oder können beschaffen werden, so folgt als erster Schritt die Kontaktaufnahme zu dem Verein BobenOp.

Allerdings ist vorab anzumerken:

Allein die Verfügbarkeit der genannten Ressourcen garantiert keinen Erfolg beim Humusaufbau. Dies ist in Abhängigkeit der standorttypischen Klima- und Bodeneinflussfaktoren erst durch den optimalen Einsatz der Ressourcen möglich.

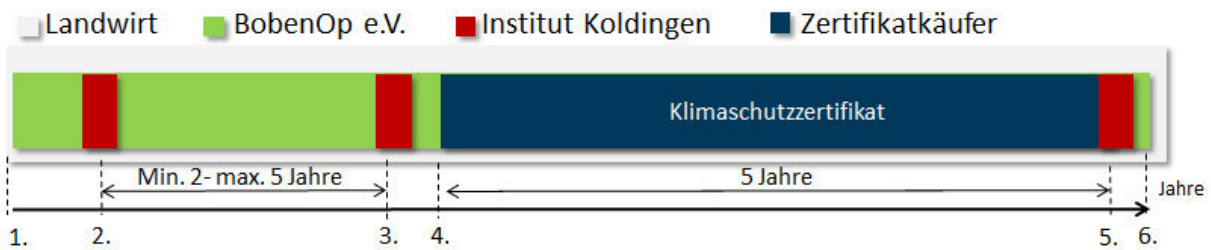


Abbildung 7: Ablauf und Zuständigkeiten

5.2 Ablauf und Zuständigkeiten

1. Unter der Voraussetzung, dass genügend Nachfrage an den Klimaschutzzertifikaten besteht, erfolgt die „Aufnahme“ in das Projekt seitens BobenOp eV.
2. Um zum einen das Potenzial des Humusaufbaus abzuschätzen und zum anderen den Ausgangszustand zu analysieren, folgt eine erste Probenentnahme mit mindestens sechs Mischproben durch die Firma Trinkies. Die Proben werden dann durch das Institut Koldingen, welches deutschlandweit mit Landwirten kooperiert, bezüglich ihres Kohlenstoffanteils analysiert.

Nach der Analyse ist über einen frei wählbaren Zeitraum von 2 bis 5 Jahren Zeit, Humus durch eine spezifisch angepasste Bewirtschaftungsweise auf dem vorgesehenen Land anzureichern.
3. Nach zwei bis fünf Jahren findet dann erneut eine Probeentnahme mit anschließender Analyse der Mischproben statt.
4. Entsprechend der zusätzlichen Kohlenstoffbindung im Vergleich zur ersten Probenentnahme werden durch den Verein BobenOp die Klimaschutzzertifikate im Wert der vermiedenen CO₂-Emissionen ausgestellt und gehandelt.
5. Um der Anforderung der Dauerhaftigkeit zu entsprechen, werden fünf Jahre nach Ausstellung des Klimaschutzzertifikates erneut Proben auf der Fläche entnommen und überprüft, ob mindestens der gleiche Anteil Kohlenstoff im Boden vorzufinden ist. Ist dies nicht der Fall, müssen die Einnahmen aus den Zertifikaten zurück erstattet werden.
- 6.

5.3 Probenahme und -analyse

Wie anhand des Ablaufes deutlich wird, beträgt der maximale Zeitraum, über den Humus aufgebaut wird und erhalten bleiben muss mindestens sieben und

maximal 10 Jahre. Innerhalb dieser Spanne finden drei Probenahmen und –analysen statt.

Ein wichtiger Faktor bei der Entnahme und Analyse der Bodenproben ist die statistische Absicherung darüber, dass die entnommenen Proben und die darin enthaltene Kohlenstoffmenge repräsentativ für die betroffene Fläche sind.

„Die Bewertung von Veränderungen der Bodenbeschaffenheit und des Bodenzustands anhand von Zeitreihenanalysen, bodenphysikalischer, geochemischer und bodenbiologischer Messwerte erfordert eine statistische Absicherung.“ (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR), 2014, S. 14)

Dies wird mittels eines bestimmten Probenentnahmedesigns und der statistischen Permutationmethode gewährleistet. Die Methode wurde von einem Referenzprojekt in Bayern übernommen, welches von Dr. Sebastian Meyer vom Verein Wisber entwickelt wurde. Dieser hat Berechnungen durchgeführt, die eine statistische Signifikanz der Erhöhung des Humusgehalt in den Böden nachweisen kann. Dr. Meyer hat hierfür mehrere Szenarien mit unterschiedlichem Design berechnet.

Zwei dieser Methoden werden dem Landwirt für die Probeentnahme zur Auswahl gestellt. Der Unterschied beider Methoden liegt in erster Linie in der Genauigkeit, der Belastbarkeit der Ergebnisse und im Preis. (Meyer, 2016)

Die Entscheidung darüber, welche Methode angewendet werden soll, liegt beim Landwirt selbst.

Für die Probeentnahme ist die Firma Trinkies zuständig. Trinkies ist ein Unternehmen, welches auf die Probenentnahmen des Bodens spezialisiert ist und durch jahrelange Erfahrung und die Nutzung des VDLUFA Standards berechtigt ist, die jeweiligen Bodengegebenheiten zu beurteilen.

len und dementsprechend zu beproben. (Trinkies, 2016)

Ein Sachverständiger von Trinkies legt die Anzahl der Einstiche und ggf. die Anzahl der Segmente fest, in die eine Fläche für die Beprobung aufgeteilt werden muss. Beides hängt u.a. von der Größe der Fläche und der Bodenbeschaffenheit ab und wird nach VDLUFA Standard entschieden.

Außerdem gilt:

Stellen, „[...] deren Eigenschaften erheblich vom Durchschnitt der zu beurteilenden Fläche abweichen (= nicht repräsentativ), z.B. Silo- und Mistladeplätze, schattige Weideplätze, Tränkstellen, Maulwurfs- haufen, Vorgewende, Fahrgassen etc.)“ sind von der Probeentnahme auszuschließen. „Die Einstichstellen sollten deshalb nicht parallel zur Bearbeitungsrichtung liegen, da Fehler durch Düngestreifen, ehemalige Blatt- oder Strohschwaden und Pflanzreihen auftreten können.“ (Ehlers, Vorschlag Probenentnahme, 2016)

In der folgenden Abbildung ist eine Beispielfläche aus der Region Hürup zu sehen. Dabei wurde die 10 Hektar große Fläche in zwei Segmente aufgeteilt, da sich im linken Abschnitt ein Hang befindet. Auf der rechten Seite wurden ca. 40 Einstiche mit einer A, B, und C-Probe getätigt. Auf der linken Seite weniger als die Hälfte.



Abbildung 8: GPS-Koordinaten d. Referenzfläche in Google Earth Ansicht

Gemäß der gewünschten Entnahmemethode und der vorab festgelegten Einstichmenge Proben durch die Firma Trinkies entnommen.

Dabei wurde bei jeder Entnahmestelle eine A-Probe genommen. Jeweils im Abstand von einem Meter wurde eine weitere Probe östlich und westlich entnommen. Je nach Methode werden zusätzlich zur A-Probe entweder jeweils nur die B-Probe und C-Probe (=3 Proben) genommen oder auch noch eine D- und E-Probe (=5 Proben).

Um auch bei nachstehenden Probenahmen die gleichen Stellen zu treffen, wird jeder Entnahmeweg mittels eines DGPS Systems aufgezeichnet. Die Entnahmetiefe bei jeder Probe liegt bei 25cm.

Bei der ersten möglichen Entnahmemethode werden 3 Mischproben mit je einer A-, B- und einer C-Probe entnommen. Sie ist somit durch nur 3 Einzelproben je Mischprobe die günstigere Methode. (Meyer, 2016)

5.4 Auswertung im Labor

Nachdem die Entnahme der Proben auf der ausgewiesenen Fläche erfolgt ist, werden die Mischproben an das Institut Koldingen zur weiteren Analyse geschickt. Das Institut gehört der Agrolab Group an und ist eine europaweit tätige Laborgruppe. Es hat sich auf die Bereiche der Agrar-, Umwelt-, Wasser- und Lebensmittelanalytik spezialisiert. [1] Die Probe sollte ca. 300 g pro Probenmaterial betragen, um eine Aussage für eine 1 bis 10 ha große landwirtschaftlich genutzte Fläche zu geben. [2] Anschließend können im Labor die Mischproben auf sämtliche Mineral- und Nährstoffe sowie Spurenelemente untersucht werden. Für die Zertifizierung und den Nachweis der Kohlenstoffspeicherung steht der C-Gehalt im Fokus.

5.5 Das Geschäftsmodell

Die nachstehende Value Chain verdeutlicht die monetären Aufwendungen und Erträge, die entlang der Wertschöpfungskette (Probenentnahme – Humusaufbau - Probenentnahme - Zertifikatverkauf – Humuserhaltung - Probenentnahme) auftreten.

Geschäftsmodell zur Humusanreicherung und dem Verkauf von Klimaschutzzertifikaten

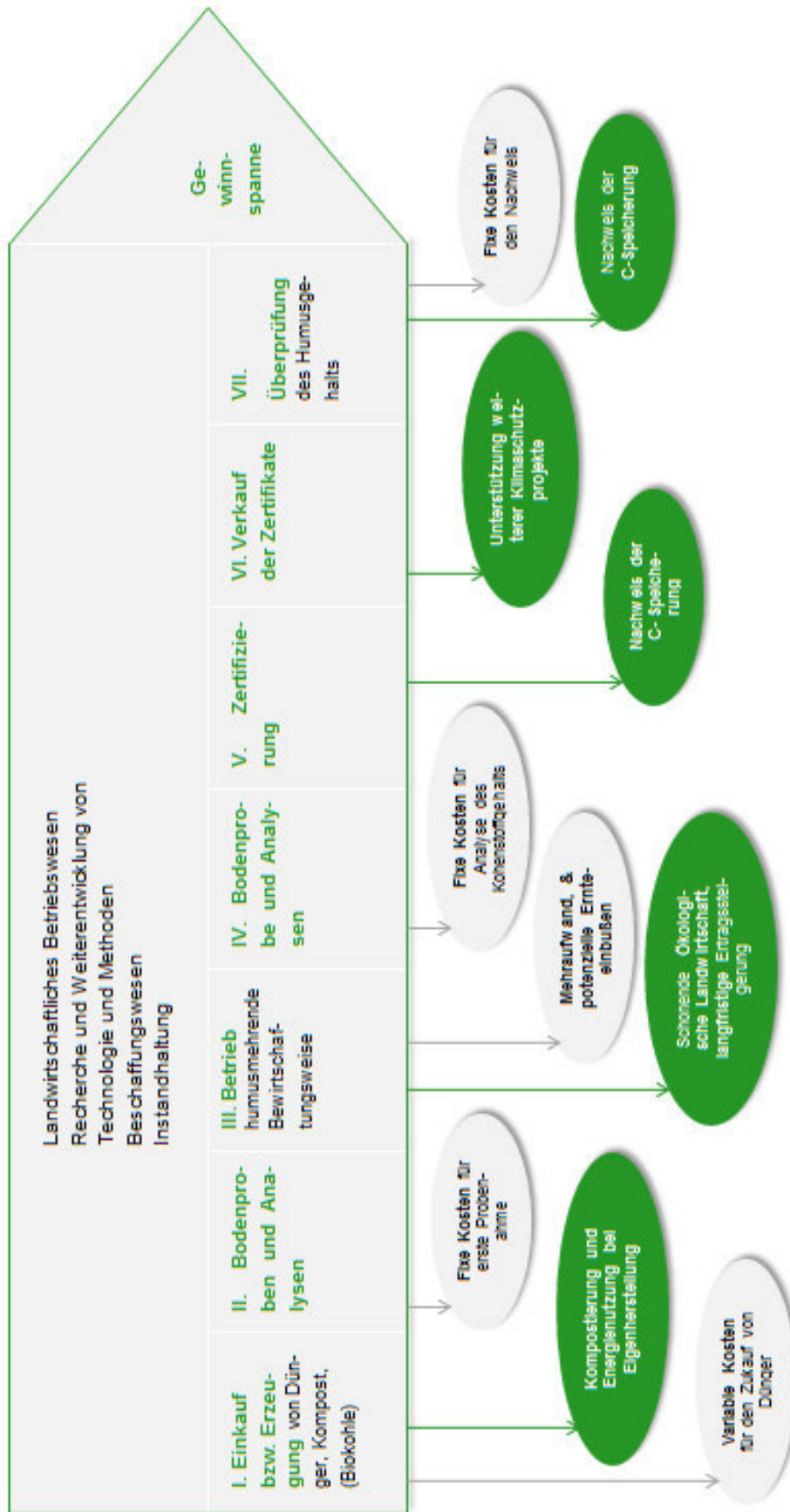


Abbildung 9: Value Chain

Die Value Chain beschreibt die Zusammenhänge der Wertschöpfungskette im Betrieb. Hierbei werden Primäraktivitäten und unterstützende Aktivitäten grafisch dargestellt. Im Rahmen des Geschäftsmodell werden die einzelnen Aufwendungen und Erträge (hier in grau und grün unterlegt) den Aktivitäten zugeordnet.

- I. Der erste Schritt in der Value Chain beschreibt die Erzeugung bzw. den Einkauf des Düngemittels. Bei der Verwendung von Gülle, Stallmist oder Kompost kann meist das Endprodukt des landwirtschaftlichen Betriebs vor Ort verwendet werden oder in Form von Kompost bzw. Biokohle hinzugekauft werden. Mit Hilfe spezieller Öfen ist der Landwirt in der Lage eigene Biokohle zu produzieren und als zusätzlichen Ertrag die Energie weiter zu nutzen. Als Aufwendungen kommen auf den Landwirt die Kosten für den Einkauf und die Ausbringung auf die Fläche zu.
- II. Wie bereits aus dem Kapitel „Ablauf und Zuständigkeiten“ (siehe 5.2) hervorgeht, werden über die Wertschöpfungskette insgesamt drei Probenahmen und entsprechend drei Bodenanalysen durchgeführt.
- III. Nachdem die Analyse des Bodens vorgenommen worden ist, kann mit dem Humusaufbau begonnen werden. Innerhalb von zwei bis fünf Jahren kann der Landwirt mit Hilfe einer angepassten Bewirtschaftungsweise Humus anreichern. Kurzfristig gesehen hat der Landwirt einen Mehraufwand und potenzielle Ernteeinbußen durch die Änderung von der Bewirtschaftungsweise. Langfristig hingegen kann durch die schonende ökologische Landwirtschaft dem Boden Nährstoffe hinzugefügt werden. Nach der Aussage Henning Knutzens profitiert der Landwirt von der Ertragssteigerung von 10 % nach fünf Jahren Humusanreicherung.
- IV. Im Anschluss an die zweite Probenentnahme und -analyse, die zur Feststellung des eingespeicherten Kohlenstoffs dient, wird die Zertifizierung von BobenOp e.V. vorgenommen. Der Verein stellt entsprechend des Kohlenstoffgehalts Klimaschutzzertifikate aus, die anschließend an den Endkunden verkauft werden.

Der Verkauf der Klimaschutzzertifikate wird von dem Verein BobenOp vorgenommen. Der Endkunde bezahlt für eine Tonne eingespeichertes Kohlenstoffdioxid 45 €. Davon gehen 30 € an den Landwirt zurück. Dieser kann davon Teile des Mehraufwands entschädigen. Die restlichen 15 € hingegen bleiben bei dem Verein und werden in weitere Klimaschutzprojekte von BobenOp reinvestiert.

5.6 Beispielrechnung für Klee- bzw. Weidegras

Beispielrechnung

Die folgende Kostenberechnung vergleicht den Anbau von Mais mit dem Anbau von Klee- bzw. Weidegras in Verbindung mit der Kompostausbringung und der Humusanreicherung. Die Rechnung dient nur zur Veranschaulichung und muss individuell angepasst werden.

Die Betrachtungsfläche misst 10 ha, die wiederum in zwei unterschiedliche Flächen aufgeteilt sind. Die Aufteilung der Flächen ist Ursache der Probenentnahme. Die Beispielfläche setzt sich aus 6 ha Weideland und 4 ha Hügelland zusammen. Es wird ein Betrachtungszeitraum von 0 bis 10 Jahren vorgenommen. Die Werte basieren auf dem Austausch mit einem Landwirt aus Schleswig-Holstein und Stübs Spezialberatungsring Ackerbau Schleswig Flensburg.

Tabelle 3: Beispielrechnung für Klee- und Weidegras

		pro Jahr für 1 ha	nach 5 Jahren für 1 ha	nach 5 Jahren für 10 ha	nach 10 Jahren für 10 ha
Kosten:	Probenentnahme und Analyse	5,56 €	-	-	556,00 €
	Umstellung der Fruchtfolge	128,00 €	640,00 €	6.400,00 €	12.800,00 €
	Kompost	180,00 €	900,00 €	9.000,00 €	18.000,00 €
Umsatz:	Zertifikatverkauf (bei 1,5 % Humusanreicherung in 5 Jahren)	405,00 €	2.025,00 €	20.250,00 €	40.500,00 €
	Mehrertrag		175,00 €	1.750,00 €	3.500,00 €
Gewinn:		91,44 €	660,00 €	6.600,00 €	12.644,00 €

Die Berechnungsgrundlagen der nachfolgenden Rechnung sind im Anhang A einzusehen.

5.7 Business Model Canvas

Das Business Model Canvas dient dazu komplexe Geschäftsmodelle visuell abzubilden. Dabei können wichtige Schlüsselakteure und Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Das nachfolgende Canvas Model zeigt eine allgemeingültige Darstellung des Geschäftsmodells.



Abbildung 10: Business Model Canvas

Die **Schlüsselaktivität** ist die Anreicherung von Humus.

Diese beiden Unternehmen beschreiben einen Teil der **Schlüssel-Partner**. Der Hauptpartner des Geschäftsmodells ist hingegen der Verein BobenOp und stellt gleichzeitig den **Kundentyp** dar. Dieser steht in Verbindung mit dem Endkunden und ist für den Verkauf der Klimaschutzzertifikate verantwortlich. Zwischen dem Landwirt und dem Verein BobenOp herrscht im weitesten Sinne ein Business-to-Business Modell. Durch die Humusanreicherung und die Kohlenstoffsenske können Klimaschutzzertifikate geschaffen werden, allerdings werden diese Zertifikate von BobenOp e.V. an den Endkunden verkauft. Demnach gibt es keine direkten **Vertriebswege** zwischen Endkunden und Landwirt.

Der Landwirt geht eine Partnerschaft und Kooperation mit dem Verein ein. Weitere **Kundenbeziehungen** können Partnerschaften bzw. Netzwerke zwischen Landwirten aus der Region sein. Maschinen für eine schonende Bodenbewirtschaftung können gemeinsam genutzt werden. Durch eine Veränderung der Fruchtfolge kann es auch zu einer Änderung der Abnehmer der landwirtschaftlichen Güter kommen. Weidegras und Klee gras wird vorzugsweise von Landwirten mit Viehhaltung

genutzt. Hingegen wird der Maisanbau vermehrt für Biogasbetreiber verwendet.

Zum Aufbau von Humus und der Speicherung von Kohlenstoff benötigt der Landwirt die unter Kapitel 5.1 beschriebenen **Ressourcen**.

Der **Nutzen** für den Verein BobenOp ist die Schaffung von Klimaschutzzertifikaten und daraus finanzierbaren Klimaschutzmaßnahmen...

Allerdings kommen anfängliche **Kosten** auf den Landwirt zu. Wie in Kapitel 5.6 anhand einer Beispielrechnung dargestellt, spielen Kostenfaktoren wie das Beprobieren, die Umstellung der Fruchtfolge sowie der Einkauf und die Ausbringung des Düngermittels eine wesentliche Rolle. Hingegen kann der Landwirt auch **Einnahmen** verzeichnen. Diese ergeben sich zum einen aus den Zahlungen der verkauften Klimaschutzzertifikate und zum anderen durch den potenziellen Mehrertrag. Nach fünf Jahren kann durch die Humusanreicherung eine Ertragssteigerung von ca. 10 % verzeichnet werden.. (H. Knutzen 2017)Stärken-Schwächen-Analyse

Als Zusammenfassung der einzelnen Analysen und Modelle dient die nachfolgende SWOT-Analyse. Hierbei werden die Schwächen und Stärken des Geschäftsmodells gegenübergestellt sowie Risiken und Chancen des Projekts aufgezählt,

Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Zusätzlicher Mehrwert durch die Anreicherung der Böden Kapazität in Böden vorhanden Bekanntheitsgrad in der Region Transparenz gegenüber der Kunden Kundenloyalität	Permanenz: Es muss gewährleistet sein, dass der Humus über 5 Jahre angereichert wird. Zusätzliche Kosten durch Proben und Bodenbearbeitung Nicht konkret nachweisbar: Synergieeffekt der Ertragssteigerung
Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
Unterstützung weiterer Klimaschutzprojekte in der Region Kooperation mit anderen Betrieben und Netzwerken	keine Abnehmer durch technischen und ökologischen Fortschritt wird es einfacher für Konkurrenten ebenfalls den Markt zu betreten

Abbildung 11: SWOT-Analyse

6 | Zukunftsperspektive Biokohle

Wie bereits 2.8.2 in angeschnitten bietet Biokohle aufgrund der vielfältigen Vorteile großes Potenzial effektiv langfristig stabilen Humus im Boden anzureichern,

6.1 Herstellung von Biokohle

Da sich die Eigenschaften und somit auch die Wirkung von Biokohle stark in Abhängigkeit der Herstellung unterscheiden sind nachfolgend die zwei gängigsten Herstellungsverfahren erklärt:

Pyrolyse

Biomasse mit einem TM-Gehalt von mindestens 50 % verweilt viele Stunden bei Temperaturen von ca. 400 – 800 °C unter Sauerstoffausschluss oder –abwesenheit und verkohlt. (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 54)

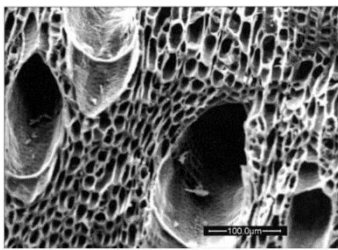


Abbildung 12: REM – Bild von Pyrolysekohle aus Holz (langsame Pyrolyse)

HTC – Hydrothermale Karbonisierung

Die Verkohlung von Biomasse erfolgt in maximal 6 Stunden bei einer Temperatur von ca. 200 °C unter einem Druck von ca. 20 bar, ohne dass das Material vorher getrocknet werden muss (Kolbe & Zimmer, 2015, S. 54).

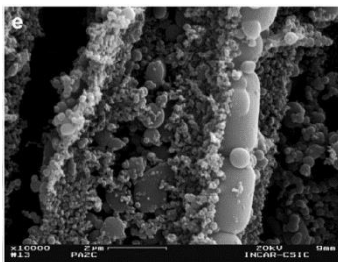


Abbildung 13: REM – Bild von HTC-Kohle aus Gerstestroh

Im Vergleich der beiden Verfahren zeigen sich nachstehend die größten Unterschiede:

Tabelle 4: Unterschiede zwischen Pyrolyse- und HTC-Biokohlen

Pyrolyse	HTC
Weitgehender Erhalt der Strukturen der Ausgangsmasse.	Vollständiger struktureller Umbau der Materialien mit kleinerer Oberflächengröße.
Ca. 50 % des ursprünglichen Kohlenstoffanteils bleibt erhalten.	Bis zu 80 % des ursprünglichen Kohlenstoffanteils bleibt erhalten.
Verweilzeit der Kohlen im Boden ist schätzungsweise 100 bis zu 1000 Jahren.	Verweilzeit der Kohlen im Boden sind schätzungsweise Jahrzehnte. (Rückführung von Dauer- in Nährhumus in stärkerem Umfang)
Höherer Anteil aromatischer Strukturen	Höherer Anteil leicht mineralisierbarer Kohlenstoffverbindungen

Bei der Änderung verschiedener Parameter innerhalb des Herstellungsprozesses ergeben sich für die beiden Verfahren außerdem unterschiedliche Wirkungen. So resultiert beispielsweise die Steigerung der Prozesstemperatur, dass mittels Pyrolyse hergestellte Biokohle in einem steigenden Kohlenstoffgehalt. Über das HTC-Verfahren hergestellte Kohle hingegen ändert sich nur geringfügig in der Oberflächengröße und der Stabilität. Weitere Unterschiede hinsichtlich der Folgen verschiedener Parameteränderungen sind in der folgenden Tabelle einzusehen.

Tabelle 5 zeigt veränderbare Parameter in den Herstellungsprozessen und deren Einflüsse auf die Biokohle.

	Pyrolyse	HTC
Prozesstemperatur (steigend)	Zunahme des Kohlenstoffgehaltes Zunahme komplexer aromatischer Strukturen und Abbaustabilität Abnahme Verfügbarkeit der Nährstoffe (Empfehlung: max. 500 °C)	Geringe Beeinflussung der Oberflächengröße und Stabilität
Prozess	Biomasse mit geringem Wassergehalt (z.B. Stroh, Restholz)	Verwendung feuchter Biomasse ohne Trocknung möglich (z.B. Gülle, Frisch)

6.2 Anwendung von Biokohle

Biokohle bietet viele verschiedene Möglichkeiten zur Anwendung und Kaskadennutzung. Beispielsweise kann Biokohle als Futterzusatz oder Zusatz zur Vergärung von Biomassen vor der Ausbringung auf dem Feld verwendet werden. (Haubold-Rosar, et al., 2016, S. 71-72).

Die Ausbringung reiner Biokohle hätte zu Folge, dass nur sehr wenig Stickstoff für die Pflanze verfügbar ist und es zu Ausgasung von leicht flüchtigen organischen Verbindungen kommen kann. (Haubold-Rosar, et al., 2016, S. 71-72)

Für die Verwendung von Biokohle sehr wichtig, dass eine sogenannte Oberflächenaktivierung, Nährstoffanreicherung und mikrobiellen Besiedelung erfolgt.

Dies kann beispielsweise durch Kompostierung bzw. Fermentation von Biokohlen mit Kompost oder anderen nährstoffreicheren organischen Substanzen geschehen. (Haubold-Rosar, et al., 2016, S. XII)

Für die Verwendung von Biokohle gilt trotz der versprechenden Wirkung außerdem:

Ein erhöhtes Pflanzenwachstum ist nur zu erwarten wenn durch die Anwendung von Biokohle gezielt ertragsbegrenzende Bodeneigenschaften

wie z.B. schlechte Nährstoff- oder Wasserversorgung usw.) verbessert werden.

. (Haubold-Rosar, et al., 2016, S. 102).

Wie bei dem Kompost ergeben sich die stofflichen Anforderungen an die Rohstoffe und die Wahl des Herstellungsprozesses jeweils aus den Zielen, die die Biokohle letztendlich im Boden erfüllen sollen, beispielsweise C-Sequestrierung und verbesserte Bodenfunktion (Haubold-Rosar, et al., 2016, S. 28). Verschiedenen Eigenschaften der Rohstoffe und deren Einfluss auf die Biokohle als Endprodukt sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 5: Parameter bei Ausgangsstoffen für Biokohlen und ihr Einfluss

Parameter	.. nimmt Einfluss auf...
Biomasse	Höhe der Kohlenstoffgehalte
	Nährstoffgehalte (Siehe Anhang B)
	pH-Werte
Struktur	Sorptionseigenschaften
	Wasserbindungsfähigkeit

Hinsichtlich der Anwendung von Biokohle ist allgemein anzumerken:

Die Wahl der Anwendung von Biokohle, deren Ausgangsstoffe und Herstellungsprozess sollte gut durchdacht und den Bedürfnissen des Bodens genau angepasst sein.

7 | Rechtliche Grundlage zum Humusaufbau

Hinsichtlich der Anreicherung von Humus sind unterschiedliche Verordnungen und fachspezifische Gesetze zu beachten. In diesen sind Regelungen für den Bodenschutz im Pflanzenschutzrecht, im Düngemittelrecht sowie in der Bioabfall- und Klärschlammverordnung enthalten.

Entsprechend sollten die Inhalte der folgenden Verordnungen und Gesetze bekannt sein:

-
- » Bodenschutzrecht
 - » Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft
 - » Regelung für das Ein- und Ausbringen von Materialien auf oder in Böden- BBodSchV §12
 - » Klärschlammverordnung
 - » Düngemittelverordnung
 - » Cross Compliance, Bodenschutz und die Durchführung in SH
-

Rechtliche Grundlage für Biokohle

Rechtlich gesehen ist die Einordnung von Biokohle begrenzt. Aktuell ist nur die Nutzung von Holzkohle berücksichtigt. (Haubold-Rosar, et al., 2016, S. 124)

In zahlreichen Verordnungen sowie Gesetzen geregelt. Sofern ein bestimmter Bereich nicht abgedeckt ist, tritt das Bodenschutzrecht in Kraft.

Folgende Regelungen sind wichtig für den Humusaufbau:

-
- » Bodenschutzrecht
Insbesondere §2 und §7
 - » Bodenschutzverordnung
Insbesondere §12
 - » Klärschlammverordnung
 - » Düngemittelverordnung
 - » Cross Compliance-Regelungen
-

III Anhang

A. Berechnungsgrundlagen für Beispielrechnung

Probenentnahme und Analyse des Bodens

Die Probenentnahme mit anschließender Analyse des Nährstoffgehalts des Bodens wird im Laufe der Wertschöpfungskette drei Mal vorgenommen. Jeweils werden sechs Mischproben erstellt und an das Institut Koldingen zur Analyse geschickt. Die Kosten für die Messungen vor Ort belaufen sich bei dem Unternehmen Trinkies auf 7 € pro Probe. Weitere 10 € pro Probe muss für die Analyse im Institut gezahlt werden. Demnach ergibt sich folgende Rechnung:

Tabelle 6: Kosten für Probenentnahme und Analyse

1. Probenentnahme und Analyse	Probenentnahme & -analyse	Mischproben-anzahl	Gesamtbetrag	Skelettanteilschätzung
Jahr 0	17,00 €	6	102,00 €	250,00 €
Jahr 5	17,00 €	6	102,00 €	/
Jahr 10	17,00 €	6	102,00 €	/
				556,00 €
			pro Jahr für 10 ha	55,60 €
			pro Jahr für 1 ha	5,56 €

Allerdings muss zu den Kosten für die Probenentnahme und Analyse noch das einmalige Beprobieren des nicht humifizierbaren Stein- bzw. Skelettanteils hinzugerechnet werden. Die Kosten belaufen sich auf 250 € für die 10 ha Fläche.

Umstellung der Fruchtfolge

Im Folgenden wird ein Vergleich der Kosten und Umsätze bei der Umstellung von Maisanbau und Klee gras-/Weidegrasanbau vorgenommen. Die Rechnung wird mit einer Null-Verzinsung kalkuliert.

Tabelle 7: Kosten der Umstellung der Fruchtfolge(1)

Fruchtfolge	in €/ha	Maisanbau	Klee gras/ Weidelgras
Saat		180,00	27,00
Düngung		112,00	202,00
Pflanzenschutz		45,00	0,00
Versicherung		5,00	1,00
variable Maschinenkosten		179,00	219,00
Kosten		521,00	449,00
		pro 50t Ernte	bei 4 Schnitt

Der Verkaufspreis für Mais wird zu 30 € pro Tonne angenommen. Bei einer Ernte von ca. 50 Tonnen (gerechnet wird hier mit 47,5 t) ergibt sich ein Verkaufspreis von 1425 € pro ha. Auf der gleichen Fläche kann zu einem Verkaufspreis von 30 € pro Tonne 42,9 Tonnen Klee gras geerntet werden. Somit summiert sich der Verkaufspreis auf 1287 € pro ha. Nach Gegenüberstellung des Umsatzes und der aufkommenden Kosten ergeben sich folgende direktkostenfreie Leistungen:

Tabelle 8: Kosten der Umstellung der Fruchtfolge (2)

in €/ha	Maisanbau	Klee gras-/Weidegrasanbau
Umsatz	1.425,00	1.287,00
Kosten	521,00	449,00
Kosten Arbeitskraft	48,00	104,00
fixe Kosten Maschinen	85,00	91,00
Direktkostenfreie Leistung	771,00	643,00

Nach Gegenüberstellung der direktkostenfreien Leistung ergibt sich eine Kostendifferenz von 128 € pro ha bei Umstellung von Mais auf Klee gras/ Weidegras.

Allerdings unterscheiden sich Mais und Klee gras gerade in Hinsicht auf das Verhalten mit Kohlenstoff. Der Maisanbau setzt ca. 600 kg/ha Kohlenstoff frei. Im Gegensatz dazu kann Klee gras/Weidegras diese Menge an Kohlenstoff kompensieren.

Einsatz von Kompost in Verbindung mit der Humusanreicherung

Über die fünf Jahre des Humusaufbaus werden 100 Tonnen Frischmasse Kompost auf ein Hektar Fläche ausgebracht. Die Kosten pro Jahr für den Komposteinkauf, den Transport und die Ausbringung belaufen sich auf 180 € pro ha. Die 100 t/ha werden zu 9 € pro Tonne berechnet.

Der Humusaufbau wird mit 0,2 % pro Jahr kalkuliert. Laut Henning Knutzen entsprechen die 0,2 % Humusanreicherung pro Jahr ca. 9 Tonnen CO₂. Nach fünf Jahren steigt die Humusanreicherung um 1,5 %. Die Rechnung ergibt dann:

$$\begin{array}{rcl} 1,50\% & \text{_____} & * \\ 0,20\% & & \end{array} \quad \begin{array}{rcl} & 9 \text{ €/t} & \\ & & \end{array} \quad = \quad 67,5 \text{ t/CO}_2$$

Durch den Verkauf von Klimaschutzzertifikaten erhält der Landwirt 30,-€ pro Tonne CO₂. Innerhalb von fünf Jahren ergibt sich ein Umsatz von 2025,- € pro Hektar und ein Wert von 405,- €/ha pro Jahr.

$$67,5 \text{ t/CO}_2 \quad * \quad 30 \text{ €/t} \quad = \quad 2025 \text{ €/ha}$$

Ein weiterer Vorteil neben dem Verkauf von Klimaschutzzertifikaten, die durch die Kohlenstoffsenke in den Böden möglich ist, ist die Ertragssteigerung durch die Humusanreicherung. Nach fünf Jahren kann, laut Henning Knutzen, mit einem Mehrertrag von ca. 10 % und einer Dünger-Einsparung von 50 € gerechnet werden. Für die Beispielrechnung wird mit einem Mehrertrag von 175 € nach fünf Jahren gerechnet.

Nach Aussage von Henning Knutzen ist unter Annahme einer ausgeglichenen Humusbilanzierung und geringen Kostenschwankungen bei dem Kauf von Kompost der Humusaufbau durch Komposteinsatz für den Landwirt wirtschaftlich darstellbar (H. Knutzen 2017).

B. Nährstoffgehalte von Biokohlen aus diversen Rohstoffen und verschiedenen Prozessen

Tabelle 9: Nährstoffgehalte von Biokohlen aus diversen Rohstoffen und verschiedenen Prozessen

Inputstoffe	Herstellung		Temp. °C	pH ³⁾	Nährstoffe - Gesamtgehalte						S g kg ⁻¹	
					C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹		Mg g kg ⁻¹
Tropische Gehölze	Pyrolyse	traditionell, Kleinbauern	o.A.		708	10,9	65	6,80	0,9	1,3	0,3	
Eucalyptus-Holz	Pyrolyse	Lambiotte Reaktor	550-650		457	4,5	102					
Eucalyptus-Holz	Pyrolyse	Lambiotte Reaktor	550-650		649	4,0	162	1,00				
Gehölz(grün-)schnitt	Pyrolyse	Meiler, langsam	550		676	2,8	241	9,60				
Eucalyptus deglupta	Pyrolyse	Meiler	350	7,0	824	5,7	144	0,58			1,3	0,29
Bras. Pfefferbaum	Pyrolyse	langsam	300	6,6	593	3,0	198	0,30	1,0	7,3	1,2	
Bras. Pfefferbaum	Pyrolyse	langsam	450	7,3	756	3,0	252	0,70	2,5	13,2	2,3	
Bras. Pfefferbaum	Pyrolyse	langsam	600	9,1	770	1,0	770	0,90	1,2	18,1	2,9	
Bambus	Pyrolyse	langsam	300	6,7	662	4,0	166	2,40	3,0	2,2	1,4	
Bambus	Pyrolyse	langsam	450	5,2	769	2,0	385	3,60	3,5	2,9	1,9	
Bambus	Pyrolyse	langsam	600	7,9	809	2,0	405	5,00	5,2	3,4	2,3	
Rinde, Acacia mangium	Pyrolyse	traditionell, Meiler	260-360	7,1	398	10,4	38					
Holzrinde	HTC	Revatec-Reaktor, 2h	200	5,2	503	9,2	55					
Holz (Eiche + Hickory)	Pyrolyse	schnell	500	6,8	662	3,2	207	0,30	3,4	3,7	1,5	0,08
Holzspäne (Eiche)	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	350	4,8	759	1,0	759		1,1	0,7		
Holzspäne (Eiche)	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	4,9	884	1,2	737		2,2	0,9		
Eichen-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	4,3	639	1,3	492	0,01	0,7	0,8	0,0	
Eichen-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	4,6	788	1,7	464	0,01	1,5	1,1	0,1	
Eichen-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	5,8	839	1,8	466	0,01	1,2	1,5	0,1	
Eichen-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	6,4	876	1,7	515	0,00	2,1	1,2	0,1	
Kiefern-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	6,7	621	1,0	621	0,26	0,7	2,9	0,7	
Kiefern-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	4,6	744	0,9	827	0,04	0,4	2,2	0,5	
Kiefern-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	5,6	834	1,0	834	0,00	0,7	2,7	0,8	
Kiefern-Holz	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	6,0	870	1,3	669	0,01	0,8	2,2	0,6	
Kiefernspäne	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	400	7,6	739	2,6	284	0,15	1,5	1,7	0,6	0,01
Kiefernspäne	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	500	8,3	817	2,2	371	0,14	1,5	1,9	0,6	0,06
Fichtenspäne	HTC	Fluß-Reaktor, 10 h	180	4,4	576	1,2	480					

Inputstoffe	Herstellung		Temp. °C	pH ³⁾	Nährstoffe - Gesamtgehalte							
					C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	Mg g kg ⁻¹	S g kg ⁻¹
Pellet. Erdnusshölse	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	400	10,5	732	24,3	30	1,80	15,2	4,6	2,2	0,60
Pellet. Erdnusshölse	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	500	10,1	804	24,8	32	2,00	16,4	5,1	2,5	0,60
Erdnusshölse	Pyrolyse	o.A.	400		499	11,0	45	0,60	6,2			
Erdnusshölse	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	400	7,9	748	27,0	28	2,60	20,0			0,90
Erdnusshölse	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	500	8,6	818	27,0	30	2,60	20,0			1,00
Erdnusshölse	Pyrolyse	langsam	300	7,8	739	16,0	46	0,90	8,6	3,2	1,3	
Erdnusshölse	Pyrolyse	langsam	450	8,2	815	10,0	82	0,90	9,4	3,3	1,3	
Erdnusshölse	Pyrolyse	langsam	600	8,0	864	9,0	96	1,00	7,1	3,4	1,2	
Erdnusshölse	HTC	5h	300	6,8	564	9,0	63	8,00	0,0	2,0	0,2	
Pekannusshölse	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	350	5,9	645	2,6	248	0,30	2,0			0,10
Pekannusshölse	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	500	7,2	912	5,1	179	0,50	5,0			0,10
Pekannusshölse	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	700	7,6	834	3,4	245	0,26	4,2	3,6	0,7	0,10
Haselnussschale	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	6,4	699	5,4	129	0,40	5,2	3,7	0,8	
Haselnussschale	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	7,7	758	5,1	149	0,30	4,3	2,8	0,6	
Haselnussschale	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	8,6	801	5,1	157	0,28	4,3	2,7	0,5	
Haselnussschale	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	8,9	841	5,2	162	0,33	5,2	3,3	0,6	
Kokosnussschale	Pyrolyse	o.A.	500		690	9,4	73					

Tabelle 9: Nährstoffgehalte von Biokohlen aus diversen Rohstoffen und

Inputstoffe	Herstellung		Temp. °C	pH ³⁾	Nährstoffe - Gesamtgehalte						S g kg ⁻¹
					C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	
Maisstroh	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	350	5,9	675	9,3	73		10,4	2,7	
Maisstroh	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	6,7	790	9,2	86		6,7	3,1	
Maisstroh	Pyrolyse	rotierender Laborofen	550	9,9	743	7,8	95				
Maisstroh	HTC	4h	250	4,7	678	6,5	104				
Maisstroh	Pyrolyse	Muffelofen	300	9,4	536	14,4	37	2,50			
Maisstroh	Pyrolyse	Muffelofen	500	10,7	419	9,0	47	4,00			
Maisstroh	Pyrolyse	Muffelofen	700	11,3	245	7,8	31	6,80			
Maisstroh	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	7,3	595	11,6	51	1,37	17,1	6,5	5,9
Maisstroh	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	9,2	626	11,0	57	1,81	20,2	7,3	6,6
Maisstroh	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	9,9	687	11,1	62	1,85	24,8	11,7	9,5
Maisstroh	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	10,0	698	10,1	69	2,11	24,6	9,4	8,6
Getreidestroh	HTC	Fluß-Reaktor, 8 h	180	4,6	536	4,9	109				
Reisstroh	Pyrolyse	o.A.	500		490	13,2	37				
Chinaschilf ¹⁾	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	250	5,4	553	4,3	129	1,00	5,0		0,50
Chinaschilf ¹⁾	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	500	8,0	844	10,7	79	2,40	10,0		0,60
Pfahlrohr ²⁾ o. Blätt.	Pyrolyse	Vakkumofen, N ₂	300	8,4	653	6,5	100	1,20	37,0		
Pfahlrohr ²⁾ o. Blätt.	Pyrolyse	Vakkumofen, N ₂	400	8,1	723	6,9	105	1,30	41,8		
Pfahlrohr ²⁾ o. Blätt.	Pyrolyse	Vakkumofen, N ₂	600	10,7	786	5,5	143	1,70	50,2		
Rapsstroh	Pyrolyse	Muffelofen	300	6,5	616	1,9	324	1,60			
Rapsstroh	Pyrolyse	Muffelofen	500	9,4	634	0,4	1585	2,70			
Rapsstroh	Pyrolyse	Muffelofen	700	10,8	549	0,4	1373	4,80			
Sojastroh	Pyrolyse	Muffelofen	300	7,7	576	12,7	45	2,70			
Sojastroh	Pyrolyse	Muffelofen	500	10,9	626	3,7	169	4,40			
Sojastroh	Pyrolyse	Muffelofen	700	11,1	579	1,0	579	5,80			
Erdnussstroh	Pyrolyse	Muffelofen	300	8,6	537	26,0	21	6,30			
Erdnussstroh	Pyrolyse	Muffelofen	500	10,9	485	15,1	32	9,50			
Erdnussstroh	Pyrolyse	Muffelofen	700	11,2	470	15,1	31	11,60			

Inputstoffe	Herstell.		Temp. °C	pH ³⁾	Nährstoffe - Gesamtgehalte						S g kg ⁻¹	
					C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹		Mg g kg ⁻¹
Klärschlamm	Pyrolyse	ENERSLUDGE™ Technol.	450		470	64,0	7	56,00				5,00
Klärschlamm	Pyrolyse	N2	300	5,3	256	33,2	8	25,00	2,0	34,7	3,5	44,70
Klärschlamm	Pyrolyse	N2	400	4,9	202	24,0	8	28,00	2,0	41,7	4,3	47,20
Klärschlamm	Pyrolyse	N2	500	7,3	203	21,3	10	33,00	3,0	46,2	4,6	59,00
Klärschlamm	Pyrolyse	N2	700	12,0	204	12,0	17	36,00	4,0	53,5	5,4	61,70
Zuckerrohr-Bagasse	Pyrolyse	o.A.	500		710	17,7	40					
Zuckerrohr-Bagasse	Pyrolyse	langsam	300	7,2	695	9,0	77	0,50	2,7	4,6	1,4	
Zuckerrohr-Bagasse	Pyrolyse	langsam	450	7,9	786	9,0	87	0,70	2,5	8,3	1,8	
Zuckerrohr-Bagasse	Pyrolyse	langsam	600	7,9	765	8,0	96	0,80	1,5	9,1	2,1	
Zuckerrübenschnitzel	HTC	Revatec-Reaktor, 2h	200	4,8	497	21,2	23					
Zuckerrübenschnitzel	HTC	Batch-Reaktor, 4 h	190	6,0	519	14,2	37					
Zuckerrübenschnitzel	HTC	Batch-Reaktor, 12 h	190	6,4	556	14,0	40					
Zuckerrübenschnitzel	HTC	Batch-Reaktor, 12 h	190	5,9	501	13,0	39					
Biertreber	HTC	Batch-Reaktor, 12 h	190	5,3	544	35,0	16					
Biertreber	HTC	Batch-Reaktor, 4 h	190	5,4	513	34,0	15					
Biertreber	HTC	Batch-Reaktor, 12 h	190	5,6	545	33,0	17					
Grünabfälle	Pyrolyse	langsam	450	6,2	680	1,7	400	0,20	2,0			
Gärrest (Mais)	HTC	Fluss-Reaktor, 10 h	180	6,4	411	12,6	33					
Küchenabfälle	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	7,5	653	58,8	11	5,87	13,0	28,2	3,3	
Küchenabfälle	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	8,3	524	36,5	14	5,01	14,6	51,7	5,3	
Küchenabfälle	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	9,7	367	25,6	14	7,52	21,3	53,8	4,5	
Küchenabfälle	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	10,5	232	10,3	23	8,15	27,9	73,5	6,6	
Papierfaserschlamm	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	7,4	212	0,9	236	0,83	2,8	258,1	2,4	
Papierfaserschlamm	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	8,2	200	1,1	182	0,83	3,3	266,2	2,8	
Papierfaserschlamm	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	9,3	192	0,7	274	0,82	3,3	289,2	2,7	
Papierfaserschlamm	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	11,1	192	0,8	240	0,94	3,8	311,2	2,9	

Tabelle 9: Nährstoffgehalte von Biokohlen aus diversen Rohstoffen und

Inputstoffe	Herstell.		Temp. °C	pH ³⁾	Nährstoffe - Gesamtgehalte							
					C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	K g kg ⁻¹	Ca g kg ⁻¹	Mg g kg ⁻¹	S g kg ⁻¹
Geflügelmist	Pyrolyse	langsam	450	9,9	380	20,0	19	25,20	22,1			
Geflügelmist + Sägesp.	Pyrolyse	Wasserdampfaktiv., N ₂	700		258	7,5	34	48,00	30,0			
Geflügelmist	Pyrolyse	Wasserdampfaktiv.	700		172	6,0	29	73,00	58,0			
Geflügelmist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	350	8,7	461	49,0	9	29,00	60,0			7,80
Geflügelmist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	700	10,3	440	28,0	16	43,00	90,0			10,00
Geflügelmist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	350	8,7	511	44,5	11	20,80	48,5	26,6	9,5	6,10
Geflügelmist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	700	10,3	459	20,7	22	31,20	74,0	40,2	14,5	6,30
Geflügelmist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	8,1	259	21,5	12	26,41	40,0	157,5	8,9	
Geflügelmist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	9,9	268	12,4	22	17,96	31,8	265,7	7,2	
Geflügelmist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	10,6	254	14,1	18	30,56	28,1	204,2	10,4	
Geflügelmist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	10,7	236	9,4	25	23,60	27,4	242,8	8,8	
Hühnermist	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	400	10,1	392	34,7	11	30,10	51,1	42,7	10,7	13,70
Hühnermist	Pyrolyse	Batch Reaktor, N ₂	500	9,7	392	30,9	13	35,90	58,6	50,4	12,9	13,90
Putenmist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	350	8,0	493	40,7	12	26,20	40,1	40,4	8,5	5,50
Putenmist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	700	9,9	448	19,4	23	36,60	55,9	56,1	12,4	4,10
Separ. Schweinemist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	350	8,4	515	35,4	15	38,90	17,8	39,1	24,4	8,00
Separ. Schweinemist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	700	9,5	441	26,1	17	59,00	25,7	61,5	36,9	8,50
Rindermist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	350	9,2	558	26,0	21	10,00	14,3	26,7	12,2	1,10
Rindermist	Pyrolyse	Temp.erhöhung stufig, N ₂	700	9,9	567	15,1	38	16,90	23,1	44,8	20,6	1,50
Rindermist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	300	8,9	561	26,6	21	5,39	15,0	20,2	8,8	
Rindermist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	400	9,2	577	24,2	24	6,45	16,6	22,6	9,7	
Rindermist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	500	9,4	594	25,8	23	3,95	14,9	18,5	8,5	
Rindermist	Pyrolyse	langsam, Daisy Reaktor, N ₂	600	9,9	628	22,5	28	8,27	20,9	26,5	11,7	
Pferdemist I	HTC	Fluss-Reaktor, 10 h	180	6,4	335	7,1	47					
Pferdemist II	HTC	Fluss-Reaktor, 10 h	180	6,2	334	10,4	32					

IV Literaturverzeichnis

- Baumgarten, A. (2010). *Richtlinie für die Anwendung von Kompost aus biogenen Abfällen in der Landwirtschaft*. Wien: Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft.
- Boku. (o. A.). *Bodenkunde online*. Abgerufen am März 2017 von https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/boku_online/pcboku10.agrar.hu-berlin.de/cocoon/boku/sco_2_substrate_82e17c.html?section=N100BW
- Bundesverband Boden e.V. (o. A.). *Bodenwelten*. Abgerufen am April 2017 von <http://www.bodenwelten.de/content/bodenarten>
- Burbaum. (2017).
- Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt. (Oktober 2008). Leitfaden zur freiwilligen Kompensation von Treibhausgasen. Berlin, Deutschland.
- Dunst, G. (2011). *Humusaufbau: Chance für Landwirtschaft und Klima*. Sonnenerde Gerald Dunst Kulturerden GmbH.
- Düwel, O., Utermann, J., Siebner, C., & Krone, F. (2007). *Gehalte organischer Substant in Oberböden Deutschlands*.
- Ehlers, U. (05.. November 2016). GPS-Koordinaten. (A. Puszciewicz, Interviewer)
- Ehlers, U. (15.. Oktober 2016). Vorschlag Probenentnahme. (A. Puszciewicz, Interviewer)
- Ehlers, U. (15.. Mai 2017). Abgrenzung der Klimaschutzzertifikate zu CO₂-Zertifikaten. (A. Quast, Interviewer)
- Haubold-Rosar, M., Heinkle, T., Rademacher, A., Kern, J. D., Germer, S., Karagöz, Y., et al. (2016). *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer "veränderter" Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Knutzen, H. (19. 05 2017). (K. Juulsgaard, Interviewer)
- Knutzen, H. (14.. Februar 2017). Ablauf Zertifikathandel. (A. Quast, Interviewer)
- Knutzen, H. (24. 05 2017). Stübs Spezialberatungsring Ackerbau Schleswig Flensburg .
- Kolbe, D. H., & Zimmer, J. (2015). *Leitfaden zur Humusversorgung*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR). (Oktober 2014). 25 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Schleswig-Holstein. Flintbek.
- LLUR. (2006). *Die Böden Schleswig-Holsteins*.
- LLUR. (2011). *Unseren Boden begreifen - Abteilung Geologie und Boden*.
- LLUR. (o.A.). *Landwirtschafts- und Umweltatlas*. Abgerufen am 2017 von <http://www.umweltdaten.landsh.de/atlas/script/index.php>
- Meyer, D. S. (15.. Oktober 2016). Methodendesigns der Probeentnahme. (A. Puszciewicz, Interviewer)
- Möller, A., & Höper, H. (2014). *Bewertung des Einsatzes von Biokohle in der Landwirtschaft aus Sicht des Bodenschutzes*. Hannover: LBEG GeoBerichte 29.
- Rippel, R., & Beck, D. R. (07. Februar 2017). www.lfl.bayern.de. Von <https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/031122/index.php> abgerufen
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Horn, R., Kandeler, E., et al. (2016). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Schiller. (o.A.). *Bodenart und Bodentyp: Bestimmung und Bedeutung für Böden*. Abgerufen am

- März 2017 von <http://www.tobias-schiller.de/arbeiten/Boden.pdf>
- Schleswig-Holstein, S. A. (2017). *Agrarstruktur 2016 in Schleswig-Holstein*. Von https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Presseinformationen/SI17_007.pdf abgerufen
- Stahr. (2014). *Handbuch der Bodenkunde*.
- Stürner. (2001). *Marschen und Küste*.
- Teichmann, I. (2014). *Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten*. Berlin: DIW Berlin - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.
- Trinkies, C. (11.. November 2016). Bodenproben. (A. Puszczewicz, Interviewer)
- utopia.de. (kein Datum). *Die besten Anbieter für den CO2-Ausgleich*. Abgerufen am 28.. April 2017 von <https://utopia.de/0/produktguide/shops-portale-523/co2ausgleich>
- utopia.de. (o.A.). *Die besten Anbieter für den CO2-Ausgleich*. Abgerufen am 28.. April 2017 von <https://utopia.de/0/produktguide/shops-portale-523/co2ausgleich>
- VDLUFA, V. D.-u. (2004). *Humusbilanzierung*. Bonn.
- Wolters, S., Nett, K., Tänzler, D., Wilkening, K., Götz, M., Krebs, J.-M., et al. (Februar 2015). Aktualisierte Analyse des deutschen Marktes zur freiwilligen Kompensation von Treibhausgasemissionen. (Umweltbundesamt, Hrsg.) Dessau-Roßlau.
- www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de. (12. Dezember 2016). Von <https://www.bodenkunde-projekte.hu-berlin.de/carlos/A01zersetzungsprozesse.html#Humifizierung> abgerufen