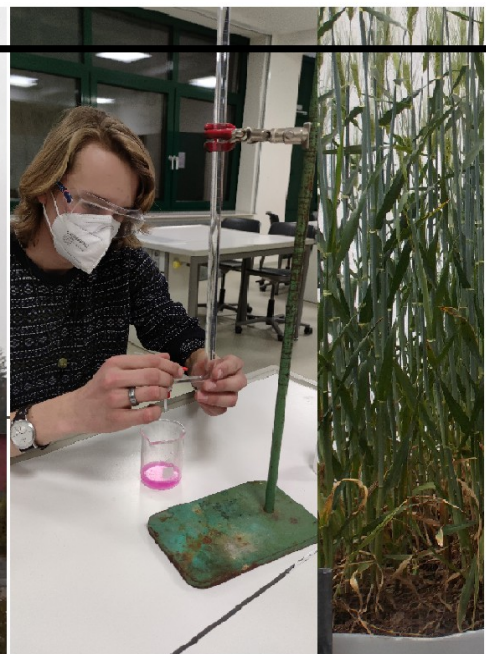




Die Wechselertrags-Polykultur (WEP)

Pedologisch-agrarbiologische Entwicklung einer dürreresilienten Anbaumethode

Rufus Wegner



Rufus Wegner (17), St. Michael-Gymnasium (Bad Münstereifel, NRW), Jugend forscht 2022, Biologie, Projektbetreuer: Nikolaus Weiler

Kurzfassung:

Der Klimawandel stellt uns vor immer größere Herausforderungen. Insbesondere werden Dürreereignisse die Landwirtschaft und damit unsere Lebensgrundlage beeinflussen.

Die Wechseletrags-Polykultur (WEP) soll als konkreter Baustein für agrarische Anbaumethoden ökologischen und ökonomischen Nutzen vereinen, indem sie ertragssteigernd den Bodenwasserhaushalt hin zur Dürreeressilienz beeinflusst. Der Fokus liegt hierbei auf pedologischen (bodenkundlichen) Aspekten und der Beeinflussung über systemische Lösungsansätze.

In 2,5 Jahren habe ich die WEP auf Grundlage pedologischer, aber auch synökologischer, arbeitspraktischer und ökonomischer Aspekte entworfen und entwickelt. In einem 1 ¼ jährigen Feldversuch mit möglichst genauer Ein-Faktor-Analyse wurde die WEP erprobt, untersucht und weiterentwickelt.

Dazu wurden im Versuchszeitraum (im Wochenrhythmus) über 400 Pflanzenhöhen, knapp 100 manuell gemessene Bodenfeuchten und mithilfe einer Wetterstation knapp 90.000 Wetterdaten erfasst und ausgewertet sowie Fotoreihen mit knapp 300 Fotos erstellt.

In einer abschließenden Bodenanalyse wurden mit Wassergehalts- und Wasserspannungs-Daten, die mithilfe der Filterpapiermethode ermittelt wurden, von 100 präparierten Bodenproben pF-Kurven erstellt. Es wurden Infiltrationsraten, Glühverluste und Bodenrespirationen bestimmt. Proben für das Lichtmikroskop wurden präpariert, untersucht und bewertet.

Leider wurde der Versuch durch die Starkregenereignisse im Sommer 2021 beschädigt, sodass danach nur noch eingeschränkt geforscht werden konnte. Dafür bot sich so die Gelegenheit, die WEP in Bezug auf extreme Starkregenereignisse zu erproben.

Trotz der resultierenden Probleme ermöglicht der Versuch eine Evaluation und Bearbeitung des Anbaukonzeptes WEP.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine Bestätigung der Annahmen, sodass eine Weiterentwicklung auf deutlich erweiterter Grundlage möglich und aussichtsreich ist.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problematik trockenheitsinresilienter Böden.....	1
1.2	Ziel und Vorgehen meiner Arbeit.....	1
2	Das Grundprinzip der WEP	1
3	Praktische Erforschung der WEP.....	2
3.1	Versuchsaufbau.....	3
3.2	Messdaten (während des Versuches).....	3
3.3	Anschließende Bodenanalysen	5
3.3.1	Infiltrationsratenmessungen.....	5
3.3.2	pF-Kurven-Bestimmung (nicht tensiometrisch)	6
3.3.3	Respirationsratenbestimmung.....	8
3.3.4	Glühverlustbestimmung.....	9
3.3.5	Lichtmikroskopische Betrachtung	11
3.4	Vernetzende und extrapolierende Interpretation der Ergebnisse.....	12
4	Ergebnisdiskussion und Ausblick.....	15
4.1	Unterstützungsleistungen.....	18

1 Einleitung

1.1 Problematik trockenheitsinresilienter Böden

Der Klimawandel stellt uns vor große Herausforderungen. Wie die letzten Jahre eindrucksvoll gezeigt haben, werden Dürreereignisse ein zentrales Problem sein. Diese wirken sich über eine Beeinflussung der (Trink-)wasser- und Nahrungsmittelversorgung unmittelbar auf unsere Lebensgrundlage aus.

Besonders relevant sind dabei unsere Böden, da diese Wasserfilter und vor allem riesige Wasserspeicher darstellen^[1]. Böden, die nicht hinreichend widerstandsfähig gegen Trockenheit sind, können wichtige Bodenfunktionen verlieren^[2]. Daher ist es von immenser Wichtigkeit, Konzepte zu entwickeln, um unsere Bodensysteme dementsprechend anzupassen und ihre Widerstandsfähigkeit zu erhöhen.

Eine besonders relevante Schnittstelle zwischen dem Boden, seinem Wasserhaushalt und dem Menschen stellt die Landwirtschaft dar. Diese ist einerseits abhängig von der Beschaffenheit des Bodens, andererseits wird durch die Landwirtschaft zwangsläufig auch der Boden massiv beeinflusst.

1.2 Ziel und Vorgehen meiner Arbeit

Es müssen im Interesse aller Menschen und insbesondere im Interesse der Agrarindustrie Konzepte für die Landwirtschaft entwickelt werden, die die Resilienz des Bodens gegenüber Trockenheit erhöhen und dabei nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch nachhaltig sind. In meiner Arbeit fokussiere ich mich auf die systemökologische Beeinflussung auf Ebene der Bodenmatrix. Ziel ist dabei eine modular nutzbare Anbaumethode, welche mit anderen Nutzungssystemen kombinierbar ist (Bspw. sind organische oder mineralische Düngung, Einbringung von Pyrolyseprodukten oder Branntkalk etc. kein Element meiner Untersuchungen, eine Kombination mit meiner Anbaumethode ist aber denkbar).

Dazu habe ich mich zunächst umfassend mit pedologischen und agrarbiologischen Aspekten auseinandergesetzt und auf Grundlage dessen das Grundprinzip meiner Anbaumethode entwickelt. Auf dieser Grundlage habe ich Hypothesen zu den einzelnen pedo(-bio-)logischen Mechanismen aufgestellt und diese anhand eines einjährigen Versuchs beurteilt.

Insbesondere durch das Feedback der Jury habe ich mich nach dem Regionalwettbewerb mit der biometrischen Datenauswertung und statistischen Darstellung meiner Ergebnisse beschäftigt. Nach dem Bundeswettbewerb habe ich diese neue Fassung der schriftlichen Arbeit formuliert, die durch eine komplett neue Struktur den Fokus von der theoretischen Entwicklung der Anbaumethode auf meine praktische Erforschung verlagert.

2 Das Grundprinzip der WEP

Die Schwierigkeit bei der Entwicklung einer Anbaumethode besteht in der starken Interdependenz der zahlreichen wirkenden Mechanismen – insbesondere im Boden. Um aus diesen eine schlüssige Anbaumethode zu entwickeln, ist ein probates Vorgehen, natürliche Ökosysteme als Entwicklungsgrundlage zu nutzen^[3] (herausragendes Beispiel: Agroforstsysteme). Diese werden dann an ökonomische und arbeitspraktische Erfordernisse angepasst und ggf. auch systemökologisch weiter modifiziert. Oft können natürlich nicht sämtliche Mechanismen übernommen werden, die Herangehensweise bringt jedoch folgende Vorteile mit sich:

1. Da sich sämtliche (Nutz-) Pflanzen in ihrer Grundfunktion evolutiv an natürliche Zustände angepasst haben, sind bei einem der Natur maximal nachgeahmten Zustand erhöhte Resilienzen am ehesten zu erwarten.
2. Je weniger natürliche Mechanismen anthropogen verändert werden, desto unwahrscheinlicher sind Kollateralschäden.

Einem Agrarsystemen nahe und besonders dürreresilient ist in unserem Klimat das Sukzessionsstadium früher Folgegesellschaften. Durch den Klimawandel sind Veränderungen im Makroklima und damit im Auftreten terrestrischer Biome zu erwarten^[4]. Klimawandelbedingt sind insbesondere länger anhaltende Dürrephasen, generell erhöhte Trockenheit und Temperaturen sowie punktueller auftretende Regenfälle zu erwarten^[5]. Dementsprechend ist hierzulande ein Trend hin zu Steppenlandschaften gemäßiger Breiten zu erwarten^[6]. Steppen weisen besonders geringe Sukzessionsdauer bis zum Erreichen ihrer Klimaxvegetation auf und ähneln oben genannten Sukzessionsstadien. Anpassung an das zu erwartende Klima sowie sukzessionsbedingte Ökosystembeeinflussung begründen also eine besondere Eignung als Vorlagesystem.

Bei der Betrachtung dieser Vorlage fällt besonders auf, dass weder einzelne Pflanzen konstant dominant hervortreten, noch ein klares phasiertes Nacheinander unterschiedlicher Pflanzen zu beobachten ist. Vielmehr könnte man den zu beobachtenden Zustand als fließenden Wechsel in der Dominanz verschiedener Arten beschreiben (erklärbar durch evolutive Prozesse der Nischendifferenzierung). Auf die Landwirtschaft übertragen wäre das eine Kombination aus Fruchtfolge und Polykultur.

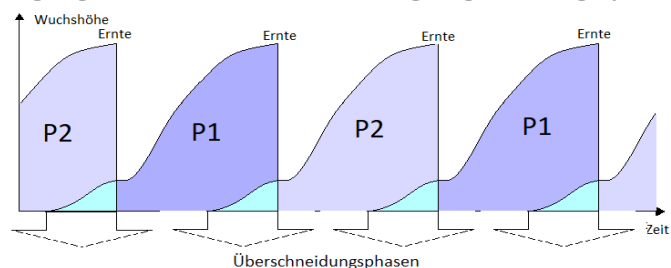


Abb. 1: Grundprinzip der WEP

Und das ist meine Grundidee der Wechselertrags-Polykultur: Sich überschneidende Anbauphasen, die einen absolut permanenten Bewuchs mit Kulturpflanzen bei minimaler Konkurrenz und maximaler Effizienz der Ressourcennutzung ermöglichen (s. Abb.1). Es lassen sich nun konkrete Hypothesen bezüglich pedologischer Mechanismen aufstellen:

- Verminderung degradativer Erosion durch Verringerung der Erosivität durch Verlangsamung von Wind und Wasser unmittelbar an der Bodenoberfläche und Verringerung der Erodierbarkeit durch extrem hohe Impakt-schwellenwerte der entstehenden Streuschicht^[7]

- maximierter Anteil der Nutzpflanzentranspiration an der Evapotranspiration^[8]
- minimierte (aktuelle) Evaporation durch Beschattung und Windverlangsamung, außerdem durch enorm geringe ψ_m in der natürlich entstehenden Mulchschicht; Ausgleich ansteigender ψ_m in oberflächennahen Schichten^[9]
- erhöhte Infiltrationskapazität durch dauerhaften Schutz sowie Förderung der Sorptivität und herbeiführen von „fingering“ in Makroporenflüssen (durch mechanischen Schutz und optimale Bedingungen für Wurmart und Enchyträen, die Makroporenstrukturen fördern)^[10]
- Lenkung der biotischen Aufbauefügegenese (Ziel ist hierbei das Erreichen eines Schwammgefüges im Gegensatz zum – in der herkömmlichen Landwirtschaft tendenziell auftretenden – Fragmentgefüge^[11]) hin zu einem der Dürresilienz zuträglichen Mikrogefüge mit erhöhter nFK durch:
 - hohe Gehalte organischer Substanz^[12]
 - Förderung der Humifizierung^[13]
 - verringerte Lagerungsdichten durch eine Maximierung der Bioturbation (Förderung des Edaphons) und die Förderung des mikrobiellen Aufbaus von Stabilisatorstoffen (hauptsächlich Polyuronide und Polysaccharide; außerdem von Huminstoffen) sowie die Bildung Organo-Mineralischer Verbindungen (wie Ton-Humuskomplexe)^[12]
 - dadurch eine Förderung von Kapillarwasser im Mittelporenbereich (pF=4,2 → PWP und pF=1,8 → FK und somit im Bereich der nFK)^[14]
 - Erhöhte Adsorption von Wasser durch große spezifische Oberflächen, die elektrostatische Wechselwirkungen aufweisen (insbesondere Huminstoffe); dadurch erhöhte volumetrische Wassergehalte bei allen pF-Werten (insbesondere aber unterhalb von pF=1,8)^[15]
 - ganz besonders (!) die Kontinuität des Zustandes, da sich nur so das (Mikro-)Biom des Bodens entsprechend entwickeln kann (nicht zuletzt, da das Haftwasser ein wichtiges Reaktionsmedium und das Millieu mikrobieller Aktivität darstellt^[16]) und das dynamische Gleichgewicht des Aufbauefüges (bspw. im permanenten Auf- und Abbau von Stabilisatorstoffen) andernfalls immer wieder gestört wird^[17] und die niemals vollständig reversiblen (unvorteilhaften) Gefügeänderungen durch Schrumpfung und Quellung so minimiert werden^[18].
- erhöhter transpirationsgetriebener kapillarer Aufstieg in den Wurzelraum durch höhere Wasserleitfähigkeitskoeffizienten und ψ_m im Wurzelraum^[19], weil hier die biotische Aufbauefügegenese dahingehend aufgrund potentieller Mykorrhiza, abgestorbener Wurzelreste, Wechselwirkungen der Pflanzenwurzeln etc. besonders stark wirken müsste

Arbeitspraktisch/ökonomisch und synökologisch lassen sich außerdem folgende Hypothesen aufstellen:

- verbesserte Aufwuchsbedingungen der Kulturpflanzen durch Schutzfunktion des stehenden Bewuchses
- mögliche Mutualismen
- generell erhöhte Resilienz des Agrarökosystems (u.a. durch die erhöhte Dürresilienz, damit verbunden auch einem effizienteren Nährstoffhaushalt, höhere Biodiversität etc.)
- einfache Ernte (ggf. mit Mähdrescher) durch unterschiedliche Ernte- und Hauptwachstumszeiten
- optimale Ressourcennutzung durch zeitliche Effizienzsteigerung und eben verbesserten Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt

3 Praktische Erforschung der WEP

Um die Anbaumethode erproben und später wirtschaftlich nutzen zu können, muss nach dem Grundkonzept der Methode eine konkrete Kultur entworfen werden. Dazu müssen Pflanzen ausgewählt werden, die optimal zum Grundkonzept passen. Durch die Auswertung bestehender Daten zum Anbau in Fruchtfolgen sowie im Gemengeanbau und die Betrachtung von Wuchs- bzw. Entwicklungsstadien habe ich eine mögliche Beispielkultur entwickelt. Es hat sich schließlich die Kombination eines Wintergetreides mit einer Sommerleguminose und

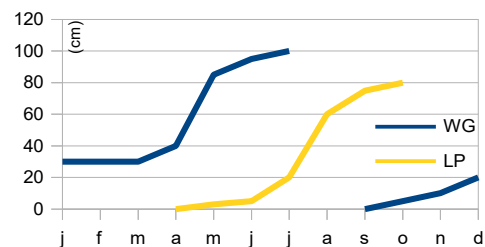


Abb. 2 Wuchshöhen WG + LP (ca.)

dann explizit von Wintergerste (*Ihordeum vulgare*) mit schmalblättrigen (auch blauen) Lupinen (*lupinus angustifolius*) als besonders vielversprechend gezeigt. Gründe für die besondere Eignung sind:

- Die Vegetationsphasen ergänzen sich sehr gut (siehe Abb.2). Insbesondere im Abgleich der EC-Stadien* zeigt sich, dass die Wintergerste besonders wenig Laub trägt, während die Lupine keimt; da die Lupine ihr Laub kurz vor der Ernte weitgehend verliert, gilt das gleiche für die Gerste.
- Die Wuchshöhen lassen eine Ernte mit dem Mähdrescher zu (arbeitspraktisch und wirtschaftlich).
- Die blaue Lupine ist zwar weniger ertragreich, als bspw. die weiße Lupine, dafür aber deutlich widerstandsfähiger – insbesondere gegen die häufige Anthraknose-Erkrankung^[20].
- Mutualismus zwischen Lupine und Wintergerste über Knöllchenbakterien (Stickstoff).
- Gerstenstroh weist in Relation zu anderen anuellen Pflanzen hohe Ligninanteile (ca. 20%)^[21] auf.
- Stützende Funktion der Gerste für die Lupine.

- Unterschiedliche Hauptwurzelsräume führen zu unterschiedlichen Wasserquellen und Biomasseertrag in verschiedenen Tiefen des Pedons.
- Da Getreide in anhaltenden Trockenphasen geerntet werden muss, entstehen üblich Umbruchphasen, in der degradative Zyklen (s.o.) exzessiv beschleunigt werden. Insbesondere die Gerstenproduktion wird also optimiert.

3.1 Versuchsaufbau

Die Kernproblematik bei der praktischen Erforschung der WEP ist – wie generell bei Agrarsystemen als offene Systeme – das Erreichen einer Ein-Faktor-Analyse. Um dieser möglichst nahe zu kommen, habe ich meine Versuche in dafür präparierten Kunststoff-tanks (mit Löchern, Vlies und einer Kiesschicht versehene, halbierte IBC-Tanks) und mit einer homogenisierten (Erdmischer) Erde durchgeführt. Außerdem habe ich in jeweils doppelter Ausführung die WEP-Kultur (in Tank 2 u. 3) und eine Vergleichskultur (herkömmlicher Anbau als Fruchtfolge) angebaut. Um auch innerhalb der Tanks laterale Oberflächenabflüsse zu ermöglichen, habe ich auf Innen-Bodenniveau Abflusslöcher gesetzt. Der Versuch sollte über 1,25 Jahre laufen, sodass beide Überschneidungsphasen und die besonders dürrerelevante Sommerphase beobachtet werden können. Durch die Starkregenereignisse am 14.07.21 wurde der Versuch so stark beschädigt, dass danach nur noch eingeschränkt geforscht werden konnte. Die Kulturen (v.a. die Lupinen) wurden leider vollständig zerstört; glücklicher Weise konnten auch nach den Flutereignissen aber noch belastbare Bodenproben



Foto 1: Versuchsaufbau

entnommen und analysiert werden. Außerdem ergaben sich ausgesprochen interessante Messwerte bezüglich der Infiltration bei starken, punktuellen Niederschlägen.

3.2 Messdaten (während des Versuches)

Um maximal belastbare Ergebnisse zu erzielen, ist es notwendig, möglichst genaue und zahlreiche Messungen durchzuführen. Aus der vergleichenden Analyse von Wetter-, Pflanzen- und Bodenfeuchtedaten können Rückschlüsse gezogen werden, wie der Boden auf bestimmte Wetterphänomene „reagiert“ und Aussagen über die Funktion der Anbaumethode evaluiert werden. Folgende Methoden habe ich daher angewendet:

Messgerät	Parameter	Dokumentation und Verarbeitung der Daten:
Bodenfeuchtemesser	Bodenfeuchte in 20 cm Tiefe	Wöchentliche, manuelle Messung an jeweils fünf Messpunkten in jedem der vier Tanks → Durchschnittswert für jeden Tank
Maßstab	Wuchshöhen	Wöchentliche Messung; jeweils Messung der höchsten Pflanzen und Ermittlung eines (ungefähren) Durchschnittes (Neben Relevanz für das Konzept auch Aussage über Vitalität der Pflanzen)
Fotoreihen	Visualisierung der Methode	Mithilfe eines festen Stativs wurden wöchentlich alle Kanister aus identischen Positionen seitlich und von oben fotografiert
Wetterstation (Vantage pro 2 der Schule)	Wind (Geschw.+ Summe) ; Regen (Rate + Summe); Temperatur; Sonneneinstrahlung; (Intensität + Energie) (Es wurden noch mehr Daten erfasst)	Die Wetterstation wurde tiefer als üblich aufgebaut, damit Wettereinflüsse nah an den Versuchsflächen gemessen werden konnten. Zur Auswertung wurden spezifische Phasen ausgewählt (bspw. Phasen extremer Trockenheit, starken Niederschlags etc.).

Da über einen langen Zeitraum sehr viele Parameter erfasst wurden, können hier nur einige Daten gezeigt werden. Hier (nächste Seite) ausgewählte Mess- und Dokumentationsdaten zum Intervall: April bis Flut – Beginn der 1. Überschneidungsphase (Wuchshöhen: Beginn bis WG-Ernte):

Aus den ersten drei Grafiken lässt sich deutlich ablesen, wie die Aussaat der Lupine auf den Bodenwasserhaushalt wirkt: Die Aussaat der Lupine erfolgte am 11.04.21. Für die Aussaat der Lupine wurde die über den Winter aufgebaute Streuschicht sowie die oberste Bodenschicht leicht geöffnet (s. Foto 2). Durch den recht ergiebigen Regen vom 5. bis zum 12.04. steigen die Wassergehalte in allen Tanks insgesamt an. Die WEP-Tanks zeigen jedoch geringere Anstiege, als die Vergleichskultur. Auf die Regenfälle folgte eine warme Phase mit hohen Sonneneinstrahlungen. Die frisch besäten WEP-Tanks verlieren deutlich mehr Wasser, als die Vergleichstanks und können den nun punktuell auftretenden Regen kaum aufnehmen. Dieser Trend setzt sich fort und verstärkt sich in der besonders starken Phase von Hitze, Wind und Sonneneinstrahlung (am 13.06. war die Erde durch die Trockenheit zu hart, um Messungen durchzuführen). Grund für diese Phänomene sind die, entgegen der biotischen Aufbaueffizienz wirkenden, schnell einsetzenden Mechanismen. Durch die anthropogene Störung der Bodenoberfläche (hier durch Aggregatzerstörung^[10]) wird insbesondere die Sorptivität

(s) verringert. Die Infiltrationskapazität nimmt schnell ab. Wie sich über die Gleichung von Philip beschreiben lässt, ist diese insbesondere zu Beginn von Infiltrationsvorgängen wesentlich. Durch die Störung der Sorptivität aber auch der Wasserleitfähigkeit (ausgedrückt durch den Wasserleitfähigkeitskoeffizienten k^0) kommt es recht schnell zu Oberflächenwasser, welches dann lateral abfließt und Verschlämmung sowie Krustenbildung (auf Ebene des Mikrogefüges) hervorruft^[10]. Dadurch erfolgt dann eine positive Rückkopplung auf die Verringerung der Sorptivität (diese wird also noch geringer), was sich bei den punktuell auftretenden Regenfällen zwischen 18.04.21 und 03.06.21 widerspiegelt.

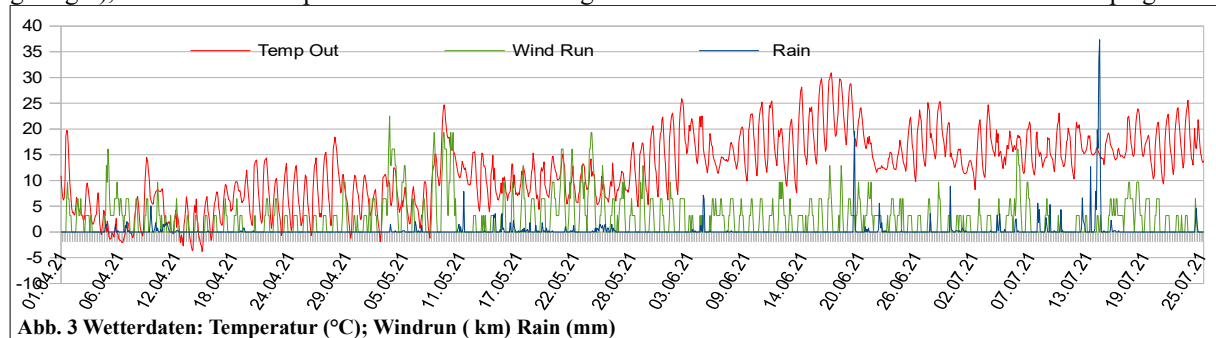


Abb. 3 Wetterdaten: Temperatur (°C); Windrun (km) Rain (mm)

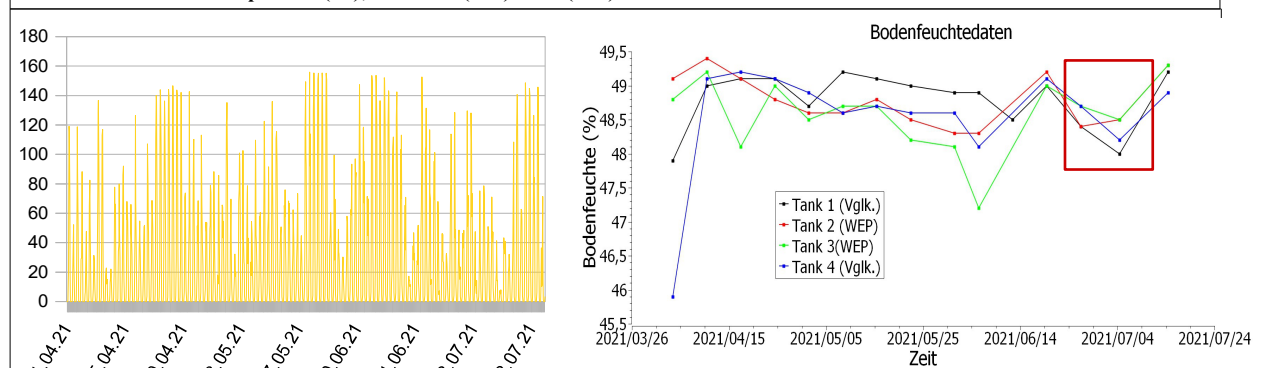


Abb. 4;5: Wetterdaten: Solar Energy (LY); Bodenfeuchtemessungen (%)

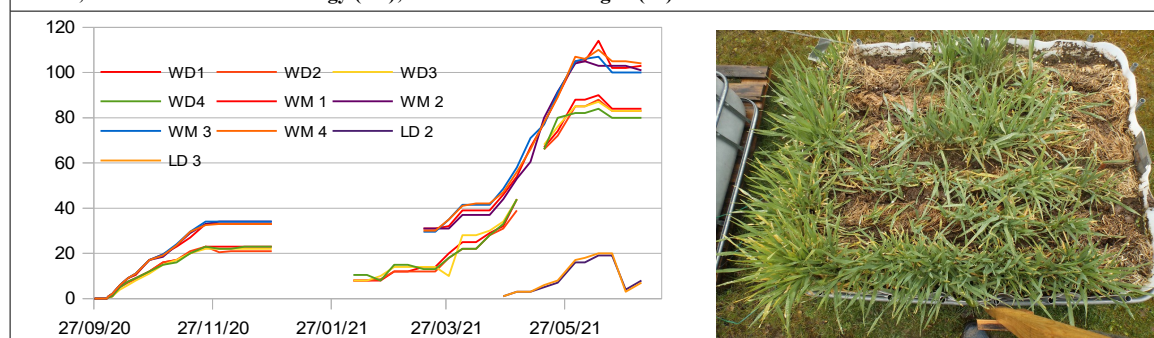


Abb.6: Wuchshöhen von Wintergerste und Lupine (M = max.; D = Durchschnitt); Foto 2 (11.04.; oben; T 2)

Der Eingriff wirkt sich jedoch nicht nur auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens, sondern auch auf die Prozesse des Wasserverlustes aus, wie sich aus den beeinflussten (nach dem Eingriff tendenziell immer heftiger verstärkten) Bodenfeuchteabnahmen ablesen lässt. Da nur die Bodenoberfläche gestört worden ist (und in einer solch kurzen Zeit noch keine Veränderungen im Prozess des kapillaren Aufstieges in den Wurzelraum sowie im Dränungsverhalten zu erwarten sind^[22]) und die Wasserverluste parallel zu besonders heißen, trockenen Phasen auftreten, ist mit einer Veränderung in der Evapotranspiration zu rechnen^[9]. Weil durch den Eingriff keine gesteigerte Transpiration zu erwarten ist (eher im Gegenteil, aufgrund potentiell zerstörter Pflanzen), muss sich das Verhältnis von Evaporation zur Transpiration innerhalb der Evapotranspiration hin zur Evaporation verschieben. Dies lässt sich durch die allgemeinen physikalischen Abhängigkeiten der Verdampfung (E) untermauern, denn es gilt: $R_e(1-r) = R_a + E + H$ ^[23] ($R_e \triangleq$ Energieeinstrahlung; $R_a \triangleq$ Abstrahlung; $r \triangleq$ Albedo; $H \triangleq$ Wärmeableitung in die Atmosphäre). Durch die gestörte Streuauflage erhöht sich die Energieeinstrahlung auf die Bodenoberfläche (nicht nur aufgrund der sichtbar hohen Albedo der Gerstenstreu (s. Foto 2) und auch die Evaporation steigt. Insbesondere verdeutlicht aber die Dalton-Gleichung den Zusammenhang für die potentielle Evaporation:

$E = f(u)(e_s - e)$ ^[23]. Sie bezieht zusätzlich die Windgeschwindigkeit u mit ein. Durch den Abtransport von Wasserdampf wird so dessen Diffusion in die Atmosphäre angetrieben^[9]. Dass u an der Bodenoberfläche nach dem Eingriff erhöht ist, ergibt sich aus dem verringerten mechanischen Schutz der Streuauflage (und ggf. lebende Pflanzen). Zusätzlich wird durch den Ausdruck $(e_s - e)$ das Sättigungsdefizit an Wasserdampf (und somit ein Dampfdruckgefälle) für insgesamt potentielle Verdunstung inkludiert^[9]. Die weiteren Veränderungen bezüglich des Dampfdruckes lassen sich am besten über die *Fickschen*

Gesetze verstehen. Das Wasser im Boden diffundiert nicht zufällig gasförmig aus dem Boden heraus, sondern – wie auch bei jeder Wasserbewegung in flüssiger Phase – gemäß physikalischer Potentiale. Dabei wird stets der Zustand der maximalen Entropie angestrebt. Beim Wasserdampf sind, im Vergleich zur sonstigen Wasserbewegung, die dabei relevanten Größen recht gut zu überblicken. Erstens kann (in tieferen Bodenschichten) praktisch immer von einem mindestens 90%-igen Sättigungsgrad an Wasserdampf in der Bodenluft ausgegangen werden^[23]. Zweitens ist das antreibende Potential immer durch den Konzentrationsgradienten des Wasserdampfs (s. 1. Ficksches Gesetz) ausdrückbar^[24] (nicht wie in flüssiger Phase, bei der mehrere Potentiale relevant wirken können). Der Diffusionskoeffizient D_B ist analog zu k_0 . Da sich nicht nur die Einstrahlung auf die Bodenoberfläche, sondern auch ihre Gefügestruktur verändert hat, muss die aktuelle (nicht die potentielle) Evaporation als reale Veränderung betrachtet werden^[9]. Die aktuelle Evaporation bezieht ein, dass eine Verdunstung nur so lange erfolgt, wie Wasserdampf an die Schnittstelle zur Atmosphäre transportiert wird. An dieser Schnittstelle verändert sich dementsprechend der Konzentrationsgradient mit der Zeit – ein instationärer Zustand liegt vor, welchen das 2. Ficksche Gesetz über eine Differentialgleichung beschreibt. Es zeigt sich, dass unter Erhaltung der Masse die zeitliche Änderung der diffundierenden Teilchen proportional zur zweiten Ableitung der Konzentration nach dem Ort ist (s. 2. Ficksches Gesetz^[25]). Auf die Vorgänge an der Bodenoberfläche bezogen bedeutet dies, dass wenn ein Zwischenmedium mit geringer Wasserdampfkonzentration vorliegt (bspw. eine Schicht grober Aggregate oder eben eine Streuschicht), dann kann diese als „Barriere“ die Wasserdampfdiffusion zeitlich limitieren^[23]. Das wird nach dem Eingriff vermutlich unterbunden, da nach der Bearbeitung Teile sogar etwas tieferer Schichten in direktem Kontakt zur Atmosphäre stehen. Das Ergebnis zeigt sich in der vergleichenden Analyse von Wetter- und Bodenfeuchtedaten, wenn die bearbeitete Fläche immer weiter austrocknet, ihre aktuelle Evaporation ist gewissermaßen näher an ihre potentielle Evaporation herangerückt.

Dieser Trend beginnt sich etwa ab dem 20.06. zu verlangsamen, bis er sich Anfang Juli eindeutig umdreht. Die besäten WEP-Tanks verlieren nun bei den bis zum 12.07. hohen Temperaturen, Sonneneinstrahlungen und t.w. starken Winden weniger Wasser als die Vergleichstanks (geringere Abnahme). Bei den Starkregenereignissen am 14.07.21 zeigen insbesondere die WEP-Kulturen eine erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit. Grund für diese Trendumkehr ist die Beschaffenheit der WEP-Anbaumethode. Dadurch, dass die Bodenoberfläche nur minimal und in Teilen gestört wird, kann sich diese besonders schnell regenerieren und positive Rückkopplungen degradativer Zyklen werden früh unterbrochen. Die Streuschicht ist nur teilweise beschädigt und wird zügig (durch bspw. Bioturbation) geschlossen. Mikroorganismen aber gerade auch das Edaphon der Meso- und Makrofauna können die zunächst beschädigten Streifen aus den unbeschädigten Zonen heraus schnell wieder besiedeln und (z.B. in Form von Enchyträengängen oder mikrobieller Schleimstoffproduktion) wichtige Eigenschaften des Bodenwasserhaushaltes (s.o.) positiv beeinflussen. Hinzu kommt die aufwachsende Lupine, welche durch mechanischen Schutz die potentielle Evaporation sowie degradative Erosion (sowohl in Erosivität als auch Erodierbarkeit) verringert. Zusätzlich könnten die Ergebnisse hier bereits durch Veränderungen im kapillaren Aufstieg in den Wurzelraum (in dem die Messungen durchgeführt werden) beeinflusst worden sein (s.Kap.3.4).

Die Daten zeigen also zum einen, dass bei einer Störung der Bodenoberfläche ein direktes Herabsetzen der Bodenfunktionen sichtbar ist. Zum anderen, dass dies bei der WEP in besonders geringem Maße und sich umkehrend erfolgt. Leider konnten durch die Starkregenereignisse keine Daten aus der Umbruchphase zwischen den Kulturen in den Vergleichstanks gemessen werden; die Vermutung, dass dort besonders starke Schädigungen zu erwarten gewesen wären, wird jedoch bestärkt.

Die Wuchshöhen waren wie erwartet. Höhenminderungen bei der Gerste sind auf Schneelast bzw. absterbende Pflanzenteile im Zuge der Vernalisation bzw. die Kornfüllung im Juli zurück zu führen. Durchschnittshöhenminderungen der Lupine liegen in einer Nachsaat begründet, die ich durchführen musste, weil die Keimraten der Lupine zunächst zu gering waren. Das kann entweder an zu geringer Aussaat, einer nicht optimal angepassten Lupinensorte, nicht optimalen Keimbedingungen durch die Wintergerste (zu geringer Abstand?) oder ungünstigen Wetterverhältnissen liegen. Dem müsste in langfristigeren Studien nachgegangen werden.

3.3 Anschließende Bodenanalysen

Um die Beobachtungen während des Versuches zu untermauern und sie insbesondere in ihren Ursachen und Zusammenhängen einzuordnen sowie langfristige Prognosen fundieren zu können, habe ich verschiedene analytische Verfahren genutzt. Die erste Herausforderung war es, die richtigen Analyseverfahren auszuwählen. Nicht alle interessanten Aspekte des Bodenwasserhaushaltes sind (überhaupt oder für mich) direkt messbar. Zudem beleuchten einige Messverfahren für sich nur recht diffus Zusammenhänge. Mein Ansatz war es, gewissermaßen „Knotenpunkte“ in dem komplexen Netz des Bodenwasserhaushaltes auszuwählen, die konkret für die Beeinflussung durch die WEP wichtige Veränderungen beleuchten. Aus der Vernetzung der Messergebnisse lässt sich dann ein Bild des Bodenwasserhaushaltes und insbesondere der Vorgänge an der Bodenmatrix erschließen. Folgende Verfahren habe ich ausgewählt, teilweise abgewandelt, angewendet und ausgewertet:

3.3.1 Infiltrationsratenmessungen

Bereits durch den Vergleich von Bodenfeuchte- und Wetterdaten konnte ich – insbesondere durch die Starkregenereignisse – Rückschlüsse auf die Infiltration ziehen. Genauer und aussagekräftiger sind natürlich direkte Infil-

1.Fick'sches Gesetz^[23]
(stationäre
Diffusionsströmung):
$$q = D_B \frac{(\partial c)}{(\partial x)}$$

2.Fick'sches Gesetz^[23]
(instationäre
Diffusionsströmung):
$$\frac{(\partial c)}{(\partial t)} = D_B \frac{(\partial^2 c)}{(\partial x^2)}$$

trationsratenmessungen. Bei den erhobenen Daten ist dabei der Zeitpunkt der Messung zu betrachten: Ich habe nach der Ernte der Wintergerste und somit nach den Starkregenereignissen gemessen. Zu diesem Zeitpunkt ist zu erwarten, dass Unterschiede in der Infiltration besonders deutlich sichtbar sind. Ganz besonders die Starkregenereignisse haben sicherlich die Unterschiede besonders drastisch verstärkt, da eine früher eintretende Überschreitung der aktuellen oder kumulativen Infiltration zu früher auftretenden lateralen Oberflächenabflüssen führt^[10]. Diese wiederum verringern die Infiltrationskapazität über ein Herabsetzen der Sorptivität durch Verschlammung sowie der hydraulischen Leitfähigkeit (insbesondere durch Zerstörung von Makroporenstrukturen, wodurch das „fingering“ an der Befeuchtungsfront unterbunden wird^[10]). Die Starkregenereignisse betonen also die Unterschiede in der Infiltration zusätzlich, indem sie die Infiltration umso stärker verringern, je geringer diese bereits ist. Genutzt habe ich zur Messung ein selbst gebautes Infiltrometer (s. Foto 3). Zwei verschieden große Ringe werden ineinander einige cm in den Boden geschlagen. Der äußere Ring wird zeitlich vor und während der Messung konstant mit Wasser gefüllt, sodass keine lateralen Wasserflüsse durch Potentialdifferenzen entstehen. Im inneren Ring wird nun die Infiltrationsrate gemessen (Infiltrationsmenge pro Flächen- und Zeiteinheit). Wichtig ist, dass nur bis zu einem Wasserstand von 5-10cm im inneren Ring gemessen und zum Wasserbefüllen ein Tuch eingelegt wird, um künstliche Verschlammung zu verhindern. Typischerweise ist bei der Messung die anfängliche Infiltrationsrate sehr hoch, fällt dann aber auf einen konstanten, recht belastbaren Wert. In fünffacher Durchführung habe ich einen solchen Wert in jeweils zwei verschieden behandelten Tanks bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 grafisch dargestellt:



Foto 3

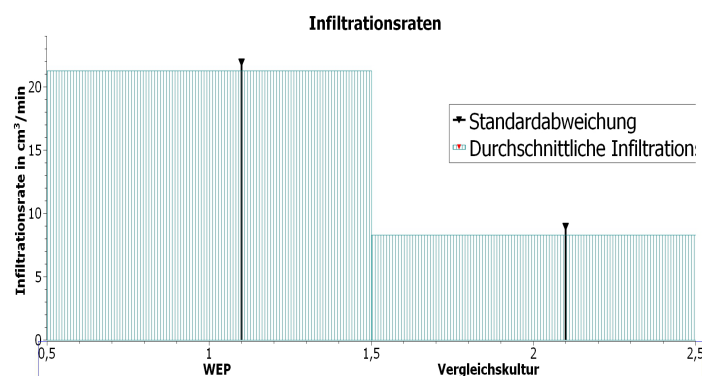


Abb. 7 Ergebnisse Infiltrationsversuch

Bei einer sehr geringen Standardabweichung von $0,658 \text{ cm}^3 / \text{min}$ zeigen die WEP-Tanks durchschnittliche Infiltrationsraten im Gleichgewichtszustand von $21,238 \text{ cm}^3 / \text{min}$ – die Vergleichstanks lediglich von $8,282 \text{ cm}^3 / \text{min}$. Die Vermutung/ Beobachtung aus Kap.3.2 einer erhöhten Infiltrationskapazität durch die WEP lässt sich also fundiert verifizieren. Die Infiltration ist klimawandelbedingt gleich doppelt relevant: Erstens weil Agrarsysteme, die das punktuell auftretende Wasser optimal aufnehmen können dürreresilienter sein werden, zweitens weil auch Starkregenereignisse häufiger zu erwarten sind und diese bei einer gesteigerten Fähigkeit des Bodens, Wasser aufzunehmen – im Interesse der gesamten Gesellschaft – besser abgedeckt werden können.

3.3.2 pF-Kurven-Bestimmung (nicht tensiometrisch)

Den umfangreichsten Aufschluss über die konkreten Vorgänge an der Bodenmatrix geben pF-Kurven (auch Retentionskurven). Sie geben Aufschluss über die auf das Bodenwasser wirkenden Potentiale im Boden. In der Pedologie ist der Begriff des Potentials als die aufzubringende Arbeit definiert, die notwendig ist, um eine gegebene Menge von Wasser zu einem anderen Bezugspunkt zu transportieren^[26]. Um Wasser entgegengesetzt der Gravitation zu bewegen, muss Energie aufgebracht werden. Durch seine Lage verfügt das Wasser dann über Energie, weswegen ein Gravitationspotential (ψ_z) definiert werden kann. Gemäß des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik^[27] wird angestrebt, diese Energie wieder abzugeben. Dem wirken andere Potentiale entgegen. Diese Potentiale sind es, die für den Bodenwasserhaushalt besonders relevant sind. Grund dafür ist erstens, dass Ihre Qualität maßgeblich die Wasserspeicherkapazität des Bodens begründet, zweitens jegliche Wasserflüsse im Boden beeinflusst und drittens (im Gegensatz zur Gravitation) beeinflussbar sind. Ihre systemökologische Beeinflussung ist Kern meiner Arbeit. Um bezüglich der Potentialverhältnisse konkrete Aussagen formulieren zu können, ist ein Bezugsniveau erforderlich. Dieses wird so gewählt, dass ψ_z positive Werte aufweist^[26]. Als Haftwasser gebundenes Wasser erfährt durch die Bindung (chemisch betrachtet korrekt nur eine Wechselwirkung) an die Bodenmatrix einen Energieverlust. Es muss Energie aufgebracht werden, um das Wasser von den Bodenteilchen zu lösen^[26]. Von der Gravitation geht eine gewisse Energie aus, die jedoch zu gering ist, um diese Bindung zu lösen (sobald sich dieser Zustand verändert, wird das Haftwasser zu Sickerwasser → s.o.). Auch die Bindung an die Bodenmatrix versetzt das Wasser mit Energie und ist somit ein energetisches Potential. Dieses – (im statischen Zustand) dem Gravitationspotential entgegenwirkende – Potential wird als Matrixpotential (ψ_m) bezeichnet, da es die potentielle Energie bezüglich der Bodenmatrix betrifft^[28]. Der Betrag des Matrixpotentials (als dem ψ_z entgegenwirkend ist es negativ) ergibt die Wasserspannung, mit der das Bodenwasser gehalten wird¹. Weitere wir-

1 Dieser Zusammenhang existiert nur theoretisch, da er einen statischen Zustand beschreibt, der im Boden

kende Potentiale sind: *osmotisches Potential* (ψ_o), *Gaspotential* (ψ_g), *Druckpotential* oder *piezometrisches Potential* (ψ_h oder ψ_p). Alle Teilpotentiale des Wassers zusammen bilden das *Gesamtpotential* (ψ). Real wird aus den relevantesten Potentialen (meist Matrix- und Gravitationspotential^[26]) das *Hydraulische Potential* (ψ_H) gebildet^[28].

Eine pF-Kurve bildet das Verhältnis zwischen dem Matrixpotential (dargestellt über den pF-Wert als negativ dekadischer Logarithmus der Saugspannung) und dem dazugehörigen Wassergehalt des Bodens an. Sie beschreibt also, welche Menge an Wasser ein Boden in welcher Qualität bindet. Der spezifische Verlauf der pF-Kurve eines Bodens lässt also Aussagen über die genaue, physikalische Beschaffenheit der Bodenmatrix in Bezug auf ihre Interaktion mit dem Bodenwasser zu. Um aus diesem spezifischen Verlauf Rückschlüsse ziehen zu können, müssen die Vorgänge an der Bodenmatrix genauer beleuchtet werden. Das Haftwasser wird an der festen Phase des Bodens (Bodenmatrix) konkret als Kapillarwasser oder hygroskopisch gehalten. Das Kapillarwasser befindet sich in Menisken, die sich zwischen Bodenteilchen ausbilden^[29]. Hygroskopisches Wasser wird über Kräfte der Adsorption im engeren Sinne (daher auch als Adsorptionswasser bezeichnet) und osmotische Kräfte an Bodenpartikel gebunden^[15]. Dies bedeutet, dass Wassermoleküle in drei bis vier Schichten durch vorwiegend elektrostatische Kräfte an die Oberflächen fester Bestandteile des Bodens gebunden sind^[29]. Wovon aber sind diese Kräfte abhängig? Relativ einfach erscheint zunächst die Beeinflussung der Kapillarkräfte. Sie hängen neben der Zusammensetzung der Bodenlösung (Kohäsionskräfte) maßgeblich von Porendurchmessern ab. Poren werden daher sogar nach ihrem Matrixpotential klassifiziert^[30]. „Je kleiner der Durchmesser [...] kapillare[r] Hohlräume ist, desto stärker ist die Bindung“^[15]. Die Adhäsion hingegen hängt nicht von Porengrößen zwischen Bodenpartikeln, sondern von deren Benetzbarkeit ab^[15]. Relevant sind zwischenmolekulare Wechselwirkungen der Partikeloberflächen; inkl. Einwirkungen elektrostatischer Felder durch Ionen. Somit führen Oberflächen, die stärkere solcher Wechselwirkungen ausbilden können, zu mehr Wasserspeichervermögen. Das Wasser lagert sich in mehreren Schichten an die Matrix an. Dabei nimmt die Saugspannung nach außen hin kontinuierlich ab. Zusätzlich ist natürlich der Oberflächeninhalt relevant. Dabei wird insbesondere die spezifische Oberfläche betrachtet.

Die Erstellung einer pF-Kurve dient mir daher weniger zur unmittelbaren Quantifizierung der Wasserspeichereigenschaften, als vielmehr zur Untersuchung der Bodenmatrix. Herkömmlich wird diese mithilfe eines Tensiometers und der Verdunstungsmethode bestimmt. In meinem Versuch habe ich ein alternatives Verfahren verwendet, welches für mich, unter etwas größerem zeitlichen Aufwand, unter den gegebenen Bedingungen besser durchführbar war – die Filterpapiermethode.

Als poröses Material weist auch Filterpapier eine spezifische, bekannte und leicht berechenbare pF-Kurve auf. Je nachdem, in welcher Qualität (bezogen auf die Saugspannung) Wasser vorliegt, wird unterschiedlich viel Wasser in das Filterpapier gesogen. Wird das Filterpapier in engen Kontakt mit einer Bodenprobe gebracht, kann also die stärkste wirkende Saugspannung ermittelt werden. Bsp.: Eine Probe wird mit einer bestimmten Menge Wasser versehen, sodass ihr Wasser mit mindestens mit pF=3 gehalten wird (pF-Wert ist zunächst unbekannt) → auch im Filterpapier füllen sich alle Poren, die Matrixpotentiale von pF ≥ 3 aufweisen. Ermittelt man den Wassergehalt des Filterpapiers, so kann man aus der Kalibrierungskurve den pF-Wert (hier =3) ablesen. Bestimmt man dann den Wassergehalt der Probe, so erhält man den entsprechenden

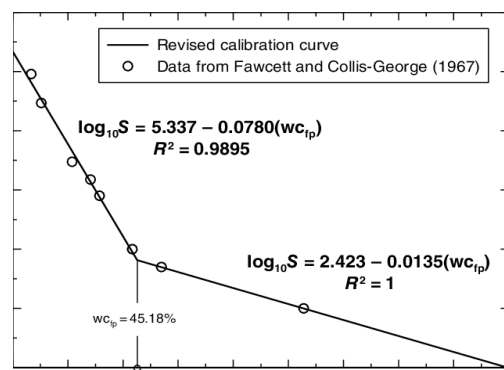


Abb.: 8^[31]

Datenpunkt einer pF-Kurve des beprobten Bodens. Um repräsentative Daten zu erhalten, habe ich 100 Bodenproben (jeweils 25 pro Tank) wie folgt behandelt:

1. Proben präparieren, sodass ca. 100cm³ unkomprimiert vorliegen.
2. Mittig in die Probe wird dabei ein Filterpapier mit bekannter pF-Kurve (Whatman-Filterpapier Nr.42) à 300,0 mg eingelegt, sodass ein guter Kontakt entsteht
3. 4x25 Proben werden je mit fünf verschiedenen Mengen Wasser versehen (in 2,5ml-Schritten)
4. Fünftägige Inkubationszeit an einem Ort mit minimaler Temperaturschwankung (≠Kondensation)
5. Präparieren des Filterpapiers (entnehmen, abbürsten)
6. Einwiegen des Filterpapiers (Genauigkeit: 1 mg) und der Proben (Genauigkeit : 0,1g).
7. Trocknen der Proben bei 105°C (Massebestimmung im ofentrockenen Zustand) für 5h und erneutes Einwiegen der Proben.
8. Aus den Gewichtsunterschieden des Filterpapiers kann dessen volumetr. Wassergehalt bestimmt werden.
9. Mithilfe der spezifischen Funktion des Whatman-Filterpapiers Nr.42 (s. Abb. 8) wird nun für jede Probe



Foto 4

praktisch niemals vorliegt. Dennoch ist seine Funktion von enormer Relevanz, da er der Zustand ist, zu dem das System in jedem (dynamischen) Zustand strebt.

der pF-Wert ermittelt

10. Aus den erfassten Daten kann der volumetr. Wassergehalt der Probe errechnet werden, der dann gegen den pF-Wert aufgetragen wird.

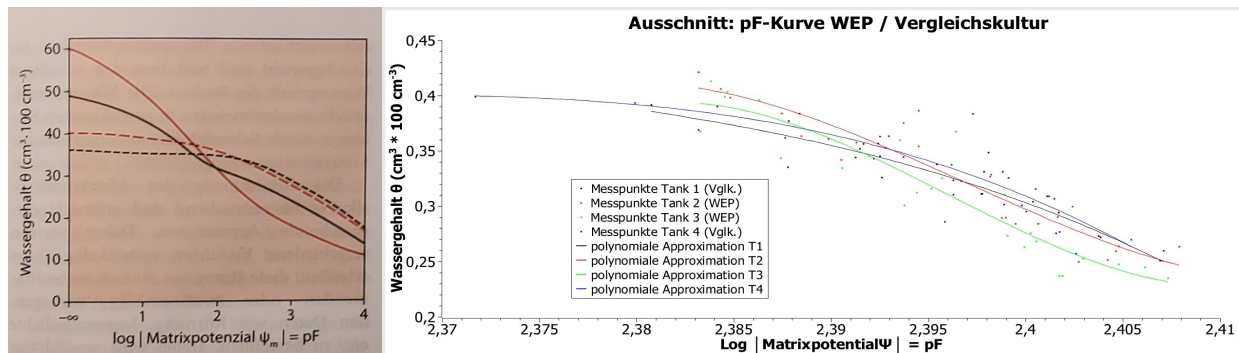


Abb. 9^[32]

Abb. 10

Mithilfe einer polynomialen Approximation 3. Grades habe ich aus den Messpunkten Kurven angenähert (s. Abb. 10). Es ist schwierig abzuschätzen, welches Intervall einer pF-Kurve man erhält, da dies nur durch den Grad der Bodenbefeuchtung beeinflusst werden kann. Ein besonders interessanter Ausschnitt der pF-Kurve liegt zwischen $\text{pF}=1,8$ und $\text{pF}=2,5$ vor. Dieses Segment ist in Bezug auf die Porosität der Bodenmatrix durch den Übergang von engen Grobporen zu Mittelporen gekennzeichnet (entsprechend der Einteilung nach Sekera und Boodt^[33]). In dem Abschnitt liegt auch der Punkt der maximalen Wasserspeicherkapazität im Zustand des statischen Gleichgewichts. Dieser Zustand existiert nur theoretisch bzw. in vitro, ist aber ein wesentlicher Kennwert für den Bodenwasserhaushalt. Er bildet die Feldkapazität FK ab. Kombiniert man diese mit dem permanenten Welkepunkt PWP (bei $\text{pF} = 4,2$), indem man den volumetrischen Wassergehalt der FK von dem des PWP (dann auch Totwasser genannt) subtrahiert, so erhält man die nutzbare Feldkapazität nFK. Diese ist besonders relevant, da sie Speicherkapazität für pflanzenverfügbares Wasser widerspiegelt^[34].

Mit der WEP möchte ich die nFK langfristig erhöhen. Innerhalb eines Jahres (durch die Starkregenereignisse sogar noch weniger) ist eine signifikant messbare Veränderung der nFK nicht zu erwarten gewesen. Das untersuchte Intervall kann aber Aufschlüsse bezüglich der Veränderungen an der Bodenmatrix geben, die dann langfristig auch die nFK beeinflussen. Die Untersuchung besonders kleinräumiger Phänomene ermöglicht hier valide, langfristige Aussagen^[35]. Aufgrund der o.g. Schwierigkeit wurde nicht das gesamte, zunächst erwünschte Intervall, abgebildet. Durch einen positiven Zufall liegt der besonders interessante Schnittpunkt der verschiedenen Kurven genau in der betrachteten Messreihe. Abb. 9 (aus dem Lehrbuch der Bodenkunde) zeigt die charakteristischen Kurvenveränderungen entsprechend spezifischer Lagerungsänderungen (bspw. durch Quellung und Schrumpfung). Insbesondere Sekundärporen beeinflussen diese Veränderungen^[36]. Somit kann der direkte Zusammenhang zur biotischen Aufbaufügegenese gezogen werden, welche hier bspw. durch die Verbindung über mikrobiell produzierte Stabilisatorstoffe (Polyuronide, Polysaccharide) wirkt. Die gemessenen Kurven lassen sich mit den Literatur-Kurven direkt vergleichen. Die WEP-Proben zeigen deutlich weniger flache pF-Kurven (Vgl.: durchgezogene Graphen) als die Vergleichskulturen, was auf eine verstärkte Bildung grober Sekundärporen hinweist^[37]. Daraus folgt eine erhöhte Bioturbation sowie eine Verstärkung sämtlicher schwammgefügebildender Prozesse^[11]^[38]^[36]. Diese abzulesenden Effekte sind in Bezug auf die Dürresilienz des Agrarsystems – insbesondere in ihrer Prozesshaftigkeit – positiv zu bewerten^[11] und entsprechen dem angestrebten Ziel der WEP.

3.3.3 Respirationsratenbestimmung

Ein besonders wichtiger Faktor der biotischen Aufbaufügegenese ist die Aktivität des Edaphons, explizit des mikrobiellen Edaphons^[17]^[12]. Da es unmöglich ist, dies auch nur näherungsweise mikroskopisch zu erfassen, habe ich als Anhaltswert für die mikrobielle Aktivität eine Respirationsrate ermittelt^[39]. Diese erfasst das entstandene CO_2 in einem definierten Zeitraum. Da dieses ein Produkt der Zellatmung ist, kann so auf die biologische Aktivität geschlossen werden. Die Messung der Respiration erfolgt wie folgt^[39]:

- Bodenproben definierter Masse (50 g) werden jeweils in Respirationskolben (250-ml-Erlenmeyerkolben mit Gummistopfen) gegeben (12fache Ausführung).
- Zusätzlich werden 10 ml NaOH definierter Konzentration in einem Röhrchen hinzugegeben.
- Es erfolgt eine einwöchige Inkubation im Dunkeln (um verfälschende Fotosynthese zu minimieren) bei möglichst konstanter Raumtemperatur. Respiriertes CO_2 der geht in die Luft des Respirationskolbens über. Aufgrund der Affinität von NaOH zu CO_2 wird dieses absorbiert und reagiert mit NaOH zu NaCO_3 und H_2O .
- $c(\text{NaOH})$ verringert sich, der pH-Wert sinkt und über eine Titration (mit HCl) kann man die Menge des reagierten CO_2 ermitteln. Da NaCO_3 mit HCl reagieren würde, muss das Carbonat vor der Titration ausgefällt werden. Üblich erfolgt dies mit BaCl_2 . Da mir $\text{Ba}(\text{OH})_2$ zur Verfügung stand, habe ich den Versuch dahingehend abgeändert, dass ich dieses zum Ausfällen verwenden konnte. Die Fällungsreaktion durch Ba^+ verläuft identisch, wie mit BaCl_2 . Lediglich muss die entsprechende Beeinflussung des pH-Wertes durch die so zugegebenen Hydroxid-Ionen einkalkuliert werden.

- Aus der verbrauchten Menge an HCl in der Titration (hier mit Phenolphthalein in Ethanol-Lösung als Indikator) kann die Respirationsrate berechnet werden. Um Standardwerte zu erhalten, wird dabei gewöhnlich mit zusätzlichen Blindproben, Inkubatoren etc. gearbeitet. Da mein Ziel der konkrete Vergleich der vier Versuchstanks war, habe ich jeweils drei Proben simultan unter identischen Bedingungen behandelt.
- Zusätzlich habe ich eine Blindprobe untersucht, um etwaige Verunreinigungen durch versuchsunabhängiges CO₂ aus der Raumluft einzukalkulieren und zu überprüfen, ob alle von mir gemischten Chemikalien in der korrekten Konzentration vorlagen. Die hierbei gemessene Abweichung betrug <0,25 ml der titr. HCl und kann somit vernachlässigt werden.

Aus den allgemeinen Formeln bezüglich Masse, molarer Masse, Volumen, Stoffmenge und Konzentration habe ich die für meinen Versuch passende Formel hergeleitet, mit welcher sich die Masse an CO₂ berechnen lässt, die mit der Natronlauge reagiert.



Foto 5

$$m(\text{CO}_2) = (0,1 \text{ mol/l}) * (0,01 \text{ l} - \frac{(0,1 \text{ mol/l}) * (V(\text{HCl}) - 0,01 \text{ l})}{0,2 \text{ mol/l}}) / 2 * 44 \text{ g/mol}$$

Es zeigt sich bei einer Standardabweichung von $\sigma = 1,92201 \times 10^{-3} \text{ g}$ eindeutig, dass die Proben aus den WEP-Versuchstanks durchschnittlich etwa $4,0685 \times 10^{-3} \text{ g/250ml}$ höhere Respirationsraten aufweisen, als die der Vergleichstanks (s. Abb. 12).

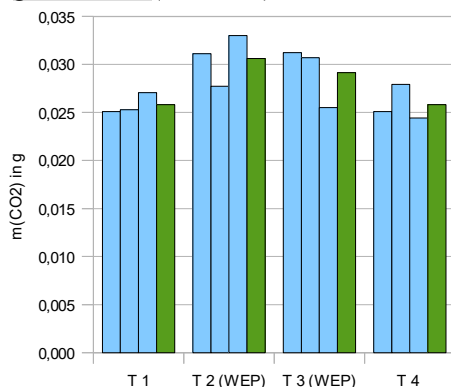


Abb.11

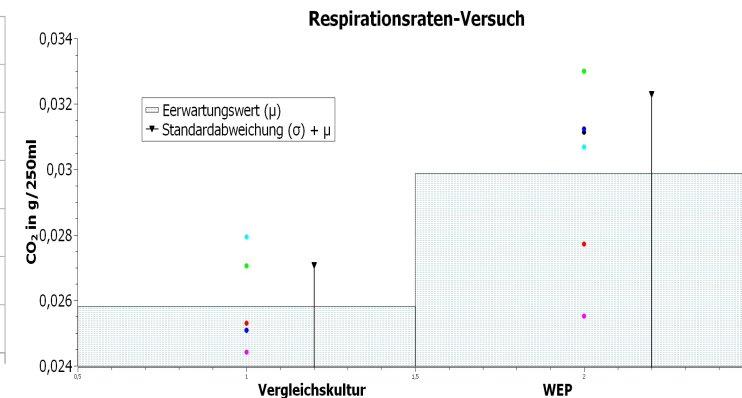


Abb.12

Um die Belastbarkeit meiner Messergebnisse zu überprüfen, habe ich mittels des Student-t-Tests (konkret eines Zweistichproben-t-Tests) für $H_0: \mu_{\text{WEP}} - \mu_{\text{VGL}} \geq \omega_0 = 0$; $H_1: \mu_{\text{WEP}} - \mu_{\text{VGL}} \leq \omega_0 = 0$ bei $\mu_{\text{WEP}} = 0,02988$; $\mu_{\text{VGL}} = 0,025813$ und $n = m = 6$ mit einem wissenschaftlich üblichen $\alpha \leq 5\%$ die Konfidenz meiner Daten ermittelt:

$$S_{\text{WEP}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{(x=1)}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{6} * ((0,03113 - 0,02988)^2 + \dots + (0,027720 - 0,02988)^2) = 5,82870 * 10^{-6}$$

$$S_{\text{VGL}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{(x=1)}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{6} * ((0,02508 - 0,025813)^2 + \dots + (0,0253 - 0,025813)^2) = 1,55956 * 10^{-6}$$

$$\Rightarrow S^2 = \frac{(n-1)S_{\text{WEP}}^2 + (m-1)S_{\text{VGL}}^2}{n+m-2} = \frac{(6-1)5,8287 * 10^{-6} + (6-1)1,55956 * 10^{-6}}{10} = 3,69413 * 10^{-6}$$

$$\Rightarrow T = \frac{\mu_{\text{WEP}} - \mu_{\text{VGL}} - \omega_0}{S} * \sqrt{\frac{n*m}{n+m}} = \frac{0,02988 - 0,0258115 - 0}{1,922011967 * 10^{-3}} * \sqrt{\frac{36}{12}} \approx 3,6664$$

Die Teststatistik T muss nun mit dem entsprechenden p-Quantil $t(p; v)$ einer t-Verteilung mit v Freiheitsgraden abgeglichen werden (ablesbar aus Quantiltabellen der Studentschen t-Verteilung). Für meinen Versuch ergibt sich als Freiheitsgrade ausgedrückt ergibt sich so: $t(p; v) = t(1 - \frac{1}{2} \alpha; n + m - 2) = 1,812 < T = 3,6664$

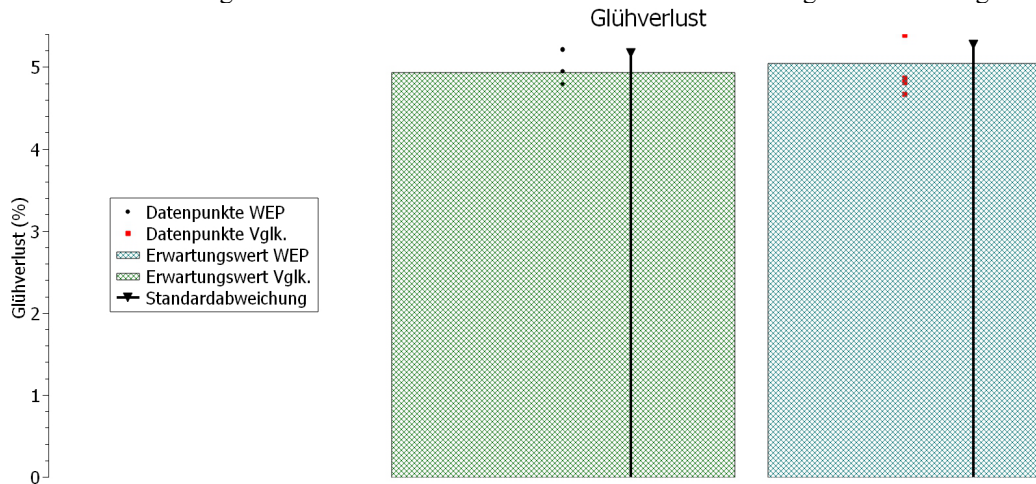
Die Irrtumswahrscheinlichkeit dafür, dass fälschlich eine höhere Respirationsrate bei den WEP-Bodenproben gemessen wurde, beträgt also weniger, als 5%. Dementsprechend kann mit einer Konfidenz von 95% behauptet werden, dass die gemessenen Respirationsraten der WEP-Bodenproben tatsächlich höher sind, als die der Vergleichskultur. Ein übliches Signifikanzniveau von 5% wird somit eingehalten.

3.3.4 Glührverlustbestimmung

Stoffliche Grundlage und Indikator der biotischen Aufbaufügegenese ist die organische Substanz des Bodens. Als Näherungswert für diese kann ein Glührverlust bestimmt werden^[40]. Dazu werden lutro Bodenproben bei 105°C im Trockenschrank getrocknet. Die Proben werden eingewogen, wodurch man den klassisch verwendeten Bezugswert der Masse ofentrockener Böden erhält. Bei 600°C werden die Proben nun geglüht – der so erzielte

2 In Ermangelung eines Laborofens habe ich einen Tonbrennofen zum Glühr verwendet. Dadurch sind keinerlei Verfälschungen zu erwarten^[40].

Masseverlust kommt durch verbrannte Organische Substanz und verdampftes Konstitutionswasser zustande. Leider ist bei der Durchführung des Versuches ein zunächst unscheinbarer Fehler unterlaufen, der die Messergebnisse jedoch stark beeinflusst hat. Es ergaben sich Ergebnisse, welche der aufgestellten Hypothese signifikant höherer Gehalte organischer Substanz in den WEP-Tanks und den bisherigen Beobachtungen entgegenstehen:



Die Vergleichskultur zeigt sogar minimal höhere Gehalte organischer Substanz, als die WEP-Proben. Die Differenz (0,1%) ist allerdings zu gering, um belastbare Aussagen treffen zu können – insbesondere bei einer Standardabweichung von

$$S_{WEP}^2 = \frac{1}{n} \sum_{(x=1)}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{4} * ((5,39 - 4,935)^2 + \dots + (4,81 - 4,935)^2) = 0,074275$$

$$S_{VGL}^2 = \frac{1}{n} \sum_{(x=1)}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{6} * ((5,21 - 5,0425)^2 + \dots + (4,79 - 5,0425)^2) = 0,03297$$

$$\Rightarrow S^2 = \frac{(n-1)S_{WEP}^2 + (m-1)S_{VGL}^2}{n+m-2} = \frac{(4-1)0,074275 + (4-1)0,03297}{10} = 0,05362 \Leftrightarrow S = 2,3157 = \sigma$$

Die Durchführung eines Zweistichproben-t-Tests bestätigte diese Annahme weiter, denn bei

$$T = \frac{\mu_{WEP} - \mu_{VGL} - \omega_0}{S} * \sqrt{\frac{n*m}{n+m}} = \frac{5,0425 - 4,935 - 0}{0,23157} * \sqrt{\frac{4*4}{4+4}} \approx 0,6565$$

wird bei einer Freiheitsgraden von $\nu = 4 + 4 - 2 = 6$ maximal lediglich ein p-Quantil von $t(0,7;6) = 0,553$ eingehalten. Um eine stichhaltige Aussage zu treffen ist dies zu gering.

Dass der Versuch nicht grundlegend falsch abgelaufen ist, zeigt sich an den ermittelten Werten, welche von ihrer Größenordnung her den zu erwartenden Messwerten entsprechen (2-6% + Konstitutionswassergehalt)^[41].

Als erste klassische Fehlerquelle ist der Masseverlust durch verdampfendes Konstitutionswasser einzubeziehen^[40]. Ton und Sesquioxide können daher die Messwerte stark beeinflussen. Bspw. dehydriert Goethit (FeOOH) zwischen 280 und 400°C zu Hämatid ($2\text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$).

Dass auch in meinen Bodenproben z.B. diese Reaktion stattgefunden hat, zeigt sich an der rotbraunen Färbung der Proben nach dem Glühen (s. Foto 6), welche dehydrierte Eisenoxide indiziert^[42]. Die Vergleichbarkeit der Daten wird nur gering beeinträchtigt, da ich durch die homogenisierte Erde als Substrat von sehr ähnlichen mineralischen Zusammensetzungen der Versuchspedone ausgehen kann. Die Varianz der Messergebnisse wird hierdurch allerdings leicht vergrößert.



Foto 6

Die Hauptfehlerquelle wird vermutlich aber in der Versuchsdurchführung liegen: Durch eine verschlossene Abluftklappe des genutzten Trockenschrankes, schlug der erste Schritt der Trocknung fehl und musste wiederholt werden. Die Proben wurden also erhitzt, dadurch getrocknet, durch später im Trockenschrank kondensierendes Wasser dann wieder befeuchtet und einige Tage darauf erneut getrocknet. Zunächst erschien mir dieser Fehler wenig problematisch – warum sollte sich durch einen fehlgeschlagenen Trocknungsvorgang bei 105°C der Glühverlust verändern? Eine Veränderung des Gehaltes organischer Substanz durch Verbrennung sollte erst ab Temperaturen von 325°C signifikant auftreten^[42]. Im Zuge meiner Fehleranalyse betrachtete ich u.a. die Beeinflussung der Bodenatmung durch Trocknungsvorgänge. Folgendes Phänomen ist vermutlich aufgetreten: Durch den Trockenvorgang wurde ein großer Teil der Mikroorganismenpopulation abgetötet. Bei einer darauffolgenden Wiederbefeuchtung kommt es zu einem besonders schnellen Anstieg der Mikroorganismen-Abundanzen. Grund hierfür ist, dass die Zellen zuvor abgestorbener Mikroorganismen eine besonders leicht zugängliche C- und N-Quelle darstellen^[43]. Das schnelle Populationswachstum ist mit kurzzeitig extrem hohen Respirationsraten Ver-

bunden, bei denen bis zu $\frac{3}{4}$ der insgesamt vorhandenen Biomasse schlagartig mineralisiert werden^[43]. Der Anteil des so verursachten Biomasseverlustes ist maßgeblich von zwei Faktoren abhängig:

1. der Stabilität der organischen Verbindungen
2. den Bedingungen für das mikrobielle Edaphon

Bei der „Begasungs-Inkubationsmethode“ bspw. macht man sich diese Zusammenhänge zur Messung des Gehaltes organischer Substanz zunutze^[44]. Da in der kurzzeitigen Versuchszeit (<1 Jahr) noch nicht mit signifikanten Anteilen von Huminstoffen zu rechnen ist^[45], müssen die Mineralisierungsprozesse maßgeblich von den Bedingungen des mikrobiellen Edaphons abhängen. Aus den Respirationsversuchen (Kap.3.3.3) ergibt sich, dass diese in den WEP-Proben deutlich günstiger sein müssen. Es folgt, dass signifikant höhere Gehalte organischer Substanz, als beim Glühverlust gemessen, in den WEP-Proben wahrscheinlich sind. Untermauern lässt sich diese These durch weitere Literaturwerte (bspw. zeigen Langzeitstudien (Versuchsflächen in Broadbalk) die Korrelation zwischen dem Gehalt an organischer Substanz und Respirationsraten auf. Es zeigt sich, dass höhere Respirationsraten mit höheren Gehalten organischer Substanz einhergehen (Jenkinson und Powlson 1976)^[46]).

Es kann in der Betrachtung der WEP aufgrund dieser Zusammenhänge und (insbesondere langfristig) durch den mengenmäßig höheren Verbleib von Biomasse auf den Flächen sowie Mechanismen der Humifizierung (s.u.) von erhöhten Gehalten organischer Substanz ausgegangen werden – auch wenn die Glühverlustbestimmungen dazu keine belastbaren Werte erbrachten. Eine genaue Quantifizierung und damit genauere Aussagen sind aufgrund des fehlgeschlagenen Versuchs hier nicht möglich. Auf eine Wiederholung des Versuches habe ich verzichtet, da:

1. durch die Vernetzbarkeit mit anderen, belastbaren Ergebnissen die Messung weniger relevant ist und
2. durch die zeitliche Komponente (der Versuch erfordert viel Zeit sowie hohe Aufwände und ist damit schwerlich spontan zügig durchzuführen) immer verfälschtere Daten zu erwarten sind, je später nach dem Feldversuch die Proben genommen werden.

3.3.5 Lichtmikroskopische Betrachtung

Besonders anschaulich zeigen sich die Veränderungen durch den Einsatz der WEP in der lichtmikroskopischen Betrachtung der Proben. Hier liegen ausgewählte Fotografien durch ein Lichtmikroskop bei unterschiedlichen Vergrößerungen vor. Die Schwierigkeit bei der Untersuchung des Bodengefüges liegt maßgeblich in der Präparierung der Bodenproben, sodass diese (mikroskopisch) betrachtbar und zugleich nicht in ihrer (Fein-)struktur möglichst unverändert sind. Häufig verwendet man daher zur genauen Analyse des Mikrogefüges Bodendünnschliffe von 20 – 30 μm Dicke verwendet. Diese können dann mit bis zu 70facher Vergrößerung lichtmikroskopisch untersucht werden. Mittlerweile können Bodendünnschliffe sogar elektronenmikroskopisch betrachtet werden. Auch die computerisierte Synchrotron-Tomographie wird zunehmend eingesetzt^[47]. Für meine Bodenanalysen konnte ich diese Verfahren nicht verwenden, was allerdings auch nicht notwendig ist.

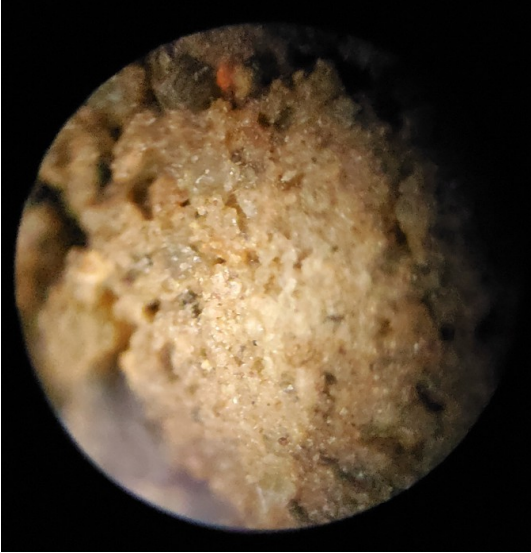
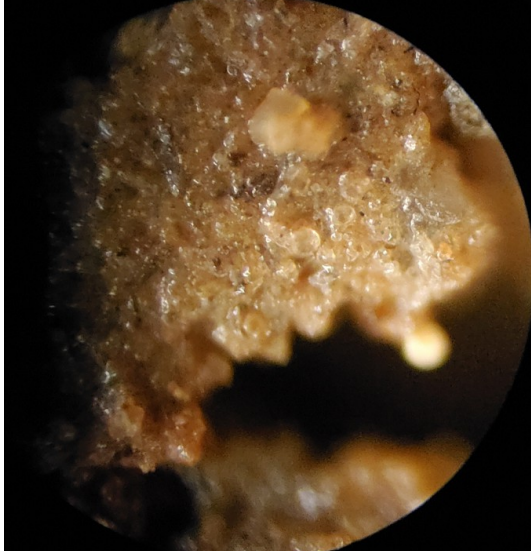
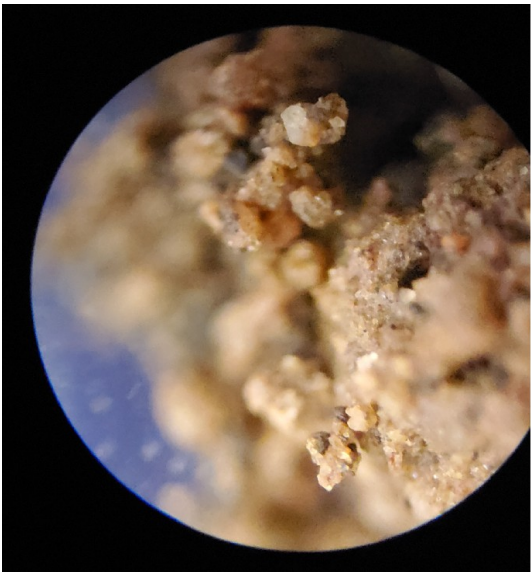
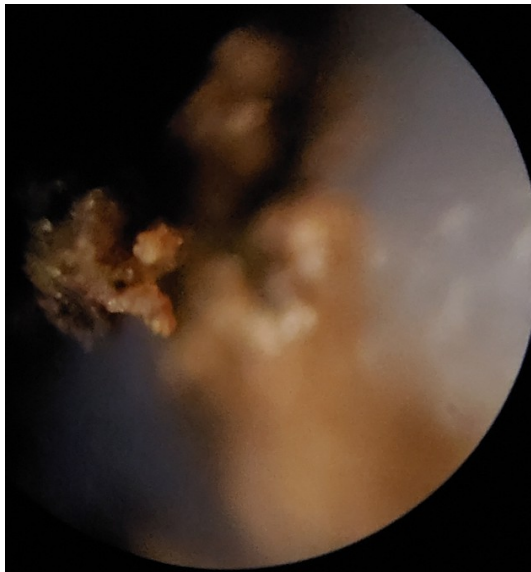
Präpariert habe ich meine Proben wie folgt:

- großzügige Proben aus den Versuchstanks entnommen
- mittig aus den Proben unter minimaler Komprimierung Proben herausgedrückt und in Petrischalen aufgefangen
- mit einer Pinzette die obersten Bodenteilchen abgenommen, sodass eine möglichst unveränderte Schicht des Bodengefüges offen liegt

Experimentell habe ich von meinen Proben ausgehend die maximal mögliche Vergrößerung ermittelt, bei der sich das Gefüge gut betrachten lässt. Durch die große Tiefe meiner Proben (etwa 2mm) ergibt sich bei höheren Vergrößerungen das Problem, dass nicht alle Tiefen scharfgestellt werden können. Das Gefüge ist dann zwar noch gut untersuchbar (durch Scharfstellen verschiedener Ebenen), jedoch nicht mehr gut abbildbar. Es haben sich Vergrößerungen bis 25fach als gut darstellbar und gleichzeitig besonders aussagekräftig erwiesen. Die relevanten, gefügemorphologischen Aspekte können bei diesen Vergrößerungen noch sehr gut abgebildet werden. Die Aufnahmen zeigen sehr deutlich, welche Veränderungen in der Gefügemorphologie sich in welchem Maße durch die WEP ergeben haben. Aus den Überlegungen in Kap. 2 geht das Ziel hervor, durch die Beeinflussung der biotischen Aufbaugefügegenese das Bodengefüge von einem Fragmentgefüge hin zu einem Schwammgefüge zu verändern.

Die Vergleichskultur weist klassische Charakteristika eines Fragmentgefüges auf. Damit entspricht sie herkömmlich genutzten landwirtschaftlichen Böden^[11], was ihre Eignung als Bezugspunkt unterstreicht. Klar erkennbar sind sowohl charakteristische Bröckel, unregelmäßig begrenzte Aggregate mit rauen Oberflächen, die zur Bildung von Klumpen mit verschmierten und verschlammten Oberflächen neigen. Die groben Partikel sind kaum verbunden. [11]

Im Gegensatz dazu zeichnet sich bei den WEP-Proben ein eindeutiger Trend zum Krümelgefüge ab, welches durch eine intensive Verklebung einzelner Krümel zum Schwammgefüge wird. Krümel sind deutlich kleiner als Bröckel und Klumpen. Zusätzlich weisen sie eine höhere Porosität und mechanische Stabilität auf. Krümel sind ebenfalls unregelmäßig, aber tendenziell rundlich begrenzt. Es zeigen sich – ganz besonders bei 25facher Vergrößerung – enorm stark ausgeprägte Feinstrukturen mit hoher Stabilität. Zwischen den verschiedenen Teilchen sind Koagulatstrukturen erkennbar.

	10-fache Vergrößerung	25-fache Vergrößerung
Probe aus T1		
Probe aus T2 (WEP)		

3.4 Vernetzende und extrapolierende Interpretation der Ergebnisse

Besonders interessant werden die verschiedenen Messergebnisse in ihrer Vernetzung, da sie so ein recht weites Bild auf die Vorgänge des Bodenwasserhaushaltes ermöglichen. Zusätzlich lassen sich langfristige Prognosen fundieren.

Zu aller erst muss nachvollzogen werden, von welchen Faktoren der Bodenwasserhaushalt abhängig ist, um die Messergebnisse in diesen einzuordnen. Besonders zentral sind hier die Eigenschaften mehrdimensionaler, instationärer Strömungen unter anisotropen Wasserflussbedingungen (unter Begrenzung auf laminare Flüsse). Sowohl Effekte, als auch Ursachen dieser konnten im Versuch analysiert werden.

Entgegen dem intuitiven Denken fließt das Wasser im Boden weder immer nach unten, noch in die trockensten Bereiche, sondern immer gemäß der es antreibenden Potentiale (s.o.). Analog zum 1. Fickschen Gesetz zeigt die *Darcy-Gleichung* die Abhängigkeit der volumetrischen Wasserflussdichte (q) zu einem substratabhängigen Wasserleitfähigkeitskoeffizienten (k), der den Widerstand, den das Substrat auf den Wasserfluss ausübt, beschreibt und eben dem Gesamtpotential des Wassers (ψ). Durch den Gradienten „ $d\psi/dl$ “ wird deutlich, dass sich das wirkende Potential dabei im Laufe der Fließstrecke (l) verändern kann. Ändert sich beispielsweise eines der Teilpotentiale oder die hydraulische Leitfähigkeit des Substrates, so ändert sich auch Richtung und Geschwindigkeit des Wasserflusses. Diese Richtungsänderungen ähneln in ihrer Form „der Brechung von Lichtstrahlen beim Übergang in optisch dichtere bzw. weniger dichte Medien“^[48]. Um jedoch solche Richtungsänderungen zu erfassen, reicht die einfache *Darcy-Gleichung* nicht mehr aus. Sie kann nur angeben, wie viel Wasser von einem einzigen Punkt in eine gegebene Richtung fließen wird. Betrachtet man also nicht mehr einen infinitesimal kleinen Punkt im Boden, sondern ein Strömungsfeld, so wird die *Laplace-Gleichung* zur Argumentation erforderlich. Durch den Einbezug zweier Raumrichtungen wird die Realität

mehrdimensionaler Wasserflüsse deutlich besser abgebildet (vorstellbar als aus dem durchströmten Raum herausgeschnittene Ebene). Zum Erhalt der Masse nun müssen sich die Fließgeschwindigkeiten der einzelnen Raumrichtungen in Abhängigkeit zueinander verändern. Mathematisch ausgedrückt wird dies durch die Kontinuitätsgleichung (für zweidimensionale Flüsse). Es ergibt sich durch Einsetzen der *Darcy-Gleichung* daraus die *Laplace-Gleichung*. Aus dieser Differentialgleichung wird ersichtlich, dass der angestrebte Punkt eines Wasserflusses abhängig ist von den antreibenden Potentialen in die verschiedenen Richtungen und der Änderung dieser Potentiale im Verlauf der Fließstrecke ist.

Wichtig ist bei der Argumentation zu beachten, dass sich die wirkenden Potentiale nicht nur aufgrund der Beschaffenheit der Bodenmatrix verändern, sondern auch durch den Wasserfluss selbst. Bewegt sich Wasser in ein Segment der Bodenmatrix werden mehr Poren oder adsorbierende Oberflächen besetzt und das Matrixpotential auf das verbleibende Wasser sinkt^[26]. „ $d\psi$ “ als dominanter Faktor ist also nicht nur bezogen auf eine Strecke, sondern grundlegend variabel! Über die *Laplace-Gleichung* können alle (laminaren) stationären Strömungen eines Bodens beschrieben werden, also alle Strömungen, die keinerlei Änderung im Wassergehalt des Strömungsfeldes aufweisen. In der Realität treten diese Zustände allerdings praktisch niemals ein, da dem Boden durch

Dränung, Evaporation, Wasseraufnahme durch Wurzeln und Infiltration ununterbrochen Wasser entzogen oder hinzugegeben wird. Dementsprechend muss die Kontinuitätsgleichung verändert werden. Die Masse wird nicht erhalten, sondern gemäß des Differential, der Änderung des Wassergehalts verändert. Vereinfachend stellt die *Richards-Gleichung* diesen Zusammenhang anschaulich dar, indem sie instationäre Strömungsverhältnisse für eindimensionale Flüsse abbildet. Gedanklich können weitere Raumrichtungen eingefügt werden, wodurch die Argumentation schlüssiger wird, die mathematische Beschreibung

$$\begin{aligned} \partial k_x \frac{(\partial \Psi / \partial x)}{(\partial x)} + \partial k_y \frac{(\partial \Psi / \partial z)}{(\partial z)} &= 0 \\ \frac{\partial k_x (\partial \Psi / \partial x)}{\partial x} + \frac{\partial k_y (\partial \Psi / \partial z)}{(\partial z)} &= \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \Psi}{\partial z} + k \right) &= \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial S\Phi}{\partial t} \end{aligned}$$

allerdings deutlich einfacher bleibt. Wendet man diese Formel auf die einzelnen Beobachtungen an, so lässt sich ein weitreichendes, vergleichendes Bild der Bodenmatrix und des Bodengefüges über das gesamte Pedon hinweg abbilden.

So habe ich bei der WEP deutlich erhöhte Infiltrationsraten gemessen: Bei der Infiltration steigt der Wassergehalt mit der Zeit. Der Wassergehalt nach der Zeit wächst also - $\partial \theta / \partial t$ wird immer positiver (ebenso $\partial S\Phi / \partial t$ – die Sättigung des Bodens nimmt also entsprechend zu). Dementsprechend muss $k(\partial \Psi / \partial z)$ auch positiver werden. Das setzt voraus, dass $\partial \Psi$ positiver wird. Sei vereinfacht: $\Psi = \Psi_H = \Psi_m + \Psi_z$, so ergibt sich, dass das - als negativ definierte - Matrixpotential weniger stark sein muss, als das - als positiv definierte - Gravitationspotential. Relevant sind also explizit diejenigen Faktoren, welche das Matrixpotential im Infiltrationsverlauf beeinflussen.

Gemäß des Gesetzes von *Brooks-Corey* sind dies die Wassersättigung selbst und das ursprünglich auftretende Potential – bestimmt durch Kapillar- und Adhäsionskräfte. Wichtig ist zu deuten, dass die Potentialverringerung durch Sättigung umso schneller verläuft, je geringer das ursprüngliche Matrixpotential ist. Ist Ψ dann positiv geworden, so wird der nächste Faktor der *Richards-Gleichung* für die Infiltration relevant – k . Allgemein gilt: je größer k , desto schneller der Wasserfluss ($k(\partial \Psi / \partial z) = q$!). Je schneller nun ein Wasserfluss nach unten (positiv definiert) ist, desto mehr Wasser pro Zeit kann ein Pedon infiltrieren, desto höher ist seine Infiltrationsrate. Ein weiteres Gesetz von

Brooks-Corey beschreibt die Faktoren, die k beeinflussen. Wobei Θ die relative Sättigung angibt. Auch k steigt also mit der Sättigung, jedoch in einem Maße, welches durch die ursprüngliche hydraulische Leitfähigkeit (messbar im gesättigten Zustand) bestimmt wird. Diese ist

$$k = k_0 \Theta^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}}$$

maßgeblich abhängig von den Porendurchmessern der perkolierenden Poren. Besonders anschaulich zeigt dies die *Hagen-Poiseuille-Gleichung*. Q beschreibt hier den Wasserfluss je Zeiteinheit durch eine Pore, r deren Durchmesser, η die Viskosität, $\Delta \Psi$ die Potentialdifferenz und l die Fließstrecke. Aus den Zusammenhängen bezüglich der Sättigung ergibt sich der charakteristische Verlauf einer jeden Infiltration. Außerdem ergeben sich die Eigenschaften eines Bodens, die die Infiltration(-rate) bestimmen, weil sie die volumetrische Wasserflussdichte – ausgedrückt in der *Richards-Gleichung* – verändern.

$$Q = \frac{\pi * r^4}{8\eta} * \frac{\Delta \Psi}{l}$$

So lässt sich nun das Ergebnis meiner pF-Kurven-Messung mit den Wetter- und Bodenfeuchtedaten verknüpfen und so weitreichender interpretieren. Im Schnitt steigt der Wassergehalt im Bereich niedriger Matrixpotentiale. Der Boden wird poröser. Wie bereits in Kap. 3.3.2 gedeutet, ist dafür v.a. die Sekundärporenbildung verantwortlich, die sich dann langfristig weiter auf die nFK auswirkt. Anteilig werden enge Grobporen und Mittelporen gefördert. Dadurch steigt Q , während im Rahmen des pflanzenverfügbaren Wassers Ψ_m partiell sinkt. Den Konnex zur biotischen Aufbaufügegenese habe ich in gefügemorphologischer Hinsicht schon in Kap.3.3.2 darstellen können, durch die Verknüpfung mit den lichtmikroskopischen Betrachtungen kann dies weiter untermauert werden. Dementsprechend sind zusätzliche Beeinflussungen der Infiltration durch unregelmäßige Gefügestrukturen einzubeziehen. Diese treten besonders durch die Aktivität verschiedener Wurmarten, sowie Enchyträen auf, welche beim Anlegen ihrer Gänge Makroporenstrukturen mit verdichteten Seitenwänden hinterlassen. Diese Vorgänge sind weder in ihrer Quantität, noch Qualität zu unterschätzen: Die Kompression des umgebenden Bodens erfolgt bei einigen Arten mit Drücken von über 100kPa und sie machen einen wesentlichen Teil der Porosität und

Aggregatstabilität des Oberbodens aus^[38]. Besonders wertvoll für die Infiltration sind dabei angelegte Vertikalporen zur Oberfläche. Diese werden explizit durch eine Bedeckung mit Mulch gefördert^[49]. Auf die Infiltrationsrate wirken sich diese Strukturen durch präferenzielle Flüsse (auch Makroporenflüsse) aus. Im Verlauf der Infiltration zeigt sich dies im „fingering“. Das Wasser fließt dabei besonders schnell, da folgende Vorgänge an den Makroporenstrukturen ablaufen: k ist von Beginn an sehr hoch, da r groß ist. k kann durch Sättigung schnell weiter ansteigen, weil die komprimierten Seitenwände der Gänge besonders hohe Matrixpotentiale mit geringen Wasserleitfähigkeiten aufweisen. Die Seitenwände sättigen sich also schnell auf, da umliegendes Substrat – mit deutlich geringeren Matrixpotentialen – das Wasser erst bei nahezu vollständiger Sättigung entlang des Potentialgradienten aufnehmen kann. Zusätzlich sinkt das kapillar bedingt ohnehin geringe Matrixpotential dadurch rapide auf 0. Das Wasser bewegt sich mit maximalem k und Ψ extrem schnell nach unten^[10]. (Auch können präferenzielle Flüsse zustande kommen, wenn in einem grobporigen Medium Feinporenstrukturen sind, die sich sehr schnell aufsättigen und dadurch eine geringfügig höhere q aufweisen als die umliegenden Grobporen^[10].) Dadurch leistet die bei der WEP konstant vorliegende Mulchschicht auf dreifache Weise Erosionsschutz: Erstens durch Transportmedienverlangsamung an der Oberfläche, zweitens durch hohe Impaktschwellenwerte an der Bodenoberfläche und drittens durch eine erhöhte Sorptivität und Infiltration, die lateralen Oberflächenabflüsse als wichtigen Erosivitätsfaktor vorbeugen. Da sich sowohl verschiedenste Wurmarten als auch Enchyträen in einem verwobenen Nahrungsnetz im Boden befinden und praktisch in jedem natürlichen Pedon unserer Breitengrade anzutreffen sind, kann ihre Aktivität nicht nur im lichtmikroskopisch sichtbaren Ergebnis ihrer Anwesenheit, sondern auch durch die gemessenen, erhöhten Respirationsraten belegt werden.

Dazu kommen vertikale Unterschiede. Bereits im Zusammenhang mit der Wasserdampfdiffusion wurde die Streuschicht (L-Horizont) als physikalisch auf den Bodenwasserhaushalt wirkend benannt. In Bezug auf die flüssige Phase des Bodens lässt sich auch auf die Streuschicht die Richards-Gleichung anwenden: Sofern keine Faulschicht oder auf sonstige Weise versiegelnde Streu vorliegt, ist $\partial\Psi/\partial z$ in dieser Phase besonders positiv – also nach unten gerichtet – und k enorm groß. Es ergibt sich eine sehr schnelle Wasseraufnahme in die Streuschicht, welche das eintreffende Wasser über den O-Horizont direkt in den Oberboden leitet. Hohe Potentialdifferenzen führen zu einem regelrechten Einsaugen des Wassers ins Pedon. Der Oberboden ist maßgeblicher Ort der biologischen Aktivität und zeigt somit besonders stark die Auswirkungen der biotischen Aufbaugeschichte. Unter dem Einfluss hoher Bioturbation bilden sich Krümel als Aggregate^[11]. Die höheren Respirationsraten in Kombination mit den lichtmikroskopischen Gefügeanalysen und der pF-Kurve lassen hier auf ein gesteigertes Vorkommen organischer Stabilisatorstoffe schließen, weil diese in Form von Polyuroniden und Polysacchariden als Zwischenprodukte und Stoffwechselprodukte des mikrobiellen Abbaus von Vegetationsrückständen auftreten. Somit indiziert eine höhere Respiration sowohl die gesteigerte Bildung solcher Stabilisatorstoffe (mikrobielle Schleimstoffe), als auch deren Abbau als Nahrungsgrundlage verschiedenster Mikroben. Durch diese verbinden sich die Krümel zu einem Schwammgefüge mit besonders hohen Lagerungsdichten. Der Oberboden weist so in Bezug auf die Richards-Gleichung durch die WEP-Bewirtschaftung besonders interessante und wünschenswerte Eigenschaften auf. Insgesamt höhere Lagerungsdichten und stärker ausgebildete Feinstrukturen führen zu großen Mittelporenanteilen. Diese weisen aufgrund von Kapillarkräften Matrixpotentiale im Bereich von $pF=2,5$ bis $pF=4,2$ auf. Sie speichern effizient pflanzenverfügbares Wasser. Gleichzeitig liegen Makroporenstrukturen vor, die oben genannte präferenzielle Flüsse und damit eine optimale Wasserverteilung (nicht nur vertikal) hervorrufen. Im Sinne der Infiltration wird das Wasser innerhalb der Mittelporen zwar nicht mit maximaler Geschwindigkeit aufgenommen, dafür aber durch stark negative Matrixpotentiale entgegen der Schwerkraft bzw. horizontal in die Porensysteme gezogen. Ψ gegen die Flussrichtung wird negativ oder gleich 0, wodurch sich q explizit verlangsamt, bzw. umkehrt. Schließt man gedanklich nun mehrdimensionale Flüsse mit ein, so kann q in z -Richtung gegen 0 gehen, während der Betrag von q in y - x -Richtung hoch ist. Die Infiltration ist so natürlich nicht maximal im Sinne einer maximalen Wasserableitung, sondern im Sinne einer Wasseraufnahme. Das Wasser wird nicht bis ins Grundwasser schnell abgeleitet, sondern effizient gespeichert. Das ist im Sinne der Dürresilienz absolut wünschenswert. Auch in Bezug auf den Grundwasserhaushalt ist dieses Phänomen positiv zu bewerten, da Regenfälle etc. so effektiv abgefedert werden und eine konstante Zufuhr an Wasser durch drändendes Haftwasser erfolgt. Langfristig sind daher auch erhöhte GWOs (Grundwasseroberflächen) zu erwarten.

Aus der Beschaffenheit des Oberbodens folgt auch eine Begünstigung des kapillaren Aufstiegs in den Wurzelraum (s.o.). Durch Transpiration wird im Wurzelbereich $\partial\theta/\partial t$ negativ. Aufgrund der im Vergleich zu oberen und unteren Schichten hohen Matrixpotentiale ergibt sich mehrdimensional betrachtet eine maximale q in den Wurzelbereich, wenn das Matrixpotential sättigungsbedingt auch nur minimal negativer wird! Der kapillare Aufstieg in oberflächennahe Bereiche, wenn $\partial\theta/\partial t$ durch die Evaporation bedingt negativ wird, ist – entsprechend der entlang der z -Richtung nach oben positiveren $\partial\Psi/\partial z$ – minimal. In Bezug auf den Nährstoffhaushalt wird das so gebildete Schwammgefüge als besonders effizient im Sinne einer hohen Nährstoffsorption und -freisetzung charakterisiert. Hohe Gehalte pflanzenverfügbaren Wassers sind hier nicht nur im Sinne der Dürresilienz, sondern auch nährstoffökonomisch relevant. Nährsalze sind für Pflanzen nur aufnehmbar, wenn sie in der Bodenlösung vorliegen^[51] 3.

Bei den Matrixpotentialbetrachtungen sollten nun nicht nur Kapillar-, sondern auch Adhäsionskräfte beachtet werden. Insbesondere Huminstoffe sind hier relevant, da sie besonders hohe spezifische Oberflächen aufweisen

3 Ausgenommen sind hier Nährstoffe, die Pflanzen über ihre Blätter aufnehmen können^[50]

und ihre funktionellen Gruppen über Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, schwache Van-der-Waals-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen sowie elektrostatische Felder der (variablen) Ladungen, die Adhäsion erhöhen (Fulvosäuren weisen im Vergleich mehr Carboxylgruppen und somit höhere Aciditäten sowie variable Ladungen⁴ auf, da diese v.a. durch deprotonierte COOH-Gruppen zustande kommen). Zusätzlich stellen Huminstoffe wichtige Kohlenstoffspeicher dar und stellen den effizientesten Weg der Klimawandelbekämpfung dar. So sind momentan etwa 2000Gt Kohlenstoff in Form von Huminstoffen gebunden und damit weit mehr als doppelt so viel wie insgesamt in der Atmosphäre! Die Speicherkapazität ist dabei bei weitem noch nicht ausgenutzt. Die Humifizierung verläuft relativ schnell, wobei ihre Produkte sehr langfristig Kohlenstoff speichern (Fulvosäuren etwa 25 bis 500 Jahre, Humine und Huminsäuren durchschnittlich 1100 Jahre). Diese Speicherung wird maßgeblich gestört durch degradative Erosion im Zuge der herkömmlichen Land- und Forstwirtschaft. Die WEP verfolgt dagegen das – allgemein vertretene – Ziel, den Huminstoffanteil (nicht gleichzusetzen mit dem Humusgehalt) langfristig zu erhöhen. Um das Erreichen dieses Ziels zu bestätigen, sind längerfristige und komplexere Versuche erforderlich. Bereits in meinen Versuchen konnte ich jedoch zeigen, dass die Bedingungen der Humifizierung verbessert wurden. Insbesondere die hohe mikrobielle Aktivität ist Indikator und Faktor der Humifizierung. Zwar bewirkt diese auch eine höhere Mineralisation, insbesondere Zwischenprodukte dieser sind allerdings wesentlich für den Aufbau von Huminstoffen; ebenso wesentlich sind extrazelluläre Enzyme für die Humifizierung. Biochemische Initialphase sowie Primär- und Sekundärzersetzung sind maßgeblich von der Aktivität des Edaphons abhängig. Auch die hohen Mengen an Lignin, welche auf den Flächen langfristig verbleiben, sind wesentlich, da bei ihrem Abbau Polyphenole entstehen, welche durch extrazelluläre Polyphenoloxidasen zu Chinonen oxidiert werden. Diese kondensieren dann untereinander oder mit freien Aminogruppen zu Huminstoffzentren, an die sich dann andere Moleküle und besonders Spaltprodukte von Proteinen, Peptiden und Zuckern anlagern.

4 Ergebnisdiskussion und Ausblick

Die Wechseltrags-Polykultur hat sich insgesamt als erfolgversprechend gezeigt. Durch die verschiedenen Dokumentations-, Mess-, und Analyseverfahren konnte im betrachteten Zeitraum gezeigt werden, dass die WEP über die erwünschten Mechanismen eine insbesondere langfristig erwartbar höhere Dürresilienz bewirkt. Die Messergebnisse zeigen sich als belastbar. Insbesondere durch die Vernetzung der Versuchsergebnisse, können die Beschaffenheit und die diese verändernden Mechanismen an der Bodenmatrix sowie der Gefügestruktur weitreichend nachvollzogen werden.

Auf dieser Grundlage konnten die in Kap. 2 aufgestellten Hypothesen mit einer recht hohen Evidenz mehr als überwiegend verifiziert werden. Die Ergebnisse bestätigen eine erhöhte Dürresilienz durch die WEP. Auch die beobachtete, positive Reaktion auf die Starkregenereignisse 21 ist in Anbetracht aktueller Prognosen für die Zukunft des Agrarsektors gesellschaftlich relevant.

Eine abschließende Bewertung der Anbaumethode ist nichtsdestotrotz nicht möglich. Um hier abschließende und allgemein vergleichbare sowie umfassend belastbar belegte Aussagen treffen zu können, sind Langzeitversuche auf größeren Flächen mit ggf. noch besser kontrollierbaren Bedingungen (→ Ein-Faktor-Analyse) erforderlich. Nicht analysiert werden konnte, aufgrund der Starkregenereignisse, in meinen Versuchen die zweite Überschneidungsphase der WEP mit Wintergerste und Lupine. In Bezug auf diese konnte ich lediglich durch die erste Überschneidungsphase Rückschlüsse ziehen. Hier – und unter Umständen auch in der mehrjährigen Wiederholung von Überschneidungen – müssen weitere empirische Daten gesammelt werden.

Auch eine weitere Optimierung der WEP – allein schon durch optimaler angepasste Kulturpflanzen und Anbautechniken – ist notwendig. Eine Erweiterung des Anbaukonzeptes beispielsweise durch permanente Bodendecker (z.B. Klee gras), die Kombination mit anderen Verfahren oder langfristig zyklische Erweiterungen der WEP sind denkbar. So könnten sich mehrere WEP-Kulturen (z.B. Wintergerste, Lupine, Winterweizen, Buchweizen, Winterraps, Mais, Wintergerste, Ackerbohne, Winterweizen, Lupine usw.) fließend abwechseln. Die angewandten Analyseverfahren haben ihren Zweck zufriedenstellend erfüllt. Umfassendere und genauere Analysen wären in einer weitreichenderen Evaluation der WEP aber selbstverständlich erforderlich.

Die Forschung an der WEP ist bei weitem noch nicht abgeschlossen. Bis sie tatsächlich der Landwirtschaft zur zukunftsrelevanten Dürrebekämpfung und -begegnung dienen kann, ist noch viel Forschungsarbeit erforderlich.

Mit meiner Arbeit kann ich eine breite Grundlage für weitere Hypothesen bezüglich der WEP schaffen. Die Grundüberlegungen der systemökologischen Beeinflussung der Bodenmatrix durch die WEP konnte ich anhand empirischer Daten abbilden und untersuchen.

Dies stimmt mich optimistisch, dass die WEP ein agrarbiologischer, modularer Baustein für eine zukünftige Landwirtschaft in Zeiten des Klimawandels sein kann.

Zusätzlich hat mir die Arbeit an der WEP persönlich viel erbracht. Die Freude am vernetzten Denken, sowie dem strukturierten und prozesshaften Arbeiten haben mein Interesse an den Agrar-, Bio- und Bodenwissenschaften zusätzlich bestärkt. Voraussichtlich werde ich dieses nach meinem Abitur 2022 in einem Studium der Agrarbiologie weiterverfolgen.

4 Diese sind auch für den Nährstoffhaushalt des Bodens enorm zuträglich, da sie die KAK* der Bodenmatrix und somit die konstante Nährstoffversorgung der Pflanzen erhöhen.

Literaturverzeichnis

- 1: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,S.14 f.
- 2: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.10.8
- 3: Mark Shepard, Water for Any Farm; Applying Restoration Agriculture Water Management Methods on Your Farm, 2020,S. 2ff.
- 4: Lisa Urry, Michael Cain, Steven Wasserman, Peter Minorsky, Jane Reece, Campbell Biologie (11., aktualisierte Auflage), 2019,S. 1578-1587
- 5: Peter Carstens, Hitze, Dürre und Starkregen in Deutschland: Was kommt auf welche Region zu?, 27.06.2021,GEO ,
- 6: Christian Mihatsch, Klima: Der Trend zur Steppe, 07.05.2021,
- 7: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,Kap.3.1.2
- 8: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,S.430 ff.
- 9: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.4.4.2
- 10: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,S. 295 ff.
- 11: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.3.1
- 12: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.3
- 13: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,Kap.2.6.1
- 14: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.1.6.5
- 15: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.4.1.2
- 16: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. S.131
- 17: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,Kap. 3.6
- 18: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.2.2
- 19: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,S. 297 ff.
- 20: Dr. J. Petes, Anbau von Lupinen – Chancen und Risiken, 05.05.2015 (Aktualisiert am 24.12.2021),Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg Vorpommern ,
- 21: Lebzien et al., Zum Potential höherer Pilze bei der Umwandlung von Getreidestroh in Futter- und Lebensmittel, 2007,Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 258 , S.40
- 22: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap. 6.4.3
- 23: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.4.4
- 24: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.4.4.1
- 25: , Zusammenhang des 1. und 2. Fickschen Gesetz, abgerufen am 11.04.21,studifix.de ,
- 26: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.4.2.1
- 27: Spektrum, Thermodynamik, Abgerufen am 13.10.21,Spektrum.de Lexikon der Biologie ,
- 28: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,S.130
- 29: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,S.132
- 30: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,S.133
- 31: H.Kim, M. Prezzi, R. Salgado, Calibration of Whatman Grade 42 filter paper for soil suction measurement, 2016,ResearchGate ,

- 32: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.4.2.3
- 33: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.1.6.5
- 32: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,S.132 f.
- 33: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.3 u. 4
- 34: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.1.6.4
- 35: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,S. 284
- 36: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.6.3.4.2
- 37: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. 6.2
- 38: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. 3.3
- 39: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. S.67
- 40: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. S.78
- 41: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. 6.3
- 42: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. S.199f.
- 43: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,Kap. 3.6.1.3
- 44: D.L.Rowell, Bodenkunde; Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, 1997,Kap. S.198
- 45: Karl Stahr; Ellen Kandeler; Ludger Herrmann; Thilo Streck, Bodenkunde und Standortlehre, 2016,Kap. 3.6.1.2
- 46: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,S. 290
- 47: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap. 10.8.1.7
- 48: Michael Denk, Blätter nutzen Phosphor aus Wüstenstaub, 08.21,Spektrum der Wissenschaft , S.26f.
- 49: Scheffer/ Schachtschabel et al. , Lehrbuch der Bodenkunde (17. Auflage), 2018,Kap.9.5.2

4.1 Unterstützungsleistungen

Nikolaus Weiler, Biologielehrer, StMG Bad Münstereifel, hat mich als Projektbetreuer in der Planung und Durchführung des gesamten Projektes unterstützt. Unter anderem hat er Materialien beschafft, Anregungen, v.a. bezüglich Verständlichkeit und Visualisierung wichtiger Aspekte, zur schriftlichen Arbeit gegeben und mich auf die Jurybefragung vorbereitet. Über den gesamten – nun fast dreijährigen – Prozess hinweg hat er mich darin bestärkt meine Ideen und Interessen immer weiter zu vertiefen und sich dabei auf mein ja doch eher spezielles Thema eingelassen.

Daniel Mertens, Chemie- und Physiklehrer, StMG Bad Münstereifel, hat mich in der Beschaffung von Chemikalien unterstützt und die Idee zur Abwandlung des Respiationsversuches mit Bariumhydroxid anstelle von Bariumchlorid gegeben; hat mir das Programm SciDavis zur Datenauswertung empfohlen

Dr. Stefan Pätzold, Senior Researcher, Institute of Crop Science and Resource Conservation (INRES) and Soil Ecology, Universität Bonn, hat mir zur Anwendung des Versuches zur Respiationsrate geraten, um die Aktivität des Edaphons zu untersuchen. Außerdem hat er mir das Buch „Bodenkunde Untersuchungsmethoden und ihre Anwendung“ (D.L. Rowell) empfohlen.

Juryfeedback Regionalwettbewerb: Hat mir die Idee Student-t-Tests durchzuführen gegeben, mir empfohlen, die Beschreibung theoretischer Grundlagen in der Arbeit zugunsten der Beschreibung empirischer Daten zu kürzen, bodenkundliche Formeln stärker mit meinen Messergebnissen in Verbindung zu setzen und insbesondere meine Grafiken in den Vordergrund zu stellen.