Hochschule
für nachhaltige Entwicklung
Eberswalde
Fachbereich für Wald und Umwelt

Bachelorarbeit zur Erlangung des Grades „Bachelor of Science“

International Forest Ecosystem Management

Die Erfassung des Bodenzustandes von fünf Waldumbauversuchsflächen im Nordostbrandenburger Jungmoränenland

Eine Untersuchung der Homogenität ausgewählter Bodenparameter

vorgelegt von:

Johann Ahrend
Matrikelnummer: 17211215

1. Gutachter: Prof. Dr. Winfried Riek
Funktion: Fachgebietsleiter Boden- und Standortskunde

2. Gutachterin: Dr. rer. agr. Evelyn Wallor
Funktion: Akademische Mitarbeiterin im Fachbereich Wald und Umwelt

Eberswalde, den

Zusammenfassung

Diese Arbeit widmet sich der Untersuchung des Bodenzustandes von fünf Waldumbauversuchsflächen im Nordostbrandenburger Jungmoränenland. Die aufgrund von Standorts- und Reliefkarten sowie Altersstruktur und Baumartenzusammensetzung ausgewählten, sich ähnelnden Flächen wurden anhand einzelner aufgenommener Bodenparameter auf ihre tatsächliche Homogenität hin untersucht. Insgesamt bestätigten die Untersuchungen die angenommene Homogenität der Flächen. Zwar gibt es gelegentlich signifikante Abweichungen der Parameter in einigen der festgelegten Tiefenstufen zwischen den Flächen, diese sind jedoch hauptsächlich mit der Versuchsfläche 1 in Verbindung zu bringen. Da diese gemäß der Standortskarte auf der Hälfte der Untersuchungspunkte eine bessere Nährkraftstufe aufweist, war bereits im Vorfeld über gewisse Abweichungen spekuliert worden. Die statistischen Untersuchungen bestätigen diese Vermutungen. Bei den sich vermutlich einstellenden Veränderungen der Auflage und den oberen 30 Zentimetern des Bodens, sollte dieser Unterschied bei zukünftigen Aufnahmen mit in die Bewertung einfließen. Die in dieser Arbeit ermittelten Grenzwerte die über- beziehungsweise unterschritten werden müssen, um von signifikanten Veränderungen der Parameter sprechen zu können, liefern die Grundlage für die Anstellung zukünftiger Vergleiche.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis V

Tabellenverzeichnis VII

Abkürzungen IX

1. Einführung 1

1.1 Deutschlands Wald im Klimawandel 1

1.2 Zustand der Wälder Brandenburgs 2

1.3 Die Waldumbauvarianten, Alt Madlitz 3

2. Material / Methoden 5

2.1 Untersuchungsgebiet 5

2.1.1 Klima 6

2.1.2 Geologie und Boden 6

2.2 Versuchsaufbau 8

2.3 Probenentnahme 9

2.4 Probenaufbereitung 10

2.5 Laboranalysen 11

2.6 Versuchsauswertung 12

2.6.1 Überprüfung der Homogenität der Flächen 12

2.6.2 Ermittlungen der Grenzwerte 13

3. Ergebnisse 13

3.1 Ergebnisse der vorbereitenden Statistik 13

3.1.1 Ergebnisse für die Trockenrohdichte 14

3.1.2 Ergebnisse für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) 14

3.1.3 Ergebnisse für die effektive Kationenaustauschkapazität. 14

3.1.4 Ergebnisse für das C/N-Verhätlnis 15

3.1.5 Ergebnisse für die Hydroniumionenkonzentration (H_3O^+) / den pH-Wert in H_2O 15
3.2 Ergebnisse der vergleichenden Statistik 16
3.2.1 Ergebnisse der Trockenrohdichte 16
3.2.2 Untersuchung des organischen Kohlenstoffanteils 19
3.2.3 Untersuchung der effektiven Kationenaustauschkapazität 22
3.2.4 Untersuchung des C/N Verhältnis 24
3.2.5 Untersuchung der Hydroniumionenkonzentration / des pH-Wertes . 26
3.3 Grenzwertermittlung der untersuchten Parameter 29
4. Diskussion 30
4.1 Bewertung der Trockenrohdichte. 30
4.2 Bewertung des organischen Kohlenstoffgehalts 30
4.3 Bewertung der effektiven Kationenaustauschkapazität 32
4.4 Bewertung des C/N-Verhältnisses 33
4.5 Bewertung des pH-Wertes 34
4.6 Abweichungen in den Ergebnissen des pH-Wertes 34
5. Fazit 38
6. Anmerkungen 38
Literaturverzeichnis 39
Anhang 42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Kronenverlichtung aller Baumarten in Deutschland (Thünen Institut, 2021) 1

Abbildung 2 Kronenverlichtung aller Baumarten Brandenburgs (MLUK Brandenburg, 2021) 2

Abbildung 3 Lage des Untersuchungsgebiets in Brandenburgs (links) und die Lage der Versuchsflächen (rechts) (Quelle: Erstellt in QGIS mit Daten von © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA) 5

Abbildung 4 Stamm- und Standortsformengruppe, sowie Feinbodenformen der Versuchsflächen und umliegender Umgebung (Quelle: Erstellt in QGIS mit Quelldaten von GeoBasis-DE/LGB © GeoBasis-DE/LGB, dl-de/by-2-0 (bearbeitete Daten) QGIS.org QGIS Geographic Information System) 7

Abbildung 5 Digitales Geländemodell der Umgebung der Versuchsflächen (Quelle: Erstellt in QGIS mit Quelldaten von GeoBasis-DE/LGB © GeoBasis-DE/LGB, dl-de/by-2-0 (bearbeitete Daten) QGIS.org QGIS Geographic Information System) 8

Abbildung 6 Versuchsflächen mit Buffer und Permanent Observation Plots 9

Abbildung 7 Schema der Probenentnahme pro Permanent Observation Plot . 10

Abbildung 8 Boxplotdiagramme der Trockenrohdichte der Tiefenstufe 10-30 cm 18

Abbildung 9 Boxplotdiagramme der Trockenrohdichte der Tiefenstufe 0-10 cm 19

Abbildung 10 Boxplotdiagramme des Corg-Gehaltes in t/ha für die verschiedenen Tiefenstufen: a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30 cm 21

Abbildung 11 Boxplotdiagramme der AKe für die verschiedenen Tiefenstufen a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30 cm 23

Abbildung 12 Boxplotdiagramme des C/N-Verhältnisses für die jeweilige Tiefenstufe a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30 cm 26

Abbildung 13 Boxplotdiagramme der pH-Werte der Tiefenstufen a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30cm 28

Abbildung 14 Grafische Darstellung des Korrelationskoeffizienten der eigens und vom Labor gemessenen pH-Werte der Auflage (a), der Tiefenstufe 0-10 cm (b), und der Tiefenstufe 10-30 cm (c) 37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Eine grobe Übersicht der Waldumbauversuchsflächen 4

Tabelle 2 Methoden zur Bestimmung des pH Wertes, des Glühverlustes, des C_{org} - Gehalts (Gutachterausschuss Forstliche Analytik, 2014) 11

Tabelle 3 : p-Werte des C_{org}-Gehaltes des Levene-Tests auf Basis des Medians 14

Tabelle 4 : p-Werte der effektiven Kationenaustauschkapazität des Levene-Tests auf Basis des Medians 15

Tabelle 5 Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für das C/N-Verhältnis mit resultierenden p-Werten < 0,05 15

Tabelle 6 p-Werte des C/N Verhältnisses des Levene-Tests auf Basis des Medians 15

Tabelle 7 Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für die $HO3^+$ - Konzentration mit resultierenden p-Werten < 0,05 16

Tabelle 8 p-Werte der H_3O^+-Konzentration des Levene-Tests auf Basis des Medians 16

Tabelle 9 Ergebnisse des Tukey-Tests mit resultierenden p-Werten < 0,05 der Trockenrohdichte für die Tiefenstufe 10-30 cm 18

Tabelle 10 Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests mit Bonferroni-Korrektur der Trockenrohdichte für resultierende p-Werte < 0,05 der Tiefenstufe 0-10cm (pro Zeile werden die genannten Flächen miteinander verglichen) 19

Tabelle 11: Resultierende p-Werte der ANOVA für den C_{org}-Gehalt 20

Tabelle 12 Ergebnisse des Tukey-Tests des C_{org} mit resultierenden p-Werten < 0,05 für die Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm 20

Tabelle 13: Ergebnisse der Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Auflage und die Tiefenstufe 10-30 cm der AKe 22

Tabelle 14 Zusammengefasste Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für die Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm 24

Tabelle 15 Ergebnisse des paarweisen Vergleichs des C/N Verhältnisses der Tiefenstufe 0-10 cm mit resultierenden p-Werten $p < 0{,}05$ 25

Tabelle 16 Zusammengefasste Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für die $HO3^{+}$-Konzentration mit resultierenden p-Werten für die jeweilige Tiefenstufe 27

Tabelle 17 Ergebnisse des paarweisen Vergleichs der $HO3^{+}$-Konzentration der Tiefenstufe 0-10 cm mit resultierenden p-Werten < 0,05 27

Tabelle 18 Mediane, obere und untere Grenzwerte der gemessenen Parameter für die jeweilige Tiefenstufe..... 29

Tabelle 19 Korrelationskoeffizienten und p-Werte der Auflage und den beiden Tiefenstufen des Mineralbodens 35

Tabelle 20 Übersicht der Waldumbauversuchsflächen 42

Abkürzungen

POP	Permanent Observation Plot
TRD	Trockenrohdichte
AKe	effektive Kationenaustauschkapazität
H_3O^+-Konzentration	Hydroniumionenkonzentration
C_{org}-Gehalt	organischer Kohlenstoffgehalt
C-Vorrat	Kohlenstoffvorrat

1. Einführung

1.1 Deutschlands Wald im Klimawandel

Die letzten Jahre, angefangen mit den starken Stürmen des Herbsts 2017 und den darauffolgenden Dürrejahren 2018 bis 2020, haben deutlich sichtbare Spuren in den Wäldern Deutschlands hinterlassen. Abbildung 1 verdeutlicht die abnehmende Vitalität aller Baumarten, welche anhand der Kronenverlichtung und Vergilbung beurteilt wird.

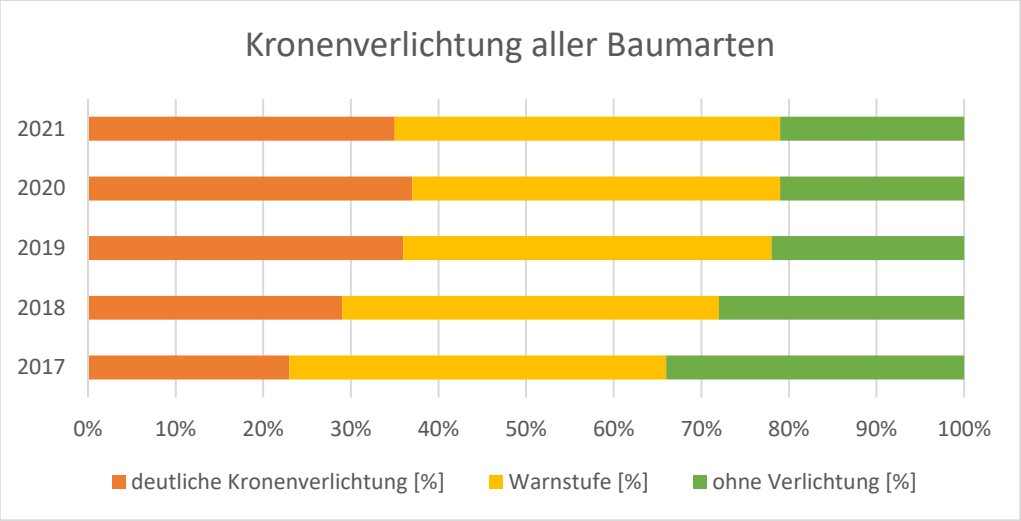


Abbildung 1 Kronenverlichtung aller Baumarten in Deutschland (Thünen Institut, 2021)

Zu beobachten ist, dass der Anteil der Bäume ohne Verlichtung und der Anteil derer mit deutlicher Verlichtung sich von 2017 bis 2019 umgekehrt hat. Seitdem ist er konstant auf dem höchsten Niveau seit Beginn der Aufzeichnungen (1984) geblieben. In dem Zeitraum von 2018 bis 2020 sind 170,6 Millionen Kubikmeter Schadholz angefallen mit einem Nadelholzanteil von über 90 Prozent. Am stärksten betroffen, allerdings auch am häufigsten vertreten, ist die Fichte. Sechzehn Prozent, des bei der Bundeswaldinventur 2012 ermittelten Vorrates, sind in einem Zeitraum von drei Jahren als Kalamitätsholz angefallen. Die langen Dürreperioden und die heftigen Sturmereignisse prädisponierten die oft außerhalb ihrer natürlichen Verbreitung angebauten einschichtigen Reinbestände für Borkenkäferbefall, insbesondere durch den Kupferstecher und den Buchdrucker (BMEL, 2021).

1.2 Zustand der Wälder Brandenburgs

Die Wälder Brandenburgs, welche deutschlandweit mit den geringsten Niederschlagsmengen auskommen müssen, wurden von den Extremwetterereignissen und Dürreperioden der letzten Jahre nicht weniger getroffen, wie Abbildung 2 verdeutlicht. Zwar sind nicht mehr ganz so viele Bäume in der Kategorie „deutliche Kronenverlichtung“, dafür sind 2021 jedoch nur noch 12 Prozent ohne Verlichtung.

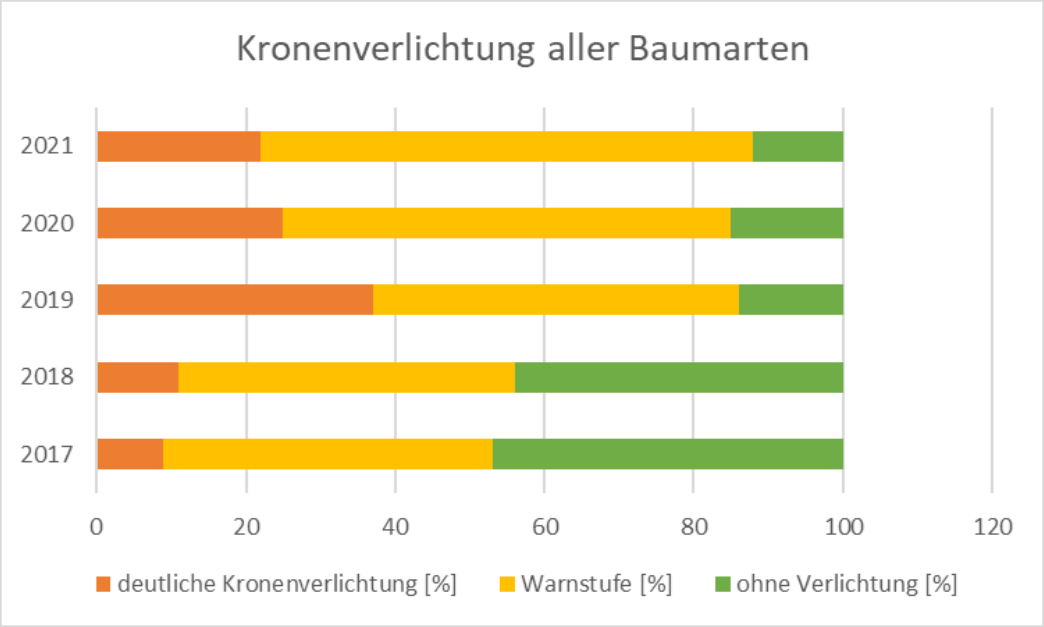


Abbildung 2 Kronenverlichtung aller Baumarten Brandenburgs (MLUK Brandenburg, 2021)

Die Kiefer ist mit einem Anteil von 73 Prozent, gefolgt von Eiche (fünf Prozent) und Buche (vier Prozent), die mit Abstand häufigste Baumart der Wälder Brandenburgs. Auch sie leidet stark unter der anhaltenden Trockenheit. Der Anteil deutlich geschädigter Kiefern stieg von sechs Prozent im Jahr 2018 auf 24 Prozent im Jahr 2019 und liegt auch im Jahr 2020 noch bei zwanzig Prozent. Lediglich zehn Prozent aller Kiefern fallen noch in die Kategorie der Schadstufe 0 ohne Verlichtung (MLUK Brandenburg, 2021, S. 8 ff.).

Die Durchmischung der Kiefernmonokulturen mit standortgerechten Laubbaumarten wie Eiche und Buche, im Rahmen von Waldumbauplänen gemäß der Waldbaurichtlinie zur Herbeiführung von mehr Struktur und Vielfalt zur Steigerung der Resilienz der Wälder gegenüber biotischen und abiotischen Schädlingen, wurde in den vergangenen Jahrzehnten zu einem immer

relevanteren Thema (MLUL, 2004). Die Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2021 zeigen jedoch auch für diese Baumarten enorme Vitalitätsverluste seit 2017. Waren 2017 noch 28 Prozent der Eichen und 61 Prozent der Buchen in der Schadstufe 0, sind es 2021 nur noch drei, beziehungsweise sieben Prozent (MLUK Brandenburg, 2021)

Um zukünftig im Rahmen des Waldbaus mit den Herausforderungen des Klimawandels fertig zu werden, ist eine Intensivierung des Waldmonitorings nötig, um klimawandelbedingte Schäden schnell zu erkennen und mit waldbaulich angemessenen Maßnahmen zu reagieren, im besten Fall frühzeitig agieren, zu können. Neben der Erhöhung der Artenvielfalt in den Wäldern kommt es vor allem auch auf deren Unterschiedlichkeit hinsichtlich ihrer Ansprüche an. Eine Durchmischung der Monokulturen mit schattentoleranten und lichtliebenden, verschieden tief wurzelnden, sowie zu verschiedenen Zeitpunkten austreibenden Arten, würde die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit der Wälder gegenüber abiotischen und biotischen Schädigungen erhöhen und für eine bessere Ausnutzung der standörtlichen Gegebenheiten sorgen (Spathelf, 2021).

1.3 Die Waldumbauvarianten, Alt Madlitz

In der Region um Briesen und Alt Madlitz sind die Waldbestände zu einem Großteil von einschichtigen, 50 bis 60-jährigen Kiefernreinbeständen geprägt. Das gängige Konzept der Förderung des flächigen Waldumbaus solcher Bestände ab einem Alter von 60 Jahren mit standortgerechten Baumarten, oft Buche oder Eiche (MLUL, 2020), soll im Rahmen dieses Projektes um neue Varianten erweitert werden. Neben einer breiteren Baumartenpalette spielen auch alternative Begründungsmethoden mit ganzheitlichem Blick auf Standort, Humusauflage, Kraut-, Strauch-, und Baumschicht eine wichtige Rolle (de Vries, 2022). Bei der Wahl eines geeigneten Bestandes für die Anlage der Versuchsflächen lag das Hauptaugenmerk auf der Homogenität der Flächen. Neben Altersstruktur, Relief und Exposition, sollten sich die Versuchsflächen vor allem in der selben Nährkraftstufe befinden. Um die Aussagekraft der langfristig angelegten Versuche zu unterstreichen, war es wichtig, möglichst schwierige Ausgangsbedingungen für die sich zukünftig etablierenden

Pflanzengesellschaften zu finden. Würden bestimmte Pflanzkomposita auf den relativ nährstoffarmen und drainierenden Sandböden mit hydrophober Streu bestehen, könnten die neuen „Madlitzer“ Versuchsvarianten als Beispiel für einen umfassenderen und ganzheitlicheren Waldumbauansatz in der Region dienen. Darüber hinaus könnten sie bei der Erprobung zusätzlicher waldbaulicher und waldbautechnischer Aspekte, wie der Belassung von höheren Totholzmengen, oder der Anreicherung von Humus, durch beispielsweise gezielten Einsatz von Gräsern und Kräutern, neue Perspektiven aufzeigen (de Vries, 2022).

Insgesamt setzt sich das Waldumbauprojekt aus drei Versuchsvarianten zusammen, die sich hinsichtlich Durchforstungsart sowie Pflanz- und Saatzusammenstellung sowohl voneinander, als auch in sich selbst unterscheiden. Sie sollen mit einer der natürlichen Entwicklungsdynamik überlassenen Fläche und einer regulär vom Förster weiter bewirtschafteten Fläche in ihrer Entwicklung verglichen werden. Eine grobe Übersicht der Behandlungsart der einzelnen Flächen liefert Tabelle 1. Eine detailliertere Beschreibung liefert der Anhang.

Tabelle 1 Eine grobe Übersicht der Waldumbauversuchsflächen

	FLÄCHE 0	**FLÄCHE 1**	**FLÄCHE 2**	**FLÄCHE 3**	**FLÄCHE 4**
TYP	Referenzfläche	Natürliche Dynamik ohne Wildeinfluss	Lichtökologisch orientierte Waldentwicklung	Wald und Wild Mikadoprinzip ohne Zaunbau	Syntropischer Waldumbau
DURCH-FORST-UNGSART	Durch den Förster Hochdurch-forstungsweise	Zwei Löcher (700m²) simulieren eine natürliche Störung	Drei Lochhiebe (500m²) + schwache Hochdurchforstung	Starke Hochdurchforstung mit lochartigem Schwerpunkt	Einrichtung drei verschiedener Schirmstellungen (locker, licht, kahl)

Diese Arbeit widmet sich der Untersuchung des Bodenzustandes der Waldumbauversuchsflächen zum Zeitpunkt vor den Umbaumaßnahmen. Die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Bodenparameter sollen als Ausgangspunkt und Referenz für zukünftige Erhebungen dienen, die voraussichtlich alle fünf bis sieben Jahre wiederholt werden. Die verschiedenen Bodenparameter der Versuchsflächen werden hinsichtlich ihrer Homogenität untersucht, um sich

vollziehende Veränderungen, unter Einfluss der Waldumbauvarianten, mittel- bis langfristig beurteilen zu können. Um diese Veränderungen letztlich bewerten zu können werden über die Mediane der verschiedenen Parameter obere und untere Grenzwerte ermittelt die entscheiden, ab wann eine Veränderung einen signifikanten Unterschied darstellt.

2. Material / Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die zu untersuchenden Flächen des Waldumbauprojektes befinden sich im östlichen Teil Brandenburgs zwischen Fürstenwalde und Frankfurt Oder (siehe Abbildung 3).

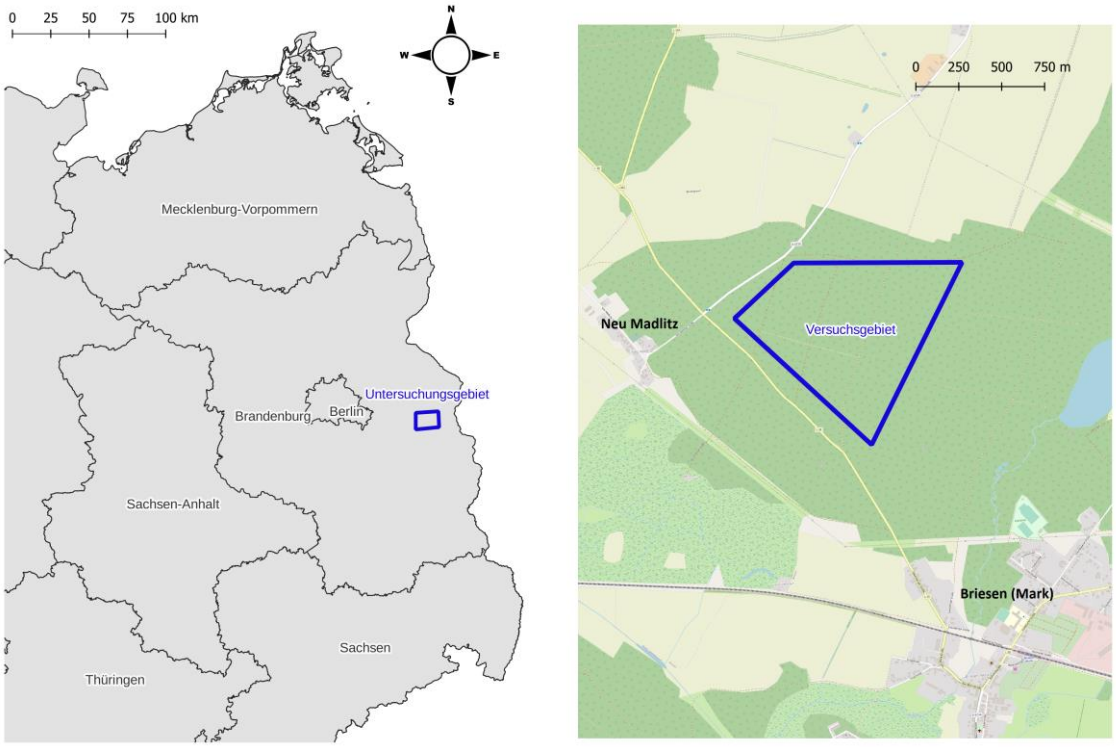


Abbildung 3 Lage des Untersuchungsgebiets in Brandenburgs (links) und die Lage der Versuchsflächen (rechts) (Quelle: Erstellt in QGIS mit Daten von © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Die Versuchsflächen liegen etwa einen Kilometer außerhalb des Ortes Briesen (Mark) nahe der L38.

2.1.1 Klima

Der nach Gauer (2012) folgenden Einteilung Deutschlands in Wuchsgebiete und denen untergeordneten Wuchsbezirken, befindet sich das Untersuchungsgebiet in dem Wuchsgebiet Nordostbrandenburger Jungmoränenland. Es ist dem kontinental geprägten, südmärkischen Klima zuzuordnen, in dem die mittlere Niederschlagsmenge pro Jahr 500 bis 560 Millimeter beträgt (Gauer & Aldinger, 2005, S. 95). Die Daten des Deutschen Wetterdienstes, der nächstgelegenen Wetterstation in Lindenberg, bestätigen dies mit einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 568 mm im Zeitraum von 1981 bis 2010 (Deutscher Wetterdienst, 2022).

2.1.2 Geologie und Boden

Der Wuchsbezirk Seelower Platte als südlicher Teil des Wuchsgebietes Nordostbrandenburger Jungmoränenland zeichnet sich hauptsächlich durch seine in der Saale- und Weichseleiszeit geprägten Grundmoränen und vereinzelte Sander aus. Diese sind meist mittlerer Trophie und von lehmunterlagerten Sandbraunerden bestimmt. Die zu untersuchenden Flächen liegen im zentralen südlichen Teil des Wuchsbezirkes. In diesem Sanderbereich sind vorwiegend verhältnismäßig arme Sandbraunerden und Sand-Podsolbraunerden zu finden (Gauer & Aldinger, 2005).

Wie in Abbildung 4 ersichtlich, ist die prägende Feinbodenform der Versuchsflächen vor allem die Grubenmühler Sand-Braunerde auf ziemlich nährstoffarmen (Z2) Standorten. Die Lienewitzer Sand-Braunerde mäßiger Trophie (M2) findet sich auf dem östlichen Teil der Fläche 1 wieder. (Landesbetrieb Forst Brandenburg, 2011).

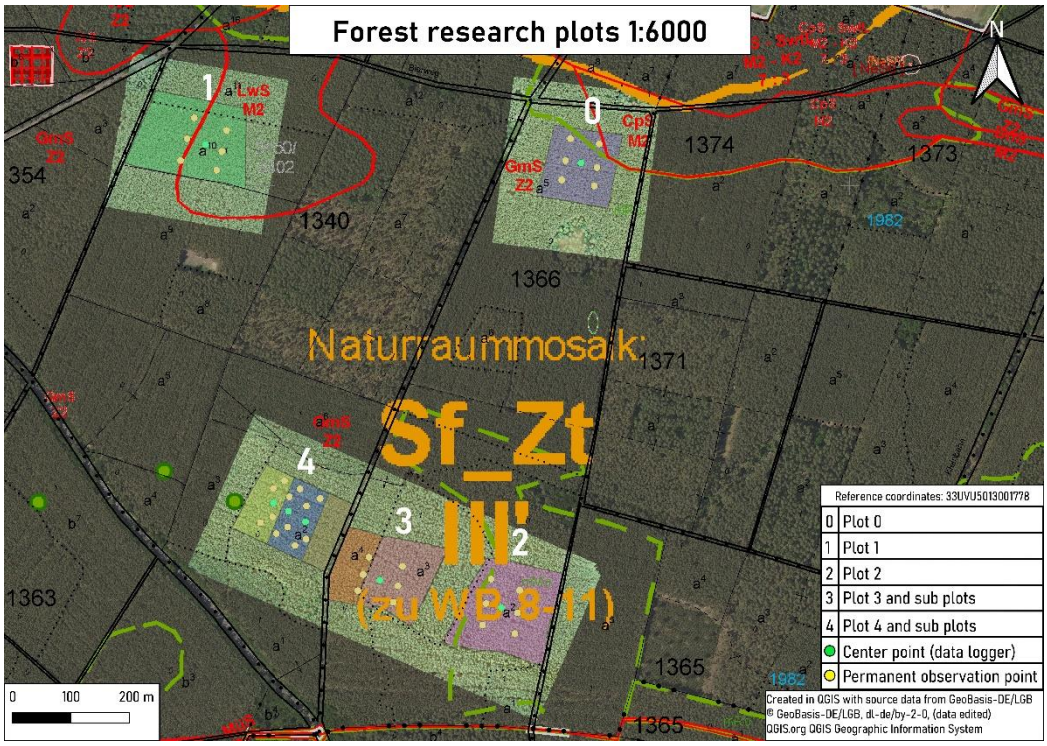
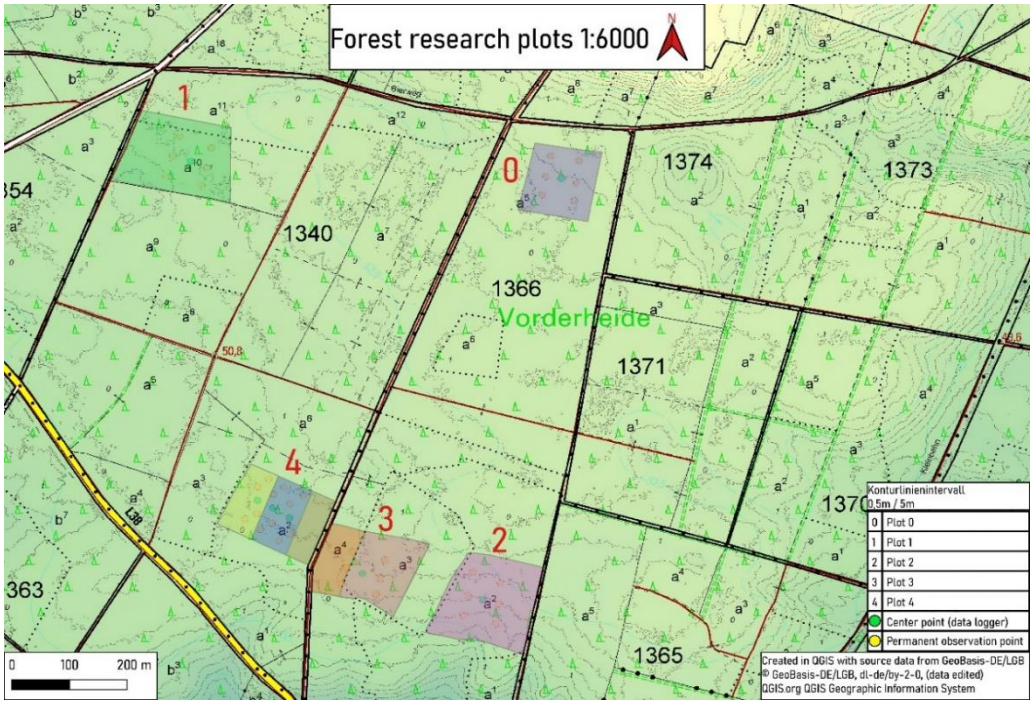


Abbildung 4 Stamm- und Standortsformengruppe, sowie Feinbodenformen der Versuchsflächen und umliegender Umgebung (Quelle: Erstellt in QGIS mit Quelldaten von GeoBasis-DE/LGB © GeoBasis-DE/LGB, dl-de/by-2-0 (bearbeitete Daten) QGIS.org QGIS Geographic Information System)

Bei der Betrachtung des Reliefs (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht g efunden werden.**) wird deutlich, dass auf den Versuchsflächen in der Höhe keine nennenswerten Unterschiede bestehen. Die engen Konturlinien nördlich des



Untersuchungsgebiets deuten eine leichte Erhöhung an, die die Versuchsflächen jedoch nicht tangiert.

Abbildung 5 Digitales Geländemodell der Umgebung der Versuchsflächen (Quelle: Erstellt in QGIS mit Quelldaten von GeoBasis-DE/LGB © GeoBasis-DE/LGB, dl-de/by-2-0 (bearbeitete Daten) QGIS.org QGIS Geographic Information System)

2.2 Versuchsaufbau

Wie bereits unter Kapitel 1.3 beschrieben, lag bei der Wahl der Waldumbauversuchsflächen das Hauptaugenmerk auf einer größtmöglichen Homogenität der Flächen. Die Wahl fiel letzten Endes auf fünf Untersuchungsflächen in einem 40- bis 50-jährigen, einschichtigen Kiefernreinbestand um die Abteilung 1340 des Reviers Wilmersdorf der Oberförsterei Briesen. Dadurch befinden sich fast alle Teile dieser Flächen, entsprechend der SEA 95 C (Schulze, 2013) auf grundwasserfernen, mittelfrischen und armen Standorten (Z2). Lediglich der östliche Teil der Fläche 1 wird mit „mittelfrisch bis mäßig nährstoffhaltig“ beschrieben (M2) (siehe Abbildung 4)

Vier dieser fünf Versuchsflächen haben sechs Untersuchungspunkte die im Weiteren als Permanent Observation Plots (POP) bezeichnet werden und in zwei Transekten von Nord nach Süd in gleichmäßigem Abstand angeordnet sind (siehe Abbildung 6).

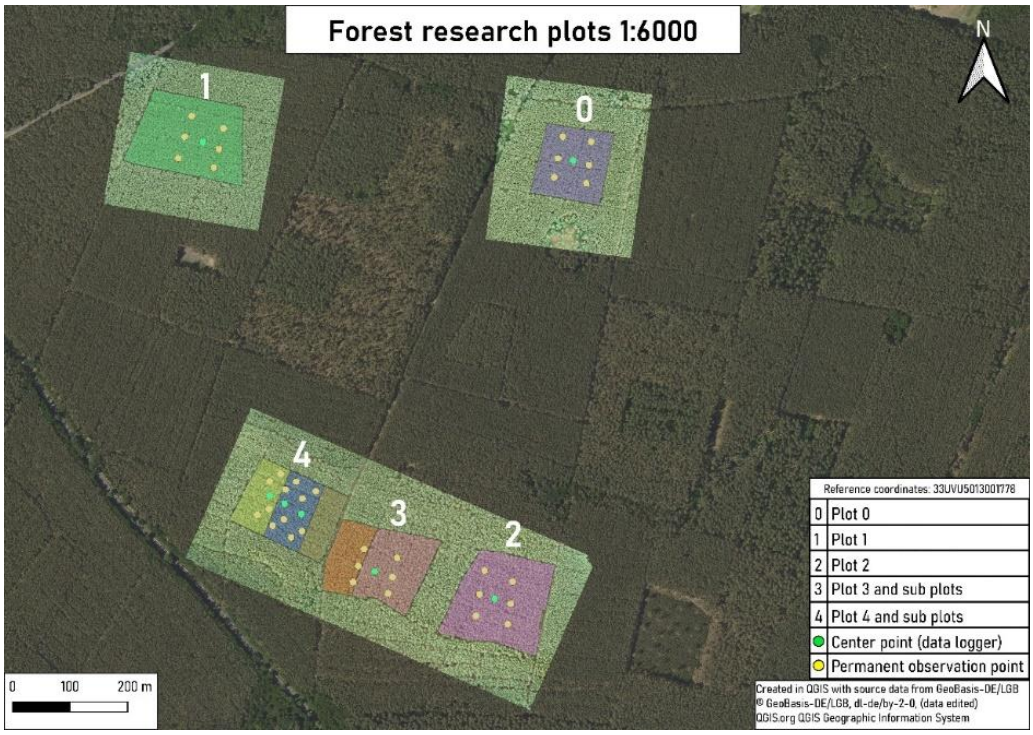


Abbildung 6 Versuchsflächen mit Buffer und Permanent Observation Plots

Die fünfte Untersuchungsfläche ist aufgrund von unterschiedlichen Durchforstungsintensitäten in drei Teilbereiche gegliedert von denen jeder vier POP enthält.

2.3 Probenentnahme

Zur Gewinnung der Bodenproben der Mineralbodenhorizonte wurde ein Wurzelbohrer mit einem Durchmesser von acht Zentimetern verwendet. Für die Entnahme der Auflage wurde ein Stechrahmen mit den Maßen 15 cm x 20 cm genutzt. Um einen ausreichend hohen Stichprobenumfang für die Bewertung der Bodenhomogenität sicherzustellen, wurden an jedem der POP´s vier Proben entnommen, die zu einem späteren Zeitpunkt zu Mischproben für die chemische Analytik zusammengeführt wurden. In einem Abstand von zwei Metern, ausgehend vom Mittelpunkt eines jeden POP, wurden Richtung Norden, Osten, Süden und Westen die Bodenproben entnommen. Falls eine Bohrung fehlschlug, oder ein Baum, beziehungsweise ein alter Stubben im Weg waren, wurde die Bohrung entlang des Azimuts nach innen verschoben.

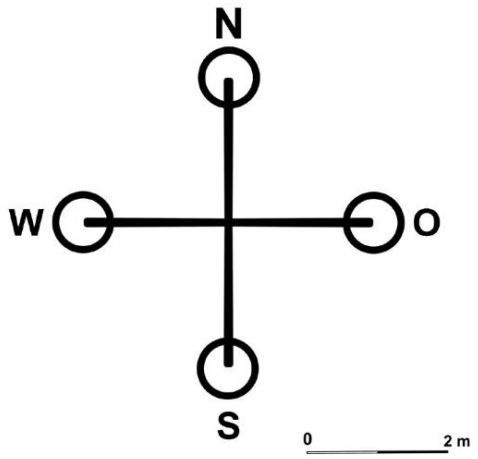


Abbildung 7 Schema der Probenentnahme pro Permanent Observation Plot

Abbildung 7 verdeutlicht die Lage der Bohrungen in Relation zum Mittelpunkt. Jede Bohrung wurde in drei Tiefenstufen unterteilt und die Proben einzeln in Tüten abgepackt. Zuerst erfolgte die Entnahme der Streu mit Hilfe des Stechrahmens. An derselben Stelle wurde der Wurzelbohrer in den Boden getrieben und das Bodenmaterial je Tiefenstufe (0 bis 10 cm und 10 bis 30 cm) entnommen. Die durch den Wurzelbohrer gewonnenen, volumenbezogenen Proben wurden im weiteren Verlauf zur Bestimmung der Trockenrohdichte und für die chemischen Analysen verwendet.

2.4 Probenaufbereitung

Nach der Probenentnahme wurden am Ende eines jeden Tages die Feuchtgewichte der Proben bestimmt, bevor sie bei Raumtemperatur offen zum Trocknen gelagert wurden. Im Verlauf der Aufnahmen wurden die Proben in den Plastiktüten immer wieder gewendet um das Material gleichmäßig zu trocknen. Besonderes Augenmerk fiel dabei auf die Proben der Streuschicht, die aufgrund ihrer hohen Feuchtigkeit öfter gewendet werden mussten, um die Entwicklung von Schimmel zu verhindern. Um den Vorgang der Trocknung abzuschließen, mussten die Proben der Streuschicht letzten Endes circa eine Woche im Trockenschrank bei 45° Celsius lagern.

Nachdem die Mineralbodenproben ungefähr vier Wochen bei Raumtemperatur luftgetrocknet worden waren, wurde jede Probe erneut gewogen. Um den Vorgang zur Errechnung der Trockenrohdichte zu vereinfachen, wurde die Annahme getroffen, dass der Grobbodenanteil bei unter 5% liegt. Dadurch entfiel die Notwendigkeit jede Probe nach der Siebung ein weiteres Mal zu wiegen. Die Trockenrohdichte in g/cm³ errechnete sich demnach wie folgt:

$$\frac{Trockenmasse\ Boden\ [g]}{Volumen\ Wurzellbohrstab\ [cm^3]}$$

Nach der erneuten Einwaage und Bestimmung der TRD erfolgte die Herstellung der Mischproben. Diese setzten sich je Tiefenstufe aus den vier Bohrungen Richtung Nord, Ost, Süd und West für den jeweiligen POP zusammen. Zum Aussieben des Grobbodenanteils wurde ein Sieb mit einer Maschenweite von zwei Millimeter verwendet. Das gesiebte Material der vier Einzelproben (Nord, Ost, Süd, West) je POP wurde in einem Eimer für jede Tiefenstufe zu einer Mischprobe zusammengeführt. Pro Tiefenstufe entstanden so jeweils 36 Mischproben.

2.5 Laboranalysen

Im Labor der Hochschule konnten die Parameter pH-Wert, Glühverlust und der daraus resultierende C_{org}-Gehalt bestimmt werden. Die chemischen Analysen zur Bestimmung der Nährstoffgehalte und der sich daraus ergebenden effektiven Kationenaustauschkapazität sowie das C/N-Verhältnis wurden von Brookside Laboratories mithilfe des Mehlich-3-Verfahrens durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die Methoden zur Bestimmung des pH-Wertes, des Glühverlusts und des C_{org}-Gehalts.

Tabelle 2 Methoden zur Bestimmung des pH Wertes, des Glühverlustes, des C_{org} - Gehalts (Gutachterausschuss Forstliche Analytik, 2014)

Norm	**Parameter**
DIN EN 12879	Bestimmung des Glühverlustes
DIN 19684-1	pH-Wertermittlung
Kartieranleitung (Sponagel, et al., 2005)	Bestimmung des organischen Kohlenstoffs Gehalts

Für alle Mischproben wurde der pH-Wert in H_2O- und KCl-Lösung ermittelt. Als Messgerät diente das Gerät inoLab® pH 720. Anstatt die Proben wie in der DIN-Norm beschrieben eine Stunde im geschlossenen Becher stehen zu lassen und diese mehrfach umzurühren, wurden die Proben lediglich direkt nach der Hinzugabe der Lösung und nach 10- bis 20-minütigem Warten, kurz vor der

Messung des pH-Wertes, ein weiteres Mal verrührt. Nach der Messung des pH-Wertes in H_2O, erfolgte die Zugabe von Kaliumchlorid (1 mol/l) und nach erneutem Umrühren die Messung in KCl-Lösung.

Der Glühverlust in Prozent wurde mit Hilfe folgender Formel errechnet:

$$\frac{m\,(105°) - m\,(geglüht)}{m\,(105°)} * 100$$

2.6 Versuchsauswertung

2.6.1 Überprüfung der Homogenität der Flächen

Um die Homogenität der Flächen zu überprüfen und die dafür geeigneten statistischen Verfahren auszuwählen, mussten die Analysewerte zunächst hinsichtlich ihrer Verteilung untersucht werden. Mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests wurde geprüft, ob die Daten normalverteilt sind. Danach erfolgte die Überprüfung der Homogenität der Varianzen durch den Levene-Test basierend auf dem Median, da dieser im Vergleich zum Mittelwert die robustere Variante darstellt (LI, et al., 2015). Waren die Daten normalverteilt und die Varianzen homogen, fand die one-way ANOVA (einfaktorielle Varianzanalyse) in Verbindung mit dem Tukey-Test Anwendung (Universität Zürich, 2022). Die one-way ANOVA untersucht, ob es insgesamt zwischen den Mittelwerten der untersuchten Variable zwischen den einzelnen Flächen signifikante Unterschiede gibt. Der Tukey-Test spezifiziert diese Aussage, in dem er die Flächen paarweise miteinander vergleicht. Waren die Daten nicht normalverteilt, oder die Varianzen heterogen, dienten der Kruskal-Wallis-Test in Verbindung mit der Bonferroni-Korrektur zur Klärung der Frage, welche Variablen welcher Flächen sich voneinander unterscheiden (Universität Zürich, 2022). Das Signifikanzniveau wurde mit $p = 0{,}05$ festgelegt. Da die Anzahl der zu untersuchenden Proben bei $N = 36$ liegt, wurde nicht die exakte, sondern die asymptotische Signifikanz zur Beurteilung der Homogenität hinzugezogen. Bei der Untersuchung beschränkte sich die Auswahl auf die Parameter pH-Wert, effektive Kationenaustauschkapazität (AKe), die Trockenrohdichte (TRD), den organischen Kohlenstoff (C_{org}) und das C/N-Verhältnis.

Da statistische Analysen des pH-Wertes mit Fehlern behaftet sind, wird seine untransformierte Variable, die Hydroniumionenkonzentration (H_3O^+), zur statistischen Auswertung herangezogen (Murphy, 1982). Weil der pH-Wert der negative dekadische Logarithmus der $H3O^+$-Konzentration ist, gilt die Formel: $H3O^+ = 10^{-pH}$ (Covington, Bates, & Durst, 1985). Da die eigens gemessenen pH-Werte im Vergleich zu denen des Labors erheblich höher ausfielen, wurden die pH-Werte des Labors zur statistischen Auswertung benutzt.

Um eine Auswertung des C/N-Verhältnisses im Mineralboden insbesondere in der Tiefenstufe 10-30 cm möglich zu machen, wurden solche N-Werte die vom Labor als $N < 0{,}05$ angegeben wurden, $N = 0{,}05$ gleichgesetzt, da die meisten der N Werte dieser Stufe zwischen 0,05 und 0,07 lagen.

Zur Untersuchung und Auswertung der aufgenommenen Daten, wurde das Programm SPSS (28) von International Business Machines (IBM) verwendet.

2.6.2 Ermittlungen der Grenzwerte

Zur Abschätzung zukünftige signifikanter und versuchsbedingter Veränderungen wurden für die erhobenen Parameter sogenannte Grenzwerte ermittelt. Dazu wurde über alle Flächen und je Tiefenstufe der Median ermittelt und als Referenzwert für den one-sample t-Test angenommen. Mit Hilfe der rnorm Funktion der Statistiksoftware R (Core Team R, 2014) wurden künstliche Stichproben generiert, deren Umfang dem des jeweiligen Parameters entspricht. Dabei wurde eine Standardabweichung von1 angenommen und der Mittelwert wurde sukzessive verkleinert, beziehungsweise vergrößert. Sobald der Mittelwert der hypothetischen Stichprobe im t-Test einen p-Wert <0,05 erzeugt, wurde er als unterer beziehungsweise oberer Grenzwert identifiziert.

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der vorbereitenden Statistik

Im Folgenden werden die erhobenen Parameter, wie unter 2.6.1 erwähnt, mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf ihre Verteilung und durch den Levene-Test auf Varianzhomogenität überprüft.

3.1.1 Ergebnisse für die Trockenrohdichte

Aus den Ergebnissen des Shapiro-Wilk-Test für die Trockenrohdichte (TRD) geht hervor, dass die Werte der beiden Tiefenstufen 0-10cm und 10-30cm normalverteilt sind, da das Signifikanzniveau für alle Flächen $p \geq 0{,}05$ ist.

Der Test auf Varianzhomogenität auf Basis des Medianes zeigt, dass die Varianzen der Werte der Trockenrohdichte für die Tiefenstufe 0-10 cm signifikant voneinander abweichen ($p = 0{,}015$), die der Tiefenstufe 10-30 cm jedoch als homogen einzustufen sind ($p = 0{,}762$).

3.1.2 Ergebnisse für den organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org})

Aus den Ergebnissen des Shapiro-Wilk-Tests für den organischen Kohlenstoffgehalt geht hervor, dass die Werte der Auflage und die der beiden Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm normalverteilt sind, da die resultierenden p-Werte alle größer als $p = 0{,}05$ sind.

Die Tests auf Varianzhomogenität auf Basis der Mediane haben ergeben, dass die Varianzen in allen Tiefenstufen als homogen einzuordnen sind. Tabelle 3 beschreibt die entsprechenden p-Werte.

Tabelle 3 : p-Werte des C_{org}-Gehaltes des Levene-Tests auf Basis des Medians

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
Corg [t/ha]	Auflage	0,107
	0-10 cm	0,464
	10-30 cm	0,638

3.1.3 Ergebnisse für die effektive Kationenaustauschkapazität.

Aus den Ergebnissen des Shapiro-Wilk-Test für die effektive Kationenaustauschkapazität geht hervor, dass die Werte der Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm Normalverteilt sind, die der Fläche 1 der Auflage jedoch nicht. Der p-Wert liegt auf dieser Fläche bei $p = 0{,}024$.

Der daran anschließende Test zur Überprüfung der Homogenität der Varianzen, dessen Ergebnisse in Tabelle 4 dargestellt sind, zeigt, dass die Varianzen der

Auflage und der Tiefenstufe 0-10 cm keine signifikanten Unterschiede aufweisen, die der Tiefenstufe 10-30 cm hingegen schon.

Tabelle 4 : p-Werte der effektiven Kationenaustauschkapazität des Levene-Tests auf Basis des Medians

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
AKe [meq/100 g]	Auflage	0,302
	0-10 cm	0,093
	10-30 cm	0,004

3.1.4 Ergebnisse für das C/N-Verhätlnis

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für das C/N-Verhältnis zeigen, dass nicht alle Werte der Flächen der Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm einer Normalverteilung folgen, die der Auflage hingegen schon. Tabelle 5 veranschaulicht die Flächen mit signifikanten Unterschieden.

Tabelle 5 Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für das C/N-Verhältnis mit resultierenden p-Werten < 0,05

Paameter	Tiefenstufe	Fläche	p-Wert
C/N	0-10cm	Fläche 0	0,033
		Fläche 4.3 (kahl)	0,014
	10-30cm	Fläche 1	0,04

Der daran anschließende Test zur Überprüfung der Varianzhomogenität ergab, für keine der Flächen in keiner der Tiefenstufen signifikante Abweichungen. Seine Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6 p-Werte des C/N Verhältnisses des Levene-Tests auf Basis des Medians

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
C/N	Auflage	0,082
	0-10 cm	0,492
	10-30 cm	0,878

3.1.5 Ergebnisse für die Hydroniumionenkonzentration (H_3O^+) / den pH-Wert in H_2O

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für die H_3O^+-Konzentration zeigen, dass in keiner Tiefenstufe die Werte der Flächen Normalverteilt sind. Tabelle 7 stellt die signifikanten Ergebnisse mit $p < 0{,}05$ dar.

Tabelle 7 Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests für die $HO3^+$ - Konzentration mit resultierenden p-Werten < 0,05

Parameter	Tiefenstufe	Fläche	p-Wert
pH (H3O+)	Auflage	Fläche 0	0,025
		Fläche 1	0,000
		Fläche 2	0,032
		Fläche 4.3 (kahl)	0,001
	0-10cm	Fläche 0	0,000
		Fläche 1	0,004
		Fläche 2	0,024
		Fläche 4.2 (licht)	0,032
	10-30cm	Fläche 0	0,004
		Fläche 3	0,035

Die Überprüfung der Homogenität der Varianzen, ergab für keine der Flächen signifikante Unterschiede. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8 p-Werte der H_3O^+-Konzentration des Levene-Tests auf Basis des Medians

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
H_3O^+	Auflage	0,530
	0-10 cm	0,056
	10-30 cm	0,355

3.2 Ergebnisse der vergleichenden Statistik

Im Folgenden werden die erhobenen Parameter hinsichtlich ihrer Homogenität überprüft. Dabei wurde, wie bereits in Kapitel 2.6 beschrieben, entweder die one-way ANOVA in Verbindung mit dem Tukey-Test bei Varianzhomogenität und Normalverteilung der Werte angewandt, oder, falls eine der beiden Voraussetzungen nicht zutraf, der Kruskall-Wallis-Test in Verbindung mit der Bonferroni-Korrektur.

3.2.1 Ergebnisse der Trockenrohdichte

Da Varianzhomogenität und eine Normalverteilung der Werte nur für die TRD der Tiefenstufe 10-30 cm vorliegt, fand nur in diesem Fall die one-way ANOVA und der Tukey-Test Anwendung. Bei der Tiefenstufe 0-10 cm wurde der Kruskal-Wallis-Test mit der Bonferroni-Korrektur angewandt.

One-way ANOVA

Aus den Ergebnissen der one-way ANOVA geht für die Tiefenstufe 10-30 cm hervor, dass zwischen den Flächen signifikante Unterschiede bestehen ($p < 0{,}001$)

In der Folge wurde zur Untersuchung zwischen welchen Flächen ein signifikanter Unterschied besteht, der Tukey-Test angewandt. Für die Tiefenstufe 10-30 cm ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen vielen Flächen. Tabelle 9 veranschaulicht welche Flächen nicht homogen zueinander sind. Auffällig ist, dass die Fläche 0 sehr aus dem Rahmen fällt, da lediglich zwischen ihr und den Werten der Fläche 2 keine signifikanten Unterschiede bestehen.

Tabelle 9 Ergebnisse des Tukey-Tests mit resultierenden p-Werten < 0,05 der Trockenrohdichte für die Tiefenstufe 10-30 cm

Ausgangsfläche	Vergleichsfläche	p-Wert
Fläche 0	Fläche 1	0,000
	Fläche 3	0,027
	Fläche 4.1 (locker)	0,000
	Fläche 4.2 (licht)	0,027
	Fläche 4.3 (kahl)	0,000
Fläche 1	Fläche 2	0,000
Fläche 2	Fläche 4.1 (locker)	0,048
	Fläche 4.3 (kahl)	0,000
Fläche 3	Fläche 4.3 (kahl)	0,001
Fläche 4.2 (licht)	Fläche 4.3 (kahl)	0,013

Abbildung 8 veranschaulicht die Streuung der Trockenrohdichte der Tiefenstufe 10-30 cm. Auf den Interquartilsabstand bezogen, liegt Trockenrohdichte über alle Flächen zwischen 1,52 g/cm³ und 1,76 g/cm³. Beim Betrachten der Abbildung wird ersichtlich, dass die Flächen 0 und 4.3 (kahl) eine deutlich höhere, beziehungsweise niedrigere Dichte im Vergleich zu den anderen Flächen aufweisen. Dies bestätigt die vermehrt auftretenden in Tabelle 9 aufgezeigten signifikanten Unterschiede der Fläche 0 und 4.3 (kahl) zu den anderen Flächen.

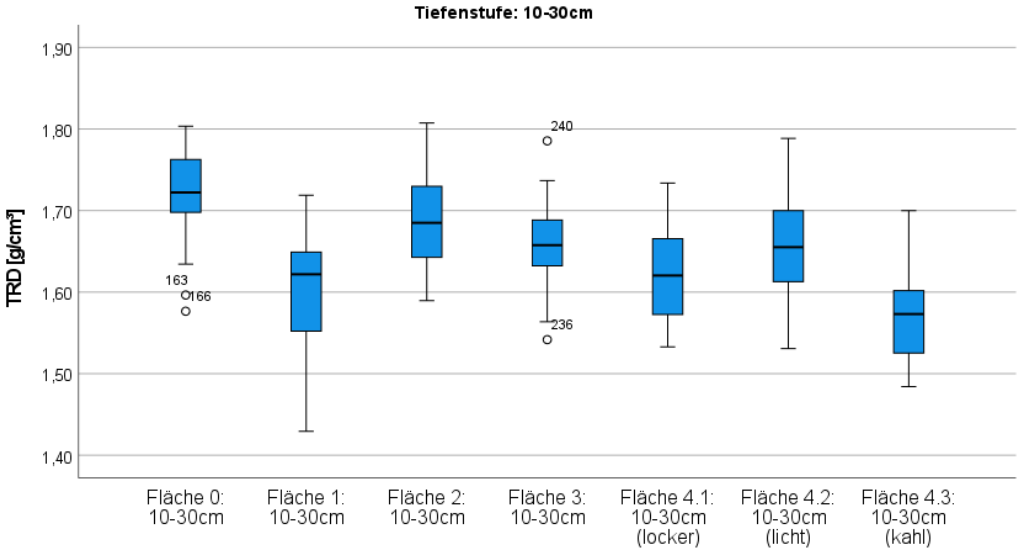


Abbildung 8 Boxplotdiagramme der Trockenrohdichte der Tiefenstufe 10-30 cm

Kruskal-Wallis

Der Kruskal-Wallis-Test bestätigt, dass für die Tiefenstufe 0-10 cm signifikante Unterschiede bestehen ($p = 0{,}001$).

Um zu überprüfen welche Flächen der Tiefenstufe 0-10cm signifikant voneinander abweichen, wurden die Flächen paarweise verglichen und die

Signifikanzwerte mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur angepasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10 Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests mit Bonferroni-Korrektur der Trockenrohdichte für resultierende p-Werte < 0,05 der Tiefenstufe 0-10cm (pro Zeile werden die genannten Flächen miteinander verglichen)

Ausgangsfläche	Vergleichsfläche	p-Wert
Fläche 1	Fläche 4.3 (kahl)	0,006
	Fläche 4.2 (licht)	0,009
	Fläche 2	0,007
	Fläche 3	0,039

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass fast alle Flächen homogen zueinander sind. Lediglich die Werte der Fläche 1 weichen signifikant von allen Flächen außer der Fläche 4.1 und der Fläche 0 ab. Abbildung 9 veranschaulicht die höhere Dichte der Fläche 1 im Gegensatz zu allen anderen Flächen außer den Flächen 0 und 4.1 (locker).

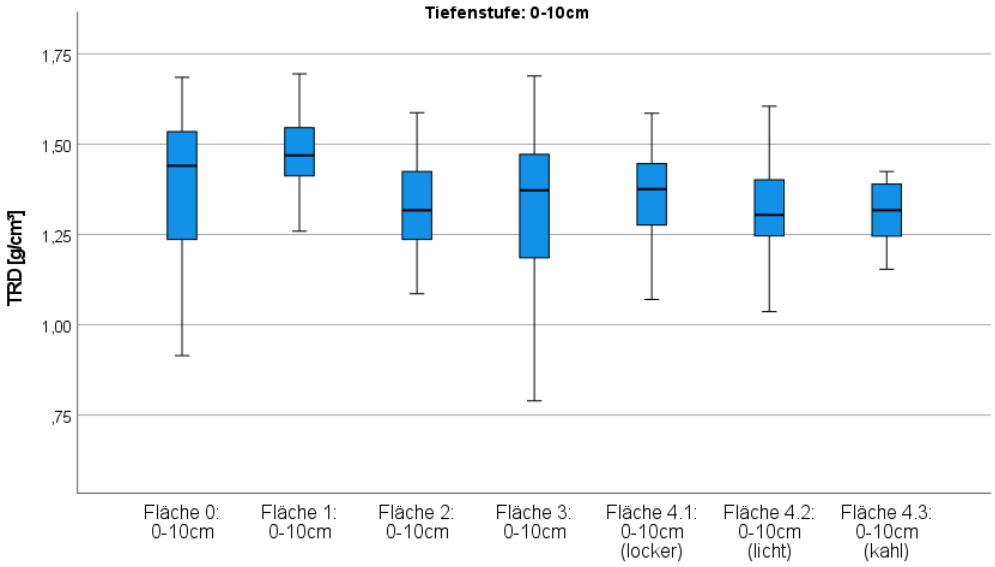


Abbildung 9 Boxplotdiagramme der Trockenrohdichte der Tiefenstufe 0-10 cm

Insgesamt lässt sich auf den Interquartilsabstand eine Streuung der Dichte zwischen 1,2 und 1,53 g/cm³ beobachten.

3.2.2 Untersuchung des organischen Kohlenstoffanteils

Da die Werte der Auflage und der beiden Tiefenstufen normalverteilt sind, und ihre jeweiligen Varianzen homogen, wurde für alle Werte die one-way ANOVA in

Verbindung mit dem Tukey-Test angewandt. Tabelle 11 veranschaulicht ihre Ergebnisse.

Tabelle 11: Resultierende p-Werte der ANOVA für den C_{org}-Gehalt

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
Corg [t/ha]	Auflage	0,208
	0-10cm	0,003
	10-30cm	0,005

Es wird erkennbar, dass in der Auflage zwischen den Flächen keine signifikanten Unterschiede bestehen, die Flächen der beiden anderen Tiefenstufen jedoch signifikante Unterschiede aufweisen. Tabelle 12 stellt die Ergebnisse des Tukey-Tests der Tiefenstufen des Mineralbodens dar und hebt die Flächen mit resultierenden p-Werten $p < 0{,}05$ hervor.

Tabelle 12 Ergebnisse des Tukey-Tests des C_{org} mit resultierenden p-Werten < 0,05 für die Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm

Ausgangsfläche	Vergleichsfläche	Tiefenstufe	p-Wert
Fläche 1	Fläche 0	0-10 cm	0,005
	Fläche 2		0,013
	Fläche 3		0,005
	Fläche 4.1 (locker)		0,022
Fläche 1	Fläche 0	10-30 cm	0,027
	Fläche 2		0,002
	Fläche 3		0,044
	Fläche 4.3 (kahl)		0,023

Es wird anschaulich, dass sich die Fläche 1 deutlich von allen anderen bis auf die Fläche 4.2 (licht) und die Fläche 4.3 (kahl) in der Tiefenstufe 0-10 cm abhebt. Ähnlich verhält es sich in der darunterliegenden Tiefenstufe. Außer zu den Flächen 4.1 (locker) und 4.2 (licht) unterscheidet sich die Fläche 1 signifikant von allen anderen Flächen. Abbildung 10 zeigt die unterschiedlichen C_{org}-Gehalte in t/ha für die drei Tiefenstufen. Bemerkenswert ist vor Allem der wesentlich geringere C-Vorrat der Fläche 1 in der Tiefenstufe 0-10 cm und der vergleichsweise höhere C-Vorrat in der Tiefenstufe 10-30cm.

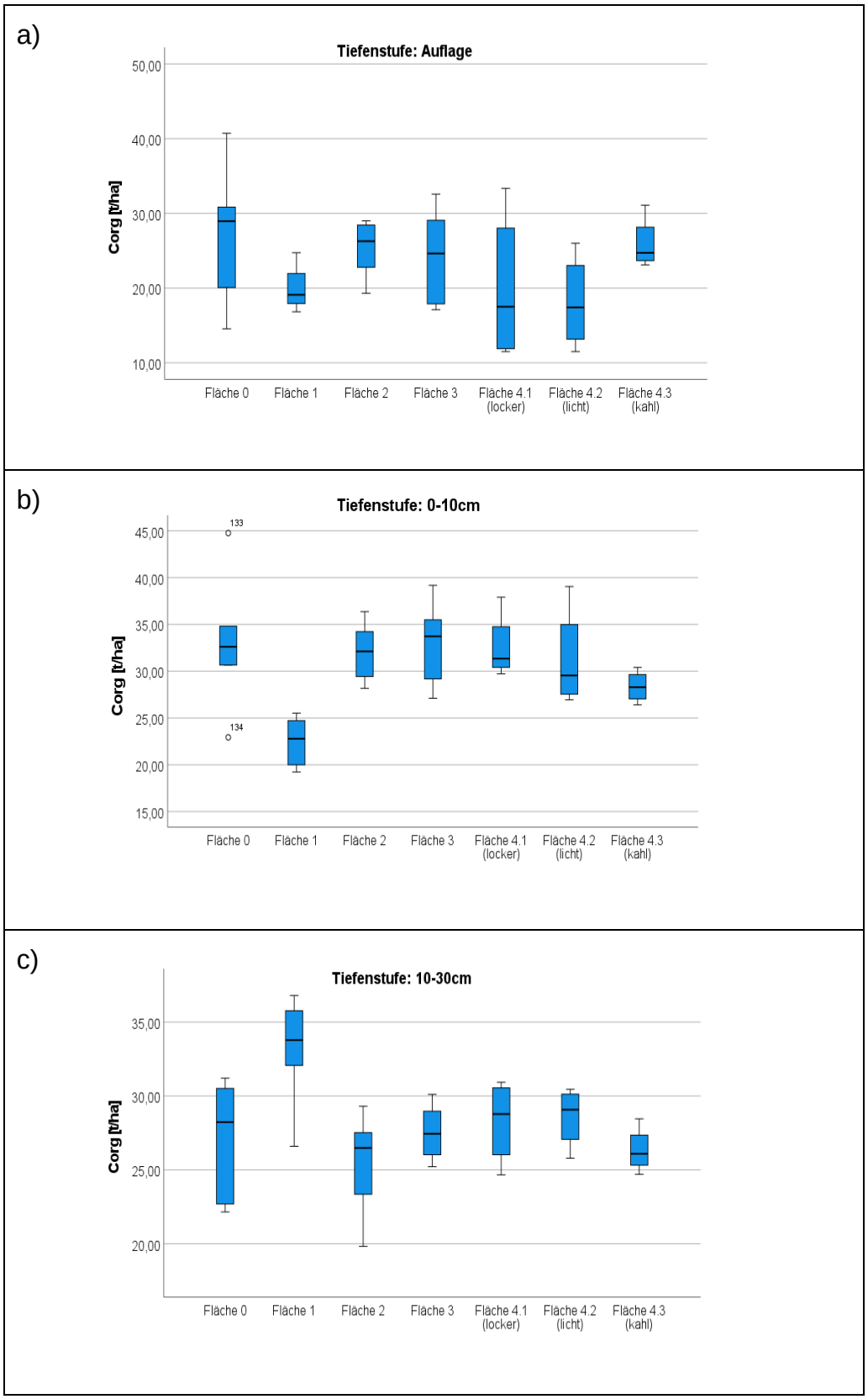


Abbildung 10 Boxplotdiagramme des Corg-Gehaltes in t/ha für die verschiedenen Tiefenstufen: a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30 cm

Während der Median der Fläche 1 in der Tiefenstufe 0-10 cm bei 23 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar liegt, beträgt er im gesamten Mittel 30,5 t/ha. In der

Tiefenstufe 10-30 cm kehrt sich das Verhältnis um und der Median der Fläche 1 liegt bei 33 t/ha während er im gesamten Mittel 28 t/ha beträgt. Das Boxplotdiagramm der Auflage zeigt für die Fläche 1 mit 19 t/ha ebenfalls einen vergleichsweise geringen Kohlenstoffgehalt, der sich jedoch nicht so deutlich von den anderen Flächen abgrenzt wie in den beiden Tiefenstufen darunter. Dies spiegelt das Ergebnis der ANOVA für die Auflage wider.

3.2.3 Untersuchung der effektiven Kationenaustauschkapazität

Da nur die Werte der Tiefenstufe 0-10 cm normalverteilt waren und Varianzhomogenität auf den Median bezogen aufwiesen, konnte auch nur in diesem Fall die one-way-ANOVA inklusive des Tukey-Tests angewandt werden. Für die Auflage und die Tiefenstufe 10-30 cm wurden die Voraussetzungen nicht erfüllt, weswegen der Kruskal-Wallis-Test mit der Bonferroni-Korrektur in beiden Fällen angewendet wurde.

One-way ANOVA

Aus der one-way-ANOVA für die Tiefenstufe 0-10 cm geht hervor, dass zwischen den Flächen keine signifikanten Unterschiede bestehen, da der p-Wert über dem Signifikanzniveau liegt ($p = 0{,}299$).

Kruskal-Wallis-Test

Die zusammengefassten Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests, unter Einbezug der Bonferroni-Korrektur, ergeben weder für die Auflage, noch für die Tiefenstufe 10-30 cm signifikante Unterschiede. Tabelle 13 stellt die jeweilige p-Werte dar.

Tabelle 13: Ergebnisse der Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests für die Auflage und die Tiefenstufe 10-30 cm der AKe

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
AKe [meq/100g]	Auflage	0,164
	10-30cm	0,168

Die in Abbildung 11 dargestellten Boxplotdiagramme zeigen relativ homogene Varianzen in der Auflage, eine etwas größere Streuung in der Tiefenstufe 0-10 cm und deutliche größere Streuung in der Tiefenstufe 10-30 cm. Diese Beobachtung veranschaulicht das Ergebnis des Levene-Tests.

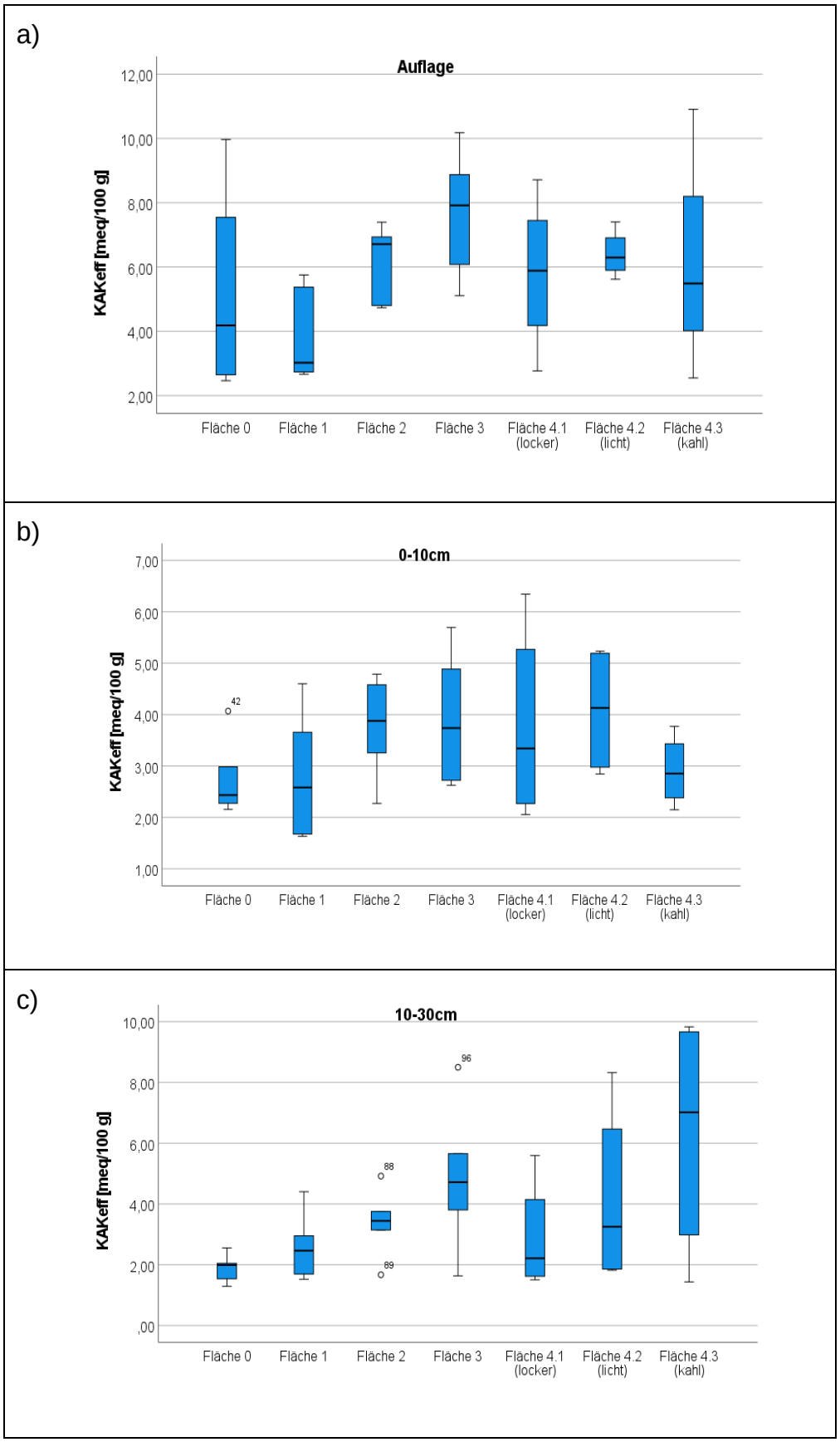


Abbildung 11 Boxplotdiagramme der AKe für die verschiedenen Tiefenstufen a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30 cm

Die unterschiedlichen Werte der AKe vor Allem in der Tiefenstufe 10-30 cm scheinen jedoch trotz sichtbarer Unterschiede zwischen beispielsweise den Flächen 0 und 1 zur Fläche 4.3 (kahl) nicht groß genug zu sein, um als signifikant zu gelten.

Insgesamt liegt der Median der AKe der Auflage über alle Flächen zwischen 3 und 8 meq/100g, der Median der Tiefenstufe 0-10 cm zwischen 2,4 und 4,1 meq/100g und der Median der Tiefenstufe 10-30 cm zwischen 2 und 7 meq/100g. Trotz der vergleichsweise hohen AKe der Fläche 4.3 in der Tiefenstufe 10-30 cm ist zu beobachten, dass die AKe mit zunehmender Tiefe abnimmt.

3.2.4 Untersuchung des C/N Verhältnis

Aufgrund homogener Varianzen und der vorliegenden Normalverteilung fand für die Auflage die ANOVA Anwendung. Die beiden Tiefenstufen des Mineralbodens wurden mit Hilfe des Kruskal-Wallis-Tests und der Bonferroni-Korrektur untersucht.

One-way ANOVA

Aus den Ergebnissen der one-way ANOVA für die Auflage geht hervor, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Flächen bestehen ($p = 0{,}386$).

Kruskal-Wallis

Die zusammengefassten Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests unter Einbezug der Bonferroni-Korrektur zeigen, dass zwischen den Flächen der Tiefenstufe 0-10 cm signifikante Unterschiede bestehen, in der Tiefenstufe 10-30 cm jedoch nicht. Tabelle 14 veranschaulicht die zusammengefassten Ergebnisse.

Tabelle 14 Zusammengefasste Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für die Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
C/N	0-10cm	0,018
	10-30cm	0,202

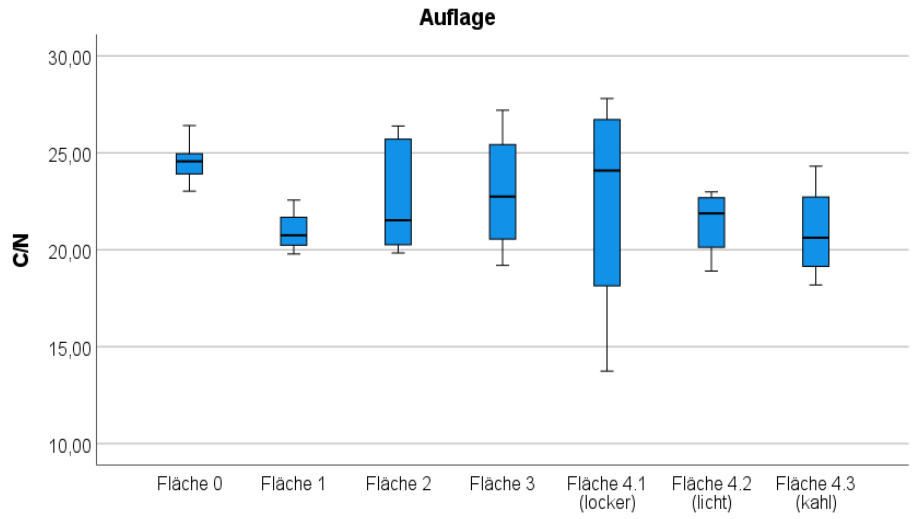
Ein paarweiser Vergleich der Flächen verdeutlicht jene Flächen, deren Unterschiede als signifikant zu bewerten sind. Diese Flächen sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15 Ergebnisse des paarweisen Vergleichs des C/N Verhältnisses der Tiefenstufe 0-10 cm mit resultierenden p-Werten $p < 0{,}05$

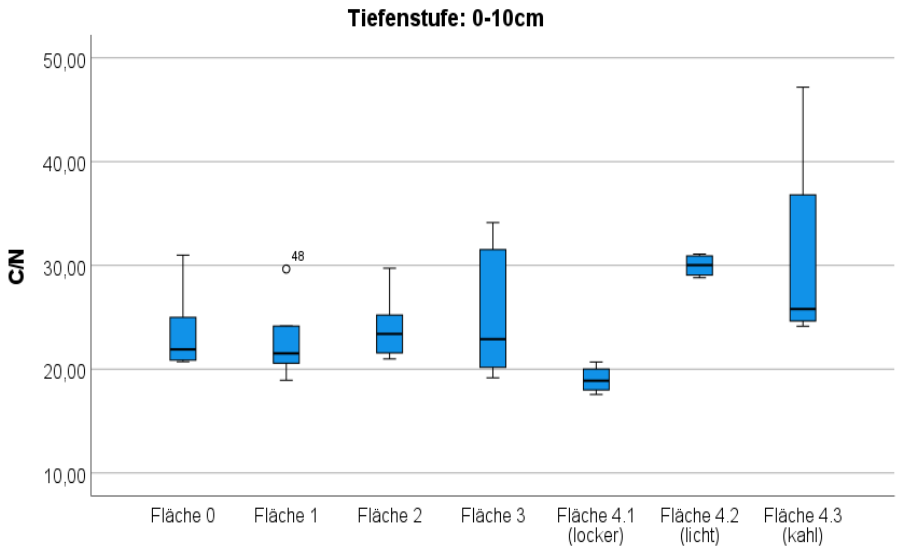
Ausgangsfläche	Vergleichsfläche	p-Wert
Fläche 4.1 (locker)	Fläche 4.2 (licht)	0,011

Es zeigt sich, dass die einzigen Flächen die sich signifikant voneinander unterscheiden, die Fläche 4.1 und die Fläche 4.2 sind. Abbildung 12 visualisiert die Werte des C/N-Verhältnisses und verdeutlicht diesen Unterschied.

a)



b)



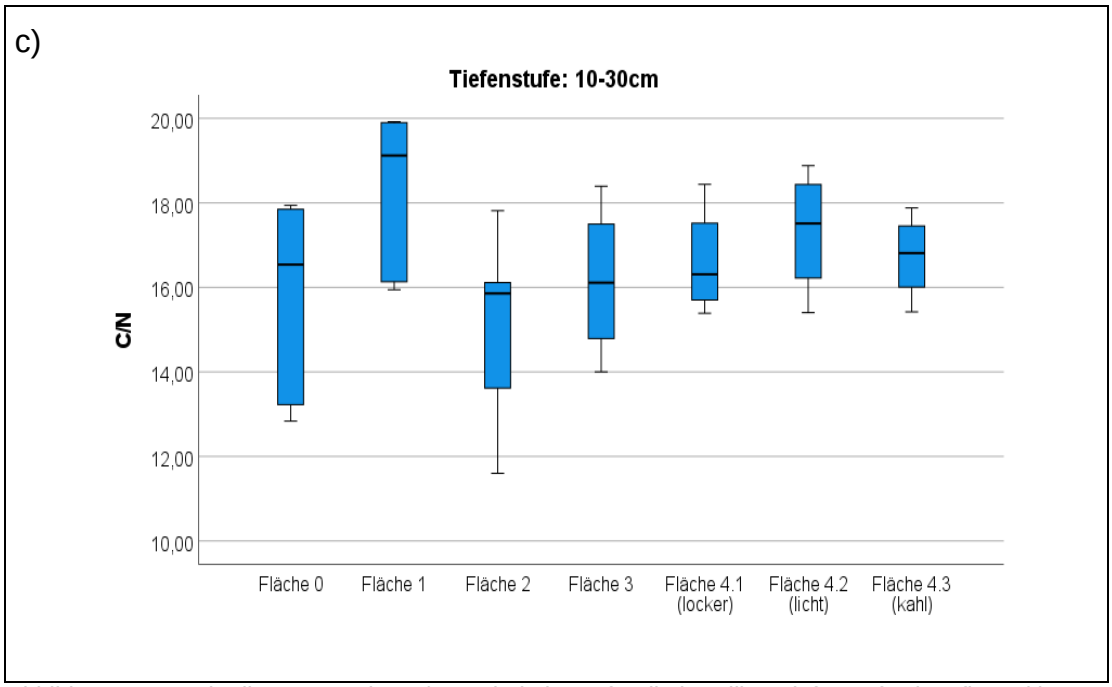


Abbildung 12 Boxplotdiagramme des C/N-Verhältnisses für die jeweilige Tiefenstufe a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30 cm

Es ist zu erkennen, dass sich das C/N-Verhältnis der Auflage im Wesentlichen zwischen 20 und 25 bewegt. Die Werte der Tiefenstufe 0-10 cm liegen zwischen 20 und 30. Auffallend große Streuung besitzen die Flächen 3 und 4.3 (kahl). Außerdem liegen die Mediane der Flächen 4.2 und 4.3 bei 30 beziehungsweise 25 und sind damit etwas höher als die der restlichen Flächen, welche bei etwas über 20 liegen. Die Interquartilsabstände der Tiefenstufe 10-30 cm sind in ihrer Breite als auch in den Werten sehr nah beieinander. Das C/N-Verhältnis schwankt in dieser Stufe auf die Interquartilsabstände bezogen im Wesentlichen zwischen 13 und 20. Die Mediane liegen hauptsächlich zwischen 16 und 17. Lediglich Fläche 1 weist mit einem Median von 19 ein leicht höheres C/N-Verhältnis auf.

3.2.5 Untersuchung der Hydroniumionenkonzentration / des pH-Wertes

Da keine der Flächen Normalverteilt ist, findet in der Folge der Kruskal-Wallis-Test in Verbindung mit der Bonferroni-Korrektur Anwendung. Die zusammengefassten Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests zeigen, dass in der Auflage und der Tiefenstufe 10-30 cm keine signifikanten Unterschiede bestehen, in der Tiefenstufe 0-10 cm hingegen schon. Tabelle 16 stellt die resultierenden p-Werte dar.

Tabelle 16 Zusammengefasste Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für die $HO3^+$-Konzentration mit resultierenden p-Werten für die jeweilige Tiefenstufe

Parameter	Tiefenstufe	p-Wert
HO3+	Auflage	0,133
	0-10cm	0,023
	10-30cm	0,878

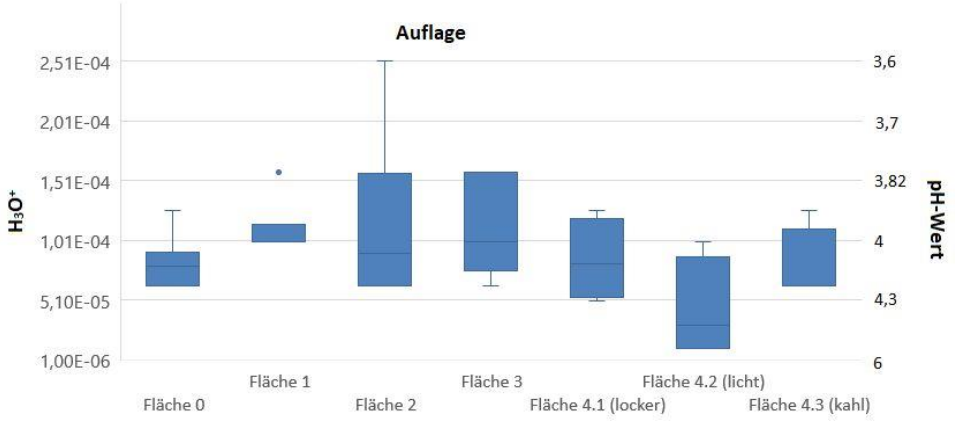
Zur Feststellung zwischen welchen Flächen in der Tiefenstufe 0-10 cm Unterschiede bestehen, wurden die Flächen paarweise unter Einbezug der Bonferroni-Korrektur untersucht. Die signifikanten Ergebnisse sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17 Ergebnisse des paarweisen Vergleichs der $HO3^+$-Konzentration der Tiefenstufe 0-10 cm mit resultierenden p-Werten < 0,05

Ausgangsfläche	Vergleichsfläche	p-Wert
Fläche 1	Fläche 3	0,012

Es wird ersichtlich, dass die einzigen Flächen die einen signifikanten Unterschied zueinander aufweisen, die Flächen 1 und 3 sind. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse dient Abbildung 13. Aus ihr geht hervor, dass der pH-Wert der Fläche 1 in der Tiefenstufe 0-10 cm mit 4,4 (Median) deutlich über dem der Fläche 3 liegt (4,1).

a)



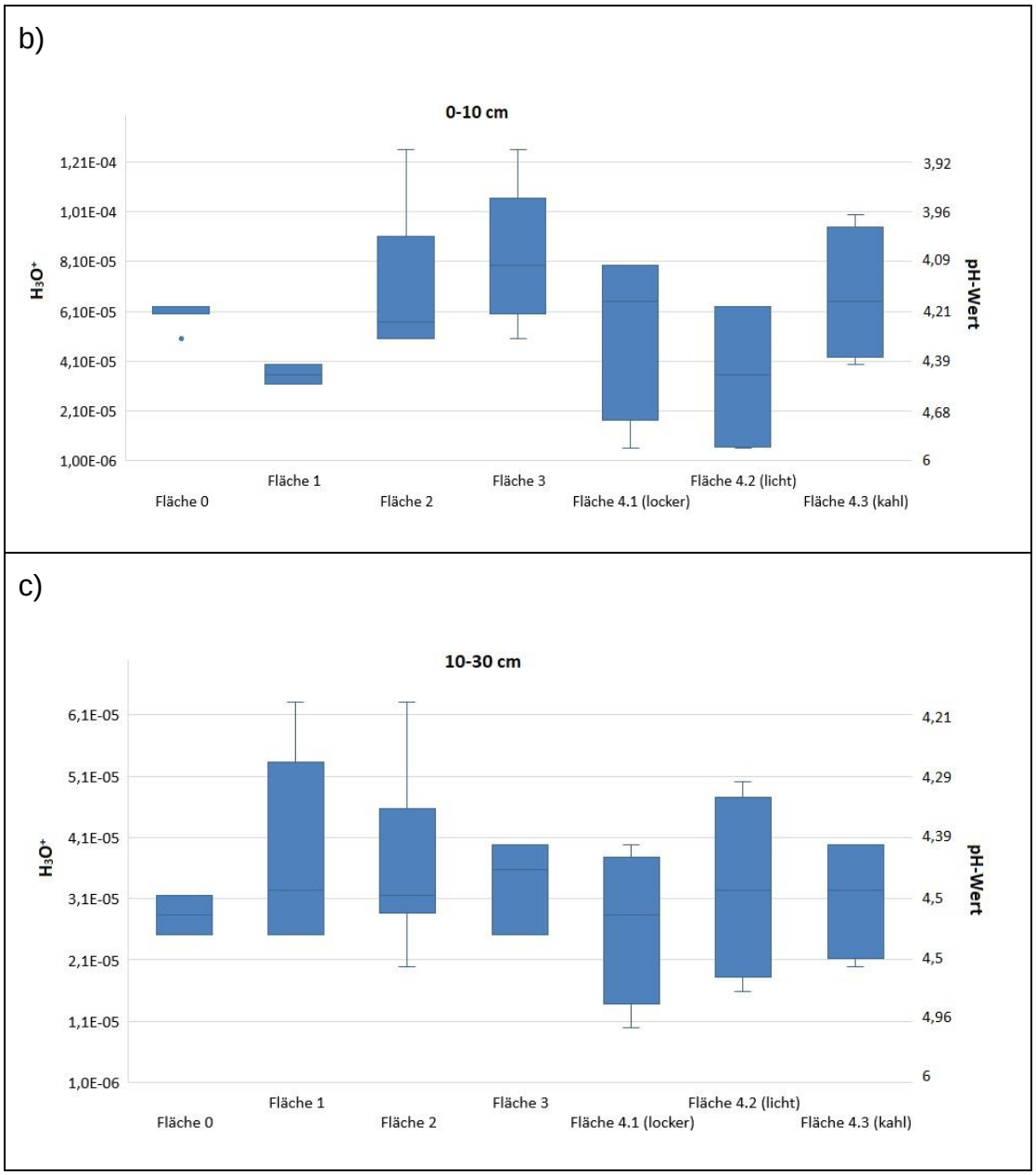


Abbildung 13 Boxplotdiagramme der pH-Werte der Tiefenstufen a) Auflage, b) 0-10 cm, c) 10-30cm

Es ist zu beobachten, dass die Flächen 0 und 1 der Auflage im Vergleich zu den anderen Flächen nur einen geringen Interquartilsabstand aufweisen. Ähnlich Verhält es sich mit den Werten der Flächen 0 und 1 in der Tiefenstufe 0-10 cm. Allerdings weisen die anderen Flächen hier noch weitere Interquartilsabstände auf, als die der Auflage. Daraus resultiert, dass der p-Wert der Tiefenstufe 0-10 cm mit $p = 0{,}056$ nur knapp über dem Signifikanzniveau liegt. In der Tiefenstufe 10-30 cm zeigen sich die geringsten Abweichungen zwischen den einzelnen Flächen. Lediglich die Fläche 0 weist eine etwas geringere Streuung der Werte auf.

Insgesamt lässt sich ein Anstieg des pH-Wertes mit zunehmender Tiefe beobachten. Liegt der Median auf alle Flächen bezogen in der Auflage bei durchschnittlich 4,05, beträgt er in der Tiefenstufe 0-10 cm 4,2 und in der Tiefenstufe 10-30 cm 4,5.

3.3 Grenzwertermittlung der untersuchten Parameter

Die in Tabelle 18 dargestellten oberen und unteren Grenzwerte der jeweiligen Parameter in den verschiedenen Tiefenstufen beschreiben ab wann eine Veränderung als signifikant zu bewerten ist und keine zufällige Streuung mehr darstellt. Die Erzeugung der Grenzwerte erfolgte, wie unter 2.6.2 beschrieben, mit der Statistiksoftware R.

Tabelle 18 Mediane, obere und untere Grenzwerte der gemessenen Parameter für die jeweilige Tiefenstufe

Parameter	Tiefenstufe	Median	Anzahl Proben	unterer Grenzwert	oberer Grenzwert
pH	Auflage	4	36	3,6	4,4
pH	0-10 cm	4,2	36	3,8	4,6
pH	10-30 cm	4,5	36	4,1	4,9
TRD [g/cm³]	0-10 cm	1,38	144	1,1	1,51
TRD [g/cm³]	10-30 cm	1,65	144	1,5	1,87
Corg [t/ha]	Auflage	22,95	36	22,56	23,31
Corg [t/ha]	0-10 cm	30,53	36	30,15	30,92
Corg [t/ha]	10-30 cm	27,86	36	27,5	28,24
C/N	Auflage	22,15	36	21,75	22,49
C/N	0-10 cm	23,13	36	22,68	23,56
C/N	10-30 cm	16,60	36	16,3	17,19
AKe [meq/100g]	Auflage	5,69	36	5,34	5,98
AKe [meq/100g]	0-10 cm	3,1	36	2,67	3,45
AKe [meq/100g]	10-30 cm	2,91	36	2,56	3,17

4. Diskussion

4.1 Bewertung der Trockenrohdichte.

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Dichte der Tiefenstufe 0-10 cm mit 1,3 g/cm³ bis 1,43 g/cm³ im Mittel nach der bodenkundlichen Kartieranleitung (Sponagel, et al., 2005) als gering bis mittel einzustufen ist. Dies liegt vermutlich vor allem an dem hohen Humusgehalt der sich im Ah-Horizont mit dem B-Horizont vermischt. Die durchschnittliche TRD von 1,57 bis 1,72 g/cm³ der Tiefenstufe 10-30 cm deutet auf eine mittlere bis hohe Dichte nach Sponagel (2005) hin. Die beobachteten signifikanten Unterschiede der Fläche 1 der Tiefenstufe 0-10 cm im Vergleich zu allen anderen Flächen, können eventuell darauf zurückzuführen sein, dass die Fläche hinsichtlich ihrer Nährkraftstufe in Z2 und M2 unterteilt ist (siehe Abbildung 4).

Die homogene Varianz der Dichte der Tiefenstufe 10-30 cm erklärt sich wahrscheinlich durch die abnehmende Durchmischung des Mineralbodens mit dem Oberboden. Die jedoch signifikant unterschiedlichen Werte der Dichte lassen kein Muster zwischen den Flächen erkennen, außer dass sich die Fläche 0 von den meisten anderen durch eine besonders hohe Dichte abhebt. Beim Betrachten der Abbildung 4 und den durchschnittlichen Werten der Dichte auf den einzelnen Flächen, lässt sich eventuell auch ein räumlicher Zusammenhang feststellen. Mit Ausnahme der Fläche 4.2 scheint die TRD der Flächen von West nach Ost zuzunehmen. Die allgemein eher hohe Dichte in der Tiefenstufe 10-30 cm könnte durchaus auf den Einsatz von schwerem Arbeitsgerät in der bisherigen Bewirtschaftung der Flächen zurückzuführen sein.

4.2 Bewertung des organischen Kohlenstoffgehalts

Aus den Erhebungen der zweiten Bodenzustandserhebung geht hervor, dass in Brandenburgs Böden auf den Median bezogen der Kohlenstoffvorrat der Auflage bis 30 cm Tiefe circa 70 Tonnen pro Hektar beträgt. Dieser Anteil macht 85 Prozent des gesamten bis in 90 cm Tiefe gespeicherten Kohlenstoffs aus (Riek & Russ, Waldbodenbericht Brandenburg Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden Band 2, 2019). Im Vergleich dazu ist der Kohlenstoffvorrat über alle fünf untersuchten Flächen auf den Median bezogen

circa 10 Tonnen höher. Während der Median der Auflage im Schnitt bei 23 t/ha liegt, ist er in der Tiefenstufe 0-10 cm bei 30,5 t/ha und in der Tiefenstufe 10-30 cm bei knapp 28 t/ha. Damit sind ungefähr 28% des Kohlenstoffvorrates Teil des Auflagehumus. Dies deckt sich in etwa mit den knapp 31 Prozent des C-Vorrates der Auflage brandenburgischer Waldböden der in der BZE 2 erhoben wurde. Im deutschlandweiten Vergleich sind diese Werte bedeutend höher als der bundesweite Durchschnitt (17%). Besonders Rohhumus und moderartige Humusformen weisen einen hohen Kohlenstoffanteil auf, der mit einer Verbesserung der Humusform abnimmt. Dies und die deutlich höhere gebundene Menge an Kohlenstoff in Böden mit höherer biologischer Aktivität weisen auf ein deutliches Potential brandenburger Böden zur Speicherung von organischem Kohlenstoff im Unterboden hin (Riek & Russ, Waldbodenbericht Brandenburg Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden Band 2, 2019).

Die signifikanten Unterschiede der Fläche 1 im Vergleich zu fast allen anderen Flächen, in Tabelle 12 dargestellt, unterstützen diese Aussage. Der Kohlenstoffanteil dieser Fläche, die zur Hälfte die Nährkraftstufe M2 (siehe Abbildung 4) aufweist, fällt mit 19 t/ha auf den Median bezogen eher gering im Vergleich zu dem Flächenmittel (23 t/ha) aus. In der Tiefenstufe 0-10 cm verdeutlicht sich der Unterschied noch weiter. Der Median liegt hier bei circa 23 t/ha während er auf den anderen Flächen im Mittel bei über 30,5 t/ha liegt. Die Tiefenstufe 10-30 cm weist für den Median hingegen einen Wert von 33 t/ha auf, während die anderen Flächen im Schnitt bei circa 28 t/ha liegen (siehe Abbildung 10). Die Aussage, dass mit steigender Nährkraft die Kohlenstoffanteile im Unterboden zunehmen, scheint auch für die Versuchsflächen zu gelten.

Als Folge daraus könnte die Vermutung angestellt werden, dass bei einem sich vollziehenden Wechsel der Flächen von Kiefernmonokulturen zu Mischkulturen mit höheren Laubanteilen die sich verändernde Auflage dazu führen könnte, dass sich die biologische Aktivität erhöht. Dadurch würde zwar mehr Kohlenstoff aus der Auflage durch die Bodenlebewesen freigesetzt werden, längerfristig könnten sich jedoch stabilere Humusverbindungen in den Unterboden verlagern.

4.3 Bewertung der effektiven Kationenaustauschkapazität

Aus der Betrachtung der Ergebnisse der paarweisen Vergleiche aus Kapitel 3.2.3 geht hervor, dass weder für die Auflage noch für die beiden Tiefenstufen signifikante Unterschiede zwischen den Flächen bestehen. Die niedrigen p-Werte für die Tiefenstufe Auflage ($p = 0{,}164$) und die Tiefenstufe 10-30 cm ($p = 0{,}168$) deuten jedoch auf leichte Unterschiede. Bei näherer Betrachtung der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fällt auf, dass die M ediane der Tiefenstufe 10-30 cm für die Flächen 0, 1 und 4.1 bei ungefähr 2 $mmol_c$ / 100 g liegen, während die Fläche 4.3 einen besonders hohen Wert von 7 ausweist. In der Auflage weisen die Flächen 0 und 1 einen ebenfalls eher geringen Wert von 4 beziehungsweise 3 $mmol_c$ /100 g auf, während die anderen Werte, auf den Median bezogen, bei um die 6 $mmol_c$ / 100g liegen, die der Fläche 3 sogar bei 8 $mmol_c$ /100g. Die Tiefenstufe 0-10 cm weist die geringsten Abweichungen auf mit Medianen zwischen 2,5 $mmol_c$ /100 g und 4 $mmol_c$ /100 g. Da die Kationenaustauschkapazität maßgeblich vom C-Gehalt, die Humusqualität und den pH-Wert gesteuert wird (Horn et al., 2005, zitiert nach Riek, Russ, & Kühn, 2015), liegt die Vermutung nahe, dass diese Werte bei den Flächen 0 und 1 sowie der Fläche 4.1 in der Tiefenstufe 10-30 cm tiefer ausfallen sollten als die der Fläche 3, der Auflage, oder die der Fläche 4.3 der Tiefenstufe 10-30 cm. Eine Betrachtung der Mediane und Interquartilsabstände des C_{org}-Gehaltes und des pH-Wertes der Flächen verdeutlicht jedoch, dass weder die C_{org}-Gehalte noch die pH-Werte der Flächen 0, 1 und 4.1 bedeutend niedriger ausfallen, als die der Fläche 3 oder der Fläche 4.3 (siehe Abbildung 10 und Abbildung 13). Da die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests und die der ANOVA jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Flächen aufweisen, scheint hier ein Rückschluss auf höhere, beziehungsweise niedrigere pH-Werte und C_{org}-Gehalte eher schwierig zu sein.

Insgesamt ist die AKe nach (Riek, Russ, & Kühn, 2015), über alle Flächen zusammengenommen, sowohl für die Tiefenstufe 0-10 cm mit 31 $mmol_c$/kg als auch für die Tiefenstufe 10-30 cm mit 29 $mmol_c$/kg, eher gering einzustufen. Würde man die Fläche 4.3 der Tiefenstufe 10-30 cm getrennt betrachten, würde ihre AKe mit 70 $mmol_c$/kg als mittel eingestuft werden. Damit liegt sie mindestens 30 $mmol_c$/kg über allen anderen Flächen. Die mit 56,9 $mmol_c$/kg im Vergleich

hohe AKe der Auflage verdeutlicht das Potential die AKe im Mineralboden, durch Umverlagerung der Humusanteile in tiefere Schichten, ansteigen zu lassen. Verbessert sich die Humusform im Verlauf des Waldumbaus, dürfte des Weiteren die Humusqualität zunehmen und ihr pH-Wert steigen. Dies könnte längerfristig vermutlich auch für einen Anstieg der AKe im Mineralboden sorgen.

4.4 Bewertung des C/N-Verhältnisses

Der Beobachtung ist vorwegzunehmen, dass das C/N-Verhältnis aufgrund sehr niedriger C- und N-Gehalte im Mineralboden nur bedingt interpretierbar ist (Riek & Russ, Waldbodenbericht Brandenburg Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden Band 2, 2019). Dies wurde insbesondere bei den Ergebnissen der N-Werte des Labors deutlich, die in der Tiefenstufe 10-30 cm entweder zwischen 0,5 und 0,7 Prozent, oder unter 0,5 Prozent lagen. Da für alle Werte mit $N < 0{,}05$ zur statistischen Auswertung der Wert für $N = 0{,}05$ gleichgesetzt wurde, sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu beurteilen. Um einen Vergleich zu den Ergebnissen der BZE herstellen zu können, dürfen demnach nur die Werte der Auflage und die der Tiefenstufe 0-10 cm hinzugezogen werden.

Das C/N Verhältnis ist nach den Erhebungen BZE-2 (Riek & Russ, Waldbodenbericht Brandenburg Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden Band 2, 2019) in Brandenburg unter anderem für die Nährkraftstufe, die Bodentypengruppen, die Humusform und dem Bestandestyp angegeben. Da sich die zu untersuchenden Flächen hauptsächlich auf Z-Standorten befinden, der Bestandestyp Kiefer ist, die Humusform hauptsächlich Rohhumus und rohhumusartiger Moder und alle Flächen von Braunerden geprägt sind, werden diese Werte zum Vergleich herangezogen. Dabei gilt in allen Fällen, dass der Median bei ungefähr 25 liegt. Auf die Auflage und die Tiefenstufe 0-10 cm bezogen, liegt der Median der untersuchten Flächen bei 22,3 und damit etwas unter dem brandenburgischen Durchschnitt (25). Die Fläche 1 liegt mit einem C/N Verhältnis 21,1 etwas unter dem Gesamtdurchschnitt, was vermutlich durch die etwas bessere Nährkraftstufe auf der Hälfte der Fläche zu begründen ist (siehe Abbildung 4). Da, wie bereits unter Kapitel 4.2 beschrieben, von einer höheren Umsetzung des organischen Materials bei einer besseren Nährkraftstufe auszugehen ist und gleichzeitig das

Potential erhöht wird mehr Kohlenstoff im Unterboden zu speichern, scheint das höhere C/N-Verhältnis der Tiefenstufe 10-30 cm der Fläche 1, in Abbildung 12 dargestellt, im Vergleich zu den anderen Flächen die logische Konsequenz zu sein. Eine Erklärung gibt es indes nicht für den in Tabelle 15 dargestellten signifikanten Unterschied ($p = 0{,}011$) in der Tiefenstufe 0-10 cm zwischen den Flächen 4.1 und 4.2. Fasst man die Auflage und die Tiefenstufe 0-10 cm in der statistischen Analyse zusammen, relativiert sich der Unterschied und es ergibt sich der Wert $p = 0{,}624$ für den paarweisen Vergleich der Flächen 4.1 und 4.2 nach Kruskal-Wallis unter Einbezug der Bonferroni-Korrektur.

4.5 Bewertung des pH-Wertes

Der in Kapitel 3.1.5 beobachtete Anstieg des pH-Wertes von der Auflage hin zu den Mineralbodenhorizonten lässt sich nach den Ergebnissen der BZE - Stichproben mit den abnehmenden Kohlenstoffvorräten begründen. Insbesondere in der Auflage zeigt sich, dass niedrige pH-Werte mit einer Erhöhung des C-Vorrates einhergehen. (Riek, Russ, & Kühn, 2015) Der signifikante Unterschied der Flächen 1 und 3 mit $p = 0{,}012$ in der Tiefenstufe 0-10 cm könnte sich demnach durch den signifikanten Unterschied im C_{org}-Gehalt der beiden Flächen erklären. Allerdings weicht die Fläche 1 auf ihren C-Gehalt bezogen auch signifikant von den Flächen 0, 2, und 4.1 ab, welche in diesem Fall auf den pH-Wert bezogen keine signifikanten Abweichungen darstellen. In all diesen Fällen lässt sich jedoch ein geringerer pH-Wert bei steigendem Kohlenstoffgehalt feststellen (siehe Abbildung 10 und Abbildung 13). Diese Tendenz zeigen auch die nicht signifikant abweichenden Flächen 4.2 und 4.3 der Tiefenstufe 0-10 cm. Für die Tiefenstufe 10-30 cm lässt sich diese Tendenz nicht so klar beurteilen, vor allem aufgrund einer relativ breiten homogenen Streuung der Werte. Für die Auflage scheint sich die Tendenz eines höheren pH-Wertes bei einem geringeren Kohlenstoffgehalt ebenfalls zu bestätigen. Lediglich die Flächen 0 und 1 folgen einem umgekehrten Trend.

4.6 Abweichungen in den Ergebnissen des pH-Wertes

Bei dem Vergleich der eigens gemessenen pH-Werte und denen des Labors fiel auf, dass diese zum Teil erheblich voneinander abwichen. Aus gegebenem

Anlass wurde untersucht, ob die Werte in irgendeiner Form zueinander korrelieren. Da die Werte nicht normalverteilt sind, fand die Korrelationsanalyse nach Spearman Anwendung. Ferner wurde der zweiseitige Test auf Signifikanz durchgeführt, da von einem ungerichteten Zusammenhang ausgegangen wurde (Universität Zürich, 2022).

Tabelle 19 veranschaulicht die Korrelationskoeffizienten und p-Werte der Tiefenstufen.

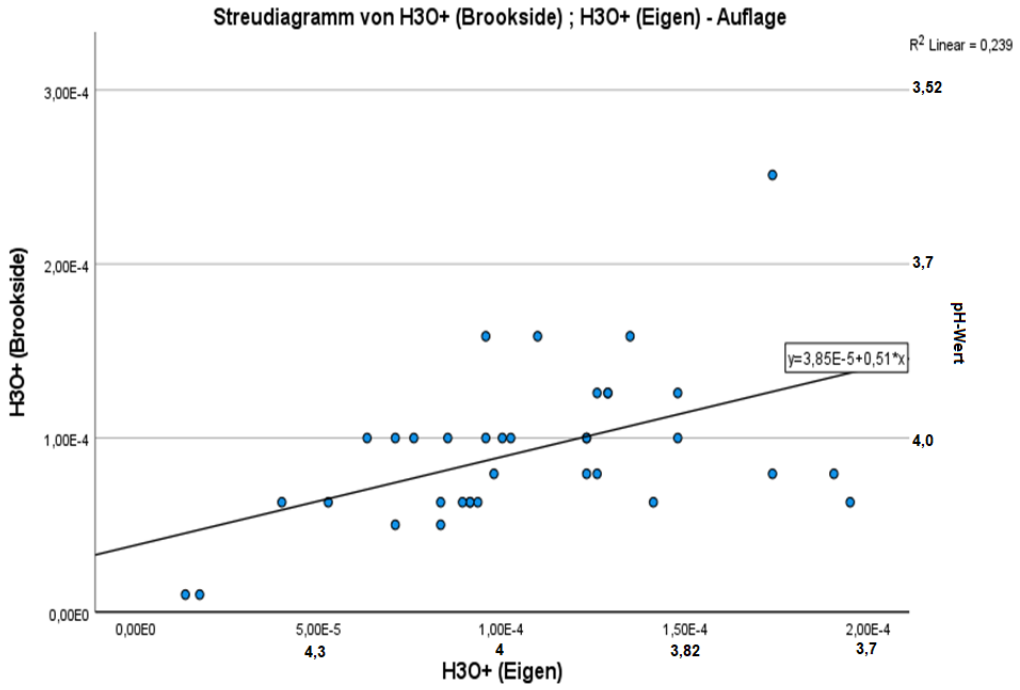
Tabelle 19 Korrelationskoeffizienten und p-Werte der Auflage und den beiden Tiefenstufen des Mineralbodens

Tiefenstufe	Ausgangswert		H3O+ (Brookside)
Auflage	H3O+ (Eigen)	Korrelationskoeffizient	0,488
		p-Wert (2-seitig)	0,003
		N	36
0-10 cm	H3O+ (Eigen)	Korrelationskoeffizient	0,519
		p-Wert (2-seitig)	0,001
		N	36
10-30 cm	H3O+ (Eigen)	Korrelationskoeffizient	0,081
		p-Wert (2-seitig)	0,640
		N	36

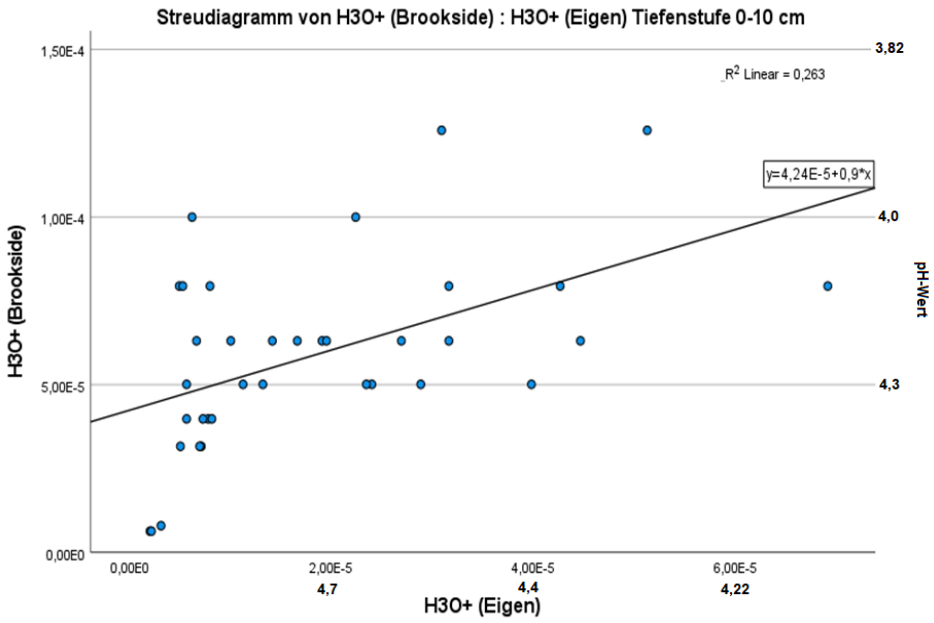
Es wird ersichtlich, dass sowohl die Auflage als auch die Tiefenstufe 0-10 cm eine signifikante Korrelation aufweisen, da $p \leq 0{,}01$ ist. Da beide Korrelationskoeffizienten positiv sind, handelt es sich um gleichsinnige Beziehungen (Universität Zürich, 2022). Dementsprechend gehen höhere Werte des Brookside Labors mit höheren eigens gemessenen Werten einher. Da der p-Wert der Tiefenstufe 10-30 cm größer als 0,01 ist, besteht in diesem Fall keine statistisch signifikante Korrelation. Da der Korrelationskoeffizient der Auflage bei $r_a = 0{,}488$ und für die Tiefenstufe bei $r_{0\text{-}10} = 0{,}519$ liegt, handelt es sich nach (Cohen, 1992) bei r_a um einen mittleren Effekt und bei $r_{0\text{-}10}$ um einen starken Effekt.

Abbildung 14 verdeutlicht den linearen Zusammenhang der Werte.

a)



b)



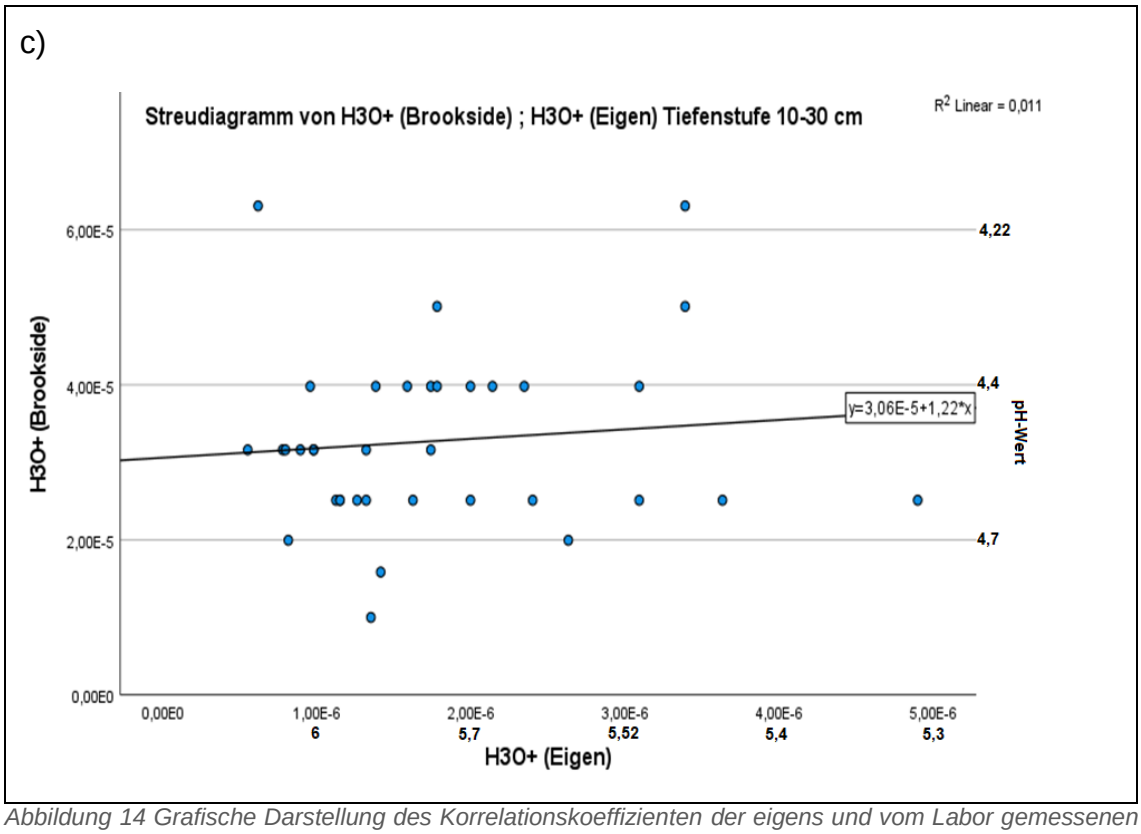


Abbildung 14 Grafische Darstellung des Korrelationskoeffizienten der eigens und vom Labor gemessenen pH-Werte der Auflage (a), der Tiefenstufe 0-10 cm (b), und der Tiefenstufe 10-30 cm (c)

Es ist deutlich zu erkennen, dass für a und b eine positive Korrelation vorliegt, während für c keine statistisch relevante Korrelation zu erkennen ist.

5. Fazit

Insgesamt bestätigen die unternommenen Untersuchungen die angenommene Homogenität nach der die Flächen ursprünglich ausgewählt wurden. Zwar weichen einige Ergebnisse der untersuchten Parameter gelegentlich in der einen oder anderen Tiefenstufe signifikant voneinander ab, bis auf die Abweichungen der Trockenrohdichte, welche von West nach Ost zuzunehmen scheint, beschränken sich die meisten signifikanten Unterschiede jedoch auf die Fläche 1. Da diese auf der Hälfte der Permanent Observation Plots eine andere Nährkraftstufe aufweist, war schon im Vorfeld von gewissen Abweichungen auszugehen. Diese haben sich durch die statistischen Untersuchungen auf die Homogenität der Parameter bestätigt. Besonders deutlich veranschaulicht der signifikante Unterschied des organischen Kohlenstoffgehaltes der Fläche 1 im Vergleich zu fast allen anderen Flächen die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen. Bei sich eventuell einstellenden Veränderungen der Parameter sollte dieser Unterschied in Zukunft definitiv mit in die Bewertung einfließen.

6. Anmerkungen

Abschließend ist für die Wiederholungsaufnahmen zu erwähnen, dass die Trocknung der Bodenproben, insbesondere der Auflage, aufgrund der beschränkten Kapazitäten im Labor der HNE, ein nicht unerheblicher organisatorischer Aufwand war. Es stellte sich heraus, dass zur Trocknung, eventuell auch schon zur Lagerung, Papiertüten deutlich geeigneter waren als Plastiktüten. Für den Fall, dass bei einer erneuten Aufnahme trotzdem Plastiktüten verwendet werden sollten, da es sich im Feld als deutlich praktischer erweist, sollte darauf geachtet werden, entsprechende Größen zu verwenden. 3 Liter Beutel stellten sich für den Trocknungsvorgang der Auflage als deutlich zu klein heraus. Die Proben mussten über eine Woche im Trockenschrank bei 40° Celsius lagern und mehrmals gewendet werden. Die spätere Nutzung von Papiertüten beschleunigte diesen Vorgang um mehrere Tage und es war ausreichend, die Proben einmal zu wenden.

Literaturverzeichnis

BMEL. (2021). *Waldbericht der Bundesregierung 2021.* Bonn: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Abgerufen am 21. 04 2022 von https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/waldbericht2021.pdf?__blob=publicationFile&v=11

Cohen, J. (Juli 1992). A Power Primer quantitative Methods in Psychology. *Psychological Bulletin*, S. 155-159. Von http://www.bwgriffin.com/workshop/Sampling%20A%20Cohen%20tables.pdf abgerufen

Core Team R. (2014). *R: a language and Environment for Statistical Computing.* (R. F. Computing, Herausgeber) Abgerufen am 12. 07 2014 von http://www.R-project.org/

Covington, A., Bates, R., & Durst, R. (1985). Definition of pH scales, standard reference values, measurement of pH and related terminology (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, S. 531-542. Von https://doi.org/10.1351/pac198557030531 [Add to Citavi project by DOI] abgerufen

de Vries, R. (10. 01 2022). mündl. Mitteilung. Alt Madlitz, Brandenburg, Deutschland.

de Vries, R. (Januar 2022). Vergleich von Waldumbaukonzepten, Alt Madlitz. 1.

Deutscher Wetterdienst. (06. 04 2022). *Deutscher Wetterdienst*. Abgerufen am 07. 04 2022 von https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/berlin-brandenburg/lindenberg/_node.html

Gauer & Aldinger. (2005). *Waldökologische Naturräume Deutschlands - Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke.* Stuttgart: Henkeldruck.

Gauer, J., & Krohier, F. (2012). *Waldökologische Naturräume Deutschlands - Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke Digitale Topographischen Grundlagen Neubearbeitung Stand 2011.* Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen Institut.

Gutachterausschuss Forstliche Analytik. (2014). *Handbuch Forstliche Analytik.* Bonn: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft.

Landesbetrieb Forst Brandenburg. (2011). *Betriebliche Anweisung zur Forsteinrichtung des Landeswaldes im Land Brandenburg.* Potsdam: Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde. Abgerufen am 30. 05 2022 von https://forst.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/bafe.3807173.pdf

LI, X., Morrow, J., DeMeo, D. L., Weiss, S. T., Wang, X., & Fu, Y. (18. Dezember 2015). A Comparativ Study of Tests for Homogeneity of Variances with Application to DNA Methylation Data. *PloS one*.

MLUK Brandenburg. (2021). *Waldzustandsbericht des Landes Brandenburgs.* Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Potsdam.

MLUL. (2004). *Waldbau-Richtlinie 2004 "Grüner Ordner" der Landesforstverwaltung Brandenburg.* Potsdam: MLUR Brandenburg.

MLUL. (13. Januar 2020). *forst.brandenburg.de.* Abgerufen am 05. 05 2022 von https://forst.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/richtli2020.pdf

Murphy, M. (1982). *Analyzing and presenting pH Data.* Illinois: Journal of Dairy Science. Von https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0022030282821656?token=714D9D28619830ABA9A75655B6BFC9F57A6F020443571D6AE6F32E4C335E7A773F5E64324E993D5BB5302D33BC447FBB&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220627122528 abgerufen

Riek, W., & Russ, A. (2019). *Waldbodenbericht Brandenburg Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden Band 2.* Potsdam,

Eberswalde: Ministerium für Ländliche Entwicklung Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg; Landesbetrieb Forst Brandenburg.

Riek, W., Russ, A., & Kühn, D. (2015). *Waldbodenbericht Brandenburg Zustand und Entwicklung der Brandenburgischen Waldböden Band 1.* Eberswalde: MLUL (Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft); Landesbetrieb Forst Brandenburg.

Schulze, G. (2013). *Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland SEA 95 Teil C. Forstliche Auswertung.* Schwerin.

Spathelf, P. (6. März 2021). MISCHENpossible. *Die Welt*, 20.

Sponagel, H., Grottenthaler, W., Hartmann, K.-J., Hartwich, R., Janetzko, P., Joisten, H., . . . Traidl, R. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung.* Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.

Thünen Institut. (2021). *Ergebnisse der Bundesweiten Waldzustandserhebung.* Abgerufen am 21. 03 2022 von https://tiwo-wze.shinyapps.io/WZE_app/

Universität Zürich. (21. 03 2022). *Methodenberatung UZH*. Von https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/zusammenhaenge/rangkorrelation.html abgerufen

Universität Zürich. (22. 03 2022). *Universität Zürich UZH Methodenberatung*. Abgerufen am 30. 08 2022 von https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss.html

Anhang

Tabelle 20 Übersicht der Waldumbauversuchsflächen

	FLÄCHE 0	FLÄCHE 1	FLÄCHE 2	FLÄCHE 3	FLÄCHE 4
TYP	Referenzfläche	Natürliche Dynamik ohne Wildeinfluss	Lichtökologisch orientierte Waldentwicklung	Wald und Wild Mikadoprinzip ohne Zaunbau	Syntropischer Waldumbau
BEHAND-LUNGSART	Durch den Förster Hochdurch-forstungsweise	Zwei Störungslöcher (700m²) Holz bleibt im Bestand	3 Lochhiebe ca. 500m² + Schwache Hochdurchforstung Holz der ersten Durchforstung bleibt im Bestand, wird zwischen den Saatreihen angeordnet Saat-/Pflanzreihen im Abstand von 2m	Starke Hochdurchforstung mit lochartigem Schwerpunkt (80-100 Efm/ha) Holz der ersten Durchforstung bleibt im Bestand um Saatgut und Jungpflanzen vor Verbiss zu schützen. Ausbringung von 3 Saatgut und Jungpflanzenmisch-ungen die jeweils in Pioniergehölze und solche mit längerem Lebenszyklus aufgeteilt sind. Saat-/ Pflanzreihen mit 2m Abstand, Abwechslung der Wertbaumarten alle 10m	Einrichtung drei verschiedener Schirmstellungen; locker, sehr licht, Kahlschlag Entnahme der LAS >20cm Restholz wird entlang der Saatreihen angeordnet, Kronenteile geschreddert und gemulcht Saatreihen alle 3, bzw. 1,5m Einbringung einzelner Arten als 2-jährig verschulte Sämlinge In jeder Reihe werden die verschiedenen Pflanz- und Saatgutkombina-tionen nacheinander angereiht, sodass sie in den unterschiedlichen Schirmstellungen

					gleich vertreten sind Gezielter Einsatz von Gräsern zwischen den Baumreihen zum regelmäßigen Mulchen für zusätzlichen. Humusaufbau
ZAUN	Nein	Ja	Ja	50/50	Ja
ZIEL	Referenz zu den anderen Flächen	Beobachtung Wuchsdynamik Mortalitätsrate, Verjüngung, Vitalität des Hauptbestan-des	Beobachtung der Entwicklung in Verbindung mit künstl. Saat mit unterschiedlichen Baum-, Strauch und Krautarten unter bevorteilten Lichtbedingungen Vergleich der unterschdl. Baumartenzusam-menstellungen und deren Entwicklung (Mortalität, Vitalität etc.)	Beobachtung der Entwicklung in Verbindung mit künstl. Saat, unterschiedlichen Baum-, Strauch und Krautarten Reduzieren des Verbisses durch künstlichen Verhau (Mikado) Auswirkung des Verhaus auf nächste Generation Vergleich gezäunt / ungezäunt Vergleich der unterschdlichen Baumartenzusam-mensetzungen	Rasche Verbesserung des Humus-/Bodenkörpers, durch Einbringung von verschiedenen Baum-Strauch- und v.A. Krautarten Beobachtung der Unterschiede der Oberbodenverän-derung durch die unterschiedlichen Licht- und mikroklimatischen Verhältnisse

Eidesstattliche Erklärung

Johann Detert Ahrend

Matrikel-Nr.: 17211215

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die aufgeführten Quellen und Hilfsmittel verwendet wurden.

Ort, Datum, Unterschrift