

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Humusformen als Indikatoren für die Zersetzergesellschaft in Zeiten des Klimawandels

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Universität Osnabrück

Teilvorhaben 2: Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2219WK41A4

Teilvorhaben 2: 2219WK41B4

Laufzeit:

01.11.2021 bis 31.12.2024 (TV 1) bzw. 15.02.2025 (TV 2)

Monat der Erstellung:

04/2025

Veröffentlichung:

24.07.2025

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht.....	1
1.	Aufgabenstellung.....	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse.....	3
a)	Arbeitspakete und Meilensteine.....	3
b)	Zusammenfassung	5
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse.....	6
1.	Material und Methoden.....	6
a)	Versuchsdesign	6
b)	Flächenauswahl	6
c)	Untersuchungsgebiet	7
d)	Humusmorphologie.....	9
e)	Probenahme und Feldaufnahmen	9
f)	Messungen am Streumaterial.....	10
g)	Messungen an gestörtem Bodenmaterial	10
h)	Messung an ungestörten Boden.....	10
i)	Meteorologische Daten und Bodenfeuchtemessungen	10
j)	Aufnahme der Zersetzergesellschaft	11
k)	Vegetationsaufnahmen	11
l)	Statistik.....	11
2.	Erzielte Ergebnisse	12
a)	Arbeitspaket 1: Flächen- und Datenmanagement	12
b)	Arbeitspaket 2: Feuchthumusformen und bodenchemische Ergebnisse	12
c)	Arbeitspaket 3: Bodenbiodiversität	22
d)	Arbeitspaket 4: Räumliche Modellierung	24
e)	Arbeitspaket 5: Transfer in die forstliche Praxis	25
3.	Schlussfolgerungen.....	27
4.	Verwertung	28
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	28
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	28
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	28
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	28
5.	Erkenntnisse von Dritten	28
6.	Veröffentlichungen	28
III.	ANHANG	31
1.	Teilvorhaben 1:.....	31
a)	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	31
b)	Bearbeitete Arbeitspakete.....	31
c)	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	32
2.	Teilvorhaben 2: Flächen- und Datenmanagement und Wissenstransfer in die Forstpraxis	33
a)	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	33
b)	Bearbeitete Arbeitspakete.....	33
c)	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	34

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Im Projekt BioFeuchtHumus ist es das Ziel, einen Beitrag zur Bewertung bodenökologischer Eigenschaften in Feuchtwäldern zu leisten. Dieses wird im Rahmen von Klimaanpassungsmaßnahmen für die Forstwirtschaft und den Waldnaturschutz zukünftig notwendig sein. Hierbei wurde vor allem die Rolle von Humusformen in wechselfeuchten Laubwäldern bisher weitgehend vernachlässigt. Die Humusaufgabe, d. h. die organischen Horizonte, die durch die Aktivität der Zersetzergesellschaft an der Schnittstelle von Vegetation und Boden entstehen, sind das Resultat aus der Zersetzung der Streu sowie Humifizierung und Mineralisation. Die organischen Auflagehorizonte sowie der oberste Mineralbodenhorizont sind für die Analyse des Abbaus organischer Substanz interessant, da hier die Auswirkungen der Akkumulation und Zersetzung von Pflanzenstreu sowie der Zersetzung oberflächennaher Wurzelreste morphologisch deutlich werden. In Europa und Deutschland sind Feuchtwälder natürlicherweise selten, da für deren Vorkommen spezifische, nur stellenweise auftretende Standortbedingungen gegeben sein müssen. Außerdem haben Landnutzungsänderungen, intensive forstliche Nutzungen und großflächige Entwässerungen in der Vergangenheit zur weiteren Abnahme von intakten Feuchtwäldern geführt. Eine weitere Gefährdung geht für Feuchtwaldökosysteme vom Klimawandel aus. Das liegt insbesondere an der Abhängigkeit von Wasser (Ssymank et al., 2024), da längere Trockenphasen infolge höherer Temperaturen in Verbindung mit den saisonalen Niederschlagsverhältnissen zu einer Veränderung der Standortbedingungen führen können. Besonders ganzjährig wasserbeeinflusste Wälder sind gefährdet.

Dem Wasserhaushalt kommt eine Schlüsselfunktion bei der Anpassung von Wäldern an zunehmende Trocken- und Hitzeereignisse zu. Bei allen waldbaulichen Eingriffen ist daher besonderes Augenmerk auf die Bewahrung bzw. Verbesserung des Waldinnenklimas und des Bodenwasserangebots zu legen, um Temperaturextreme abzufedern und die Konkurrenz um Wasser abzumildern. Standorte mit dem Bodentyp Pseudogley (Stauwasserböden) machen in Deutschland mehr als 10 % der Fläche aus und sind durch ihre Abhängigkeit vom Niederschlag und der Evapotranspiration besonders sensitiv gegenüber Klimaveränderungen, da einerseits die Versickerung und andererseits der kapillare Aufstieg aus dem Unterboden begrenzt ist (Kuratorium Boden des Jahres, 2015).

In den wechselfeuchten Wäldern des Kernmünsterlandes sind Feuchthumusformen auf Pseudogleyen weit verbreitet. Infolge des Klimawandels sind diese Standorte von zunehmender Trockenheit betroffen. Auswertungen der Bodenzustandserhebung Wald aus den 1990er Jahren konnten aufzeigen, dass sich die Jahre mit erhöhtem Wasserstress für die Vegetation häufen (Wilpert et al., 2016). Aufgrund des Klimawandels ist ein Rückgang des Bodenwasserangebotes zu erwarten.

Bodenorganismen sind essenziell für die Kohlen- und Nährstoffkreisläufe in Wäldern (Eisenhauer et al., 2024). Sie besitzen eine hohe indikatorische Funktion in Bezug auf die Baumartenwahl, die Entnahme von Biomasse, die Menge an natürlichem Totholz sowie die Befahrung von Waldböden (Klein-Raufhake et al., 2024, 2025). Klimatische und bodenphysikalische Veränderungen wie der Temperatur- und Wasserhaushalt beeinflussen die Vielfalt und Aktivität der Bodenorganismen (Pollierer et al., 2021). Durch Trockenheit verschlechtern sich die Lebensbedingungen vor allem für feuchthäutige Bodenorganismen (Regenwürmer und Kleinringelwürmer), die an der Ausbildung der Humusform wesentlichen Anteil haben.

Im Rahmen von Klimaanpassungsmaßnahmen für die Forstwirtschaft und den Waldnaturschutz wird es zukünftig nötig sein, Indikatoren zu identifizieren, die schnell und einfach aufgenommen werden können. Die Zersetzergesellschaft, also die für einen Waldbestand typischen Bodenorganismen, und die Humusform beeinflussen sich gegenseitig. Die Ausprägung der Humusform und die Artenzusammensetzung der Zersetzergesellschaft mit Regenwürmern und Kleinringelwürmern sind eng miteinander verknüpft und variieren in Abhängigkeit von Standort- und Umweltfaktoren. Die Bodenorganismen und damit die Humusform reagieren daher auf den Klimawandel.

Zukünftige Szenarien sagen eine Zunahme der Dürreintensität für Wälder über breite klimatische Gradienten voraus. Dies könnte besonders in Wäldern mit hohen wechselnden Feuchtigkeitsbedingungen problematisch sein, wie den Eichen-Hainbuchen-Wäldern in der Westfälischen Bucht in Nordrhein-Westfalen. Im Kontext der Klimafolgenforschung werden Informationen zum Wasserhaushalt benötigt, um die Auswirkungen des sich ändernden Dürrestressrisikos auf feuchte Wälder und deren Humusform-Vitalität zu bewerten. Sie sollten sowohl die zeitlichen Dynamiken als auch die räumliche Verteilung des Bodenwassergehalts umfassen. In dieser Studie untersuchten wir die Humusform und die Wasserspannung von Böden mit wechselnden Wasserhaushaltsbedingungen in feuchten Wäldern, die ein ausgeprägtes Mikrorelief und eine unterschiedliche Bodenvegetation bzw. Krautschicht aufweisen. Die spezifischen Ziele waren: (1) morphologische Merkmale feuchter Humusformen auf Pseudogley-Standorten zu identifizieren; (2) die Variabilität der Bodenfeuchtigkeit in den Bereichen mit feuchten Humusformen im Jahresverlauf zu zeigen; und (3) die Bodenorganismen sowie bo-

denchemischen Eigenschaften zu bewerten, die die Humusform je nach Bodenfeuchtigkeit am stärksten beeinflussen. Wir konzentrieren uns auf zwei feuchte Laubwaldstandorte, jeweils mit acht Intensivflächen und weiteren 56 Standorten.

Im Detail verfolgt das Projekt die folgenden übergeordneten Forschungsziele mit ihren jeweiligen Teilfragestellungen:

1. Identifizierung bodenbiologischer und morphologischer Merkmale zur Klassifizierung aerohydromorpher Waldhumusformen
 - 1.1 Für welche Wasserhaushaltsbedingungen und Zersetzergesellschaften können die aerohydromorphen Humusformen (Feuchtmull, Feuchtmoder, Feuchtrohhumus) als Indikator dienen und somit sich ändernde Wasserhaushaltsbedingungen in Zeiten des Klimawandels sichtbar machen?
 - 1.2 Welche diagnostischen Merkmale eignen sich zur Differenzierung der aerohydromorphen Humusformen?
2. Untersuchung aerohydromorpher Humusformen und der Zersetzergesellschaften in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte
 - 2.1 Welche Merkmale aerohydromorpher Humusformen entstehen unter dem Einfluss unterschiedlicher Wasserhaushaltsbedingungen, Bestockung, Vegetation in der Krautschicht, Bodentypen und Zersetzergesellschaften?
 - 2.2 Welche flächenhaften Verbreitungsmuster ergeben sich aus der räumlichen Modellierung aerohydromorpher Humusformen?
 - 2.3 Wie werden sich aerohydromorphe Humusformen in ihrer Verbreitung unter der Anwendung regionaler und nationaler Klimawandelszenarien entwickeln?
3. Maßnahmen zur Förderung der Kohlenstoffspeicherung
 - 3.1 Welche Maßnahmen können auf der Basis der Untersuchungen zu den Feuchthumusformen zur Förderung der Kohlenstoffspeicherung in Böden feuchter Waldökosysteme sowie des Anpassungspotenzials der Wälder an den Klimawandel abgeleitet werden?
 - 3.2 Wie können diese Maßnahmen in die forstliche Praxis transferiert werden?

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt begann mit einer Literatur- und Datenrecherche zu bestehendem Wissen zum Projektthema. Zeitgleich wurde in den wechselfeuchten Eichen-Hainbuchenwäldern im Süden von Münster nach geeigneten Untersuchungsflächen mit Feuchthumusformen gesucht. Für das Projekt kamen Pseudogley-Standorte mit ausgeprägtem Staunäseeinfluss in Frage. In diesem Zuge wurde auch eine Kartensammlung mit Schwerpunkt auf forstlichen und bodenkundlichen Karten angelegt, die bei der Flächenauswahl genutzt werden konnten.

Im Kernmünsterland erfolgte die Einrichtung von Probepunkten in zwei Waldgebieten. An den Standorten Inkmannsholz und Wolbecker Tiergarten kamen Bodenfeuchtemessstationen mit jeweils vier Messpunkten zum Einsatz (AP 2.3). An 56 weiteren Standorten fanden drei Beprobungen von Regen- und Kleinringelwürmern als repräsentative Gruppen der Zersetzergesellschaft statt, begleitet von bodenchemischen Analysen (AP 3). Ergänzend dazu erfolgte die Kartierung von Humusformen an weiteren Standorten in beiden Untersuchungsgebieten (AP 2.1). Vegetationsaufnahmen und bodenbiologische Untersuchungen wurden an insgesamt 64 Standorten mit Feuchthumusformen durchgeführt (AP 2.2).

Im letzten Projektjahr stand die Zusammenführung der Daten sowie der Transfer der Erkenntnisse in die Forstpraxis im Vordergrund (AP 5).

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Flächen- und Datenmanagement AP 1.1 Auswahl der Untersuchungsflächen AP 1.2 Aufbau der Datenbasis	01/2022 bis 06/2023	Zu Projektbeginn wurden für alle Teilbereiche des Projektes relevante Daten, Literatur und Karten zusammengetragen. Die Literaturrecherche umfasste u. a. bestehende wissenschaftliche Erkenntnisse zu ökologischen Zusammenhängen in Feuchtwäldern sowie bekannte Praxisempfehlungen zu Anpassungsmaßnahmen von Feuchtwäldern an den Klimawandel. Auch Daten mit laufenden sowie bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten im gleichen Untersuchungsgebiet konnten ausgetauscht werden. Für die Flächenauswahl von Bedeutung waren insbesondere bodenkundliche sowie forstliche Karten. Nach einigen Voruntersuchungen wurden planmäßig insgesamt zwei Bodenfeuchtemessstationen, acht Intensivmessstandorte sowie 56 weitere Probepunkte für die Untersuchung der Bodenfauna, der Vegetation sowie bodenchemischer Parameter eingerichtet. Dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.
AP 2 Feuchthumusformen AP 2.1 Humusformenkartierung AP 2.2 Vegetationskartierung AP 2.3 Monitoring Bodenfeuchte	07/2022 bis 12/2024	Die Humusformenkartierung wurde wie geplant durchgeführt. Zur Aufnahme der Feuchthumusformen ist ein eigenes Formblatt entstanden, mit dem es möglich ist, morphologische Eigenschaften im Feld direkt zu dokumentieren. Die Vegetationskartierung ist an den Intensivstandorten von Kolleg*innen der NABU-Naturschutzstation Münsterland durchgeführt worden. Die erhobenen Daten sind aufbereitet und liegen vor. Die Messstationen für das Monitoring der Bodenwasserspannung liefen erfolgreich an zwei Standorten im Münsterland. Auf acht Intensivstandorten wurden kontinuierlich (im 30-Minuten-Takt) die Wasserspannung und die Bodentemperatur aufgenommen. Zusätzlich waren zwei Klimastationen installiert, um Wetterdaten (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Luftdruck, Bestandes-Niederschlagsmenge, Windrichtung) aufzunehmen. Insgesamt wurden über zwei Jahre Daten aufgenommen. Dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.
AP 3 Bodenbiodiversität AP 3.1 Untersuchung der Regenwürmer AP 3.2 Untersuchung der Enchyträen AP 3.3 Analyse bodenchemischer Parameter AP 3.4 Auswertung der Labordaten	07/2022 bis 06/2024	Die Regenwürmer sind mit Hilfe einer Senflösung und anschließender Handauslese erfasst worden. Die nachfolgende Bestimmung des Artenspektrums, der Biomasse und Abundanz ist fertiggestellt. Die Proben zur Bestimmung der Enchyträen wurden im Frühjahr und Herbst 2023 zusammen mit dem IFAB entnommen. Im Herbst 2023 konnten die Probenahmen abgeschlossen werden. Es wurden somit 56 Standorte plus die acht Intensivstandorte (3-fach) beprobt. Die Enchyträen sind im Labor vom IFAB extrahiert und bestimmt worden. Die ausgewerteten Daten liegen vor. An den Intensivstandorten sowie an den 56 weiteren Standorten sind Proben aus dem Mineralboden (drei Tiefen: 0-5, 5-10, 10-15 cm) und von der organischen Auflage nach dem Schema der BZE III (Satellitensystem) entnommen worden. Diese wurden im Labor gewogen, auf 2 mm gesiebt und auf die Parameter C_{org}, N_t und den pH-Wert untersucht. Die Messungen zu den bodenchemischen Parametern wurden im Frühjahr 2024 beendet. Die vorliegenden Messdaten sind ausgewertet und liegen vor. Dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.
AP 4 Räumliche Modellierung AP 4.1: Datenanalyse	07/2023 bis 12/2024	Die Datenanalyse, die Einarbeitung in die Thematik des Digital Soil Mapping sowie die Auswertung der Zusammenhänge zwischen den Geländedaten und Labordaten wurden in der zweiten Jahreshälfte 2023 begonnen. Die Räumliche Modellierung wurde im Herbst 2024 beendet.

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 4.2: Räumliche Modellierung/Upscaling		Die Ergebnisse liegen vor. Dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.
AP 5 Transfer in die forstliche Praxis AP 5.1 Öffentlichkeitsarbeit AP 5.2 Vermittlung der Projektergebnisse	07/2022 bis 02/2025	Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Veranstaltungen durchgeführt, um die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse an die forstliche Praxis zu vermitteln. Dabei handelte es sich u. a. um eine Exkursion, eine Fortbildung im Forstlichen Bildungszentrum von Wald und Holz NRW in Arnsberg und eine Abschlusstagung in Münster. Das Projekt wurde zudem bei weiteren Tagungen vorgestellt, u. a. beim Waldklimafondskongress 2022 in Göttingen, der DBG-Tagung 2022 in Trier und 2023 in Halle und bei der IUFRO 2024 in Stockholm. Zudem wurde eine Broschüre zu forstlichen Handlungsempfehlungen erstellt. Diese soll der Forstpraxis einen Überblick über Feuchtwaldökosysteme mit besonderem Fokus auf bodenökologische Prozesse geben und Maßnahmen zur Erhaltung von Feuchtwäldern im Klimawandel aufzeigen. Außerdem wurden Beiträge aus dem Projekt in für die Forstpraxis relevanten Zeitschriften und Plattformen (AFZ – Der Wald, Waldwissen.net) publiziert. Im Zuge der Tagungen wurden zudem mehrere DBG Mitteilungen veröffentlicht (s. Kapitel 4: Veröffentlichungen). Dieses Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Halbzeit der Periode zur Datenerhebung im Gelände und Labor	06/2023	Dieser Meilenstein wurde erfolgreich abgeschlossen.
M 2 Abschluss der Gelände- und Laborarbeiten	06/2024	Dieser Meilenstein wurde erfolgreich abgeschlossen.
M 3 Projektende	02/2025	Dieser Meilenstein wurde erfolgreich abgeschlossen.

b) Zusammenfassung

Im Projekt „BioFeuchtHumus“ wurde die räumliche und zeitliche Variabilität des Wassergehaltes im Boden und deren Einfluss auf Humusformen in Laubwäldern, insbesondere im Kontext des Klimawandels, untersucht. Waldökosysteme sind zunehmend durch den Klimawandel bedroht, was ein tieferes Verständnis der Bodendynamik und ihrer Auswirkungen auf die organische Auflage erfordert. Hierbei wurde untersucht, wie Bodenfeuchtigkeitsbedingungen und das Mikrorelief die Mächtigkeit und die Zusammensetzung der organischen Auflagen sowie die Ausprägung verschiedener Feuchthumusformen beeinflussen.

Die Indikatorfunktion von Humusformen kann einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung von Monitoringmethoden zur Bewertung ökologischer Bodeneigenschaften in feuchten Waldbeständen leisten. Feuchthumusformen treten in Eichenmischwäldern mit dem Bodentyp Pseudogley in den Niederungen Nordwestdeutschlands auf und sind besonders sensitiv gegenüber dem Klimawandel, da sie stark von Niederschlägen und Evapotranspiration abhängig sind. Sensoren, die die Bodenwasserspannung messen, wurden daher direkt an der Grenze zwischen Mineralboden und organischen Horizonten in den ausgewählten Waldgebieten installiert, um den Einfluss von Wasser in den organischen Horizonten aufzuzeichnen.

Der Wasserhaushalt der Pseudogley-Standorte im Münsterland zeigte in den Jahren 2022 bis 2024 einen typischen jahreszeitlichen Verlauf zwischen Trockenheit und Wassersättigung im Oberboden. Die Standorte waren daher ideal für die Untersuchung der morphologischen, chemischen und biologischen Eigenschaften der Feuchthumusformen geeignet. Anhand von Untersuchungen in den Feuchtwäldern des Münsterlandes diente die morphologische Charakterisierung der Feuchthumusformen als Grundlage für die erfolgreiche Überprüfung und Erweiterung einer neuen Humusformensystematik, wie sie in der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 6 (AG Boden, 2024) beschrieben ist. Die Besonderheit der Feucht-Mull-Humusformen im Untersuchungsgebiet ist im Vergleich zu aeromorphen Mull-Humusformen das Fehlen tiefgrabender Regenwürmer. Die Durchmischung des humosen Mineralbodens ist somit an diesen Feuchtwald-Standorten vor allem die Leistung endogäischer Regenwürmer sowie der epigäischen Art *Lumbricus rubellus*. Die jahreszeitliche Dynamik der Kleinringelwürmer sowie deren Tiefenverteilung im Humusprofil stehen in enger Abhängigkeit zum Wasserhaushalt der Feuchthumusformen auf diesen wechselfeuchten Standorten. Auch der Einfluss des Mikroreliefs konnte aufgezeigt werden. In den verschlossenen Gräben und kleinen Senken des Gebietes kommt es durch längere Wassersättigung aufgrund der anaeroben Bedingungen zu einem verzögerten und verringerten Abbau des organischen Materials, und die Mächtigkeit der O-Lagen nimmt zu.

Im Zuge des Klimawandels wird die zukünftig häufigere Trockenheit auf den Stauwasserböden des Münsterlandes zu einer geringeren Verbreitung von Feuchthumusformen führen, da der prägende Einflussfaktor Wasser nicht in bisherigem Maße erhalten bleibt. Für das Fortbestehen des Lebensraums Feuchtwald-Ökosystem, mit der Eigenschaft viel Kohlenstoff zu speichern und eine hohe Bodenbiodiversität vor allem durch eine hohe kleinräumige Variabilität unterschiedlich feuchter Mikrostandorte zu erzeugen, ist es somit unabdingbar, Optimierungen des Wasserhaushaltes durchzuführen.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Material und Methoden

a) Versuchsdesign

Das Untersuchungsdesign ist in drei verschiedene Standortkategorien eingeteilt (Abbildung 1). Dabei wurden in der ersten Kategorie acht Standorte für das Intensivmonitoring der Bodenfeuchte (plus Analysen zur Bodenbiodiversität und Kartierung der Feuchthumusformen) etabliert. 56 weitere Standorte wurden für Analysen zu Bodenorganismen und bodenchemischen Untersuchungen (plus Kartierung von Feuchthumusformen) ausgewählt. In den verschiedenen Standortkategorien werden sowohl die Lage im Mikorelief als auch die der Feuchthumusformen möglichst repräsentativ abgebildet.

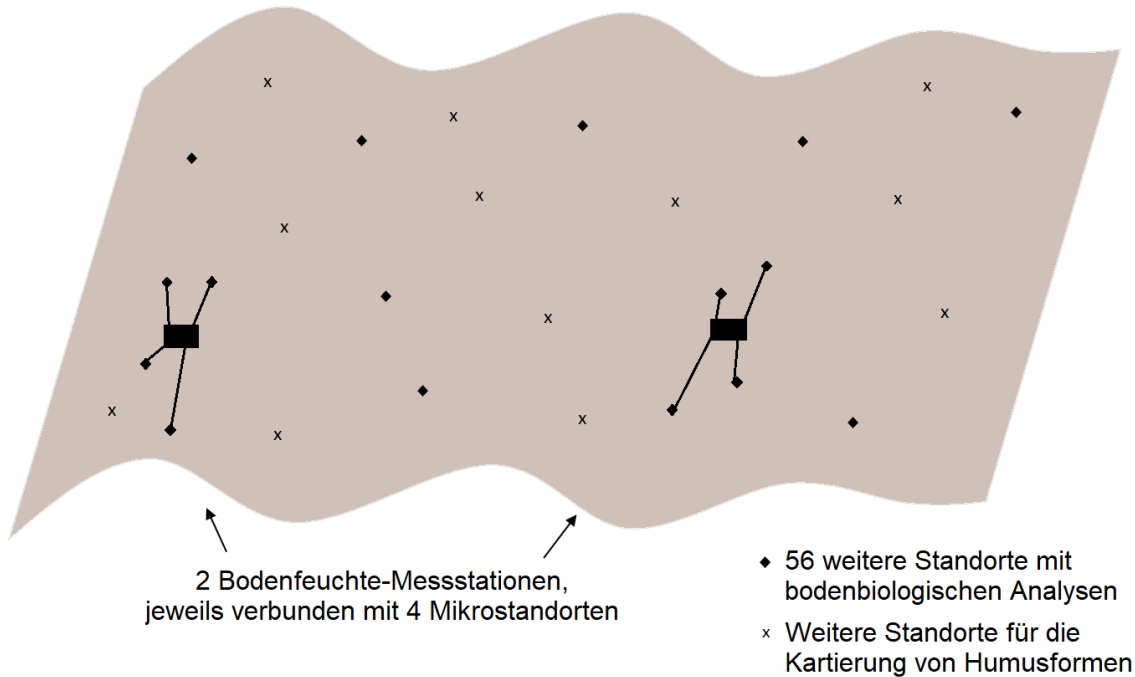


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Designs mit drei Standortkategorien, die unterschiedlich intensiv untersucht wurden

b) Flächenauswahl

Zur Flächenauswahl erfolgte die Auswertung digitaler Karten (u. a. historische Karten, DTK25 und BK5 zur forstlichen Standortserkundung) mit Informationen über:

- Bodentypen
- Ausgangsgesteine
- Bodenarten
- Grundwasser- und Staunässeverhältnisse (SW4)
- Nährstoffhaushalt
- Humusformen
- Bestandesdaten u. a. Hauptbaumart, Baumalter etc.

Außerdem standen Daten wie Stau- und GW-Pegelmessstellen aus dem Projekt „Fit für den Klimawandel“ (Laufzeit 2014-2018) zur Verfügung (Linnemann et al., 2018). Im Gelände wurden die Standorte mit starker Staunässe aufgesucht (Tabelle 1). Staunässe tritt auf, wenn eine wasserundurchlässige Zone im Boden (Staukörper) die Versickerung des Niederschlagswassers hemmt und somit zur Vernässung des darüber liegenden Bereiches (Stauwasserleiter) führt. Im Gegensatz zu Grundwasser wird Staunässe im Laufe der Vegetationszeit mehr oder weniger vollständig verbraucht (Schrey, 2014). Diese Staunässe-beeinflussten Standorte lagen in den meisten Fällen in verschlossenen Gräben oder Senken (Abbildung 2).

Tabelle 1: Staunässe aus der Bodenkarte BK50 von Nordrhein-Westfalen (Schrey, 2014)

Kurzzeichen	Staunässe
SW1	sehr schwache Staunässe
SW2	schwache Staunässe
SW3	mittlere Staunässe
SW4	starke Staunässe
SW5	sehr starke Staunässe

Legende

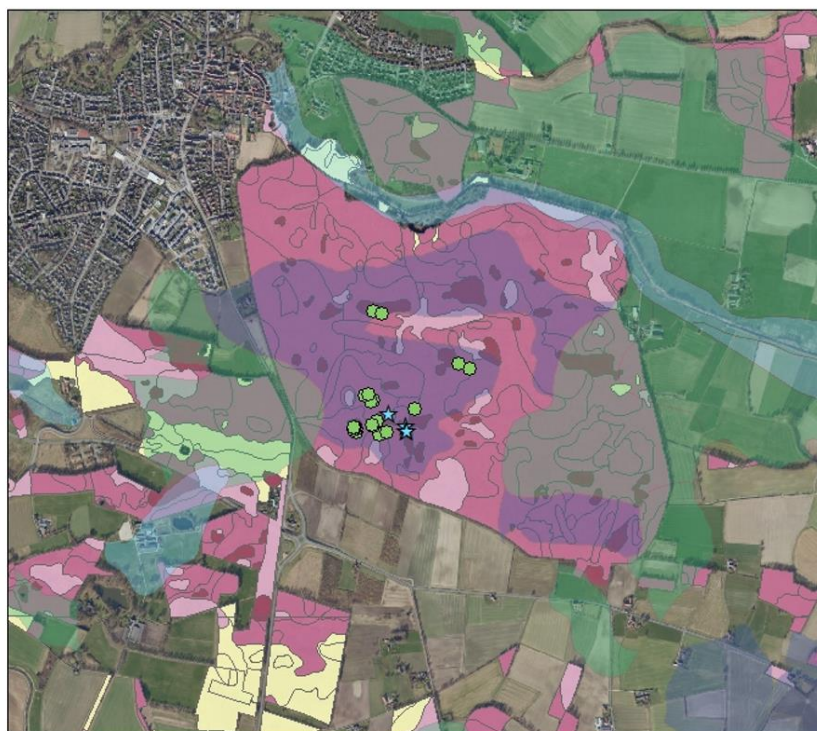
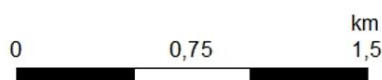
- starke Staunässe (SW4)
- Untersuchungsstandort

Standort

- ★ Intensivstandort

Bodenhaupttypen

- Gley-Pseudogley
- Nassgley
- Pseudogley
- Pseudogley-Gley



BK5 zur Forstlichen Standorterkundung von NRW
Koordinatensystem: ETRS 1989 UTM Zone 32N
Projektion: Transverse Mercator

Abbildung 2: Darstellung der Staunässe (SW4), Untersuchungs- und Intensivstandorte sowie die Bodenhaupttypen im Wolbecker Tiergarten (Karte erstellt mit ArcMAP, esri, 2024).

c) Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist als Teil des Kernmünsterlandes geologisch der Münsterländer Bucht zuzuordnen, die wiederum Teil der Norddeutschen Tiefebene ist. Zu Beginn der Kreidezeit (vor ca. 145 Mio. – 65 Mio. Jahren) kam es zu einer transgressiven Phase, während der große Teile des heutigen Deutschlands von Wasser überflutet wurden (Meschede, 2015). Im Zuge dieses Meeresspiegelanstiegs bildete sich das Niedersächsische Becken, das lediglich über schmale und flache Pforten mit dem offenen Meer verbunden war. Das Münsterland befand sich zu dieser Zeit als Teil der Rheinischen Masse oberhalb des Meeresspiegels. Während der Oberen Kreide schritt diese transgressive Phase soweit fort, dass das Münsterland vollständig von Meer bedeckt wurde, was sich anhand der abgelagerten, vorwiegend mergeligen und kalkigen Sedimente widerspiegelt (Drozdowski & Hilden, 1995). Zeitweise lag der Meeresspiegel des Kreidemeeres 250 m über dem heutigen (Oschmann, 2016). Während die Unterkreide von Dehnungen geprägt war, kam es in der Oberkreide zu kompressiven Bewegungen, die mit der Alpidischen Orogenese einhergingen (Meschede, 2015). Das Ferneinwirken dieses Gebirgsbildungsprozesses führte zu Störungen und Überschiebungen. Infolgedessen sank die Münsterland-Scholle ab, wodurch sich mächtige kreidezeitliche Sedimentfolgen ablageren konnten, die eine eigene tektonische Einheit bilden (Drozdowski & Hilden, 1995; Meschede, 2015). Im Norden der Münsterländer Bucht stehen Sedimente der Unteren Kreide an sowie Gesteine des Juras, der Trias und des Zechsteins, die Richtung Süden auskeilen, sodass im südlichen Teil, auf dem Gebiet des Inkmannsholzes und des Wolbecker Tiergartens, ausschließlich Sedimente der Oberen Kreide im Untergrund vorzufinden sind, die flach nach Norden einfallen. Diese bilden gemeinsam mit den im Norden anstehenden Gesteinen eine Muldenstruktur (Drozdowski & Hilden, 1995). Südlich von Münster lagern mit einer Mächtigkeit von mehreren hundert Metern karbonatische Sedimente der Oberkreide, die bis kurz unter die Oberfläche reichen und stellenweise an der Oberfläche auftreten (Saloustros & Speetzen, 1999).

Im Untersuchungsgebiet folgen auf den Sedimenten der Oberkreide quartäre Ablagerungen, die den größten Teil des Umlands von Münster bedecken (Skupin et al., 1993). Während des Quartärs sank die Temperatur stark und das Skandinavische Inlandeis breitete sich aus. Während der Saale-Kaltzeit reichten die Gletschermassen bis über das Gebiet des Münsterlandes hinaus (Meschede, 2015). Die Ausbreitung der vorrückenden Eismassen ist durch das flächendeckende Auftreten von Geschiebelehm und Geschieben in Form von Feuersteinen oder aus Skandinavien stammenden Magmatiten, die vom Eis transportiert wurden, gut nachvollziehbar. Stellenweise kam es auch zu äolischen Ablagerungen und beim Rückgang des Eises zu einer schmelzwasserbedingten, fluviatilen Sedimentation von Sand und Kies. An den Intensivstandorten im Inkmannsholz lagern quartäre Sedimente mit einer Mächtigkeit von ungefähr 3,5 m über Kalk- und Mergelsteinen des Obercampaniums. Die Mächtigkeit der quartären Ablagerungen im Untersuchungsgebiet im Wolbecker Tiergarten beträgt ungefähr 4,5 m. Auch hier lagern die quartären Sedimente auf Gesteinen, die während des Obercampaniums sedimentierten.

Die tonigen Geschiebelehme, die Teil der Grundmoränen sind, bilden den stauenden Sd-Horizont, während die darüber lagernden Decksande den stauwasserleitenden Sw-Horizont darstellen, was zu primären Pseudogleyen führt (Abbildung 3). Während der Saale-Kaltzeit transportierten die ausbreitenden Eismassen diese Geschiebemergel, die sich an den untersuchten Standorten ablagerten (Meschede, 2015). Die glaziale Sedimentdecke weist einen hohen Tonanteil auf, der aufgrund seiner geringen Wasserdurchlässigkeit einen Staukörper bildet. Dieser verhindert die Infiltration des Niederschlags in tiefere Horizonte und schränkt den Austausch mit dem Grundwasser stark ein (Zepp, 1995; Blume et al., 2014). Überlagert wird der Staukörper von Sedimenten mit hohem Sandanteil, wodurch der stauwasserleitende Sw-Horizont entsteht. Die Marmorierung des Staukörpers und der Stauzone, bestehend aus gebleichten Bereichen und Rostflecken, deutet auf wechselnde Wasserstände hin und stellt typische Redoxmerkmale dar, die unter dem Einfluss von Stauwasser und wechselnden Sauerstoffverhältnissen entstehen (Dorau et al., 2020).



Abbildung 3: Pseudogley im Wolbecker Tiergarten (T. Frank, 2023).

Die Bodenverhältnisse kennzeichnen die Untersuchungsgebiete als Pseudogley-Standorte. Charakteristisch für Pseudogleye sind die durch Stauwassereinfluss bedingten Wechsel zwischen nassen und trockenen Phasen, was zu einer größeren Spannweite in der Wasserbindungsintensität und den ökologisch relevanten Bodenwassergehalten führt. In Trockenphasen, besonders im Sommer, neigen sowohl der Ah-Horizont als auch der stauwasserleitende Horizont aufgrund des eingeschränkten Wasserspeicherraums zur Austrocknung. Gleichzeitig verhindert der Staukörper aufgrund seiner Textur und Porendiskontinuität den kapillaren Aufstieg von Wasser aus tieferen Schichten in den Wurzelraum oder den Ah-Horizont. Da der Staukörper die Wassernachlieferung hemmt, verweilt das Bodenwasser im Vergleich zu anderen Böden länger, was signifikante Änderungen im Wasserhaushalt im Jahresverlauf bewirkt (Dorau et al., 2020). So wechseln sich trockene Phasen mit Phasen zunehmender Wassergehalte ab, die zu wiederkehrenden Wassersättigungen führen, die teils bis an die Oberfläche reichen.

Die beiden untersuchten Waldstandorte Inkmannsholz und Wolbecker Tiergarten befinden sich im Kernmünsterland (Abbildung 4). Das Gebiet Inkmannsholz, als Teilstück des Waldgebiets Davert, liegt südlich und der Wolbecker Tiergarten südöstlich der Stadt Münster. Die Waldgebiete Inkmannsholz und Wolbecker Tiergarten sind naturnahe Waldstücke im Kernmünsterland, deren Baumbestand sich größtenteils aus Stieleichen, Hainbuchen und Rotbuchen, zusammensetzt. Es handelt sich um wechselfeuchte Laubwaldökosysteme, die größtenteils forstwirtschaftlich genutzt werden. Zusätzlich sind die Standorte als FFH- und Naturschutzgebiet ausgewiesen. Im Zuge der historischen Nutzung wurde umfangreich in den Wasserhaushalt der Ökosysteme eingegriffen, um eine bessere Zugänglichkeit der stark vernässten Bereiche und eine ökonomisch starke Forstwirtschaft zu bewirken. Seit Beginn des 19. Jahrhunderts dienten hierfür großflächig angelegte Grabensysteme zur Entwässerung. Dies führte zu Veränderungen der Standortbedingungen, insbesondere zu trockeneren Verhältnissen in den zuvor wechselfeuchten Böden. Im Rahmen von Renaturierungsmaßnahmen wurden und werden diese Grabensysteme sukzessive rückgebaut. Durch den in Folge der Maßnahmen erreichten naturnäheren Zustand wird den Anforderungen des Standorts als wechselfeuchtes Waldökosystem nachgekommen (Linnemann et al., 2018).

Die beiden untersuchten Waldstandorte Inkmannsholz und Wolbecker Tiergarten sind naturnahe Waldstücke im Kernmünsterland, deren Baumbestand sich größtenteils aus Stieleichen, Hainbuchen und Rotbuchen, zusammensetzt. Es handelt sich um wechselfeuchte Laubwaldökosysteme, die größtenteils forstwirtschaftlich genutzt werden. Zusätzlich sind die Standorte als FFH- und Naturschutzgebiet ausgewiesen. Im Zuge der historischen Nutzung wurde umfangreich in den Wasserhaushalt der Ökosysteme eingegriffen, um eine bessere Zugänglichkeit der stark vernässten Bereiche und eine ökonomisch starke Forstwirtschaft zu bewirken. Seit Beginn des 19. Jahrhunderts dienten hierfür großflächig angelegte Grabensysteme zur Entwässerung. Dies führte zu Veränderungen der Standortbedingungen, insbesondere zu trockeneren Verhältnissen in den zuvor wechselfeuchten Böden. Im Rahmen von Renaturierungsmaßnahmen wurden und werden diese Grabensysteme sukzessive rückgebaut. Durch den in Folge der Maßnahmen erreichten naturnäheren Zustand wird den Anforderungen des Standorts als wechselfeuchtes Waldökosystem nachgekommen (Linnemann et al., 2018).

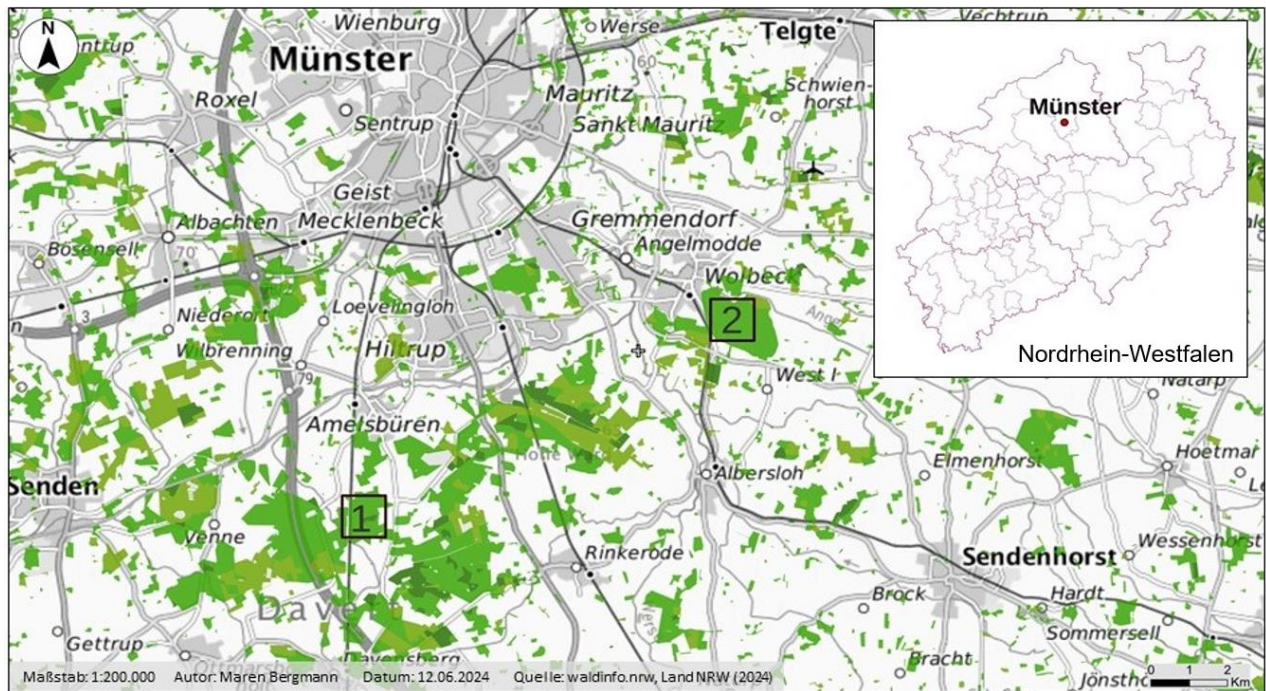


Abbildung 4: Lage der Untersuchungsflächen in Nordrhein-Westfalen. 1. Inkmannsholz (Davert) 2. Wolbecker Tiergarten. Die Waldbedeckung ist in grün dargestellt (Karte M. Bergmann, 2024).

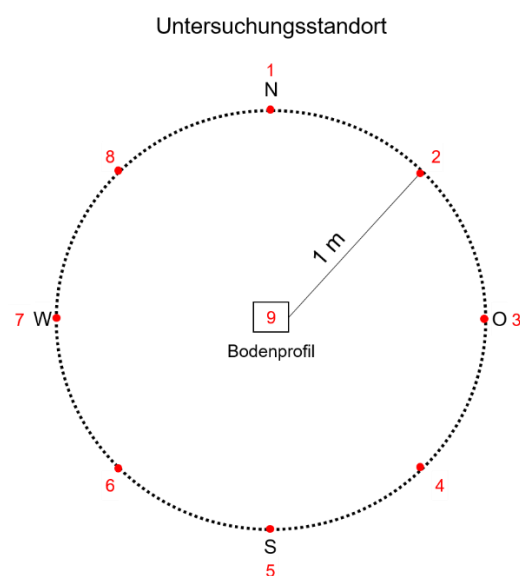
Klima

Klimatisch können das Inkmannsholz und der Wolbecker Tiergarten als feucht gemäßigt charakterisiert werden. Die Untersuchungsgebiete liegen im Übergangsbereich zwischen einem maritimen und einem kontinentalen Klima. Die Winter sind verglichen mit bundesweiten Maßstäben als mild anzusehen. Hinsichtlich der Niederschlagsmenge gibt es keine signifikanten Abweichungen von anderen Regionen Deutschlands. Dennoch liegt die Anzahl der Niederschläge in dieser Region über dem Bundesdurchschnitt, während die jährliche Sonnenscheindauer geringer ist. Insgesamt wurde im Zeitraum von 1991-2020 im Jahresschnitt eine Temperatur von 10,4 C° gemessen, bei einer durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge von 763,4 mm/a und einer durchschnittlichen Sonnenscheindauer von 1685,0 h/a (Deutscher Wetterdienst, 2023).

d) Humusmorphologie

Die Humusformen werden in Anlehnung an AG Boden (2024) und Wellbrock et al. (2022) aufgenommen. Zur genaueren Aufnahme der Feuchthumusformen wurde ein eigenes Formblatt erstellt (s. Anhang).

e) Probenahme und Feldaufnahmen



Jeder Standort wurde im Satellitenverfahren beprobt (Abbildung 5). Am Mittelpunkt der Satelliten wurde eine Bohrstocksondierung durchgeführt. Hierbei wurden die Bodenart bestimmt und die Horizontmächtigkeiten abgegrenzt. Insbesondere die Bodenart, Hydromorphiemerkmale und der Beginn des Sd-Horizontes der im Gebiet auftretenden Pseudogleye wurde detailliert aufgenommen, um später Rückschlüsse auf die Bodenfeuchte ziehen zu können. Die Probenahme der organischen Auflage erfolgte mit Hilfe eines Stechrahmens. Hierbei wurde ein kleiner Stechrahmen mit den Maßen 15x15 cm an Moderstandorten und ein großer Stechrahmen mit den Maßen 30x30 cm an den Mullstandorten verwendet. Die Innenfläche des jeweils verwendeten Stechrahmens ist in cm² anzugeben. Dies entspricht 225 cm² für den kleinen Stechrahmen und 900 cm² für den großen Stechrahmen (Wellbrock et al., 2022). Unterhalb der organischen Auflage wurde in den Tiefen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm Material des mineralischen Bodens entnommen. Aus den Proben der Satelliten 1 und 5 sowie 3 und 7 wurden Mischproben erstellt. Der Satellit 9 (Mittelpunkt) wurde nicht mit anderen Proben gemischt.

Abbildung 5: Darstellung des durchgeführten Satellitenverfahrens in Anlehnung an Wellbrock et al. (2022).

f) Messungen am Streumaterial

Die Streuproben wurden zunächst im feuchten Zustand gewogen, anschließend in Aluschalen luftgetrocknet und im trockenen Zustand nochmals gewogen, um den Humusvorrat zu bestimmen. Danach erfolgte das Sieben der Proben (nacheinander mit einem 20 mm-, einem 4 mm- und einem 2 mm-Sieb) und das feine Vermahlen mit einer Analysenmühle. Abschließend wurden die fein gemahlenen Proben auf ihren Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt analysiert, wofür ein C/S-Analysator (Eltra CS 500) verwendet wurde.

g) Messungen an gestörtem Bodenmaterial

Das gestörte Bodenmaterial wurde luftgetrocknet und auf ≤ 2 mm gesiebt. Der pH-Wert wurde in einer 0,01 mol/l CaCl_2 -Lösung (1:2,5 Boden: CaCl_2 -Lösung) gemäß DIN ISO 11260 2018 gemessen. Die Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff ermittelte man mithilfe eines C/S-Analysator (Eltra CS 500) nach DIN ISO 10694 (1995) und DIN ISO 13878 (1998). Das Vorhandensein von anorganischem Kohlenstoff wurde über die CO_2 -Freisetzung nach Zugabe von 10 % HCl geprüft.

h) Messung an ungestörten Boden

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurden Volumenproben mit drei Stechzylindern je 100 cm^3 nach DIN 19672-1 in denselben Tiefenstufen wie bei der Kohlenstoffgehaltsbestimmung entnommen. Die Proben wurden in Petrischalen gefüllt, im feuchten Zustand gewogen, anschließend 24 Stunden bei 105°C getrocknet und erneut ausgewogen, bis keine Gewichtsänderung mehr feststellbar war (Blume, 2010).

Anhand des Trockengewichtes und des Stechzylindervolumens ist zunächst die Trockenrohdichte in g/cm^3 berechnet worden. Zusätzlich wurde die gemessene Kohlenstoffkonzentration in Prozent in den Kohlenstoffgehalt in g/kg umgerechnet. Für die Berechnung des Kohlenstoffvorrats im Mineralboden wurde der Skelettanteil an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da er sowohl im Wolbecker Tiergarten als auch im Inkmannsholz kaum vorhanden ist. Letztlich ergibt sich daraus folgende Formel:

$$\text{OC} = \rho_{\text{TRD}} * z * C$$

wobei: OC = Bodenkohlenstoffvorrat in t C ha^{-1} , ρ_{TRD} = Trockenrohdichte der Tiefenstufe in g/cm^3 , z = Mächtigkeit der Tiefenstufe in dm, C = organische Kohlenstoffkonzentration in g/kg .

Der Kohlenstoffvorrat der organischen Auflage wurde nach der folgenden Formel berechnet:

$$\text{C-stock}_{\text{O-lay}} = \text{C-conc}_{\text{O-lay}} * \text{weight}$$

wobei: $\text{C-stock}_{\text{O-lay}}$ = Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage in g/m^2 , $\text{C-conc}_{\text{O-lay}}$ = organischer Kohlenstoffgehalt in der organischen Auflage in g/kg , weight = Trockengewicht der organischen Auflage in kg m^2 (Wellbrock et al., 2022).

i) Meteorologische Daten und Bodenfeuchtemessungen



Abbildung 6: Bodenfeuchtemessstation mit Klimastation im Untersuchungsgebiet Wolbecker Tiergarten (Foto: T. Frank, Juni 2022).

An den ausgewählten Intensivstandorten wurde im Frühjahr 2022 eine Station zur Messung von Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Luftdruck sowie des Matrixpotentials und der Bodentemperatur (Abbildung 6) installiert. Lufttemperatur und Niederschlag wurden automatisch alle 30 Minuten über einen Wettertransmitter (Vaisala WXT536) gemessen. Sensoren zur Messung des Matrixpotentials wurden in drei verschiedenen Bodentiefen installiert, um Ergebnisse zur Bodenfeuchtigkeit und -temperatur direkt an der Schnittstelle zwischen mineralischem Boden und organischen Bodenhorizonten sowie in der Hauptwurzelzone zu erhalten. Die Tensiomarks wurden in den drei Bodentiefen, 10 cm, 20 cm und 30 cm (von der GOF), verwendet. Der pF-Wert gibt an mit welcher Kraft das Wasser gegen die Schwerkraft im Boden gehalten wird. Ein niedriger pF-Wert zeigt Wassersättigung an, während ein hoher pF-Wert Trockenheit signalisiert (Blume et al., 2014).

j) Aufnahme der Zersetzergesellschaft



Abbildung 7: Probenahme zur Erfassung der Regenwürmer mittels Senfemulsion in einem Metallring ($0,33 \text{ m}^2$) mit anschließender Handauslese eines spatentiefen Bodenblocks ($0,03 \text{ m}^2$) innerhalb der Senfextraktionsfläche (Foto: T. Frank, Mai 2023).

Das Projekt beinhaltete Bestandsaufnahmen der Regenwürmer und Kleinringelwürmer einmalig an 56 Standorten mit Feuchthumusformen und in zeitlicher Wiederholung (3x) an acht Intensivstandorten. Die Untersuchungsparameter umfassten qualitative und quantitative Parameter wie Artenspektrum und Siedlungsdichte beider Tiergruppen sowie Biomasse der Regenwürmer und Vertikalverteilung der Kleinringelwürmer. Auch die Strategie- und Lebensformtypen sowie die Zeigerwerte wurden ermittelt. Die Erfassung der Regenwürmer erfolgte über eine Austreibung aus dem Boden mittels einer Senfsuspension auf $0,33 \text{ m}^2$ (Fründ & Jordan, 2003) mit anschließender Handauslese eines spatentiefen Bodenblocks ($0,03 \text{ m}^2$) innerhalb der Senfextraktionsfläche (Abbildung 7) (Ehrmann & Babel, 1991). Für die Erfassung der Kleinringelwürmer wurden mit einem Stechrohr Bodenproben (Auflage + Mineralboden) bis zu einer Tiefe von maximal 21 cm entnommen und vertikal in 4-5 Teilproben unterteilt. Im Labor wurden die Kleinringelwürmer extrahiert.

k) Vegetationsaufnahmen

Die Vegetationsaufnahmen wurden an 64 Standorten mit Feuchthumusformen sowie an vier trockeneren Referenzstandorten mit aeromorphen Humusformen durchgeführt. Dies erfolgte zwischen Mai und August 2023 in Anlehnung an Braun-Blanquet auf 25 m^2 großen quadratischen Aufnahmeflächen.

l) Statistik

Die statistische Analyse wurde mit der Statistiksoftware R Version 4.3.2 (R Core Team, 2024) durchgeführt. Basierend auf der Residualanalyse und dem Shapiro-Wilk-Test waren die pH-Werte an den Forschungsstandorten nicht normalverteilt. Auf Grundlage dieser Annahmen wurde eine Analyse des Kruskal-Wallis-Rangsummentests durchgeführt, gefolgt vom Dunn-Test (Post-hoc-Analyse). Anschließend wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Alle Werte wurden durch den Vergleich der Mittelwerte der Faktorstufen Humusform bewertet (Tukey-Test). Das Signifikanzniveau aller Tests lag bei $\alpha = 5 \%$ (Schabenberger & Pierce, 2010; Reimann et al., 2011). Für die grafische Darstellung wurden Box-Whisker-Diagramme gewählt, die den Median (mittlere Linie), das 25. und 75. Perzentil (untere/obere Grenze der Box), das 95. und 5. Perzentil (Whiskers), das 1. und 99. Perzentil (untere/obere Linie), Ausreißer (graue Punkte) und den Mittelwert (schwarze Punkte) anzeigen (McGill et al., 1978).

Ein Ziel war es, die primären Umweltfaktoren für die Bildung von Feuchthumusformen unter Pseudogleyen zu identifizieren. Es wurden eine Reihe von Kovariaten verwendet, die das Vorkommen in kleinen Senken charakterisierten. Diese Variablen umfassten Bodenparameter und Bodenvegetation. Die Kovariaten wurden auf Kollinearität mittels Korrelationsanalyse, Varianzinflationsfaktoren und Toleranzlevel geprüft.

2. Erzielte Ergebnisse

a) Arbeitspaket 1: Flächen- und Datenmanagement

Zu Projektbeginn wurden für alle Teilbereiche des Projektes relevante Daten, Literatur und Karten zusammengetragen. Da es sowohl räumliche als auch inhaltliche Überschneidungen gab, fand mit den beiden Projekten Waldgürtel MS - Fit für den Klimawandel und BiCO₂, an denen ebenfalls Wald und Holz NRW sowie die NABU-Naturschutzstation Münsterland e. V. beteiligt waren, ein Datenaustausch statt. Außerdem wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Diese umfasste wissenschaftliche Literatur zu den Zusammenhängen zwischen Humusformen, der Bodenfauna und weiteren Parametern in Feuchtwäldern sowie die Auswirkungen des Klimawandels auf Feuchtwälder und die Rolle dieser bei der Kohlenstoffspeicherung. Zudem wurde auch nach Broschüren, Strategien, Praxishilfen, Richtlinien etc. gesucht, die Empfehlungen zum forstlichen Umgang mit Feuchtwäldern, insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels, geben.

Für die Flächenauswahl waren vor allem bodenkundliche (z. B. BK 5) und forstliche Standortkarten relevant. Aus den Karten der Forsteinrichtung von Wald und Holz NRW ließen sich Daten zu Haupt- und Nebenbaumarten und deren Alter ableiten. Außerdem verfügt Wald und Holz NRW über Informationen zur Lage von Wildnisentwicklungsgebieten, in denen sich Teile des Untersuchungsgebietes befinden, sowie weitere Informationen zu den Waldgebieten. Gesucht wurden Pseudogley-Standorte in wechselfeuchten Eichen-Hainbuchenwäldern mit ausgeprägter Staunässe. Das Vorkommen von Feuchthumusformen ist auf einen ausreichenden Wassereinfluss angewiesen. Hierzu wurden neben der Forstbetriebskarte insbesondere diverse Bodenkarten ausgewertet.

Die Suche nach geeigneten Untersuchungsflächen mit Feuchthumusformen und Staunässemerkmalen bis in die organische Auflage gestaltete sich dabei schwerer als angenommen. Dies lag u. a. an den Dürrejahren seit 2018, die auch in den Feuchtwäldern des Münsterlandes erhebliche Auswirkungen hatten. Waldflächen, die laut Karten möglicherweise geeignet schienen, wurden im Gelände beprobt und insbesondere die Humusform wurde stichprobenartig untersucht. Mit dem Inkmannsholz als Teil der Davert und dem Wolbecker Tiergarten gelang die Auswahl zweier geeigneter Gebiete. In diesen Gebieten wurden die beiden Bodenfeuchtemessstationen, acht Intensivmessstellen sowie 56 weitere Probepunkte installiert und entsprechend markiert.

Alle Untersuchungsflächen befinden sich im Staatswald. Das Teilprojekt 2 übernahm deshalb alle notwendigen Absprachen und die Regelung der Genehmigungsverfahren mit dem zuständigen Regionalforstamt und der Unteren Naturschutzbehörde.

b) Arbeitspaket 2: Feuchthumusformen und bodenchemische Ergebnisse

Die zukünftige Baumartenauswahl wird u. a. durch das verfügbare Wasserangebot zum Wachstum bestimmt (Becker et al., 2022). Nach dem seit 1960 beobachteten Temperaturanstieg (Pluess et al., 2022) und einschlägigen Klimaszenarien ist davon auszugehen, dass die pflanzenverfügbare Wassermenge in der Vegetationsperiode zurückgeht, während die Verdunstungsverluste durch Interzeption und Evaporation angesichts höherer Temperaturen und geringerer Niederschlagsintensitäten im Sommerhalbjahr zunehmen (Sutmöller et al., 2021). Die Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers im Wurzelraum gewinnt angesichts dieser Entwicklung an Bedeutung. Hydrologische Eigenschaften von Mineralböden, insbesondere die Höhe der pflanzenverfügbaren Wasserspeicherung, werden auf Grundlage der forstlichen Standortkartierung abgeleitet oder aus Daten des bodenkundlichen und forstlichen Umweltmonitorings über Pedotransfer-Funktionen berechnet und gegebenenfalls unter waldbaulichen Gesichtspunkten weiter klassifiziert (Morgenstern et al., 2011; Groh et al., 2012; Meusburger et al., 2022).

Oftmals fehlen allerdings aktuelle und hochauflösende Informationen zur Ausprägung von Humusaufgaben. Humusformen, bestehend aus den organischen Auflagehorizonten und dem obersten Mineralboden, sind das Resultat aus der Zersetzung und damit Mineralisierung der Streu sowie der Humifizierung an der Schnittstelle von Vegetation und Boden. Beteiligt sind bei der Zersetzung u. a. Regenwürmer und Kleinringelwürmer, welche die organische Auflage gleichzeitig als Habitat nutzen (Bernier & Gillet, 2012; Wachendorf et al., 2023). Die Humusform dient dabei auch in Feuchtwäldern als Indikator für den Zustand der Bodenlebensgemeinschaft. Die Ansprache aerohydromorpher Humusformen (Feuchthumusformen) ist in der aktuellen Humusformen-Klassifikation der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 6) (AG Boden, 2024) nicht sehr differenziert, da eindeutige Merkmale sowie diagnostische Horizonte zur Klassifizierung fehlen (Frank et al., 2023). Die Ausweisung eindeutiger diagnostischer Merkmale für Humusformen in Feuchtwäldern ermöglicht die Weiterentwicklung der Systematik für aerohydromorphe Humusformen (Wachendorf et al., 2023). Die Gliederung der organischen Auflage in Humusformen basiert auf deren makroskopischen Erscheinungsformen, wobei die erkennbaren Merkmale variabel sind und von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden können (Grüneberg et al., 2016). Die Ergebnisse zur Aufnahme der organischen Auflage zeigen, dass sich an den wasserbeeinflussten Waldstandorten aufgrund der dort vorkommenden Standortsfaktoren Feuchthumusformen mit unterschiedlichen morphologischen Eigenschaften ausprägen (Abbildung 8).

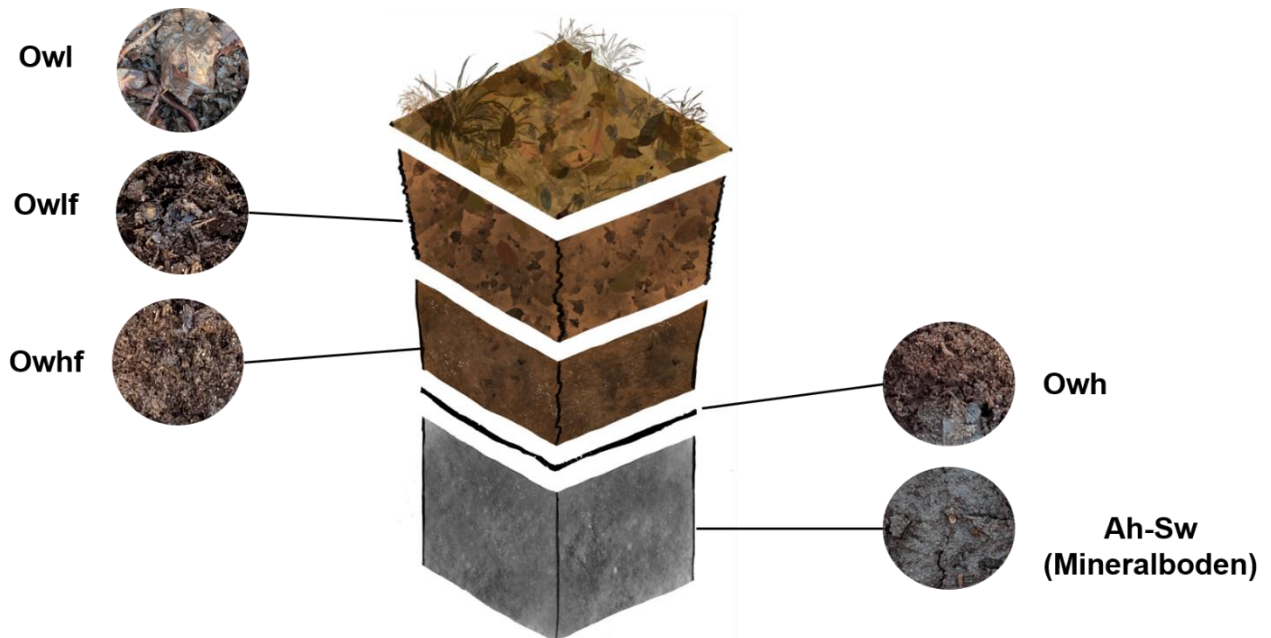


Abbildung 8: Aufbau und Horizontierung einer Feuchthumusform sowie dem dazugehörigem Mineralboden (erstellt von Cara Beume 2024).

Insbesondere verschiedene Formen von Feuchtmull und Feuchtmoder sind im Untersuchungsgebiet im Kernmünsterland zu finden. An den 64 Untersuchungsstandorten wurden folgende Feuchthumusformen (Subtypen) nach AG Boden (2024) kartiert: Feucht-L-Mull: 27 Standorte, Feucht-F-Mull: 19 Standorte, Feuchtmoder: 18 Standorte. Diese lassen sich anhand ihrer morphologischen Eigenschaften noch in weitere Subtypen oder Varietäten untergliedern. Es wurden insgesamt 320 Humusformen (= jeweils 5 Satelliten pro Standort) an den 64 Standorten aufgenommen (Abbildung 9). Mit einem Vorkommen an 182 Standorten ist am häufigsten ein Feucht-L-Mull (MLF) vergeben worden. Danach folgen die Feucht-F-Mulle (MFF) an 47 Standorten. Beim Feucht-F-Mull konnte noch weiter in einen (feinhumusreichen) moderartigen Feucht-F-Mull (MFFmf) unterschieden werden. Bei den Feucht-Modern (AMF), welche an 21 Standorten vorkamen, war eine weitere Unterteilung in feinhumusreicher Feucht-Moder (AMFf) (23 Standorte) und mullartiger Feucht-Moder (AMFm) (9 Standorte) möglich. Die Subtypen und Varietäten AMFf, AMFm und MFFmf sind bisher in der KA 6 (AG Boden, 2024) für die Feuchthumusformen nicht näher beschrieben.

Häufig finden sich an den Feuchtmull-Standorten erkennbare Redoxmerkmale bis an die organische Auflage. Schwarze „schmierige“ Blätter, die stapelartig im Owl- und Owf-Horizont zusammenliegen, zeigen einen eindeutigen Wassereinfluss (wasserbeeinflusst = w) (Tabelle 2). Weitere Erkennungsmerkmale sind unter Feuchtmull die Krümelstruktur und ein erhöhtes Aufkommen von Regenwürmern insbesondere im mineralischen A-Horizont. Die typische Horizontfolge für einen Feucht-L-Mull ist Owl/Ah... und für einen Feucht-F-Mull Owl/Owf/Ah... (Abbildung 10). Ähnlich wie bei den aeromorphen Humusformen konnte auch als Subtyp ein Moderartiger Feucht-F-Mull vergeben werden. Dieser zeichnet sich durch seinen zweigeteilten Owf-Horizont aus. Unter dem Owl-Horizont ist ein feinhumusarmer Owlf-Horizont ausgebildet, darunter folgt ein mächtiger und feinhumusreicher Owhf-Horizont mit deutlich erkennbarem Feinhumusanteil. Dieser Subtyp zeigt sich auf Böden mit schlecht bis mäßig zersetzbaren Streuarten, aufgrund des weiten C/N-Verhältnisses geht die Geschwindigkeit des Streuabbaus zurück.

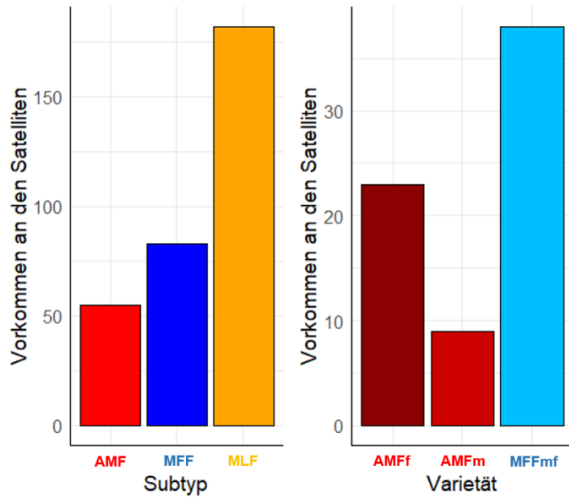


Abbildung 9: Verteilung der aufgenommenen Feuchthumusformensubtypen bzw. -varietäten an allen Satelliten (n = 320).



Abbildung 10: Humusmonolith mit der Feuchthumusform Feucht-F-Mull und hydromorphem Oberboden im Inkmannsholz (03/2022, Foto: T. Frank).

In den Feuchtmöden konnten wir mächtige Owf-Horizonte finden, die sich noch weiter in Owlf- und Owfh-Horizonte gliedern lassen. Somit ist je nach Mächtigkeit eine Unterscheidung in feinhumusarmer (Owlf-Horizont dominierend) oder feinhumusreicher (Owfh-Horizont dominierend) Feuchtmöde möglich (Tabelle 2). Typisch für den Feuchtmöde (AMF) ist auch das Vorkommen eines Owfh-Horizontes. Auch hier war eine weitere Untergliederung in den Subtyp mullartiger Feuchtmöde (AMFm) möglich. Diese Feuchthumusform ist ein Übergangssubtyp zwischen den Feucht-Mull-Humusformen und den Feuchtmöde-Humusformen. Die Entwicklung findet bevorzugt auf sauren, basenarmen Standorten statt. Das Owl-Material ist miteinander verklebt und zeigt oft gemeinsam mit den weiteren Horizonten eine mächtige stapelartige Lagerung an. Eine weitere Besonderheit ist das Vorkommen eines Owih-Horizontes im mullartigen Feuchtmöde. Dieser Horizont liegt filmartig und lückig vor und hat eine schmierige Konsistenz. Die Mächtigkeit ist < 0,5 cm. Der Übergang zum Ah-(Sw)-Horizont ist unscharf. Zusätzlich konnte an den Feuchtmöde Standorten mit dem feinhumusreichen Typischen Feuchtmöde eine Varietät festgestellt werden. Diese Feuchthumusform zeichnet sich durch ein weites C/N-Verhältnis sowie schlecht zersetzbare Streu im Gegensatz zu den Feucht-Mull-Humusformen aus.

Tabelle 2: Beschreibung und morphologische Eigenschaften der O-Horizonte und des mineralischen Oberbodens eines Feucht-Mulls (linke Tabelle) und eines Feucht-Moders (rechte Tabelle).

Horizont	Owl	Owf	Mineralischer Oberboden		Horizont	Owl	Owff/Owlf/Owhf	Owh/Owih	Mineralischer Oberboden
Beschreibung und morphologische Eigenschaften der O-Horizonte und des mineralischen Oberbodens eines Feucht-Mulls	Zeitweilig stauwasserbeeinflusst				Beschreibung und morphologische Eigenschaften der O-Horizonte und des mineralischen Oberbodens eines Feucht-Moders	Zeitweilig stauwasserbeeinflusst			
	deutliche Grau- bis Schwarzfärbung der Streureste verursacht durch den Sauerstoffmangel		Hydromorphe Merkmale wie Rostflecken sind deutlich sichtbar			deutliche Grau- bis Schwarzfärbung der Streureste verursacht durch den Sauerstoffmangel			Hydromorphe Merkmale wie Rostflecken sind deutlich sichtbar
		bei feuchten Bedingungen hat der Feinhumus im Owf eine schmierige Konsistenz	Krümelstruktur aufgrund hoher Regenwurm-aktivität				bei feuchten Bedingungen hat der Feinhumus im Owhf eine schmierige Konsistenz	bei feuchten Bedingungen hat der Feinhumus im Owh eine schmierige Konsistenz	
	schnelle Streuzersetzung (enges C/N Verhältnis)					langsamere Streuzersetzung (weites C/N Verhältnis)			
	typischer Horizont eines Feucht L-Mulls	typischer Horizont eines Feucht F-Mulls					typischer Horizont eines Feucht- Moders/ mullartiger Feuchtmoder		
	Vegetation weist auf Nässe im Oberboden hin					Vegetation weist auf Nässe im Oberboden hin			
	Regenwurmlosung und Mineralpartikel sichtbar		Einarbeitung von Pflanzenresten in den Mineralboden			Organische Auflage ist in Paketen geschichtet			

Bei den Feuchthumusformen im Projekt ließ sich in der Abfolge Feucht-L-Mull < Feucht-F-Mull < Feuchtmoder eine zunehmende Akkumulation von organischer Substanz in der Auflage ausmachen. Diese zunehmende Mächtigkeit ist auch mit dem Mikrorelief im Untersuchungsgebiet zu begründen. Teilweise verschlossene Gräben und kleine Senken durchziehen das Gebiet. Viele der ausgewiesenen 64 Standorte liegen in einem dieser Gräben und Senken (Abbildung 11).

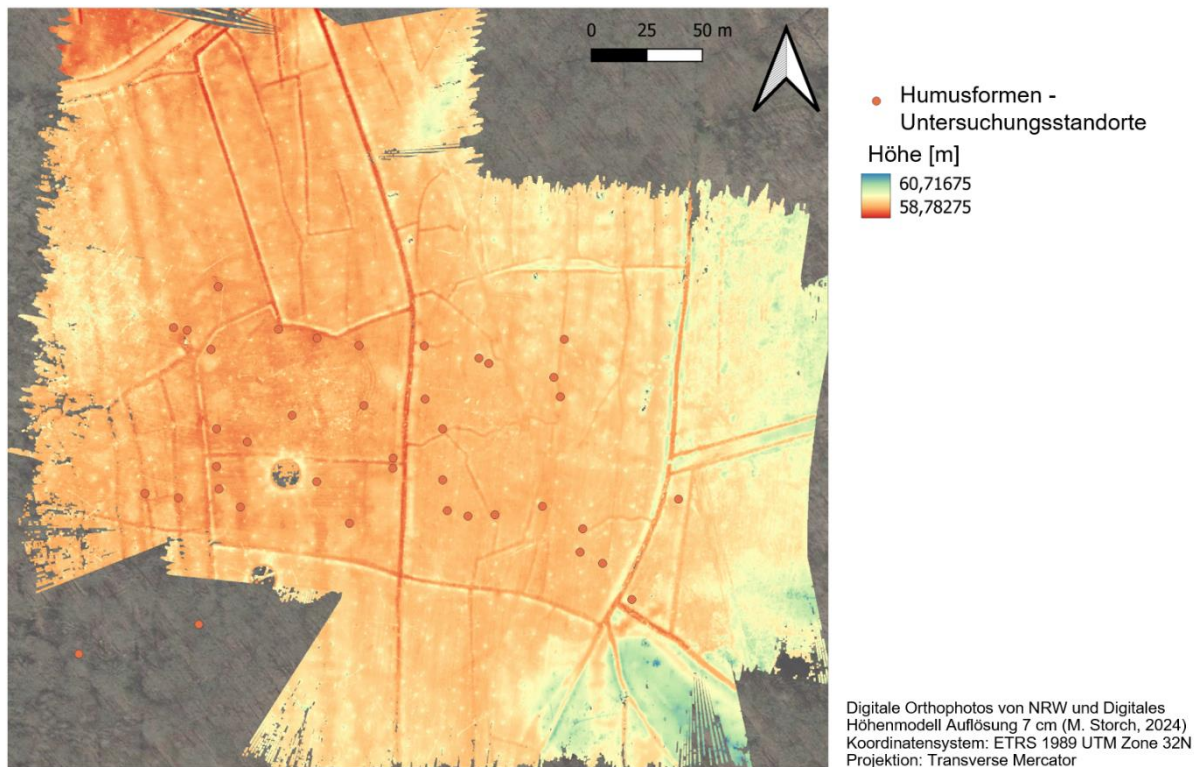


Abbildung 11: Digitales Höhenmodell und Untersuchungsstandorte zur Darstellung des Mikroreliefs im Inkmannsholz (Davert).

Der Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage und im Mineralboden bis 15 cm Tiefe ist für die verschiedenen Feuchthumusformen Feucht-Moder, Feucht-F-Mull und Feucht-L-Mull ermittelt. Der Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage ist bei den Feucht-Moderstandorten (AMF) am höchsten, gefolgt von den Feucht-F-Mull-Standorten (MFF) und den Feucht-L-Mull-Standorten (MLF). Die statistischen Tests (Tukey-Test) zeigen hochsignifikante Unterschiede zwischen allen Humusformen (AMF-MFF, AMF-MLF und MFF-MLF). Diese Unterschiede deuten darauf hin, dass die Humusform einen engen Bezug zum Kohlenstoffvorrat in der Auflage hat, was u. a. auf die unterschiedlichen Zersetzungsgrade der Streu zurückzuführen ist (Bens et al., 2006; Štícha et al., 2010; Bårdale et al., 2021). Die erhöhte Akkumulation von Kohlenstoff ist an den Feucht-Moder-Standorten auf schlecht zersetzbare Streu zurückzuführen, die langfristig auch zu einer Bodenversauerung beiträgt. Im Mineralboden bis 15 cm Tiefe ist der Kohlenstoffvorrat über die verschiedenen Humusformen hinweg relativ ähnlich. Die Mittelwerte und die Verteilung der Werte für AMF, MFF und MLF sind vergleichbar. Die statistischen Tests zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Humusformen. Es kann allerdings eine Tendenz zu höheren Kohlenstoffvorräten an den Feucht-L-Mull Standorten im Vergleich zu Feucht-Moder-Standorten festgestellt werden. Dies zeigt auch die höhere biologische Aktivität an den Mull-Standorten und somit eine höhere Anreicherung von Kohlenstoff im Mineralboden (Frank et al. in Vorb.).

Die pH-Werte im Mineralboden sind an allen untersuchten Standorten nach Humusformen und den drei unterschiedlichen Tiefenstufen (0-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm) ermittelt worden. Die höchsten pH-Werte sind an den Feucht-L-Mull Standorten in 10–15 cm Tiefe (MLF = $4,64 \pm 0,59$) aufgenommen worden, gefolgt von 0–5 cm ($4,60 \pm 0,59$) und 5–10 cm ($4,60 \pm 0,58$). Danach folgen die Feucht-F-Mull Standorte mit pH-Werten in 0–5 cm ($4,00 \pm 0,43$), 5–10 cm ($4,11 \pm 0,48$) und 10–15 cm ($4,21 \pm 0,47$). Die niedrigsten pH-Werte wurden an den Feucht-Moder Standorten gemessen (AMF = 0–5 cm $3,40 \pm 0,28$, 5–10 cm $3,54 \pm 0,25$ und 10–15 cm $3,63 \pm 0,23$). Die pH-Werte zeigen eine leichte Variation mit zunehmender Tiefe. Hohe statistische Signifikanzen wurden im Bereich von 0–5 cm Tiefe zwischen AMF-MFF ($p = 0,0013$), MFF-MLF ($p = 0,0004$) und zwischen MLF-AMF ($p < 0,0001$) festgestellt. Zusätzlich wurden hochsignifikante Unterschiede zwischen MLF-AMF ($< 0,0001$), AMF-MFF (0,0018) und MFF-MLF (0,0039) im Bereich von 5–10 cm Tiefe beobachtet. Weitere hochsignifikante Unterschiede wurden zwischen MLF-AMF ($< 0,0001$), AMF-MFF (0,0020) und ein signifikanter Unterschied zwischen MFF-MLF (0,0133) im Bereich von 10–15 cm Tiefe festgestellt. Die Untersuchungsgebiete zeichnen sich durch stark saure bis sehr stark saure pH-Werte aus. Auf den Mullstandorten sind etwas höhere pH-Werte im mineralischen Oberboden (0-5 cm) zu finden (pH 4-5) als auf den Moderstandorten (pH 3-4) (Frank et al. in Vorb.).

Die C/N-Verhältnisse wurden in der organischen Auflage und in drei verschiedenen Tiefenstufen (0–5 cm, 5–10 cm und 10–15 cm) des Mineralbodens für die drei verschiedene Humusformtypen Feucht-Moder (AMF), Feucht-F-Mull (MFF) und Feucht-L-Mull (MLF) an den Untersuchungsstandorten Inkmannsholz und Wolbeker Tiergarten ermittelt. Die Mittelwerte und die Standardabweichung geben Aufschluss über die durchschnittlichen C/N-Verhältnisse und deren Streuung. Ähnlich wie bei aeromorphen Humusformen ist das C/N-Verhältnis auf den Standorten mit Feucht-L-Mull oder Feucht-F-Mull im Mineralboden am engsten (C/N: 14, 13). Feucht-Moder Standorte zeigen ein weites C/N-Verhältnis. Es zeigt sich, dass das C/N-Verhältnis generell bei den Feucht-Moderstandorten (AMF) in allen Tiefen weiter ist (C/N: 15-17) als bei den Mull-Humusformtypen (MFF: 13-14 und MLF: 13-14).

In der organischen Auflage finden sich in den C/N-Verhältnissen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feucht-F-Mull-Standorten und Feucht-Moder-Standorten (Frank et al. in Vorb.). Das C/N-Verhältnis (12-14) im Mineralboden ist eng bis mäßig eng und spricht für eine rasche Humifizierung und Mineralisierung. Durch das vereinzelte Erlen- und Eschenvorkommen haben wir eine schnell zersetzbare Streu (Tabelle 3). Auch die Streu der Hainbuche besitzt ein enges C/N-Verhältnis und wird innerhalb von 1 ½ - 2 Jahren zersetzt (Hättenschwiler, 2005) (Abbildung 12). Es findet sich eine ausgeprägte Krautvegetation an einigen Standorten, die ebenfalls zur Ausbildung der Humusform beiträgt (Anschlag et al., 2017; Linnemann et al., 2023; Fornfeist et al., 2024) (s. Kapitel Vegetation).

Tabelle 3: Waldstandorttyp gemäß Linnemann et al. (2023) und Fornfeist et al. (2024) sowie die entsprechenden Feuchthumusformen mit AMF = Feucht-Moder, MFF = Feucht-F-Mull und MLF = Feucht-L-Mull an den Satelliten der 64 Untersuchungsstandorte. Zusätzlich sind die C/N-Verhältnisse der frischen Laubstreu dargestellt nach Ellenberg & Leuschner (2010).

Humusform	Esche <i>Fraxinus excelsior</i>	Hainbuche <i>Carpinus betulus</i>	Rotbuche <i>Fagus sylvatica</i>	Schwarz-Erle <i>Alnus glutinosa</i>	Schwarzpappel <i>Populus nigra</i>	Stieleiche <i>Quercus robur</i>
AMF	0	39	6	0	0	6
MFF	3	27	3	6	0	9
MLF	6	36	12	3	15	9
C/N Verhältnis	21	23	51	15	63	47

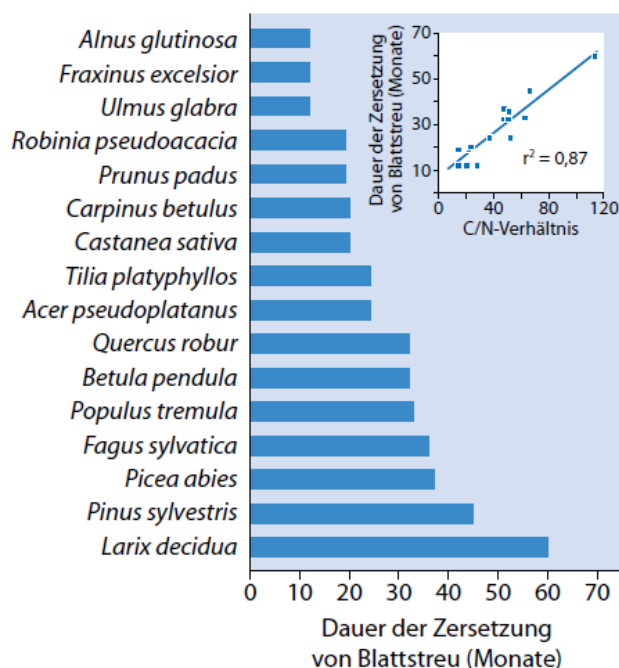


Abbildung 12: Durchschnittliche Zersetzungsdauer von Blattstreu europäischer Waldbäume unter natürlichen Bedingungen. Die Dauer der Streuzersetzung ist positiv korreliert mit dem C/N-Verhältnis, d.h., je weiter das C/N-Verhältnis, desto langsamer verläuft die Zersetzung (Hättenschwiler, 2005; Bartsch et al., 2015).

Hauptsächlich an den Mullstandorten fand sich eine aktive Zersetzergesellschaft aufgrund höherer pH-Werte. Die relativ engen C/N-Verhältnisse an diesen Standorten und die dort vorkommende leicht zersetzbare Streu unterstützen diese Aussage. Die vorgefundenen Humusformen sind sensitiv gegenüber anthropogenen und klimatischen Veränderungen und weisen eine hohe zeitliche und räumliche Dynamik auf. Einträge anthropogener Säurebildner führen zu schnelleren Versauerungsprozessen im Boden und die zunehmende Stickstofffracht in den Depositionen führt zu Veränderungen des Nährstoffgleichgewichts. Zusätzlich zu den Stickstofffrachten finden wir an den Feucht-Moder Standorten eine geringere biologische Aktivität der Zersetzergesellschaft und somit eine langsamere Zersetzung der Laubstreu im Vergleich zu den Feucht-Mull-Standorten.

Die Phasen der kompletten Wassersättigung tragen zusätzlich zu einem langsamen Abbau der organischen Substanz bei (Bauhus et al., 2004; Erber & Broll, 2005).

Die Kartierung der Feuchthumusformen zeigte eine hohe kleinräumige Variabilität der Humusformen. Bereits im Umkreis von einem Meter treten unterschiedliche Humusformentypen auf. Dabei liegen aerohydromorphe Humusformen und aeromorphe Humusformen direkt nebeneinander vor. Die Variabilität wird besonders durch das Mikorelief beeinflusst. Diese große räumliche Variabilität ist typisch für Feuchthumusformen (Graefe, 1994; Erber & Broll, 1998). Diese beeinflusst auch die Bodenbiodiversität (Bernier & Gillet, 2012). Kleinräumige Unterschiede der Mächtigkeiten der organischen und mineralischen Horizonte sind typisch für Waldböden (Broeg et al., 2023). Trotz dieser hohen Variabilität der Feuchthumusformen kann das Vorkommen an einem Standort meist durch die Betrachtung weiterer Faktoren erklärt werden. Im Untersuchungsgebiet kommen Feuchthumusformen in Senken und verschlossenen Gräben vor. Dort sind die Feuchthumusformen stärker vom Stauwasser geprägt und kommen somit in Abhängigkeit vom Mikorelief vor.

Arbeitspaket 2b Intensivmonitoring der Bodenfeuchte und Niederschlagsmessungen

Wechselfeuchte Staunässeböden zeichnen sich durch einen speziellen Luft- und Wasserhaushalt aus (Frank et al., 2023). Charakteristisch sind mehr oder weniger lang andauernde Phasen mit Wassersättigung in Teilen des Bodens. Die Niederschlagsverläufe sowie die gemessenen pF-Werte an den Intensivstandorten im Inkmannsholz und Wolbecker Tiergarten dokumentieren die Veränderungen des Bodenwasserhaushalts im Untersuchungszeitraum von Juni 2022 bis November 2024.

Die Standorte A1 bis A4 im Wolbecker Tiergarten zeigen zu Beginn der Messkampagne im Juni 2022 eine Trockenphase, was sich in steigenden pF-Werten widerspiegelt (Abbildung 13). Besonders am Standort A3 werden pF-Werte von über 4 in allen drei Tiefen (10 cm, 20 cm und 30 cm) erreicht, was auf eine ausgeprägte Trockenheit hinweist. Ab Ende 2022 sinken die pF-Werte an allen Standorten deutlich, was zu einer anhaltenden Wassersättigung bis Juni 2023 führt. Im Sommer 2023 sind erneut steigende pF-Werte zu beobachten, die jedoch weniger stark ausgeprägt sind als im Sommer/Herbst 2022. Bereits im Oktober 2023 erreichen alle Standorte erneut einen Zustand vollständiger Wassersättigung, der bis Mitte Juni 2024 anhält. Trotz der Sommerperiode 2023–2024 wechseln sich Trockenphasen mit Phasen vollständiger Wassersättigung ab, was auf wiederholte Niederschlagsereignisse zurückzuführen ist.

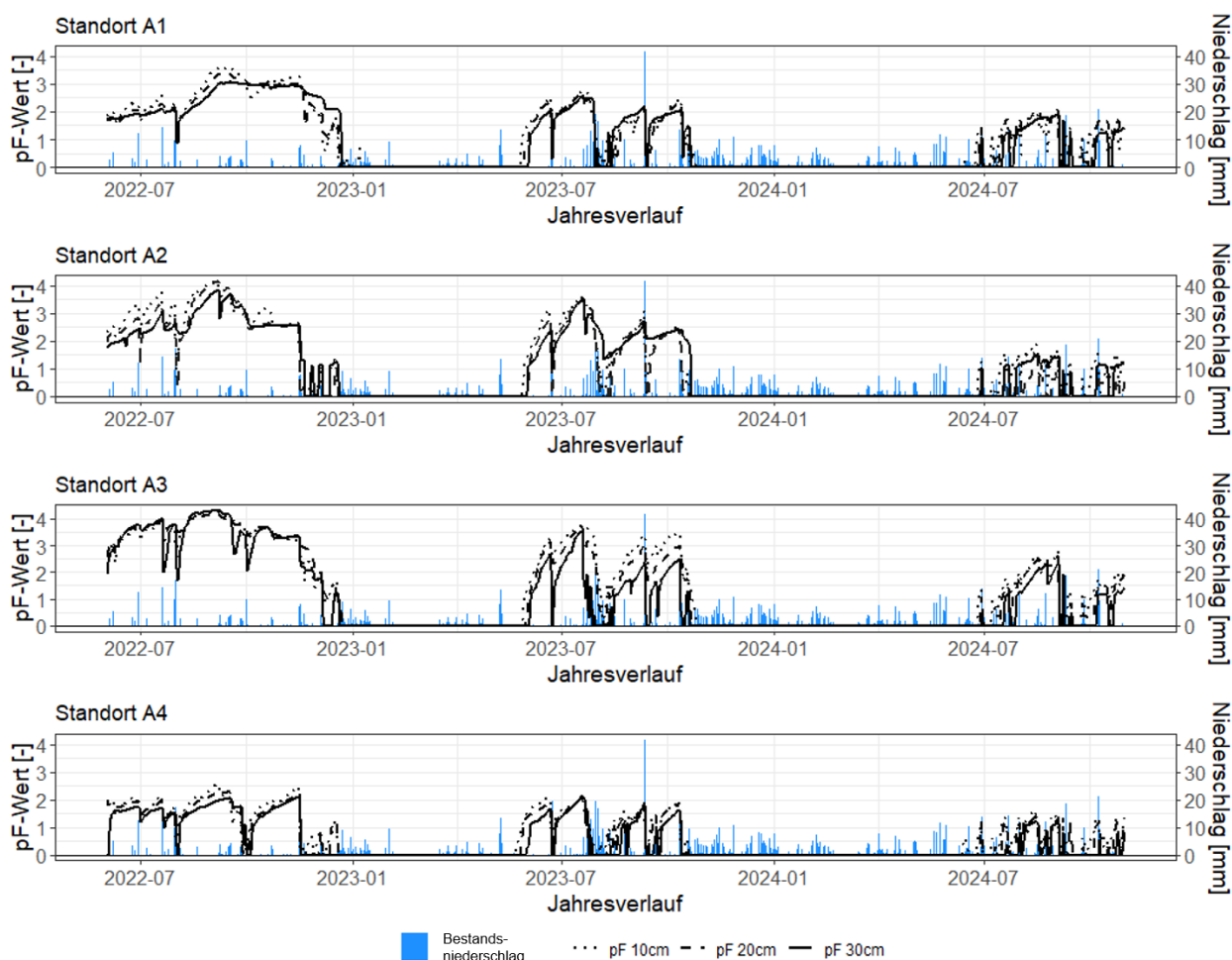


Abbildung 13: Jahresverläufe der Bodenwasserspannung (pF-Wert) für die drei untersuchten Bodentiefen 10, 20 und 30 cm und die Niederschläge im Bestand von Mai 2022 bis November 2024 an den Intensivstandorten A1-A4 im Wolbecker Tiergarten (n = 850 Tage).

Die Niederschläge tragen entscheidend zur Wasserversorgung in Waldökosystemen mit Staunässeböden bei. Während der Vegetationsperiode sinkt der Bodenwassergehalt, wodurch die Saugspannung für die Wasseraufnahme durch Wurzeln ansteigt.

Ein Vergleich der Bodenfeuchtedynamik und des Niederschlags im Sommer 2022 mit den Sommern 2023 und 2024 am Beispiel des Intensivstandorts A1 verdeutlicht weitere Unterschiede (Abbildung 14). Im Sommer 2022 sind in allen Tiefen erhöhte pF-Werte zu beobachten, die auf eine längere Trockenphase hinweisen. Diese ist intensiver als in den Folgejahren. Die Trockenphasen können dann zeitweise die biologische Aktivität limitieren (Itter, 2000). Im Herbst 2022 nehmen die pF-Werte durch wiederholte Niederschlagsereignisse deutlich ab, was zu einer vollständigen Durchfeuchtung der Böden führt. Im Winter 2022/2023 dominiert eine andauernde Wassersättigung (blau markierte Bereiche), die typisch für die feuchteren Wintermonate ist. Im Sommer 2023 treten erneut hohe pF-Werte und längere Trockenperioden auf. Der Sommer 2024 hingegen zeigt eine stärkere Dynamik mit kürzeren Trockenphasen und einer schnellen Reaktion des Bodenwasserspeichers auf Niederschläge.

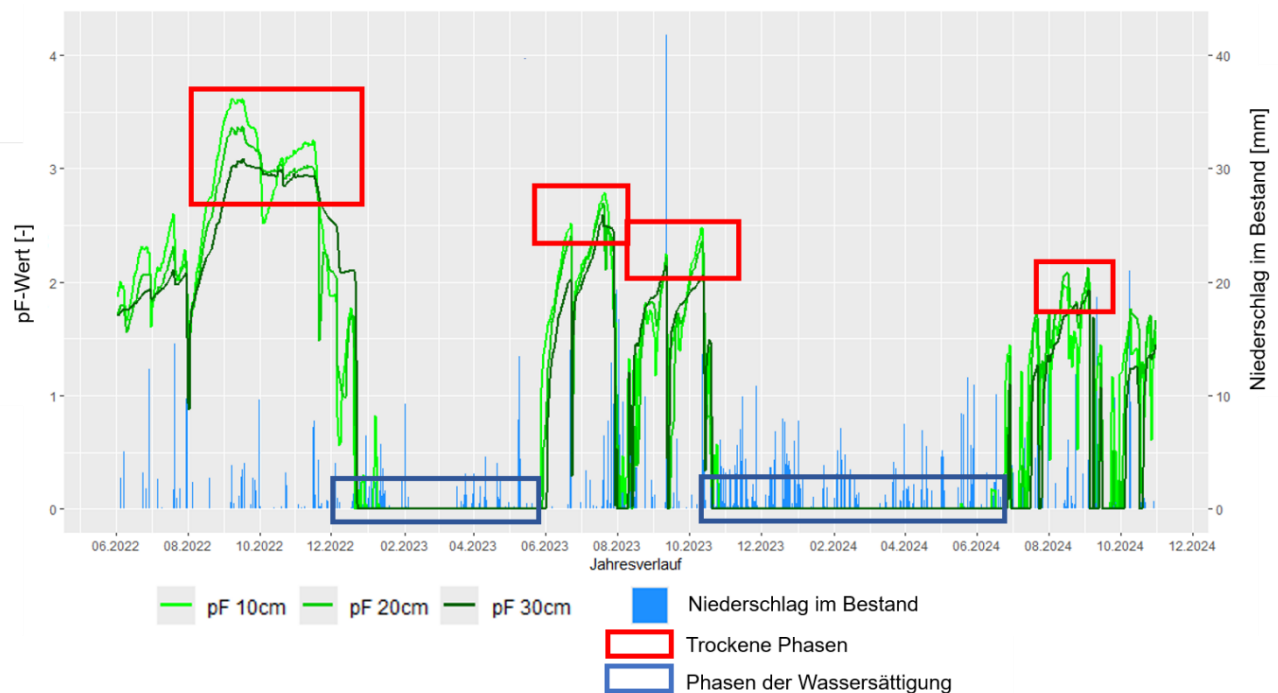


Abbildung 14: Jahresverläufe der Bodenwasserspannung (pF-Wert) für die drei untersuchten Bodentiefen 10, 20 und 30 cm und die Niederschläge im Bestand von Mai 2022 bis November 2024 am Intensivstandort A1 im Wolbecker Tiergarten mit trockenen Phasen (rot markiert) und wassergesättigten Phasen (blau markiert) (n = 850 Tage).

Zusammenfassend weist der Sommer 2022 insgesamt die trockensten Bedingungen auf, gefolgt von einer schnellen Erholung der Bodenfeuchte im Herbst. Der Sommer 2023 ist durch die längste stabile Trockenperiode geprägt, während der Sommer 2024 eine höhere Variabilität und kürzere Trockenphasen zeigt. Im Winter 2022/2023 und Winter 2023/2024 sind in allen drei Tiefen pF-Werte von 0 zu erkennen, die auf eine anhaltende Wassersättigung hinweisen. Dies ist ein Muster, das sich in beiden Winterperioden wiederholt und typisch für wechselfeuchte Pseudogley-Standorte ist.

Auch an den Standorten B5 bis B8 im Waldgebiet der Davert (Inkmanholz) spiegeln die pF-Werte die saisonale Bodenfeuchtedynamik wider (Abbildung 15). Zu Beginn des Untersuchungszeitraums steigen die pF-Werte an und erreichen im September 2022 Maximalwerte ($pF > 4$). Auffällig ist Standort B7, der erst im Februar 2023 vollständige Wassersättigung erreicht, etwa sechs Wochen später als die anderen Standorte. Im Sommer 2023 trocknen die Böden infolge höherer Niederschläge weniger stark aus, wohingegen im Sommer 2024 höhere pF-Werte auftreten. Dennoch wechseln sich auch hier Nass- und Trockenphasen regelmäßig ab. Damit einhergehend unterscheidet sich die pflanzenverfügbare Wassermenge der Böden zwischen den Sommern 2022 bis 2024 deutlich.

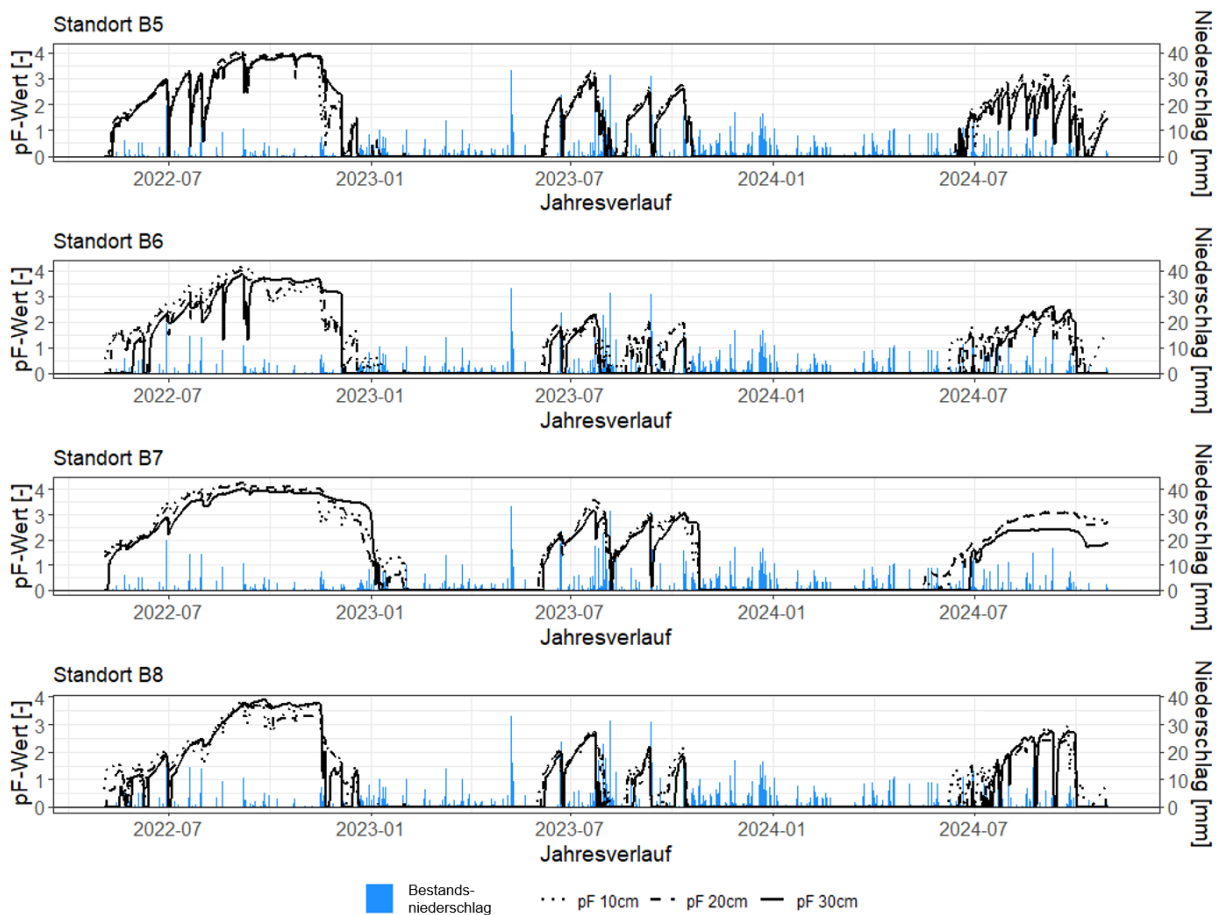


Abbildung 15: Jahresverläufe der Bodenwasserspannung (pF-Wert) für die drei untersuchten Bodentiefen 10, 20 und 30 cm und die Niederschläge im Bestand von Mai 2022 bis November 2024 an den Intensivstandorten B5-B8 im Inkmanns-holz (Davert) (n = 883 Tage).

Die Ergebnisse zeigen eine kleinräumige Variabilität in der Korngrößenverteilung, damit verbunden sind die Bodenfeuchtebedingungen an den acht Pseudogley-Standorten sowie die Ausprägung der Feuchthumusformen. Die Bodenfeuchte beeinflusst hierbei vor allem die Ausprägung der Mächtigkeit der organischen Auflage (Erber & Broll, 2003; Bens et al., 2006; Bårdale et al., 2021). Diese finden sich vor allem in kleinen Senken und geschlossenen Gräben (Frank et al., 2023). Innerhalb dieser Mikrostandorte unterliegen die Humusformen reduzierenden Bedingungen, die durch Sauerstoffmangel gekennzeichnet sind, oder sie durchlaufen zumindest Schwankungen zwischen aeroben und anaeroben Bedingungen, was die Akkumulation von organischer Substanz begünstigt (Erber & Broll, 2005, 2006). Das Zusammenspiel von Wassergehalt und Sauerstoffverfügbarkeit spielt eine entscheidende Rolle bei der Zersetzung von Streu und der Entwicklung verschiedener Humusformen. Die Sauerstoffsättigung in organischen Auflagen hängt vom Wassergehalt, der Wasserhaltekapazität und der Bodentemperatur ab (Erber & Broll, 2005).

Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse die komplexe Interaktion verschiedener Faktoren wie Bodenart, (Kraut)vegetation und Mikrorelief, die den Bodenwasserhaushalt beeinflussen. Unterschiede in der Infiltration und Speicherung von Niederschlagswasser führen zu variierenden Bodenfeuchten und Trockenstressbedingungen an den untersuchten Standorten.

Arbeitspaket 2c Vegetationskartierung

In der Krautschicht der 64 Untersuchungsstandorte wurden insgesamt 76 Gefäßpflanzenarten kartiert (Linne-mann et al., 2023). Die häufigsten Arten waren *Carpinus betulus* (63 Plots), *Carex remota* (58 Plots) und *Oxalis acetosella* (36 Plots). In der Baumschicht dominierten *Quercus robur* und *Carpinus betulus*. Auf pflanzensoziologischer Ebene sind die Standorte den Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwäldern (*Stellario holostea-Carpinetum betuli*) zuzuordnen. Der gewichtete Feuchtezeigerwert nach Ellenberg (Ellenberg & Leuschner, 2010)

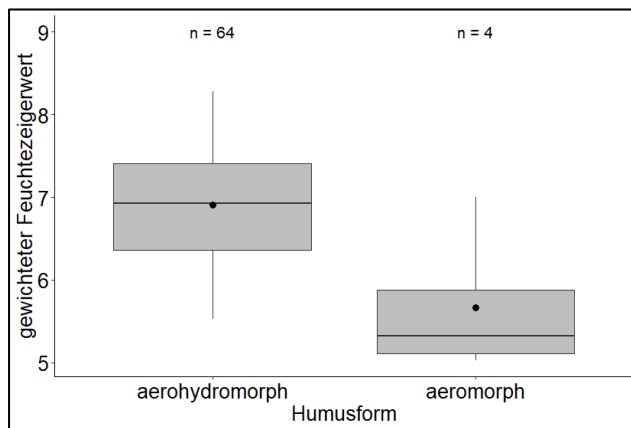


Abbildung 16: Vergleich des gewichteten Feuchtezeigerwertes auf Standorten mit aerohydromorphen (Mittelwert 6,9) und aeromorphen (Mittelwert 5,7) Humusformen. Der Unterschied ist signifikant ($p < 0,001$). Grafik: L. Santora

lag im Mittel bei 6,9. Damit war er signifikant höher als der mittlere gewichtete Feuchtezeigerwert von 5,7 für die vier Referenzflächen an trockenen Standorten (einseitiger t-Test; $p < 0,001$) (Abbildung 16).

Es wurden drei Arten kartiert, die in der Forstlichen Standortaufnahme als Zeigerpflanzen für unterschiedliche Feuchthumusformen aufgelistet sind (Arbeitskreis Standortkartierung 2016): *Carex remota* (Zeiger für die feuchte Ausprägung von „bessere[n] Moder-Humusformen bis F-Mull“), *Lysimachia vulgaris* (Zeiger für „Feuchtmoder bis Feuchtmull“) und *Carex acutiformis* (Zeiger für „Feuchtmull bis Anmoor“). Für jede der drei Feuchthumusformen konnten außerdem anhand einer Indicator Species Analysis (Dufrêne & Legendre, 1997) ein bis zwei Indikatorarten identifiziert werden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Ergebnisse der Indicator Species Analysis.

Humusform	Pflanzenart	Spezifizität	Sensitivität	Indikatorwert
Feucht-F-Mull	<i>Carex sylvatica</i>	0,76	0,71	0,54
	<i>Agrostis stolonifera</i> agg.	0,92	0,29	0,27
Feucht-L-Mull	<i>Impatiens noli-tangere</i>	0,98	0,28	0,27
Feuchtmoder	<i>Vaccinium myrtillus</i>	1,00	0,33	0,33
	<i>Molinia caerulea</i>	0,95	0,22	0,21

Die Bodenvegetation wird in verschiedenen Kontexten genutzt, um daraus Bodeneigenschaften wie Feuchte- oder Nährstoffhaushalt abzuleiten (Wilson et al., 2001; Pinto et al., 2016; Jonathan et al., 2022). Der Ellenberg'sche Feuchtezeigerwert, der auf den Untersuchungsstandorten gut durchfeuchtete, aber noch nicht nasse Böden anzeigt (Ellenberg & Leuschner, 2010), lässt erkennen, dass die Artenzusammensetzung der Pflanzen die Bodenbedingungen sehr gut widerspiegelt. Er hebt sich außerdem deutlich vom Wert für die Referenzflächen an trockenen Standorten ab. Der Feuchtezeigerwert scheint daher ein guter Indikator zur Unterscheidung der Humusform in aerohydromorph und aeromorph zu sein, wenngleich dies durch eine Erhöhung der Anzahl der Referenzflächen noch validiert werden sollte. Die Zeigerpflanzen der Forstlichen Standortaufnahme (Arbeitskreis Standortkartierung, 2016) kamen zwar alle auf den jeweils durch sie angezeigten Humusformen vor, jedoch sind dort insgesamt 26 Zeigerpflanzen verzeichnet. Die geringe Anzahl vorkommender Pflanzenarten auf den Untersuchungsflächen legt nahe, dass der aktuelle Katalog an Zeigerpflanzen, aufgrund des Ausbleibens eines Großteils an Arten im Untersuchungsgebiet, allein kein hinreichendes Mittel zur schnellen Erkennung von Feuchthumus(-formen) im Gelände darstellt.

Die Schwierigkeit der Unterscheidung einzelner Feuchthumusformen mittels bestimmter Pflanzenarten wird auch an der Indicator Species Analysis ersichtlich. Zwar zeigt sich dort, dass beim Vorkommen einer Indikatorart auf einem Plot in den meisten Fällen auf die Humusform geschlossen werden kann, die sie indiziert (hohe Spezifizität). Jedoch kommen außer *Carex sylvatica* die Indikatorarten nur auf maximal einem Drittel der Plots mit der jeweiligen Humusform vor, d. h. auf vielen Flächen ist keine Art vorhanden, von der die Humusform abgeleitet werden könnte (niedrige Sensitivität). Aufgrund des Untersuchungsdesigns kann außerdem kein Vergleich zu potenziellen Indikatorarten auf den äquivalenten Humusformen auf Trockenstandorten gezogen werden. Die Ergebnisse müssten überdies mithilfe weiterer Stichproben in anderen feuchten Waldgebieten überprüft werden, um eine verallgemeinerbare Aussage über die Eignung der Arten als Indikatorpflanzen für verschiedene Feuchthumusformen treffen zu können (Bakker, 2008).

Die Zusammensetzung der Vegetation in der Krautschicht erlaubt insgesamt Rückschlüsse über das Feuchteregime des Bodens und lässt in Teilen auch Annahmen über die Humusform zu. Dies muss jedoch aufgrund der geringen Anzahl an Referenzflächen noch unter Vorbehalt passieren und kann außerdem nicht ohne Weiteres auf andere Wälder mit ähnlichen Feuchteverhältnissen übertragen werden.

c) Arbeitspaket 3: Bodenbiodiversität

Die Zersetzergesellschaft, abhängig von Umweltbedingungen, ist eine Artenkombination streuzersetzender Bodenorganismen, die ihr Habitat in der organischen Auflage und im oberen Mineralboden haben. Die Zersetzer sind hierbei die Leistungsträger, zersetzen Streu, leisten die Bioturbation und tragen damit zur Entwicklung der Humusform bei (Graefe, 1993).

Geeignete Indikatoren zur Aufnahme sind neben den Regenwürmern auch Kleinringelwürmer, diese ergänzen das Bild im Bereich der Mesofauna (Abbildung 17, 18). Außerdem sind die Kleinringelwürmer oft noch dort vertreten, wo Regenwürmer keine Rolle mehr spielen (Graefe, 1993). In der Bodenbiologie werden oft drei verschiedene Gruppen von Regenwürmern unterschieden (= Lebensformtypen), die durch ihre Tätigkeit in unterschiedlichem Maße zum Streuabbau sowie zum Erhalt der Bodenstruktur und des Porensystems beitragen (Klein-Raufhake et al., 2023; Fraser & Boag, 1998) (Abbildung 19).

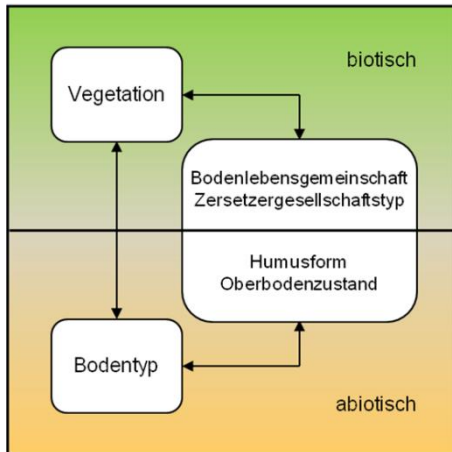


Abbildung 17: Komplexe Strukturelemente eines Ökosystems (Graefe, 1993).



Abbildung 18: Regenwurm und Kleinringelwurm (Foto: Heinz-Christian Fründ).

Auf den untersuchten Standorten dominierten in der Auflage lebende (epigäische) Regenwurmarten. Im oberen Mineralboden grabende Regenwürmer (endogäische) kamen ebenfalls vor. Diese sind auf den Feuchtmull-Standorten deutlich zahlreicher als auf den Feuchtmoder-Standorten. Tiefgrabende (anecische) Regenwürmer wurden nicht gefunden (Tabelle 5). Insgesamt wurden neun Regenwurmarten nachgewiesen, wobei *Eiseniella tetraedra* und *Octolasion tyrtaeum* Nässezeiger sind.

Tabelle 5: Arteninventar und Lebensformtypen der Regenwürmer an den 64 Untersuchungsstandorten.

Regenwürmer	
Lebensformtyp	Arten
epigäisch	<i>Dendrobaena octaedra</i>
	<i>Dendrodrilus rubidus</i>
	<i>Eiseniella tetraedra</i>
	<i>Lumbricus castaneus</i>
	<i>Lumbricus rubellus</i>
endogäisch	<i>Aporrectodea caliginosa</i>
	<i>Aporrectodea rosea</i>
	<i>Octolasion cyaneum</i>
	<i>Octolasion tyrtaeum</i>
anecisch	[keine]

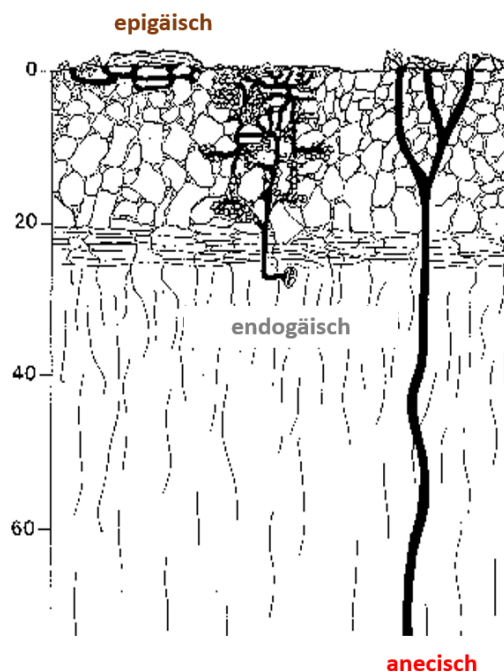


Abbildung 19: Gänge und unterschiedliche ökologische Nischen der drei Regenwurm-Ökotypen verändert nach Fraser & Boag (1998).

Endogäische Arten sind im Vergleich zu epigäischen Arten weniger säuretolerant. Die pH-Werte an den untersuchten Standorten liegen im oberen Mineralboden (0-5 cm) unter Feuchtmoder mit Werten < 4 unterhalb ihres Toleranzbereichs (Graefe & Beylich, 2003; Ehrmann, 2015). Die Abundanz ist in den Feucht-Moder-Standorten signifikant geringer als in den Feuchtmullen. Auch die Biomasse ist in den Feucht-Moder-Standorten erheblich geringer als in den Feuchtmullen. Feuchtezeiger kommen im Feucht-Moder nur sehr vereinzelt vor, und besonders hoch ist der Biomasse-Anteil epigäischer Arten in allen Humusformen (>36 %) (Beylich et al. in Vorb.).

Tiefgrabende Regenwürmer sind sowohl wenig säuretolerant als auch empfindlich gegenüber Stau-/Grundwasser, wenn dieses ihre tiefreichenden Wohnröhren über einen längeren Zeitraum unter Wasser setzt (Beylich & Graefe, 2002). Daher finden sie sowohl in Feuchtmoder- als auch in Feuchtmull-Standorten durch die Vernässung keine geeigneten Lebensbedingungen. An der Entstehung aeromorpher Mull-Humusformen sind generell meist anecische und endogäische Regenwürmer maßgeblich beteiligt, indem sie organische Substanz in den Boden einarbeiten und den mineralischen Oberboden intensiv durchmischen (Angst et al., 2022). Endogäische Arten, die bevorzugt den mineralischen Oberboden bewohnen, wurden vermehrt an Feuchtmull-Standorten des Untersuchungsgebiets nachgewiesen. Hierzu gehören *Aporrectodea caliginosa* und *Octolasion tyrtaeum*, die für die Durchmischung des Bodens und eine stabile Bodenstruktur wichtig sind. Anecische Regenwürmer waren in den Feuchthumusformen nicht vorhanden, was auf die ungünstigen Bedingungen für tiefgrabende Arten hinweist. Die hohe Bodenfeuchte und die teilweise niedrigen pH-Werte wirken für diese Gruppe hemmend. An den staunassen Untersuchungsstandorten konnten sich aerohydromorphe Mull-Humusformen (Feucht-F-Mull und Feucht-L-Mull) trotz des Fehlens anecischer Regenwürmer ausbilden. Die Bioturbation im humosen Mineralboden ist hier somit vor allem die Leistung endogäischer Regenwürmer sowie von *Lumbricus rubellus*.

Epigäische Arten dominieren, insbesondere in Feuchtmoder-Standorten, wo sie als oberflächenbewohnende Arten wesentlich zur Zersetzung der organischen Substanz beitragen. Häufig nachgewiesene Arten waren *Lumbricus rubellus*, *Dendrobaena octaedra* und *Eiseniella tetraedra*. Während *D. octaedra* und *E. tetraedra* eher kleine Streubewohner sind, bewohnt der deutlich größere Art *L. rubellus* eher den Mineralboden und trägt zur Bioturbation bei.

Kleinringelwürmer (Enchyträen u. a.) sind mit den Regenwürmern eng verwandt, tragen aber aufgrund ihrer geringeren Größe (mehrheitlich 1-20 mm) auf einer anderen Skalenebene zu Zersetzung, Durchmischung und Gefügebildung im Boden bei. An Mull-Standorten sind Kleinringelwürmer überwiegend im oberen Mineralboden aktiv, der durch die Tätigkeit der endogäischen Regenwürmer eine krümelige Struktur aufweist (Graefe, 2004). In Moder-Profilen besiedeln die Tiere dagegen überwiegend die organischen Auflagehorizonte und meiden den basenarmen Mineralboden. Diese für gut belüftete Standorte typische Tiefenverteilung wird an stark stau- oder grundwasserbeeinflussten Standorten mit aerohydromorphen Humusformen zusätzlich durch Staunässe und damit einhergehend Sauerstoffmangel beeinflusst.

Kleinringelwürmer zeigen artabhängig unterschiedliche Toleranz gegenüber Versauerung und Vernässung. Hinsichtlich der Bodenfeuchte lassen sich drei Gruppen unterscheiden (Graefe & Schmelz, 1999): 1. Frischezeiger, die Vernässung meiden, 2. Feuchtezeiger, die bevorzugt in nassen Böden vorkommen und 3. indifferente Arten, die eine große Bandbreite von Feuchteverhältnissen vertragen. Insbesondere die Feuchtezeiger haben eine höhere Toleranz gegenüber nässebedingtem Sauerstoffmangel. Die Abundanz der Kleinringelwürmer nimmt vom Feucht-L-Mull zum Feucht-Moder zu. Außerdem kommen neben Frischezeigern auch Feuchtezeiger in allen Feuchthumusformen vor (Beylich et al. in Vorb.).

An den meisten untersuchten Projektstandorten wurden Feuchtezeiger nachgewiesen. Ihre Anteile schwankten jedoch sowohl zeitlich als auch räumlich erheblich. Häufig vorkommende Feuchtezeigerarten waren *Cognettia glandulosa* und *Marionina simillima*. Die Tiefenverteilung der drei Zeigergruppen an jedem Untersuchungstermin spiegelt jeweils den aktuellen Staunäseeinfluss in der organischen Auflage und im oberen Mineralboden wider. Die zeitliche Variabilität wurde mit Hilfe der dreimaligen Aufnahme an den Intensivstandorten deutlich. Dabei war zu erkennen, dass die Gesamtabundanz der Kleinringelwürmer stark mit der Bodenfeuchte schwankt (Beylich et al. in Vorb.).

Eine längere Trockenphase im Herbst 2022 kann den vorübergehenden Wegfall der Feuchtezeiger zur Folge haben. Nach mehrmonatigem Wasserüberstau im Frühjahr 2023 konnten dagegen bei A1, wie auch den übrigen Intensivstandorten, keine Frischezeiger nachgewiesen werden (Frank et al., 2024). Die verbleibenden nassetoleranten Arten konzentrierten sich auf die obersten Zentimeter des Humusprofils. Die Zersetzungsleistung ist in dieser Situation eingeschränkt. Nach Abtrocknung des Bodens besiedelten auch Frischezeiger wieder die oberen Profilmillimeter, während die Feuchtezeiger im darunter liegenden, schlecht belüfteten Mineralboden vorherrschten (Oktober 2023) (Abbildung 20).

Insgesamt wurden Frischezeiger bei wassergesättigten Bedingungen nur selten nachgewiesen, besiedelten jedoch nach Trockenphasen wieder den oberen mineralischen Boden. Die hohe zeitliche Dynamik der Tiefenverteilung der Kleinringelwürmer kann als charakteristisch für aerohydromorphe Humusformen angesehen werden.

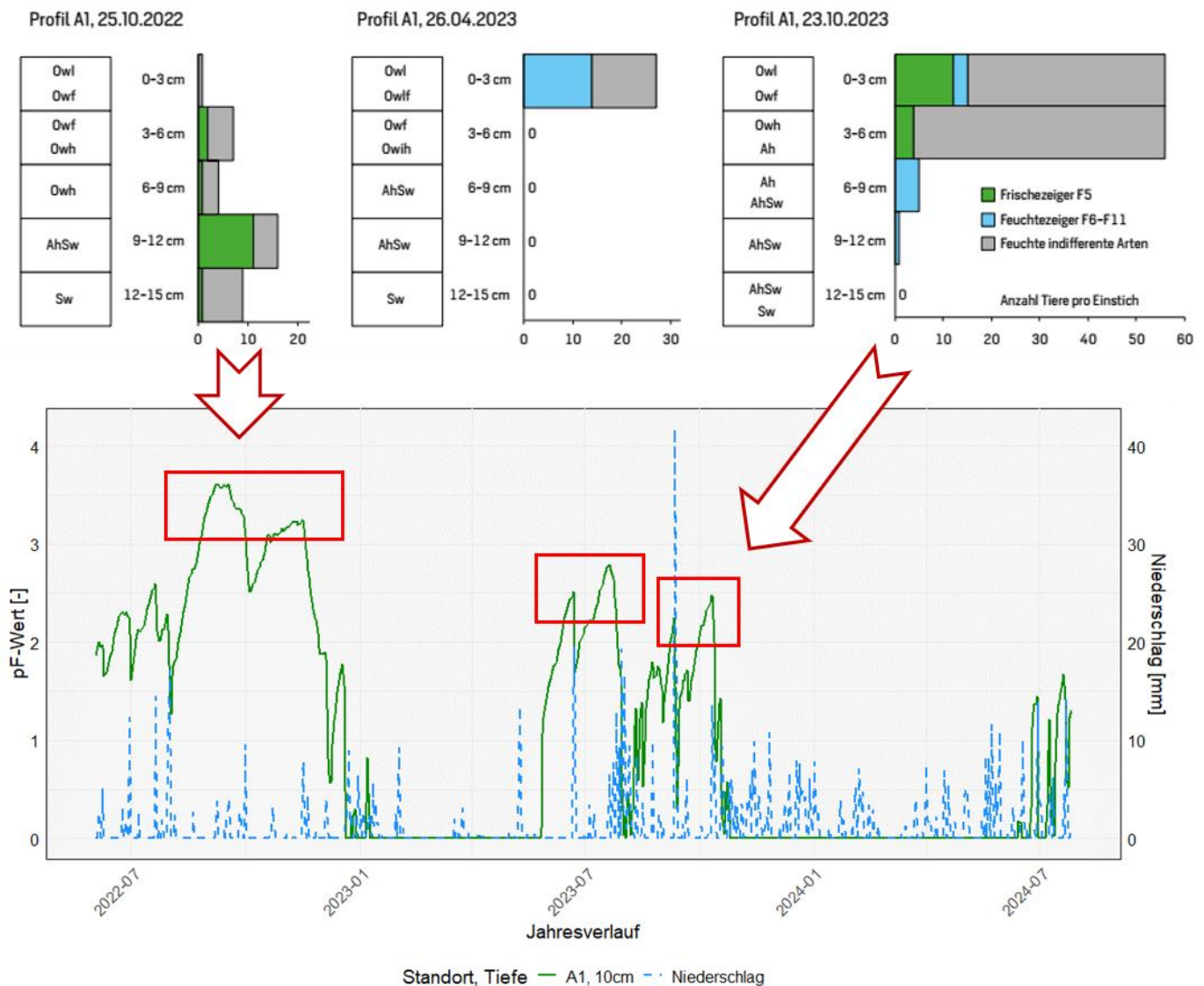


Abbildung 20: Oben: Anzahl Kleinringelwürmer pro Einstich für die drei Aufnahmen am Intensivstandort A1 sowie die Zuordnung als Frische-/Feuchtezeiger. Unten: Jahresverlauf der Bodenwasserspannung von Juli 2022 bis Juli 2024 am Intensivstandort A1 in 10 cm Tiefe mit trockenen Phasen (rot markiert) (Frank et al., 2024).

d) Arbeitspaket 4: Räumliche Modellierung

Um räumliche bodenökologische Muster anhand der Humusform als Indikator flächig erfassen und analysieren zu können (Upscaling), werden räumliche Modelle benötigt, die basierend auf bodenökologischen Standortdaten aus flächenhaft verfügbaren Umweltdaten verlässliche Vorhersagen für Humusformen ableiten. Ziel war es hierbei, die Korrelation von Merkmalen der Feuchthumusformen mit weiteren Umweltvariablen (z. B. dem Mikorelief und der Vegetation) darzustellen. Auch die räumlichen Muster der aufgenommenen Feuchthumusformen im Untersuchungsgebiet konnte so aufgezeigt werden. Abschließend können die gemessenen chemischen Eigenschaften der Feuchthumusformen – wie pH-Wert und C/N-Verhältnis – auf eine größere Fläche (z. B. ein gesamtes Waldgebiet) übertragen und in Karten dargestellt werden. Allgemein werden derartige Modelle für bodenkundliche Fragestellungen unter dem Konzept „Digital Soil Mapping“ zusammengefasst (Brevik et al., 2016; Nussbaum et al., 2023). Die anschließende Regionalisierung dient dazu, räumliche Muster und die Verteilung dieser Merkmale in einem Untersuchungsgebiet zu erkennen und vorherzusagen (Wellbrock et al., 2016).

Zur Erhebung der Daten wurde ein detailliertes digitales Geländemodell (DGM) mit Hilfe von Laserscanning-Daten erstellt, das auf einer Trägerdrohne (DJI Matrice 600) montiert war. Dieses DGM lieferte genaue Höheninformationen, welche die Grundlage für die Modellierung von Reliefvariablen wie Neigung, Krümmung und Feuchteindex bildete. Auch der SAGA Wetness Index ist ein topografischer Indikator, der die potenzielle Bodenfeuchte in einem Gelände abschätzt. Er basiert auf dem Verhältnis zwischen dem Zufluss an Wasser an einem Punkt im Gelände und der Hangneigung, die das Abflusspotential des Wassers beschreibt (Böhner et al., 2001).

Für die Analyse der Verteilungsmuster wurden Methoden des maschinellen Lernens, wie etwa das Random Forest-Modell, eingesetzt (van der Westhuizen et al., 2023). Die Anwendung von Random Forest-Modellen erlaubte räumliche Vorhersagen für verschiedene Bodenmerkmale wie pH-Wert und C/N-Verhältnis. In Kombination mit geostatistischen Verfahren, wie Kriging zur Residueninterpolation (Hengl et al., 2018), ließen sich detaillierte räumliche Karten erstellen. Diese Karten zeigen, wie bodenchemische Parameter (z. B. C/N-Verhältnis) in Abhängigkeit von Standortfaktoren variieren und in welchen Gebieten bestimmte Humusformen vorkommen.

Zudem zeigen die Modellierungen, dass Feuchthumusformen eng mit dem Mikrorelief sowie den vorhandenen Baumbeständen verknüpft sind. Insbesondere die Hangneigung und Krümmung des Geländes wirken sich auf die Ausbildung von Feuchthumusformen aus, da diese topografischen Indizes eng mit der Bodenfeuchte zusammenhängen. Das Mikrorelief im Inkmannsholz spielt somit eine entscheidende Rolle bei der Verteilung aerohydromorpher Humusformen. Bereiche mit Senken, Vertiefungen oder flachen, wenig geneigten Flächen neigen dazu, Wasser länger zu speichern, was wiederum den Zersetzungsprozess beeinflusst und die Ansammlung von Laubstreu begünstigt.

Ebenso konnte festgestellt werden, dass die Verteilung der Humusformen von der Baumartenzusammensetzung des Waldbestandes beeinflusst wird. Aerohydromorphe Humusformen, wie Feucht-F-Mull oder Feucht-L-Mull, treten vermehrt in Bereichen auf, in denen Bäume wie Esche oder Schwarzpappel dominieren, die gut an feuchte Bedingungen angepasst sind. Die Laubstreu dieser Bäume wird schnell von Bodenmikroorganismen zersetzt. Ältere Eichenbestände wiederum korrelieren oft mit moderartigen Humusformen aufgrund schwer zersetzbarer Eichenstreu an den Standorten.

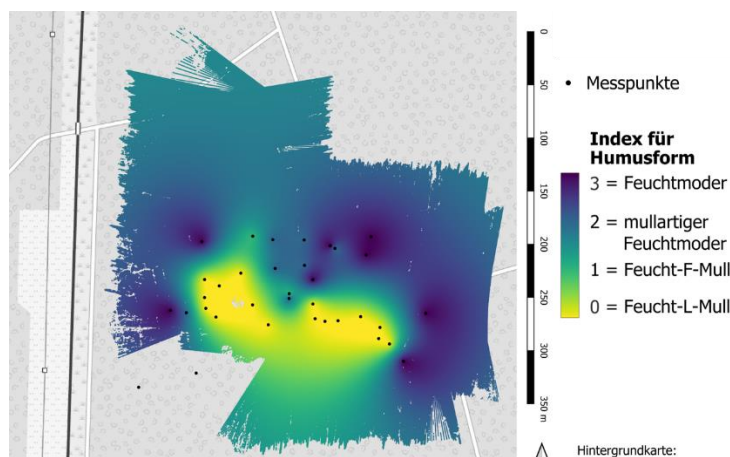


Abbildung 21: Verbreitung der Feuchthumusformen (nach Interpolation mit Ordinary Kriging) (N. Hellwig, 2024, unveröffentlicht).

Ein weiteres Ergebnis zeigt, dass lokale Besonderheiten wie Gräben und Bombentrichter die Verbreitung von Feuchthumusformen beeinflussen können. Diese topografischen Besonderheiten führen zu Störungen im Oberboden, Veränderungen des pH-Wertes und des C/N-Verhältnisses (beides erhöht) und auch zu spezifischen Wasserverhältnissen, die das Bodengefüge und die Humusform stark prägen. So lassen sich in diesem Bereich oft klare Abgrenzungen zwischen Auflage- und Mull-Humusformen erkennen (Abbildung 21).

Ein weiterer wesentlicher Punkt war die potenzielle Veränderung der räumlichen Verbreitung von Feuchthumusformen durch den Klimawandel. Basierend auf Klimawandelszenarien (RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP

8.5) lässt sich abschätzen, dass ein Temperaturanstieg und veränderte Niederschlagsmuster langfristig die Bodenbedingungen in der Region beeinflussen werden (Walthert et al., 2015; Höltermann & Jessel, 2019; Pluess et al., 2022). Zum Beispiel könnten warme und trockene Sommerperioden die Bildung von Feuchthumusformen in den Waldgebieten reduzieren und stattdessen aeromorphe Humusformen begünstigen. Eine zentrale Frage bleibt daher, wie stabil und resilient Feuchthumusformen gegenüber klimatischen Veränderungen sind.

e) Arbeitspaket 5: Transfer in die forstliche Praxis

Im Projekt wurde eine an die Forstpraxis gerichtete Broschüre zu forstlichen Handlungsempfehlungen erarbeitet (Fornfeist et al., 2025). Im Vorfeld erfolgte eine Literaturrecherche zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Feuchtwälder und möglichen Anpassungsmaßnahmen. Die Ergebnisse der Literaturrecherche zu bisherigen Erkenntnissen und Empfehlungen wurden mit den Projektergebnissen kombiniert und in einer Broschüre zusammengefasst. Diese bietet neben einer Einführung in verschiedene Feuchtwaldtypen, deren ökologische Funktionen und die besondere Gefährdung durch den Klimawandel, konkrete Empfehlungen für die Forstpraxis aus sechs Themenbereichen. Jede Empfehlung wird ausführlich erläutert, einschließlich des Hintergrunds, der praktischen Umsetzung im Wald und möglicher Förderprogramme. Ziel der Broschüre ist es, die Forstpraxis für die Bedeutung und Schutzwürdigkeit von Feuchtwaldökosystemen zu sensibilisieren und konkrete Maßnahmen zu deren Erhalt anzustoßen, wie beispielsweise die Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushaltes oder die Minimierung der Befahrung. Besonders hervorgehoben wird die Funktion dieser Ökosysteme als Kohlenstoffspeicher im Kontext des Klimawandels.

Im Rahmen des Projekts fanden zudem mehrere Veranstaltungen zum Wissenstransfer und zum Austausch mit der Forstpraxis statt. Bereits im Frühjahr 2022 wurde eine Kick-off-Veranstaltung mit Exkursion ins Projektgebiet durchgeführt, an der neben den Projektpartnern Vertreter des Regionalforstamtes Münsterland und

der Universität Münster teilnahmen. Im Herbst 2023 folgte eine Exkursion für Waldbesitzende und Interessierte, bei der erste Ergebnisse zu Feuchthumusformen, Bodenfeuchte, Bodenfauna, Vegetation und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel vorgestellt und diskutiert wurden (Abbildung 22). Darüber hinaus wurde das Projekt in den Jahren 2023 und 2024 an mehreren Terminen innerhalb der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalens präsentiert.



Abbildung 22: Exkursion für Waldbesitzende in das Untersuchungsgebiet Wolbecker Tiergarten im Oktober 2023. Foto: Michael Elmer (Wald und Holz NRW).



Abbildung 23: Exkursion in den Arnsberger Wald im Rahmen der Fortbildung des Forstlichen Bildungsprogramms von Wald und Holz NRW im Juni 2024. Foto: Max Fornfeist (Wald und Holz NRW).

Im Juni 2024 wurde eine Fortbildung im Rahmen des Forstlichen Bildungsprogramms von Wald und Holz NRW in Arnsberg unter dem Titel „Bedeutung des Bodens in Feuchtwäldern – Erkenntnisse aus der Forschung für die Forstpraxis“ mit 20 Teilnehmenden durchgeführt (Abbildung 23). Nach einer theoretischen Einführung zu Projektergebnissen und forstlichen Handlungsoptionen, wurden diese vor allem mit dem Bezug zu Humusformen und Böden bei einer Exkursion anschaulich vermittelt.

Im Oktober 2024 wurde zudem eine Tagung zum Thema „Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen“ in Münster durchgeführt. Bei der zweitägigen Abschlusstagung des BioFeuchtHumus-Projekts nahmen insgesamt mehr als 40 Personen teil. Neben den Projektergebnissen wurden auch weitere Forschungsergebnisse zu Böden und Humusformen, beispielsweise durch den Geologischen Dienst NRW, vorgestellt. Bei einer Podiumsdiskussion mit Vertretern aus Bodenkunde, Naturschutz und Forstpraxis ging es insbesondere um die praktische Umsetzung von Maßnahmen in Feuchtwäldern.

Das Projekt wurde bei Tagungen in Form von Vorträgen und Postern vorgestellt, u. a. beim Waldklimafonds-Kongress 2022 in Göttingen, der Tagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (DBG) 2022 in Trier und 2023 in Halle und bei der Tagung der International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) 2024 in Stockholm.

Im Rahmen des Projekts wurden zahlreiche wissenschaftliche Artikel veröffentlicht, ergänzt durch praxisorientierte Publikationen. Hervorzuheben sind zwei Beiträge in der Zeitschrift AFZ – Der Wald. Zudem erschien ein weiterer Beitrag auf der Online-Plattform Waldwissen.net (s. Kapitel 4: Veröffentlichungen).

dem erschien ein weiterer Beitrag auf der Online-Plattform Waldwissen.net (s. Kapitel 4: Veröffentlichungen).

3. Schlussfolgerungen

Die aerohydromorphen Humusformen konnten morphologisch weiter differenziert werden. Geprägt sind diese Humusformen durch die periodische Wassersättigung und die daraus resultierenden anaeroben Verhältnisse. An den untersuchten Standorten wurden dabei folgende Merkmale erfasst: das Vorkommen spezifischer Zeigerpflanzen für Feuchtstandorte, das Auftreten von Redoxmerkmalen, schwarze und schmierige Blätter sowie eine stapelartige Lagerung des Materials. Solche Humusformen, die durch entsprechende Zeigerpflanzen in der Krautschicht gekennzeichnet sind, lassen sich bei Veränderungen im Wasserhaushalt, beispielsweise durch Grabenverschlüsse oder klimawandelbedingte Auswirkungen, schnell und unkompliziert erfassen.

Die chemischen Eigenschaften aerohydromorpher Humusformen zeigen ähnliche Muster wie die aeromorphen Humusformen: Mull-Humusformen weisen ein engeres C/N-Verhältnis und höhere pH-Werte auf als Moder-Humusformen. Der Einfluss des Wasserhaushalts scheint diese Zusammenhänge nicht oder nur geringfügig zu beeinflussen. Dennoch trägt die periodische Wassersättigung dazu bei, dass die C-Vorräte an aerohydromorphen Standorten höher sind als an aeromorphen.

Unterschiede zwischen den beiden Humusformtypen lassen sich jedoch feststellen. So treten an aerohydromorphen Standorten spezifische Feuchtezeiger sowohl bei Regenwürmern als auch bei Kleinringelwürmern auf. Feucht-L-Mull, Feucht-F-Mull und Feucht-Moder weisen eine zunehmende Dominanz von Feuchtezeigern auf, wobei die Artenzahlen an den aerohydromorphen Standorten höher sind, da diese zusätzlich zu den Arten aeromorphen Humusformen vorkommen. Eine bemerkenswerte Eigenschaft ist die hohe Biomasse epigäischer Regenwürmer, insbesondere von *Lumbricus rubellus*, an Feucht-Mull-Standorten. Diese Art übernimmt zusammen mit endogäischen Regenwürmern die Bioturbation, da anecische Regenwürmer in diesen Böden fehlen.

Aerohydromorphe Standorte zeigen eine stärkere zeitliche und räumliche Variabilität, die eng mit den Vernäsungsverhältnissen verknüpft ist. Saisonale Veränderungen führen phasenweise zu einer Dominanz von Feuchtezeigern. Vertikal betrachtet variiert die Verteilung von Kleinringelwürmern entlang des Bodenfeuchtegradienten, was zeitweise zu einer „Zweiteilung“ des Profils führt. Daher ist der Beprobungstermin bei wechselfeuchten Standorten entscheidender als bei trockenen Standorten.

Die räumliche Abgrenzung von Feuchthumusformen gegenüber aeromorphen Humusformen korreliert mit dem Mikrorelief und der Zusammensetzung der Baumbestände. Diese räumlichen Muster spiegeln nicht nur die Verteilung der Baumbestände wider, sondern auch lokale Besonderheiten wie Gräben und kleine Senken. Durch die Kombination moderner Technologien, etwa drohnenbasierter Höhenmodelle mit klassischen bodenkundlichen und forstlichen Kartierungen können detaillierte, räumlich differenzierte Informationen über Feuchthumusformen und bodenchemische Eigenschaften gewonnen werden. Diese datenbasierten Modelle liefern wertvolle Erkenntnisse mit hoher praktischer Relevanz für die Forstwirtschaft.

Aus den bodenökologischen Erkenntnissen konnten Handlungsempfehlungen für die Forstpraxis zur Anpassung von Feuchtwäldern an den Klimawandel abgeleitet werden. Konkrete Empfehlungen wurden in einer Broschüre zusammengefasst und veröffentlicht – beispielsweise der partielle Verschluss von Entwässerungsgräben zur Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushaltes oder eine Erhöhung des Anteils heimischer, standorttypischer Laubbaumarten. Diese Broschüre bietet der Forstpraxis eine fundierte Informationsgrundlage, um konkrete Maßnahmen im Rahmen der Bewirtschaftung umzusetzen.

4. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Projektes fanden keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen statt.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Im Rahmen des Projektes wurden Handlungsempfehlungen zum waldbaulichen Umgang mit Feuchtwäldern für die Forstpraxis erarbeitet und an die Forstpraxis sowie verschiedene Multiplikatoren weitergegeben. Diese können einen Beitrag zur Erhaltung und zur Anpassung von Feuchtwäldern mitsamt ihren zahlreichen Funktionen, inkl. der Bereitstellung von Wertholz, im Klimawandel leisten. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie die Broschüre zu den Handlungsoptionen werden über das Projektende hinaus, u. a. über die Webseiten der Projektpartner, verfügbar sein (TP 2).

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Naturschutz und Klimaanpassung: Die erarbeiteten Indikatoren und Messverfahren zur Überwachung der Bodenfeuchte und der pF-Werte können im Naturschutz zur besseren Bewertung von Klimawandelrisiken in Feuchtwäldern genutzt werden. Dies könnte zu neuen Strategien zur Renaturierung und Anpassung von Feuchtwäldern führen, die besonders sensitiv gegenüber den Folgen des Klimawandels sind. Langfristig könnten Kommunen, Naturschutzorganisationen und Landwirte die entwickelten Methoden einsetzen, um Waldökosysteme resilienter gegenüber möglichen Perioden von Trockenstress zu machen.

Transferstrategien und wirtschaftlicher Nutzen: Der Transfer der Forschungsergebnisse könnte über Schulungen, Workshops und die Entwicklung von Monitoring-Tools erfolgen, die forstwirtschaftliche Betriebe oder Naturschutzorganisationen zur Bewertung ihrer Böden einsetzen können. Die Integration in digitale Plattformen ist ebenfalls denkbar, um den Wert der Kohlenstoffbindung sowie die unterschiedlich auftretenden Humusformen in Feuchtwäldern sichtbar und das Wissen nutzbar zu machen. In Kooperation mit Forst- und Umweltverbänden könnte die Entwicklung von Best-Practice-Modellen vorangetrieben werden.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Rahmen des Projektes haben Forstverwaltung, Wissenschaft und Naturschutz eng zusammengearbeitet. Zudem wurden auch in Form von zahlreichen Veranstaltungen Kontakte zur Forstpraxis und anderen Vertretern aus der Wissenschaft geknüpft. Dieses Netzwerk kann auch zukünftig zum Austausch von Wissen genutzt werden. Die Grundlagen für eine Verstetigung der Kooperation zwischen Forstpraxis, Naturschutz und Wissenschaft konnten so geschaffen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für zukünftige Forschungsprojekte in ähnlichen Konstellationen dienen. Auch nach Projektende werden die bestehenden Bodenfeuchtemessstationen durch das Regionalforstamt Münsterland weiter betreut.

5. Erkenntnisse von Dritten

Die Projektpartner befanden sich während der Projektlaufzeit im Austausch mit anderen Forschungsprojekten und -einrichtungen. Überschneidungen im Untersuchungsgebiet ergaben sich beispielsweise mit dem bis April 2024 laufenden Waldklimafonds-Projekt BiCO₂, das zudem thematische Parallelen und gemeinsame Projektpartner aufwies. Inhaltliche und räumliche Überschneidungen gab es auch mit dem bereits abgeschlossenen Waldklimafonds-Projekt „Waldgürtel MS – Fit für den Klimawandel“. Die Universität Osnabrück stand weiterhin in engem Austausch mit dem Geologischen Dienst NRW.

6. Veröffentlichungen

Broschüre Handlungsempfehlungen

Fornfeist, M., Frank, T., Santora, L., Bergmann, M., Brauckmann, H.-J., Broll, G., Elmer, M., Linnemann, B., Theisinger, W., Wöllecke, J. (2025). Bodenökologie in Feuchtwäldern – Handlungsempfehlungen für die Forstpraxis.

Zeitschriften o. ä.

Fornfeist, M., Santora, L., Frank, T., Linnemann, B., Bergmann, M., Elmer, M. (2024). Feuchtwälder im Klimawandel – Projekt BioFeuchtHumus. AFZ-DerWald 15: 12-15.

Frank, T., Beylich, A., Graefe, U., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2024). Feuchtwälder im Klimawandel – Bodenökologische Prozesse. AFZ-Der Wald 15, 16-20.

Fornfeist, M., Elmer, M., Theisinger, W., Frank, T., Santora, L., Broll, G., Beylich, A., Graefe, U., Brauckmann, H.-J., Wöllecke, J., Linnemann, B. (2024). Feuchtwälder im Klimawandel. Waldwissen. (<https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/naturschutz/gewaesser/feuchtwaelder-im-klimawandel>).

Frank, T., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2023). Feuchthumusformen und der Bodenwasserhaushalt von Waldökosystemen im Münsterland. Mitteilungen der DBG, Bd.121.

Linnemann, B., Santora, L., Frank, T., Wöllecke, J., Elmer, M., Fornfeist, M., Broll, G. (2023). Feuchthumusformen und Bodenvegetation in Waldökosystemen im Münsterland. Mitteilungen der DBG, Bd. 121.

Haberer, J., Schilli, C., Frank, T., Broll, G. (2023). Vorkommen von Feucht- und Nasshumusformen an zwei Standorten im westlichen Münsterland. Mitteilungen der DBG, Bd. 121.

Graefe, U., Frank, T., Beylich, A., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2023). Untersuchungen der Anneliden-Fauna (Regenwürmer und Kleinringelwürmer) von Feuchthumusformen im Münsterland – ein Beitrag zum Projekt „BioFeuchtHumus“. Mitteilungen der DBG, Bd. 121.

Frank, T., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2023). Humus Forms of Moist and Wet Forest Stands. A Review. International Journal of Plant Biology, 14, 780-796, doi:10.3390/ijpb14030058.

Wachendorf, C.; Milbert, G.; Broll, G.; Frank, T.; Graefe, U.; Beylich, A. (2023). A concept for a consolidated humus form description – an updated version of the German humus form systematics. Journal of Plant Biology, 14, 658–686, doi:10.3390/ijpb14030050.

Frank, T., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2022). Humusformen als Indikatoren für die Zersetzer-gesellschaft in feuchten Waldökosystemen (Projekt: „BioFeuchtHumus“). Mitteilungen der DBG, Bd.120.

Poster

Linnemann, B., Santora, L., Frank, T., Wöllecke, J., Elmer, M., Fornfeist, M., Broll, G. (2023). Feuchthumusformen und Bodenvegetation in Waldökosystemen im Münsterland.

Haberer, J., Schilli, C., Frank, T., Broll, G. (2023). Vorkommen von Feucht- und Nasshumusformen an zwei Standorten im westlichen Münsterland.

Graefe, U., Frank, T., Beylich, A., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2023). Untersuchungen der Anneliden-Fauna (Regenwürmer und Kleinringelwürmer) von Feuchthumusformen im Münsterland – ein Beitrag zum Projekt „BioFeuchtHumus“.

Frank, T., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2023). Feuchthumusformen und der Bodenwasserhaushalt von Waldökosystemen im Münsterland.

Frank, T., Brauckmann, H.-J., Broll, G. (2022). Humusformen als Indikatoren für die Zersetzer-gesellschaft in feuchten Waldökosystemen (Projekt: „BioFeuchtHumus“). Mitteilungen der DBG, Bd.120.

Vorträge

Tagungen

Frank, T. (2024). Moist humus forms and the soil water balance of forest ecosystems in Northwestern Germany. IUFRO Conference 2024, Stockholm.

Frank, T. (2024). Feuchthumusformen und Bodenwasserhaushalt von Waldökosystemen im Münsterland unter dem Einfluss des Klimawandels. Gd Forum, Geologischer Dienst NRW.

Frank, T. (2024). Feuchthumusformen und der Bodenwasserhaushalt von Waldökosystemen unter dem Einfluss des Klimawandels im Münsterland. Osnabrücker Geographisches Kolloquium, Universität Osnabrück.

Frank, T. (2023). Feuchthumusformen und der Bodenwasserhaushalt von Waldökosystemen im Münsterland. DBG Tagung 2023, Halle/Saale.

Frank, T. (2022). Humusformen als Indikatoren für die Zersetzer-gesellschaft in feuchten Waldökosystemen (Projekt: „BioFeuchtHumus“). Waldklimafondskongress, Göttingen.

Fortbildung 2024

Fornfeist, M., Frank, T., Brauckmann, H.-J. (2024). Projekt „BioFeuchtHumus“ – Humusformen als Indikatoren für die Zersetzer-gesellschaft in Zeiten des Klimawandels. Fortbildungsveranstaltung Bedeutung des Bodens in Feuchtwäldern – Erkenntnisse aus der Forschung für die Forstpraxis, Arnsberg.

Fornfeist, M., Elmer, M. (2024). Forstliche Handlungsoptionen zum Umgang mit Feuchtwäldern. Fortbildungsveranstaltung Bedeutung des Bodens in Feuchtwäldern – Erkenntnisse aus der Forschung für die Forstpraxis, Arnsberg.

Abschluss-tagung 2024

Fornfeist, M., Santora, L., Frank, T. (2024). Übersicht zum Projekt „BioFeuchtHumus“. Tagung Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen, Münster.

Frank, T., Broll, G. (2024). Feuchthumusformen und Bodenwasserhaushalt. Tagung Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen, Münster.

Santora, L., Linnemann, B. (2024). Vegetation an Waldstandorten mit Feuchthumusformen. Tagung Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen, Münster.

Beylich, A., Graefe, U., Brauckmann, H.-J. (2024). Kleinringelwürmer und Regenwürmer an Feuchthumus-Standorten. Tagung Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen, Münster.

Hellwig, N., Frank, T. (2024). Räumliche Verbreitung von Feuchthumusformen. Tagung Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen, Münster.

Fornfeist, M., Elmer, M. (2024). Handlungsempfehlungen für die Forstpraxis. Tagung Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen, Münster.

Sonstige

Fornfeist, M. (2024). Projekt „BioFeuchtHumus“ – Humusformen als Indikatoren für die Zersetzer-gesellschaft in Zeiten des Klimawandels. Teambesprechung Waldnaturschutz Wald und Holz NRW, Videokonferenz.

Fornfeist, M. (2023). Projekt „BioFeuchtHumus“ Bodenbiodiversität feuchter Waldökosysteme – Humusformen als Indikatoren für die Zersetzer-gesellschaft in Zeiten des Klimawandels. Fachbereichsbesprechung Wald und Holz NRW, Videokonferenz.

Flyer

Fornfeist, M., Frank, T., Santora, L., Broll, G., Brauckmann H.-J., Wöllecke, J., Linnemann, B., Beylich, A., Elmer, M. (2023). BioFeuchtHumus – Humusformen als Indikatoren für die Zersetzer-gesellschaft in Zeiten des Klimawandels.

Fornfeist, M., Bergmann, M., Beylich, A., Brauckmann, H.-J., Broll, G., Elmer, M., Frank, T., Graefe, U., Linnemann, B., Santora, L., Wöllecke, J. (2024). Feuchtwälder im Münsterland. Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen.

Pressemitteilungen

Wald und Holz NRW (2024). Feuchter Waldboden ist voller Leben und hilft dem Klima - Internationaler Tag des Artenschutzes am 03. März 2024.

Wald und Holz NRW (2024). Feuchtwälder im Klimawandel – wertvoll und schützenswert.

III. ANHANG

1. Teilvorhaben 1:

a) Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Projekt BioFeuchtHumus wurde ein Beitrag zur Bewertung bodenökologischer Eigenschaften in Feuchtwäldern erarbeitet, die im Rahmen von Klimaanpassungsmaßnahmen für die Forstwirtschaft und den Naturschutz notwendig sind. In den wechselfeuchten Wäldern des Kernmünsterlandes sind Feuchthumusformen auf Pseudogleyen weit verbreitet. Diese Standorte sind infolge des Klimawandels zunehmend von Trockenheit betroffen. Auswertungen der Bodenzustandserhebung Wald zeigen eine Häufung von Jahren mit erhöhtem Wasserstress für die Vegetation. Dies führt zu verschlechterten Lebensbedingungen für feuchthäufige Bodenorganismen, wie Regen- und Kleinringelwürmer, die wesentlich zur Ausbildung von Humusformen beitragen.

Humusformen, bestehend aus organischen Auflagehorizonten und dem obersten Mineralboden, sind ein Ergebnis der Zersetzung und Humifizierung, dienen als Lebensraum und als Indikator für die Bodenlebensgemeinschaft. Die aerohydromorphen Humusformen sind in der aktuellen Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 6) jedoch nur unzureichend differenziert, da eindeutige morphologische Merkmale fehlen. Im Projekt wurden die Humusform und die Wasserspannung von Böden mit wechselndem Wasserhaushalt an Standorten mit ausgeprägtem Mikorelief und vorkommenden Feuchtezeigern (Vegetation) untersucht. Angesichts zunehmender Dürreintensität durch den Klimawandel, insbesondere in den Eichen-Hainbuchen-Wäldern der Westfälischen Bucht, sind Informationen zum Wasserhaushalt und zur Bodenfeuchte essentiell, um die Auswirkungen auf Humusformen und die Vitalität feuchter Wälder zu bewerten.

Ziele des Projektes waren: (1) Identifikation morphologischer Merkmale von Feuchthumusformen, (2) Darstellung der Bodenfeuchtevariabilität im Jahresverlauf und (3) Aufnahme und Bewertung der Bodenorganismen und bodenchemischer Eigenschaften, die die Humusform beeinflussen. Die Untersuchungen erfolgten an acht Intensivstandorten und 56 weiteren Standorten.

b) Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Feuchthumusformen und bodenchemische Ergebnisse und Arbeitspaket 3: Bodenbiodiversität

Insbesondere verschiedene Formen von Feuchtmull und Feuchtmoder sind im Untersuchungsgebiet im Münsterland zu finden. An den 64 Untersuchungsstandorten wurden folgende Feuchthumusformen (Subtypen) nach AG Boden (2024) kartiert: Feucht L-Mull: 27 Standorte, Feucht F-Mull: 19 Standorte, Feuchtmoder: 18 Standorte. Diese lassen sich anhand ihrer morphologischen Eigenschaften noch in weitere Subtypen oder Varietäten untergliedern. Es wurden insgesamt 320 Humusformen an den 64 Standorten aufgenommen. Mit einem Vorkommen an 182 Standorten ist am häufigsten ein Feucht-L-Mull (MLF) vergeben worden. Danach folgen die Feucht-F-Mulle (MFF) an 47 Standorten. Beim Feucht-F-Mull konnte noch weiter in einen (feinhumusreichen) moderartigen Feucht-F-Mull (MFFmf) unterschieden werden. Bei den Feucht-Modern (AMF), welche an 21 Standorten vorkamen, war eine weitere Unterteilung in feinhumusreicher Feucht-Moder (AMFf) (23 Standorte) und mullartiger Feucht-Moder (AMFm) (9 Standorte) möglich. Die Subtypen und Varietäten AMFf, AMFm und MFFmf sind bisher in der KA 6 (AG Boden, 2024) für die Feuchthumusformen nicht näher beschrieben. Die chemischen Eigenschaften aero-hydromorpher Humusformen zeigen ähnliche Muster wie die aeromorpher Humusformen: Mull-Humusformen weisen ein engeres C/N-Verhältnis und höhere pH-Werte auf als Moder-Humusformen. Der Einfluss des Wasserhaushalts scheint diese Zusammenhänge nicht oder nur geringfügig zu beeinflussen. Dennoch trägt die periodische Wassersättigung dazu bei, dass die C-Vorräte an aerohydromorphen Standorten höher sind als an aeromorphen.

Unterschiede zwischen den beiden Humusformtypen lassen sich jedoch feststellen. So treten an aerohydromorphen Standorten spezifische Feuchtezeiger sowohl bei Regenwürmern als auch bei Kleinringelwürmern auf. Feucht-L-Mull, Feucht-F-Mull und Feucht-Moder weisen eine zunehmende Dominanz von Feuchtezeigern auf, wobei die Artenzahlen an den aerohydromorphen Standorten höher sind, da diese zusätzlich zu den Arten aeromorpher Humusformen vorkommen. Eine bemerkenswerte Eigenschaft ist die hohe Biomasse epigäischer Regenwürmer, insbesondere von *Lumbricus rubellus*, an Feucht-Mull-Standorten. Diese Art übernimmt zusammen mit endogäischen Regenwürmern die Bioturbation, da anecische Regenwürmer in diesen Böden fehlen.

Aerohydromorphe Standorte zeigen eine stärkere zeitliche und räumliche Variabilität, die eng mit den Vernäsungsverhältnissen verknüpft ist. Saisonale Veränderungen führen phasenweise zu einer Dominanz von Feuchtezeigern. Vertikal betrachtet variiert die Verteilung von Kleinringelwürmern entlang des Bodenfeuchtegradienten, was zeitweise zu einer „Zweiteilung“ des Profils führt. Daher ist der Beprobungstermin bei wechselfeuchten Standorten entscheidender als bei trockenen Standorten.

Arbeitspaket 4: Räumliche Modellierung

Die räumliche Abgrenzung von Feuchthumusformen gegenüber aeromorphen Humusformen korreliert mit dem Mikrorelief und der Zusammensetzung der Baumbestände. Diese räumlichen Muster spiegeln nicht nur die Verteilung der Baumbestände wider, sondern auch lokale Besonderheiten z. B. Gräben. Durch die Kombination moderner Technologien, etwa drohnenbasierter Höhenmodelle mit klassischen bodenkundlichen und forstlichen Kartierungen können detaillierte, räumlich differenzierte Informationen über Feuchthumusformen und bodenchemische Eigenschaften gewonnen werden. Diese datenbasierten Modelle liefern in der Kombination mit Klimawandelszenarien wertvolle Erkenntnisse mit hoher praktischer Relevanz für die Forstwirtschaft in der Untersuchungsregion.

c) Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

1. Die aerohydromorphen Humusformen konnten morphologisch weiter differenziert werden. Merkmale: das Vorkommen spezifischer Zeigerpflanzen für Feuchtwaldstandorte, das Auftreten von Redoxmerkmalen, schwarze und schmierige Blätter sowie eine stapelartige Lagerung des Materials. Die aerohydromorphen Humusformen, lassen sich bei Veränderungen im Wasserhaushalt schnell und unkompliziert erfassen.
2. Die chemischen Eigenschaften aerohydromorpher Humusformen zeigen ähnliche Muster wie die aeromorpher Humusformen: Mull-Humusformen weisen ein engeres C/N-Verhältnis und höhere pH-Werte auf als Moder-Humusformen. Der Einfluss des Wasserhaushalts scheint diese Zusammenhänge nicht oder nur geringfügig zu beeinflussen. Dennoch trägt die periodische Wassersättigung dazu bei, dass die C-Vorräte an aerohydromorphen Standorten höher sind als an aeromorphen.
3. An aerohydromorphen Standorten finden sich spezifische Feuchtezeiger sowohl bei Regenwürmern als auch bei Kleinringelwürmern. Feucht-L-Mull, Feucht-F-Mull und Feucht-Moder weisen eine zunehmende Dominanz von Feuchtezeigern auf, wobei die Artenzahlen an den aerohydromorphen Standorten höher sind, da diese zusätzlich zu den Arten aeromorpher Humusformen vorkommen. Eine bemerkenswerte Eigenschaft ist die hohe Biomasse epigäischer Regenwürmer, insbesondere von *Lumbricus rubellus*, an Feucht-Mull-Standorten. Diese Art übernimmt zusammen mit endogäischen Regenwürmern die Bioturbation, da anecische Regenwürmer in diesen Böden fehlen.
4. Die räumliche Abgrenzung von Feuchthumusformen gegenüber aeromorphen Humusformen korreliert mit dem Mikrorelief und der Zusammensetzung der Baumbestände. Diese räumlichen Muster spiegeln nicht nur die Verteilung der Baumbestände wider, sondern auch lokale Besonderheiten wie Gräben und kleine Senken. Durch die Kombination moderner Technologien, etwa drohnenbasierter Höhenmodelle mit klassischen bodenkundlichen und forstlichen Kartierungen können detaillierte, räumlich differenzierte Informationen über Feuchthumusformen und bodenchemische Eigenschaften gewonnen werden.

2. Teilvorhaben 2: Flächen- und Datenmanagement und Wissenstransfer in die Forstpraxis

a) Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Wesentliches Ziel des Teilvorhabens war es für Feuchtwälder Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu entwickeln und das Wissen an die Forstpraxis zu vermitteln. Im Staatswald von NRW sind Probeflächen ausgewählt worden, um die Zusammenhänge zwischen Humusformen, Bodenfeuchte, Zersetzergesellschaft, weiteren Bodenparametern und der Vegetation zu untersuchen, die schwerpunktmäßig vom Teilvorhaben 1 durchgeführt wurden. Im Fokus des Teilprojekts stand zudem die Funktion von Feuchtwäldern, Kohlenstoff vor allem im Boden zu speichern, im Klimawandel zu erhalten und zu stärken.

Neben der Auswahl und Absprache zu den Untersuchungsflächen sowie der Unterstützung der Geländeaufnahmen lag vor allem die Daten- und Literaturrecherche, die Ausarbeitung von waldbaulichen Handlungsoptionen sowie die Durchführung von Veranstaltungen zum Wissenstransfer in die Forstpraxis in der Verantwortung des Teilvorhabens.

b) Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Flächen- und Datenmanagement

In der Anfangsphase des Projektes stellte Wald und Holz NRW forstliche und bodenkundliche Daten für das Projektgebiet zusammen. Auch die Nutzung von Daten vorheriger Projekte im Untersuchungsgebiet unter Beteiligung von Wald und Holz NRW (Waldgürtel MS - Fit für den Klimawandel und BiCO₂) wurde ermöglicht. Im Teilprojekt fand zudem eine Literaturrecherche zum Wissenstand in allen Teilbereichen des Projektes statt.

Gemeinsam mit den Projektpartnern fand die Suche nach geeigneten Feuchthumusstandorten im Untersuchungsgebiet statt. Wald und Holz NRW unterstützte die Universität Osnabrück bei der finalen Festlegung der Untersuchungsstandorte.

Da sich alle Untersuchungsflächen im Staatswald befinden, übernahm Wald und Holz NRW die Absprache mit dem Regionalforstamt und der örtlichen Revierleiterin. Dies betraf vor allem die Auswahl der Untersuchungsflächen sowie die Untersuchungstermine, um mögliche Konflikte mit einer Jagd oder Holzerntemaßnahmen zu vermeiden. Wald und Holz NRW beantragte zudem die für die Projektpartner nötigen Genehmigungen zur Befahrung der Forstwege vom Regionalforstamt Münsterland.

Arbeitspaket 2: Feuchthumusformen

Wald und Holz NRW unterstützte das Teilvorhaben 1 bei der Humusformenkartierung und war am Aufbau der Bodenfeuchtemessstationen beteiligt.

Arbeitspaket 3: Bodenbiodiversität

Wald und Holz NRW unterstützte das Teilvorhaben 1 bei der Probenahme der Regenwürmer, die sich über insgesamt 64 Standorte in drei Aufnahmezyklen erstreckte.

Arbeitspaket 4: Räumliche Modellierung

Als Grundlage für die räumliche Modellierung der Feuchthumusformen erwies sich vor allem das Relief, das im Kernmünsterland oft von Entwässerungsgräben geprägt ist, als relevante Größe (TV 1). Zu diesen konnte Wald und Holz NRW Kartengrundlagen, Hintergrundinformationen und Erkenntnisse des abgeschlossenen Projektes „Waldgürtel MS – Fit für den Klimawandel“ bereitstellen.

Arbeitspaket 5: Transfer in die forstliche Praxis

Im Teilprojekt wurde eine Literaturrecherche zu Folgen des Klimawandels für Feuchtwälder und möglichen Anpassungsmaßnahmen durchgeführt. Besonders in den Blick genommen wurden die Böden und ihre Funktion als Kohlenstoffspeicher. Ausgehend von den Recherche- und den Projektergebnissen wurden waldbauliche Handlungsoptionen für die Forstpraxis erarbeitet, die zur Anpassung von Feuchtwäldern an den Klimawandel und zur Stärkung der Klimaschutzfunktion von Feuchtwäldern beitragen können. Diese wurden in einer Broschüre samt Hintergrundinformationen, Auswirkungen der Maßnahmen auf die Feuchtwaldökosysteme, konkrete Umsetzungsmöglichkeiten im Wald sowie finanziellen Förderoptionen veröffentlicht und über zahlreiche Stakeholder und Kontakte an die Forstpraxis verteilt.

Zur Vermittlung der Projektergebnisse an die Forstpraxis wurden mehrere Veranstaltungen unterschiedlicher Formate unter der Federführung von Wald und Holz NRW gemeinsam mit der Universität Osnabrück durchgeführt. Dies begann im Frühjahr 2022 mit einer Kick-off Veranstaltung mit Exkursion in das Projektgebiet. Neben den Projektpartnern nahmen einige Vertreter des Forstamtes Münsterland sowie der Universität Münster teil. Im Herbst 2023 fand zudem eine Exkursion für Waldbesitzende und Interessierte in das Projektgebiet statt, bei der erste Ergebnisse aus den Bereichen Feuchthumusformen, Bodenfeuchte, Bodenfauna, Vegeta-

tion und Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel vorgestellt und diskutiert wurden. Insgesamt 25 Personen nahmen teil. 2023 und 2024 wurde das Projekt bei internen Besprechungen von Wald und Holz NRW vorgestellt.

Im Sommer 2024 wurde eine Fortbildung im Rahmen des Forstlichen Bildungsprogramms von Wald und Holz NRW in Arnsberg unter dem Titel "Bedeutung des Bodens in Feuchtwäldern – Erkenntnisse aus der Forschung für die Forstpraxis" mit 20 Teilnehmenden durchgeführt. Nach einer theoretischen Einführung zu Projektergebnissen und forstlichen Handlungsoptionen wurden diese vor allem mit dem Bezug zu Humusformen und Boden bei einer Exkursion anschaulich vermittelt.

Zum Projektabschluss wurde im Herbst 2024 eine Tagung zum Thema „Feuchtwälder im Münsterland – Humusformen als Indikatoren für Bodenorganismen“ in Münster durchgeführt.

Neben zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die vor allem im Rahmen des 1. Teilprojektes durchgeführt wurden, koordinierte Wald und Holz NRW die Veröffentlichung von zwei Artikeln in der Zeitschrift AFZ-Der Wald und in dem Portal waldwissen.net.

c) Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Das Teilprojekt konnte sicherstellen, dass die zahlreichen Untersuchungen auf den Staatswaldflächen durchgeführt werden konnten. Ein wesentliches Ergebnis stellt die veröffentlichte Broschüre zu Handlungsempfehlungen zur Anpassung von Feuchtwäldern an den Klimawandel dar (Fornfeist et al., 2025). Diese ist vor allem an die Forstpraxis gerichtet und bietet eine fundierte Informationsgrundlage, um im Wald konkrete Maßnahmen umzusetzen. Beispiele sind:

- Erhöhung des Anteils heimischer, standorttypischer Laubbaumarten wie Ulme, Erle oder Weide je nach Feuchtwaldtyp.
- Schaffung und Erhaltung natürlich entstandener Lücken.
- Verschluss von Entwässerungsgräben und Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushaltes.
- Räumliche und zeitliche Minimierung der Befahrung feuchter Bereiche.
- Maßnahmen zur Vorbeugung starker Bodenverdichtung auf Rückegassen, z. B. durch breitere Reifen oder Bänder.
- Einstellung der forstlichen Bewirtschaftung in besonders feuchten, schwer erreichbaren und ertragschwachen Teilbereichen.
- Berücksichtigung von kleinräumigen Standortunterschieden bei der Planung und Durchführung von forstlichen Maßnahmen.

Im Bereich Wissenstransfer wurden unter der Federführung von Wald und Holz NRW verschiedene Veranstaltungen in Form von Exkursionen, Fortbildungen und Tagungen (s. auch AP 5) durchgeführt. Insgesamt nahmen über 100 Personen an den Veranstaltungen teil.

Auch die Veröffentlichungen in für die Forstpraxis relevanten Zeitschriften wie AFZ-Der Wald und waldwissen.net stellen wichtige Ergebnisse des Teilprojektes dar.

Literatur

- AG Boden, 2024:** Bodenkundliche Kartieranleitung: In zwei Bänden, Stuttgart, Hannover, in Kommission bei der E. Schweizerbart'schen Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, ISBN: 9783510968695.
- Angst, G., J. Frouz, J.W. van Groenigen, S. Scheu, I. Kögel-Knabner, N. Eisenhauer, 2022:** Earthworms as catalysts in the formation and stabilization of soil microbial necromass. *Global change biology* **47** (16), 75–82, DOI: 10.1111/gcb.16208.
- Anschlag, K., D. Tatti, N. Hellwig, G. Sartori, J.-M. Gobat, G. Broll, 2017:** Vegetation-based bioindication of humus forms in coniferous mountain forests. *Journal of Mountain Science* **14** (4), 662–673, DOI: 10.1007/s11629-016-4290-y.
- Arbeitskreis Standortkartierung (2016):** Forstliche Standortsaufnahme, Eching: IHW-Verlag, 7. Auflage.
- Bakker, J. (2008):** Increasing the utility of Indicator Species Analysis. *Journal of Applied Ecology* **45**, 1829–1835.
- Bārdule, A., A. Butlers, A. Lazdiņš, I. Līcīte, U. Zvirbulis, R. Putniņš, A. Jansons, A. Adamovičs, Ģ. Razma, 2021:** Evaluation of Soil Organic Layers Thickness and Soil Organic Carbon Stock in Hemiboreal Forests in Latvia. *Forests* **12** (7), 1–15, DOI: 10.3390/f12070840.
- Bartsch, N., E. Röhrig, M. Lay, 2015:** Waldökologie: Einführung für Mitteleuropa. Springer Berlin Heidelberg, 417, ISBN: 978-3-662-44268-5.
- Bauhus, J., T. Vor, N. Bartsch, A. Cowling, 2004:** The effects of gaps and liming on forest floor decomposition and soil C and N dynamics in a *Fagus sylvatica* forest. *Canadian Journal of Forest Research* **34** (3), 509–518, DOI: 10.1139/x03-218.
- Becker, C., R. Petzold, K. Schmidt, T. Behrens, F. Thomas, U. Werban, 2022:** Räumliche Prognose der Humuseigenschaften von Waldböden mittels Vis-NIR-Spektroskopie und digitaler Bodenkartierung - Methodenleitfaden für die praktische Anwendung, 63 S. DOI: 10.13140/RG.2.2.20642.58568.
- Bens, O., U. Buczek, S. Sieber, R.F. Hüttel, 2006:** Spatial variability of O layer thickness and humus forms under different pine beech-forest transformation stages in NE Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **169** (1), 5–15, DOI: 10.1002/jpln.200521734.
- Bernier, N., F. Gillet, 2012:** Structural relationships among vegetation, soil fauna and humus form in a sub-alpine forest ecosystem: A Hierarchical Multiple Factor Analysis (HMFA). *Pedobiologia* **55** (6), 321–334, DOI: 10.1016/j.pedobi.2012.06.004.
- Beylich, A., U. Graefe, 2002:** Annelid coenoses of wetlands representing different decomposer communities. In: Broll, G., W. Merbach, E.-M. Pfeiffer (Hrsg.). *Wetlands in Central Europe*, Springer Berlin Heidelberg, 1–10.
- Blume, H.-P., 2010:** Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag, DOI: 10.1007/978-3-8274-2733-5.
- Blume, H.-P., K. Stahr, W. Fischer, G. Guggenberger, R. Horn, H.-G. Frede, P. Felix-Henningsen (Hrsg.), 2014:** Handbuch der Bodenkunde, Kapitel Bodenbildung. Wiley, DOI: 10.1002/9783527678495.
- Böhner, J., R. Köthe, O. Conrad, J. Gross, A. Ringeler, T. Selige, 2001:** Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterization. *Soil Classification* **7**, 213–222.
- Brevik, E.C., C. Calzolari, B.A. Miller, P. Pereira, C. Kabala, A. Baumgarten, A. Jordán, 2016:** Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma* **264**, 256–274, DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.05.017.
- Broeg, T., M. Blaschek, S. Seitz, R. Taghizadeh-Mehrjardi, S. Zepp, T. Scholten, 2023:** Transferability of Covariates to Predict Soil Organic Carbon in Cropland Soils. *Remote Sens.* **15**, 1–25.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2023:** Lufttemperatur: vieljährige Mittelwerte 1991 – 2020: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/vielj_mittelwerte.html. Deutscher Wetterdienst.
- Dorau, K., S. Wessel-Bothe, G. Milbert, H.P. Schrey, D. Elhaus, T. Mansfeldt, 2020:** Climate change and redoximorphosis in a soil with stagnic properties. *CATENA* **190**, 1–7, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104528.
- Drozdowski, G., H.D. Hilden (Hrsg.), 1995:** Geologie im Münsterland: Mit 6 Tabellen, Krefeld, Geologisches Landesamt, NRW, ISBN: 3860299220.
- Dufrêne, M., P. Legendre, 1997:** Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* **67**, 345–366.
- Ehrmann, O., 2015:** Regenwürmer in den Böden Baden-Württembergs - Vorkommen, Gefährdung und Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit. *Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau*, **105**, 125–176.
- Ehrmann, O., Babel, U. 1991:** Quantitative Regenwurmerfassung – ein Methodenvergleich. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **66**, 475–478.
- Eisenhauer, N., Ristok, C., Guerra, C. A., Tebbe, C. C., Xylander, W., Babin, D., Bartkowski, B., Burkhard, B., Filser, J., Glante, F., Hohberg, K., Kleemann, J. et al., 2024:** Bodenbiodiversität. In: *Faktencheck Artenvielfalt - Bestandsaufnahme und Perspektiven für den Erhalt der biologischen Vielfalt in Deutschland*. Oekom, München, 917–1047.
- Ellenberg, H., C. Leuschner, 2010:** Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht; 203 Tabellen. Stuttgart, Ulmer, ISBN: 9783825281045.

- Erber, C., G. Broll, 1998:** Humusformenausprägung basenarmer nasser Waldstandorte im Sauerland: Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Humusformensystematik. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **78**, 457–458.
- Erber, C., Broll, G., 2003:** Feuchthumus und Torf als Indikatoren für einen sich verändernden Wasserhaushalt – zwei Beispiele aus dem Sauerland, In: Forstwissenschaftliche Fakultät der Uni Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, *Freiburger Forstliche Forschung* **49** 33–42.
- Erber, C., G. Broll, 2005:** Ausbildung von Feuchtmoder-Humusformen in Abhängigkeit von der Sauerstoff-Verfügbarkeit. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **107**, 301–302.
- Erber, C., G. Broll, 2006:** Topsoil Changes in former wet Forest Stands in North-Western Germany. *Hydrology and Management of Forested Wetlands*, 552–559, DOI: 10.13031/2013.20380.
- Fornfeist, M., Frank, T., Santora, L., Bergmann, M., Brauckmann, H.-J., Broll, G., Elmer, M., Linne-mann, B., Theisinger, W., Wöllecke, J., 2025:** Bodenökologie in Feuchtwäldern - Handlungsempfehlungen für die Forstpraxis https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Naturschutz/Dokumente/2025/250305_Broschuere_BioFeuchtHumus_Bodenoekologie_in_Feuchtwaldern_-_Handlungsempfehlungen_fuer_die_Forstpraxis.pdf
- Fornfeist, M., L. Santora, T. Frank, B. Linnemann, M. Bergmann, M. Elmer, 2024:** Feuchtwälder im Klimawandel - Projekt BioFeuchtHumus. *AFZ - Der Wald* **15**, 12–15.
- Frank, T., A. Beylich, U. Graefe, H.-J. Brauckmann, G. Broll, 2024:** Feuchtwälder im Klimawandel - Bodenökologische Prozesse. *AFZ - Der Wald* **15**, 16–20.
- Frank, T., Brauckmann, H.-J., Broll, G., 2023:** Humus Forms of Moist and Wet Forest Stands. A Review. *International Journal of Plant Biology* **14**, 780–796, doi:10.3390/ijpb14030058.
- Fraser, P.M., B. Boag, 1998:** The distribution of lumbricid earthworm communities in relation to flatworms: a comparison between New Zealand and Europe. *Pedobiologia* **42** (6), 542–553, DOI: 10.1016/S0031-4056(24)00478-5.
- Fründ, H.C., B. Jordan, 2003:** Regenwurmerfassung mit Senf oder Formalin? Versuche zur Eignung verschiedener Senfzubereitungen für die Austreibung von Regenwürmern. *Osnabrücker naturwissenschaftliche Mitteilungen* **29**, 97–102.
- Graefe, U., 1993:** Veränderungen der Zersetzergesellschaften im Immissionsbereich eines Zementwerkes. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, **73**, 531–534.
- Graefe, U., 1994:** Humusformengliederung aus bodenzoologischer Sicht. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **74**, 41–44.
- Graefe, U., 2004:** Das vertikale Verteilungsmuster der Kleinringelwurmzönose als Indikator der Prozessdynamik im Humusprofil. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **103**, 27–28.
- Graefe, U., A. Beylich, 2003:** Critical values of soil acidification for annelid species and the decomposer community. *Newsl. Enchytraeidae* **8**, 51–55.
- Graefe, U., R.M. Schmelz, 1999:** Indicator values, strategy types and life forms of terrestrial Enchytraeidae and other microannelids. *Newsl. Enchytraeidae* **6**, 59–67.
- Groh, J., H. Puhlmann, Y. Morgenstern, 2012:** Modellierung des Bodenwasserhaushalts und Analyse des Trockenstresses für zwei Waldstandorte im Odenwald. *Konferenzpapier, Tag der Hydrologie*, 316–317.
- Grüneberg, E., C.T. Aydin, R. Baritz, G. Milbert, 2016:** Die Waldböden und ihre Einflussfaktoren. In: Wellbrock, N., A. Bolte, H. Flessa (Hrsg.). *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*, Braunschweig, Johann Heinrich von Thünen-Institut, 44–74.
- Hättenschwiler, S., 2005:** Effects of Tree Species Diversity on Litter Quality and Decomposition. In: Scherer-Lorenzen, M. (Hrsg.). *Forest Diversity and Function: Temperate and Boreal Systems*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg, 149–164, DOI: 10.1007/3-540-26599-6_8.
- Hengl, T., M. Nussbaum, M.N. Wright, G.B.M. Heuvelink, B. Gräler, 2018:** Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. *PeerJ* **6**, DOI: 10.7717/peerj.5518.
- Höltermann, A., B. Jessel, 2019:** Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. *Positionspapier. Bundesamt für Naturschutz, Bonn*.
- Itter, A., 2000:** Beziehungen zwischen dem Bodenwasserhaushalt und der Stickstoffdynamik von landwirtschaftlich genutzten Pseudogleyen, Univ. Bochum, DOI: 10.23689/FIDGEO-420.
- Jonathan, L., F. Adeline, L. Andyne, P. Céline, C. Hugues, 2022:** Prediction of forest nutrient and moisture regimes from understory vegetation with random forest classification models. *Ecological Indicators* **144**, 109446, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109446.
- Klein-Raufhake, T., Hölzel, N., Schaper, J. J., Elmer, M., Fornfeist, M., Linnemann, B., Meyer, M., Neuenkamp, L., Rentemeister, K., Santora, L., Wöllecke, J., Hamer, U., 2025:** Disentangling the Impact of Forest Management Intensity Components on Soil Biological Processes. *Global Change Biology* **31** (1) 1–15, <https://doi.org/10.1111/gcb.70018>
- Klein-Raufhake, T., Hölzel, N., Schaper, J. J., Hortmann, A., Elmer, M., Fornfeist, M., Linnemann, B., Meyer, M., Rentemeister, K., Santora, L., Wöllecke, J., Hamer, U., 2024:** Severity of topsoil compaction controls the impact of skid trails on soil ecological processes. *Journal of Applied Ecology* **61** 1817–1827. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14708>
- Klein-Raufhake, T., J. Schaper, Hölzel N., Hamer U., 2023:** Einfluss der Waldbewirtschaftung auf bodenökologische Prozesse. *AFZ - Der Wald* **21**, 17–20.

- Kuratorium Boden des Jahres, 2015:** Stauwasserboden: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Aktuelles/Archiv/Boden_des_Jahres_2015_Stauwasserboden.
- Linnemann, B., M. Elmer, A. Tecker, K. Greiving, D. Bieker, H.P. Hochhäuser, T. Walter, T.M. Wertebach, N. Hölzel, 2018:** Fit for climate change - adapting moist forests to climate change. *Natur und Landschaft* **93** (12), 562–568.
- Linnemann, B., L. Santora, T. Frank, J. Wöllecke, M. Elmer, M. Fornfeist, G. Broll, 2023:** Feuchthumusformen und Bodenvegetation in Waldökosystemen im Münsterland. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 1-4.
- McGill, R., J.W. Tukey, W.A. Larsen, 1978:** Variations of Box Plots. *The American Statistician*.
- Meschede, M., 2015:** *Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz*. Springer Berlin Heidelberg, 249, ISBN: 9783662452981.
- Meusburger, K., V. Trotsiuk, P. Schmidt-Walter, A. Baltensweiler, P. Brun, F. Bernhard, M. Gharun, R. Habel, F. Hagedorn, R. Köchli, A. Psomas, H. Puhlmann, A. Thimonier, P. Waldner, S. Zimmermann, L. Walthert, 2022:** Soil-plant interactions modulated water availability of Swiss forests during the 2015 and 2018 droughts. *Global change biology* **28** (20), 28–44, DOI: 10.1111/gcb.16332.
- Morgenstern, Y., H. Puhlmann, K. von Wilpert, 2011:** Erfassung und erste Analysen von räumlichen Mustern der Bodenfeuchte auf Waldstandorten. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* **12**, 47–59.
- Nussbaum, M., S. Zimmermann, L. Walthert, A. Baltensweiler, 2023:** Benefits of hierarchical predictions for digital soil mapping—An approach to map bimodal soil pH. *Geoderma* **437**, DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116579.
- Oschmann, W., 2016:** *Evolution der Erde: Geschichte der Erde und des Lebens*. Bern, Haupt Verlag, **383**, ISBN: 9783825244019.
- Pinto, P.E, Dupouey, J.-L., Hervé, J.-C., Legay, M., Wurpillot, S., Montpied, P., Gégout, J.-C., 2016:** Optimizing the bioindication of forest soil acidity, nitrogen and mineral nutrition using plant species. *Ecological Indicators* **71**, 359-367
- Pluess, A.R., P. Brang, S. Augustin, 2022:** *Wald im Klimawandel: Grundlagen für Adaptationsstrategien*, Bern, 447. ISBN: 9783258479958.
- Pollierer, M. M., Klärner, B., Ott, K., Digel, C., Ehnes, R. B., Eitzinger, B., Erdmann, G., Brose, U., Maraun, M., Scheu, S., 2021:** Diversity and functional structure of soil animal communities suggest soil animal food webs to be buffered against changes in forest land use. *Oecologia* **196**: 195-209.
- R Core Team, 2024:** Version R 4.3.2, [r-project.org](https://www.r-project.org).
- Reimann, C., P. Filzmoser, R. Garrett, R. Dutter, 2011:** *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. New York, John Wiley & Sons, 343, ISBN: 9781119965282.
- Saloustros, K., E. Speetzen, 1999:** Aufbau und Genese der saalezeitlichen Grundmoräne bei Mittel-Gaupele - im westlichen Münsterland (Westfalen, NW-Deutschland). *Geologie und Paläontologie in Westfalen*, **52**, 41-49.
- Schabenberger, O., F. J. Pierce, 2010:** *Contemporary statistical models for the plant and soil sciences*. CRC Press, 738, ISBN: 9781420040197.
- Schrey, H.P., 2014:** *Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1 : 50 000, BK 50, 20 Abb., 35 Tab., 5 Tab. im Anhang; Krefeld (Geol. Dienst Nordrh.-Westf.)*.
- Skupin, K., E. Speetzen, J. G. Zandstra, 1993:** *Die Eiszeit in Nordwestdeutschland: Zur Vereisungsgeschichte der Westfälischen Bucht und angrenzender Gebiete mit 24 Tabellen*. Krefeld, Geologisches Landesamt, 143, ISBN: 3860299247.
- Ssymank, A., M. Röhling, G. Ellwanger, S. Scheele (Hrsg.), 2024:** *Natura 2000 Waldlebensraumtypen im Klimawandel: Forschungsbedarfe und Möglichkeiten für Anpassungsstrategien, Management und Maßnahmen*. BfN-Schriften. 681, Bonn, Bundesamt für Naturschutz, DOI: 10.19217/skr681.
- Štícha, V., L. Bílek, D. Zahradník, 2010:** Influence of microrelief and dominant species on thickness of humus layers on selected plots in NP Šumava. *Scientia Agriculturae Bohemica* **41** (1), 44–48.
- Sutmöller, J., E. Schönfelder, H. Meesenburg, 2021:** Perspektiven der Anwendung von Klimaprojektionen in der Forstwirtschaft, *promet* **104** (7), 47-53.
- van der Westhuizen, S., G.B. Heuvelink, D.P. Hofmeyr, 2023:** Multivariate random forest for digital soil mapping. *Geoderma* **431**, 1-11, DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116365.
- Wachendorf, C., G. Milbert, G. Broll, T. Frank, U. Graefe, A. Beylich, 2023:** A concept for a consolidated humus form description – an updated version of the German humus form systematics. *Journal of Plant Biology* **14** (3), 658–686, DOI: 10.3390/jpb14030050.
- Walthert, L., M. Scherler, M. Stähli, M. Huber, Baltensweiler A., L. Ramirez-Lopez, A. Papritz, 2015:** Böden und Wasserhaushalt von Wäldern und Waldstandorten der Schweiz unter heutigem und zukünftigem Klima (BOWA-CH): Ein Projekt--Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL).
- Wellbrock, N., A. Bolte, H. Flessa 2016:** *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*. Thünen Report. 43, Braunschweig, Johann Heinrich von Thünen-Institut, DOI: 10.3220/REP1473930232000.

Wellbrock, N., V. Makowski, J. Bielefeldt, P.-E. Dühnelt, E. Grüneberg, O. Bienert, U. Blum, K. Drescher-Larres, N. Eickenscheidt, J. Evers, W. Falk, M. Greve, P. Hartmann, J. Henry, F. Jacob, J. Martin, G. Milbert, W. Riek, D. Rückkamp, 2022: Arbeitsanleitung für die dritte Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III): Manual on the third Soil Inventory in Forests, Johann Heinrich von Thünen-Institut, DOI: 10.3220/WP1655205829000.

Wilson, S. McG., Pyatt, D.G., Malcolm, D.C., Connolly, T. (2001): The use of ground vegetation and humus type as indicators of soil nutrient regime for an ecological site classification of British forests. *Forest Ecology and Management* **140**, 101-116

Wilpert, K. von, P. Hartmann, H. Puhlmann, P. Schmidt-Walter, H. Meesenburg, J. Müller, J. Evers, 2016: Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: Wellbrock, N., A. Bolte, H. Flessa (Hrsg.). *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*, Braunschweig, Johann Heinrich von Thünen-Institut, 343–386.

Zepp, H., 1995: Klassifikation und Regionalisierung von Bodenfeuchtereime-Typen: Mit 58 Tabellen. Berlin, Stuttgart, Borntraeger, 224, ISBN: 3443090095.