

Agroforestry: a possible adaptation strategy to climate change?

Comparing the water stress of two land use systems in eastern Brandenburg, Germany



BSc thesis by Jorin Herbst
January 2022

Agroforestry: a possible adaptation strategy to climate change?
Comparing water stress of two land use systems in eastern
Brandenburg, Germany

Bachelor thesis Soil Physics and Land Management Group
submitted in partial fulfilment of the degree of Bachelor of Science
in International Land and Water Management at Wageningen
University, the Netherlands

This bachelor thesis was presented and graded at Wageningen university in the context of an academic education program. Given this context, it was not subject to rigorous scientific peer review, nor does it necessarily meet Wageningen university publication standards. At the time of writing the author (Jorin Herbst) was not a staff member of Wageningen university.

Study program:

BSc International Land and Water Management

Student registration number:

1041222

YWU 80812

Supervisors:

WU Supervisor: Klaas Metselaar

Host supervisor: Rosanna Gahler

Examinator:

Loes van Schaik

Date:

10/06/2022

Soil Physics and Land Management Group, Wageningen University

Executive summary

Global warming is expected to increase temperatures and change regional precipitation pattern and amounts. In the region of Brandenburg in eastern Germany, an increase in extreme events and rising temperatures have already been observed. With an average annual precipitation of about 500 mm per year and dominantly sandy soils, water is one of the main limiting factors for agricultural production in this region. This is because water stress experienced by plants can significantly affect plant functioning and therefore yields. In this context, water stored in the soil is of major importance to supply plants with water during dry periods, especially when the groundwater table is too deep for the plants to access.

The type of land use system determines the composition and density of vegetation and therefore the requirement of-, and the access to water due to differences in evapotranspiration and rooting depth. Depending on the land use, each system thus experiences different durations and intensities of water stress. By experimenting with different land use systems, this knowledge can be used to adapt to changing climates. One of these land use systems is Agroforestry. It is defined as the integration of trees and woody shrubs into agricultural production. It proposes a multiple land use such as combining annual crop and wood or biomass production in one area. That can have multiple benefits such as increased land productivity, regulating ecosystem services and cultural services compared to conventional land uses such as monocropping. Agroforestry, as a part of more integrated, agroecological practices, is therefore seen as one alternative to the current large scale industrialized production model to assure food supply with a changing climate.

Nonetheless the several benefits that agroforestry has compared to annual crop production, the effect on the water availability and soil water balance is still contested. On one hand, such a system can have a positive contribution due to the creation of microclimates and the increase of organic matter in the soil, which increases the water holding capacity. On the other hand, due to the increased density and diversity of plants, it can also cause a higher water usage. If the positive or negative effects of this system prevail depends largely on the specific characteristics of the region, such as weather conditions and type of soil and the design of the land use system.

To better understand the impact of agroforestry systems in the region of Brandenburg, this study has the objective to model and compare water availability and water stress of an agroforestry system and an adjacent field under annual crop cultivation on the farm Schlossgut Alt Madlitz GmbH & Co. KG. The farm, also called Gut&Bösel, is located ca. 80 km east of Berlin. The land use systems of interest are a syntropic agroforestry system, which is a diverse multilayer cropping system set up in rows, and an adjacent field with annual crop cultivation, both under organic farming practices.

To reach the research objective, the following research questions are answered:

- What is the difference in duration of water stress under the different land use systems?
- What is the difference in intensity of water stress under the different land use systems?
- What is the difference in decreased productivity of the systems due to water stress?

To answer the research questions, the following soil properties of both systems were assessed: soil horizon, soil type, organic matter content, field capacity and the permanent wilting point. The measurements were then used with a climatic water balance to estimate the water availability during the period of Mai 2019 – August 2021. The water availability in turn was used to estimate the duration and the intensity of water stress that each land use system experienced during the modeled period.

The analysis of the data shows that both areas have a similar soil horizon and soil type. The similarity of the soil makes both areas suitable for comparison. The organic matter content of the agroforestry system is higher in the tree rows (5-9 %) and comparable to the comparison field between the rows (1.5-3 %). This is also the case for the subsoil, though the difference between the row and the area between the rows is smaller compared to the topsoil. The field capacity of the agroforestry system is with 35% comparable to field capacity of the comparison field (36%). This deviates from the expectations of a higher field capacity in the agroforestry due to the higher OM content. The permanent wilting point of the agroforestry system is at 10%, while the comparison field has a permanent wilting point of 7%.

The water availability in the agroforestry system was initially higher than in the comparison field but dropped during the first summer and did not recharge during the winter periods as much as the field under annual cultivation. While the comparison field experiences water stress in 50% of the measured period, the agroforestry system experiences water stress in above 90% of the measured period. Also, the intensity of the water stress is higher for the agroforestry compared to the comparison field. The considerably higher water stress in the agroforestry system is most likely due to the longer growing period of trees which outweighs the increase in water availability due to larger rooting depths. The soil water content of the agroforestry system though shows slightly lower fluctuations and peaks of depletion compared to the comparison field. This can be seen as an advantage to buffer extreme events such as heavy rainfall, heatwaves, and droughts.

There are certain limitations to the results of this study. First, due to time and resource limitations the method for assessing the soil properties had to be adapted. These adaptations should minimally affect the results of the water availability and water stress. To estimate the water availability, a simple water balance model was used. Several assumptions about the properties of the crops and trees regarding their transpiration had to be made due to the lack of data. In addition, the model assumes a mature agroforestry system even though the system is still in development. This could lead to an overestimation of the transpiration, and thus to an underestimation of the water availability. The water stress of both systems, but especially of the agroforestry system could therefore be overestimated. Other water in-, and outfluxes than precipitation, evapotranspiration and deep percolation were not considered in this model. This could negatively affect the beneficial influences of the agroforestry system to e.g. catch dew moisture due to increased surface area. Finally, due to the nature of the study which is limited to a specific period, design and characteristics of the land use systems, conclusions from this study are limited to the research area and cannot be applied to other locations.

To conclude, this study shows that during the period of Mai 2019 – August 2021 the agroforestry system on the farm of Gut & Bösel experienced longer periods and higher rates of water stress than the adjacent field under annual crop cultivation. But it shows lower fluctuations of the soil water balance than the comparison field, which can be an advantage considering climate change. To understand this tendency better I would recommend applying this model over a longer period, thus a larger number of growing seasons and monitor other parameters like the organic matter content and yield of both systems at the same time.

EXECUTIVE SUMMARY	I
DANKSAGUNG	IV
GLOSSAR	V
1. EINLEITUNG	1
2. METHODIK	3
FORSCHUNGSGEBIET	4
MESSMETHODEN	6
3. ERGEBNISSE	8
BODENEIGENSCHAFTEN	8
BODENWASSERGEHALT UND TROCKENSTRESS	10
4. DISKUSSION	12
5. FAZIT	15
6. QUELLENVERZEICHNIS	16
7. ANHANG	18
I: ANBAUPLANUNG	18
II: METHODIK	18
III: ERGEBNISSE	22

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Klaas Metselaar, der meine Bachelorarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit bin ich ihm außerordentlich verbunden.

Ein besonderer Dank gilt dem Team von Gut & Bösel. Insbesondere Benedikt Bösel für die Möglichkeit diese Forschungsarbeit auf dem Betrieb durchzuführen und Rosanna Gahler und Max Küsters für die Betreuung und Unterstützung während der Aufnahme und Analyse der Daten. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen anderen Festangestellten und Praktikanten des Betriebs für die interessanten Diskussionen und Beiträge während meines Aufenthaltes, welche maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Glossar

AG	Agroforst
FK	Feldkapazität
LNS	Landnutzungssystem
nFK	Nutzbare Feldkapazität
OM	Organische Substanz
pWG	Pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt
pWG_{max}	Maximaler pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt
PWP	Permanenter Welkepunkt
PTF	Pedotransferfunktion
TS	Trockenstress
VF	Vergleichsfeld

1. Einleitung

Studien über den anthropogenen Klimawandel zeigen eine beständige Voraussage zu steigenden Temperaturen und sich verändernden regionale Niederschlagsmengen und Mustern. Diese Voraussagen konnten schon in den letzten Jahren anhand von zunehmenden extrem Wetterereignissen wie Starkregen, Hitzewellen und längeren Dürreperioden beobachtet werden (Holsten et al., 2009; Olesen et al., 2011). Das derzeitige industrialisierte Produktionsmodell der Landwirtschaft, welches auf einer intensiven Monokultur mit einem hohen Level an Mechanisierung und externen Inputs wie z.B. Dünger oder Pestiziden basiert, zeigt eine hohe Schadensanfälligkeit für diese klimatischen Veränderungen (Rotz & Fraser, 2015). Voraussagen mit diesem Produktionsmodell zeigen auf kurze Sicht eine Reduzierung der Erträge und langfristig eine Reduzierung der ökologischen und ökonomischen Diversität des Landwirtschaftlichen Sektors, welche durch externe Shocks wie klimatische extrem Bedingungen zu Problemen mit der Nahrungsmittelzufuhr führen können. Eine Anpassung des derzeitigen Produktionsmodells zu integrierten, agroökologischen Systemen ist daher laut Altieri et al. (2015) eine Möglichkeit, um die Nahrungsmittelzufuhr auch in der Zukunft sicherzustellen. Eines dieser Systeme ist die Agroforstwirtschaft, eine Polykultur die auf der Kombination von einjährigen Kulturen und mehrjährige, meist holzigen, Büschen und Bäumen basiert (Böhm et al., 2020).

Im Bundesland Brandenburg, im Osten von Deutschland, ist Wasser mit einer jährlichen Niederschlagsmenge von 500 mm und vorherrschend sandigen Böden schon jetzt der limitierende Faktor der landwirtschaftlichen Produktion (Bauer, 1999; Schmidt, 2020). In diesem Zusammenhang ist das Wasser, welches im Boden gespeichert wird, von ausschlaggebender Wichtigkeit, gerade wenn das Grundwasser zu tief ist, um von Kulturen erreicht zu werden. Die Menge an Wasser, welches im Boden gespeichert wird, hängt von den lokalen Wetterbedingungen, Bodeneigenschaften und der Vegetation ab (Estiarte & Vicca, 2019). Je nach Art der Landnutzung und Bewirtschaftung gibt auf einer Fläche eine spezielle Zusammenstellung und Dichte der Vegetation. Ein eine solche Zusammensetzung der Vegetation auf einer definierten Fläche mit einer dazugehörigen Art der Bewirtschaftung wird Landnutzungssystem (LNS) genannt. Jedes LNS hat daher eine unterschiedliche Wasserverfügbarkeit und Wasserverbrauch während der Vegetationsperiode. Dementsprechend steht den Kulturen in verschiedenen Landnutzungssystemen bei gleichen Klimatischen Bedingungen unterschiedliche Mengen an Wasser zur Verfügung. Das beeinflusst die Dauer und Intensität von Stress, den ein LNS durch Wassermangel erfährt (Veste & Böhm, 2018). Dies hat wiederum Einfluss auf die Produktivität und den Ertrag einer Fläche.

Agroforstwirtschaft ist dementsprechend ein spezielles Landnutzungssystem, welches laut Torralba et al. (2016) mehrere Vorteile im Vergleich zum Anbau von einjährigen Kulturen hat. So können z.B. Lebensmittel oder Futter und Holz bzw. Biomasse gleichzeitig auf einer Fläche produziert werden. Diese Ausnutzung verschiedener ökologischer Nischen auf derselben Fläche kann somit die Flächenproduktivität erhöhen. Weitere Vorteile sind unter anderem eine Diversifizierung des Ertrags, Erhöhung der Ertragsstabilität, die Schaffung eines Mikroklimas und die Erhöhung der organischen Substanz im Boden durch den ganzjährigen bewuchs, welche zur Speicherung von Wasser im Boden beiträgt (Torralba et al., 2016). Andererseits kann eine höhere Dichte und Diversität von Kulturen auf der gleichen Fläche auch zu einem erhöhten Wasserverbrauch führen. Das Ausmaß der positiven oder negative Einflüsse eines Agroforstsystems hängt dabei von den speziellen Eigenschaften der Region und der genauen Gestaltung des Agroforstsystems ab (Veste & Böhm, 2018). Umso wichtiger ist es, dass Betriebe Forschung und Überwachung wichtiger Bodenparameter wie z.B. Flächenproduktivität, organischer Substanz und Wasserspeicherkapazität dieser Systeme durchführen, um besser zu verstehen, wie diese LNS in ihrem speziellen Kontext funktionieren und was für Vor-, bzw. Nachteile sie im Vergleich zu Systemen mit einjährigen Kulturen haben.

Ein Betrieb in Brandenburg, der mit verschiedenen LNS experimentiert und deren Einfluss überwacht und dokumentiert ist das Schlossgut Alt Madlitz GmbH & Co. KG. Um den Einfluss von Agroforstsystemen auf den Wasserhaushalt im Boden auf dem Betrieb und in der Region Brandenburg besser zu verstehen, ist die Zielstellung dieser Forschungsarbeit die Wasserverfügbarkeit und den Trockenstress von einem Agroforstsystem mit einem naheliegenden Feld mit einjährigen Kulturen zu modellieren und zu vergleichen. Um diese Zielstellung zu erreichen, werden folgende Forschungsfragen beantwortet:

- Wie unterscheidet sich die Dauer des Trockenstress der beiden Landnutzungssysteme während der Simulationsperiode?
- Wie unterscheidet sich Intensität des Trockenstress beider Landnutzungssysteme während der Simulationsperiode?
- Was ist der Unterschied in der Reduzierung der Produktivität beider Landnutzungssysteme?

Die Forschungsarbeit ist wie folgt strukturiert: Kapitel zwei beschreibt die Methodik der Studie, also das Forschungsgebiet, den Aufbau der Studie und die Messmethoden. Kapitel drei gibt eine Darstellung der Ergebnisse, welche in Kapitel vier, der Diskussion, interpretiert und ausführlich besprochen werden. Die Diskussion enthält auch eine Darstellung der Implikationen und der Limitierung dieser Studie. Abschließend wird in Kapitel fünf ein Fazit gegeben.

2. Methodik

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurden mehrere quantitative Messungen vor Ort, und Schätzungen anhand von einem Modell durchgeführt. Im Folgenden werden die Region, die beide Flächen, das Muster der Probenentnahme, und die Messmethoden vorgestellt.

Die Forschungsarbeit wurde auf dem Betrieb Gut & Bösel durchgeführt, welcher sich in Alt Madlitz ca. 80 km östlich von Berlin befindet (Abbildung 1). Die umliegende Region kann landschaftlich als *Lebusplatte* eingeordnet werden, die zwischen *Oderbruch* und *Fürstenwalder Spreetalniederung* liegt. Es ist eine Grundmoräne die von Geschiebelehmen, -mergeln, -sanden und Rinntälern geprägt und in der Weichseleiszeit entstanden ist. Die vorherrschenden Bodenarten sind stark sandige Lehme und lehmige Sande. Klimatisch liegt der Standort im Übergangsbereich zwischen den atlantisch und den kontinental geprägten Zonen, wobei der kontinentale Einfluss überwiegt. Typisch sind große jahreszeitliche Temperaturschwankungen mit warmen Sommern und mäßig kalten Wintern. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge liegt bei 500 mm pro Jahr. Ein Großteil davon fällt zwischen den Monaten Mai und September (Bauer, 1999).



Abbildung 1: Lage des Forschungsgebiets und des Betriebs Gut & Bösel

Forschungsgebiet

Bodenproben wurden auf zwei Flächen des Betriebs Gut & Bösel gezogen. Die erste Fläche ist ein syntropischer Agroforst und die zweite ein nahes Vergleichsfeld, das mit einjährigen Kulturen in der Fruchtfolge des Betriebs bestellt wird. Der syntropische Agroforst wird im Folgenden auch als AG -, und das Vergleichsfeld als VF bezeichnet.

Der syntropische Agroforst

Dies ist ein Agroforstsystem das auf dem von Ernst Götsch entwickelten System der „syntropischen Landwirtschaft“ basiert (Bickel, 2019). Dieses System macht sich natürliche Sukzessionsprozesse zu Nutze, um dynamische Ökosysteme zu schaffen, die sowohl Nahrungsmittel als auch Holz und Biomasse produzieren und die Bodenfruchtbarkeit verbessern.

Hauptaspekte dieses Ansatzes sind:

1. Langzeit Planung und Miteinbeziehung der Sukzession
2. Besetzung aller Schichten eines „syntropischen Agroforstsystems“ wie in Abbildung 2 zu sehen
3. Eine hohe Diversität und Dichte an Anbaufrüchten inklusive Begleitpflanzen zur Unterstützung der Hauptpflanzen
4. Mehrjährige Pflanzen und dauerhafte Boden Bedeckung
5. Selektion und Trial and Error (Bickel, 2019; Ruff, 2018).

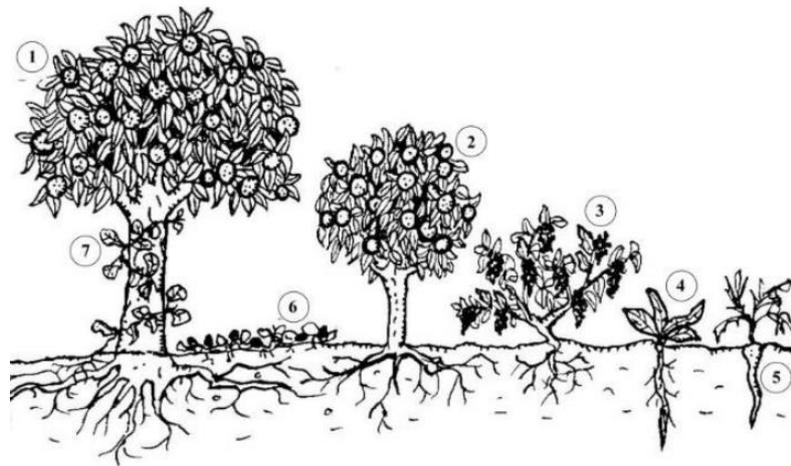


Abbildung 2: Die verschiedenen Schichten eines syntropischen Agroforstsystems (Mackall & Gabriel, 2012)

Das syntropische Agroforstsystem dieser Studie ist ca. 3 Jahre alt und wurde in 20 Reihen, auf einer Fläche von 3 ha angelegt. Die Baumreihen haben eine Nord-Süd Ausrichtung und enthalten diverse Gehölz- und Obstbäume, Beeren und Kräuter mit insgesamt über 50 verschiedenen Spezies. Zwischen den Baumreihen wird derzeit eine Luzerne-Weidegras-Mischung angebaut. Eine ausführliche Inventur der Baumarten ist im Anhang I zu finden. Wie Abbildung 3 zeigt, wurde Fläche für diese Studie auf den mit Baumreihen bepflanzten Bereich begrenzt.

Vergleichsfeld

Das Feld, welches zum Vergleich gewählt wurde, liegt direkt neben dem Agroforstsystem und hat eine Größe von ca. 80 ha. Aus diesem Grund wurde, wie in Abbildung 3 zu sehen, eine Teilfläche des Feldes mit der gleichwertigen Größe des AG ausgewählt. Die Teilfläche wurde nicht nach einer bestmöglichen Repräsentation des gesamten Feldes, sondern nach der bestmöglichen Vergleichbarkeit mit dem AG ausgewählt. Das Fläche wird unter Vorgaben des Ökolandbaus mit regenerativen Praktiken bewirtschaftet. Das bedeutet eine maschinelle Beikraut Bekämpfung, Bodenbearbeitungen wie Pflügen und Grubbern, die Integrierung von diversen Zwischenfrüchten und Untersaaten und eine vierteilige Fruchtfolge. Teil dieser Fruchtfolge sind verschiedene Arten von Getreide wie Hafer, Dinkel, Roggen, Lupine, Gerste, Mais und Ackergras-Leguminosen Gemenge. Die Anbauplanung kann im Anhang I eingesehen werden.



Abbildung 3: Das Agroforstsystem und die Teilfläche des Vergleichsfeldes inclusive Probenmuster

Muster der Beprobung

Das syntropische Agroforstsystem und das Vergleichsfeld wurden beide, wie in Abbildung 3 dargestellt, nach einem nicht zufälligen, zweckmäßigen Muster beprobt. Dabei unterscheidet sich die Beprobung beider Flächen wegen unterschiedlicher Eigenschaften wie folgt.

Das Agroforstsystem wurde an zwei Stellen jeweils

1. in der Baumreihe,
2. 1m neben der Baumreihe und
3. in der Mitte der Baumreihen beprobt.

Mit dieser Methode soll, über spätere Gewichtung nach Anteil der bedeckten Fläche der einzelnen Probenentnahme Punkte, eine möglichst repräsentative Darstellung der Bodeneigenschaften des Systems wiedergespiegelt werden. Die Gewichtung im Agroforst ist wie folgt:

Tabelle 1: Gewichtung der Probenpunkte des AGs

Probepunkt	Breite	Gewichtung
In der Baumreihe	2 Meter	20 %
1m neben der Baumreihe	1 Meter	10 %
Mitte der Baumreihen	7 Meter	70 %

Um eine repräsentative Darstellung der Bodeneigenschaften des Vergleichfeldes zu erreichen, wurde die Teilfläche in der gängigen Form eines W beprobt. Somit gibt es 6 Probenpunkte in dem AG und 5 Probenpunkte in dem VF. An jedem Punkt werden Proben im Oberboden (15 cm Probentiefe) und Unterboden (55 cm Probentiefe) gezogen.

In dieser Studie können keine Statistischen Analysen der Ergebnisse gemacht werden. Dies liegt an der geringen Anzahl der Proben und dem speziellen Probeentnahme Muster im Agroforst. Dort gibt es immer nur zwei vergleichbare Probenpunkte (e.g. zwei Proben aus der Baumreihe, zwei Proben 1m neben der Baumreihe etc.). Eine statistische Analyse dieser Werte würde keine zuverlässigen Ergebnisse geben. Des Weiteren ist die Variation der Ergebnisse innerhalb des Agroforstes so groß, dass ein statistischer Vergleich mit dem Vergleichsfeld auch hier keine zuverlässigen Ergebnisse geben würde, aus denen man etwas über die Signifikanz und Vergleichbarkeit sagen könnte. Deshalb wird in dieser Studie nur von Tendenzen gesprochen.

Messmethoden

Bodenhorizont

Die Bodenhorizonte wurden in dieser Studie mit einem Bodenauger von Eijkelkamp (bis 1.20 m) beprobt, um einen Überblick von dem Aufbau, der Homogenität und der Vergleichbarkeit der Böden beider Flächen zu bekommen. Dabei wurden aufeinanderfolgenden Proben von ca. 10 cm tiefe aus demselben Probenpunkt auf einem hellen Untergrund aneinandergelagt, um so den Bodenhorizont aufzubauen. Wegen Überschneidungen der aufeinanderfolgenden Proben wird der Bodenhorizont diagonal dargestellt.

Bodenart

Die Bodenart wurde in dieser Studie nach der Schlemm Methode bestimmt. Dabei wird ein Glas mit ca. 1/3 Bodenprobe und 1/3 Wasser gefüllt und ca. 2-3 Minuten geschüttelt. Der Sand setzt sich nach ca. 1-2 Minuten ab, der Schluff nach ca. 1 Stunde und der Ton nach ca. 24 Stunden. Die Höhe des jeweiligen Anteils im Verhältnis zur Gesamthöhe ergibt den prozentualen Anteil von Sand, Schluff und Ton der jeweiligen Probe (Sammis, 1996). Mit dem Dreiecksdiagramm der Körnungsklassen wird dementsprechend die Bodenart bestimmt (Amelung et al., 2018).

Organische Bodensubstanz

Die organische Bodensubstanz wurde in dieser Studie mit der Glühverlustmethode ermittelt. Die Bodenproben werden dabei für 24 Stunden bei 105 °C getrocknet und anschließend für 3 Stunden auf eine Temperatur von 550 °C erhitzt. Dabei verbrennen die organischen Bestandteile der Probe. Der Gewichtsverlust durch die Erhitzung in Relation zum Gesamtgewicht der Probe ergibt den prozentuale Anteil von organischer Substanz im Boden (FAO, 2019).

Feldkapazität

Feldkapazität (FK) ist ein Kennwert der Wasserspeicherkapazität eines Bodens. Er beschreibt den Wassergehalt, der gegen die Schwerkraft im Boden gehalten werden kann (*Lexikon Der Geowissenschaften*, n.d.). Da der Boden durch Adsorptions- und Kapillarkräfte eine Saugspannung auf das Bodenwasser ausübt, kann dieser Punkt der FK auch als Wasserspannung angegeben werden. Diese wird mit dem logarithmischen Wert pF gekennzeichnet und liegt bei der FK bei pF 1,8-2 (Eijkelkamp Soil & Water, 2019; Hellberg-Rode et al., 2002). FK kann entweder in Volumen (%) oder in Masse (e.g. m^3/m^3) angegeben werden.

Die FK wurde nach der Methode aus dem *FAO Manual 45* (W.R. Walker, 1989) bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung der Originalmethode kann in Anhang II eingesehen werden. Für diese Studie wurde die Methode angepasst und statt im Feld mit Bodenkernproben in 100 cm³ Ringen ausgeführt. Nach der Entnahme wurden die Proben vorbereitet, auf einer Seite mit einem wasserdurchlässigen Teefilter und auf der anderen Seite mit einem Plastikdeckel bedeckt. Zur Sättigung wurden sie anschließend für 12 Stunden in einen Behälter mit Wasser gestellt. Danach wurden die Proben gewogen und in einen verschließbaren Behälter mit einem durchlässigen Gitter platziert, damit das Wasser, welches nicht vom Boden gehalten wird, durch Gravitation ablaufen kann. Der Wasserverlust wurde übers Wiegen in halbstündigen Intervallen bestimmt. Die aufgenommenen Daten wurden dann in einen Graphen dargestellt und mit der Trendlinie der Punkt der minimalen Veränderung festgelegt. Anschließend wurden die Proben für 24 Stunden bei 105-110 Grad Celsius getrocknet. Mit dem Trockengewicht der Probe wurde der volumetrische Wassergehalt, die Bodendichte und der gravimetrische Wassergehalt bestimmt.

Die FK im Unterboden konnte auf beiden Flächen wegen zu hohem Schaden an bestehenden Kulturen nicht beprobt werden. Alternativ wurde die FK im Unterboden mit derselben Pedotransferfunktion wie der permanente Welkepunkt bestimmt.

Permanenter Welkepunkt

Der permanente Welkepunkt (PWP) beschreibt den Wassergehalt im Boden, bei dem das Wasser so stark an die Bodenpartikel gebunden ist, dass Pflanzen dieses Wasser nicht nutzen können und dementsprechend welken. Dieser Punkt liegt bei einer Wasserspannung von pF 4,2. Die Labor Bestimmung des PWP (pF 4.2) war im Rahmen der Studie nicht möglich, daher wurde der PWP über eine Pedotransferfunktion (PTF) bestimmt. In dieser Studie wurde die PTF ROSETTA 3 genutzt um anhand der Bodentextur die van Genuchten Wasserretentionsparameter FK und PWP zu bestimmen (Schaap & Zhang, 2017). Der PWP wird in der Maßeinheit Volumen (%) angegeben. Die Feldkapazität minus den permanenten Welkepunkt ergibt die nutzbare Feldkapazität ($FK - PWP = nFK$). Der nFK beschreibt die Menge an Wasser die im Boden gespeichert, und von den Pflanzen genutzt werden kann (Hellberg-Rode et al., 2002).

Bodenwassergehalt

Für diese Studie wurde für beide LNS anhand von Wetterdaten eine Wasserbilanz auf täglicher Basis aufgesetzt. Eine Wasserbilanz ist ein einfaches Modell welches den Boden als einen Körper sieht der Wasser aufnimmt und abgibt. Anhand von diesem Modell wird der aktuelle pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (pWG) beider LNS über eine Simulationsperiode von Mai 2019 – August 2021 geschätzt. Zwei wichtige Parameter sind der aktuelle pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (pWG) und der maximale pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (pWG_{max}). Eine detaillierte Beschreibung des Modells und der Berechnungen kann im Anhang II eingesehen werden.

Trockenstress

Trockenstress (TS) entsteht, wenn der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt so gering ist, dass Pflanzenfunktionen durch Transpirationsregulierung eingeschränkt werden. TS kann in Dauer und Intensität eingeteilt werden. Die Dauer ist die Anzahl von Tagen, in denen ein System (e.g. LNS) Stress erfährt, während die Intensität das Ausmaß dieses Stresses beschreibt. Um den Trockenstress eines Systems zu bestimmen kann das relative extrahierbare Wasser (REW) berechnet werden. Das ist das Verhältnis von aktuellem pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt zu maximalem pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt über das gesamte Bodenprofil, welches von Wurzeln erreicht wird. Trockenstress entsteht, wenn das $REW < 0.4$ fällt, also der pWG unter 40% des pWG_{max} fällt (Estiarte & Vicca, 2019). Diese Methodik basiert auf einer des gesamten Systems und nicht individueller Spezies, deshalb ist der REW nicht Kultur abhängig. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnung vom REW kann in Anhang II eingesehen werden.

3. Ergebnisse

Dieses Kapitel zeigt die Ergebnisse dieser Studie. Zusätzliche Informationen zu Ergebnissen können im Anhang III eingesehen werden.

Bodeneigenschaften

Bodenhorizont

Der Bodenhorizont von beiden Flächen zeigt einen braunen Ackerhorizont der schwach mit Humus angereichert ist (0-30 cm). Darauf folgt ein hellbrauner, Ton-humusverarmter Oberbodenhorizont aus Sand. Dieser Variiert je nach Entnahmepunkt im AG zwischen 30-60 cm und 30-85 cm und im VF zwischen 30-40 cm und 30-80 cm. Nachfolgend ist ein gelblich brauner Tonanreicherungshorizont zu sehen der mit Sand verzahnt ist. Dieser beginnt im AG bei einer tiefe zwischen 60-85 cm und im VF je nach Entnahmepunkt bei einer Tiefe von 40-80 cm. Es ist auffällig das gerade in den höher gelegenen Entnahmepunkten (AG 4 und 5 und VF 4 und 5) der Tonanreicherungshorizont bei geringerer Tiefe beginnt. Die Ergebnisse der Beprobung des Bodenhorizonts können im Anhang III eingesehen werden.

Bodenart

Die Analyse zeigt eine Bodenart von hauptsächlich schluffig bis leicht lehmigen Sanden für beide Flächen. Der Oberboden weist dabei einen leicht höheren schluff und Ton Anteil auf als der Unterboden, der oft bis zu fast 80% aus Sand besteht. Gerade im AG der Schluff und Ton Anteil wie in Tabelle 2 zu sehen etwas höher als im VF. Die Bodenart der einzelnen Proben kann im Anhang III eingesehen werden.

Tabelle 2: Prozentualer Anteil der Minerale der analysierten Bodenschichten der zwei LNS

Prozentualer Anteil der Minerale	Sand %	Schluff %	Ton %
AG Oberboden	69	28	3
AG Unterboden	80	20	0.2
VF Oberboden	72	25	2
VF Unterboden	78	22	0.1

Organische Substanz (OM)

Der Gehalt an organischer Substanz im Boden wird in einem Boxplot Diagramm (Abb. 4) dargestellt. Dabei wird zwischen Fläche und Bodenschicht unterschieden. Es ist zu sehen, dass die OM im AG in beiden Bodenschichten höher als im VF ist. Auffällig ist die Variationsbreite des OM im Oberboden des AG mit einem Median von 3.4 % und einem maximum von 8.69 %.

Das Boxplot Diagramm zeigt die Rohdaten der Proben ohne Miteinbeziehung der Gewichtung nach Entnahmepunkt im AG, die in der Methodik beschrieben wurde. Gewichtete Mittelwerte des OM können in Tabelle 3 eingesehen werden.

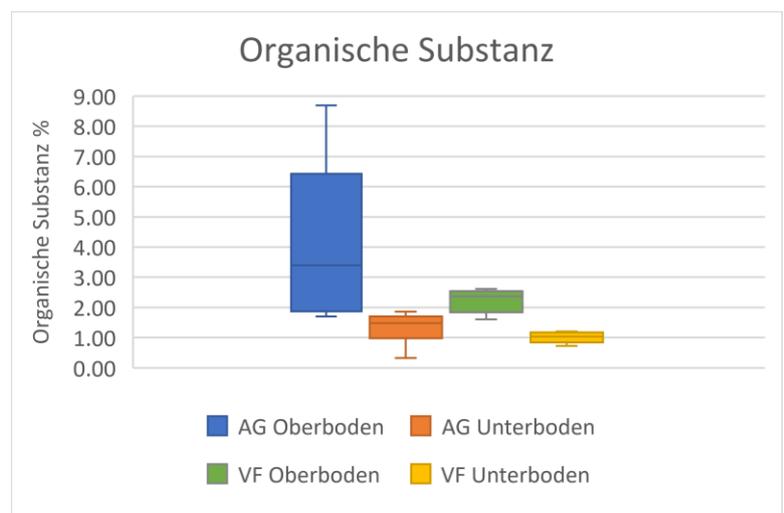


Abbildung 4: Boxplot mit der organischen Substanz der analysierten Bodenschichten der zwei LNS

Tabelle 3: Gewichtete organische Substanz der analysierten Bodenschichten der zwei LNS

	AG Oberboden	AG Unterboden	VF Oberboden	VF Unterboden
Durchschnittswert OM %	3.32	1.33	2.23	1.01

Feldkapazität und Permanenter Welkepunkt

Ergebnisse der Analyse der FK und des PWP werden in einem Boxplot Diagramm in Abb. 5 dargestellt. Dabei wird zwischen Fläche und jeweiliger Bodenschicht unterschieden. Die Feldkapazität des Oberbodens beider Flächen wurden gemessen, während die FK des Unterbodens und der PWP im Ober-, und Unterboden mit der Pedotransferfunktion *Rosetta* bestimmt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die FK im Oberboden des Vergleichsfeldes höher ist als die des AGs. Der permanente Welkepunkt des Oberbodens ist wiederum höher im Agroforst als im Vergleichsfeld. Im Unterboden ist die FK und der PWP höher im Vergleichsfeld als Agroforst. Trotzdem ist die nutzbare Feldkapazität, wie Tabelle 4 zeigt, sowohl im Ober-, als auch im Unterboden höher im VF als im AG. Die Variabilität der mit der PTF geschätzten Parameter scheint hoch bei der FK und mäßig bei dem PWP.

Die Ergebnisse in Abb. 5 zeigen die Ergebnisse der einzelnen Proben. Die gewichteten Resultate (wie in der Methodik beschrieben) werden in Tabelle 4 dargestellt.

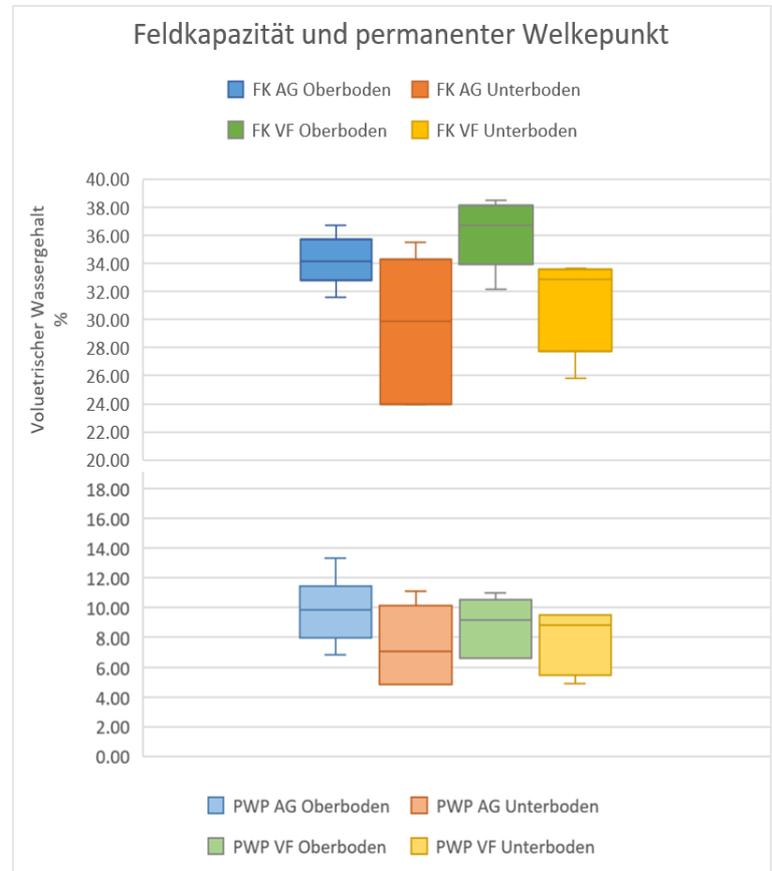


Abbildung 5: Boxplot der Feldkapazität und des permanenter Welkepunktes der analysierten Bodenschichten der zwei LNS

Tabelle 4: Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und nutzbare Feldkapazität der analysierten Bodenschichten der zwei LNS

	AG Oberboden	AG Unterboden	VF Oberboden	VF Unterboden
FK %	34.82	29.18	36.16	31.08
PWP %	8.68	7.43	8.70	7.71
nFK %	26.13	21.75	27.46	23.37

Bodenwassergehalt und Trockenstress

Bodenwassergehalt

Der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (pWG) beider LNS wird in Abb. 6 und 7 dargestellt. Es wird zwischen pWG im Oberboden und im Unterboden (Abb. 6) -, und gesamten pWG beider Schichten (Abb. 7) unterschieden. Der pWG_{max} des Oberbodens ist etwas geringer im Agroforst als im Vergleichsfeld. Der pWG beider LNS erfährt während des Simulationszeitraums keine maximale Erschöpfung. Doch hat das Vergleichsfeld in den Sommermonaten stärkere Erschöpfungen des pWGs als der Agroforst. Im Unterboden ist der pWG_{max} des Agroforsts höher als der des Vergleichsfeldes. Beide Systeme erfahren maximale Erschöpfung des pWG in den Sommermonaten. Der pWG des Vergleichsfeld erholt sich von diesen Erschöpfungen im ersten Jahr schneller als der des Agroforst und im zweiten Jahr mit ähnlicher Geschwindigkeit.

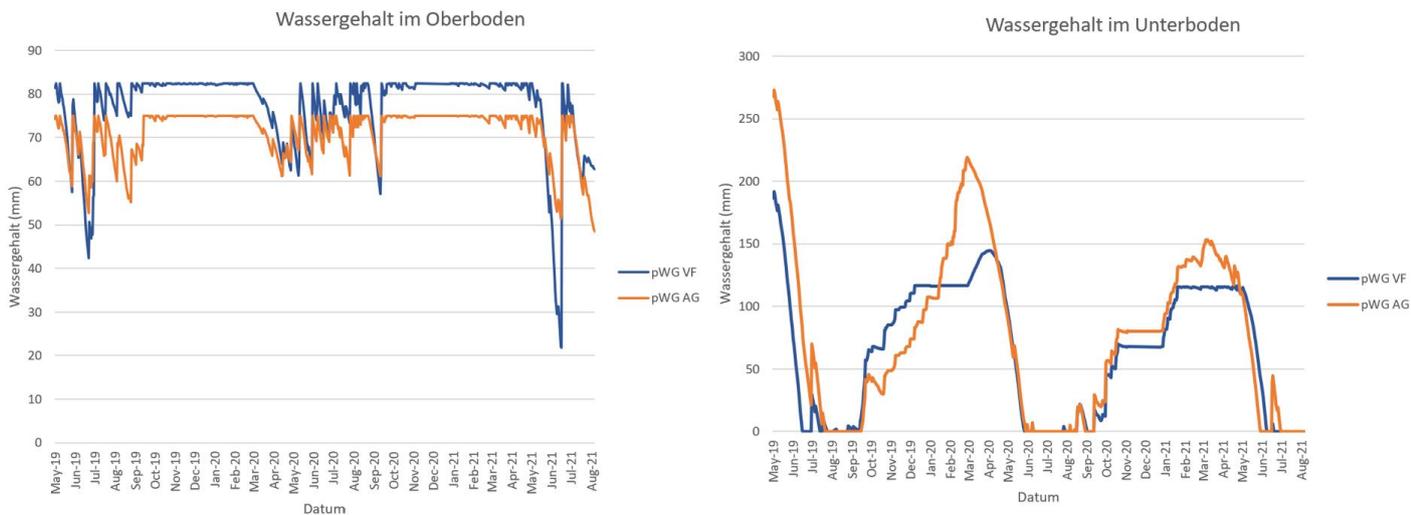


Abbildung 6: PWG des Ober-, und Unterbodens beider LNS

Der gesamte pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt verhält sich wegen der Gewichtung Oberboden zu Unterboden (ca. $\frac{1}{4}$ zu $\frac{3}{4}$) ähnlich wie der des Unterbodens. Ein Unterschied ist, dass sich der gesamten pWG beider Systeme während des Messzeitraums nicht vollständig erschöpft. In Abb. 7 wird zusätzlich der pWG_{max} dargestellt. Im Vergleichsfeld erreicht der pWG diese Grenze in den Wintermonaten und überschüssiges Wasser versickert. Im Agroforst wird die Grenze nicht erreicht, d.h. es versickert kein Wasser während des Simulationszeitraums.

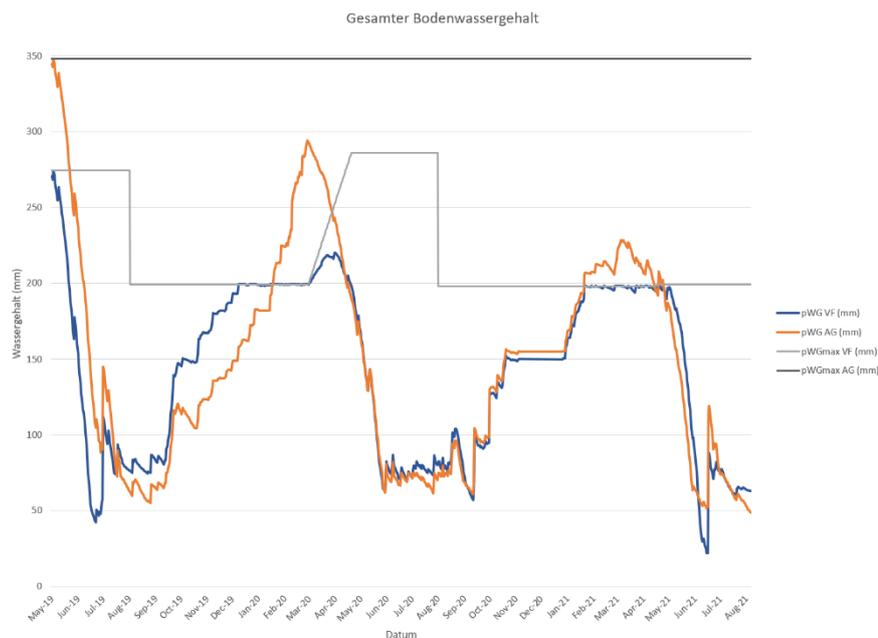


Abbildung 7: Gesamter pWG beider LNS über den Simulationszeitraum

Länge und Intensität des Trockenstresses

Das relative extrahierbare Wasser beider Systeme während des Messzeitraums wird in Abb. 8 dargestellt. Die rote Linie im Graph zeigt den Grenzwert von 0.4, unter welchem die Systeme Trockenstress erfahren. Die Ergebnisse sind numerisch in Tabelle 5 dargestellt. Das Agroforstsystem hat ca. 50 % des Messzeitraums Trockenstress, während es bei dem Vergleichsfeld nur 29 % sind. Dabei wird die Verringerung der Produktivität durch diesen Stress im AG auf 19 % und im VF auf 7% geschätzt. Detailliertere Angaben können im Anhang III eingesehen werden.

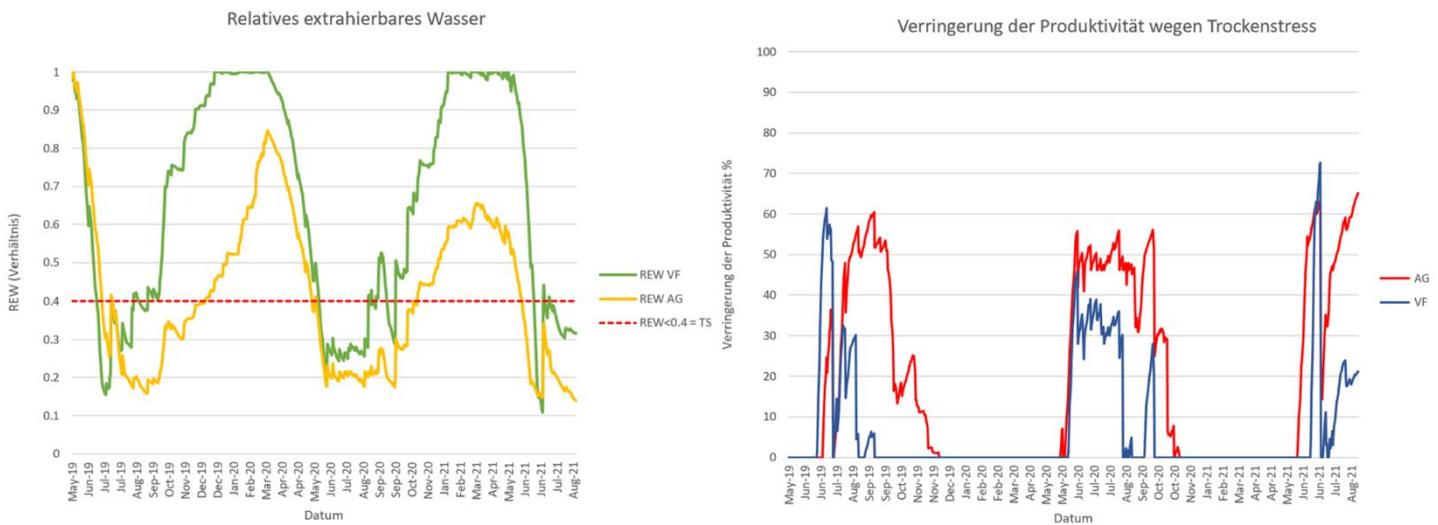


Abbildung 8: REW und Verringerung der Produktivität durch TS

Tabelle 5: Dauer des TS und dadurch verursachte Verringerung der Produktivität der LNS

Jahr	Dauer TS VF (Tage)	Dauer TS AG (Tage)	Verringerung der Produktivität VF (%)	Verringerung der Produktivität AG (%)
2019	70	158	7.4	20.8
2020	95	159	8.2	18.9
2021	61	84	6.2	17.8
Insgesamt	226	401	7.4	19.2

4. Diskussion

Dieses Kapitel enthält eine Interpretation der Resultate, eine Diskussion der genutzten Methoden und ein Vergleich mit anderen Studien.

Bodenhorizont und Bodenart

Der Boden besteht aus schluffig bis leicht lehmigen Sanden und kann anhand des Bodenhorizonts als Bänderfahlerde klassifiziert werden. Der Bodenhorizont zeigt die für Bänderfahlerden typischen leicht humosen Ackerhorizont auf den ein sandiger Ton-, und Humusarmer Oberboden folgt. Auf den höher gelegenen Probenpunkten beider Flächen kann unter der sandigen Schicht ein Tonanreicherungshorizont gesehen werden, der charakteristisch für Bänderfahlerden ist. Bänderfahlerden sind typisch für Böden der Region, die aus Grundmoränen entstanden-, und unter Ackerbaulicher Nutzung sind (MLUR et al., 2003).

Organische Substanz

Die organische Substanz beider Systeme ist gering (1-3 %) aber im VF vergleichbar-, und im AG etwas höher als typische Werte für die sandigen Böden der Region (Umweltbundesamt, 2020).

Der gewichtete OM Gehalt des AGs ist sowohl im Oberboden als auch im Unterboden höher als der des VFs. Dieser Unterschied ist größer im Oberboden und minimal im Unterboden. Auffallend ist die große Variation des OMs im Oberboden des AGs. In der Baumreihe sind die OM Werte teilweise mehr als drei Mal so hoch wie neben und zwischen den Baumreihen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass bei der Pflanzung der Bäume Kompost mit eingetragen wurde und in den Baumreihen dauerhaft Mulch genutzt wird. Dieser zersetzt sich und trägt zu einem höherem OM Gehalt im Boden bei. Im Unterboden des AGs ist jedoch auch ein höherer OM Gehalt als im VF zu sehen. Dies kann nur teilweise durch die Eintragungen von Kompost bei der Pflanzung erklärt werden. Andere Gründe könnten die Auswaschung von OM des Oberbodens in tiefere Schichten-, und der Einfluss von abgestorbener Biomasse und Wurzelexudaten der Bäume sein. Dies ist jedoch nur eine Hypothese, da keine Vergleichsdaten von vorherigen Messungen des OM in Ober-, und Unterboden vorliegen. Deshalb, und weil das Agroforstsystem noch sehr jung ist, ist eine regelmäßige Überprüfung des OM Gehaltes in den folgenden Jahren zu empfehlen. Somit können die Einflüsse des LNS auf den OM Gehalt im Boden miteinander in Verbindung gebracht und quantifiziert werden.

Laboranalysen des OMs aus beiden Flächen zeigen etwas geringere Werte als die, die in dieser Studie gemessen wurden (~1.5%). Dies lässt sich an der Glühverlustmethode erklären, mit der eine leichte Überschätzung des OM Gehaltes durch den Verlust von gebundenem Wasser und CO₂ einhergeht. Daher ist eine leichte Überschätzung des OM Gehaltes in dieser Studie wahrscheinlich. Da der OM Gehalt beider Flächen mit der gleichen Methode bestimmt wurde, lassen sie sich trotz Überschätzung miteinander vergleichen.

Feldkapazität und permanenter Welkepunkt

Die gemessene nutzbare Feldkapazität beider Flächen ist mit 26-28 % höher als Vergleichswerte aus der Region, die bei 14-22 % liegen (LGB, 2020). Dieser Unterschied könnte durch höhere OM Werte (ca. 1%) und die regenerativen Anbaumethoden erklärt werden, da diese mit dauerhafter Bodenbedeckung (Zwischenfrüchten und Untersaaten) die Durchwurzelung und Erhaltung der Bodenstruktur fördern. Der Unterschied könnte aber auch an der experimentellen Methode zur Bestimmung des FK liegen. Laboranalysen von dem Vergleichsfeld zeigen ein FK von ca. 25%, im Vergleich zu dem gemessenen Wert von 36% ist davon auszugehen, dass die genutzte Methode dieser Studie eine Überschätzung der FK Werte zur Folge hat. Der PWP aus der Laboranalyse ist wiederum geringer (3-4%) als der mit der PTF geschätzte Wert (7-9%) dieser Studie. Da sowohl FK als auch PWP überschätzt wurden müsste die ermittelte nFK nur etwa 2-

3% höher als die im Labor bestimmte nFK sein. Die Ergebnisse der Laboranalyse können in Anhang III eingesehen werden.

Die gemessene Feldkapazität ist im Ober-, sowie im Unterboden des VF höher als im AG. Diese Ergebnisse widersprechen den Erwartungen einer höheren FK im AG wegen des erhöhten OM Gehalt und besserer Bodenstruktur durch mehrjährige Pflanzen. Dieser unerwartete Unterschied kann mit Pflügen des VFs ca. 2-3 Wochen vor Probeentnahme erklärt werden, welche eine Auflockerung des Bodens, also eine Vergrößerung des Porenvolumens des Bodens, zur Folge hat. Um dies mit Sicherheit zu sagen, müsste man jedoch mehr Proben je Fläche zu verschiedenen Zeitpunkten nehmen. Der PWP ist im Ober-, und Unterboden beider Flächen vergleichbar. Dies war zu erwarten, da die PTF Rosetta den OM Gehalt nicht miteinbezieht und zwischen beiden Flächen kein großer Unterschied in der Bodenart vorliegt. Diese Einschränkung des Rosetta Modells verringert die Genauigkeit der Ergebnisse im Hinblick auf FK und PWP, doch da mit steigendem OM Gehalt beide Parameter mit einer ähnlichen Rate ansteigen, beeinflusst diese Einschränkung die nFK nur minimal (Irmak et al., 2018).

Schlussfolgernd ist die nFK (FK-PWP) im VF sowohl im Ober-, als auch im Unterboden etwas höher als im AG. Somit hat der VF eine höhere Wasserspeicherkapazität als der AG.

Pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (pWG)

In diesem Abschnitt wird erst der pWG des Oberbodens und des Unterbodens-, dann der gesamte pWG und am Ende die Implikationen dieser Werte besprochen.

Im Oberboden hat das VF aufgrund von einer höheren nFK einen höheren pWG_{max} als der AG. Trotzdem erfährt das VF in den Sommermonaten der Simulationsperiode höhere Erschöpfungen des pWG. Dies steht in Zusammenhang mit einer höheren Evapotranspiration (Anhang II, Abb. 12) der Ackerkulturen des VFs im Sommer. Beide LNS erfahren jedoch keine vollständige Erschöpfung des pWG im Oberboden. Dies kann anhand von dem genutzten Modell der Wasserbilanz erklärt werden. Dort wird der Oberboden als erste Schicht mit einer Tiefe von 30 cm gesehen. In dieser ersten Schicht überwiegen die Niederschläge während der Simulationsperiode der partiellen Evapotranspiration der Vegetation der Systeme. Der pWG_{max} im Unterboden ist, anders als im Oberboden, höher im AG als im VF. Die größere Wurzeltiefe der Bäume des AGs und das damit einhergehende Erreichen tieferer Bodenschichten ist ausschlaggebender als die höhere nFK des VFs. Beide LNS erfahren maximale Erschöpfungen des pWG im Unterboden während der Sommermonate der Simulationsperiode. Dabei ist der pWG des VF wegen dem geringeren pWG_{max} früher erschöpft als der des AGs und erholt sich im Sommer wegen der vorher genannten höheren ET auch langsamer. Im Herbst ist dies Umgekehrt, da die Ackerfrüchte des VFs früh geerntet werden und der AG mit den Bäumen eine längere Wachstumsperiode-, und somit eine höhere ET hat, erholt sich der pWG des VFs im Herbst schneller. Somit erreicht der pWG des VFs den maximalen pWG in den Wintermonaten, während der pWG des AG den maximalen pWG wegen einer früh startenden Wachstumsperiode während des Simulationszeitraums zu keinem Zeitpunkt erreicht. Der gesamte pWG, also beider Schichten, verhält sich in beiden LNS ähnlich wie der des Unterbodens. Das liegt an dem Verhältnis der Tiefe dieser zwei Schichten, denn der Oberboden nimmt mit 30 cm ca. $\frac{1}{4}$ der gesamten Tiefe-, und der Unterboden ca. $\frac{3}{4}$ der gesamten Tiefe ein. Der Unterschied des gesamten pWG zum pWG des Unterbodens ist, dass der erstere zu keinem Zeitpunkt maximale Erschöpfung erreicht.

Aus den Ergebnissen dieser Analyse lassen sich einige Schlussfolgerungen ziehen. Erstens, der AG verbraucht wegen längerer Wachstumsperioden mehr Wasser. Er hat aber durch die größere Wurzeltiefe auch mehr Wasser zur Verfügung. Zweitens, die Höchstwerte der ET und damit der Erschöpfung sind höher im

Vergleichsfeld. Durch die kürzere Wachstumsperiode erholt sich der pWG des VFs aber auch schneller. Daraus lässt sich schließen, dass die Schwankungen des pWG des Agroforstes geringer sind als die des Vergleichsfeldes. Dies ist von Vorteil bei zunehmenden extremen Wetterbedingungen da der AG diese besser als das VF abpuffern kann. Wie sich dies auf die Produktivität der LNS auswirkt, wird im folgenden Teil besprochen.

Eine wichtige Limitierung des Modells zur Bestimmung des pWGs ist, dass es von einem ausgewachsenen Agroforstsystem ausgeht. Da dies aber erst 3 Jahre alt ist, wird die Evapotranspiration des Systems sehr wahrscheinlich überschätzt. Eine Annäherung an ein junges System in der Entwicklung ist wegen der hohen Diversität an Pflanzen zu komplex, um im Rahmen dieser Studie durchgeführt zu werden. Des Weiteren wird eine gleichmäßige Verteilung der Wurzeln über die gesamte Wurzeltiefe angenommen, aus der die partielle Evapotranspiration der jeweiligen Schichten bestimmt wird. In Realität nimmt die Wurzeldichte mit zunehmender Tiefe ab. Daher sollte die partielle Evapotranspiration etwas niedriger im Unter-, und etwas höher im Oberboden als die bestimmten Werte sein. Aus zeitlichen Einschränkungen mussten mehrere Annahmen bezüglich der Evapotranspiration des Agroforstes gemacht werden. Dies beinhaltet z.B. sehr ähnliche Werte der Evapotranspiration für die verschiedenen Baumarten im System. Mit einer individuelleren Beschreibung der ET der verschiedenen Baumarten könnte die Genauigkeit des Modells noch verbessert werden. Es wäre zu empfehlen die Ergebnisse dieser Studie mit Bodenfeuchtemessungen beider Flächen zu vergleichen, um die Genauigkeit des genutzten Modells zu bestimmen.

Trockenstress und Verringerung der Produktivität

Der Trockenstress den die LNS erfahren werden anhand vom REW bestimmt (pWG/pWG_{max}), daher lassen sich einige Aussagen über den pWG auch auf den TS übertragen.

Das VF erfährt Trockenstress früher als der AG, erholt sich aber auch schneller. Durch die längere Wachstumsperiode ist der TS des Agroforsts im ersten Jahr mehr als doppelt so lang wie der des VFs. Die Intensität der beiden LNS ist dabei vergleichbar. Während sich der REW des VFs wieder komplett erholt, bleibt der REW des AGs bei einem maximum von 80%, was einen intensiveren TS im darauffolgenden Sommer 2020 zur Folge hat. Wie im ersten Jahr ist auch 2020 die Dauer des TS im AG doppelt so lang wie der im VF. Dieses Muster ist auch im dritten Jahr wieder zu erkennen. Der REW des AG erreicht im zweiten Jahr (2020) ein maximum von 65%, während sich das VF vollständig erholt. Über die gesamte Simulationsperiode erfährt das VF 29% -, und der AG 51% der Zeit Trockenstress. Dabei ist die Intensität des TS bei dem Agroforst tendenziell höher. Dies spiegelt sich auch in der Verringerung der Produktivität wider. Diese ist während des Simulationszeitraums im Agroforst fast drei Mal so hoch wie im Vergleichsfeld. Der Agroforst erfährt also trotz höherer Wasserverfügbarkeit wegen längerer Wachstumsperioden als das VF erheblich längere und etwas intensivere Perioden von Trockenstress.

Hervorzuheben ist hierbei, dass diese Verringerung der Produktivität durch TS auf Systemebene und nicht auf Pflanzenebene ist. Dies ist ausschlaggebend, da z.B. Böhm et al. (2020) in einer Fallstudie zeigt, dass die Flächenproduktion von Agroforstsystemen höher ist als die von Ackerkulturen ohne agroforstliche Nutzung. Die Produktivität des Agroforstes ist also höher, aber die Verringerung der Produktivität wegen TS ist auch höher als im Vergleichsfeld. Das bedeutet, dass man aus dieser Studie keine aussagekräftige Schlussfolgerung daraus ziehen kann, was für einen Effekt die Verringerung der Produktivität letztendlich auf den Ertrag und somit den monetären Gewinn aus den Systemen bedeutet.

5. Fazit

Die Zielstellung dieser Forschungsarbeit war es Einsichten auf den Einfluss von Agroforstsystemen auf den Bodenwassergehalt in Brandenburg zu erlangen. Dafür wurde ein syntropisches Agroforstsystem mit einem naheliegenden Feld mit einjährigen Pflanzen auf dem Betrieb Schlossgut Alt Madlitz GmbH & Co. KG im Osten von Brandenburg verglichen.

Die Ergebnisse der Bodenanalyse zeigen einen vergleichbaren Bodenhorizonte und Bodenart beider LNS. Die Proben des organischen Materials zeigen eine höhere Variabilität-, und generell leicht höhere OM Gehalte im Agroforstsystem. Diese können hauptsächlich auf äußere Eintragungen beim Pflanzen des AG zurückgeführt werden. Die nutzbare Feldkapazität ist höher im Vergleichsfeld als im Agroforst.

Der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt wurde auf einer täglichen Basis anhand von einer klimatischen Wasserbilanz in dem Zeitraum Mai 2019 – August 2021 geschätzt. Die Ergebnisse zeigen einen höheren Wasserverbrauch, aber auch eine höhere Wasserverfügbarkeit im Agroforstsystem im Vergleich zum Vergleichsfeld. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse eine insgesamt geringere Schwankung des pflanzenverfügbaren Wassergehalts im Agroforst über die Simulationsperiode. Im Hinblick auf den Klimawandel, mit der Zunahme von Extremereignissen wie Dürre und Starkregen, ist dies ein Vorteil des Agroforstsystems, da es diese extreme besser abpuffern kann als ein Feld mit einjährigen Pflanzen.

Der Trockenstress auf Systemebene war doppelt so hoch -, und die Verringerung der Produktivität drei Mal so hoch im Agroforst wie im Vergleichsfeld. Da jedoch die generelle Produktivität des Agroforstes höher ist als im Vergleichsfeld ist eine weiterführende Analyse auf Pflanzenebene nötig, um den Effekt dieses Stresses und die damit zusammenhängende Verringerung der Produktivität auf den Ertrag zu quantifizieren.

Eine wichtige Limitierung der Analyse ist, dass das genutzte Modell von einem voll entwickelten Agroforstsystem ausgeht, das System auf dem Betrieb jedoch noch in der Entwicklungsphase ist. Das führt wahrscheinlich zu einer Unterschätzung des pflanzenverfügbaren Wassergehalts im Agroforst. Diese Limitierung beeinflusst jedoch nicht die Schlussfolgerungen, die aus den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit gezogen werden können. Um die Genauigkeit des genutzten Modells und die erwähnte Überschätzung einzuschätzen, ist ein Vergleich mit Bodenfeuchtemessungen beider Flächen zu empfehlen.

Des Weiteren ist eine Weiterführung der Simulation des pflanzenverfügbaren Wassergehalts in beiden Systemen zu empfehlen, um die beobachteten Tendenzen über einen längeren Zeitraum, also während mehreren Wachstumsperioden, und unter verschiedenen Wetterbedingungen zu vergleichen. Abschließend ist auch eine regelmäßige Messung der Bodeneigenschaften beider Systeme zu empfehlen, um den Einfluss des Agroforstsystems auf diese zu quantifizieren.

6. Quellenverzeichnis

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm#Contents>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), 869–890. <https://doi.org/10.1007/S13593-015-0285-2/TABLES/2>
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch Der Bodenkunde*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>
- Bauer, J. (1999). *Flächennutzungsplan Alt Madlitz*. [https://www.amt-odervorland.de/INFORMATIONEN/ba_info/BAUAMTSINFORMATIONEN/BRIESEN_\(MARK\)/OT_ALT_MADLITZ/FNP_Alt_Madlitz_00_1999_11/FNP_Alt_Madlitz_00_1999_11_Begruendung.pdf](https://www.amt-odervorland.de/INFORMATIONEN/ba_info/BAUAMTSINFORMATIONEN/BRIESEN_(MARK)/OT_ALT_MADLITZ/FNP_Alt_Madlitz_00_1999_11/FNP_Alt_Madlitz_00_1999_11_Begruendung.pdf)
- Bickel, U. (2019). *Agroforstsysteme – innovative , produktive Landnutzung mit vielfältigen Funktionen*. https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2019/12/Bericht_Forum.pdf
- Böhm, C., Kanzler, M., Pecenka, R., & Ralf Pecenka, D.-I. (2020). *Untersuchungen zur Ertragsleistung (Land Equivalent Ratio) von Agro-forstsystemen Autoren*. <http://agroforst-info.de/>
- Eijkelkamp Soil & Water. (2019). *Sandbox for pF-determination*. www.eijkelkamp.com
- Estiarte, M., & Vicca, S. (2019). 3.8 Ecosystem water stress – *ClimEx Handbook*. <https://climexhandbook.w.uib.no/2019/11/05/ecosystem-water-stress/>
- FAO. (2019). *Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1)*. FAO. <http://www.fao.org/3/ca2934en/CA2934EN.pdf>
- Gahler, R. (2021). *Internship supervisor*.
- Hellberg-Rode, Gesine, D., Otto, D. K.-H., & Schleithoff, H. (2002). *HyperSoil - Entwicklung einer hypermedialen Lern- und Arbeitsumgebung zum Themenfeld "Boden" im (Sach-)Unterricht*. <https://www.hypersoil.uni-muenster.de/4/00.htm>
- Holsten, A., Vetter, T., Vohland, K., & Krysanova, V. (2009). Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas. *Ecological Modelling*, 220(17), 2076–2087. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2009.04.038>
- Irmak, S., Sharma, V., Mohammed, A. T., & Djaman, K. (2018). Impacts of cover crops on soil physical properties: Field capacity, permanent wilting point, soil-water holding capacity, bulk density, hydraulic conductivity, and infiltration. *Transactions of the ASABE*, 61(4), 1307–1321. <https://doi.org/10.13031/TRANS.12700>
- Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB). (2020). *Soil / Kennwerte der Wasserbindung Brandenburg (WFS-SO-BOBINDUNG)*. https://inspire.brandenburg.de/services/so_bobindung_wfs?
- Lexikon der Geowissenschaften*. (n.d.). Spektrum Akademischer Verlag. Retrieved January 20, 2022, from <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/feldkapazitaet/4671>
- Mackall, J., & Gabriel, S. (2012). What Is Permaculture? *Cornell University*, 1–45. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1sjwvpv5.6>
- Marcel Schaap, & Yonggen Zhang. (2017). *Rosetta — ISMC*. <https://soil-modeling.org/resources-links/model-portal/rosetta>
- MLUR, referat B., Aboura, J., Blossey, S., & Herwig, G. (2003). *Steckbriefe Brandenburger Böden*. <https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Steckbriefe-BB-Boeden-Textteil.pdf>
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., & Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96–112. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2010.11.003>
- Rotz, S., & Fraser, E. D. G. (2015). Resilience and the industrial food system: analyzing the impacts of agricultural industrialization on food system vulnerability. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 5(3), 459–473. <https://doi.org/10.1007/S13412-015-0277-1/FIGURES/1>
- Ruff, J. (2018). *Beyond Agroforestry? An Introduction to Syntropic Farming*. <https://www.arc2020.eu/beyond-agroforestry-what-is-syntropic-farming/>

- Sammis, T. (1996). *Soil Texture Analysis*. <https://www.soils4teachers.org/files/s4t/texture.pdf>
- Schmidt. (2020). *Wetterrückblick, Jahreswerte Brandenburg*. WetterKontor GmbH Ingelheim Am Rhein. <https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/monats-undjahreswerte.asp>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150–161. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2016.06.002>
- Umweltbundesamt. (2020). *Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_karte_gehalte_orgsub_2013-07-02.pdf
- Veste, M., & Böhm, C. (2018). Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft. In *Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft*. Springer Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49931-3>
- W.R. Walker. (1989). *FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER 45. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS*. <https://www.fao.org/3/T0231e/t0231e05.htm>

7. Anhang

I: Anbauplanung

Vergleichsfeld:

Ernte 2019	US 2019	ZF 2019	Ernte 2020	US 2020	ZF 2020	Ernte 2021
S-Weizen	Seradella		Dinkel	US M2	US M2	Erbse

Abbildung 9: Anbauplanung VF

US = Untersaat

ZF = Zwischenfrucht

S-Weizen = Sommerweizen

US M2 = Untersaatmischung deutsches mit 90% Weidelgras und 10% Weißklee (Gahler, 2021).

Agroforst:

In den Baumreihen:

Reihe	Länge	1. Obstkultur und Abstand	Anzahl Reihe
1	37	Wein auf Feldahorn 2 x 2	20
2	73	Maulbeeren 4 x 4	33
3	70	Pflaume und anderes Steinobst / Hybriden 2 x 2 + Birne alle 10	35 + 10
4	72	Pflaumen und andere Steinobst / Hybriden 2x2	36
5	75	Sanddorn 1,5 x 1,5	50
6	78	Pfirsich 4 x 4 / Zierquitten	20 – 25 / 78
7	80	Ebereschenhybride 3 m Abstand	78
8	82	Hasel 4 x 4	20
9	84	Mispel mit Esskastanie Überbau	28
10	86	Hasel 4 x 4	21
11	90	Rosa Villosa und Piro (Apfel) 1x1 mit Eberschen Überhälter 4x4	87
12	89	Zanthoxylum spp. (Gelbholz) 3x3	30
13	88	Ölweide 2 x 2	44
14	85	Quitte 3 x 3	30
15	83	Feigen	42
16	68	Gojii	34
17	61	Kornellkirschen 2 x 2	30
18	53	Zwergwalnuss 2 x 2	28
19	44	Khaki und Dreiblättrige Zitrone	22

Abbildung 10: Inventur der Bäume des Agroforstsystems

Zwischen den Baumreihen:

Luzerne-Weidelgras-Mischung 50%:50% (Gahler, 2021)

II: Methodik

Feldkapazität

Bei der originalen Methode aus dem *FAO Manual 45* (W.R. Walker, 1989) wird eine kleine Fläche im Feld bewässert, bis sie vollständig gesättigt ist. Daraufhin wird die Fläche mit einer Plane bedeckt und regelmäßig auf die Bodenfeuchte beprobt. Die Ergebnisse werden dann in einem Graphen dargestellt. Wenn die Veränderung der Bodenfeuchte zwischen den Beprobungen minimal ist, also die Kurve der Datenpunkte eine horizontale erreicht, wird angenommen, dass die Feldkapazität erreicht ist (W.R. Walker, 1989).

Bodenwassergehalt

In dem genutzten Modell wurde, wie in Abb. 11 dargestellt, von zwei Bodenschichten ausgegangen. Dementsprechend ist die Gleichung der Wasserbilanz für die erste Schicht:

$$\Delta S = N - ET_1 - S_i$$

wobei ΔS die Veränderung des Bodenwassergehalts (mm/Tag), N die Niederschlagsmenge (mm/Tag), ET_1 die partielle Evapotranspiration von Schicht 1 (mm/Tag) und S_i das Sickerwasser (mm/Tag) beschreibt. Die Gleichung für die zweite Schicht ist:

$$\Delta S = S_{i\text{ein}} - ET_2 - S_{i\text{aus}}$$

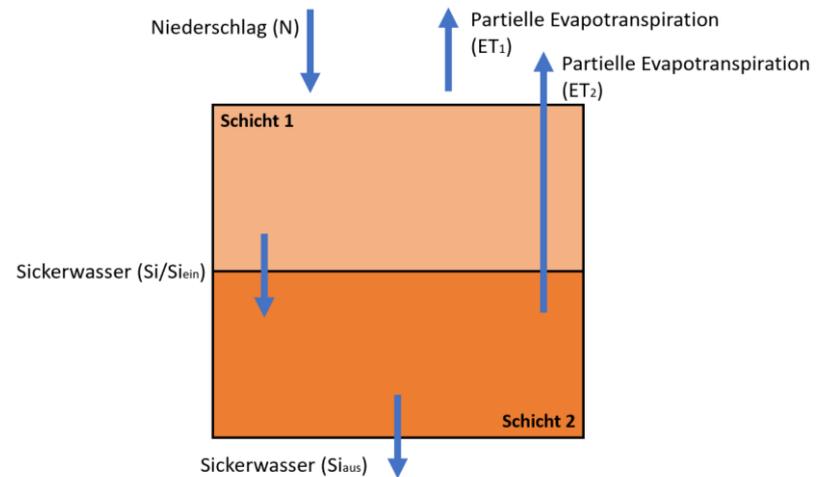


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Modells um den Bodenwassergehalt zu schätzen

Dabei sind ΔS und N identisch zu der ersten Gleichung, ET_2 ist die partielle Evapotranspiration von Schicht 2 (mm/Tag), $S_{i\text{ein}}$ (mm/Tag) ist das Sickerwasser aus der ersten Schicht welches in die zweite Schicht fließt und $S_{i\text{aus}}$ (mm/Tag) ist das Sickerwasser welches aus der zweiten Schicht abfließt. Die Wasserbilanz wurde nach Allen et al. (1998) aufgesetzt und von Bodenwassererschöpfung (mm) zu Bodenwassergehalt (mm) umgerechnet. Die täglichen Veränderungen werden für den jeweiligen Tag summiert, um den gesamten aktuellen pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt zu bestimmen. Die Pflanzenfaktoren, die genutzt werden, um von der Referenzevapotranspiration die Pflanzenevapotranspiration zu bestimmen wurden wenn möglich die Tabellen mit Standardwerten aus Allen et al., 1998 genutzt. Da der AG jedoch eine sehr hohe Diversität an Bäumen hat für welche es keine standardisierten Werte gibt, wurden für diese Mittelwerte von Bäumen aus der gleichen Familie oder mit ähnlichen Eigenschaften genutzt.

Andere Ein-, und Ausflüsse aus dem System wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Für die Wasserbilanz wurden tägliche Klimadaten von einer Wetterstation auf dem Betriebshof von Gut & Bösel genutzt.

Die Abb. 12 zeigt die geschätzte Evapotraspiration beider Systeme als ein wichtiger Teil der Wasserbilanz über die Simulationsperiode.

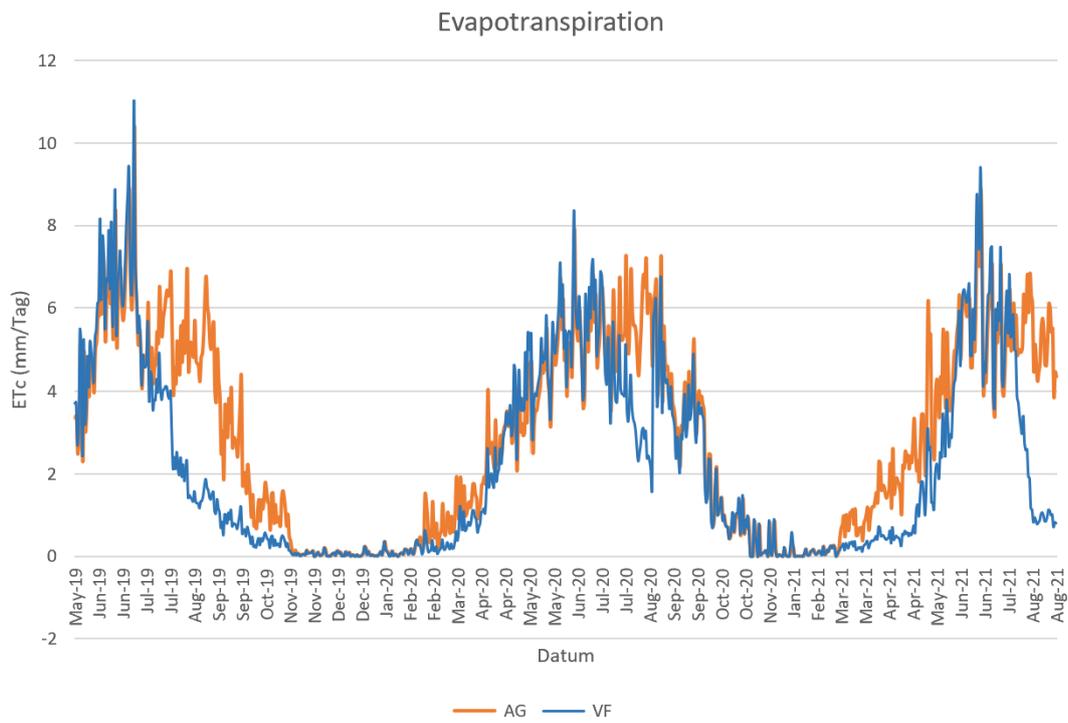


Abbildung 12: Modellierte Evapotranspiration beider LNS

Trockenstress

Dieser Schwellenwert von 0.4, ab dem ein Trockenstress entsteht, wurde empirisch bestimmt. Er basiert auf Ergebnisse, die zeigen, dass bei $REW > 0.4$ ein konstantes Verhältnis von Transpiration (T) zu potenzieller Evapotranspiration (ET_o) bei schwankenden Bodenwassergehalt besteht. Die Veränderungen in Bodenwasser hat also keinen Einfluss auf die Produktivität eines Systems. Bei $REW < 0.4$ gibt es eine lineare Beziehung des Verhältnisses T/ET_o und dem Bodenwassergehalt. Das bedeutet, dass die Produktivität eines Systems proportional zu Veränderungen im Bodenwassergehalt ist.

Der REW kann wie folgt berechnet werden:

$$REW = (TEW / TEW_{max})$$

Wobei TEW (mm) der aktuelle gesamte pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt und TEW_{max} (mm) der maximale gesamte pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt ist. TEW und TEW_{max} sind die Summe des aktuellen pflanzenverfügbare Bodenwassergehalts EW (mm) und des maximalen pflanzenverfügbare Bodenwassergehalts EW_{max} (mm) der jeweiligen Bodenschichten:

$$TEW = (EW_1 + EW_2)$$

$$TEW_{max} = (EW_{1max} + EW_{2max})$$

(Estiarte & Vicca, 2019).

Der EW und EW_{max} können wie folgt berechnet werden:

EW = pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt der jeweiligen Schicht, bestimmt auf einer täglichen Basis über die Wasserbilanz

$$EW_{max} = 1000 * (FK - PWP) * \text{Tiefe der Bodenschicht}$$

wobei hier die FK und PWP in m³/m³ angegeben wird. (Allen et al., 1998)

Die Intensität des TS kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$ITS = \text{sum}(\text{maximum}[0; (0.4 - REW) / 0.4])$$

(Estiarte & Vicca, 2019).

III: Ergebnisse

Bodenhorizont

Beprobung der Fläche AG in W Muster

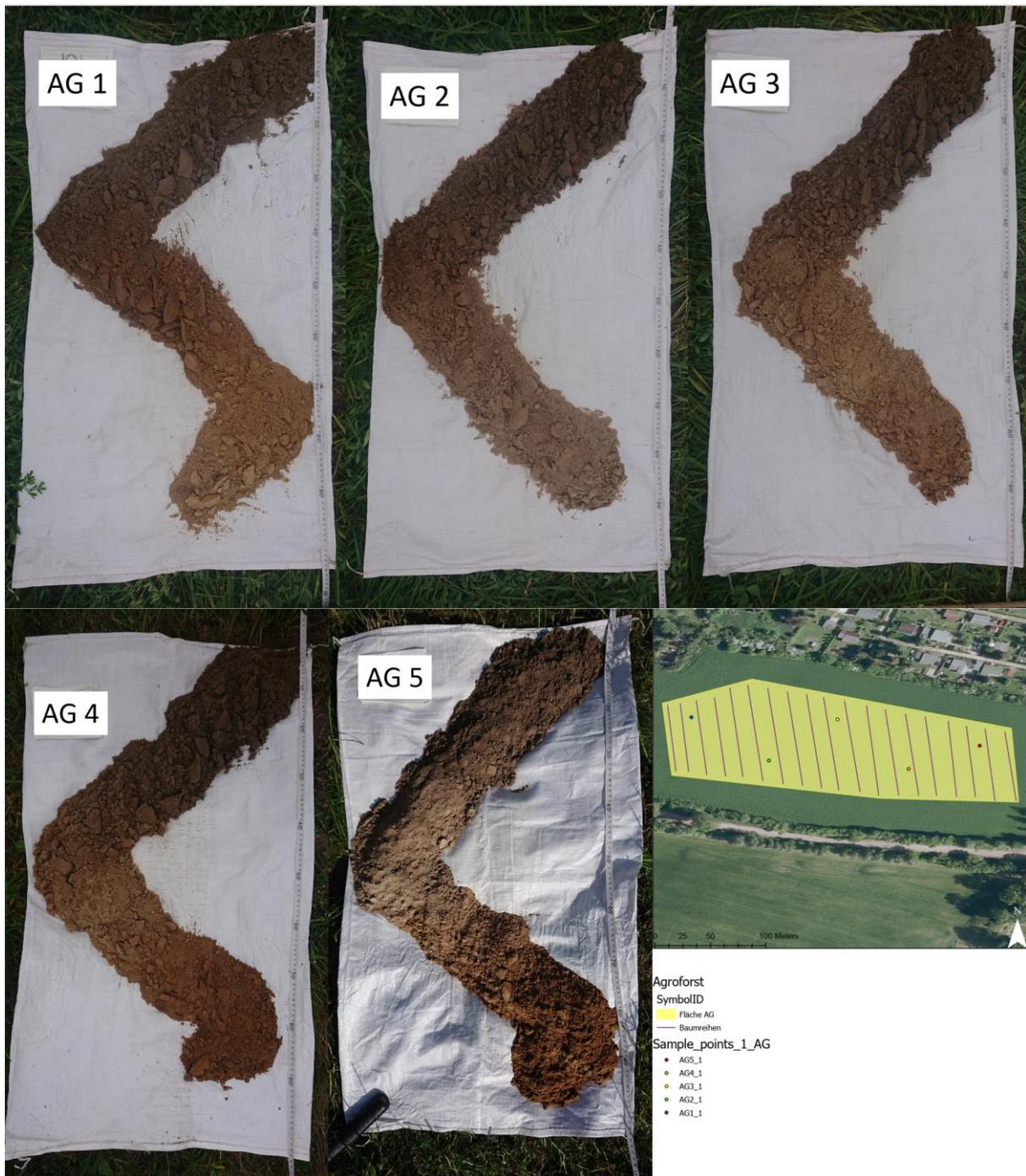


Abbildung 13: Bodenhorizont AG Beprobung im W Muster

Beprobung der Fläche AG an zwei Stelle jeweils in der Baumreihe, 1m neben der Baumreihen und zwischen den Baumreihen wie in Abb. 3 dargestellt

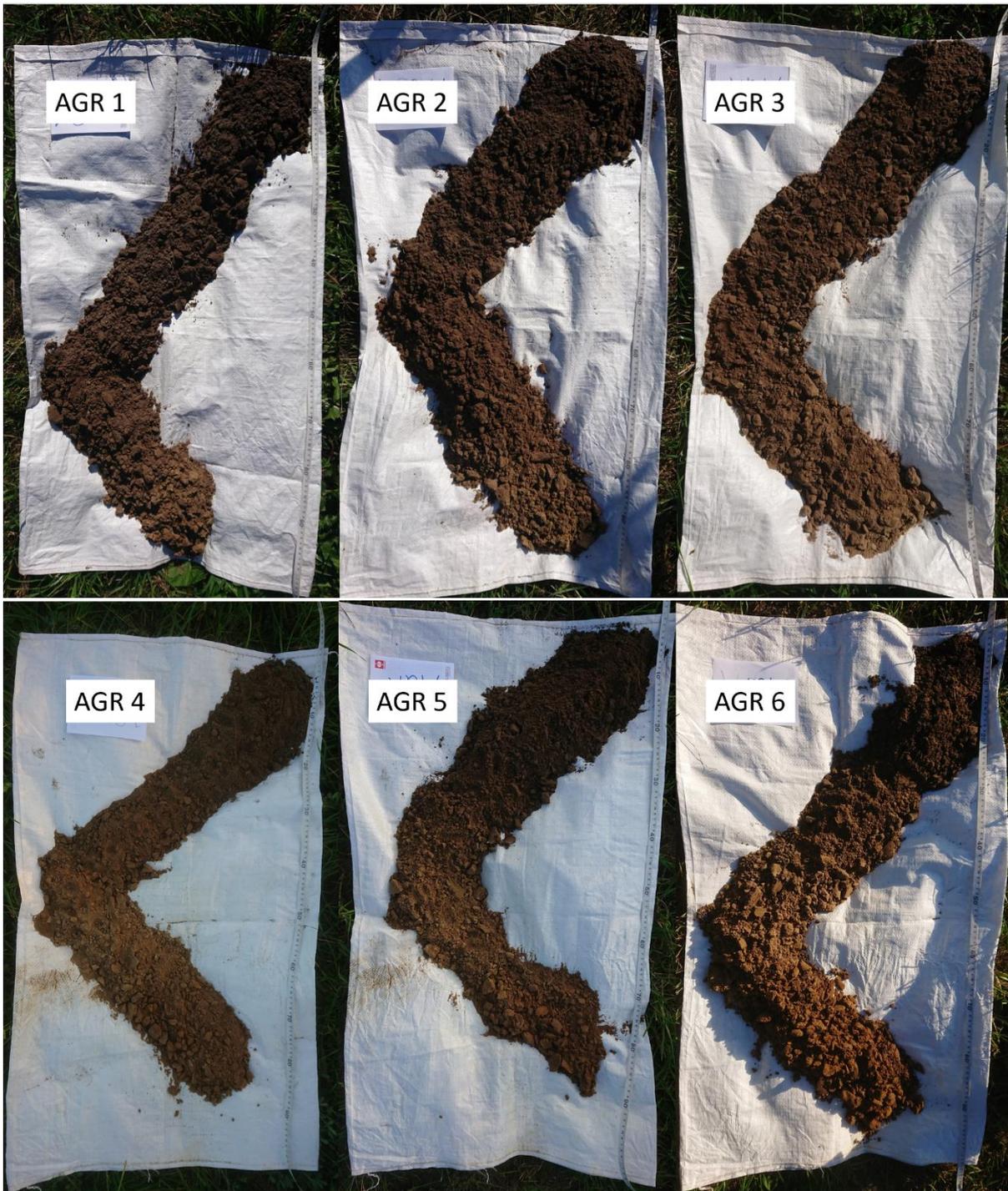


Abbildung 14: Bodenhorizont AG Beprobung wie in der Methodik beschrieben

Beprobung der Fläche VF in W Muster wie in Abb. 3 dargestellt



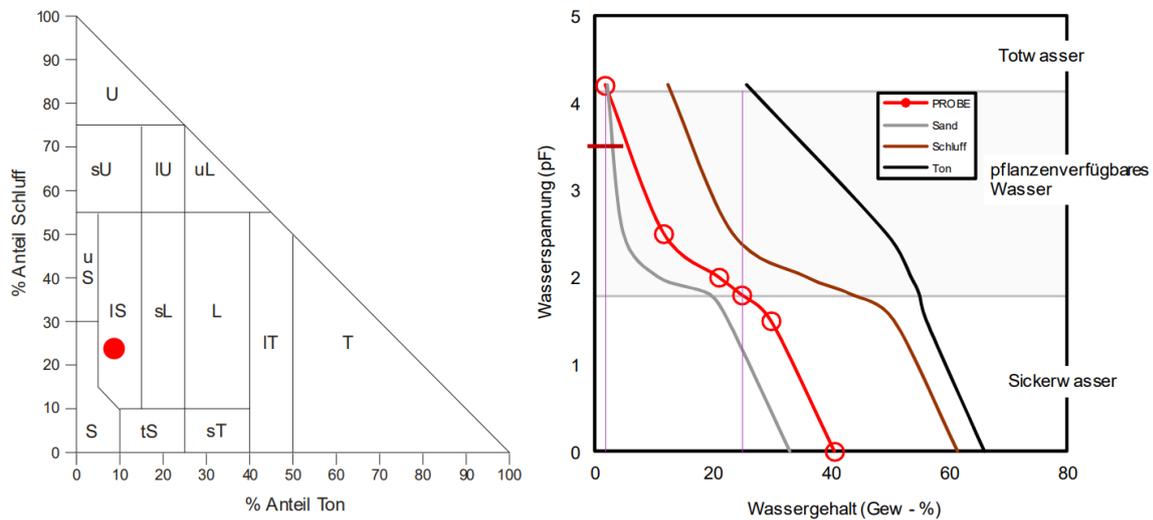
Abbildung 15: Bodenhorizont VF Beprobung im W Muster

Bodenproben

Tabelle 6: Ergebnisse der Bodenproben im Ober-, und Unterboden beider LNS

Probennummer	Bodenart DE	Bodenart EN	Organische Substanz %	FK gemessen (%)	PWP geschätzt (%)	FK geschätzt (%)
AG1O	schluffiger Sand	sandy loam	5.68	33.24	13.30	34.11
AG2O	schluffiger Sand	sandy loam	3.98	31.60	10.79	29.84
AG3O	schluffiger Sand	loamy sand	2.82	34.84	8.29	29.39
AG4O	schluffiger Sand	loamy sand	1.71	35.36	6.83	30.17
AG5O	schluffiger Sand	loamy sand/sandy loam	1.93	33.46	8.91	28.77
AG6O	lehmiger Sand/lehmiger Sand	loamy sand/sandy loam	8.69	36.68	10.76	38.46
AG1U	schluffiger Sand	sandy loam	1.86	No value	11.06	35.49
AG2U	schluffiger Sand	loamy sand	1.63	No value	9.20	33.31
AG3U	schluffiger Sand	loamy sand	1.32	No value	9.83	33.89
AG4U	Sand	sand	1.20	No value	4.84	23.93
AG5U	schluffiger Sand	loamy sand	0.32	No value	4.99	26.44
AG6U	Sand	sand	1.66	No value	4.84	24.03
VF1O	schluffiger Sand	sandy loam	2.37	38.46	10.99	33.46
VF2O	schluffiger Sand	sandy loam	1.61	37.82	10.09	33.08
VF3O	schluffiger Sand	loamy sand	2.62	32.13	6.66	26.10
VF4O	schluffiger Sand	loamy sand	2.46	36.68	6.61	27.30
VF5O	schluffiger Sand	loamy sand/sandy loam	2.08	35.69	9.13	29.54
VF1U	schluffiger Sand	loamy sand	1.04	No value	9.49	33.62
VF2U	schluffiger Sand	loamy sand	0.73	No value	9.41	33.54
VF3U	schluffiger Sand	loamy sand	1.21	No value	4.90	25.82
VF4U	schluffiger Sand	loamy sand	0.95	No value	8.77	32.83
VF5U	schluffiger Sand	loamy sand	1.14	No value	5.99	29.60

Bodenphysikalische Ableitungen PNR.: BD 8817



Österreichisches Texturdreieck OENorm L 1050

Wasserspannung und Wassergehalt

Quelle: Stefan Diringer (2010): Gibt es in der Bodenphysik Möglichkeiten Einzelparameter durch einen einzelnen Summenparameter zu charakterisieren? Wissenschaftliche Diplomarbeit. Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien

Abbildung 16: Ergebnisse der Laboranalyse einer Bodenprobe auf dem VF

Trockenstress und Produktivität

Tabelle 7: Trockenstress (gelbe Tabelle) und Verringerung der Produktivität (grüne Tabelle) beider LNS

Year	100-75 %	75-50 %	50-25 %	25-0 %
2019	0.54	0.27	0.19	0.00
2020	0.26	0.74	0.00	0.00
2021	0.80	0.05	0.15	0.00
Insgesamt	0.50	0.41	0.10	0.00

Year	100-75 %	75-50 %	50-25 %	25-0 %
2019	0.50	0.20	0.30	0.00
2020	0.16	0.63	0.21	0.00
2021	0.13	0.27	0.60	0.00
Insgesamt	0.29	0.38	0.33	0.00