

Hochschule Weihenstephan – Triesdorf

Fakultät Landwirtschaft, Lebensmittel und Ernährung

Studiengang Landwirtschaft

Bachelorarbeit

Huminstoffe – unterschätztes Potential

eingereicht von: Lukas Spannbauer

Betreuer: Prof. Dr. Stefan Rohse

Tag der Abgabe: 19.01.2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	- 1 -
1.1 Aktuelle Umweltsituation.....	- 1 -
1.2 Geschichtlicher Exkurs	- 3 -
1.2.1 Mesopotamien - natürlicher Klimawandel	- 3 -
1.2.2 Maya- selbstverschuldete klimatische Veränderungen	- 6 -
2.1 Ausgelaugte Böden	- 9 -
2.2 Reduktion der Wassersicherheit	- 11 -
2.3 Ertragseinbußen.....	- 13 -
2.4 Abnahme der Ernährungssicherheit durch Preisschwankungen	- 14 -
2.6 Existenzbedrohung.....	- 15 -
3 Ursachen dieser Problematik	- 16 -
3.1 Monokultur und die Krux mit den Pflanzenschutzmitteln.....	- 16 -
3.2 Verdichtung und Versiegelung.....	- 17 -
3.3 Störung des ökologischen Gleichgewichts	- 21 -
3.4 Erosion.....	- 25 -
4 Huminstoffe.....	- 27 -
4.1 Genese	- 27 -
4.1.1 Maillard Reaktion.....	- 28 -
4.1.2 Autoxidation von Polyphenolen	- 29 -
4.1.3 Lignintheorie (Lignin-Protein-Theorie)	- 30 -
4.2 Modellsysteme	- 32 -
4.2.1 Modellhypothese nach Ziechmann.....	- 32 -
4.2.2 Modellhypothese nach Weber.....	- 34 -
4.3 Struktur der Huminstoffe.....	- 36 -
4.3.1 Huminstoffmodell als ein System verschiedener Molekularstrukturen von Ziechmann - 40 -	
4.3.2 Strukturhypothese nach Kleinhempel.....	- 41 -
4.3.3 Strukturhypothese nach Haworth	- 43 -
4.4 Das Zentrum hochverdichteter Vernetzung und hochkondensierter Aromatizität	- 43 -
4.5 Offene Peripherie	- 44 -
4.6 Charakterisierung der funktionellen Gruppen und ihre variable Akzessibilität	- 45 -
5 Huminstofffraktionen	- 48 -

5.1 Fulvinsäuren.....	- 49 -
5.2 Huminsäuren.....	- 49 -
5.3 Humine	- 50 -
6 Empirie	- 51 -
6.1 Huminstoffe in Böden	- 52 -
6.1.1 Ton-Humus-Komplex.....	- 54 -
6.1.2 Luft und Wasserhaushalt	- 56 -
6.1.3 Aggregatsstabilität und Bodenleben	- 57 -
6.1.4 Kationenaustauschkapazität	- 59 -
6.1.5 Schadstoffbindung.....	- 61 -
6.1.6 Stabilisierung des pH-Wertes.....	- 64 -
6.1.7 Speicherung von Nährelementen	- 66 -
6.1.8 Huminstoffe und die Versalzung von Böden.....	- 67 -
6.2 Effekte auf die Vegetation.....	- 70 -
6.2.1 Formative Wirkung	- 70 -
6.2.2 Metabolische Wirkungen.....	- 72 -
6.3 Huminstoffe in der Kompostierung.....	- 72 -
7 Resümee.....	- 73 -
8 Literaturverzeichnis	- 76 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Earth Overshoot Day	- 2 -
Abbildung 2: Das Großreich Akkad um 2300 v. Chr.	- 5 -
Abbildung 3: paläoklimatische Untersuchungen.....	- 7 -
Abbildung 4: Wasserkreislauf in Amazonien	- 8 -
Abbildung 5: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland 1881 bis 2021	- 11 -
Abbildung 6: Regenerativer Wasserkreislauf	- 12 -
Abbildung 7: Aufbau der Huminsäuren in Bezug auf Wasser	- 12 -
Abbildung 8: Dürremonitor vom Helmholtz Zentrum für Umweltforschung.....	- 13 -
Abbildung 9: Versorgung mit Sonnenblumenöl im Jahr 2020	- 15 -
Abbildung 10: Direkte und Indirekte Folgen einer Bodenverdichtung.....	- 18 -
Abbildung 11: Porenstruktur von nicht verdichteten (oben) und verdichteten (unten) Bodenproben in jeweils 10 und 30 cm Tiefe	- 19 -
Abbildung 12: Versiegelte Fläche in Deutschland pro Jahr; Verkehrsfläche (lila), Sport, Freizeit und Erholungsfläche (gelb), Fläche für Wohnbau, Industrie und Gewerbe, Öffentliche Einrichtungen (hellblau), Betriebsfläche ohne Abbauland (dunkelblau)	- 20 -
Abbildung 13: Individuenzahlen und Biomasse der verschiedenen Bodenorganismen unter einer Bodenfläche eines Quadratmeters	- 23 -
Abbildung 14: Abnahme der durchschnittlichen Biomasse in Gramm pro Tag.....	- 24 -
Abbildung 15: Reduktion der Bodenmächtigkeit bei anhaltender Erosion	- 26 -
Abbildung 16: Autoxidation von Hydrochinon.....	- 28 -
Abbildung 17: Abläufe bei der Maillard Reaktion.....	- 29 -
Abbildung 18: Autoxidation von Polyphenolen	- 30 -
Abbildung 19: Hypothetische Struktur Lignin PAUL (2007)	- 31 -
Abbildung 20: Huminstoffgenesemodell nach Ziechmann (1996)	- 32 -
Abbildung 21: Mechanismus für die Bildung von Huminstoffen modifiziert nach Stevenson (1985)	- 35 -
Abbildung 22: Varianten der Parameter Grundeinheit, Baustein und Substrat.....	- 38 -
Abbildung 23: Strukturchemische Stellung einiger höhermolekularer Naturstoffe	- 39 -
Abbildung 24: Strukturmuster eines Huminstoffsystems.....	- 40 -
Abbildung 25: Strukturmodell von Huminstoffen nach Kleinhempel (1970)	- 42 -
Abbildung 26: Modellstruktur nach Haworth.....	- 43 -
Abbildung 27: Bausteine der Huminstoffe	- 44 -
Abbildung 28: funktionelle Gruppen der Huminstoffe	- 46 -
Abbildung 29: Fraktionierung der Huminstoffe anhand unterschiedlicher Löslichkeiten	- 48 -
Abbildung 30: Definitionen der Huminstoffunterklassen	- 49 -
Abbildung 31: Huminstoffunterklassen mit ihren jeweiligen Merkmalen.....	- 51 -
Abbildung 32: Reaktionsschema zur Selbstherstellung von Huminstoffen durch Tonminerale.....	- 53 -
-	
Abbildung 33: Fixierungsmöglichkeiten von Huminstoffen an Tonmineralen.....	- 53 -
Abbildung 34: Darstellung eines Ton-Humus-Komplexes.....	- 54 -
Abbildung 35: Brückenbaumechanismus zwischen den Ton und Humus bzw. Huminstoffen.....	- 55 -
Abbildung 36: Benetzungshemmung des Bodens.....	- 57 -
Abbildung 37: Aggregathierarchie im Boden	- 58 -
Abbildung 38: Bindungspotential bei unterschiedlichen pH-Werten.....	- 59 -
Abbildung 39: Kationenaustauschkapazität verschiedener Bodenbestandteile	- 60 -
Abbildung 40: Sorptionsisotherme für das System Benzol/Huminstoff.....	- 62 -
Abbildung 41: Abhängigkeit der sorbierten Menge Benzol [ml] vom Gehalt OS; Bodenvolumen: 0,4m ³ bei einer Fläche von 1m ²	- 64 -
Abbildung 42: Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit des pH-Wertes.....	- 65 -
Abbildung 43: Um-, Ab- und Aufbauprozesse im Boden.....	- 67 -

Abbildung 44: natürliche Auswaschung der Anionen und Kationen	- 68 -
Abbildung 45: Auskristallisation der Salze im obersten Horizont mit ständiger Akkumulation-	68 -
Abbildung 46: Verschiedene Adsorptions-Isotherme und deren Bezeichnung	- 69 -
Abbildung 47: Ionenbindung in Gegenwart von Huminstoffen	- 70 -
Abbildung 48: Effekte auf Wurzel- und Sprosswachstum; Links: Kontrollgruppe, Rechts: mit Huminsäureapplikation.....	- 71 -

1 Einleitung

„Schmeicheln wir uns indes nicht zu sehr mit unseren menschlichen Siegen über die Natur. Für jeden solchen Sieg rächt sie sich an uns. Jeder hat in erster Linie zwar die Folgen, auf die wir gerechnet, aber in zweiter und dritter Linie hat er ganz andre, unvorhergesehene Wirkungen, die nur zu oft jene ersten Folgen wieder aufheben.“

Friedrich Engels

1.1 Aktuelle Umweltsituation

Zeiten wie heute zeigen wie zerbrechlich unsere Welt doch ist. Anlässlich zahlreicher globaler Krisen wie Kriege, Pandemien und Artenverlust steht die Menschheit an einem Scheideweg. Seit dem 19. Jahrhundert haben sich die Lebensverhältnisse und die wirtschaftliche Lage für einen großen Teil der wachsenden Weltbevölkerung durch die industriell technischen Innovationen stark verbessert. So lebt die Bevölkerung in der nördlichen Hemisphäre meist in Wohlstand und Überfluss, wohingegen die Menschen im südlichen Teil oft in Armut leben. (Meier et al., 2006, S. 24 ff.)

So sieht ein weltweit anerkannter Klimaforscher namens Mojib Latif den Einfluss des Menschen auf das Klima kritisch. Der Ausstoß klimarelevanter Spurengase wie Kohlendioxid in die Atmosphäre führt zu einem „anthropogenen Treibhauseffekt“, welcher eine zusätzliche Erwärmung der Erdoberfläche zur Folge hat. (Latif, 2009, S. 58 ff.)

Immer wieder gibt es Einwände von verschiedensten Seiten, dass der Klimawandel und die daraus resultierende Implosion einiger Hochkulturen gang und gäbe sei.

Diese Aussagen sind zwar nicht falsch, aber dennoch nicht ganz richtig. So ist die zeitliche Komponente, in der sich diese Klimavariabilität vollzieht, extrem verkürzt. Das bedeutet, dass in kürzester Zeit unverzichtbare Erdressourcen

wie Biodiversität und Wasserressourcen minimiert werden. Ein großer Unterschied zum Zusammenbruch früherer Hochkulturen ist das räumliche Ausmaß, da früher nur vereinzelte Regionen solchen Katastrophen zum Opfer fielen.

Globalisierung bringt viele Vorteile mit sich wie einen unkomplizierten Wissensaustausch und grenzenlose Solidarität in Katastrophenzeiten (Brände, Tornados, Hurrikane), andererseits kommen deren Nachteile durch die hochvernetzte Welt zum Vorschein.

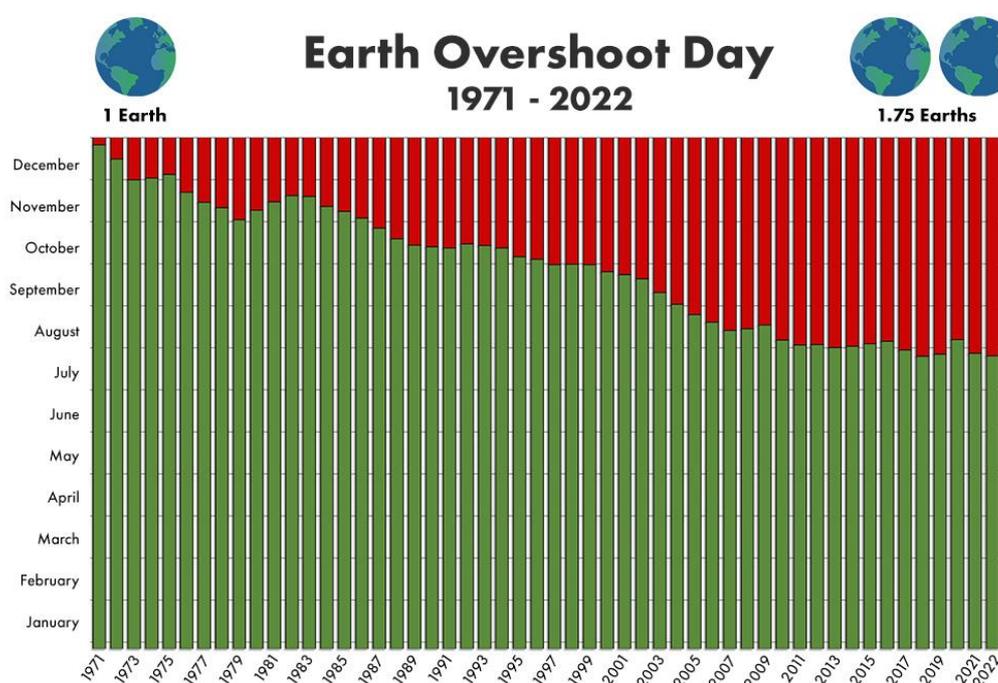


Abbildung 1: Earth Overshoot Day

(Quelle: National Footprint and Biocapacity Accounts 2022)

Hier wird durch das Global Footprint Network der Erdüberlastungstag, mithilfe des ökologischen Fußabdruckes, berechnet. Die biologische Kapazität und Regenerationsfähigkeit der Umwelt wird im Gegensatz zum menschlichen Handeln und deren Auswirkung auf die Umwelt deutlich dargestellt. Wir sehen an diesem Umweltparadoxon, dass die Menschheit Ressourcen aufbraucht, die streng genommen mit Folgen verbunden sind. Von den 24 verschiedenen

Ökosystemdienstleistungen der Erde verringern sich 15 davon ständig - wie die Insektenbestäubung, Artenvielfalt, Bodenproduktivität und Wasserressourcen. (Grunewald, 2013, S. 27 ff.)

Auch sogenannte Tipping Points, welche eine Überschreitung eines bestimmten Punktes (z.B. Grad Celsius) mit unumkehrbaren Folgen aufzeigen, sind seit Jahrzehnten wissenschaftlich erforscht und bekannt. (Deutscher Wetterdienst, 2019)

Das Wissen aus der Vergangenheit, wann und warum Schwellenwerte bei den Hochkulturen, die einen Kollaps erlitten, aufgetreten sind, kann uns heute vor ähnlichem Verhalten warnen und zur Entwicklung besserer Ressourcenmanagementstrategien beitragen.

Costanza et al. (2007) schreibt dazu: „Wenn wir adäquat von der Geschichte lernen, können wir eine nachhaltige und wünschenswerte Zukunft des Menschen gestalten.“

Anhand zweier bekannter Hochkulturen soll im Folgenden aufgezeigt werden, welche Auswirkungen eine Nichtachtung solcher Tipping Points nach sich ziehen kann.

1.2 Geschichtlicher Exkurs

1.2.1 Mesopotamien - natürlicher Klimawandel

Eine der damaligen bedeutendsten Hochkulturen der Welt und deren Zusammenbrüche fußen auf der zivilisatorischen Entwicklung des frühen Kulturkreises in Mesopotamien. Im 4. Jahrtausend v. Chr. entwickelte sich am Unterlauf des Euphrat und Tigris in den fruchtbaren Schwemmlandebenen eine Ansiedelung mit dem Zentrum Uruk, mit über 100 Siedlungsplätzen. Mit ihren städtischen und landwirtschaftlichen Innovationen, wie beispielsweise einem Netzwerk aus Kanälen und Deichen, welches aus dem Frühlingshochwasser des Euphrat gespeist wurde, konnte eine kontrollierte Bewässerung des zur damaligen Zeit schon intensiven Anbaus von Weizen, Hülsenfrüchten, Gemüse und Dattelpalmen garantiert werden. Aufgrund dieses Kniffs wurde die Stadt Uruk

im 3. Jahrtausend v. Chr. immer wohlhabender und weitere Erfindungen wie das Rad, Töpferscheibe und der Saatpflug manifestierten deren Machtbereich. (Radner, 2017)

Auch der überregionale Handel mit Luxusgegenständen wie Textilien, Metall- und Steinerzeugnissen, deren Rohstoffe aus Oman, Zypern, Innerasien und Afghanistan stammten, florierte. Dies lässt laut der Wirtschaftswissenschaften den Schluss auf eine Entwicklung einer im Sekundärsektor geprägten Wirtschaft zu und spricht von einer Urproduktion, welche die Bevölkerung in Gänze versorgen konnte. (Gerold, 2021, S. 12)

Danach folgte das 5,2-Kilojahr (kurz ka) -Klimaereignis das sich vor 5200 Jahren ereignete in Form von geringen Niederschlagsmengen, welche überregionale Folgen für den Agrarsektor in den Regenfeldbauregionen hatte. Somit verringerten sich die Bewässerungsflächen im Uruk- Bereich, was im Endeffekt zu einer Neuordnung der Herrschaftsstruktur und damit von der religiösen Regentschaft, wegführte. Infolgedessen brach in der Zeit zwischen 3100 - 2900 v. Chr. das Uruk-System zusammen und mehrere Stadtstaaten entstanden. Die weltliche Macht in Form eines Palastsystems trat in den Vordergrund, die Verwaltung und Protokollierung der wirtschaftlichen Aktivitäten übernahm und führte eine effizientere Bewirtschaftung der Landflächen sowie ein vollständig entwickeltes Schriftsystem - die Keilschrift – ein. (Gerold, 2021, S. 12 ff.)

Obwohl die veränderten Klimaereignisse einschneidend waren, konnten sich diese Stadtstaaten durch ihre fortschrittlichen Pflanzenbausysteme und effiziente Verwaltung gegen das 5,2-ka-Klimaereignis erwehren.

Im Jahre 2343 v. Chr. endete die Unabhängigkeit der einzelnen Stadtstaaten mit der Eroberung durch Sargon von Akkad. Unter ihm entstand der erste territoriale Staat in der Geschichte Mesopotamiens, dem alle zu Abgaben verpflichtet und politisch abhängig waren (Radner, 2017).



Abbildung 2: Das Großreich Akkad um 2300 v. Chr.

(Quelle: Gerold, 2021, S. 18)

In dieser Zeit blühten die landwirtschaftliche Produktion, das Kunsthandwerk und der Handel – vor allem mit Luxusartikeln mit Ebla und Larsa auf, was sich durch Tontafeln belegen lässt. Der Reichtum der Handelsaristokratie und des Königs wuchs stetig durch die Erhebung von Steuern und durch die Tribute der Städte. Dies deutet darauf hin, dass die hochentwickelte Kultur sich durch Innovationen an die veränderten Umweltbedingungen angepasst hatte. Anhand von paläoklimatischen Forschungsergebnissen ist eine Klimaentwicklung hin zu mehr Trockenheit (Aridisierung) im Zeitraum von 2300 - 1900 v. Chr. belegt. (Roberts et al., 2011)

Abermals versuchte man den neuen Klimaschwankungen mit Adaption im Pflanzenbau entgegenzuwirken. So verdrängte die Gerste Getreidesorten wie Weizen, Emme und Einkorn, da sie mit einer höheren Toleranz gegen Trockenheit und Versalzung befähigt war. Dies wurde aufgrund von 160 Pflanzenproben der neun Kulturpflanzenarten archäobotanisch (frühe Bronzezeit) von ausgewertet. Als Hülsenfrüchte wurden Linsen, Bohnen und die breiten

Bohnen angebaut; bei den Ölfrüchten waren es Leinsaat und Öldistel. (Riehl 2011)

Doch in der mittleren Bronzezeit ab 2200 v. Chr. fand bedingt durch die vermehrt einsetzenden Dürrejahre ein eindeutiger Wandel zu mehr dürreresistenten Kulturen statt. Bei den Getreidearten verschwanden Emmer und Einkorn gänzlich und Weizen wurde nur noch im geringen Maße angebaut. Die Humidität liebenden Hülsenfrüchte fehlten meist vollständig und wurden durch die Bitterwicke ersetzt. (Riehl, 2011)

Um der Aridisierung zu trotzen, wurden Wasserläufe zwar kanalisiert, konnten aber die schleichende Aufgabe der Siedlungen nicht aufhalten. Infolgedessen setzte ein Flüchtlingsstrom gen Süden innerhalb des akkadischen Reiches ein (Abbildung 2). Für eine mangelhafte Getreide-, Schaf- und Ziegenproduktion sprachen archäologische Funde, da die Ernährung vermehrt aus Wildtieren und Kräutern Bestand. (Weiss et al. 1993)

Das 4,2-ka-Dürreereignis:

Man kann in diesem Fall von der ersten Desertifikation in der Menschheitsgeschichte sprechen, die sowohl durch eine Übernutzung der Ressourcen als auch durch eine zunehmende Aridisierung vor 4200 Jahren zu Stande kam. Schließlich zerbrach das Weltreich Akkad durch das Zusammenspiel von Landflucht und unurbaren Flächen, welche lokale Kriege und die endgültige Eroberung durch die Gutäer zur Folge hatte. (Gerold, 2021, S. 27 ff.)

1.2.2 Maya- selbstverschuldete klimatische Veränderungen

Die Mayas konnten durch ihren rapiden Bevölkerungswachstum ihre sozialen und ökologischen Differenzen nicht bewältigen.

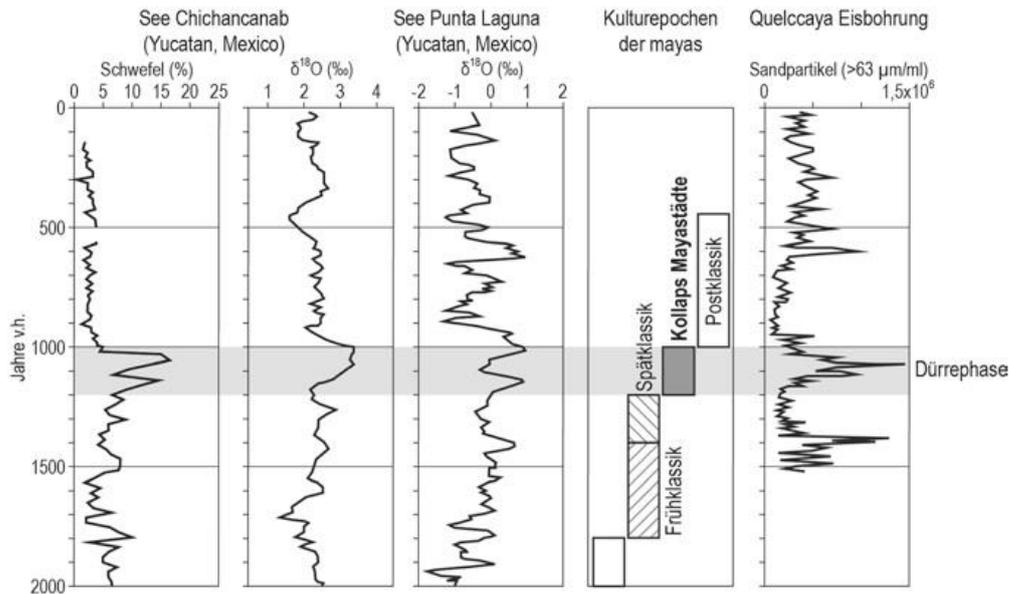


Abbildung 3: paläoklimatische Untersuchungen

(Quelle: Gerold, 2021, S. 149)

Als alleiniger Auslöser für den Zusammenbruch der Maya Königsstädte wird oft die klimatische Niederschlagsvariabilität aus dem 9. und 11. Jahrhundert angenommen. Doch diese ereigneten sich just in einer Zeit sozioökologischer Diskrepanzen. (Diamond, 2005, S. 722)

Auf der ökologischen Seite traten gravierende Umweltprobleme, die durch die Ressourcenübernutzung in Folge des starkem Bevölkerungsanstieges hervorgerufen wurden, zu Tage. Mit dem traditionellen Milpa System der Maya, welches den zeit- und standortgleichen Anbau von Mais, Bohnen und Kürbissen - auch genannt „Die drei Schwestern“ - beinhaltet, wird die Symbiose in Form von effizientester Ertragsleistung und hoher Bodenschutzmaßnahme erzielt. Zuvor musste eine Landgewinnung durch Brandrodung oder Abholzung erfolgt sein, sodass für ein bis drei Jahre ein guter Nährboden zur Verfügung stand. (Wilhelmy, 1981, S. 542) Nach dieser Zeit wurde dem Boden durch 5 bis 12-jährige Brache (abhängig von der Bodenzusammensetzung) seine Sukzession ermöglicht, was eine Regeneration und erneute Nutzung begünstigten. Durch dieses erfolgreiche System wuchs die Bevölkerung in ihrer Blütezeit auf 10.000.000 Menschen an. Dadurch musste aber auch die

Nahrungsmittelproduktion enorm angekurbelt werden. Infolgedessen wurden die Brachjahre gekürzt und immer mehr Wald gerodet. Die Effekte dieses Raubbaues waren Missernten und die Störung des Wasserkreislaufes im Regenwald, sowie eine nachgewiesene starke Erosion in den einst so fruchtbaren Böden (Beach et al., 2006).

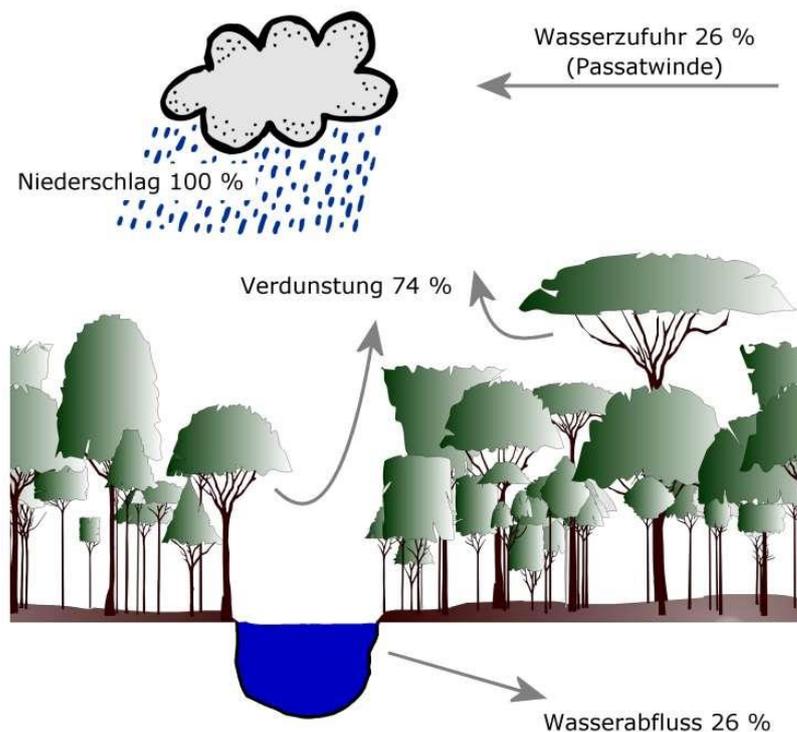


Abbildung 4: Wasserkreislauf in Amazonien

(Quelle: Dr. Deutsche, 2022)

Dieser Kreislauf funktioniert nur, wenn genügend große und vor allem zusammenhängende Regenwaldflächen vorhanden sind. (Hörner, 2020) Die Verdunstung und Zirkulation des Wassers können somit nur in einem intakten Regenwald funktionieren. Der Klimaforscher Carlos Nobre der Universität von Sao Paulo vertritt die These, dass sich durch die Zerstörung von circa einem Viertel der tropischen Regenwälder, die Trockenzeiten verlängern und schlussendlich zu Savannen werden.

Darüber hinaus führte die damalige unzureichende Landverfügbarkeit für die Nahrungsmittelproduktion zwischen 750 - 1000 n. Chr. zu politischer

Desintegration und damit zu zahlreichen Kriegen und Konflikten. Zuallererst brachen aufgrund des Raubbaues der vorherigen Jahrzehnte die lokalen Erträge ein und führten zur Destabilisierung der Einzelstädte. Einzelne Königsstädte wie Tikal und Copan zeigen deutlich, dass aufgrund der schon fortgeschritteneren Übernutzung die Ressource Wald nicht mehr gegeben war. Ebenso traten sekundär Folgen wie Bodenerosion und Sedimentation auf den noch fruchtbaren Ackerflächen auf. Darüber hinaus zeigen Grabbeigaben, dass die Schere zwischen Arm und Reich sehr stark differenziert war. Diese Diskrepanz stellte die Privilegien des Adels nach und nach infrage und zwang demzufolge die Könige in den meisten Fällen zu kriegerischen Auseinandersetzungen, deren Primärziel die Ressourcenbeschaffung war, um die eigene Machtlegitimation zu gewährleisten. Diese interkulturellen Kriege schwächten nicht nur die Bevölkerungsanzahl, sondern führten zu mehreren Bürgerkriegen und Rebellionen gegen die Elite. In den ehemals reichen und gut organisierten Mayastädten verschwand der Adel. Die „einfache“ Bevölkerung verblieb noch ein paar Jahrzehnte bis auch diese zu den Rändern an den Küsten flohen. (Gerold, 2021, S. 131 ff.)

2 Auswirkungen auf die derzeitige Landwirtschaft

Vielfältigkeit der Auswirkungen führt zu Erschwernissen in sämtlichen Bereichen der Landwirtschaft, welche in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert werden.

2.1 Ausgelaugte Böden

Immer wieder wird in Fachzeitschriften oder in Büchern der Begriff „Bodenmüdigkeit“ verwendet. In diesen Zusammenhang wird dem Boden der Verlust seiner natürlichen Fähigkeit, Biomasse zu erzeugen, diagnostiziert.

Jede Pflanzenart beansprucht verschiedene Nährstoffe in unterschiedlichen Mengen. Nimmt man zum Beispiel Winterweizen A/B mit einer Ertragserwartung von 80 dt/kg so bedarf es einer Stickstoffmenge von 230 kg N/ha.

Derartige Stickstoffmengen werden auf natürliche Weise in Form von Mineralisation nicht ohne Weiteres bereitgestellt. Somit muss der Agronom, durch das Ausbringen von mineralischem Stickstoff, eine „optimale“ Pflanzenernährung gewährleisten, um nicht mit Ertragseinbußen rechnen zu müssen (Landwirtschaftskammer NRW, 2021). Auch hat jede Pflanze bestimmte Krankheiten, die durch zu enge Fruchtfolge entstehen können. Des Weiteren werden durch Stoffwechselexsudate der Wurzeln Schädlinge angezogen und das Wachstum der Pflanzen gehemmt. Außerdem ändert sich der pH-Wert des Bodens durch bodeninterne Prozesse, welche sich wiederum auf die Nährstoffverfügbarkeit negativ auswirkt. Die Annahme, dass es sich bei Böden nur um „Substrat“ oder „tote Masse“ handelt muss schnellstmöglich korrigiert werden. Vielmehr sollte er als eine Art „Bioreaktor“ angesehen und verstanden werden. Natürlicherweise funktioniert die Gesamtheit des Bodens wie ein Schweizer Uhrwerk, welcher seine Prozesse an die vorliegenden Edukte präzise abstimmt, um die effizienteste „Produktionsgleichung“ zu erstellen. Wird die Fruchtfolge zu eng gehalten oder an den Standort nicht angepasst, wird der Boden schnell an bestimmten Nährstoffen arm, nur in bestimmten Bodenschichten durchwurzelt und trägt das Potential von Krankheiten und Schädlingen in sich. Schlussendlich wird an der „Substanz“ des Bodens, Humus gezehrt und mindert in der Folge immer mehr sein Fähigkeitspotential. Dessen essentielle Leistungen wie Nährstoffspeicherung, Schaffung von Bodenstruktur, Ionenaustausch, Puffer- und Filterfähigkeit und dem Wasserspeichervermögen sind als Beispiel des großen Portfolios an Potential zu nennen. (Roth, 2019)

Die Bodenmüdigkeit ist ein schleichender Prozess, welcher in der heutigen Zeit künstlich verlangsamt wird, bis er schließlich in Form von Qualitätseinbußen und Ertragsdepression bis hin zur kompletten Bodenerschöpfung resultiert.

2.2 Reduktion der Wassersicherheit

Zur oben genannten Bodenmüdigkeit gesellt sich vermehrt die Gefahr vor Dürren oder sogar Bränden der Ackerflächen. Entgegen der weitläufigen Meinung und Empfinden wird es nicht trockener (dürre), sondern bewegt sich der Jahresniederschlag seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahre 1880 auf einem konstanten Niveau. (Deutscher Wetterdienst, 2022)

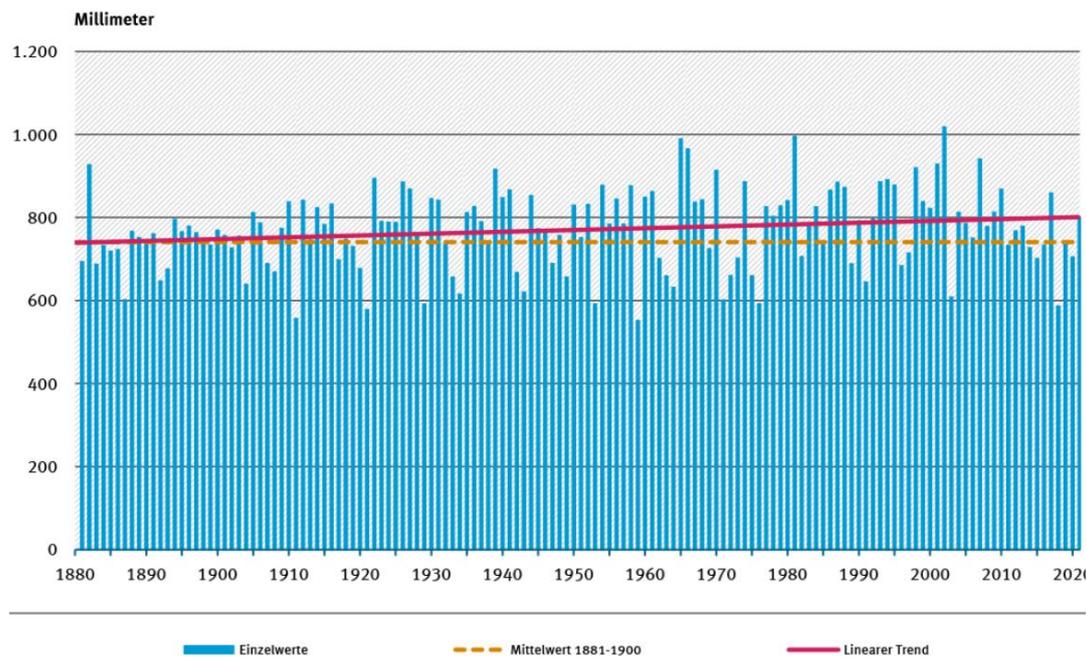


Abbildung 5: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland 1881 bis 2021

(Quelle: Anonym, 2022)

Aber diese Statistik täuscht eine gleichbleibende Wasserversorgung der Flächen vor. Dem ist aber bei weitem nicht so, da für die landwirtschaftliche Produktion nicht durchschnittliche Niederschlagsmengen, sondern Intensität, Amplituden und Extremwetterereignisse von weitaus höherer Bedeutung sind. Diese große Variabilität bedingt in vielen Fällen an manchen Tagen eine Überschwemmung bzw. Wassererosion und wieder an anderen Tagen eine Trockenheit, bei derer die Pflanzen verwelken. Diese Problematik scheint trivial betrachtet auf den klimatischen Wandel zurückführbar zu sein. Vielmehr sind diese Wetterereignisse jedoch auf den Zustand des Bodens selbst

zurückzuführen. Ähnlich dem Wasserkreislauf des Regenwaldes (Abbildung 4) ist das Verhalten auf deutschen Böden.



Abbildung 6: Regenerativer Wasserkreislauf

(Quelle: Hörner, 2020)

Anhand der Abbildung 6 kann durch einzelne Stellschrauben aufgezeigt werden, wie ein natürlicher Wasserkreislauf aufgebaut ist. Die wichtigste Variable ist durch ein Mehr an bedeckten Boden zu erreichen; dies markiert den „Kämpferstein“. (Hörner, 2020) Infolgedessen sinkt die Benetzungshemmung, hervorgerufen durch hydrophobes Ende der Huminsäuren und verbessert die Infiltrationsleistung enorm. (Schulz, o. D.)

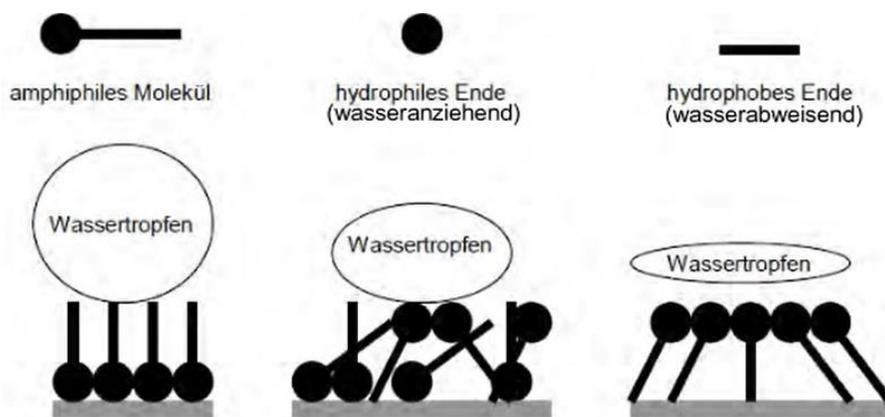


Abbildung 7: Aufbau der Huminsäuren in Bezug auf Wasser

(Quelle: Schulz, o. D.)

Somit ist es unerlässlich, die Wasser-Boden Interaktionen zu verstehen und von diesen zu lernen, um einer vermeintlichen Wasserverknappung entgegenzuwirken. (Hörner, 2020)

Ab diesem Kapitel folgt eine Treppenproblematik, die besagt, dass das aktuelle Problem akute Effekte auf die nachfolgende Problematik hat. Aufgrund der vorherig genannten Hemmnisse wie Auslaugung der Böden, Abnahme der Wassersicherheit und dem generellen Schwund an Humusmasse, kommt es immer wieder zu enormen Ertragseinbußen.

2.3 Ertragseinbußen

Obwohl sich laut Abbildung 4 die Niederschlagsmenge in Deutschland auf einem gleichbleibenden Niveau befindet, kommt es trotz allem zu vermehrten Dürren und Wasserknappheiten. (Anonym, 2020)

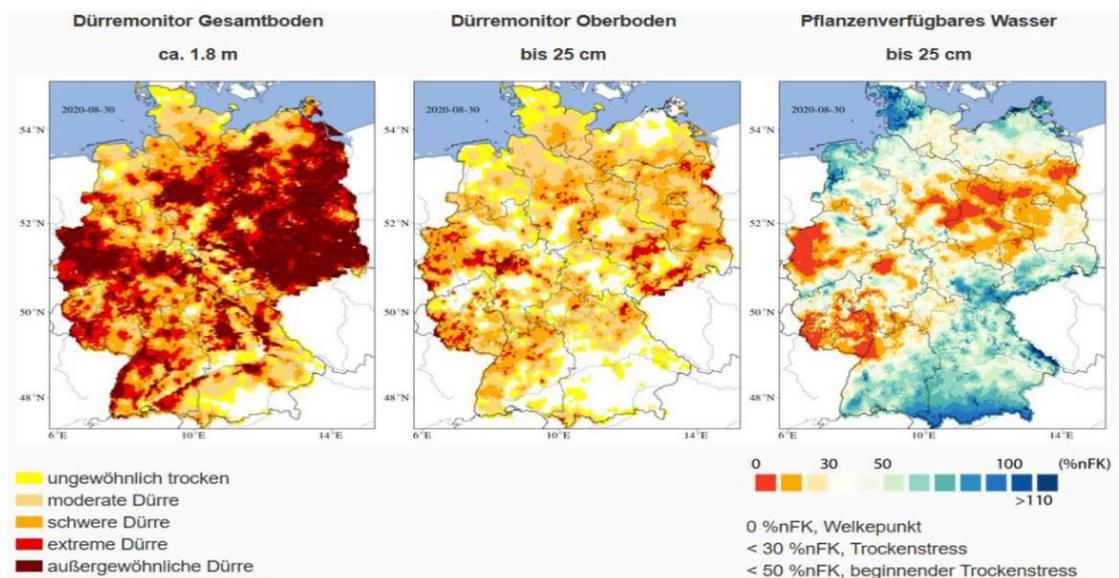


Abbildung 8: Dürremonitor vom Helmholtz Zentrum für Umweltforschung

(Quelle: Anonym, 2020)

Betrachtet man die Abbildung 8 wird deutlich, dass der Gesamtboden im Osten Deutschland von außergewöhnlicher Dürre geprägt ist, der Oberboden bis 25 cm Tiefe von partieller extremer Dürre betroffen ist und das pflanzenverfügbare Wasser vor allem im Norden und im Süden und Südosten Deutschlands noch vorrätig ist. Dies erklärt sich durch die humusreichen Böden sowohl an der Nordsee als auch dem Mittelgebirge und den Alpen und die letzteren profitieren zusätzlich durch die verstärkte Abregnung. (Umweltbundesamt, 2022)

Durch die Störung des regenerativen Wasserkreislaufes können vermehrt Extremwetterereignisse beobachtet werden. Selbst wenige Tage mit sehr hohen Temperaturen oder langanhaltenden Dürreperioden in kritischen Wachstumsphasen können zu großen Produktionsverlusten führen. In ähnlicher Weise wurden exzessive Niederschlagsereignisse als Hauptursache für große Ertragsverluste bei Mais in den USA identifiziert. Starke Regenfälle können zudem die Feldarbeiten verzögern, den Krankheitsdruck erhöhen oder Nitratauswaschung verursachen. Ebenso können sowohl Frost als auch Schädlinge und Krankheiten große Ertragsausfälle verursachen. (Hörner, 2020)

Diese Faktoren bilden in Summe die Hauptursachen für die weltweiten Ertragseinbußen in der Landwirtschaft, was wiederum eine Konsequenz in Form von Preisschwankungen nach sich zieht.

2.4 Abnahme der Ernährungssicherheit durch Preisschwankungen

Aufgrund der vorher genannten Erschwernisse, aber auch durch aktuelle Krisensituationen wie den kriegerischen Auseinandersetzungen in der Ukraine ist die Ernährungssicherheit in Drittländern gefährdet. (Mahlkow, 2022) Auch in Deutschland konnte dieser Effekt am Beispiel von Sonnenblumenöl beobachtet werden. Durch den ausfallenden Export von ukrainischem Sonnenblumenöl und die Sanktionen gegen die Russische Föderation, standen die hohen Importe in Deutschland nicht zur Verfügung und eine gleichzeitige Preissteigerung waren die Folge. (Ahrens, 2023)

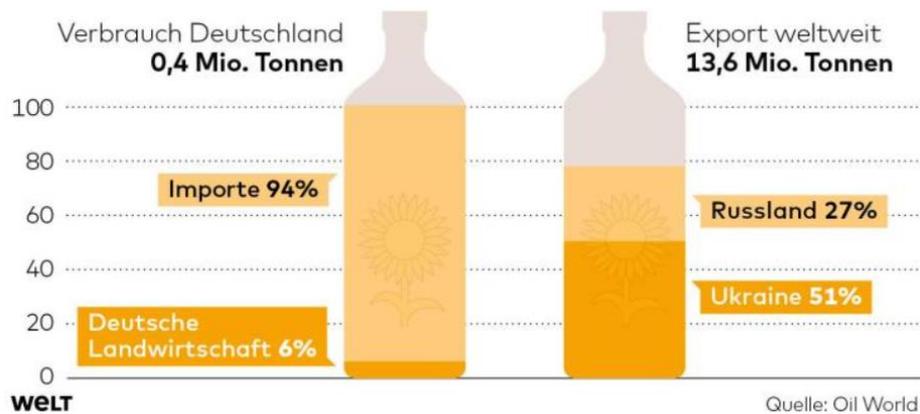


Abbildung 9: Versorgung mit Sonnenblumenöl im Jahr 2020

(Quelle: Dierig, 2022)

Der Weltmarkt beeinträchtigt die Ernährungslage derart enorm, dass sich Länder, die auf Importwaren in Form von Lebensmitteln angewiesen sind, diese nicht mehr zugänglich sind. (Die Bundesregierung, 2022)

Bedingt durch die vorher beschriebenen Ertragseinbußen, kommt es zu weiteren Folgeerscheinungen. Um die Erträge stabil zu halten, wird immer mehr Aufwand notwendig; dies können mehr Düngemittel, Pflanzenschutzmittel oder Bewässerungsanlagen sein.

In Summe kann dies für kleinere Erzeuger existenzbedrohend sein.

2.6 Existenzbedrohung

Um weiter konkurrenzfähig zu bleiben, müssen Investitionen getätigt werden, was oftmals bei kleinen Betrieben zu Verschuldungen führen und damit zur Aufgabe des landwirtschaftlichen Betriebes beitragen kann.

Zur Lösung dieses Problems stehen drei unterschiedliche Wege zur Verfügung:

Einerseits ließe sich durch Aufgabe des Betriebes eine hohe zukünftige Verschuldung verhindern.

Andererseits könnte man in effizientere meist größere Maschinen und in vermehrte Einsatzmengen von Hilfsmitteln investieren. (Anonym, o. D.)

Der Königsweg wäre eine Verbesserung der Grundlage der Landwirtschaft, indem man den Boden und seine Funktionen so fördert, dass keine oder wenig künstliche Maßnahmen vonnöten sind.

3 Ursachen dieser Problematik

Um den Gesamtzusammenhang zu verstehen, muss zunächst der Blick auf die Ursachen dieser Bodendegradation gelegt werden.

3.1 Monokultur und die Krux mit den Pflanzenschutzmitteln

Monokulturen bieten eine Option, die Nahrungsmittelproduktion zu maximieren, indem es dem Agronomen erlaubt, sämtliche Kontrolle über Parameter wie Pflanzdichte, Menge und Qualität des Pflanzenschutzmittels und Dünger sowie standardisierter Arbeitsgänge zu haben (Zimmermann, 2015). An Nutzpflanzen lässt sich sehr gut beobachten, wie gefährlich diese Abhängigkeit des Menschen von Monokulturen ist. Obwohl die Kartoffel erst zur zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts über den Atlantik nach Europa gebracht wurde, wurde sie zum Hauptnahrungsmittel der ärmeren Bevölkerung. So ereignete sich um 1845 eine verheerende Ausbreitung der Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans*), welche in Irland 1,1 Millionen Menschen das Leben kostete. (Clarkson, 2002)

Ein Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit wurde durch den Pilz *Helminthosporium maydis* im Südosten der Vereinigten Staaten ausgelöst. Hier kam es 1970 zu einer rasant ausbreitenden Art des Maisblattbrandes, der verheerende Schäden anrichtete und immense Auswirkungen auf den globalen Getreidemarkt hatte. Diese großflächigen Monokulturen bieten einen idealen Nährboden für den Einfall von Schädlingen und Krankheiten. (Dando, 1999)

Ausgelöst durch diesen Umstand greifen die meisten Agronomen zu Pflanzenschutzmitteln, um dem Befall her zu werden. Diese sind häufig nur auf die angebaute Kultur abgestimmt aber töten auch oftmals andere Organismen ab. In Deutschland waren Stand 2020, 283 Wirkstoffe in insgesamt 980 Mitteln mit 1.187 Handelsnamen zugelassen. Dabei bildet die Gruppe der Herbizide, auch Unkrautvernichtungsmittel genannt, über 50 Prozent der abgegebenen Spritzmittel aus. Da das Wirkungsspektrum der meisten Pflanzenschutzmittel oft breit gefächert ist, birgt es Risiken und Schäden auch für pflanzliche und tierische Organismen, von denen keine Schädigung ausgeht. Somit ist der großflächige Einsatz der PSM nicht nur mit hohem Nutzen, sondern auch mit einer Gefährdung der Natur, dem Grundwasser und der biologischen Vielfalt verbunden. (Umweltbundesamt, 2022)

Gleichzeitig bewirkt ein erhöhter Pestizidaufwand eine gesteigerte Resistenz der Gräser, was sich am Beispiel des Ackerfuchsschwanzes bereits zeigt, da eine Multiresistenz aufgebaut wurde. (Ulber, 2018) Um diesen Resistenzen entgegen wirken zu können, wird meist mit einem Wechsel bzw. einer Erhöhung des Pflanzenschutzmittelaufwandes agiert und damit eine weitere Belastung des Bodens und der Vegetation in Kauf genommen.

Als weitere Ursache für eine Bodendegradation ließe sich eine zunehmende Verdichtung und Versiegelung des Bodens anführen.

3.2 Verdichtung und Versiegelung

Landwirtschaftliche Maschinen wurden in den letzten Jahrzehnten immer leistungsfähiger, wodurch auch deren Gewicht stetig anstieg. Zum Beispiel gibt es Mähdrescher auf dem Markt, die mit 25 Tonnen Leergewicht und 650PS (TRIBINE T1000) ausgestattet sind (Göggerle, 2022) und ebenso Rübenroder, die bis zu 60 Tonnen auf die Waage bringen. (Umweltbundesamt, 2019)

Durch solch große Lasten werden zum einem die Funktionsfähigkeit des Bodens als auch die Lebensbedingungen des Edaphons verschlechtert. Verdeutlichen lässt sich dies an der folgenden Abbildung 11, die sowohl die indirekten

als auch direkten Auswirkungen einer Bodenverdichtung beleuchtet. (Umweltbundesamt, 2019)

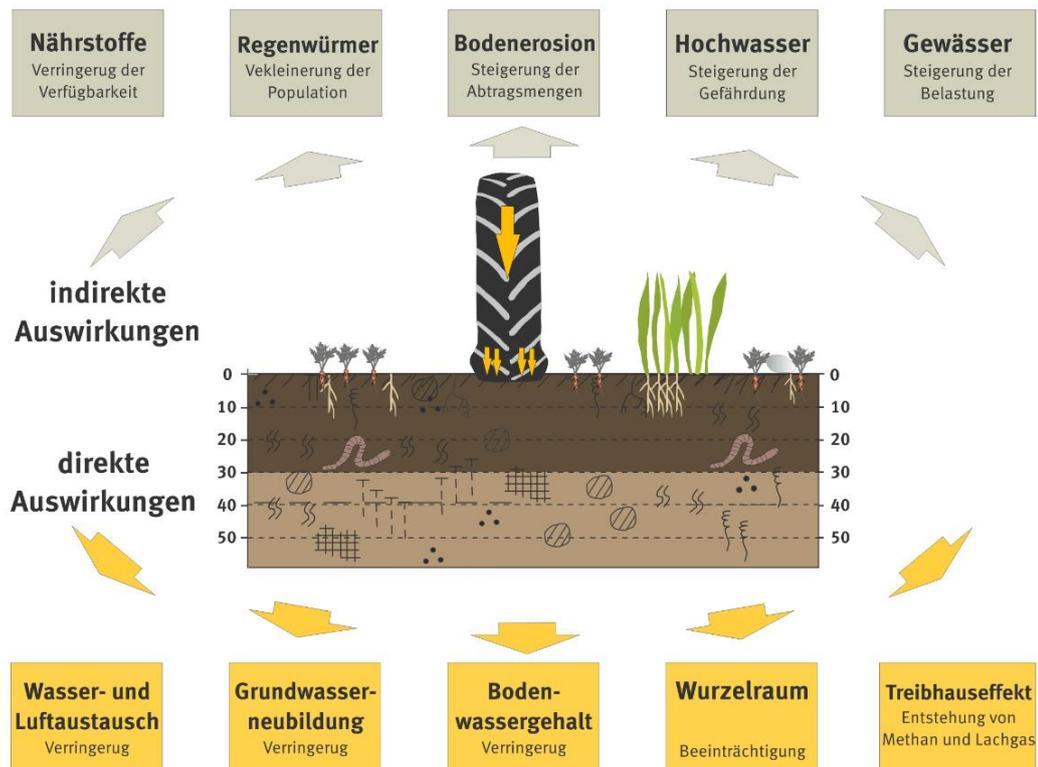


Abbildung 10: Direkte und Indirekte Folgen einer Bodenverdichtung

(Quelle: Umweltbundesamt, 2019)

Grundsätzlich ist die Stabilität des Bodens an seine Struktur gekoppelt, welche als Bodengefüge bezeichnet wird. Dieses Bodengefüge setzt sich aus Bodenpartikeln verschiedener Korngrößen, die durch Aggregate (Abbildung 34) unterschiedlicher Volumina verbunden sind, zusammen. Diese im Boden befindlichen Bodenpartikel bilden Hohlräume in Form von Poren, welche mit Luft und Wasser gefüllt sind. Anhand von Abbildung 12 kann veranschaulicht werden wie sich eine Verdichtung auf die Porenstruktur sowie deren Anzahl auswirkt. (Umweltbundesamt, 2019)

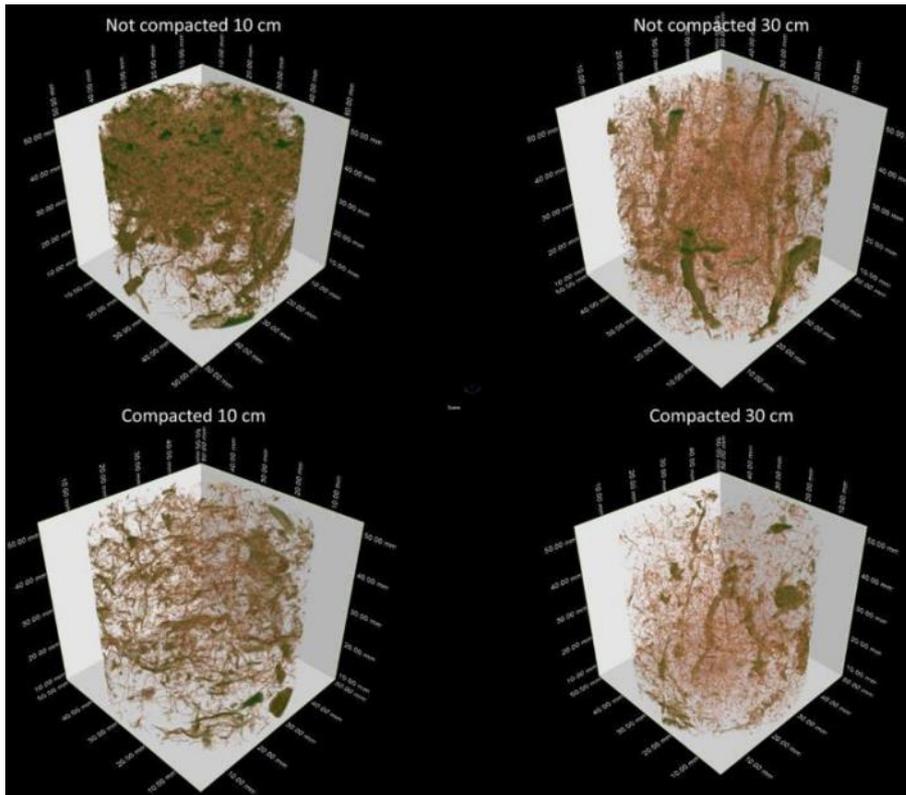


Abbildung 11: Porenstruktur von nicht verdichteten (oben) und verdichteten (unten) Bodenproben in jeweils 10 und 30 cm Tiefe

(Quelle: Sexlinger, 2020)

Als Folge dieser Schadverdichtung können verschlechterte Wuchsbedingungen der Pflanzen infolge von „Plattenbildung“, die den Wasser- und Gasaustausch sowie Nährstofftransport und Grundwasserneubildung erschweren, einhergehen; wie auch in Abbildung 11 aufgeführt ist. Gleichzeitig bewirkt dieser behinderte Gasaustausch eine Steigerung der Methan- und Lachgasentstehung. Ebenso wird durch die vorherig beschriebene Plattenbildung, die Erosionsgefahr und das Hochwasserpotential erhöht. Zwar können durch technische Erneuerungen, wie einer Reifendruckregelanlage, Einsatz von Breit- und Terrareifen und gegebenenfalls Raupenlaufwerke Schadverdichtungen abgeschwächt werden, allerdings ist mit diesen Techniken die eigentliche Ursache nicht beseitigt. (Umweltbundesamt, 2019)

Neben der Bodenverdichtung stellt auch die Bodenversiegelung eine nachhaltige Verschlechterung des Bodengefüges in Deutschland dar.

Von einer Bodenversiegelung spricht man, wenn der Boden luft- und wasserdicht abgedeckt wird, was durch die Errichtung von Gebäuden oder auch anderen Flächen, die durch Asphalt, Beton oder Pflastersteinen befestigt werden, geschieht. Somit kann Regenwasser nur noch erschwert versickern und der Gasaustausch mit der Atmosphäre wird gehemmt. (Umweltbundesamt, 2022)

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die jährliche Versiegelung nach Nutzungsart in Deutschland.

Fläche für Siedlung und Verkehr nach Art der tatsächlichen Nutzung* (Stichtag 31.12.)

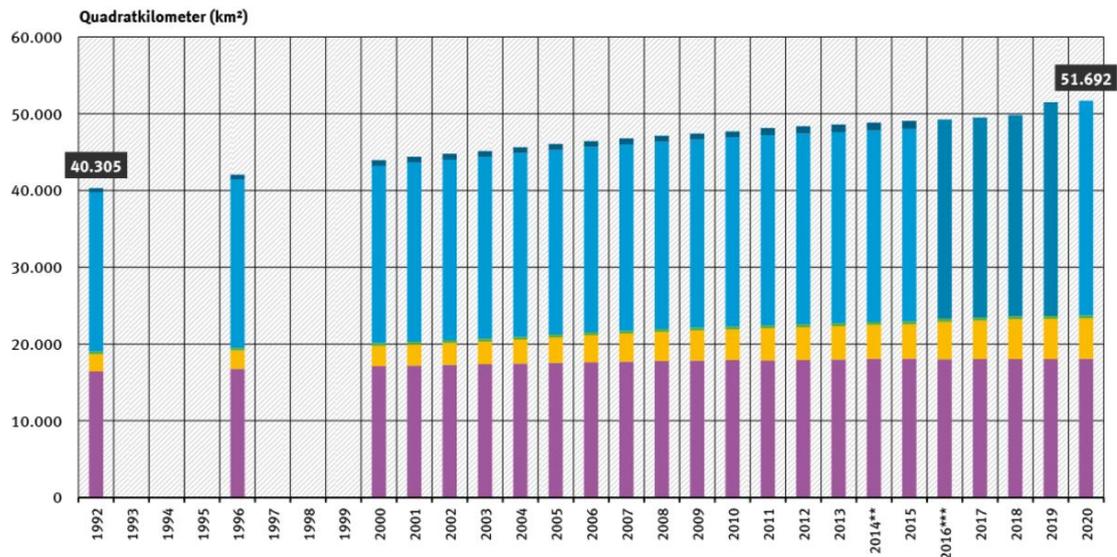


Abbildung 12: Versiegelte Fläche in Deutschland pro Jahr; Verkehrsfläche (lila), Sport, Freizeit und Erholungsfläche (gelb), Fläche für Wohnbau, Industrie und Gewerbe, Öffentliche Einrichtungen (hellblau), Betriebsfläche ohne Abbau (dunkelblau)

(Quelle: Umweltbundesamt, 2022)

All diese Faktoren haben viele unmittelbare ökologische Auswirkungen, welche wieder direkt auf die Landwirtschaft und die genutzten Böden zurückfallen.

So beeinträchtigt es zum einem durch die gehemmte Infiltration den Wasserhaushalt und zum anderen steigt die Gefahr von Überschwemmungen an.

Aufgrund des fehlenden Wasser- und Lufthaushaltes kann die Bodenfauna zu Grunde gehen, welche im großen Maße zum Erhalt und der Neubildung von fruchtbaren Böden nötig ist. Diese Störung hat Auswirkungen auf das ökologische Gleichgewicht im Boden.

3.3 Störung des ökologischen Gleichgewichts

Der Boden muss als lebendiger Bioreaktor angesehen werden, da durch ein Zusammenspiel von Edaphon und Umwelt ein sich immer erneuernder Prozess des Bodens bereitgestellt wird. So lassen sich Bodenorganismen in tierische Bodenfauna und pflanzliche Bodenflora einteilen. (Gaubé, 2006)

Unter der Bodenfauna versteht man die Gesamtheit der tierischen Bewohner des Bodens inklusive der aufliegenden Streu (Epigäon).

Hier hat jede Gruppe eine bestimmte Funktion im Zersetzungsprozess:

- Mikrofauna (< 0,2 mm): Amöben, Ciliaten, Fadenwürmer
Funktion: Mineralisierung
- Mesofauna (< 2 mm): Milben und Springschwänze
Funktion: Kleinräumige Bioturbation, Streufragmentierung und Bioakkumulation
- Makrofauna (< 20 mm): Asseln, Spinnen, Regenwürmer, Käfer und andere Insekten
- Megafauna (> 20 mm): Wirbeltiere wie Maulwürfe, Wühlmäuse und Spitzmäuse
Funktion: Großräumige Bioturbation, Streufragmentierung und Aggregatsbildung

Alle Bestandteile der Bodenfauna fördern darüber hinaus die mikrobielle Aktivität, so sorgen insbesondere Bodenkriecher und -wühler für Durchmischung, Durchlüftung und Lockerung des Bodens. (Larink, 2004)

Als weiteres wichtiges Glied im Ökosystem wird nun die Bodenflora, auch Bodenmikroflora genannt, bestehend aus Pilzen, Flechten, Algen und Bakterien, beleuchtet. Der österreich-ungarische Botaniker, Mikrobiologe, Natur und Kunstphilosoph Raoul Heinrich France bezeichnete diese autochthone Mikroflora als Nanedaphon, angelehnt an den Begriff des Nanoplanktons. Darunter sind unterschiedliche Stäbchen-, Keulen- und Kokkenformen zusammengefasst, die in allen irdischen Klimazonen beheimatet sind, da sie am wenigsten Licht und Luft bedürfen. (Francé, 1998)

In diesem Kontext ist die Rolle der Bakterien hervorzuheben, die sich überwiegend von abgestorbenem, organischem Material ernähren und somit die Grundlage für alle wichtigen Stoffkreisläufe im Boden bilden. (Gaube, 2006, S. 115 ff.)

Eine allumfassende Zusammenfassung über das Leben im Boden soll durch das nachfolgende Zitat verdeutlicht werden.

„Pflanzen, Tiere, Pilze und Mikroorganismen reinigen Wasser und Luft und sorgen für fruchtbare Böden. Intakte Selbstreinigungskräfte der Böden und Gewässer sind wichtig für die Gewinnung von Trinkwasser. Die natürliche Bodenfruchtbarkeit sorgt für gesunde Nahrungsmittel. Dies alles funktioniert nicht mechanisch, sondern läuft in einem komplexen Wirkungsgefüge ab. Ökosysteme verfügen über eine hohe Aufnahmekapazität und Regenerationsfähigkeit – aber sie sind nicht beliebig belastbar“. (Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt, 2007)

Ersichtlich wird daraus der Wert für die Menschheit, welche sozusagen als „unsichtbare“ Dienstleistung von der Umwelt bereitgestellt wird. Da diese Systeme im Boden hochkomplex sind, gelingt es der Forschung anhand von moderner molekularbiologischer, optoelektronischer und gentechnischer Verfahren erst seit den letzten Jahren weitere Erkenntnisse zu erzielen. (Boyd, 2006)

Anzahl der Individuen	Bodenorganismus	Biomasse
10.000.000.000.000	Bakterien	ca. 160 g/m ²
12.000.000.000	Pilze	ca. 380 g/m ²
1.000.000.000	Algen	ca. 90 g/m ²
600.000.000	Einzeller	ca. 115 g/m ²
1.800.000	Fadenwürmer	ca. 4 g/m ²
28.000	Springschwänze	ca. 11 g/m ²
18.000	Milben	ca. 10 g/m ²
10.000	Borstenwürmer	ca. 2 g/m ²
800	Käfer(-larven)	ca. 18 g/m ²
550	Tausendfüßer	ca. 20 g/m ²
320	Ameisen	ca. 2 g/m ²
300	Asseln	ca. 4 g/m ²
240	Fliegenlarven	ca. 26 g/m ²
230	Spinnen	ca. 2 g/m ²
130	Regenwürmer	ca. 145 g/m ²
50	Schnecken	ca. 25 g/m ²
Gesamtbiomasse ca. 1014 g/m ²		

Abbildung 13: Individuenzahlen und Biomasse der verschiedenen Bodenorganismen unter einer Bodenfläche eines Quadratmeters

(Quelle: Gaube, 2006, S. 115)

Wie anhand der Abbildung 13 zu sehen ist, können auf einem Quadratmeter eine schier unglaublich hohe Anzahl an Individuen verschiedenster Art zusammenleben und „funktionieren“. Was insgesamt etwa 1.014 Gramm pro Quadratmeter Boden ausmacht. Somit besitzt das Edaphon die größte Stellung bei den Umbau-, Abbau- und Neubildungsprozessen im Boden. Allerdings hängen die Lebensbedingungen von Bodenorganismen von zahlreichen Einfluss- und Belastungsfaktoren ab. Zu nennen wären hier die natürlichen Standortfaktoren wie Bodenfeuchte und -temperatur, Nährstoffangebote, der pH-Wert und die generelle Zusammensetzung des Edaphons. (Gaube, 2006, S. 115 ff.)

Dem gegenüber stehen allerdings die bereits erwähnten menschengemachten Belastungen in Form von Bodenverdichtungen, Schadstoffeintrag, unausgeglichene Nährstoff- und Energiezufuhr, Störung der Artengemeinschaft im

Ökosystem und einem Entzug der Lebensgrundlage durch Bodenversiegelung.

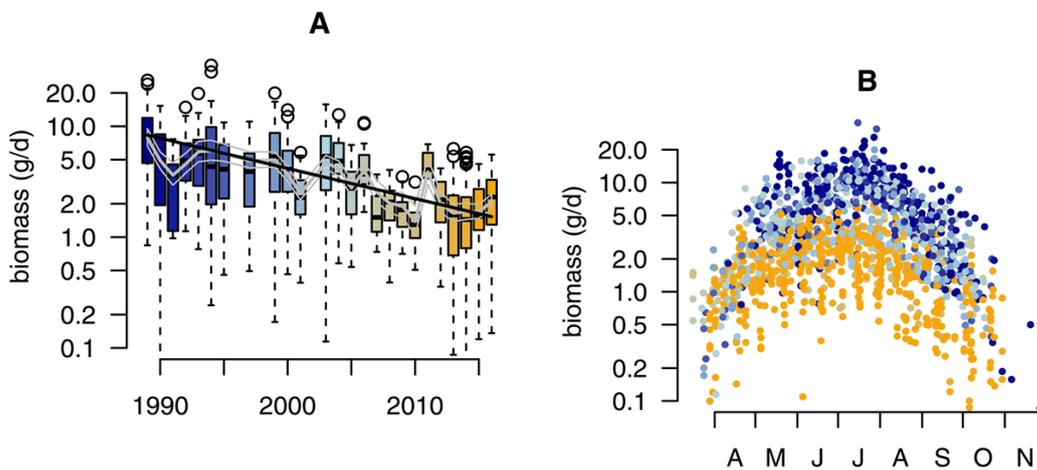


Abbildung 14: Abnahme der durchschnittlichen Biomasse in Gramm pro Tag

(Quelle: Dr. Trusch, 2019)

Auch Insekten fallen dem vermehrten Einsatz hochwirksamer Breitband Herbizide und Insektizide zum Opfer (Abbildung 14), welche den heimischen Vögeln, Säugern und anderen Tierarten die Nahrungsgrundlage entzieht. (Seibold et al. 2019, Hallmann et al. 2017)

Durch das Ausbleiben bestimmter Glieder in der Nahrungskette, kommt es zu einer Störung der Beziehungen zwischen den verschiedenen Lebewesen. Gleichzeitig nimmt der Schädlingsbefall zum Beispiel durch den Maikäfer bzw. Engerling, bedingt durch das gestörte Gleichgewicht, zu, was im Weiteren zu Aufwuchs- und Ernteschäden führen kann. Die Gründe dafür liegen in dem Verlust der Nahrungs- und Lebensgrundlagen seiner natürlichen Fressfeinde. (Lingenhöhl, 2018)

Wie bereits aus der Abbildung 14 ersichtlich wird, sinkt die biologische Aktivität des Bodens, was negative Auswirkungen für die Humifizierung hat und somit eine Verschlechterung der Stabilität und Bodenzusammensetzung mit sich bringt. Letztendlich trägt auch die Bodenerosion zur Verschlechterung der Bodenqualität bei, welche durch die drei vorherigen Punkte beschleunigt wird.

3.4 Erosion

Grundsätzlich ist Erosion ein auftretender Prozess in der Natur, indem mit Hilfe von Wasser und Wind, Bodenmaterial abträgt. Als natürliche Einflussfaktoren werden Niederschlag, Wind, Gefälle des Feldes und Erosionsanfälligkeit des Bodens betrachtet und bilden zusammen das potenzielle Erosionsrisiko. Erwähnenswert ist hierbei, dass bei einer natürlich ausgebildeten Pflanzendecke keine bedeutende Erosion auftritt. Somit kann den bewirtschaftungsbedingten Einflussfaktoren wie Bodenstruktur, angebaute Kultur bzw. Fruchtwechsel, Bedeckungsgrad und Bodenbearbeitung, die Hauptrolle zugewiesen werden. Das Zusammenspiel der beiden Einflussfaktoren beschreibt das tatsächliche Erosionsrisiko. Zusätzlich sind die Art der Bodenbearbeitung ausschlaggebend für das Erosionsrisiko ebenso wie die verstärkten Klimaveränderungen wie Trockenphasen und lokalen Starkregenereignissen. Als direkte Folge einer Bodenerosion (On-site) ist eine mittel- bis langfristige Verringerung der Bodenmächtigkeit der betroffenen Stellen (Abbildung 15) zu verzeichnen. Dadurch geht die nährstoffreiche und humushaltige Substanz des Oberbodens verloren und resultiert in geringeren landwirtschaftlichen Erträgen. Infolgedessen verliert der Boden auch viele natürliche Funktionen wie Wasserspeicherkapazität, Schadstofffilterung und -abbau sowie die Nährstoffspeicherung. Nach neuesten Erkenntnissen dauert es circa 100 Jahre, bis ein Zentimeter humoser Boden entsteht, der jedoch durch ein einziges starkes Gewitterereignis verloren gehen kann, wenn der Boden erosionsgefährdet ist. (Umweltbundesamt, 2022)

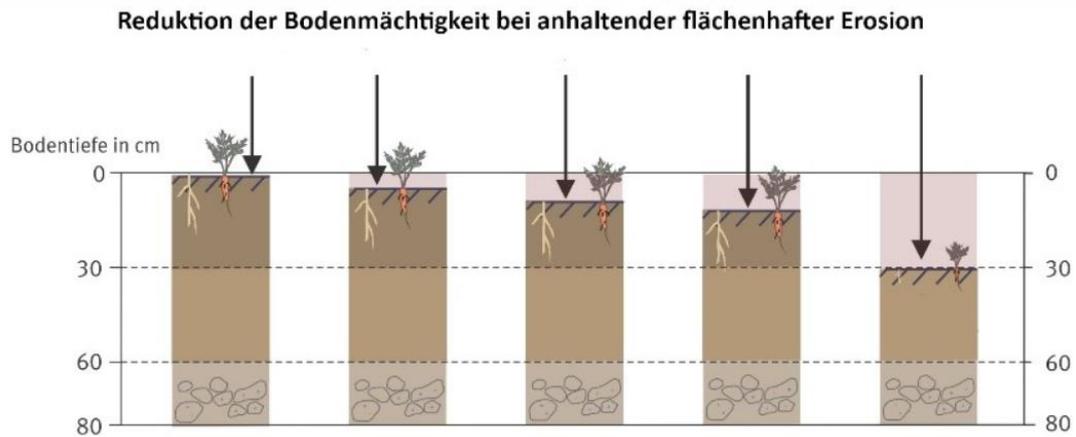


Abbildung 15: Reduktion der Bodenmächtigkeit bei anhaltender Erosion

(Quelle: Umweltbundesamt, 2022)

Ebenso kann durch Wasser und Wind abgelagertes Bodenmaterial am Unterhang oder in Senken und auch in benachbarte Land- und Gewässerökosystemen (Off-Site) angesammelt werden. So können durch diese Verschlümmungen und Überdeckungen der Pflanzen die Erträge gemindert werden. Gleichzeitig können an Bodenpartikel gebundene Nähr- und Schadstoffe in benachbarten Land- und Gewässerökosystemen zu einer Kontamination und Euthrophierung führen. Somit ist es von großer Wichtigkeit unsere Böden prophylaktisch vor schädlichen Veränderungen und Erosion zu bewahren, um zum einen das sensible Ökosystem (Gewässer) und zum anderen die Ernährungsgrundlage in Form landwirtschaftlich genutzter Fläche zu schützen. (Umweltbundesamt, 2022)

Schlussendlich wird die Erosion durch die erhöhte Bodendegradation, durch die Bodenverdichtung, der einhergehenden Minimierung des Bodenlebens und dem daraus resultierenden Humusschwund gefördert.

Trotz des Wissens um diese Risikofaktoren beharrt der Mensch stets auf den Gedanken, durch technische Erneuerungen eine Umkehr oder Verbesserung der Lebensgrundlage Boden zu erzielen. Sollte sich die Menschheit nicht eher an dem Leitgedanken des österreichischen Försters und Naturforschers Viktor

Schauberger orientieren „Natur kapieren und kopieren“, um nicht dasselbe Schicksal wie vergangene Hochkulturen zu erleiden?

Warum nicht also auf einen Naturstoff besinnen, der als Bindeglied zwischen toten und lebenden Stoffen im Boden fungiert?

Diese Aufgabe erfüllen in Böden die sogenannten Huminstoffe, auf die im Folgenden nun detailliert eingegangen wird.

4 Huminstoffe

Laut Ziechmann (1996) gehören Huminstoffe zur Stoffklasse „sui generis“. Hinsichtlich dieses Umstandes ist für ihre Einordnung in den Kanon der bekannten Naturstoffe wie auch für deren Beschreibung eine gesonderte Herangehensweise nötig. Huminstoffe sind uneinheitliche, höhermolekulare, gefärbte Naturstoffe mit aromatischen Strukturen.

4.1 Genese

Die Genese von Huminstoffen, auch als Humifizierungsprozess bekannt, wird im Zusammenspiel von Abbau-, Umwandlungs- und Neubildungsprozessen in Abhängigkeit von physikalischen, chemischen und biologischen Umständen gesteuert. Das fehlende Verständnis über die genaue Bildung von Huminstoffen bewirkt für dieses Themengebiet der Humuschemie Faszination und Raum für Hypothesen. Nach Erkenntnissen von Harald Seubert und Albrecht Behmel können sich sogar in einem frühen Stadium der Abiogenese Huminstoffe und verwandte Verbindungen aus kleinen anorganischen Grundbausteinen und deren Abkömmlingen bilden. Obwohl früher bereits bekannt war, dass eine Synthese von Huminstoffen aus autoxidierenden Hydrochinon möglich ist, brachte diese Erkenntnis eine neue Betrachtungsweise auf ihre Genese mit sich (Ziechmann, 1996, S. 14 ff.)

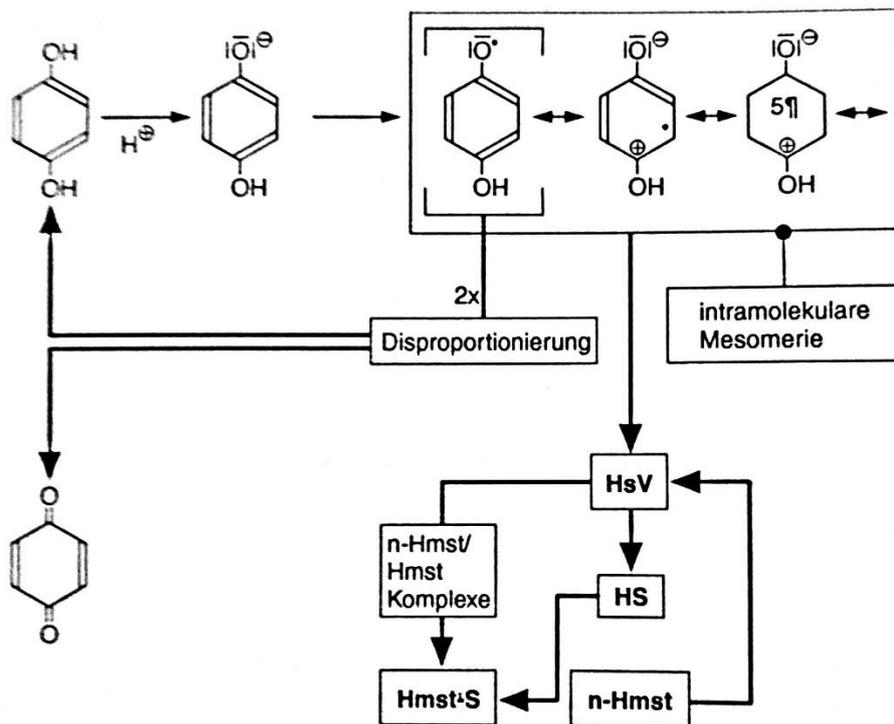


Abbildung 16: Autoxidation von Hydrochinon

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 14)

Nichtsdestotrotz wird man Huminstoffe als typische Ressource der Böden ansehen, da sie dort ihren primären Genese- und Wirkungsort finden.

Die meist nebeneinander ablaufenden Teilreaktionen werden in den nachfolgenden Absätzen allgemein erklärt.

4.1.1 Maillard Reaktion

Diese nicht-enzymatische Bräunungsreaktion, welche nach dem französischen Chemiker Louis Camille Maillard benannt ist, kann beispielsweise beim Frittieren und Braten von Lebensmitteln beobachtet werden. Die Umsetzung von reduzierenden Zuckern mit Aminosäuren, Peptiden oder Proteinen unter energetischen Bedingungen führt zu einer Vielzahl verschiedenster Verbindungen. Die „Maillard-Reaktion“ läuft nach gesicherten Erkenntnissen in zwei Phasen ab:

In der ersten Phase entstehen aus den Kohlenhydraten außerordentliche reaktive, polyfunktionelle Zwischenstufen (radikalische Zwischenstufen in der Radikalphase), welche zu huminstoffartigen, braunen, höhermolekularen Produkten führen, sogenannte Melanoidine. (Ouni et al., 2014)

In der zweiten Phase können die unterschiedlichsten Folgereaktionen eintreten, welche von Variablen wie Temperatur, Garzeit, Wassergehalt, pH-Wert sowie Art und Menge der Aminosäuren und Zuckermoleküle abhängig sind. So können anhand dieser Prozedur Aspekte für die Genese von Huminstoffen aus nichtaromatischen Ausgangsstoffen hergeleitet werden. (Ouni et al., 2014)

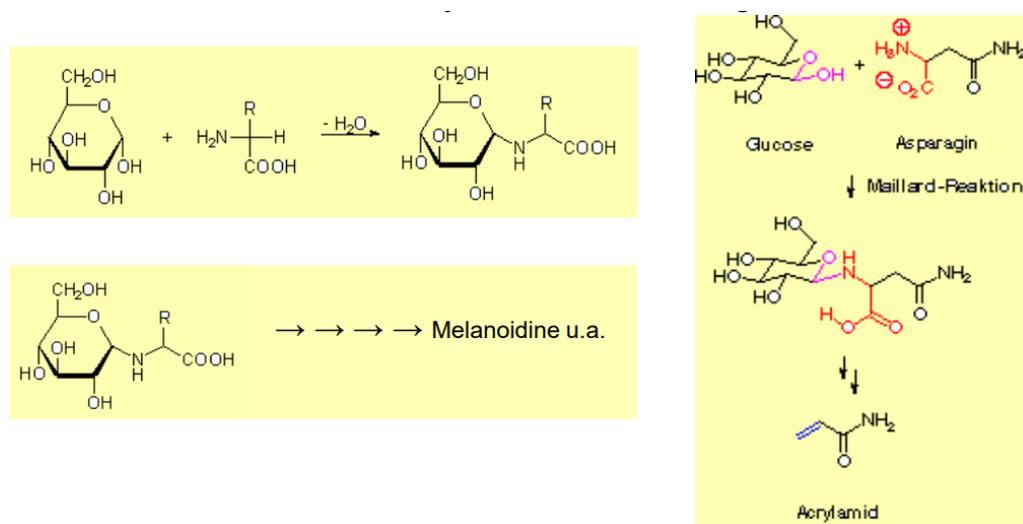


Abbildung 17: Abläufe bei der Maillard Reaktion

(Quelle: Matzner, 2017, S.45)

4.1.2 Autoxidation von Polyphenolen

Bei gewissen Phenolen ereignet sich in alkalischer Lösung und Kombination von Sauerstoff eine Autoxidation, welche als Resultat die Bildung von intensiv braunefärbten unterschiedlichen Substanzen zur Folge hat. Für diesen Prozess werden Radikale benötigt, welche auch bei der Genese der Huminstoffe zugegen sind. Nun werden durch reaktionsfähige Huminsäurevorstufen auch Nichthuminstoffe in die Huminstoffmatrix eingegliedert. So finden sich in der anfänglichen Bildungsphase zahlreiche Beweise für die Existenz von stabilen Huminstoff-, als auch Nichthuminstoffkomplexen. Durch die Präsenz von

zwischenmolekularen Wechselwirkungen (Wasserstoffbrückenbindungen, e-Donor Akzeptor Beziehungen) in den einzelnen Fraktionen wird die Phase der Huminstoffbildung abgeschlossen. Als Ausgangsmaterial fungieren Lignin oder Cellulose und Nicht-Lignin Substanzen (Stevenson, 1994).

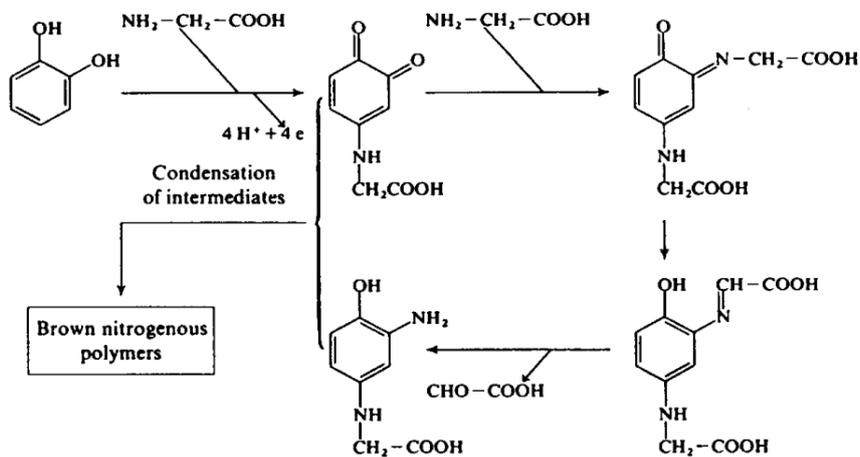


Abbildung 18: Autoxidation von Polyphenolen

(Quelle: Matzner, 2017, S.42)

4.1.3 Lignintheorie (Lignin-Protein-Theorie)

Die von Waksman (1936) aufgestellte Lignin-Theorie galt lange Zeit als einziger Bildungsweg bei der Huminstoffgenese. Dieser Theorie zufolge wird durch spezielle Mikroorganismen Lignin nur unvollständig abgebaut. Diese Modifikation von Lignin umfasst den Verlust von Methoxyl (OCH₃) -Gruppen mit der Erzeugung von o-Hydroxyphenolen und die Oxidation von aliphatischen Seitenketten zur Bildung von COOH-Gruppen. Im zweiten Teil dieser Theorie werden wieder Lignine als Ausgangsstoff zu sogenannten Chinonen umgebaut. (Waksman, 1936)

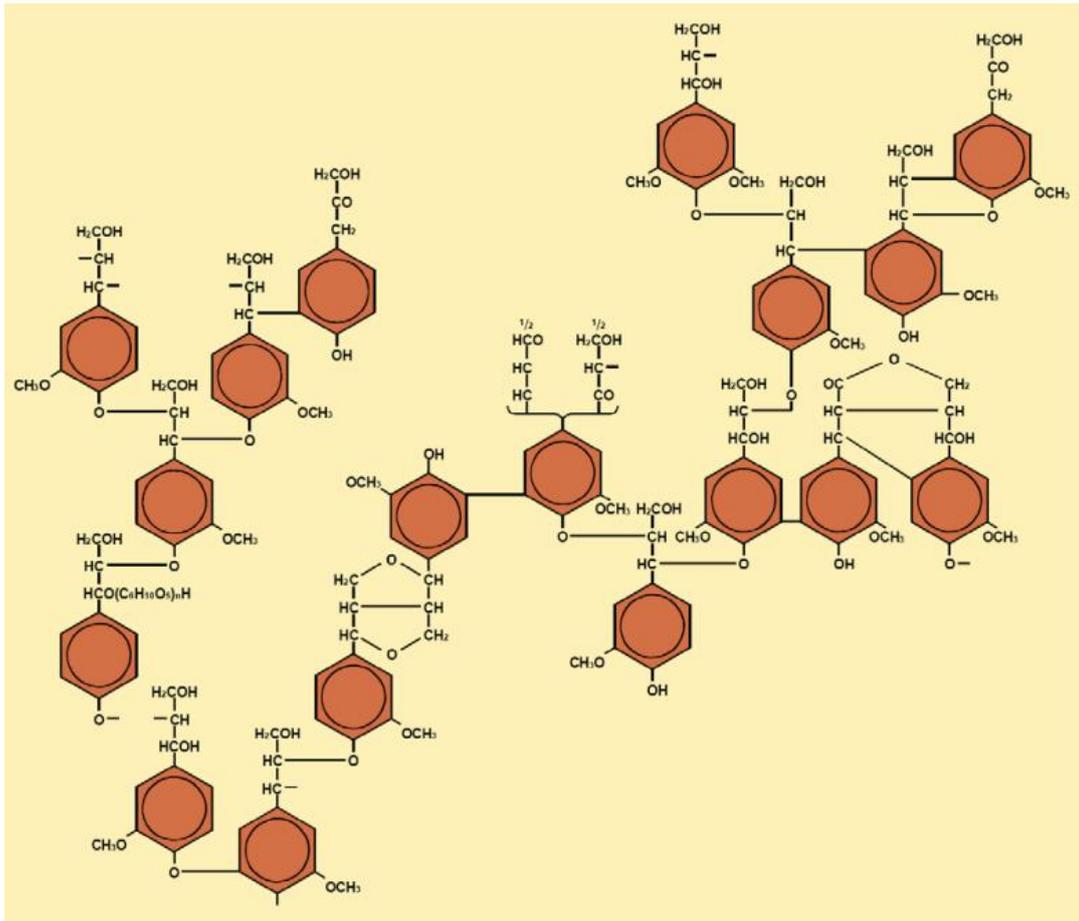


Abbildung 19: Hypothetische Struktur Lignin PAUL (2007)

(Quelle: Matzner, 2017, S. 26)

Waksman (1936) nahm daher an, dass Huminstoffe ein und dasselbe wie modifizierte Lignine sind. Die folgenden Beweise wurden von Waksman zur Unterstützung der Lignin-Theorie bei der Huminstoffbildung zitiert:

- Erhebliche Schwierigkeiten beim Abbau durch Pilze und Bakterien
- Sowohl Lignin als auch Huminsäure sind teilweise in Alkohol und Pyridin löslich.
- Alkalilöslich und ausgefällt durch Säuren
- Beide OCH₃- Gruppen
- Lignine haben ähnliche Eigenschaften wie Huminsäuren

4.2 Modellsysteme

Im nachfolgenden werden zwei Modelle als Musterreaktionen angeführt, welche aber nicht als exakte Huminstoffbildungsmechanismen verstanden werden sollten. Diese geben jedoch wesentliche Aspekte in Bezug auf den Entstehungsprozess wieder.

4.2.1 Modellhypothese nach Ziechmann

Eine Beschreibung des vielfältigen Entstehungsprozesses kann mit nachfolgendem Modell (Ziechmann, 1996) veranschaulicht werden.

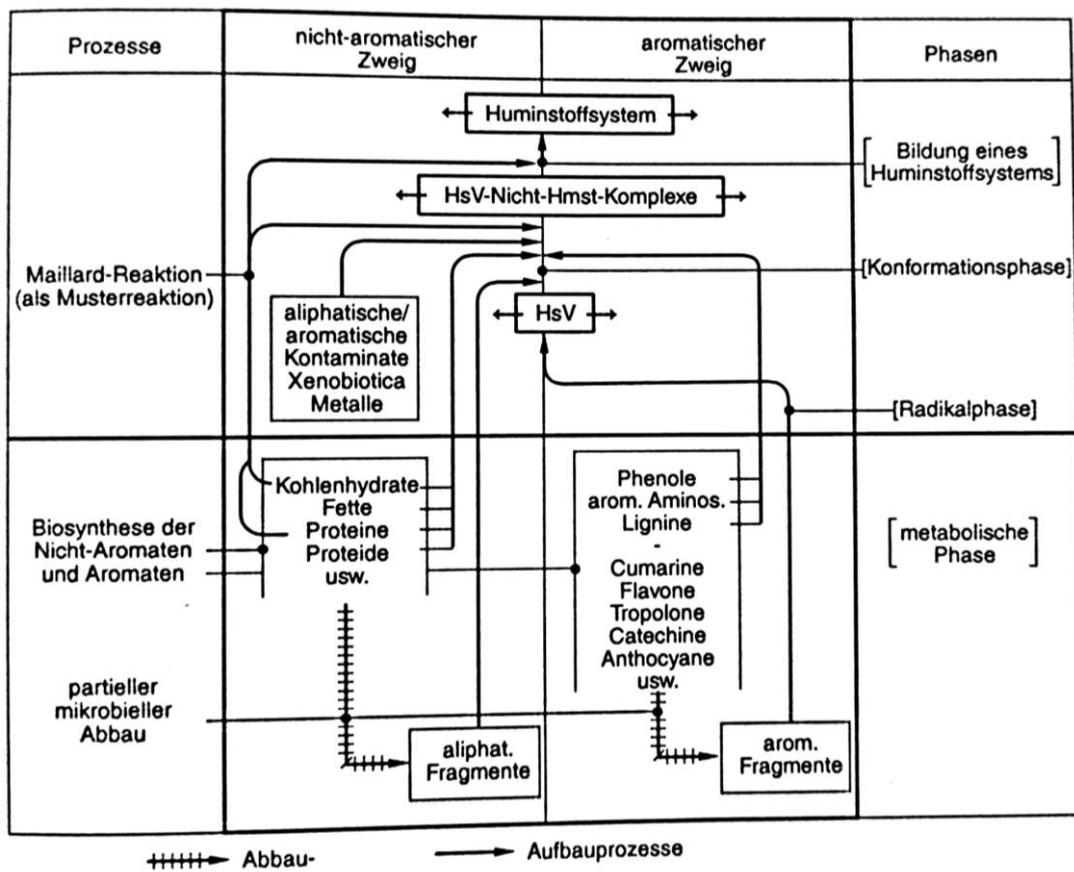


Abbildung 20: Huminstoffgenesemodell nach Ziechmann (1996)

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 15)

Die Huminstoffgenese lässt sich in vier unterschiedliche Phasen unterteilen, welche allesamt für die annähernde Beschreibung der Huminstoffgenese von Bedeutung sind.

Phase 1: Metabolische Phase

In der metabolischen Phase erfolgt nach der Biosynthese der aromatischen und nichtaromatischen Verbindungen sogleich deren partieller mikrobieller Abbau. In dieser Phase finden biochemische Grundprozesse statt, welche enzymgesteuert und von den Bodengegebenheiten abhängig sind.

Ergänzend muss gesagt werden, dass lebende Organismen zwar keine direkten Huminstoffproduzenten sind, sondern lediglich über ihren Stoffwechsel die notwendigen Ausgangsstoffe bereitstellen („precursor“). (Ziechmann, 1996, S. 14 ff.)

Phase 2: Phase der einsetzenden Radikalbildung

Die Huminstoffsynthese wird durch den Initialschritt über die „Radikalphase“ gestartet. Besonders die bereits im Vorfeld entstandenen Naturstofffragmente aus Lignin und mehrwertigen Phenolen aus der vorgelagerten metabolischen Phase, eignen sich im hohen Maße für die einsetzende Radikalphase. Durch ihre elektrophil angreifbare „Oberfläche“ können diese leicht mit den im Boden vorliegenden Fe^{3+} - Ionen Radikale bilden und begünstigen so die radikalisch verlaufende Huminstoffsynthese und formen Huminsäurevorstufen (HsV) aus.

Anders als bei der Bildung von makromolekularen Stoffen, findet man in den Endprodukten der Huminstoffe einen dauerhaften Vorrat an Radikalen. Dies zeichnet sie als außergewöhnliche Stoffklasse mit immerwährender Reaktionsbereitschaft aus, die in den nachfolgenden Kapiteln genauer betrachtet wird. (Ziechmann, 1996, S. 14 ff.)

Laut Ziechmann (1996) wird diese zweite Phase als Radikalphase bezeichnet und erweckt den Anschein, dass nur in diesem Abschnitt Radikale zur Genese beitragen. Da aber im gesamten Verlauf Radikale vorhanden sind, ist die Umbenennung der Phase 2 zur „Phase der einsetzenden Radikalbildung“ besser geeignet.

Phase 3: Konformationsphase

Mit dieser beeindruckenden Huminstoffspezies kommt es in der sogenannten Konformationsphase zu einer bedeutenden Transformation, da jetzt auch Nicht-Huminstoffe via Huminsäurevorstufen (HsV) in den Humifizierungsprozess durch die stark reaktiven Radikale importiert werden. Als Folge dieser Transformation entstehen die leicht im Boden nachweisbaren Nichthuminstoff-/Huminstoffkomplexe. (Ziechmann, 1996, S. 14 ff.)

Phase 4: Abschließende Phase

Schlussendlich wird mit der Konstituierung eines Huminstoffsystems in der vierten Phase der natürliche Endstatus dieses Naturstoffes erreicht.

Dieses erläuterte Schema dient als wichtige Erklärung des außergewöhnlichen Reaktionsvermögens der Zwischenstufen, die aufzeigen, dass jeder einzelne Partikel mit jedem anderen Partikel zu reagieren vermag. Dies hat zwangsläufig zur Folge, dass weder ein linear verlaufender Reaktionsablauf noch eine definierbare chemische Konstitution für den Naturstoff Huminstoffe am Ende stehen. (Ziechmann, 1996, S. 14 ff.)

Diese dauerhafte Präsenz von Radikalen in Huminstoffen lässt kein exaktes Reaktionsende der Humifizierung zu.

4.2.2 Modellhypothese nach Weber

Laut Jerzy Weber (1999) kann die Huminstoffgenese anhand von vier Bildungswegen beschrieben werden, die mit der folgenden Grafik verdeutlicht werden.

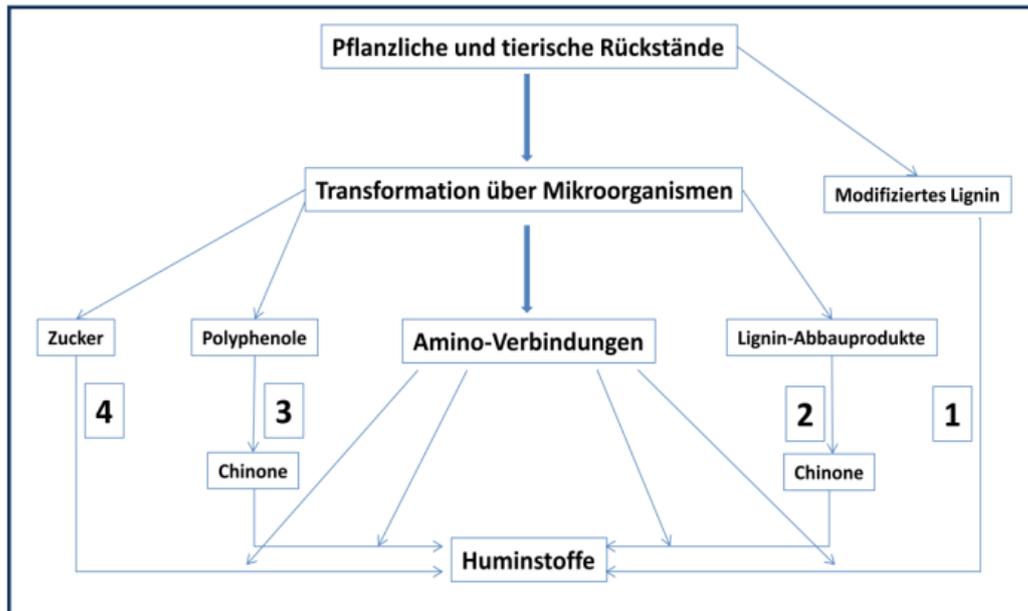


Abbildung 21: Mechanismus für die Bildung von Huminstoffen modifiziert nach Stevenson (1985)

(Quelle: Rocker, 2011, S. 4)

1. Bildungsweg:

Nach Weber tritt dieser 1. Bildungsweg vor allem in feuchten Böden und Mooren auf. Angelehnt an die Theorie von Waksman (1932), nach der Huminstoffe als modifizierte Lignine gelten, erweiterte Stevenson dessen Theorie. Dieser Huminstoffgenesetheorie zufolge wird das nur unvollständig abgebaute Lignin aus abgestorbenen Pflanzen erst später modifiziert. Bei der Modifizierung treten zum einen eine Demethylierung der einzelnen Ligninbestandteile und zum anderen eine Oxidation der Seitenketten der „Lignin-Monomere“ auf. Diese enthalten zwar noch die einzelnen Komponenten des Lignins (z.B. Coniferylalkohol und Sinapylalkohol), nicht aber das in den Huminstoffmolekülen enthaltenden Stickstoffatome. Dessen Vorkommen kann über Kondensationsreaktionen von Ligninmolekülen mit Proteinen erklärt werden. Anhand von weiterführenden Untersuchungen von Mattson und Koutler-Andersson (1942), konnte der Beweis erbracht werden, da Lignin mit NH₂-Gruppen reagiert, womit die Präsenz von Stickstoffatomen in den Ringstrukturen erklärt werden kann. (Weber, 1999)

2. Bildungsweg:

Beim zweiten Bildungsweg trägt Lignin wieder eine tragende Rolle. Mikroorganismen setzen phenolische Aldehyde und Säuren frei, welche nach enzymatischer Einwirkung in Chinone umgewandelt werden. Unter dem Einfluss von Aminoverbindungen polymerisieren diese zu huminstoffähnlichen Makromolekülen. (Weber, 1999)

3. Bildungsweg:

Zusammen mit dem zweiten Bildungsweg spricht man hier von der Polyphenoltheorie. Die Synthese der enzymatisch gebildeten Polyphenole erfolgt in diesem Bildungsweg nicht aus Lignin, sondern Mikroorganismen bedienen sich anderer Kohlenstoffquellen wie z.B. Zellulose. (Abbildung 21) (Weber, 1999)

4. Bildungsweg:

Maillard Reaktion Zucker-Amin-Kondensation

Im ersten Schritt kommt es zur Ausbildung einer Schiff'schen Base zwischen dem Aminstickstoff einer Aminosäure und der Aldehyd- oder Ketofunktion des Zuckers (Gagosian, 1978). Durch Umlagerungen, Cyclisierungen, Decarboxylierungen und Polymerisierungen entsteht ein Gemisch aus stickstoffhaltigen braunen Makromolekülen auch Melanoidine genannt, weswegen jener Reaktionsweg auch als Melanoidinhypothese bezeichnet wird. Dieser Genesemechanismus zeichnet sich durch eine vollkommene Abstinenz von Lignin aus und findet daher meist in marinen Systemen statt (Abbildung 21). (Weber, 1999)

Nach der Erläuterung der Genesemodelle von Ziechmann und Weber soll nun auf die Struktur der Huminstoffe eingegangen werden.

4.3 Struktur der Huminstoffe

Huminstoffe sind braun gefärbte, höher- bis hochmolekulare Verbindungen, die sich aus chemisch unterscheidbaren Fraktionen zusammensetzen. Es

leuchtet ein, dass aufgrund ihrer Eigenart in ihrer Genese keine chemische Konstitution im Kontext der niedermolekularen Chemie definiert werden kann. Im Prinzip können Huminstoffe so viele Strukturen aufweisen wie Partikel involviert sind. (Ziechmann, 1996, S. 18 f.) Eine exakte Aufstellung einer Konstitutionsformel käme also einer Sisyphos Arbeit gleich.

Ziechmann (1996) versuchte eine Zuordnung und Differenzierung dieser höhermolekularen Naturstoffe anhand von drei strukturbestimmenden Parametern darzulegen.

1. Der Aufbau der Grundeinheiten (G) kann aus homogenen (ho) oder heterogenen (he) Varianten erfolgen.
2. Die Bindungsform (B) zwischen den Grundeinheiten (G) kann nun ebenfalls homogene (ho) oder heterogene (he) Formen aufweisen.
3. Durch die vorhergegangene Differenzierung können diese fraglichen Substrate (S) nun als niedermolekular (nm) oder hochmolekular (hm) klassifiziert werden. (Ziechmann, 1996, S.19 f.)

Kriterien		Parameter	Varianten	Qualität
Bausteine	□	Ⓔ	(□-□-□)	homogen (ho)
	x		(x-x...x...x)	
Bindung	o	Ⓑ	(o-x...x)	heterogen (he)
	-		(x-□...o)	
	:-			
Teilchengröße	...	Ⓕ	-o-o-o-o-	homogen (ho)
	< >		-o-o-□-x-	
	< >		...x...□...x...x...	heterogen (he)
	< >		...□-□-x...o...	
	< >		...x...□...x-x...	
		Ⓖ	<□-□>	niedermolekular (nm)
			<o...o-□>	
			<x...o>	
			<-□-□-o...x...o-->	hochmolekular (hm)
			<--x-o-□-x...□...>	

Abbildung 22: Varianten der Parameter Grundeinheit, Baustein und Substrat

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 20)

Die Raumachsen G, B, S ermöglichen, dass die Positionen einiger höhermolekularen Naturstoffe vergleichsweise adäquat angegeben und deren Abweichungen zwischen ihren räumlichen Strukturen dargelegt werden können. (Ziechmann, 1996, S. 20)

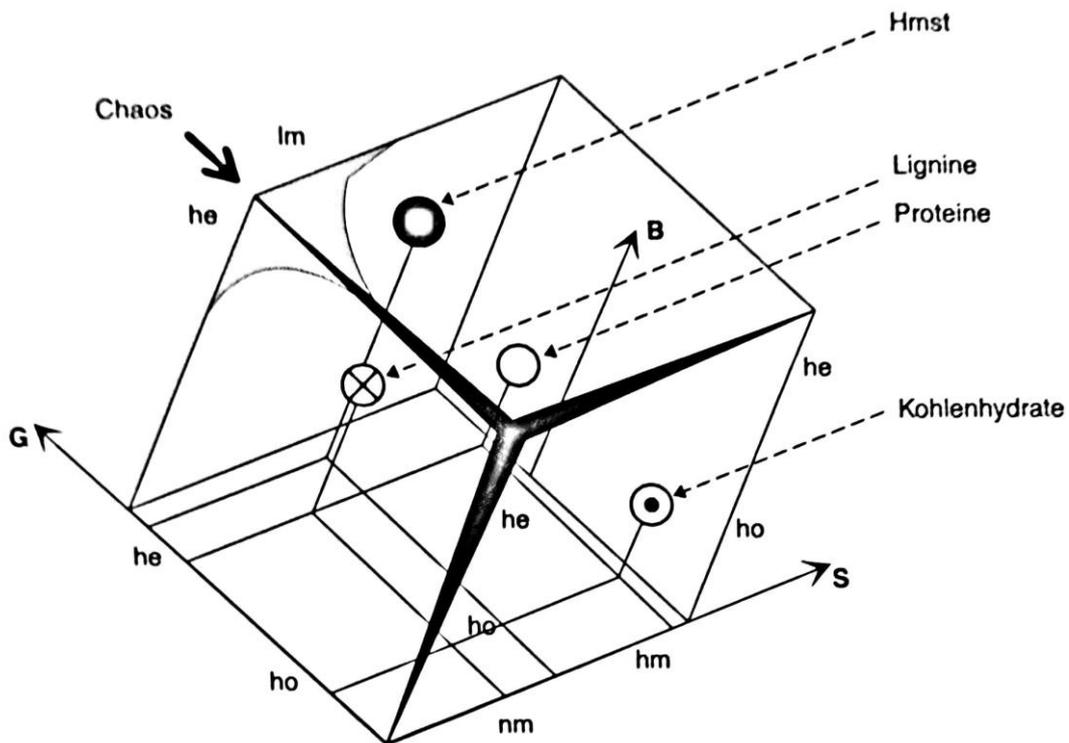


Abbildung 23: Strukturchemische Stellung einiger höhermolekularer Naturstoffe

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 21)

Ihre Sonderstellung wird strukturchemisch betrachtet gegenüber Kohlenhydraten und Proteinen deutlich und ist allenfalls mit Lignin vergleichbar. In der metabolischen Phase (laut Ziechmann 1. Phase der Huminstoffgenese) werden die postmortalen Substanzen im Großen und Ganzen auf biologischen Weg enzymgesteuert aufgespalten. Hier herrscht eine geordnete und strukturierte Chemie, die durch die Energie- und Stoffaufnahme der Organismen und deren Metaboliten vorhersehbar und nachverfolgbar ist. Mit der einsetzenden Radikalbildung geht die Huminstoffsynthese in eine unregelmäßige Chemie über, in der reaktionssteuernde Enzyme ihre Bedeutung verlieren. Infolgedessen treten durch radikale unüberschaubare Reaktionskaskaden in Verbindung mit den schier unendlichen Ausgangsstoffen (Naturstoffe und deren metabolisierte Fragmente) auf, die zu unvorhergesehenen Molekülstrukturen führen. Somit gibt es bei Huminstoffen keinen geordneten Chemismus mit nachvollziehbarer Reaktionsabfolge und man spricht daher vom chemischen Chaos.

Erschwerend kommt hinzu, dass durch sich stets ändernde Umgebungsparameter sehr viele unterschiedliche Makromoleküle entstehen können, diese aber kaum identisch sind. (Ziechmann, 1996, S. 18 ff.)

4.3.1 Huminstoffmodell als ein System verschiedener Molekularstrukturen von Ziechmann

Ziechmann (1996) sieht die Molekularstruktur mit einem im Kern hochkondensierter Aromatizität in eine auslaufende offene Peripherie. Als Darstellung dienen kugelförmige Binnenstrukturen und funktionelle Gruppen, welche wiederum als Randgruppen mit anderen Binnenstrukturen und sogar Nicht-Huminstoffen verbunden sind.

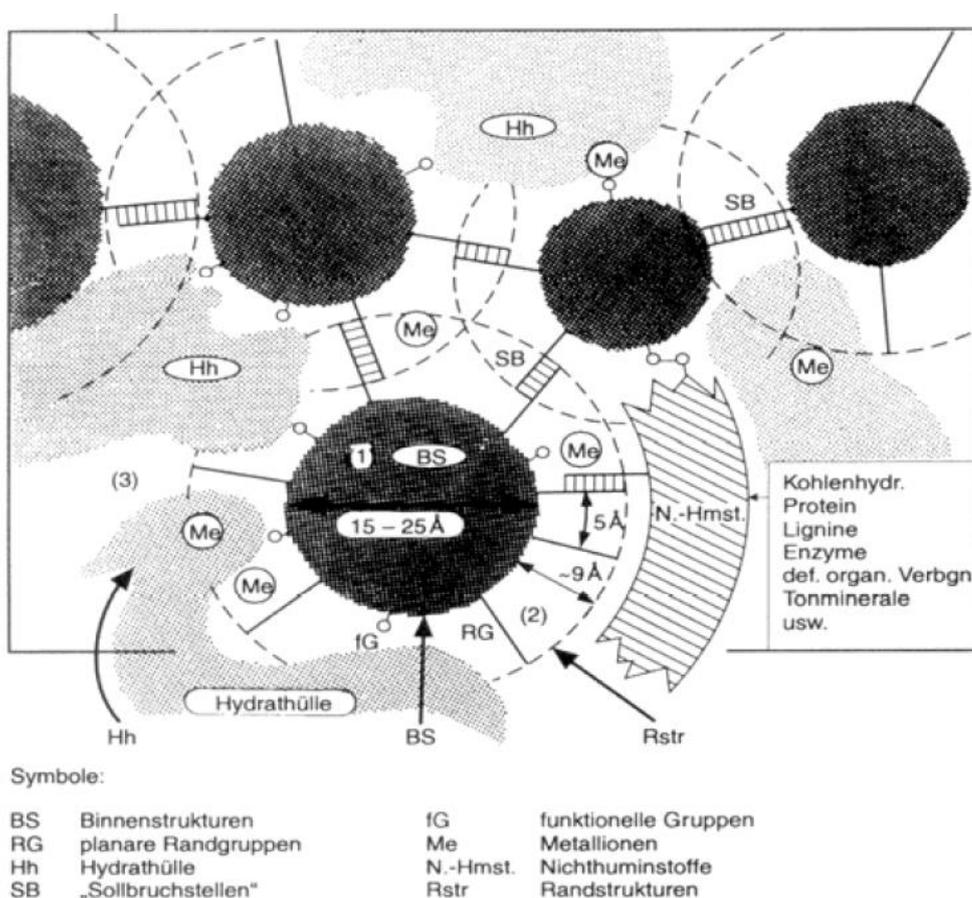


Abbildung 24: Strukturmuster eines Huminstoffsystems

(Quelle: Ziechmann, 1996, S.22)

Für die oben genannten Binnenstrukturen können als Durchmesser röntgenographisch 15-25 Å (Å entspricht 10^{-10}m) angenommen werden. Die Grundeinheiten werden über verschiedene Kovalenzen wie e-Donator Akzeptor Beziehungen und van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten. Auch sind sogenannte „Sollbruchstellen“ in diesem System integriert, die zwar bei Angriffen geöffnet, aber in ihren Binnenstrukturen nicht beschädigt werden. Um das Bindungsgeflecht von Nichthuminstoff/Huminstoff-Komplexen zu komplettieren, werden Metalle, nieder- und höhermolekulare Verbindungen sowie Wasser in das System integriert. (Ziechmann, 1996, S. 23)

Dieser Komplex ermöglicht, dass das hohe Reaktionspotential und deren Einfluss auf ihr chemisch physikalisches Umfeld nachvollzogen werden kann.

4.3.2 Strukturhypothese nach Kleinhempel

Anstatt eine universelle und exakte Strukturformel für Huminstoffe zu finden, ist es zweckmäßiger sich den komplexen Molekülstrukturen über ein grobes Raster wie Kleinhempel offeriert, anzunähern. (Eifler, 2005, S. 12 f.)

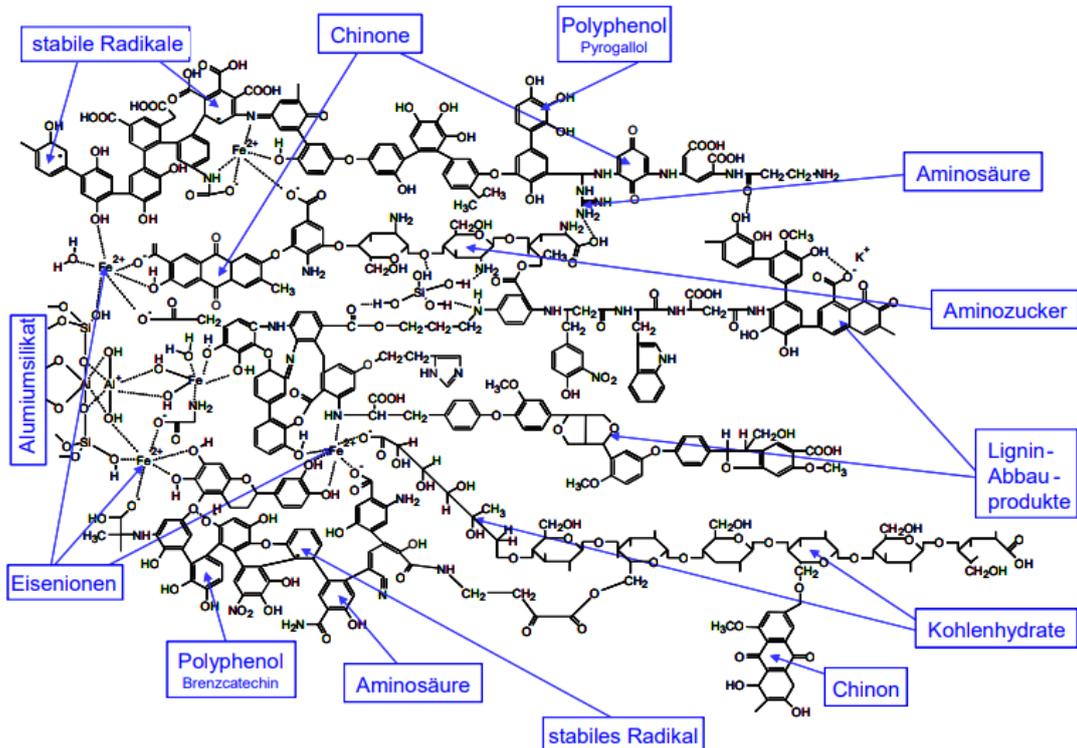


Abbildung 25: Strukturmodell von Huminstoffen nach Kleinhempel (1970)

(Quelle: Steinberg & Menzel, 2008, S. 4)

Die Abbildung 25 zeigt die schwer ersichtliche und verwirrende molekulare Strukturhypothese, die im besonderen Maße den Einbau von Metall- und Schwermetallkationen durch Komplexierung in das Huminstoffmolekül unter Berücksichtigung verschiedener Liganden verdeutlicht. Diese Atome oder Moleküle übernehmen eine Koordination an ein zentrales Metall-Ion, indem sie eine dative Bindung (koordinative Bindung) eingehen. Ebenso sind die Funktionsmerkmale wie Carboxyl- und Phenolgruppen zu lokalisieren, welche für die Wasserlöslichkeit der Huminstoffe hauptsächlich verantwortlich sind. (Eifler, 2005, S. 12 f.) Obwohl dieses Modell zwar die hochkomplexe Molekularstruktur wiedergibt, ist es als unübersichtlich und ungeordnet anzusehen.

4.3.3 Strukturhypothese nach Haworth

Der Chemiker Robert Downs Haworth (1971) priorisierte eine andere Herangehensweise die mehr auf chemisch funktionell unterscheidbare Strukturbereiche setzt.

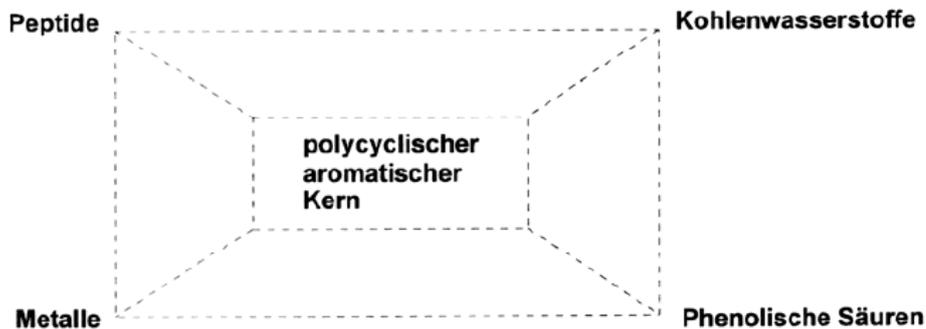


Abbildung 26: Modellstruktur nach Haworth

(Quelle: Harms, 2005, S. 28)

Mit einem simplen Blockschema reduziert Hayworth die vielschichtigen und komplexen Molekularstrukturen der Huminstoffe, die von einem chemisch verdichteten stabilen aromatischen Kern ausgehen, der von anderen Molekülen umlagert wird. (Harms, 2005, S. 28)

Obwohl die Modelle von Kleinhempel und Hayworth konträr verhaltende Sichtweisen der einzelnen Modelle aufzeigen, können diese zusammen eine dualistische Interpretation der Huminstoffstruktur darstellen.

4.4 Das Zentrum hochverdichteter Vernetzung und hochkondensierter Aromatizität

Die Binnenstrukturen werden größtenteils von Aromaten geprägt, die sich von außen nach innen zu einem Zentrum hochkondensierter Aromatizität und hoher Vernetzung konzentrieren. Der weitgehend chemisch inerte und stabile Kern der Huminstoffe kann chemisch nur noch mithilfe von Oxidation gebrochen werden, was ihn als dauerhaften Träger des gesamten

Huminstoffsystems auszeichnet. Dieses Zentrum hat sich strukturmolekular im Allgemeinen so verändert, dass dort kaum noch Strukturelemente zu erkennen sind, die biogene Ausgangsstoffe erahnen lassen. (Harms, 2005, S. 28)

Nach der Betrachtung des Zentrums hoch verdichteter Vernetzung soll nun im Folgenden die offene Peripherie dargestellt werden.

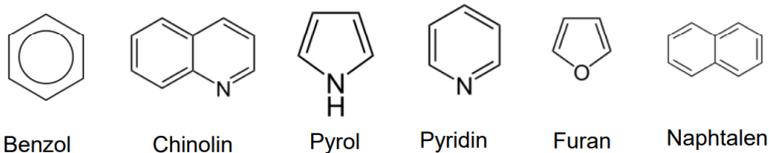
4.5 Offene Peripherie

Ausgehend vom stabilen Zentrum hin zum sich auflockernden äußeren Bereich der Peripheriestruktur, treten hauptsächlich ligninähnliche phenolische und chinonhaltige Gefüge und aliphatische Ketten auf. Diese sind z.B. über -C-C-, -C-O-C-, -C-N-C- und -COC-N-C- Bindungen miteinander verbunden. Des Weiteren lassen sich auch die biogenen Ausgangsstoffe, welche am Umsetzungs- und Aufbauprozess beteiligt sind, noch gut in der Huminstoffperipherie erkennen. (Harms, 2005, S. 28 f.)

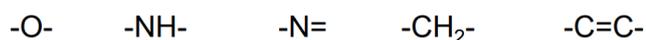
Zu nennen wären hier beispielsweise:

Chinon-, Furan-, Pyran-, Pyrrol-, Indol-, Pyrimidin-, Purin-, Phenazin-, Lignin-Cellulose- und Fettsäureesterstrukturen (Harms, 2005, S. 28 f.)

Bausteine von Huminstoffen: Aromatische Verbindungen = Kerne



Bausteine von Huminstoffen: Brücken



Bausteine von Huminstoffen: Funktionelle Gruppen



Abbildung 27: Bausteine der Huminstoffe

(Quelle: Matzner, 2017, S.37)

Im Gegensatz zum inerten Kern ist die offene Peripherie geprägt von intensiven chemischen Reaktionen mit ihrer Umwelt. (Harms, 2005, S. 28)

Radikale lassen sich mit bis zu 10^{17} – 10^{18} Spins pro Gramm in Huminstoffen nachweisen, was sie die facettenreichsten Reaktionen einleiten lässt. (Harms, 2005, S. 29)

„Der Spin ist eine quantenmechanische, intrinsische Eigenschaft von Teilchen. In Raum-Zeit-Berechnungen zeigt der Spin ähnliche Symmetrie wie ein mechanischer Drehimpuls und wird deswegen in Analogie so benannt, auch wenn er sich nicht in einer Bewegung manifestiert. Teilchen mit einem halbzahligen Spin heißen Fermionen, Teilchen mit ganzzahligem Spin Bosonen.“ (Nicolay, 2015)

4.6 Charakterisierung der funktionellen Gruppen und ihre variable Akzessibilität

Eine weitere Kennzeichnung der Huminstoffe sind deren biogene funktionelle Gruppen, welche die chemischen Eigenschaften der Huminstoffe bestimmen und in Abbildung 28 dargestellt sind.

<i>Wichtige funktionelle Gruppen von HS und ihre Wirkungen</i>			
<i>Funktionelle Gr.</i>		<i>Wichtigste Herkunft</i>	<i>Wirkung</i>
-OH	Hydroxyl (Phenol)	Phenole, Lignin	Säure
-OH	Hydroxyl (Alkohol)	Alkohole, Coniferylalkohol (Stoffwechselprodukte)	Komplexbildung, H-Brückenbildung
-COOH	Carboxyl	Carbonsäure, Aminosäuren, (meist Oxidationsprodukte von Kohlenhydraten und ähnl. Verbindungen)	Säure
=C=O	Carbonyl (Chinon)	Oxidation von Phenolen	Komplexbildung, H-Brückenbildung
R-O-R	Ether	Kohlenhydrate, Lignine	
-OCH ₃	Methoxyl	Lignine	
-NH ₂	Amino	Aminosäuren, Aminozucker, Proteine	Komplexbildung, Base, H-Brückenbildung
Heterocyclischer N		Heterocyclen, Melanine	Komplexbildung, Base, H-Brückenbildung

Abbildung 28: funktionelle Gruppen der Huminstoffe

(Quelle: Eifler, 2005, S. 9)

Huminstoffe verhalten sich aufgrund Carboxylgruppen und freien phenolischen Hydroxygruppen wie polyvalente schwache organische Polysäuren. Dadurch erklärt sich die Bezeichnung von Huminsäuren und Fulvinsäuren, die aufgrund ihrer beweglichen Wasserstoffionen die Eigenschaft der Kationenaustauschkapazität besitzen. Andererseits erlangen die Huminstoffe, dank ihrer eingebauten Amino- und Iminogruppen auch basische Eigenschaften, die bei Übereinstimmung mit niedrigen pH-Werten auch als Anionentauscher fungieren können. Näherungsweise haben Huminstoffe wegen ihrer sauer und basischer funktioneller Gruppen den Charakter von Polyampholyten (Polyelektrolyten). Allerdings reichen die Anzahl und Anordnung der Ladungen nicht aus, um die hydrophob voluminös vernetzten makromolekularen Huminstoffe gänzlich in eine wässrige Lösung zu überführen. (Harms, 2005, S. 29 f.)

In Anbetracht ihrer vielen funktionellen Gruppen und speziell der Positionierung ihrer freien Elektronenpaare der Sauerstoff- und Stickstoffatome können

diese Gruppen eine Ligandenfunktion für die Komplexbildung einnehmen. Zu erwähnen ist, dass die Anzahl der vorhandenen funktionellen Gruppen nicht mit der Zahl der zugänglichen und wirksamen funktionellen Gruppen übereinstimmt. So wird beispielsweise nach Entfernung eines Teiles der hydrophoben Huminstofffraktion mit unpolaren Lösungsmitteln eine Freilegung der bis dahin noch verdeckt hydrophoben natronlaugelöslichen Huminstoffanteile vollzogen und so für Natronlauge zugänglich gemacht. In einem Experiment erfolgte vorab eine Extraktion der lipophilen Fraktionen und führte durch eine weitere Extraktion mit 0,5% NaOH zu einer höheren Huminstoffausbeute als dies ohne vorherige Extraktion lipophiler Fraktionen stattgefunden hat. Dies führte zu einer Erhöhung der Akzessibilität von Huminstoffen für NaOH. Eine Streckung der verschiedenen Bereiche der Huminstoffmoleküle bewirkt über die elektrostatische Abstoßung der vielen Carboxylatgruppen deren Aufrechterhaltung. Gleichzeitig wird durch eine Absenkung des pH-Wertes Carboxylatgruppen protoniert (Anlagerung von Protonen) und somit zu Carboxylgruppen neutralisiert. Dies bewirkt in der Folge eine Aufhebung der elektrostatischen Abstoßung. (Harms, 2005, S. 30 f.)

Durch die Ausbildung von intra- und intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen nähern sich diese an die zuvor auseinandergehaltenen Strukturbereiche so an, dass zusätzlich van-der-Waals-Kräfte intra- und intermolekular wirksam werden. Dies resultiert in Faltungen und Kräuselungen der Molekularbereiche und vermindert dadurch die sterische Akzessibilität der funktionellen Gruppen der Huminstoffe. Ebenso kann über die Variation des pH-Wertes in wässriger Lösung eine Mizellenstrukturausbildung erfolgen, welche wiederum die Zugänglichkeit der hydrophoben Molekülanteile stark herabsetzt. (Harms, 2005, S. 31)

Infolgedessen kann keine genaue Aussage über die tatsächliche Anzahl der funktionell wirksamen Gruppen getroffen werden.

5 Huminstofffraktionen

Die weitere Unterteilung der Huminstoffe kann aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung nicht nach strukturchemischen Gesichtspunkten erfolgen, sondern wird auf Basis einer alkalischen Extraktion in die Fraktionen Fulvinsäure, Huminsäure und Humine klassifiziert. In der nachfolgenden Abbildung 29 werden die operationellen Definitionen der einzelnen Fraktionen aufgeführt. (Eifler, 2005, S. 10 ff.)

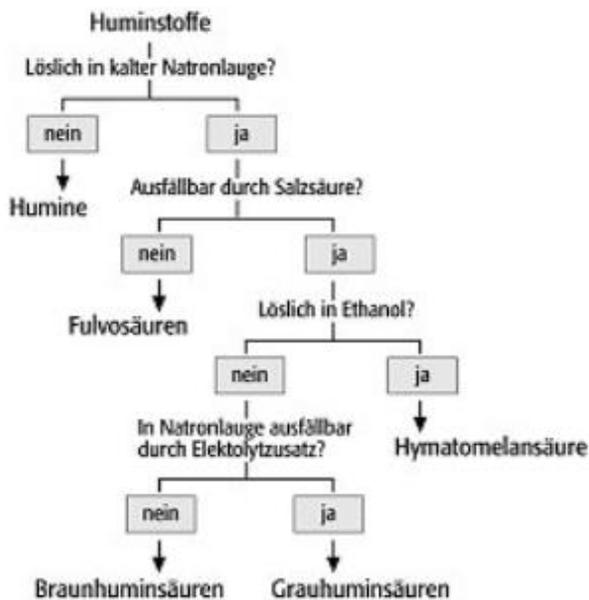


Abbildung 29: Fraktionierung der Huminstoffe anhand unterschiedlicher Löslichkeiten

(Quelle: Spektrum)

Ergänzend werden in der nachfolgenden Tabelle die operationellen Definitionen der Huminstoffunterklassen aufgeführt.

<i>Operationelle Definitionen von Huminstoff-Fractionen</i>	
<i>Fraktion</i>	<i>Definition</i>
Huminsäuren	Organische Stoffe, die aus einem alkalischen Huminstoff-Extrakt durch Zusatz von Säure bei einem pH-Wert von ≤ 2 ausgefällt werden.
Fulvinsäuren	Organische Substanz, die aus einem alkalischen Huminstoff-Extrakt nach Zusatz von Säure bei einem pH-Wert von ≤ 2 nicht ausgefällt wird.
Humine	Unlöslicher Anteil der Huminstoffe in Natronlauge.

Abbildung 30: Definitionen der Huminstoffunterklassen

(Quelle: Eifler, 2005, S. 10)

5.1 Fulvinsäuren

Die Fulvinsäuren können von Huminsäuren im Wesentlichen durch ihr geringeres Molekulargewicht, im Mittel höheren Sauerstoffgehalt, geringeren Kohlenstoff- und Stickstoffanteil und durch den meist höheren Gehalt an funktionellen Gruppen unterschieden werden. Der Anteil an Polysaccharidbausteinen kann bei Fulvinsäuren bis zu 30 % betragen, wohingegen aromatische Komponenten kaum vorhanden sind. Außerdem sind sowohl die Fulvinsäuren wasserlöslich als auch ihre Salze, die Fulvate. Diese haben die Fähigkeit Mangan(IV)- und Eisen(III)-oxide unter Reduktion zu lösen und Metallionen im Komplex zu binden. (Eifler, 2005, S. 10) Fulvinsäuren entstehen vor allem bei der Humifizierung von schwer zersetzbaren Nadelstreu und haben ihr Hauptverbreitungsgebiet in den Podsolböden des norddeutschen Tieflands und des Alpenvorlands. (Anonym, 2010)

5.2 Huminsäuren

Im Gegensatz dazu besitzen Huminsäuren ein höheres Molekulargewicht, mehr aromatische Anteile und Methylengruppen, aber weniger Polysaccharidfragmente als die Fulvinsäuren. Außerdem sind Huminsäuren schwer wasserlöslich und bilden mit mehrwertigen Kationen (Calcium, Magnesium, Eisen und Aluminium) schwerlösliche Verbindungen, die als Humate bezeichnet werden.

Höhere Löslichkeiten können in Natronlauge erzielt werden und beruhen neben der Wirkung des Natriumkations auf der Dissoziation von schwach sauren Gruppen, welche die pH-Wert abhängige Ladung der Huminsäuren erhöhen und eine Hydratisierung erleichtern. Ebenso lösen sich durch eine pH-Wert Erhöhung die bestehenden Bindungen zu anderen Humaten. (Eifler, 2005, S. 10) Huminsäuren bilden sich bei der Humifizierung leicht zersetzbarer Streu, wie Blättern und entstehen vorzugsweise bei der Verbraunung, d.h. bei der Entstehung der in Deutschland weitverbreiteten Braunerden und bei der Schwarzerdebildung. (Anonym, 2010)

Aufgrund der Präsenz von Carboxyl- und phenolischen OH-Gruppen in Huminsäuren und Fulvinsäuren besitzen beide Huminstofffraktionen eine hohe Kationenaustauschkapazität.

5.3 Humine

Humine sind im Gegensatz zu Fulvinsäuren und Huminsäuren nicht in Natronlauge löslich und stehen am Ende des Humifizierungsprozesses. Außerdem werden sie als wenig reaktionsfähig eingestuft und machen circa 50 % der organischen Substanz im Boden aus. Humine werden als kohlenstoffbasierte makromolekulare Substanzen mit schwarzer Färbung charakterisiert. Eine annähernde Erfassung des Molekulargewichtes, N-Gehalts sowie der molekularen Bausteinen ist bisher nicht möglich. (Ottow, 2011, S. 284)

<i>Huminstoff-Fractionen und ihre Eigenschaften</i>			
<i>Merkmal</i>	<i>Huminstoff-Fraktion</i>		
	<i>Fulvinsäuren</i>	<i>Huminsäuren</i>	<i>Humine</i>
Farbe	Gelb/ Gelbbraun	Braun/ Tiefbraun	Schwarz
C-Gehalt [%]	43 - 52	50 - 62	> 60
N-Gehalt [%]	0,5 - 2	3 - 8	Unterschiedlich
Molekulargewicht	800 - 9000	Zunehmend bis 10 ⁵	Unterschiedlich
Molekülbausteine	Mehr Polysaccharide	Mehr Aromaten	Unterschiedlich (teilw. wenig zersetzte Tier- und Pflanzenreste)
Innere Vernetzg.	Zunehmend von Fulvinsäuren über Huminsäuren zu Huminen		
Löslichkeit	Abnehmend von Fulvinsäuren über Huminsäuren zu Huminen		
Funktionelle Gr.	Abnehmend von Fulvinsäuren über Huminsäuren zu Huminen		
O-Gehalt	Abnehmend von Fulvinsäuren über Huminsäuren zu Huminen		
Säurestärke	Abnehmend von Fulvinsäuren über Huminsäuren zu Huminen		

Abbildung 31: Huminstoffunterklassen mit ihren jeweiligen Merkmalen

(Quelle: Eifler, 2005, S. 11)

6 Empirie

Um das beachtliche Wirkungsspektrum der Huminstoffe darzustellen, ist eine Beleuchtung der empirischen Ansätze gemäß der vorfindbaren Fakten nötig. Selbstverständlich ist es notwendig, die beobachteten Effekte anhand chemischer d.h. molekularer Sachverhalte einzustufen, um eine sichere Fundierung der Ergebnisse zu erlangen. Erst mit diesem tieferen Verständnis kann es gelingen, Wege und Ziele für eine weitere Nutzung dieser Naturstoffe zu charakterisieren, um dieses natürliche Kapital im Sinne einer modernen Ökologie und Ökonomie zu nutzen. (Ziechmann, 1996, S.31)

6.1 Huminstoffe in Böden

Bodenchemische Aspekte wie die Biogenese und Synthese der Huminstoffe, Bildung von Ton-Humus-Komplexen und die Reaktionen mit chemischen Fremdsystemen geben den Wirkungsumfang der Huminstoffe im Boden wieder. Aufbauend auf diesen bodenchemischen Vorgängen kann dadurch die Bodenbildung und die damit verbundenen chemischen Sachverhalte geschlossen werden. Der Boden wird als natürlicher Geneseort der Huminstoffe angesehen, obwohl diese sich auch außerhalb bilden können. Aus Abbildung 18 wird zwar deutlich, dass Huminstoffe auch bei der Autoxidation von Hydrochinon entstehen können oder etwa in Gewässern ebenfalls vorkommen. Die Humifizierung während des Kompostiervorganges stellt keine Diskrepanz der allgemeinen Auffassung dar. (Ziechmann, 1996, S. 31 f.)

In diesem Abschnitt sollen die Wirkungsorte Boden und Vegetation aufgrund ihrer Eigenschaften näher untersucht werden. Diese bieten ein reiches Angebot an organischer, d.h. humifizierbare Masse, mikrobieller Aktivität, um die Ausgangsstoffe bereitzustellen und das Vorhandensein von anorganischen Verbindungen, welche durch katalytische Fähigkeiten zur Huminstoffgenese benötigt werden. (Ziechmann, 1996, S. 32 f.)

Für den Geneseprozess können keine einheitlichen Modellreaktionen aufgestellt werden, da zum einen das chemische Ausgangsmaterial uneinheitlich und zum anderen nur ein oder wenige dominierende Reaktionsstränge vorhanden sind. Ebenso liegt für nur für eine geringe Anzahl an Partikeln eine verbindliche Konstitutions- oder Strukturformel vor. (Ziechmann, 1996, S. 32)

Generell lässt sich die organische Substanz im Boden in „Lebendes“ d.h. Edaphon (Bodenflora und Bodenfauna) und abgestorbenes, postmortales Material (Humus) unterteilen. Die Humifizierung in Böden verhält sich entgegengesetzt zu der Stoffsynthese in lebenden Zellen. Hier fehlen geregelter Transport und Speicherprozesse ebenso wie katalysierende Enzyme und Kompartimentierung. So ist es nicht erstaunlich, dass die Huminstoffgenese und ihre Endprodukte in dem Bereich des „chemischen Chaos“ zu finden sind (Abbildung 23). Dies ist ein entscheidendes Kriterium, das die Huminstoffe von allen anderen

makromolekularen Natur- und Kunststoffen eindeutig abgrenzt und ihnen so besondere Fähigkeiten und Eigenschaften verleiht. (Ziechmann, 1996, S. 32 f.)

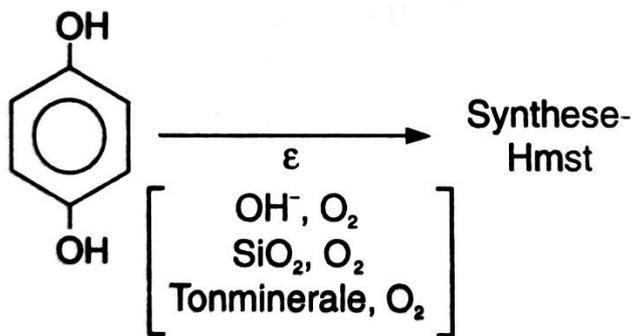


Abbildung 32: Reaktionsschema zur Selbsterstellung von Huminstoffen durch Tonminerale

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 33)

„Hier wirken die Katalysatoren als e-Akzeptoren im Sinne einer weiteren Humifizierung. Wie durch in vitro Versuche gezeigt werden konnte, kann es bei dieser Umsetzung zur Aufnahme von Huminstoffen im Zwischengittern kommen, wobei den Tonmineralen die Qualität eignet, „ihre“ Huminstoffe durch einen katalytischen Eingriff „selbstbestimmend“ herzustellen.“ (Ziechmann, 1996, S. 33).

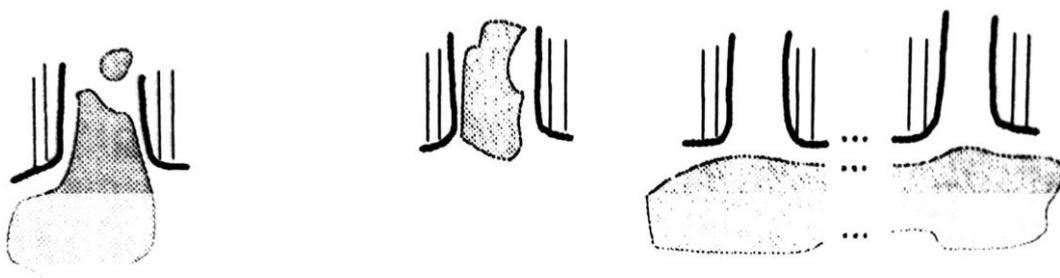


Abbildung 33: Fixierungsmöglichkeiten von Huminstoffen an Tonmineralen

(Quelle: Ziechmann, 1996, S.34)

Durch Experimente wurden die Möglichkeiten einer Fixierung von Huminstoffen an Tonmineralen bestätigt, wie aus der Abbildung 33 hervorgeht. Daraus

resultiert, dass das chemische Potential in Böden in Abhängigkeit der Struktur der Reaktionsprodukte nachhaltig bestimmt wird. (Ziechmann, 1996, S. 34)

Hier können Bodenlebewesen wie Regen- und Borstenwürmer die Reaktivität der Tonminerale erheblich steigern, indem sie die Beschaffenheit so ändern, dass die Anzahl der Oberflächen, Kanten und Ecken vergrößert wird. Da die Huminstoffe auf der Tonmatrix nun fein verteilt sind, haben sie erhebliche Effekte auf andere Systeme. Sollte dies auf Kosten einer teilweise belegten Tonoberfläche geschehen, tritt eine höhere Effektivität der Huminstoffe auf, um dies zu kompensieren. (Harms, 2005, S. 18; Nieder, o. D.)

Im Folgenden werden im Detail die Effekte der Huminstoffe auf den Boden näher erläutert.

6.1.1 Ton-Humus-Komplex

In der Bodenkunde führt die Aggregatbildung von organischen Fragmenten wie Huminstoffen mit anorganischen Partikeln wie Tonmineralen zu den sogenannten Ton-Humus-Komplexen.

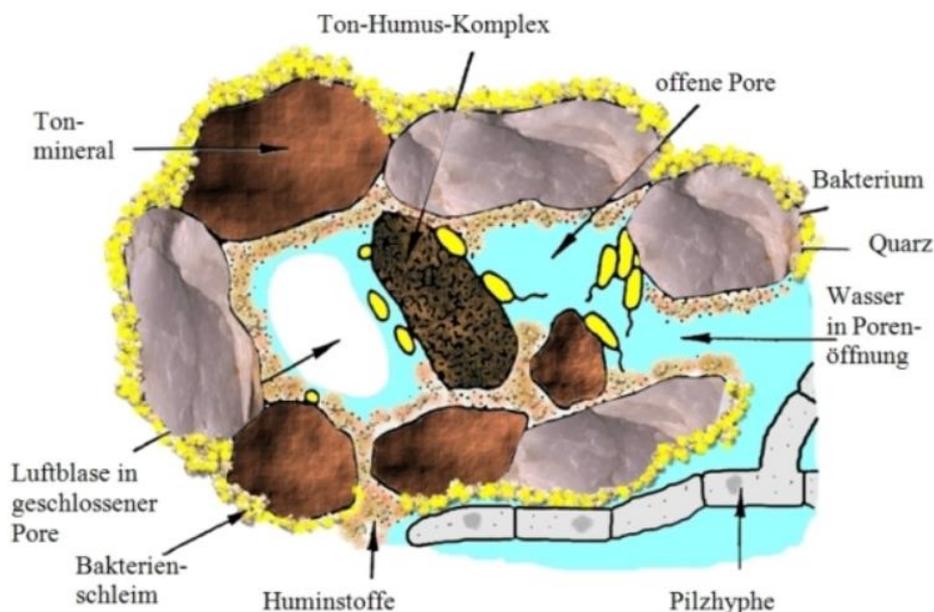


Abbildung 34: Darstellung eines Ton-Humus-Komplexes

(Quelle: Anonym, 2019, S.3)

Entstehungsprozess:

Huminstoffe sind in der Lage, einzelne Bodenpartikel zu einer Krümelstruktur zu verbinden, um ein stabiles Bodengefüge zu erschaffen. Wie die nachfolgende Abbildung 32 zeigt, besitzen die Oberflächen der Huminstoffe und Tonminerale negative Ladungen (sogenannte Bodenkolloide). Damit Ton-Humus-Komplexe oder Kalk-Ton-Humus-Komplexe entstehen können, benötigen diese eine Art „Brückenbauer“. Dies sind im Boden vor allem Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}) oder andere Kationen, die als eine solche neutralisierende Brücke dienen, um die organo-mineralischen Aggregate entstehen zu lassen. (Scheffer, 2010, S. 62 ff.)

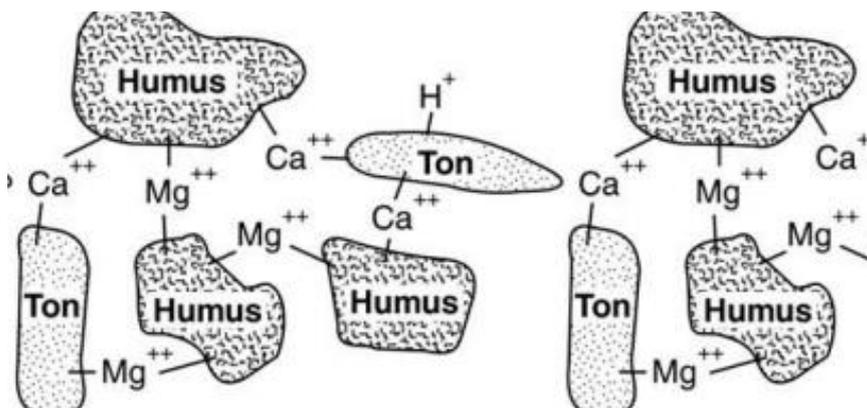


Abbildung 35: Brückenbaumechanismus zwischen den Ton und Humus bzw. Huminstoffen

(Quelle: Dr. Huth, 2020, S. 5)

Einen wichtigen Beitrag zur intensiven Vermischung von organischen und mineralischen Substanzen wird durch die Lebensweise des Regenwurmes geleistet. In dessen Darm finden Aufwertungs- und Umwandlungsprozesse statt, welche die Aggregate durch Schleimstoffe und Kalkabgabe stabilisieren. Die so gebildeten THK werden durch Bakterien und Pilze im weiteren Schritt zu Bodenkrümeln und bilden durch die Lebendverbauung ein optimales Krümelgefüge und die Humusform „Mull“ aus. (Kolbe, 2019)

Dieses entstandene Gefüge bringt weitere Vorteile mit sich, die in einer ausgeprägteren Porosphäre resultiert.

6.1.2 Luft und Wasserhaushalt

Wie in Abbildung 34 anschaulich dargestellt wird, kann ein höherer Gasaustausch und eine bessere Infiltration von Wasser durch eine Erhöhung der Anzahl von Ton-Humus-Komplexen erzielt werden. Durch die 3 - 5-fache Wasserspeicherfähigkeit seines Eigengewichtes wird dessen Nutzen für den Boden deutlich. Diese Wasserspeicherfähigkeit wird durch das Vorhandensein der Huminstoffe maßgeblich beeinflusst, da diese das 20-fache ihres Gewichtes absorbieren und dadurch den Boden vor langen Trockenperioden schützen können. (Haider, 1996)

Eine tragende Rolle spielen auch Huminsäuren, die durch ihre hydrophoben und hydrophilen Enden die Infiltrationsfähigkeit beeinflussen können (Abbildung 7). So werden durch eine Austrocknung des Bodens die Bausteine der Huminsäuren so angeordnet, dass die hydrophilen Enden nach innen weisen. Daraus folgt die Bildung einer wasserabweisenden Hülle, die erst durch eine Durchmischung des Bodens oder einen langanhaltendem Wasserkontakt wieder reversibel gemacht werden kann. Dieses Phänomen der Benetzungshemmung kann sowohl im kleinen Blumentopf als auch im Feld (Abbildung 36) beobachtet werden. (Schulz, o. D., S. 5 f.)



Abbildung 36: Benetzungshemmung des Bodens

(Quelle: Neutrog, o. D.)

Auch der Lufthaushalt spielt für die Gesamtheit des Bodens eine wichtige Rolle. Ohne diesen Gasaustausch würden die Pflanzen und das Edaphon förmlich „ersticken“. (Weyer, 2016) Aber nicht nur dem Wasser- und Lufthaushalt kommt eine tragende Bedeutung zu, sondern den Aggregatzuständen und dem Leben der Organismen im Boden.

6.1.3 Aggregatsstabilität und Bodenleben

Zum einem wirken die Ton-Humus-Komplexe durch ihre Porosphäre als gut infiltrierbar und zum anderen entstehen durch ihre Aggregate stabile Gefüge.

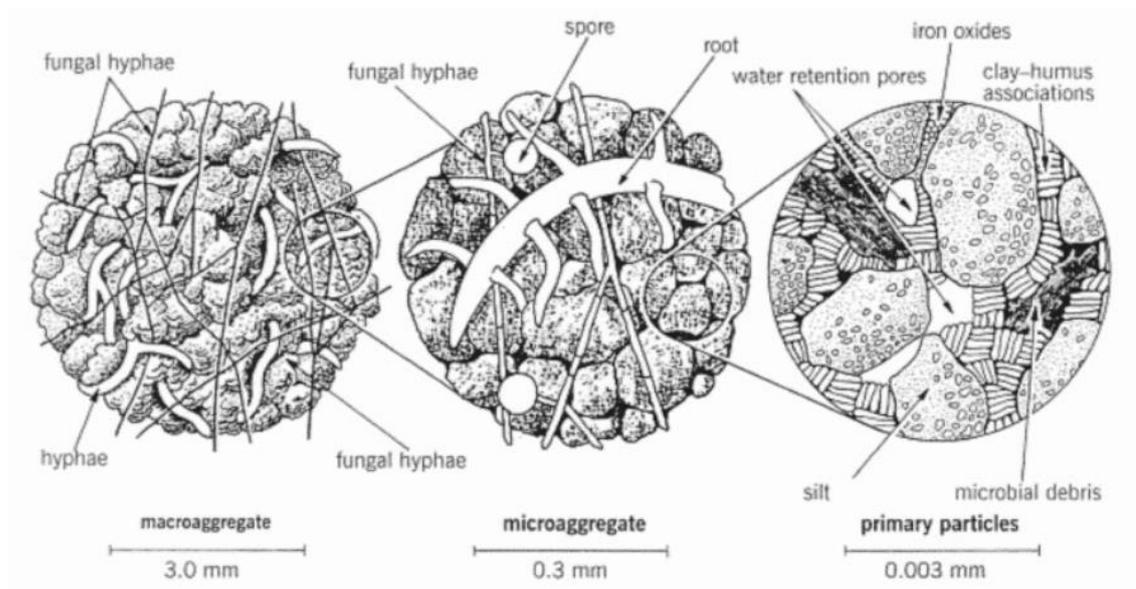


Abbildung 37: Aggregathierarchie im Boden
(Quelle: Peterson, 2019)

So lautet die Reihenfolge in der Aggregatshierarchie wie folgt:

Im ersten Schritt schließen sich die Grundbausteine des Primäraggregates zusammen, vergleichbar mit dem Aufbau in Abbildung 34.

Im zweiten Schritt formen sich mehrere Primäraggregate mit Hilfe von Wurzeln und Pilzhyphen zu einem Mikroaggregat mit der ungefähren Größe von 300µm.

Im letzten Schritt werden die Makroaggregate definiert, welche durch vielerlei Hyphen und Wurzeln fest miteinander verbunden sind und meist eine Größe über 3 mm aufweisen. Durch solch stabile Aggregate wird ebenfalls die mikrobielle Aktivität gesteigert, welche in der Produktion von mikrobiellen Polysacchariden resultiert, die danach vor allem die Makroaggregate weiter stabilisieren. (Nieder, o. D., S. 125 f.; Mair, 2017, S. 7 ff.)

Die so geschaffene hohe Aggregatstabilität wirkt der Erosion im hohem Maße entgegen und ist im gleichen Zug weniger anfällig für Bodenverdichtungen.

6.1.4 Kationenaustauschkapazität

Diese Austauschkapazität kurz KAK ist die Fähigkeit, Kationen festzuhalten (Adsorption) und bei Bedarf wieder abzugeben (Desorption). (LFE, 2019)

Verantwortlich für die Bindung vieler Nährstoffe, welche in Form von Kationen vorliegen, ist das Adsorptionsvermögen der Huminstoffe.

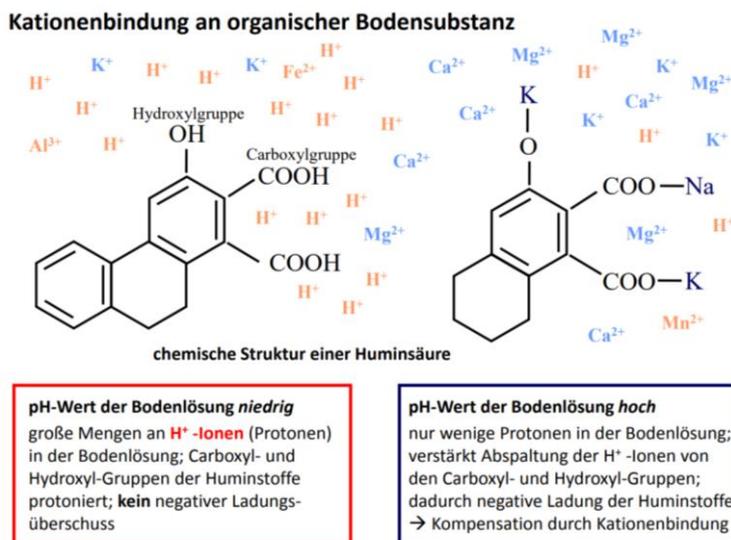


Abbildung 38: Bindungspotential bei unterschiedlichen pH-Werten

(Quelle: LFE, 2019)

Durch den Humifizierungsprozess nimmt die KAK durch Oxidation und damit der Bildung von Carboxylgruppen zu. Darum ist es von besonderer Wichtigkeit, eine ausreichende Humusversorgung aufrechtzuerhalten, um zum Beispiel in tonarmen Böden oder solchen, deren Tonminerale niedrige KAK besitzen, zu gewährleisten. Sandböden verdanken circa 75% ihrer Kationenaustauschkapazität der organischen Substanz. Anhand der aufgeführten Grafik wird die gewaltige KAK der Huminstoffe verdeutlicht, welche aber stark pH-Wert abhängig ist. (Abbildung 38) (Nieder, 2017, S. 196)

Bodenbestandteil	spezifische Oberfläche [m ² /g]	KAK [mmol _c /kg]
Huminstoffe	800–1000	50.000–75.000
Dreischicht-Tonminerale	600–800	200–2000
Al-, Fe- und Mn-Oxide	50–200	10–50
Zweischicht-Tonminerale	> 50	bis 150

Abbildung 39: Kationenaustauschkapazität verschiedener Bodenbestandteile

(Quelle: Anonym Spektrum, o. D.)

Stabilere Komplexe entstehen mit Metallionen - wie vor allem mit Kupfer (Cu^{2+}), Mangan (Mn^{2+}) und Zink (Zn^{2+}), aber auch mit mehrwertigen Kationen wie z.B. Eisen (Fe^{3+}) und Aluminium (Al^{3+}). So wird einer Bodenversauerung durch organo mineralische Komplexbildung vorgegriffen, da sonst ein Nährstoffungleichgewicht entstehen könnte, was in der Folge zum Verlust von „basischen“ Kationen wie Kalium (K^+), Magnesium (Mg^+) und Calcium (Ca^+) führen würde. (Wellbrock, 2016, S. 76 f.) Aluminium gilt als toxisches Element, was in der Pflanze sowohl das Wurzelwachstum als auch deren Aktivität negativ beeinflusst. Gleichzeitig wird die Bildung von Ton-Humus-Komplexen herabgesetzt. (Brunner, 2010, S. 15). Huminstoffe haben durch ihre große Anzahl an funktionellen Seitengruppen die Fähigkeit, Metallionen insbesondere Aluminium (Al^{3+}) und Eisen (Fe^{3+}) sehr stabil zu binden bzw. immobilisieren. (Fellmer, 2011, S. 19) Anders verhält es sich bei Mikronährstoffen, mit denen Huminstoffe, Komplexe, in der Fachsprache auch Chelate genannt, eingehen und somit für die Pflanze verfügbar werden. (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, o. D.) Huminsäuren und Fulvinsäuren können auch eine Chelatbildung mit Aluminium und Eisen eingehen, wenn diese löslich, sogar Verlagerung in tiefere Bodenschichten möglich. (Nieder, o. D., S.177 ff.) Solch enorme KAK wie in Abbildung 39 ersichtlich wird, bewirkt eine erhöhte Zugänglichkeit komplexierter Mikronährstoffe für die Pflanzen und leistet einen wichtigen Beitrag zur Minderung der Bodentoxizität. (Eifler, 2005, S. 13 ff.)

Von fundamentaler Bedeutung für unser Leben auf der Erde ist die Immobilisierung bzw. Mobilisierung und der Transport von Schadstoffen in Böden.

6.1.5 Schadstoffbindung

Laut Ziechmann (1996) wird in das Vielkomponentensystem Boden - bedingt durch den Menschen - eine Vielzahl von Fremdstoffen eingetragen. Untersuchungen von Böden und Gewässern ergeben immer wieder eine Zunahme von xenobiotischen Substanzen wie Kunststoffe, pharmazeutische Wirkstoffe, künstliche Pflanzenschutzmittel (Halogenkohlenwasserstoffe) und Nahrungsbestandteile ohne physiologische Bedeutung (synthetische Farbstoffe). Der Boden - hauptsächlich Huminstoffe - besitzt zwar eine gewisse Filterwirkung, die jedoch nicht unendlich verfügbar ist und daher dieser Ressource besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Auch für eine Sanierung kontaminierter Gebiete können folgende Untersuchungen helfen. (Ziechmann, 1996, S. 149 ff.)

6.1.5.1 Sorptionsvermögen von Benzol

Versuchsprinzip:

Anhand von Adsorption-Isothermen kann eine Wechselwirkung zwischen Kontaminat (z.B. Benzol/Toluol) und Huminstoffen dargestellt werden. Diese Isotherme stellen eine Beziehung zwischen der adsorbierten Menge einer Substanz und der Konzentration dieser in Lösung im Gleichgewicht dar. Dadurch kann das Rückhaltevermögen der Huminstoffe exakt evaluiert werden. Dieser Terminus veranschaulicht die Menge einer Substanz (Kontaminat), die von einem Kilogramm Huminstoff bei höchstmöglicher Konzentration von Benzol in wässriger Lösung adsorbiert wird. (Ziechmann, 1996, S. 149 ff.)

Versuchsaufbau:

Hierzu wurden verschieden stark konzentrierte wässrige Lösungen von Benzol (100 - 600 ppm) mit je 100 mg Huminstoff vermischt und für 18 Stunden geschüttelt. Diese Proben wurden zentrifugiert und von der überstehenden wässrigen Lösung eine definierte Menge mit Methylenchlorid extrahiert und im Anschluss gaschromatographisch untersucht. (Ziechmann, 1996, S. 155 f.)

Die Gas-Flüssigkeits-Chromatographie (GLC) oder einfach Gaschromatographie (GC) ist eine Verteilungschromatographie, die als Analysenmethode zum Auftrennen von Gemischen in einzelne chemische Verbindungen weite Verwendung findet. Die GC ist nur anwendbar für Komponenten, die gasförmig sind oder sich verdampfen lassen. (Baugh, 2014)

Versuchsergebnisse:

Die untersuchte Adsorptions-Isotherme ist in der Abbildung 40 im Folgenden wiedergegeben. So ist dieser Graphik zu entnehmen, dass bei einer Gleichgewichtskonzentration von 280 ppm, 10 Gramm bzw. 11,4 Milliliter Benzol von einem Kilogramm Huminstoff adsorbiert werden können. (Ziechmann, 1996, S. 156 f.)

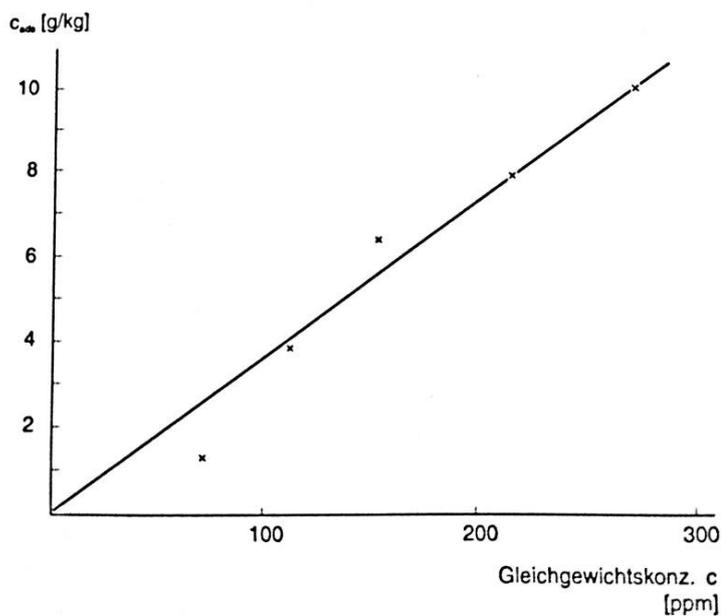


Abbildung 40: Sorptionsisotherme für das System Benzol/Huminstoff

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 156)

6.1.5.2 Sorptionsvermögen von Toluol

Das Versuchsprinzip und die Versuchsdurchführung sind mit denen des Benzols identisch.

Versuchsergebnisse

Die maximale Sorptionskapazität liegt bei 4 Gramm Toluol pro Kilogramm Huminstoff (4,6ml/kg).

Ein Vergleich der beiden Ergebnisse zeigt, dass Benzol 2,5-mal stärker adsorbiert werden kann als Toluol.

Schlussfolgerung:

Aufgrund dieses Resultates und dem Wissen des Gehaltes an organischer Substanz eines Bodens kann ermittelt werden, welche Menge eines Kontaminat von Huminstoffen „maximal fixiert“ werden kann. Durch ihre funktionellen Gruppen sind Huminstoffe also in der Lage eine Immobilisierung durch Fixierung und eine Entgiftung mit Hilfe einer Komplexbildung von Kontaminaten herbeizuführen. (Ziechmann, 1996, S. 157)

6.1.5.3 Schadstofffixierung in Abhängigkeit der organischen Substanz

„Mit einer vorläufigen Kennzeichnung der organischen Substanz (OS) kann auch eine Abschätzung des festgelegten Benzols in Abhängigkeit vom Gehalt an organischer Substanz (OS) erfolgen.“ (Ziechmann, 1996, S. 157)

Tab. 2.30: Abhängigkeit des Gehalts an OS von der Farbe des Bodens

Farbe (im feuchten Zustand)	Gehalt OS (%)	Bezeichnung	Raumgewicht (g/ml)	Farbzone
hellgrau-grau	0–2	humusarm – schwach humos	1,8–1,5	Fz 1
dunkelgrau-schwarzgrau	2–8	mäßig – stark humos	1,5–1,0	Fz 2
schwarz	8–15	humusreich	1,0–0,6	Fz 3
schwarz	15–30	anmoorig	0,6– > 0,5	Fz 4
schwarz	> 30	torfig	< 0,5	

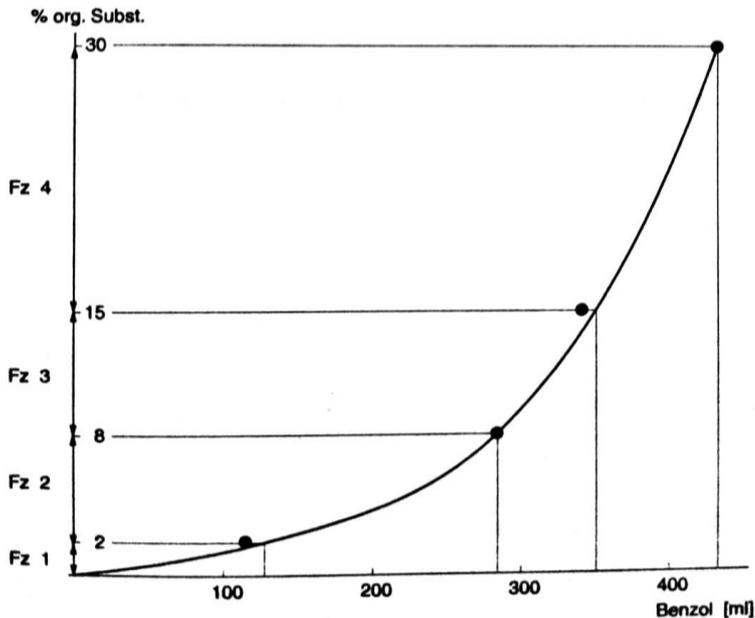


Abbildung 41: Abhängigkeit der sorbierten Menge Benzol [ml] vom Gehalt OS; Bodenvolumen: $0,4\text{m}^3$ bei einer Fläche von 1m^2

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 157)

Nicht nur die Schadstoffbindung leistet einen großen Beitrag zur „Sanierung“ des Bodens, sondern auch die Regulierung des pH-Wertes.

6.1.6 Stabilisierung des pH-Wertes

Der pH-Wert des Bodens wird zum Beispiel durch natürliche Stoffumsätze der Pflanzen, Applikation von kalkzehrenden Düngern oder auch saurem Niederschlag ins saure Milieu bewegt. (Anonym, o. D.)

So beeinflusst der pH-Wert (Potentia Hydrogenii) direkt die Potenz des Bodens, da dieser Wert sämtliche Bodeneigenschaften beeinflusst und auch

bestimmt in welchem Maße Nährstoffe für die Pflanzen verfügbar sind wie dies in Abbildung 42 anschaulich dargestellt wird. So gedeiht der Großteil der Pflanzen am besten in einem neutralen bis schwach sauren Milieu bei einem pH-Wert von circa 6,2 bis 6,8. In diesem Bereich sind Nährstoffe gelöst, Bodenorganismen ausreichend aktiv und die Struktur des Bodens im Optimalbereich. Zu saurer Boden verliert im Folge der Auswaschung von basischen Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) seine Krümelstruktur und kann so weniger Wasser speichern und wird schlecht durchlüftet. Ebenso wird die Nährstoffaufnahme für die Pflanzen gehemmt und die Aktivität der Bodenorganismen nimmt ab. (Anonym, 2021)

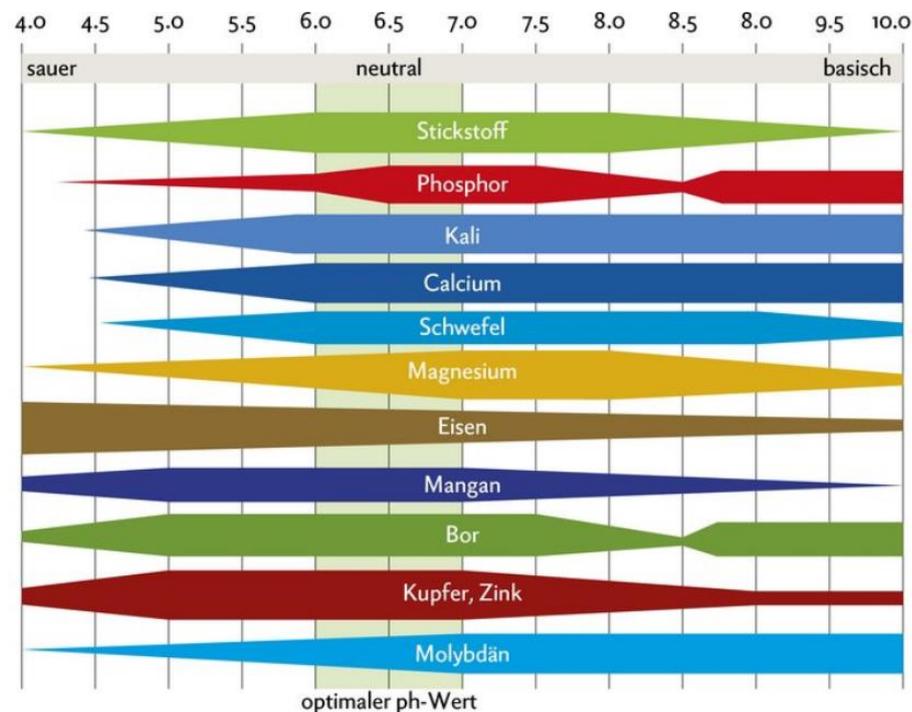


Abbildung 42: Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit des pH-Wertes

(Quelle: Die Grüne; Schweiz)

Einem hohen Stellenwert kommt somit eine Regulierung des pH-Wertes im sogenannten Optimalbereich zu. Parallel dazu wirken Huminsäuren - ähnlich dem Kalk - neutralisierend auf den pH-Wert im sauren Boden, was die Pufferkapazität erhöht und den Boden weniger angreifbar für Versauerung macht. Huminsäuren binden und immobilisieren im sauren Boden frei bewegliches

Aluminium und andere Schwermetalle. Eine Regulation des pH-Wertes durch Huminsäuren findet aber nicht nur im sauren Milieu statt, sondern diese haben auch die Eigenschaft alkalische Böden zu regulieren. Diese wirken als natürliche Chelatoren für Metallionen und lancieren deren Aufnahme durch die Pflanzenwurzeln. Außerdem stellen sie den Pflanzen sogenannte Komplexe in verwertbarer Form zur Verfügung, welche sie mit zuvor gelösten calciumgebundenem Phosphat, Nährstoffen und Spurenelementen eingegangen sind. Durch ihre Langzeitwirkung stellen Huminsäuren im Vergleich zu Kalk eine effizientere Lösung dar, da sie mehr Vorteile für das Boden-Pflanze-System mit sich bringen. (Anonym, o. D.)

Vorteilhaft wirkt sich auch die Fähigkeit der Huminstoffe aus, Mineral- und Nährstoffe zu binden und somit vor Auswaschung zu schützen.

6.1.7 Speicherung von Nährelementen

Somit können sie als Reservoir angesehen werden, die erst durch den natürlichen Vorgang der Mineralisation ihre gespeicherten Mineral- und Nährstoffe freigeben. (Harms, 2005, S. 73) Mineralisierung ist ein Humusabbauvorgang, bei dem organische Substanz und Huminstoffe unter Energiefreisetzung zu anorganischen Verbindungen abgebaut werden. Die sogenannten Mineralisierer in Form von Mikroorganismen, können einen Teil der anorganischen Masse selbst in ihren Körpern festlegen und speichern. Der verbliebene Teil der anorganischen Verbindungen wie zum Beispiel NH_4^+ und PO_4^{3-} gehen in die Bodenlösung ein und sind somit pflanzenverfügbar. Die Geschwindigkeit und der Umfang der Mineralisierung wird durch die vorherrschenden Standortbedingungen (Zusammensetzung der Ausgangssubstanz, Wasser-, Luft- und Wärmeverhältnisse, Aktivität Edaphon) bestimmt. In Abbildung 43 werden die

Ab-, Um- und Aufbauprozesse im Boden bildlich dargestellt. (Ottow, 2011, S. 23 ff.)

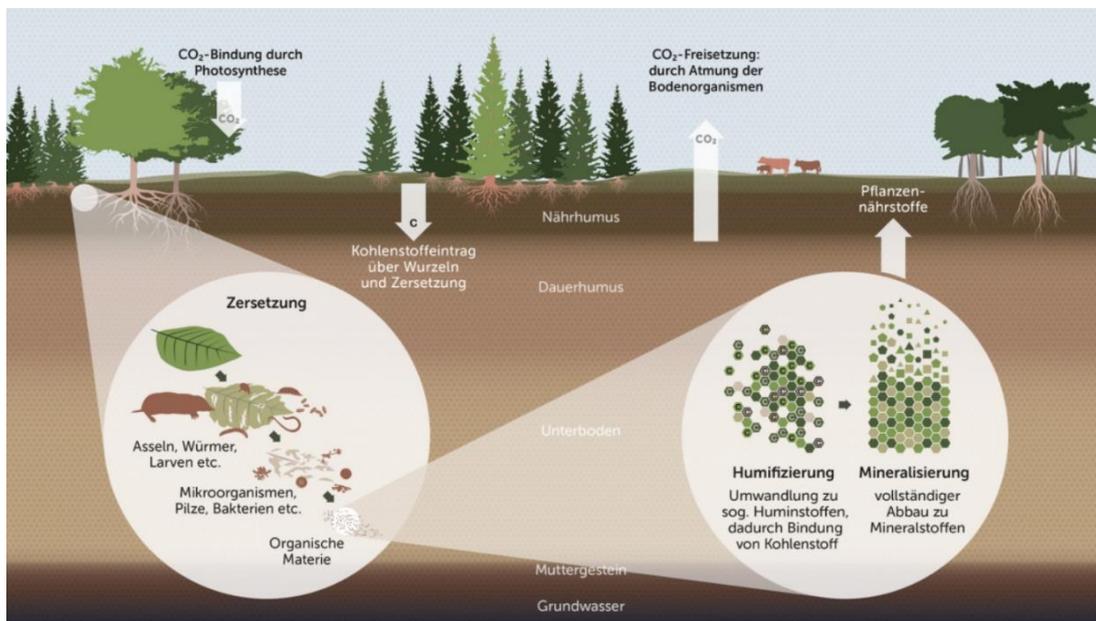


Abbildung 43: Um-, Ab- und Aufbauprozesse im Boden

(Quelle: Hahn, 2020)

Langzeitversuche geben Aufschluss darüber, dass durch Mehrung von Huminstoffen kann also auch eine langanhaltende und durchaus effiziente Nährstoffversorgung gewährleistet werden.

6.1.8 Huminstoffe und die Versalzung von Böden

In Ziechmanns Buch (1996) wird diese Fähigkeit anhand von Untersuchungen nach dem Bau im Jahre 1970 des Assuan-Staudamms (Hochdamm Sadd el Ali) beobachtet. Die Vorteile durch die Errichtung des Staudamms schlagen sich in einer geregelten Stromversorgung und einer gleichmäßigen Bereitstellung von Wasser für die Bevölkerung nieder. Doch traten im Nachhinein unerwünschte Nebenwirkungen in Form von ausbleibenden Ton-Huminstoff-Komplexen - auch Nilfracht - genannt auf, die dem Boden als natürlicher Dünger diente und gegen eine zunehmende Versalzung der einst so fruchtbaren Böden entgegenwirkte. So wurde im Jahr 1980 kalkuliert, dass etwa 15.000 Tonnen Kalkstickstoff nötig wären, um dieses gewaltige

Nährstoffdefizit auszugleichen. Durch den ständigen Wechsel des Grundwasserstandes vor dem Bau des Staudammes konnte eine Anreicherung unerwünschter Anionen und Kationen durch Auswaschung verhindert werden, wie in Abbildung 44 zu sehen ist. (Ziechmann, 1996, S. 186 ff.)

I) alter Zustand vor Errichtung des Assuan-Damms

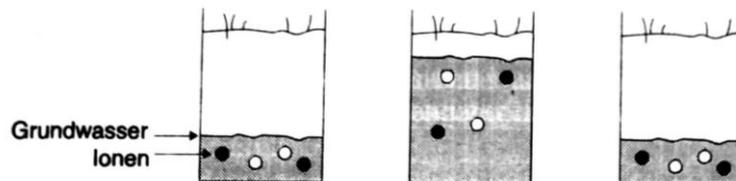


Abbildung 44: natürliche Auswaschung der Anionen und Kationen
(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 189)

Anhand dieser gravierenden Nebenwirkungen stellte sich die Frage, ob Huminstoffe in der Lage sind, diese Depravierung der Böden aufzuhalten. Ziechmann und Khairy führten 1993 anhand 500 einzelner Bodenproben Untersuchungen zu Wassergehalt, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Carbonatgehalt, Menge organisches Material und dem Wassergehalt des lufttrockenen Bodens durch. Als Ergebnis erhielten die Forscher Bodenwerte mit Salzgehalten, die eine landwirtschaftliche Nutzung der Flächen in naher Zukunft unmöglich machen würden. Außerdem enthielten diese eine geringe Menge an Huminstoffen, die mit dem marginal humifizierbaren Ausgangsmaterial zusammenhängt. Dieser Zustand kann anhand der Abbildung 45 verdeutlicht werden. (Ziechmann, 1996, S. 186 ff.)

II.1) Nach Errichtung des Assuan-Damms ohne Huminstoffe

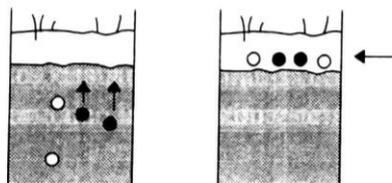


Abbildung 45: Auskristallisation der Salze im obersten Horizont mit ständiger Akkumulation
(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 189)

In den nachfolgenden Modellversuchen über die Wechselwirkungen der Bodenproben und den Huminstoffen, konnte anhand von IR-Spektren und Adsorptionsisothermen deren Wirkung nachgewiesen werden.

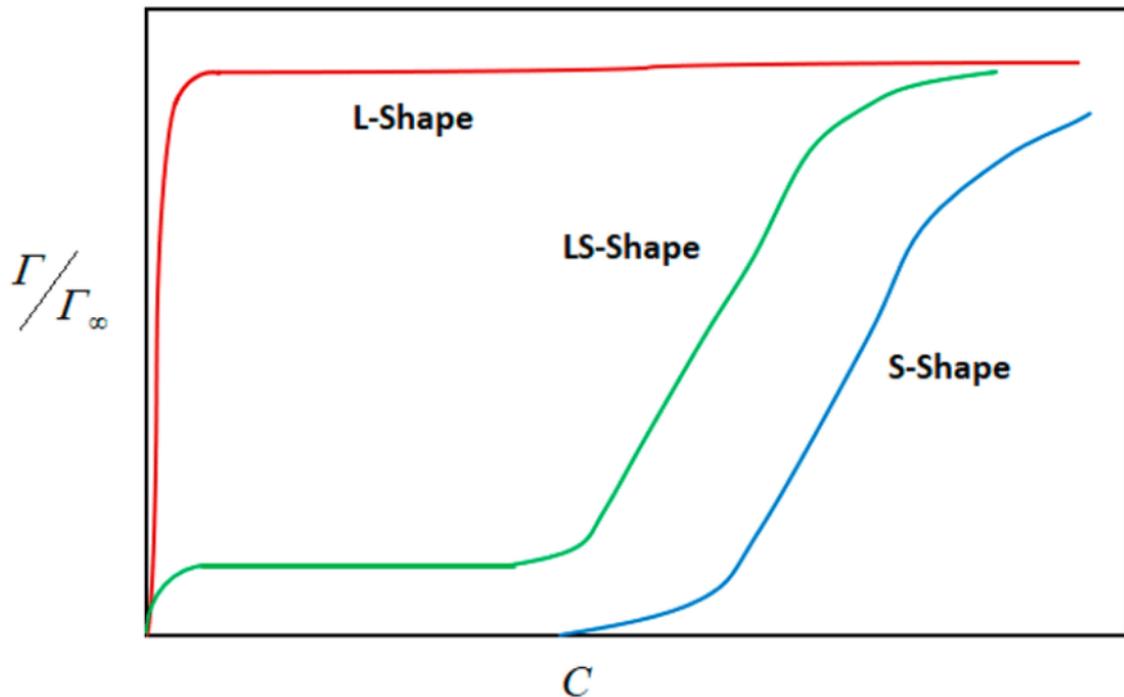


Abbildung 46: Verschiedene Adsorptions-Isotherme und deren Bezeichnung
(Quelle: Kalam, 2021)

So ergaben sich drei verschiedene Wirkungen: (Ziechmann, 1996, S. 188)

- Na^+ und Cl^- Ionen wurden durch Huminstoffe festgelegt. Die Adsorptions-Isotherme entspricht hierbei dem S-Typ.
- NaHCO_3 wird nach dem L-Typ adsorbiert.
- Die Fixierung von Ca^{2+} und Mg^{2+} ist seit langem bekannt, da diese als „Brückenbildner“ mit Tonmineralen genutzt werden.

Eine Erklärung der verschiedenen Adsorptions-Isothermen wird in Abbildung 46 aufgezeigt. Über funktionelle Gruppen wie Carboxyl- und OH-Gruppen können die Huminstoffe eine elektrostatische Bindung mit den für die Versalzung verursachenden Ionen eingehen, wie in Abbildung 47 deutlich wird. (Ziechmann, 1996, S. 188)

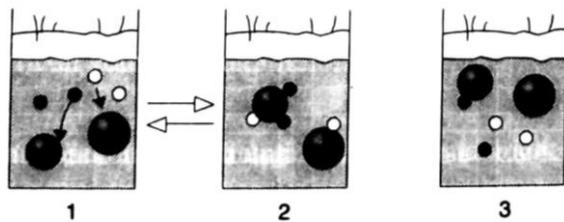


Abbildung 47: Ionenbindung in Gegenwart von Huminstoffen

(Quelle: Ziechmann, 1996, S. 189)

6.2 Effekte auf die Vegetation

Für einen Nachweis der Wirkung von Huminstoffen auf die Pflanze wurden diese Versuche im Labor mit extrahierten Huminsäuren durchgeführt. Diese ermöglichten eine störungsfreie Beobachtung der Effekte der Huminstoffe und schlossen Fremdeinflüsse aus (Ziechmann, 1996).

Die direkten Wirkungen der Huminstoffe auf die Pflanzenphysiologie können sich nach Prezmeck (1962) auf zwei Arten unterscheiden. Zum einem können sie der formativen und zum anderen der metabolischen Wirkung zugeordnet werden, was im Folgendem erläutert wird.

6.2.1 Formative Wirkung

Diese beeinflusst die Wachstumseigenschaften, im speziellen die der Wurzeln und es können folgende positive Effekte nachgewiesen werden:

- Verbessertes Wurzelwachstum, Stimulierung des Längenwachstums (Ziechmann, 1996, S. 112 ff.; Tattini et al., 1990)
- Verbesserte Anlage und Ausbildung von Seiten- und Adventivwurzeln durch Huminsäuren (Ziechmann, 1996, S. 112 ff.)
- Positiver Effekt auf Wurzelhaarausbildung durch Huminsäuren (Ziechmann, 1996, S. 112 ff.)

Anhand von Beobachtungen von Vaughan und Malcolm (1985) konnte nachgewiesen werden, dass durch eine beschleunigte Zellteilung neben der Erhöhung der Rate zur Bildung von Wurzelsystemen auch der Ertrag der

Trockenmasse erhöht wird. Dies kann anhand von Abbildung 48 eindeutig sichtbar gemacht werden.



Abbildung 48: Effekte auf Wurzel- und Sprosswachstum; Links: Kontrollgruppe, Rechts: mit Huminsäureapplikation

(Quelle: Seed Forward, o. D.)

Der Einsatz von niedermolekularen Huminsäuren verbesserte die Zellwandpermeabilität (Ellenberg, 1986) in den Pflanzenwurzeln und erhöhte dadurch die Nährstoffaufnahme. (Nardi et al., 2002)

Neben den bisher genannten Effekten konnte Sladky 1959 eine Erhöhung des Chlorophyllgehaltes in der Blattmasse und damit auch eine vermehrte Photosyntheseleistung nachweisen.

Huminstoffreichere Böden besitzen außerdem eine dunklere Farbe und können somit die Sonnenstrahlung effizienter absorbieren und speichern. Dies ist im Frühjahr von erheblichen Vorteil, um eine frühere Vegetation zu ermöglichen und die Aktivität des Edaphons zu steigern. (Bachmann, 2014)

6.2.2 Metabolische Wirkungen

Letztendlich führen auch metabolische Effekte zu einer direkten Veränderung der Stoffwechselprozesse in der Pflanze.

- Stimulierung der Nitrataufnahme (Nardi et al., 2002)
- Erhöhung der Huminsäuregehalte führt zu erhöhter Aufnahme von Mikronährstoffen wie Kupfer und Zink (Pinton et al., 1999)
- Huminstoffe wirken als organischer Katalysator im enzymatischen Prozess (Ziechmann, 1996)
- Erhöhung Vitamin C Gehalt in der Pflanze (Pandem und Ocal, 1999)
- Unterstützung des Wachstums von nützlichen Bodenmikroorganismen (Chen, 2004)

→ Infolgedessen Widerstandsfähigkeit gegenüber Schädlingen

6.3 Huminstoffe in der Kompostierung

Durch steigende Mineraldüngerpreise und erweiterter Sicht auf Bodenbildungsprozesse rückt das Thema der Kompostierung immer mehr in den Vordergrund.

Angelehnt an der Devise der Umwelt bedeutet dies: Natur kennt keine Abfälle.

Kompostierung von organischen Material wird durch gesteigerte Erkenntnisse und Analysemethoden ein bedeutendes Forschungsgebiet.

Nach Festenstein und Lacey (1965) sind in der ersten Phase der Kompostierung vor allem Bakterien, Actinomyceten und Pilze beteiligt, wobei die beiden erstgenannten gegenüber den Pilzen dominieren.

Der Ablauf der Kompostierung kann durch den Einsatz von Mikroorganismen und anderen Zusätzen wie Algenmehl gesteuert werden. Hier macht man sich das verschiedene Abbauvermögen von Bakterien, Pilzen und Actinomyceten zu Nutze. Durch Steuerung von pH-Wert, Temperatur und Nährstoffangebot kann der Humifizierungsprozess gehemmt und damit die

Humifizierungsgeschwindigkeit reduziert werden, sodass eine Qualitätserhöhung des Endproduktes möglich wird. (Ziechmann, 1996, S. 107 ff.)

Laut Grassinger (1996) wirken sich gesteigerte Belüftungsphasen ebenso auf die Entwicklung und Stabilität der Huminsäuren aus. Binner (2007) fand heraus, dass sich zu starke Belüftungsphasen auch negativ auswirken können und somit eine Abnahme der Huminsäuregehalte zur Folge haben. Demnach ist ein Wechsel zwischen ausreichender und knapper Sauerstoffzufuhr der ideale Weg, um die höchsten Humifizierungsraten zu erhalten. Auch Ziechmann (1996) kommt zu dem Schluss, dass durch eine gezielte Verminderung der Humifizierungsgeschwindigkeit eine erhebliche Erhöhung der Qualität des Endmaterials erreicht werden kann. Dies spiegelt sich in der Quantität der Huminsäurevorstufen wider, welche als Vorgängerprodukt der Huminsäuren gelten, jedoch eine höhere und vielseitigere Reaktivität besitzen. (Guggenberger, 2008, S.19)

So gilt diesem Themenbereich in der Zukunft ein großes Augenmerk, um die Effektivität und Nachhaltigkeit des Kompostes zu optimieren.

7 Resümee

Die vorliegende Bachelorarbeit ging der These „Huminstoffe – unterschätztes Potential“ auf den Grund.

Für die Bestätigung dieser Auffassung wurden quantitative Studien zu mehreren Untersuchungen und deren Effekten analysiert.

Angesichts der vielen Experimente in denen Huminstoffe extrahiert wurden, konnten maßgebliche Wirkungen wie KAK, Wasserspeicherfähigkeit, Schadstoffbindung, Nährstoffspeicherung und eine Regulierung des pH-Wert beobachtet werden.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass Huminstoffe ein breites Wirkungsspektrum und äußerst positive Effekte auf

- den Luft- und Wasserhaushalt
- die Aggregatsstabilität und das Bodenleben
- die Kationenaustauschkapazität
- die Schadstoffbindung
- die Stabilisierung des pH- Wertes
- die Speicherung von Nährelementen
- die Huminstoffe und die Versalzung von Böden
- die Effekte auf die Vegetation sowie
- die Huminstoffe in der Kompostierung

aufweisen.

Durch die quantitative Forschung wurde somit gezeigt, dass Huminstoffe durch die vielen Radikale und funktionellen Seitengruppen ein riesiges Reaktionsfeld aufzeigen und scheinbar mit jedem Partikel bzw. Stoff zu reagieren vermögen. So ist die Metapher der Hekatoncheiren (griechische Mythologie; hundertarmige Riesen) mit den Huminstoffen vergleichbar, die durch ihre Vielzahl an Bindungsmöglichkeiten und deren Wirkungsintensität beeindruckend sind.

Oft werden den Ton-Humus-Komplexen diese oben genannten Fähigkeiten zugesprochen, obwohl diese erst durch die Anwesenheit von Huminstoffen zum Tragen kommen.

Die Beziehung zwischen Bodenstruktur, Edaphon und den Huminstoffen steht in sehr enger Wechselbeziehung, die aufgrund ihrer Kollaboration eine Symbiose eingehen.

Somit sind Huminstoffe ein wichtiges Themengebiet, das zur Sanierung der Umweltprobleme einen bedeutenden Beitrag leisten könnte.

Von daher ist es sinnvoll, durch erhöhte Forschungsarbeit auf diesem Gebiet deren Wirkungen noch detaillierter zu erkunden, aber auch durch bewussteres und nachhaltigeres Handeln in der Umwelt von deren Ökosystemdienstleistungen zu profitieren.

Obwohl also Huminstoffe an viele andere Systeme gebunden sind, um ihr volles Wirkungsspektrum entfalten zu können, kann dennoch von einem enormen Potential gesprochen werden.

8 Literaturverzeichnis

- PH-Management mit Huminsäuren – HUMINTECH.* (2023, 9. Januar). Zugriff am 09.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.humintech.com/de/agrarwirtschaft/blog/ph-management-mit-huminsauren>
- Ahrens Sandra (Statista, Hrsg.). (2023). *Monatlicher Preis für Sonnenblumenöl im globalen Handel von Dezember 2019 bis Dezember 2022.* Zugriff am 13.01.23. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1296737/umfrage/monatlicher-preis-sonnenblumenoel/>
- Angrick, M. & Rewicki, D. (1980). Die Maillard-Reaktion. *Chemie in unserer Zeit*, 14(5), 149–157. <https://doi.org/10.1002/ciuz.19800140503>
- Anonym (Neutrog Trading Pty Ltd, Hrsg.). (o. D.). *How to improve hydrophobic soil.* Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://neutrog.com.au/2019/12/05/how-to-improve-hydrophobic-soil/>
- Anonym. (o. D.). *pH-Management mit Huminsäuren. Der pH-Wert und das Boden-Pflanze-System,* Humintech. Zugriff am 14.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.humintech.com/de/agrarwirtschaft/blog/ph-management-mit-huminsauren>
- Anonym (Das Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL), Hrsg.). (o. D.). *Risikomanagement in der Landwirtschaft. Welche Möglichkeiten gibt es?*, Das Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.praxis-agrar.de/betrieb/betriebsfuehrung/risikomanagement-in-der-landwirtschaft>
- Anonym. (2010). *Humifizierung und Mineralisierung bei der Bodenbildung in Geografie,* Lernhelfer. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/geografie/artikel/humifizierung-und-mineralisierung-bei-der-bodenbildung#>
- Anonym (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Hrsg.). (2019). *Humus. Bedeutung und Funktion,* Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz. LfL Merkblatt. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/merkblaetter/humus_lfl-merkblatt.pdf
- Anonym. (2020). *Es fehlt Wasser in Deutschland. Rekordhitze und Wassermangel sorgen für sterbende Wälder, ausgetrocknete Gewässer und massive Ernteeinbußen.* Novihum News. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://novihum.com/de/news/es-fehlt-wasser-in-deutschland/>
- Anonym (2021, 4. Februar). pH-Wert des Bodens bestimmen: Wie man alkalische & saure Böden erkennt. *Plantura.* Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.plan-tura.garden/gartenpraxis/boden-und-erde/ph-wert-des-bodens>
- Anonym (Deutscher Wetterdienst, Hrsg.). (2022). *Trends der Niederschlagshöhe.* Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>
- Anonym (2022, 12. Juni). Landwirtschaft ächzt unter hohen Kosten. Bauern gehen von weiteren Preissteigerungen aus. *Der Tagesspiegel.* Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/bauern-gehen-von-weiteren-preissteigerungen-aus-6004516.html>
- Anonym Spektrum (Spektrum, Hrsg.). (o. D.). *Huminstoffe,* Spektrum. Lexikon der Geowissenschaften. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/huminstoffe/7151>

- Bachmann, J. (2014). Wärmefluss und Wärmehaushalt. In H.-P. Blume, K. Stahr, W. Fischer, G. Guggenberger, R. Horn, H.-G. Frede et al. (Hrsg.), *Handbuch der Bodenkunde* (S. 1–42). Weinheim: Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk1997006>
- Baugh, P. J. (Ed.). (2014). *Gaschromatographie. Eine anwenderorientierte Darstellung* (Analytische Chemie). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Beach, T., Dunning, N., Luzzadder-Beach, S., Cook, D. E. & Lohse, J. (2006). Impacts of the ancient Maya on soils and soil erosion in the central Maya Lowlands. *CATENA*, 65(2), 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.007>
- Blume, H.-P., Stahr, K., Fischer, W., Guggenberger, G., Horn, R., Frede, H.-G. et al. (Hrsg.). (2014). *Handbuch der Bodenkunde*. Weinheim: Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527678495>
- Boyd, J. & Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 63(2-3), 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.01.002>
- Brunner, H., Conradin H., Gasser U., Kayser A., Lüscher P., Meuli R., Müller M., Nievergelt J., Pazeller A., Peyer K., Presler J., Weisskopf P., Zürner M. (Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Hrsg.). (2010). *Klassifikation der Böden der Schweiz. Bodenprofiluntersuchung, Klassifikationssystem, Definitionen der Begriffe, Anwendungsbeispiele* (3. Auflage), Umwelt und Energie Kanton Luzern. Zugriff am 16.01.2023. Verfügbar unter: https://www.bodensystematik.de/klass_03_2010.pdf
- Clarkson, L. & Crawford, M. (2002). *Feast and Famine. Food and Nutrition in Ireland 1500-1920*. Oxford: Oxford University Press, Incorporated. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5602543>
- Dando, M., Rogers Paul & Whitby Simon (Spektrum, Hrsg.). (1999). *Erntevernichtende Bio-Waffen* (10 / 1999). Spektrum der Wissenschaft. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/magazin/erntevernichtende-bio-waffen/825803>
- Die Bundesregierung. (2022). *Ernährung weltweit sichern. Ziele nachhaltiger Entwicklung*. Nachhaltigkeitspolitik, Die Bundesregierung. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/ernaehrungssicherheit-319080>
- Dierig, C. (2022, 2. März). Ukraine-Konflikt sorgt für Notstand beim Sonnenblumenöl. *WELT*. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/article237254433/Ukraine-Konflikt-sorgt-fuer-Notstand-beim-Sonnenblumenoeel.html>
- Dipl.-Met. Magdalena Bertelmann. (2019). *Tipping points. die Kipp-Elemente im Klimasystem*, Deutscher Wetterdienst. Wetter und Klima. Zugriff am 12.01.2023. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/9/5.html
- Dr. Deuschle Tom (Faszination Regenwald, Hrsg.). (2022). *Wasserwelten. Wasserkreisläufe im Regenwald*, Faszination Regenwald. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.faszination-regenwald.de/info-center/oekosystem-regenwald/wasserwelten/>
- Dr. Huth Claudia (Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz, Hrsg.). (2020). *Produktivität und Ressourcenschutz durch eine nachhaltige Bodenpflege gewährleisten*. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.wasserschutzberatung.rlp.de/Internet/global/The-men.nsf/9776d84ea11c2654c1257f08004f7189/92a3b800066e0e39c125833e00432c96>

/FILE/73.%20Pf%C3%A4lische%20Weinbautage_Vortrag_Boden-
pflege_HUTH_15.01.20.pdf

- Dr. Kolbe Hartmut. (2019). Was ist Humus. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter:
<https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/humus-1-was-ist-das.html>
- Dr. Trusch Robert (Entomologie heute, Hrsg.). (2019). *Insektenschwund. Hintergründe, Beobachtungen, Zusammenhänge* (31 Aufl.), Staatliches Museum für Naturkunde Karlsruhe. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: https://www.smnk.de/uploads/tx_psb-publication/Trusch_2019_Insektenschwund_EH31_229-256_Web.pdf
- Dr. Ulber Lena, Gehring Klaus.. Resistenzmanagement im ackerbau. Herbizidresistenz, 2018(DLG Merkblatt 432). Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter:
https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_432.pdf
- Dr. Zimmermann Dirk.. Europas Abhängigkeit von Pestiziden. So schädigt die industrielle Landwirtschaft unsere Umwelt, 2015. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: https://e-pub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2016/57533/pdf/umweltreport_pestizide_greenpeace_20151013.pdf
- Eifler Dirk. (2005). *Charakterisierung von Huminstoffen durch Fraktionierung und Metallgehaltsbestimmung mittels eines gekoppelten Systems Kapillarelektrophorese – induktiv gekoppeltes Plasma Massenspektrometer*. Zugriff am 13.01.23. Verfügbar unter:
https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/1009/1/dissertation_dirk_eifler.pdf
- Fellmer, F. (2011). *Untersuchung der Wechselwirkungen zweiwertiger chemotoxischer Schwermetalle und deren Huminstoffspezies (Metall-Humatkomplexe) mit Geomaterialien unter Verwendung von Radioisotopen*. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle. Zugriff am 16.01.23. Verfügbar unter: <https://opendata.uni-halle.de/bitstream/1981185920/7367/1/Untersuchung%20der%20Wechselwirkungen%20zweiwertiger%20chemotoxischer%20Schwermetalle%20und%20deren%20Huminstoffspezies%20%28Metall-Humatkomplexe%29%20mit%20Geomaterialien%20unter%20Verwendung%20von%20Radioisotopen.pdf>
- Francé, R. H. (1998). *Das Leben im Boden ; Das Edaphon ; Untersuchungen zur Ökologie der bodenbewohnenden Mikroorganismen*. Neu-Ulm, Holm: Ed. Siebeneicher; Deukalion, Fachverl. für Landwirtschaft und Ökologie Hils.
- Gaube Andreas. (2006). Produzenten und Konsumenten, Zersetzer und Aasfresser, Räuber und Parasiten. Der Boden als Lebensraum. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter:
https://www.stmuv.bayern.de/themen/boden/lernort_boden/doc/modul_b.pdf
- Gerold, G. (2021). *Klimawandel und der Untergang von Hochkulturen. Was lehrt uns die Geschichte?* (1. Aufl. 2021). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1960709>
- Göggerle Thomas. (2022). Mega Mähdrescher. Das sind die größten der Welt. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.wochenblatt-dlv.de/feld-stall/landtechnik/mega-maehdrescher-groessten-welt-569942>
- Guggenberger Gernot. (2008). *Einfluss des Ausgangsmaterials auf die Humifizierung bei der Kompostierung*. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: [file:///C:/Users/Mi/Downloads/fulltext_6832%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Mi/Downloads/fulltext_6832%20(2).pdf)
- Hahn Rebecca (EWS Schönau, Hrsg.). (2020). *KLIMASCHUTZ IM UNTERGRUND. IN UNSEREN BÖDEN SIND UNMENGEN AN CO₂ GESPEICHERT. DIE HUMUSVORRÄTE DARIN*

AUFZUSTOCKEN KÖNNTE HELFEN, KLIMASCHÄDLICHE EMISSIONEN ZU KOMPENSIEREN.
Verfügbar unter: <https://www.ews-schoenau.de/energiewende-magazin/zur-sache/klimaschutz-im-untergrund/>

- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H. et al. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS One*, 12(10), e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- Harms, W. (2005). *Huminstoffkontinuen – eine unbestimmbare Matrix. ein Anlaß zur Prüfung und Bewertung der nach Bundesbodenschutzverordnung rechtsverbindlichen Extraktionsverfahren für die chemische Analyse organischer Schadstoffe in Böden.* Dissertation. Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg. Zugriff am 11.01.23. Verfügbar unter: <https://d-nb.info/981486428/34>
- Hörner, I., Felgentreu, C. & Theby, V. (Autor). (2020). *Regenerative Landwirtschaft* [DVD]. Maschinenring Tirschenreuth.
- Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S. & Patil, S. (2021). Surfactant Adsorption Isotherms: A Review. *ACS Omega*, 6(48), 32342–32348. <https://doi.org/10.1021/acso-mega.1c04661>
- Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen. (o. D.). Mikronährstoffe in der Pflanze. Zugriff am 16.01.2023. Verfügbar unter: <https://llh.hessen.de/pflanze/boden-und-duengung/mikronaehrstoffe/mikronaehrstoffe-in-der-pflanze/>
- Larink, O. & Joschko, M. (13.07.2004/2014). Einfluss der Standort- und Bodeneigenschaften auf die Bodenfauna. In H.-P. Blume, K. Stahr, W. Fischer, G. Guggenberger, R. Horn, H.-G. Frede et al. (Hrsg.), *Handbuch der Bodenkunde* (S. 1–44). Weinheim: Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk1999006>
- Latif, M. (2009/1005). *Bringen wir das Klima aus dem Takt? Hintergründe und Prognosen* (1. Auflage). Frankfurt am Main: FISCHER E-Books.
- LFE (Forstliches Umweltmonitoring, Hrsg.). (2019). *Böden als Kationenaustauscher.* Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <http://www.forstliches-umweltmonitoring.de/Riek/sites/default/files/files/Teil5.pdf>
- Lingenhöhl, D. (2018, 9. Juli). So halten Vögel Insekten in Schach. *Spektrum.de*. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/news/so-halten-voegel-insekten-in-schach/1576396>
- Mahlkow Hendrik, Heidland Tobias, Jaevervall Sebastian (Welternährung- Das Fachjournal der Hungerhilfe, Hrsg.). (2022). *Ukrainekrieg bedroht langfristig Ernährungssicherheit in Afrika.* Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.welthungerhilfe.de/welternaehrung/rubriken/agrar-ernaehrungspolitik/wie-der-ukrainekrieg-afrikas-brotversorgung-trifft>
- Mair, S. (2017). *Vergleich der Aggregatstabilität von Böden mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung.* Masterarbeit. Universität für Bodenkultur, Wien. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: [file:///C:/Users/Mi/Downloads/fulltext_17068%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Mi/Downloads/fulltext_17068%20(3).pdf)
- Matzner Egbert. (2017). *Bodenbildungsprozess: Humusbildung. Warum sind einige Bodenhorizonte dunkel bis schwarz gefärbt?* Zugriff am 13.01.23. Verfügbar unter: https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/bod/de/lehre/lehre/get_file.php?id_obj=143227
- Meier, K. & Wittich, E. (2006). *Theoretische Grundlagen nachhaltiger Entwicklung. Beiträge und Diskussionen.* Seminar des Gesprächskreises Nachhaltigkeit der RLS am 17./18. Mai 2006.

- Nicolay, N. (2015). *Spin. Definition*. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://flexikon.doccheck.com/de/Spin>
- Nieder Rolf. (o. D.). *Grundlagen der Bodenkunde*, TU Braunschweig. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Bachelor.Bodenkunde/2011.Nieder.Grundlagenskript.Bodenkunde.pdf>
- Nordrhein-Westfalen, L.. Stickstoffdüngung im Getreide (2021). Ermittlung des Düngedarfs (DBE) nach DüV, 2021. Zugriff am 05.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/getreide/getreide-n-duengung-pdf.pdf>
- Ottow, J. C. G. (2011). *Mikrobiologie von Böden. Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik* (Springer-Lehrbuch, 1. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1622396>
- Petersen, M. (Orthman, Hrsg.). (2019). *Going Further Under The Microscope Of Macro-To-Microaggregates*. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://orthman.com/going-further-under-the-microscope-of-macro-to-microaggregates/>
- Radner, K. (2017). *Mesopotamien. Die frühen Hochkulturen an Euphrat und Tigris* (C.H.Beck Wissen, Bd. 2877, 1. Auflage). München: Verlag C.H. Beck. <https://doi.org/10.17104/9783406714078>
- Roberts, N., Eastwood, W. J., Kuzucuoğlu, C., Fiorentino, G. & Caracuta, V. (2011). Climatic, vegetation and cultural change in the eastern Mediterranean during the mid-Holocene environmental transition. *The Holocene*, 2011(1), 147–162. <https://doi.org/10.1177/0959683610386819>
- Rocker Dagmar. (2011). *Bakterieller Abbau von refraktärem organischem Material im Weserästuar und in der Nordsee*. Dissertation. Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg. Zugriff am 13.01.23. Verfügbar unter: <http://oops.uni-oldenburg.de/1121/1/rocbak11.pdf>
- Roth, V.-N., Lange, M., Simon, C., Hertkorn, N., Bucher, S., Goodall, T. et al. (2019). Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil. *Nature Geoscience*, (9), 755–761. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0417-4>
- Scheffer & Schachtschabel. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde* (16 Aufl.) [Erscheinungsort nicht ermittelbar]: Spektrum Akademischer Verlag.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1992). *Lehrbuch der Bodenkunde* (13., durchges. Aufl.). Stuttgart: Enke. Zugriff am 13.01.2023.
- Schulz Jan Hendrik.. Fruchtbare Böden durch Zwischenfrüchte und Untersaaten. *Fachthema TerraLife, o. D.* Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: https://www.bund-mecklenburg-vorpommern.de/fileadmin/mv/Bilder/Landwirtschaft/Agrarbuendnis_M-V/15._Wintertagung/02_Zusammenhang_Fruchtbarer_Boeden_und_Ackerbau.pptx_6_Seiter_-_Kopie.pdf
- Seed Forward (Seed Forward, Hrsg.). (o. D.). *Huminstoffe. Entwicklung eines neuartigen, huminstoffhaltigen Bodenverbessers aus pflanzlichen Roh- und Reststoffen*. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://seedforward.com/de/about/fe-projekte/>
- Seibold, S., Gossner, M. M., Simons, N. K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarli, D. et al. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature*, 574(7780), 671–674. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1684-3>
- Sexlinger Katharina, Humer Monika (Mitarbeiter) (Amt der Vorarlberger Landesregierung, Hrsg.). (2020). *Bodenverdichtung. Ursachen, Auswirkungen und Vorsorgemaßnahmen*,

- Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://vorarlberg.at/documents/302033/473021/Bodenverdichtung+-+Ursachen%2C+Auswirkungen+und+Vorsorgema%C3%9Fnahmen.pdf/0e10a79b-846c-eb91-7283-bbad97d3fd49>
- Steinberg Christian E.W., Menzel Ralph. (2008). Huminstoffe- totes Material höchst aktiv. Studien über lebenswichtige braune Geopolymere. *Aquaristik- Fachmagazin*, (Version 27.11.2008). Zugriff am 16.12.2022. Verfügbar unter: <https://redfrogteam.net/wp-content/uploads/2012/10/AF-Humus-III.pdf>
- Stevenson, F. J. [Frank J.] & Stevenson, F. J. [F. J.]. (1994). *Humus chemistry. Genesis, composition, reactions* (2nd ed.). New York: J. Wiley.
- Townsend, C. R., Begon, M. & Harper, J. L. (2009). Nachhaltigkeit. In C. R. Townsend, M. Begon & J. L. Harper (Hrsg.), *Ökologie* (Springer Lehrbuch, 2. Aufl., S. 463–502). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-95897-0_12
- Townsend, C. R., Begon, M. & Harper, J. L. (Hrsg.). (2009). *Ökologie* (Springer Lehrbuch, 2. Aufl.). Berlin: Springer.
- Umweltbundesamt. (2013). *Verlust der Biodiversität im Boden. Bodenbelastungen*. Zugriff am 02.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/verlust-der-biodiversitaet-im-boden#der-boden-lebt>
- Umweltbundesamt (Umweltbundesamt, Hrsg.). (2019). *Verdichtung*. Zugriff am 02.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/verdichtung#bodenverdichtung-ein-problem>
- Umweltbundesamt. (2022). *Bodenversiegelung*, Umweltbundesamt. Zugriff am 03.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung#was-ist-bodenversiegelung>
- Umweltbundesamt. (2022). *Erosion – jede Krume zählt*, Umweltbundesamt. Zugriff am 26.12.2022. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/erosion-jede-krume-zaehlt#undefined>
- Umweltbundesamt. (2022). *Pflanzenschutzmittel in der Umwelt*. Umweltzustand und Trends, Umweltbundesamt. Zugriff am 13.01.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien/pflanzenschutzmittel-in-der-umwelt#zahl-der-wirkstoffe-in-pflanzenschutzmitteln>
- Weber, J. (Hrsg.). (1999). *Soil humic substances*.
- Weiss, H., Courty, M. A., Wetterstrom, W., Guichard, F., Senior, L., Meadow, R. et al. (1993). The genesis and collapse of third millennium north mesopotamian civilization. *Science (New York, N. Y.)*, 261(5124), 995–1004. <https://doi.org/10.1126/science.261.5124.995>
- Wellbrock, N. (2016). Bodenversauerung und Nährstoffverfügbarkeit, 76–77. Zugriff am 16.01.2023. Verfügbar unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn057583.pdf
- Weyer, T., FH Südwestfalen & Dipl.-Ing. (FH) Runa Boeddinghaus, FH Südwestfalen. (2016). Bodenverdichtungen vermeiden. Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen. Zugriff am 03.01.2023. Verfügbar unter: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/bodenverdichtung_broschuere.pdf
- Wilhelmy, H. (1981). *Welt und Umwelt der Maya. Aufstieg und Untergang einer Hochkultur*. München: Piper.
- Yadvinder Malhi, J Timmons Roberts, Richard A Betts, Timothy J Killeen, Wenhong Li, Carlos A Nobre. (2008). *Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon*.

- Youssef Ouni, Tahar Ghnaya, F. Montemurro, Ch. Abdellia, Abdelbasset Lakhdar. (2014). *The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity*. Zugriff am 22.12.2022. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/262414337_The_role_of_humic_substances_in_mitigating_the_harmful_effects_of_soil_salinity_and_improve_plant_productivity
- Ziechmann, W. (1996). *Huminstoffe und ihre Wirkungen* (Spektrum Umwelt). Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum, Akad. Verl. Zugriff am 13.01.2023.

Erklärung

Verfasser/in (Name, Vorname):

Betreuer/in (Name, Vorname):

Thema der Arbeit:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit gemäß § 35 Abs. 7 RaPO (Rahmenprüfungsordnung für die Hochschulen für angewandte Wissenschaften in Bayern) selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ort	Datum	Unterschrift Verfasser/in

Erklärung bzgl. der Zugänglichkeit von Bachelor-/Masterarbeiten

Verfasser/in (Name, Vorname): _____

Betreuer/in (Name, Vorname): _____

Thema der Arbeit: _____

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir angefertigte Arbeit mit o.g. Titel innerhalb des Bibliotheksystems der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf aufgestellt und damit einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Die Arbeit darf im Bibliothekskatalog der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (und zugeordneten Verbundkatalogen) nachgewiesen werden und steht allen Interessierten entsprechend der jeweils gültigen Nutzungsmodalitäten der Hochschulbibliothek der HSWT zur Verfügung. Ich bin mir auch darüber im klaren, dass die Arbeit damit von Dritten ohne mein Wissen kopiert werden kann.

Die Veröffentlichung der Arbeit habe ich mit meiner Betreuerin bzw. meinem Betreuer und falls zutreffend, mit der Firma/ Institution abgesprochen, die eine Mitbetreuung übernommen hatte.

- Ja
- Ja, nach Ablauf einer Sperrfrist von ____ Jahren
- Nein

Ort Datum Unterschrift Verfasser/in

Fachgebiet:

Umweltsicherung

- Abfall
- Boden
- Wasser
- Analytik, Mikrobiologie
- Ökologie & Naturschutz
- Umwelttechnik, EDV
- Verwaltung, Recht, Wirtschaft
- Umweltmanagement
- Erneuerbare Energien

Ernährung und Versorgungsmanagement

Agrartechnik

Master:

- Energiemanagement und Energietechnik
- MBA Agrarmanagement
- MBA Regionalmanagement

Landwirtschaft

- Pflanzliche Erzeugung
- Tierische Erzeugung
- Agrarökonomie
- Landtechnik
- Erneuerbare Energien
- Agrarökologie
- Ökologische Landwirtschaft

Lebensmittelmanagement

Als Betreuer/in bin ich mit der Aufnahme in das Bibliothekssystem der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf einverstanden.

Ort Datum Unterschrift Betreuer/in