



Hochschule
für nachhaltige Entwicklung
Eberswalde



THÜNEN

Thesis zur Erlangung des Grades „Bachelor of Science“
im Studiengang Forstwirtschaft

Prognosen zu Auswirkungen der Revitalisierung eines Hochmoores im Erzgebirge auf dessen Fichtenbestand

vorgelegt von Valentin Burkhardt

Matrikelnummer 18211689

Fachbereich: Wald und Umwelt

Erstgutachter: Prof. Dr. Jens Schröder (HNE, Eberswalde)

Zweitgutachter: Dr. Cornelius Oertel (Thünen-Institut, Eberswalde)

Eberswalde, 30.08.2022

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|-----|
| I. | Abbildungsverzeichnis | III |
| II. | Tabellenverzeichnis | IV |
| III. | Abkürzungsverzeichnis | V |
| IV. | Zusammenfassung | VI |
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Zielstellung | 2 |
| 3 | Grundlegende Betrachtungen | 3 |
| 3.1 | Terrestrische Böden | 3 |
| 3.2 | Organische Böden | 3 |
| 3.2.1 | Hochmoore | 3 |
| 3.2.2 | Waldhochmoore | 4 |
| 3.2.3 | Hochmoore im Erzgebirge | 5 |
| 3.3 | Revitalisierung von Mooren | 6 |
| 3.4 | Wachstumsbedingungen der Fichte | 8 |
| 3.5 | Beschreibung der Simulationssoftware | 9 |
| 4 | Versuchsdurchführung | 10 |
| 4.1 | Untersuchungsstandort | 10 |
| 4.1.1 | Klima | 12 |
| 4.1.2 | Boden | 12 |
| 4.2 | Material und Methodik | 14 |
| 4.2.1 | Geländearbeiten | 14 |
| 4.2.2 | Bestandesdaten | 16 |
| 4.2.3 | Wachstumsmodellierung | 16 |
| 4.2.4 | Kohlenstoffspeicher | 18 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 5 | Ergebnisse | 22 |
| 5.1 | Bestandesbeschreibung..... | 22 |
| 5.2 | Kohlenstoffspeicher und Wachstumsprognosen..... | 24 |
| 6 | Diskussion..... | 30 |
| 7 | Ausblick..... | 36 |
| 8 | Literaturverzeichnis..... | 37 |
| V. | Anhang..... | VII |

I. Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Lage der Versuchsfläche am Intensivstandort Gr. Eisenstraßenmoor (nach TI-WO, 2021)..... | 10 |
| Abbildung 2: Technischer Grabenverschluss durch Damm und seitlichem Abfluss in die Fläche. Foto: V. Burkhardt..... | 11 |
| Abbildung 3: Bodenprofil am Versuchsstandort Gr. Eisenstraßenmoor. Foto: M. Gabriel..... | 13 |
| Abbildung 4: Fichtenbestand auf der Versuchsfläche. Foto: V. Burkhardt | 15 |
| Abbildung 5: Erstellung eines fiktiven Modellbestandes anhand der realgetreu abgebildeten Probekreise 1 (oben links) und 2 (oben rechts) auf dem Großen Eisenstraßenmoor..... | 16 |
| Abbildung 6: Beispielhafte Anpassung der Wachstumsfunktion "Maximum Density" im Simulationsprogramm BWINPro..... | 17 |
| Abbildung 7: Bestandeshöhenkurve (BHK) des Versuchsstandortes, bereinigt um die Kronenbrüche (graue Punkte). | 23 |
| Abbildung 8: Absolute Durchmesserverteilung gesamt und getrennt nach den Probekreisen. | 23 |
| Abbildung 9: Kronendach auf dem Probekreis 1. Foto: V. Burkhardt..... | 23 |
| Abbildung 10: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 1..... | 24 |
| Abbildung 11: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 2..... | 25 |
| Abbildung 12: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 3. | 26 |
| Abbildung 13: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 4. | 27 |
| Abbildung 14: Entwicklung des Kohlenstoffvorrats der Szenarien 1 (a), 2 (b), 3 (c) und 4 (d) in Summe und getrennt nach den Speichern lebende BM und tote BM. | 29 |
| Abbildung 15: Durchschnittliche jährliche Bildungsraten im Simulationszeitraum.... | 29 |

II. Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Bodenhorizonte am Versuchsstandort Gr. Eisenstraßenmoor (Gabriel & Pfaffner, 2022)..... | 13 |
| Tabelle 2: Geschätzte Koeffizienten der Biomassefunktion, in Abhängigkeit der Baumart und Höhenklasse (Wolff, Bolte, Bielefeldt, & Czajkowski, 2008)..... | 19 |
| Tabelle 3: Mittlere Kohlenstoffgehalte [mg g^{-1}] der Verjüngung auf Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz, in Abhängigkeit der Baumart und Höhenklasse (Wolff, Bolte, Bielefeldt, & Czajkowski, 2008) | 19 |
| Tabelle 4: Kohlenstoffmengen [t ha^{-1}] je Hektar der unterschiedlichen Speicher des Bestandes am Versuchsstandort im Jahr 2021..... | 24 |

III. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------|---|
| BM | Biomasse |
| BHD | Brusthöhendurchmesser des Baumes (gemessen in 1,3 m Höhe) |
| BWI | Bundeswaldinventur |
| BWINPro | einzelbaumbezogener Waldwachstumssimulator der NW-FVA |
| CV | Kohlenstoffvorrat |
| dg | Durchmesser des Grundflächenmittelstamms |
| FFH | Fauna-Flora-Habitat |
| H | Baumhöhe |
| hg | Höhe des Grundflächenmittelstamms |
| mNN | Meter über Normalnull |
| MoMoK | Projekt Moormonitoring für den Klimaschutz des TI-WO |
| NW-FVA | Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt |
| PK | Probekreis |
| pnV | potenzielle natürliche Vegetation |
| SPA | Special Protection Areas |
| THG | Treibhausgase |
| TI-WO | Thünen-Institut für Waldökosysteme |
| TreeGrOSS | Tree Growth Open Source Software |
| Vfm | Vorratsfestmeter |
| WHD | Wurzelhalsdurchmesser |
| Z-Baum | forstlicher Zukunftsbaum |
| ZG | Zersetzungsgeschwindigkeit |

IV. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Kohlenstoffspeicher des Fichtenbestandes auf dem Großen Eisenstraßenmoor ermittelt und deren Entwicklung modelliert. Die Versuchsfläche befindet sich im westlichen Erzgebirge und stellt ein Hanghochmoor dar. Dieses befindet sich in nach technischen Maßnahmen in der Wiedervernässung, welche auch einen Einfluss auf den Baumbestand hat. Entsprechende Entwicklungsszenarien über einen Zeitraum von 50 Jahren wurden mittels des Wachstumssimulators BWINPro erstellt. Dazu wurde zunächst eine Bestandesaufnahme anhand von Probekreisen durchgeführt und die gespeicherte Menge an Kohlenstoff in der lebenden und toten Biomasse oberirdisch und in Ansätzen unterirdisch, errechnet.

In zwei Szenarien wächst der Baumbestand ohne Schädigung bzw. unter forstlichen Eingriffen weiter und erreicht in der lebenden Baumbiomasse durchschnittliche Bildungsraten von etwa $1,5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und einen Gesamtspeicher zum Ende der Simulation von etwa 156 bis 180 t C ha^{-1} . In weiteren zwei Szenarien kommt es zum sofortigen Absterben des gesamten Bestandes bzw. eines Großteils dessen. Diese Baumbestände fungieren über den Simulationszeitraum als Kohlenstoffquelle mit einer durchschnittlichen Freisetzung von etwa 0,6 bis 1 t C ha a^{-1} .

Durch die bereits heute auf der Versuchsfläche vorzufindenden und angrenzenden Bestandesschäden, ist das Eintreten des letzten Szenarios mit einem fortlaufenden Absterben der Fichten am wahrscheinlichsten. Dazu trägt auch die im Zuge der Wiedervernässung angestrebte Anhebung des Wasserstandes bei, welcher die Schädigung der Wurzelsysteme der Fichten im anaeroben Bereich herbeiführen kann.

Wenngleich die durchschnittlichen Bildungsraten torfbildender Vegetation in Hochmooren mit $0,24 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gegenüber $1,8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ des ungeschädigten Baumbestandes, gering ausfallen, spielt dies nur eine untergeordnete Rolle (Tolonen & Turunen, 1996). Entscheidend für die Bewertung von Revitalisierungsmaßnahmen ist der Speicher großer Mengen an Kohlenstoff im Torfkörper, welcher den des Baumbestandes um ein Vielfaches übersteigt. Somit überwiegt die Relevanz der Bemühungen einer Eindämmung des Torfschwundes die des möglichen Absterbens des Fichtenbestandes.

1 Einleitung

Der Bildung von Hochmooren geht eine mehrere tausend Jahre dauernde natürliche Entwicklung nach der letzten Eiszeit einher. Wie alle Moore vom Wasserüberschuss abhängig, werden Hochmoore dabei vor allem von Regen- und Hangwasser gespeist und besitzen Möglichkeiten der Selbstregulation ihrer Wasserstände. In diesen Ökosystemen herrschen neben nassen auch weiteren Extreme wie nährstoffarme und saure Bedingungen, an die nur wenige Arten angepasst sind. Diese sind vor allem auf ganzjährig an der Geländeoberfläche liegende Wasserstände angewiesen (Joosten, 1993). Die Überreste der Pflanzen bilden dabei durch Ablagerung unter Luftabschluss durch Wasser Torf, welcher nur langsam zersetzt wird. Auf diese Weise konnten sich in den letzten Jahrtausenden mehrere Meter mächtige Torflager bilden (Succow & Edom, 2001b).

Bei Austrocknung werden moortypische Pflanzen von konkurrenzstarken Arten wie etwa Sträuchern und hochwüchsigen Gehölzen verdrängt. Ursachen dafür liegen oft beim Menschen, der mit wachsenden Bedürfnissen seit Jahrhunderten immer weiter in die natürlichen Prozesse eingriff und auch die Moore nutzte (Succow & Jeschke, 1990). Im Erzgebirge spielte Torf durch die Knappheit von Holz und Kohle als Brennstoff eine große Rolle, hinzu kam die Entwässerung zum Nutzbarmachen der Waldstandorte. Die Forstwirtschaft der Vergangenheit hat somit einen erheblichen Anteil an dem Rückgang von Waldhochmooren und ihrem kritischen Zustand in der heutigen Zeit (Slobodda, 1998). In Zusammenarbeit mit Naturschutzinstitutionen liegt es daher auch in der Verantwortung der forstlichen Betriebe, den Erhalt und die Revitalisierung der Moore voranzutreiben. Mit wachsendem öffentlichem Interesse und politischem Bekennen dazu, rückt auch die wissenschaftliche Begleitung von Revitalisierungsprozessen in den Fokus.

Das Thünen-Institut für Waldökosysteme richtet im Rahmen des bundesweiten Moorbödenmonitorings für den Klimaschutz (MoMoK-Wald) bundesweit 60 Untersuchungsstandorte auf unterschiedlichen Moortypen unter Wald ein, welche sowohl intakte als auch geschädigte Ökosysteme umfassen. Hier werden Baumbestand, Vegetation und Torfkörper fortlaufend aufgenommen und bewertet. Auf zwei Intensivstandorten wird der Revitalisierungsprozess begleitet und anhand von Haubenmessungen der Ausstoß von CO_2 , CH_4 und N_2O ermittelt, um Daten über die Klimarelevanz der Maßnahmen zu generieren. Diese Arbeit entstand in Kooperation

mit der Arbeitsgruppe des MoMoK-Wald am Thünen-Institut und befasst sich mit der Erstaufnahme und Entwicklung des Baumbestandes des Waldhochmoores am Intensivstandort Großes Eisenstraßenmoor.

2 Zielstellung

Um mögliche Auswirkungen der Revitalisierung des Hochmoores auf den Baumbestand aufzuzeigen, wird in dieser Arbeit zunächst dessen Ist-Zustand beschrieben. Anhand von Wachstumsmodellierungen werden anschließend durch die Anwendung ForestSimulator BWINPro Wachstumsprognosen des Bestands erstellt. In diesen Szenarien werden folgende Kohlenstoffspeicher und deren Entwicklung berücksichtigt:

- lebende Baumbiomasse oberirdisch in Holz, Rinde, Reisig und Blättern sowie unterirdisch in der Gesamtwurzelmasse
- tote Baumbiomasse oberirdisch und in Ansätzen unterirdisch in Grobwurzeln

Die Ergebnisse sollen hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Klimaschutz bewertet werden und in den Gesamtkontext der Revitalisierungsmaßnahmen gestellt werden.

Dabei soll geklärt werden, welchen Einfluss die Revitalisierungsmaßnahmen auf den Fichtenbestand haben und ob der Wachstumssimulator BWINPro ein geeignetes Werkzeug für die Erstellung von Prognosen auf Moorstandorten darstellt.

3 Grundlegende Betrachtungen

Im Folgenden werden allgemeine Beschreibungen und Definitionen zu behandelten Waldstandorten, insbesondere der Hochmoore, sowie Grundlagen von Revitalisierungsmaßnahmen und der Simulationssoftware aufgeführt.

3.1 Terrestrische Böden

Die terrestrischen Böden sind in Deutschland am weitesten verbreitet, ihre Wasserversorgung und -beeinflussung erfolgt durch versickerndes Regenwasser. Zudem werden die semiterrestrischen Böden unterschieden, welche zeitweise oder dauerhaft durch Grundwassereinfluss geprägt sind.

3.2 Organische Böden

Innerhalb der organischen Böden werden Moore und Anmoore klassifiziert. Letztere weisen dabei geringere Torfmächtigkeiten unter 3 dm und Anteile organischer Substanz von 15 bis 30 % auf (AG Boden, 1996).

Durch die Charakteristik ihrer Wasserversorgung werden die Moore zumeist in grundwassergesättigte Niedermoore und regenwassergespeiste Hochmoore unterschieden. Daneben existieren jedoch weitere Zwischenformen (Göttlich, 1990).

Eine Vielzahl an Ökosystemleistungen spiegelt die multifunktionale Bedeutung der Moore wider. Während in erster Linie der naturschutzfachliche Nutzen populär ist, spielen ebenfalls der Hochwasser- und Klimaschutz eine Rolle. Moore vermögen es dabei durch ihre speziellen Eigenschaften, Extremereignisse wie etwa Starkregenfälle zu puffern (Zollner, 1996; Zollner, 2003). Neben dem Einfluss auf das globale Klima durch die Aufnahme von CO₂ weisen Moore dabei ein spezielles Lokalklima auf (Müller-Kroehling & Zollner, 2015).

3.2.1 Hochmoore

Hochmoore werden aus bodenkundlicher Sicht als Torflager mit einer Mächtigkeit von über 3 dm und einem Anteil organischer Substanz von mindestens 30 % definiert (AG Boden, 1996). Ebene sowie leicht geneigte Standorte mit einem natürlichen Überschuss an Wasser ermöglichen nach Göttlich (1990) die Hochmoorbildung. Dabei realisiert ihr eigener Wasserhaushalt einen Wasserspiegel über dem des Grundwassers und das in der Mitte des Moores am stärkste ausgeprägte,

namensgebende Torfwachstum (Slobodda, 1998). Reine Regenmoore werden dabei ombrogen, durch Niederschlagswasser, gespeist und sind oligotroph, erhalten also keine weiteren Nährstoffeintragungen außer den damit Einhergehenden. Ombrosole Hanghochmoore gewinnen zudem Mineralbodenwasser aus dem höher gelegenen Hang (Succow, 2001; Succow & Jeschke, 1990). Das flächige Wachstum der Moore geschieht hier durch stauende Schichten meist hangaufwärts, die stärksten Torfmächtigkeiten werden jedoch hangabwärts vorgefunden (Slobodda, 1998).

Jahresdurchschnittstemperaturen von unter 7,5 °C und Jahresniederschläge von über 1.000 mm ermöglichen nach Walentowski et al. (2013), klimatisch die Bildung von Hochmooren. Während in der borealen Zone großflächig solche Bedingungen herrschen, ist dies in Mitteleuropa nur vereinzelt, meist in Höhenlagen von 600 bis 1.500 mNN der Fall (Succow & Joosten, 2001c).

Nach Frede und Bach (1996) charakterisieren sich intakte Hochmoore durch eine „langfristig positive Stoffbilanz“, denn die Akkumulation ist insgesamt höher als der mikrobielle Stoffabbau. Letzterer vollzieht sich nahezu ausschließlich in der obersten, torfbildenden Schicht des Moores, dem Akrotelm, wo sich aerobe und anaerobe Bedingungen durch Wasserstandänderungen abwechseln. Durch fortlaufendes Pflanzenwachstum, gelangt der Torf in das durchgehend anaerobe Torferhaltungszone Katotelm und wird zu großen Teilen dauerhaft eingelagert (Ingram, 1978). Dabei binden Hochmoore neben weiteren Nährstoffen und Schadstoffen insbesondere Kohlenstoff und haben somit Einfluss auf ihr gesamtes landschaftliches Umfeld (Succow & Jeschke, 1990).

Das saure Milieu ist eine weitere typische Eigenschaft der Hochmoore, der pH-Wert liegt im Torf bei 2,0 – 4,8 und im Wasser bei 3,5 – 6,0 (Succow, 1988; Eggelsmann, 1990).

3.2.2 Waldhochmoore

Das Bild der Hochmoore ist oft geprägt von der Vorstellung einer Offenlandschaft, in der kein Baumwachstum möglich und natürlich sei. Jedoch können naturnahe Hochmoore in bestimmten Bereichen oder flächig, licht mit krüppelwüchsigen Bäumen bestockt sein (Succow & Joosten, 2001c). Diese aus der frühen Entstehungsgeschichte der Moore bekannte Bewaldung, hatte nach Pollenprofilen und Torfhorizonten mit enthaltenen Stöcken bis zum Eingreifen des Menschen Bestand. Eine enge Verzahnung

der Bestockung mit für Baumwachstum zu nassen Bereichen verdeutlicht dabei die Wechselbeziehung von Moor und Wald (Müller-Kroehling & Zollner, 2015).

Das eingehend erwähnte, moortypische Lokalklima wird durch einen Moorrandwald maßgeblich gefördert, indem Nährstoffeinträge und austrocknender Wind im sogenannten Oasen-Effekt verhindert werden (Oke, 2002).

Viele der auf Moore spezialisierten typhobionte und tyrophile Tier- und Pflanzenarten sind auf die unterschiedlich offenen und geschlossenen Bereiche der Moore angewiesen oder bevorzugen sogar die Moorwälder, welche als Biotoptyp nach der Roten Liste vom Aussterben bedroht sind (Müller-Kroehling & Zollner, 2015). Um die hochmoortypischen Torfmoosgesellschaften gruppieren sich oftmals Bestände der Bergkiefer (*Pinus mugo agg.*) in ihren verschiedenen Wuchsformen, Fichten und Birken. Bei Beeinträchtigung der Moore setzt eine Verheidung der Offenfläche ein und die Gehölze des Randbereiches dringen auf diese vor (Zinke, 2002).

Hasch et al. (2007) definieren Waldmoore als „alle mit dem Wald verbundenen gehölzbestockten und gehölzfreien Moore, deren Wasserhaushalt entscheidend durch ein überwiegend bewaldetes Einzugsgebiet geprägt ist“.

Zudem werden Moorwälder in unterschiedliche Lebensraumtypen unterschieden, welche von Moorbirke (*Betula pubescens*), Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), Fichte (*Picea abies*) und Bergkiefer (*Pinus mugo agg.*) beherrscht werden. Letztere tritt in unterschiedlichen Wuchsformen auch als Moorkiefer (*Pinus mugo ssp. rotundata*) auf. Der Subtyp Fichten-Moorwald tritt im Randbereichen und auf teilentwässerten Hochmooren auf und ist ebenfalls nach der Roten Liste der Biotoptypen vom Aussterben bedroht (LfULG, 2022)

3.2.3 Hochmoore im Erzgebirge

Die Moore des Erzgebirges gehören in der Regel dem hydrologischen Moortyp Mittelgebirgs-Regenmoor an und sind saure, vereinzelt oligotrophe Plateau-, meist jedoch mesotrophe Gehängemoore (Edom & Wendel, 1998; Succow & Edom, 2001). Erste Moorbildungen entstanden dabei nach Slobodda (1998) alt-holozän vor etwa 9.000 Jahren auf, von Verwitterungsdecken der Weichseleiszeit überlagerten, sauren Magmatiten und Metamorphiten. Der hohe Anteil an Verebnungsflächen und solchen mit geringer Neigung und folglich gehemmtem Wasserabfluss ermöglicht morphologisch seither die Bildung von Hochmooren (Succow & Jeschke, 1990).

Die ersten Beeinträchtigungen der Moore resultierten aus der Entstehung und Etablierung des Bergbaus im Erzgebirge (12. bis 14. und 15. bis 16. Jahrhundert), welcher Wasser aus den Mooren selbst oder ihrer Einzugsgebiete nutzte (Männel, 1896; Zinke, 2002). Der Abbau der Torfkörper zur Brennstoffgewinnung mit meist vorausgehender Entwässerung, wurde im 17. und 18. Jahrhundert mit seinem mengenmäßigen Höhepunkt im 19. Jahrhundert umgesetzt und betraf nahezu alle Hochmoore. Vereinzelte Torfgewinnung als Heizmaterial fand nach den beiden Weltkriegen, sowie für Medizin und Gartenbau bis in das Jahr 1990 statt (Slobodda, 1998).

Eine systematische Entwässerung aller Flächen mit 2,2 m bis maximal 3,4 m starken Torfkörpern und anschließendem Nadelholzanbau begann Anfang des 19. Jahrhunderts mit dem Aufkommen der Forsteinrichtung (Männel, 1896; Wendel, 1992). Die angelegten Grabensysteme wurden auf sehr mächtigen Standorten und ausgebliebenem Erfolg der Bestandesetablierung schon nach einigen Jahrzehnten nicht mehr geräumt. Auf weiteren Mooren geschah dies mit gesteigerter Intensität infolge der großflächigen Rauchschäden und anschließenden Aufforstungsbemühungen in den 1970er Jahren und noch bis Ende der 1980er Jahre, in Ausnahmen auf flachgründigen Mooren sogar bis zur Jahrtausendwende (Männel, 1896; Zinke, 2002).

Die aufgeführten Nutzungsformen und Beeinträchtigungen im Erzgebirge haben einen großen Verlust an Hochmooren verursacht. Nach Männel (1896) waren hier um 1900 noch 60 km² Hochmoore vorhanden, im Jahre 1947 laut einer Aufnahme der geologischen Landesanstalt nur noch 36 km² (Zinke, 2002). Das Ergebnis einer weiteren Aufnahme durch den Naturpark Erzgebirge/Vogtland kam 1999 schließlich zu einem Ergebnis von 14 km² an Torfkörpern mit Mächtigkeiten über 0,4 m und Flächen über 1 ha und nur 8 km² an mächtigen Hochmooren mit über 0,8 m Stärke (Lange, 2002).

3.3 Revitalisierung von Mooren

Da entwässerte Moorflächen nach (Tiemeyer et al., 2013) verglichen mit Naturnahen etwa 9 bis 17-mal mehr CO₂ äquivalente Treibhausgase freisetzen, zielen die zu ergreifenden Maßnahmen vor allem auf die Wiedervernässung der Moore ab. Dabei wird durch die Anhebung des Wasserstandes eine weitere degradierende Mineralisierung des Torfes verhindert und im besten Fall ein erneutes Wachstum

ermöglicht. Dies stellt eine der effizientesten Maßnahmen im Blick auf CO₂-Vermeidungskosten und die dafür benötigte Fläche dar (Bonn et al., 2014).

Neben den Beiträgen zum Klimaschutz, werden durch Revitalisierungsmaßnahmen Ziele der Biodiversität, der Kohärenz zu weiteren Moorflächen und deren Einfluss auf den Landschaftshaushalt und das Lokalklima, sowie dem Hochwasserschutz durch die Pufferfunktion des Moorkörpers, etwa bei Starkregenereignissen, angestrebt (LfULG, 2014).

Heutigen Revitalisierungsprojekten geht in der Regel eine hydromorphologische Analyse zuvor, um das individuellen Wasserpotenzial zu ermitteln. Anhand von digitalen Geländemodellen unter Einbezug von Gefälle und Grabenquerschnitten, kann der Wasserbedarf berechnet werden (Müller-Kroehling & Zollner, 2015). Bezüglich der Vegetation können auf Grundlage geohydraulischer Werte, wie der Transmissivität als ein Maß der Feuchtigkeit und des Hangwasseranteils sowie der Torfmächtigkeit zur Einschätzung der Nährstoffverhältnisse, Ökotopprognosen gebildet werden (Kessler & Stehlik, 2014). Auf durch Sackungen und Reliefunterschiede, etwa nach Torfstichen, irreversibel geschädigten Moorstandorten, kommt es dabei in Abhängigkeit der Wasserstände zu unterschiedlichen Zonierungen, welche auch Waldbestände als heutige pnV vorsehen können (Müller-Kroehling & Zollner, 2015). Nach Drösler et al. (2012) setzen intakte Moorwälder nicht per se mehr klimaschädliche Gase frei als intakte oder revitalisierte, offene Hochmoore. Dabei fällt jedoch die Speicherung von CO₂ zu Lasten der Methan-Emissionen (Scott, Kelly & Rudd, 1999; Worrall, Burt & Shedden, 2003; Zeitz & Velty, 2002).

Im besten Fall gelingt es, durch am weitesten verbreitete Maßnahme, der Schließung der Entwässerungsgräben und gleichzeitiges Schaffen von Überläufen, den natürlichen Wasserhaushalt wiederherzustellen (Joosten, 1993). Dieser ist geprägt durch den Rückhalt von Wasser bei Mangel von ebendiesem und einem Abfluss bei Sättigung der Fläche (Edom, 2001).

Ist es möglich, den Wasserstand nahe der Oberfläche zu heben, wird die Wasserspeicherfähigkeit erhöht und das fehlende Akrotelm ersetzt oder langfristig neu gebildet (Blankenburg, 1994; Schouwenaars, 1994). Die erfolgreiche Wiederherstellung der Funktion des Moores durch die erneute Etablierung der torfbildenden Vegetation hängt vom Vorhandensein und der Fähigkeit zur Wiederbesiedelung dieser Pflanzengruppen ab (Joosten, 1993). Dem Sphagnum

kommt dabei als Hauptkomponente der Hochmoorvegetation auch in der Revitalisierung eine Schlüsselrolle zu (Meister & Liebert, 2004). Während Pfadenhauer und Klötzli (1996) die Reinitialisierung der Torfmoose beschreiben, hat Money (1995) Bedenken, ob diese, überhaupt und wenn ja, von selbst in die gestörten Moore zurückkehren werden.

Stellen sich zu hohe Wasserstände und damit einhergehend größere, dauerhaft offene Wasserflächen ein, resultiert dies in einer Freisetzung von Methan und verhindert zudem die Etablierung der beschriebenen Vegetation (Müller-Kroehling & Zollner, 2015).

3.4 Wachstumsbedingungen der Fichte

Die Fichte stellt bei abnehmender Tendenz mit etwa 2,76 Mio. ha Waldfläche in Deutschland noch immer die wichtigste Baumart der Forstwirtschaft dar (vTI, 2014). Außerhalb der weiten Verbreitung durch künstlichen Anbau im Flach- und Hügelland Mitteleuropas, lassen sich drei Teilareale der natürlichen Verbreitung abgrenzen. Diese sind das mittel- und südosteuropäische Gebiet in hochmontanen und subalpinen Regionen, zu denen auch das Erzgebirge zählt, sowie das nord- osteuropäische und sibirische Fichtengebiet in der borealen Zone (Schütt, Schuck & Stimm, 1992).

Klimatisch angepasst ist die Fichte in diesen kontinentalen Gebieten an kalt-trockene Bedingungen in Nordeuropa und kalt-feuchte in den Gebirgslagen. Untypisch sind somit Verbreitungen in warm-trockenen Lagen mit hohen Sommertemperaturen und milden Wintern (LWF, 2019).

Gute Zuwächse erreicht die Fichte bei hoher Bodenfeuchte, ein beeinflusster Bodenlufthaushalt schränkt das Wurzelwachstum jedoch ein. Flach ausgeprägte Wurzelteller als Resultat dessen erhöhen das Risiko für Trockenschäden und Windwurf. Die Toleranz gegenüber Überflutungen ist zudem als gering einzuschätzen (von Wilpert, 1990). Das Bodensubstrat und die Nährstoffverfügbarkeit spielen eine geringere Rolle als die Bodenfeuchte, auf armen Standorten ernährt die Fichte sich aus der Humusaufklage. Ebendiese wird durch langsam zersetzbare Streu, in Form von Auflagehumus, gebildet. Optimale Zuwächse werden auf tiefgründigen, frischen Böden mittlerer Basenversorgung erreicht, welche vor allem in den Gebirgslagen bestehen (Mellert & Ewald, 2014). Dort bildet die Fichte Mischbestände mit Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Weißtanne (*Abies alba*), während Reinbestände natürlicher Art

nur auf Sonderstandorten wie der subalpinen Stufe oder den Moorrändern vorkommen (LWF, 2019).

3.5 Beschreibung der Simulationssoftware

Zur Simulation des Waldwachstums wurde die Java-Anwendung ForestSimulator BWINPro, Version 8.0 der FVA-NW genutzt, welche Prognosen und Analysen der Entwicklung von Waldbeständen ermöglicht. Grundlage hierfür bildet die Softwarebibliothek TreeGrOSS (Tree Growth Open Source Software) mit Funktionen aus Datenerhebungen auf Versuchsflächen terrestrischer Standorte in Nordwestdeutschland (Nagel, Duda & Hanssen, 2014).

Die fiktive Entwicklung des Einzelbaums in Abhängigkeit von Einwuchs, Wachstum und Mortalität resultiert dabei in statistischen Wachstumsmodellen in Zeitschritten von fünf Jahren. Über unterschiedliche Abfragen können aktuelle und potenzielle zukünftige Vorräte, sowie Biomasse- und Kohlenstoffspeicher bestimmt werden. Die Anwendung bietet neben voreingestellten, waldbaulich üblichen Behandlungsketten auch die Möglichkeit der Veränderung der zugrundeliegenden Funktionen (NW-FVA, 2022).

4 Versuchsdurchführung

Im Folgenden wird der Untersuchungsstandort in Bezug auf die geographische Lage und das Klima beschrieben und eine bodenkundliche Mooransprache durchgeführt.

4.1 Untersuchungsstandort

Die untersuchte Fläche (Abbildung 1) stellt als Intensivstandort des Projektes MoMoK-Wald ein Hanghochmoor dar. Aufgrund fehlender historischer Bezeichnungen wird es heute nach der nahen Eisenstraße als Großes Eisenstraßenmoor benannt (LfULG, 2014). Die Moorfläche liegt im Eigentum des Staatsbetriebes Sachsenforst und wird innerhalb des Naturparks Erzgebirge/Vogtland dem Naturraum Oberes Westerzgebirge (Meynen et al., 1962) bzw. den Oberen Lagen des Westerzgebirges zugeordnet (Bernhardt, Haase, Mannsfeld, Richter & Schmidt, 1986). Nach Haase und Mannsfeld (2002) ist sie darin Teil der Kleinlandschaft „Steinbach-Riesenberger Hochfläche“.

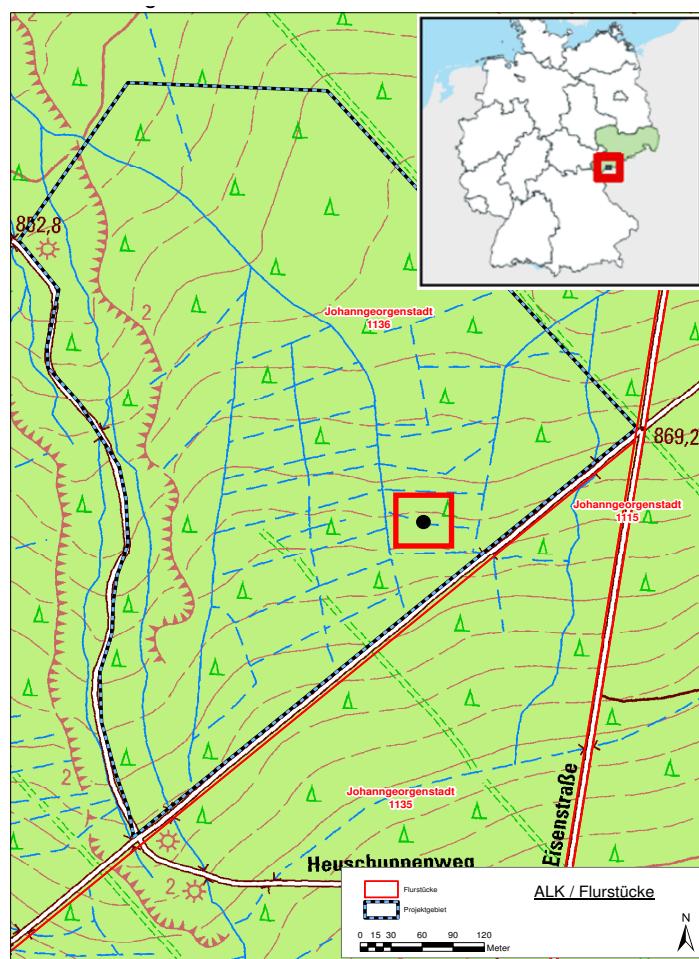


Abbildung 1: Lage der Versuchsfläche am Intensivstandort Gr. Eisenstraßenmoor (nach TI-WO, 2021).

Der Untersuchungsstandort gehört zudem zum letzten Teilgebiet (TG) 6 – Steinbach-Sauschwemme - des etwa 468 ha umfassenden FFH-Gebietes „Mittelgebirgslandschaft bei Johanngeorgenstadt“. Westlich der Ortslage Johanngeorgenstadt und südlich von Steinbach, sowie zwischen den Forstwegen Heuschuppenweg und Eisenstraße gelegen, befindet sich die etwa 13 ha große Moorfläche in den Forstabteilungen 140 und 141 und reicht südlich in Ausläufern bis in die Abteilungen 133 und 134 (s. Anhang 1). Forstlich ist die Fläche dem Wuchsgebiet 45 „Erzgebirge“ und darin dem Wuchsbezirk 4501 „Westliches Oberes Erzgebirge“ zuzuordnen (LfULG, 2014).

Geologisch liegt die Versuchsfläche im Gebiet der jüngeren Granite des Eibenstocker Granitmassivs, wo der Eibenstocker Tumalin-Granit als ein Gemenge aus Quarz, Orthoklas, Albit und Tumalin ein besonders saures Ausgangsgestein bildet. Dieser wird im Untersuchungsbereich von einer nacheiszeitlichen Moorbildung überlagert, welche sich vom Erzgebirgskamm mit dem Kleinen Kranichsee bis über das Große Eisenstraßenmoor erstreckt. Die sauren Böden aus Hochmoor- und Übergangstorf weisen ein geringes bis sehr geringes Nährstoffpotenzial auf (LfULG, 2014).

Im östlichen Teil der Moorfläche sind am Unterhang ehemalige Torfstiche vorzufinden, am westlichen Rand befinden sich nahe des Heuschuppenwegs Spuren des Zinnseifenbergbaus in Form deutlicher Reliefunterschiede. Der Zustand des Moores wird aktuell als schlecht eingestuft, lediglich 2,2 ha sind durch Vorhandensein moortypischer Arten als Fichten-Moorwald in schlechten Erhaltungszustand erfasst worden (LfULG, 2014). Während der im Jahr 2020 abgeschlossenen technischen



Abbildung 2: Technischer Grabenverschluss durch Damm und seitlichem Abfluss in die Fläche. Foto: V. Burkhardt

Revitalisierungsmaßnahme wurde das Grabensystem verschlossen und Wasser an diesen Punkten durch seitliche Überläufe in die Fläche geleitet (Abbildung 2).

4.1.1 Klima

Die zuvor beschriebenen klimatisch begünstigenden Faktoren für die Bildung von Hochmooren der Jahresdurchschnittstemperaturen von unter 7,5 °C und Jahresniederschlägen von über 1.000 mm, finden sich im Erzgebirge vor allem in den Kammlagen bis in die mittleren Höhenlagen ab 500 mNN (Succow & Jeschke, 1990). Verbreitungsschwerpunkt der Hochmoore ist das Westerzgebirge mit den höchsten Niederschlägen und maritimer Prägung durch westliche Winde, sowie einem höheren Vorkommen an Kammlagen. Zum Osterzgebirge nimmt diese Tendenz ab, hin zu subkontinentalem Klima und geringeren Niederschlägen aufgrund von zahlreichen Leegebieten (Mannsfeld & Richter, 1995).

Die der Versuchsfläche am nächsten gelegene Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) befindet sich in Entfernung von etwa 5 km Luftlinie, nahe Carlsfeld auf einer vergleichbaren Höhe von 895,3 mNN. Anstiege der Durchschnittstemperaturen, Häufung und Intensität von Extremereignissen, sowie Veränderung von Niederschlagsmustern als Ausprägungen der anthropogen verursachten Klimawandels werden auch hier deutlich. Die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmengen sind um von 1.229,8 mm im Zeitraum 1961 – 1990 auf 1170,9 mm in der Periode 1991 – 2020 zurückgegangen. Zudem ist die Jahresdurchschnittstemperatur in gleichen Zeiträumen um 1 °C von 4,4 °C auf 5,4 °C gestiegen (DWD, 2022).

4.1.2 Boden

Durch die Anlage eines Bodenprofils durch das TI-WO konnten die Horizonte des Versuchsstandortes angesprochen werden (s. Abbildung 3). Dabei stellen die Tiefenstufen bis 38 cm sehr stark bzw. mittel bis stark degradierten Torf dar, verursacht durch aerobe Bedingungen aufgrund fehlender Wassersättigung. In den darunterliegenden Tiefenstufen bis 82 cm kommt es im Jahresgang zu Wasserschwankungen und der unterschiedlich beschaffende Torf ist nicht aggregiert und weniger stark zersetzt. Der Torfkörper endet mit einem Horizont aus wiederum sehr stark zersetzenem Torf, vermutlich verursacht durch den Austritt von sauerstoffreichem Wasser (s. Tabelle 1). Somit weist der Torfkörper in diesem Bereich des Moores noch eine Mächtigkeit von 115 cm auf (Gabriel & Pfaffner, 2022). Durch

den Einfluss des mineralischen Hangwassers ist das Moor folglich als Hanghochmoor anzusprechen (Succow & Edom, 2001b).



Abbildung 3: Bodenprofil am Versuchsstandort Gr. Eisenstraßenmoor. Foto: M. Gabriel

Tabelle 1: Bodenhorizonte am Versuchsstandort Gr. Eisenstraßenmoor (Gabriel & Pfaffner, 2022).

Bodenhorizonte

| | |
|--|--|
| +6 - 9 cm "terrestrischer Auflagehorizont" | aus schwach zersetzen Moosen und Fichtennadeln |
| 0 - 20 cm "vererdet-aggregierter Torfhorizont" | aus amorphem hochzersetzen Torf |
| 20 - 38 cm "Torfschrumpfungshorizont" | aus mittel- bis starkzersetzen Radizellentorf mit Beimengungen von Wollgras, Grobseggen und Holz |
| 38 - 65 cm "Wechselwasserhorizont" | aus Radizellentorf mit Holzbeimengungen, mittelhoch zersetzt |
| 65 - 82 cm "Wechselwasserhorizont" | aus Radizellentorf mit Holz und Grobseggen Beimengungen, hoch zersetzt, matschiges Gefüge |
| 82 - 115 cm "reduzierter Torfhorizont" | aus amorphem Torf, sehr hoch zersetzt, matschiges Gefüge |
| +115 cm "reduzierter Gleyhorizont" | aus Fließerde, mineralischer Untergrund |

4.2 Material und Methodik

Die durchgeführten Aufnahmearbeiten und die anschließende Datenverarbeitung sollen im Folgenden methodisch beschrieben werden.

4.2.1 Geländearbeiten

Die eingerichtete Versuchsfläche stellt zugleich jene für die im Zuge des Projektes MoMoK durchzuführenden THG-Messungen dar und soll den ehemals entwässerten und in der Revitalisierung befindlichen Teil des Großen Eisenstraßemoores abbilden (s. Abbildung 4). Dabei handelt es sich im Folgenden um die Erstaufnahme im Oktober 2021. Auf der quadratischen Fläche mit einer Kantenlänge von 50 m sollen später die THG-Messstation installiert, sowie Vegetationsaufnahmen durchgeführt werden. Die Lage der Fläche wurde so gewählt, dass ausreichend Abstand zu dem süd-östlich tangierenden Forstweg, sowie zu der im Westen liegenden Freifläche gegeben ist. Zudem befindet sich im nördlich angrenzenden Gassenfeld bereits eine vegetationskundliche Versuchsfläche des Staatsbetriebes Sachsenforst. In diesem Bereich des Moores befinden sich verschlossene Entwässerungsgräben mit jeweils anliegenden Gassen im mittleren Abstand von etwa 30 m und ost-westlicher Ausrichtung. Innerhalb des eingenordeten Quadrates, welches zwei Gassenfelder umfasst, wurden nach festem Schema zwei repräsentative Probekreise der Bestandesaufnahme eingemessen. Diese liegen auf der Achse zwischen den Eckpunkten SO und NW mit einem jeweiligen Abstand von 17 m zum Mittelpunkt und weisen eine Fläche von 500 m² bei einem Radius von 12,62 m auf. Als Referenzpunkt wurde ein dauerhafter Messpflock nahe dem Forstweg, welcher den Heuschuppenweg mit der Eisenstraße verbindet und zwischen den Abteilungen 141 und 133 liegt, gesetzt. Dieser Punkt liegt unweit des zweiten Rohrdurchlasses, ausgehend von der Eisenstraße und wurde mit dem GPS-Gerät (Garmin eTrex 30) aufgenommen. Unter Anwendung des Bussolenzuges wurden mittels des Ultraschall-Baumhöhenmessers (Haglöf Vertex IV) und der Bussole (Suunto) die vier Eckpunkte, die zwei Probekreismittelpunkte, sowie der Mittelpunkt der Versuchsfläche eingemessen und mit Holzpflocken markiert.

Die Aufnahmearbeiten wurden nach der Arbeitsanleitung zur Kartierung von Waldmoorböden des Thünen-Instituts durchgeführt (TI-WO, 2021). Einer qualitativen Bestandesbeschreibung, folgten Datenerhebungen quantitativer Art (s. Anhang 2).

Alle Einzelbäume der Probekreise mit einem BHD ≥ 7 cm wurden in den Parametern BHD, Baumhöhe und Kronenansatz aufgenommen (s. Anhang 6; Anhang 7). Sämtliche Längen- und Höhenmessungen wurden mit dem Vertex durchgeführt, die Winkelmessungen zudem mit der Bussole. Die Altersbestimmung der Fichten erfolgte mittels Zählung der Astquirle und der Jahrringe an einem vorhandenen frischen Stubben. Diese Daten wurden mit denen der Forsteinrichtung abgeglichen (s. Anhang 3).



Abbildung 4: Fichtenbestand auf der Versuchsfläche. Foto: V. Burkhardt

Die Verjüngung umfasst alle Individuen mit einem BHD < 7 cm und einer Triebknospenhöhe ≥ 20 cm und wurde in jeweils vier Verjüngungsprobekreisen erfasst. Diese liegen in einer Distanz von 8 m zum Mittelpunkt der Probekreise, auf den zwei Achsen der Haupthimmelsrichtungen. Bei einer maximalen Distanz der Individuen von 4 m zur Mitte des Verjüngungsprobekreis wurden die nächstgelegenen 10 Individuen nach Baumart und Höhe aufgenommen und dabei der größte Radius notiert. Je Aufnahmesatellit wurde somit eine Fläche von 50,27 m² untersucht.

Zudem wurden alle abgestorbenen und kein vollständiges Feinreisig mehr besitzende Bäume, Baumteile und Stöcke als Totholz erfasst und vermessen. Die Aufnahmeschwelle lag hier für Totholzteilstücke und Wurzelstücke bei ≥ 10 cm Durchmesser am wurzelseitigen Ende bzw. dem durchschnittlichen Schnittflächendurchmesser und 10 cm BHD ganzer Bäume und stehender Bruchstücke. Sämtliches Totholz wurde zudem nach dem Grad der Zersetzung in 5 Klassen eingeteilt (s. Anhang 4).

4.2.2 Bestandesdaten

Zur quantitativen Beschreibung des Bestandes wurden die erhobenen Daten der Versuchsfäche in die Parameter Alter, Baumart, Höhe und Durchmesser des Grundflächenmittelstamms, sowie Grundfläche je Hektar abgeleitet. Auf diese Weise konnte aus den real vermessenen Probeflächen anhand der genannten Eingangsgrößen der Anwendung BWINPro ein fiktiver Bestand erstellt werden (s. Abbildung 5).

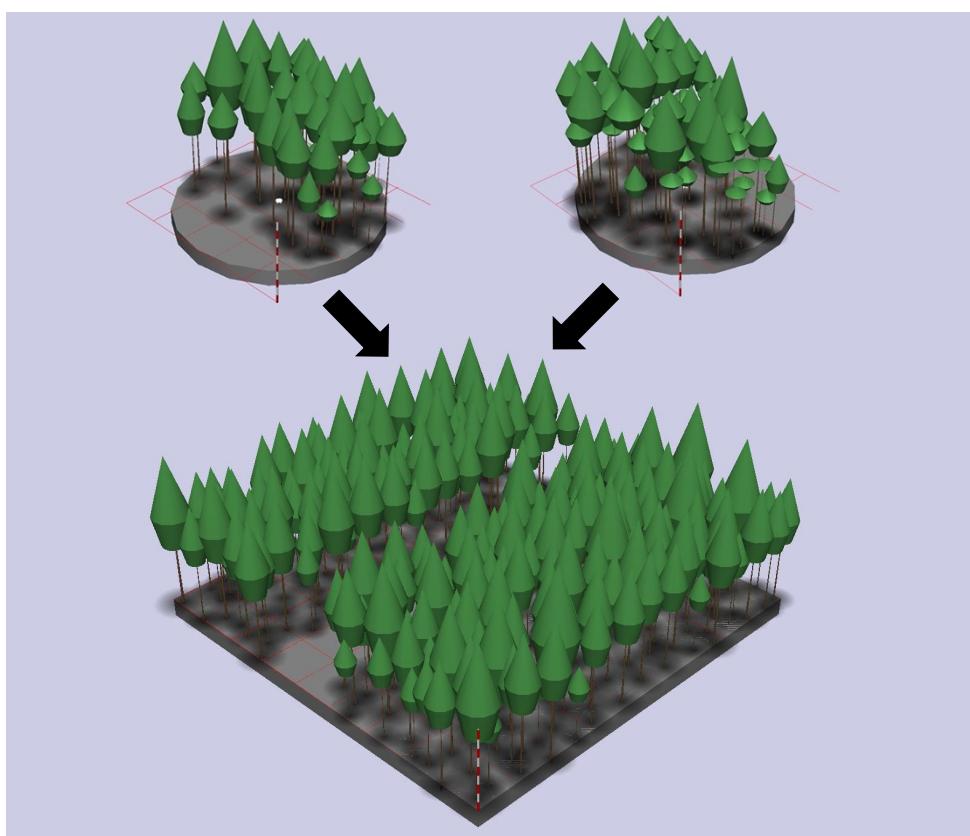


Abbildung 5: Erstellung eines fiktiven Modellbestandes anhand der realgetreue abgebildeten Probekreise 1 (oben links) und 2 (oben rechts) auf dem Großen Eisenstraßemoor.

4.2.3 Wachstumsmodellierung

Durch die Anwendung des Wachstumssimulator BWINPro wurden vier unterschiedliche Szenarien abgebildet, welche alle aus dem heutigen, zuvor erstellten Bestand hervorgehen. Diese angewendeten Szenarien wurden jeweils über einen Zeitraum von 50 Jahren simuliert und werden im Folgenden erläutert. In allen Szenarien verbleibt das Holz auf der Fläche, waldbauliche Behandlungseingriffe dienen dabei der Schaffung von Totholz.

Szenario 1 – Wachsen lassen

Diese mögliche Bestandesentwicklung schließt jegliches Absterben oder Nutzen von Bäumen, außerhalb jener der Anwendung zugrunde liegenden Mortalitätsraten durch innerartliche Konkurrenz, aus. Dadurch soll ein Wachstum ohne biotische und abiotische Schädigung der Individuen simuliert werden, welches etwa bei ausgebliebenen Revitalisierungsmaßnahmen angenommen werden kann.

Szenario 2 – Forstliche Behandlung

Für dieses Szenario wurde die im Programm BWINPro enthaltene Behandlungskette für die Fichte (Typ 50) angewendet. Darin kommt es zu unterschiedlichen forstlichen Eingriffen wie der Z-Baumauswahl, Pflegedurchforstung und Zielstärkennutzung, welche auf Waldbaukonzepten der Niedersächsischen Landesforsten beruhen.

Szenario 3 – Absterben des Bestandes

Unmittelbar zu Beginn der Simulation wird in diesem Fallbeispiel ein Kahlschlag auf der Fläche durchgeführt, der einem Absterben des Bestandes durch abiotische oder biotische Schadursachen gleichkommt. Anschließend werden keine weiteren Maßnahmen durchgeführt und die natürliche Sukzession soll fortfahren.

Szenario 4 – Hohe Mortalitätsrate der Fichte

In diesem Szenario wurde beispielhaft eine mögliche Anpassung der Simulationssoftware durchgeführt, welche jedoch keiner Parametrisierung durch belastbare Daten gleichkommt. Es wurde durch die Senkung der maximalen Bestandesdichte eine hohe Mortalitätsrate der Individuen herbeigeführt. Dies soll einer gestaffelten Bestandesauflösung durch biotische und abiotische Schädigungen gleichgesetzt werden, etwa durch Wasseranstauung und Borkenkäferbefall.

| | |
|------------------------------|--|
| Height Increment | 0.0000000000000000 |
| Height Increment Error | 0.082 |
| Quadratic Diameter Increment | (exp(2.8884+1.0544*ln(3.14159265359*(t.cw/2.0)/(6.0*(t.h-t.cb)^2)*((4.0*(t.h-t.cb)^2+(t.cw/2)^2) |
| Diameter Increment Error | 0.638 |
| Diameter Tree Error | 0.0,0,0,0,0,0 |
| Maximum Density | if(t.h>=8.0,20.9180-20.4940*exp(-exp(-4.7660)*t.h^1.6950),15.70) /* Fichte Nordwest (Woerde) |
| Maximum Age | 240 |
| Plugin Ingrowth | treegross.base.ingrowth2 |
| Decay | 1.0-((sp.year-t.out-5.0)/50.0) |
| Tarred Diameter | 145.0 |

Abbildung 6: Beispielhafte Anpassung der Wachstumsfunktion "Maximum Density" im Simulationsprogramm BWINPro.

4.2.4 Kohlenstoffspeicher

Bestand

Durch die fiktive Abbildung des heutigen, sowie zukünftiger Bestände mittels des Wachstumssimulators BWINPro der NW-FVA, konnten entsprechende Speicher an Biomasse und Kohlenstoff baumartenspezifisch abgeleitet werden. Die vorausgehende alleinige Auswahl und Anpassung der Wertigkeit des Sortimentes Restholz auf 100 % in der Sortierung im Programm BWIN, ermöglicht die Zusammenfassung aller sonstigen Derbholz-Sortimente zu dem des Restholzes. Der Biomassebericht liefert daraufhin entsprechende Anteile in den Kompartimenten Holz, Rinde, Reisig und Blättern. Diese Werte wurden ab dem Zeitpunkt des Absterbens der Individuen durch Holzernte oder anderweitige Mortalität auf den Modellierungszeitraum abgeleitet. Unterschiedliche Zersetzungsgarde und entsprechende Rohdichten und Kohlenstoffgehalte können dabei im Laufe der Simulation nicht zugeordnet werden. Daher werden gleiche Werte angenommen, wodurch sich der Kohlenstoffspeicher proportional zum Holzvorrat verhält. Auf diese Weise kann anhand der Abbaukonstante nach Rock (2008b) von 0,0525 das einfache exponentielle Modell nach Meyer et al. (2009) auch auf den Kohlenstoffspeicher [$t \text{ ha}^{-1}$] angewendet werden:

$$CV_t = CV_0 \times e^{-k \times t}$$

mit:

$t = \text{Abschreibungszeit [a]}$

$k = \text{Abbaukonstante}$

Aus dem Bericht des Kohlenstoffspeichers ist zudem der Gehalt an Kohlenstoff [$t \text{ ha}^{-1}$] in den Gesamtwurzeln entnommen worden. Da keine Zersetzungsmodele für diese Kompartimente bestehen, wurde der Speicher zum heutigen Zeitpunkt für die Gesamtbilanz verwendet, jedoch kein Zuwachs oder Abbau desgleichen angenommen.

Verjüngung

Da lediglich die Höhe der Individuen aufgenommen wurde, konnte über die allometrischen Beziehungen von Baumhöhe (H) [cm] und Wurzelhalsdurchmesser (WHD) [mm] nach den Erkenntnissen von Wolff et al. (2008) auf Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz, die fehlenden Größen ermittelt werden. Die Formulierungen wurden umgestellt und wie folgt angewendet:

$$WHD_{Eberesche} = \sqrt[1,0844]{\frac{H}{6,2529}}$$

$$WHD_{Fichte} = \sqrt[1,0905]{\frac{H}{3,674}}$$

$$WHD_{Birke} = \frac{H}{9,5205}$$

In Abhängigkeit von Baumart und der Höhenklassen < 1 m und > 1 m (s. Tabelle 2) wurden anhand der durch Wolff et al. (2009) erstellten Schätzformel der Trockensubstanz der gesamten Individuen, die Biomasse [g] ebendieser bestimmt:

$$BM = e^a \times WHD^b \times H^c$$

mit:

a, b, c = Koeffizienten der Regressionsgleichung (Tabelle 2).

Tabelle 2: Geschätzte Koeffizienten der Biomassefunktion, in Abhängigkeit der Baumart und Höhenklasse (Wolff, Bolte, Bielefeldt, & Czajkowski, 2008).

| Baumart | Eberesche <1 m | Eberesche >1 m | Fichte <1 m | Fichte >1 m | Birke <1 m |
|---------|----------------|----------------|-------------|-------------|------------|
| a | -5,511373 | -1,918987 | -4,365029 | -3,075029 | -4,374745 |
| b | 1,102974 | 1,599091 | 1,873336 | 1,605891 | 1,952172 |
| c | 1,326973 | 0,502464 | 0,977148 | 0,78647 | 0,731565 |

Mittels der mittleren Kohlenstoffgehalte nach Wolff et al. (2008) (s. Tabelle 3) wurden die Kohlenstoffspeicher der Individuen errechnet und über den Faktor 24,87 auf einen Hektar bezogen.

Tabelle 3: Mittlere Kohlenstoffgehalte [mg g⁻¹] der Verjüngung auf Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz, in Abhängigkeit der Baumart und Höhenklasse (Wolff, Bolte, Bielefeldt, & Czajkowski, 2008).

| Baumart | Eberesche <1 m | Eberesche >1 m | Fichte <1 m | Fichte >1 m | Birke <1 m |
|-------------------------|----------------|----------------|-------------|-------------|------------|
| C [mg g ⁻¹] | 482,1 | 490,0 | 514,8 | 509,3 | 501,6 |

Totholz

Die aktuellen Biomasse- und Kohlenstoffgehalte des real vermessenen Totholzes für stehende, ganze Bäume (Typ 2) und liegende, ganze Bäume (Typ 5) wurden durch die Reduktion um die Kompartimente Blätter (ZG 1), Blätter und Reisig (ZG 2), bzw. Blätter, Reisig und Rinde (ZG 3) der für entsprechende lebende Bäume errechneten Werte der Anwendung BWINPro, ermittelt (s. Anhang 4). Die Werte des ZG 3 wurden zudem durch die Anteile nach Dobbertin und Jüngling (2009) verringert (s. Anhang 5).

Für liegende (Typ 1) und stehende Bruchstücke (Typ 3), sowie Wurzelstöcke (Typ 4) wurde das Volumen mittels der Huber'schen Formel (Kramer & Akca, 1995) berechnet und die Biomasse unter Anwendung der Raumdichte nach Block und Schuck (2002) abgeleitet. Diese Mengen wurden in den Zersetzungsgrenzen 1 und 2 durch den Faktor 0,0907 erweitert, um dem Rindenanteil Rechnung zu tragen (Wellbrock et al., 2014). Dabei wurde unterstellt, dass Totholz dieser Kategorien ohne Rinde vermessen wurde und eine eventuell gegebene Doppeltwertung dieses Kompartimentes akzeptiert. Die Biomasse des Totholzes der Zersetzungsgrenzen 3, 4 und 5 wurde jeweils anhand der relativen Dichten verringert (s. Anhang 5). Zur Ermittlung der Kohlenstoffgehalte wurden ebenso entsprechende C-Anteile nach Dobbertin und Jüngling (2009) verwendet.

Um dem unterirdischen Anteil des real vermessenen Totholzes in Form der Grobwurzeln (> 2 mm) vereinfacht Rechnung zu tragen, wurden die errechneten Mengen durch den Biomasse-Expansionsfaktor für Wurzeln von 1,25 erweitert (Pretzsch, 2009).

Der Bestandesmodellierung über 50 Jahre einhergehend, wurde die Entwicklung der Biomasse- und Kohlenstoffmengen in 10-Jahresschritten für sämtliche Totholztypen nach Rock et al. (2008b) durch die Abbaukonstante der Fichte von 0,0525 beschrieben. Da das Ausgangsvolumen des Totholzes nicht bekannt ist, wurde die lineare Abschreibung gewählt (Meyer et al., 2009). Auch hier können zukünftige Zersetzungsgrenzen nicht zugeordnet werden und der Kohlenstoffspeicher [$t \text{ ha}^{-1}$] verhält sich proportional zum Holzvorrat, wodurch folgende Formulierung angewendet wird:

$$CV_t = CV_0 - k \times t$$

mit:

t = Abschreibungszeit [a]

k = Abbaukonstante

Ein möglicher Substitutionseffekt oder abweichende Umsetzungsrationen der in der Simulation anfallenden Holzerntemengen wurden nicht betrachtet. Diese Sortimente wurden in Bezug auf den Kohlenstoffspeicher dem Totholz mit entsprechend gleichen Zersetzungsraten zugeordnet.

Die Kohlenstoffspeicher der Kraut- und Vegetationsschicht, sowie des Bodens waren nicht Teil der Berechnungen.

5 Ergebnisse

5.1 Bestandesbeschreibung

Auf der Versuchsfläche stockt ein einschichtiger Fichten-Reinbestand (s. Abbildung 7), dessen Schlussgrad durch Bereiche gedrängter Kronen und solcher mit Lücken, von Inhomogenität geprägt und insgesamt als locker zu bezeichnen ist (s. Abbildung 9). Die Fichte (*Picea abies* [L] Karst.) nimmt einen Anteil von 100 % ein und weist zum Zeitpunkt der Aufnahme ein Durchschnittsalter von 56 Jahren, in der Altersspanne 33 bis 68 Jahre, auf (s. Anhang 3). Bei einem mittleren BHD von < 20 cm befindet sich der Bestand in der natürlichen Altersstufe des Stangenholzes, vor dem Übergang in das schwache Baumholz (s. Abbildung 8). Obgleich die Art der Entstehung hier nicht belegt werden kann, lässt die Historie der regional weitverbreiteten Flächentrockenlegung mit dem Ziel der Bestandesetablierung der Fichte auf eine Begründung durch Pflanzung schließen. Die relative Bonität von 3,44 (Wenk, Römissh & Gerold, 1984) verdeutlicht die mäßig bis geringe Wuchsigkeit des Bestandes. Individuen, welche bereits die Dimensionierung des Baumholzes erreicht haben, sind als mittelschäftig zu bezeichnen und weisen häufig durchschnittliche und teilweise grobastige Schaftqualitäten auf. Folglich wäre mit einer mittleren bis geringen Wertleistung durch einen Anteil an B-Holz von etwa 50 % zu rechnen. Die Kronen sind teilweise deformiert, in Bereichen mit hoher Stammdichte zudem stark eingeengt. Entlang der Gassen sind vermehrt Kronenbrüche vorzufinden, welche durch Schneelast und Wind verursacht wurden. Des Weiteren sind Nadelverluste der Fichten von etwa 25 bis 35 % als Symptom von Vitalitätseinbußen anzusprechen.

Der ursprünglich als schlagweiser Hochwald eingerichtete Bestand befindet sich heute außerhalb regelmäßiger Bewirtschaftung (arB) und dient in ganzer Fläche der Hochwasserschutzfunktion, sowie nahezu flächig als FFH- und SPA-Gebiet und anteilig geschützter bzw. wertvoller Biotope dem Naturschutz. Als Teil des Naturparks Erzgebirge/Vogtland und darin der Zone II erfüllt die Fläche zudem Funktionen der Erholung.

Im Zuge der technischen Revitalisierungsmaßnahmen kam es zur Anlage und Verbreiterung der Gassen entlang der Entwässerungsgräben zum Verschluss ebendieser. Die Fläche ist bereits zu 98 % der Befahrbarkeitsklasse B4 (kaum befahrbar) zugeordnet und wird technologisch als sensibel eingestuft.

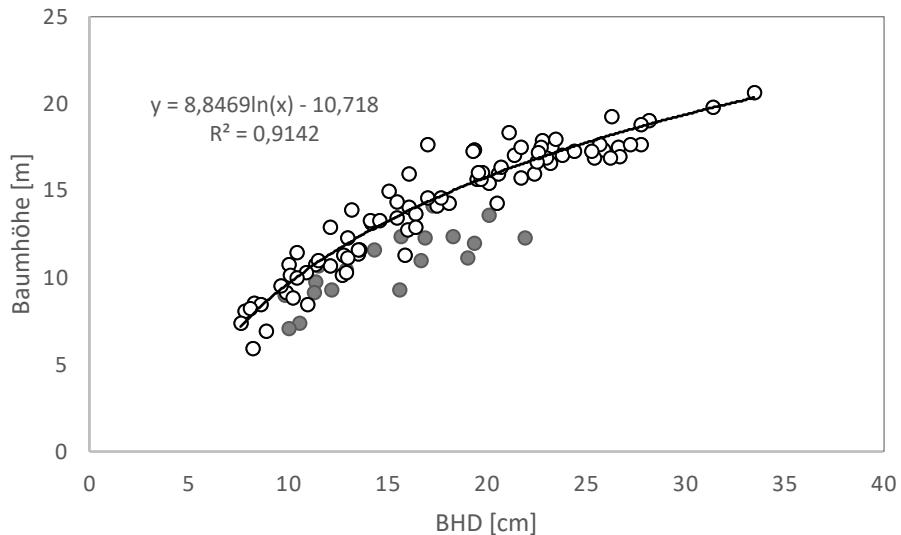


Abbildung 7: Bestandeshöhenkurve (BHK) des Versuchsstandortes, bereinigt um die Kronenbrüche (graue Punkte).

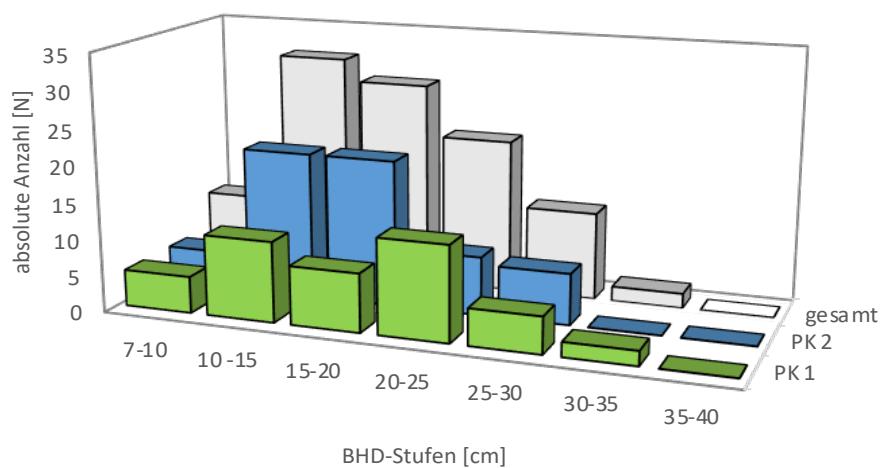


Abbildung 8: Absolute Durchmesserverteilung gesamt und getrennt nach den Probekreisen.



Abbildung 9: Kronendach auf dem Probekreis 1.
Foto: V. Burkhardt

5.2 Kohlenstoffspeicher und Wachstumsprognosen

Die zum Aufnahmezeitpunkt im Jahr 2021 im Bestand enthaltene Menge an Kohlenstoff beträgt etwa $67,7 \text{ t C ha}^{-1}$ (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Kohlenstoffmengen [t ha^{-1}] je Hektar der unterschiedlichen Speicher des Bestandes am Versuchsstandort im Jahr 2021.

| | Oberstand oberirdisch | Oberstand unterirdisch | Verjüngung oberirdisch | Totholz oberirdisch | Totholz unterirdisch | gesamt |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------|
| CV [t ha^{-1}] | 53,8 | 6,8 | 0,2 | 5,7 | 1,4 | 67,7 |

Szenario 1 – Wachsen lassen

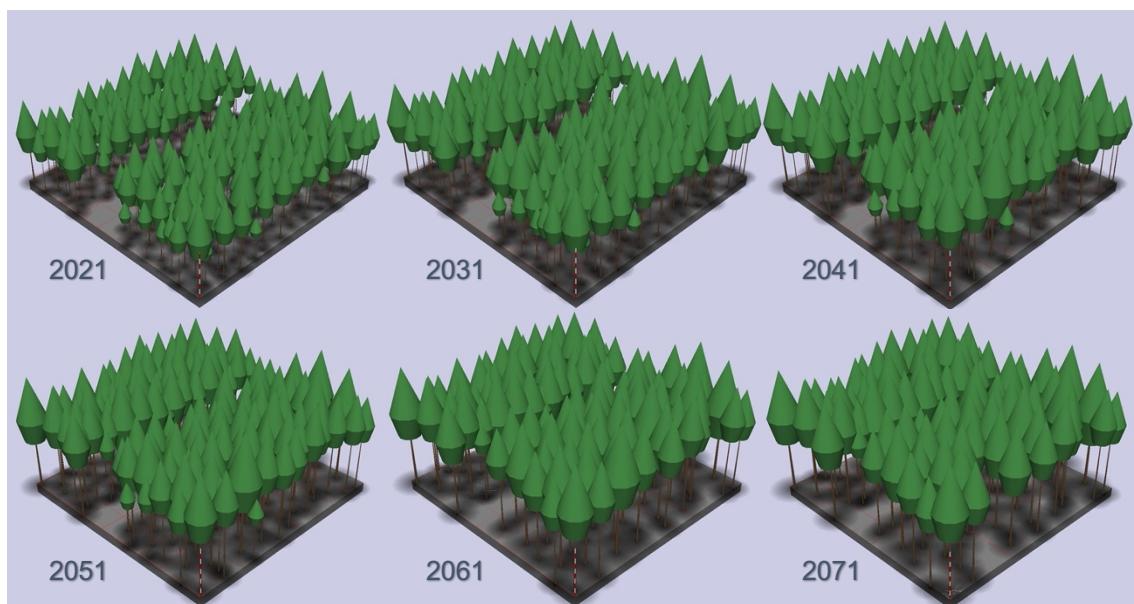


Abbildung 10: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 1.

In diesem Wachstumsszenario (s. Abbildung 10) kommt es zu einer sich immer weiter verstärkenden innerartlichen Konkurrenz der Fichte. Die Stammzahl nimmt kontinuierlich von 1.145 Individuen im Jahr 2021 auf 425 im Jahr 2071 ab. Dies resultiert in einer ebenfalls hohen Grundflächenhaltung, welche bis zum Ende der Simulation auf $56,3 \text{ m}^2$ je Hektar zunimmt. Aufgrund der starken Konkurrenz um Kronen- und Wurzelraum ist die Mortalität unsterdiger Individuen hoch, insbesondere im Alter von 66 bis 86 Jahren. In dieser Phase befindet sich der Bestand in der Dimension des schwachen und mittleren Baumholzes und es kommt zum Absterben von 18 bis 21 Fichten je ha und Jahr.

Der Kohlenstoffspeicher der lebenden Baumkompartimente vergrößert sich in den drei Jahrzehnten bis zum Jahr 2051 um etwa 2 bzw. 3 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, in den Intervallen bis zum Simulationsende noch um etwa 1 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. Im Totholz gespeicherter Kohlenstoff nimmt im ersten und letzten betrachteten Jahrzehnt mit etwa 0,06 bzw. 0,25 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ vergleichsweise gering zu, in den drei dazwischen liegenden Intervallen hingegen mit etwa 0,6 bis 0,8 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. Somit verändern sich die betrachteten Kohlenstoffspeicher etwa um den Faktor 2,7 auf 180,9 t C ha^{-1} im Jahr 2071.

Szenario 2 – Forstliche Behandlung

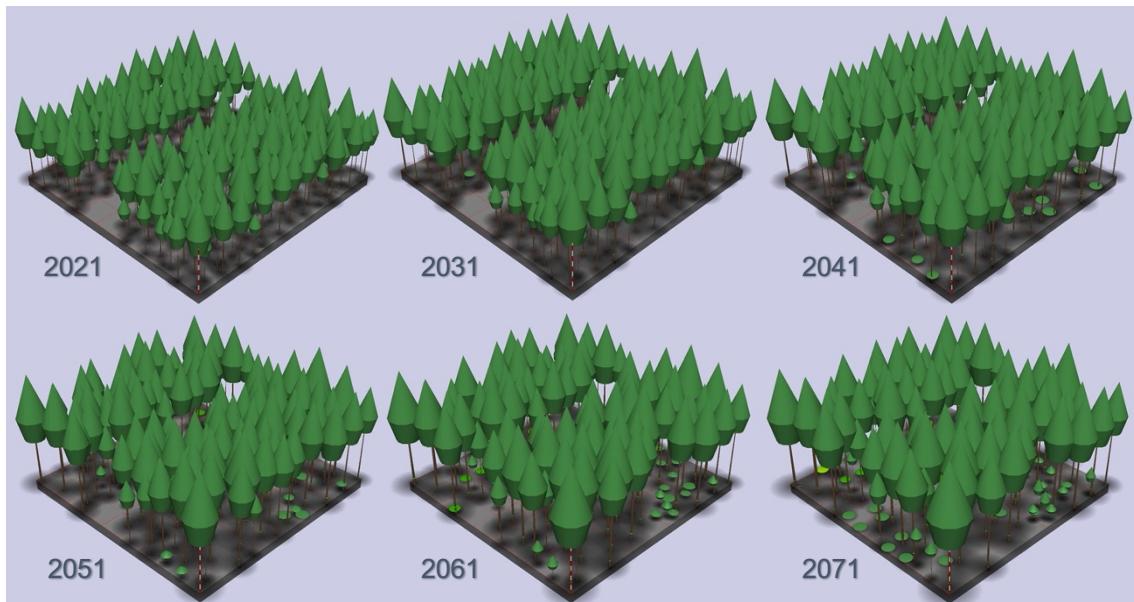


Abbildung 11: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 2.

Durch Freistellung der Z-Bäume im Zuge der Pflegedurchforstungen wird in diesem Szenario (s. Abbildung 11) die Stammzahl während dieses Waldbauszenarios frühzeitig gesenkt. Bis auf die ersten zwei Zeitintervalle von 5 Jahren mit je 17 bzw. 14 abgestorbenen Individuen je Hektar und Jahr, ist die Mortalität sehr gering und liegt maximal bei 5 Individuen pro Jahr, ehe im Bestandesalter von 101 Jahren keine weiteren Bäume absterben. Die Grundfläche nimmt trotz der forstlichen Eingriffe bis zum Alter 91 Jahre stetig zu und wird fortlaufend bei etwa 41 m^2 je Hektar gehalten. Während dieser Zeit wird die Zielstärke von 45 cm von wenigen Fichten erreicht, welche geerntet, in der Bilanzierung aber dem Totholz zugeschrieben werden.

Der im lebenden Baumbestand gespeicherte Kohlenstoff nimmt im ersten Jahrzehnt um knapp 3 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ zu. In den folgenden Intervallen nimmt dieser Trend von 1,4 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ bis 0,2 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ zusätzlicher Speicherung zum Ende der Simulation

steigt ab. Totholz inklusive der nutzbaren Sortimente entwickelt sich als Kohlenstoffspeicher ebenfalls im positiven Trend von $0,15 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ im ersten Jahrzehnt über knapp $1 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ im darauffolgenden, hin zu wieder abflachender Tendenz und $0,4 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ Akkumulation im letzten Intervall der Simulation. In den betrachteten Speichern vergrößert sich die Menge an Kohlenstoff folglich um den Faktor 2,3 auf etwa $156,2 \text{ t C ha}^{-1}$ im Jahr 2071.

Szenario 3 – Absterben des Bestandes



Abbildung 12: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 3.

Dem simulierten Kahlschlag, welcher einem Absterben des gesamten Bestandes gleichgesetzt wird (s. Abbildung 12), folgt eine starke Verdichtung der Gras- und Krautschicht. Diese erschwert das Auflaufen natürlicher Verjüngung der Baumarten, sodass es vom Randbereich ausgehend zu einer langsamen Sukzession kommt. Zum Ende der Simulation stocken insgesamt 65 Individuen über Derbholzgrenze der Birke, Fichte und Kiefer mit einer Grundfläche von lediglich $1,0 \text{ m}^2$ je Hektar auf der Fläche.

Durch das Absterben des gesamten Hauptbestandes bleibt als lebender Kohlenstoffspeicher zu Beginn der Simulation nur die Verjüngung mit etwa $0,2 \text{ t C ha}^{-1}$ erhalten. Dem lebenden Baumbestand über Derbholzgrenze mit den entsprechenden Kompartimenten sind erst ab dem Jahr 2051 wieder Zuwächse zuzuschreiben, sodass dieser zum Ende der Simulation etwa 2 t C ha^{-1} enthält. Dem sprunghaften Anstieg des Speichers Totholz folgt ein exponentieller Negativtrend von $2,6 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ hin zu etwa $0,25 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ Freisetzung von Kohlenstoff durch die Umsetzung des Totholzes. In Summe beträgt der Kohlenstoff in den betrachteten

Speichern mit $17,2 \text{ t C ha}^{-1}$ zum Ende des Szenarios noch etwa ein Viertel des ursprünglichen Speichers.

Szenario 4 – Hohe Mortalitätsrate der Fichte



Abbildung 13: Wachstumsmodellierung in 10-Jahresschritten von 2021 bis 2071, Szenario 4.

Der Absterbeprozess betrifft in diesem Szenario (s. Abbildung 13) zu Beginn etwa drei Viertel der Fichten und liegt ab dem Jahr 2031 bei 1 bis 8 Individuen je Hektar und Jahr. Die Grundfläche sinkt währenddessen von $27,2 \text{ m}^2$ je Hektar auf unter 10 m^2 und nimmt fortlaufend ab. Zwar ermöglicht die Änderung der Lichtverhältnisse die Etablierung der Birke, jedoch kann diese durch ihr Wachstum den Ausfall der Fichten in Bezug auf Vorrat und Grundfläche nicht kompensieren.

Nach der Reduzierung des Kohlenstoffspeichers der lebenden Baumkompartimente um 50 % im ersten Jahrzehnt folgt ein leichter Anstieg dieses in den zwei folgenden Intervallen um 0,3 bzw. $0,1 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, ehe in den beiden weiteren Jahrzehnten erneut eine Reduzierung des gespeicherten Kohlenstoffs um 0,2 und $1 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ erfolgt. Die Entwicklung des Speichers Totholz verhält sich in gegenläufigem Trend hierzu. Im ersten Jahrzehnt der Simulation kommt es zu Anstieg des gespeicherten Kohlenstoffs um knapp $2,2 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, welcher durch Umsetzungsprozesse im Folgenden wieder um etwa $0,5 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ je Intervall sinkt. Lediglich im letzten Jahrzehnt kommt es zu einem erneuten Anstieg des Speichers Totholz um etwa $0,25 \text{ t C ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. Lebende und tote Kompartimente ergeben zum Ende der Simulation einen knapp um die Hälfte reduzierten Kohlenstoffspeicher, im Vergleich zum Jahr 2021, von $38,5 \text{ t C ha}^{-1}$.

Im direkten Vergleich der vier Szenarien hinsichtlich ihrer Kohlenstoffspeicher sind Szenario 1 und 2 als Senke mit einem positiven Trend anzusprechen, während Szenario 3 und 4 in Summe eine Quelle mit einem negativen Trend darstellen (s. Abbildung 15). Lediglich der Speicher Totholz liegt zum Ende der Simulation in jedem Fall um das 2- bis 4-fache höher als zu Beginn. Bis auf jenen des Szenarios 3, weisen alle Totholzspeicher zum Simulationsende einen positiven Trend auf. Der Speicher lebende Baumbiomasse folgt in den Szenarien 1 und 2 kontinuierlich einem positiven Trend, zum Ende der Simulation ist dies in Szenario 3 nur leicht der Fall, während in Szenario 4 ein gegenteiliger Trend erfolgt (s. Abbildung 14).

Die durchschnittlichen Bildungsraten im Simulationszeitraum belaufen sich in der lebenden Baumbiomasse der Szenarien 1 und 2 auf etwa 1,8 bzw. 1,2 t C ha⁻¹ a⁻¹. Im Laufe der Szenarien 3 und 4 kommt es in Summe zu einer durchschnittlichen Freisetzung von etwa 1 bzw. 0,6 t C ha⁻¹ a⁻¹(s. Abbildung 15).

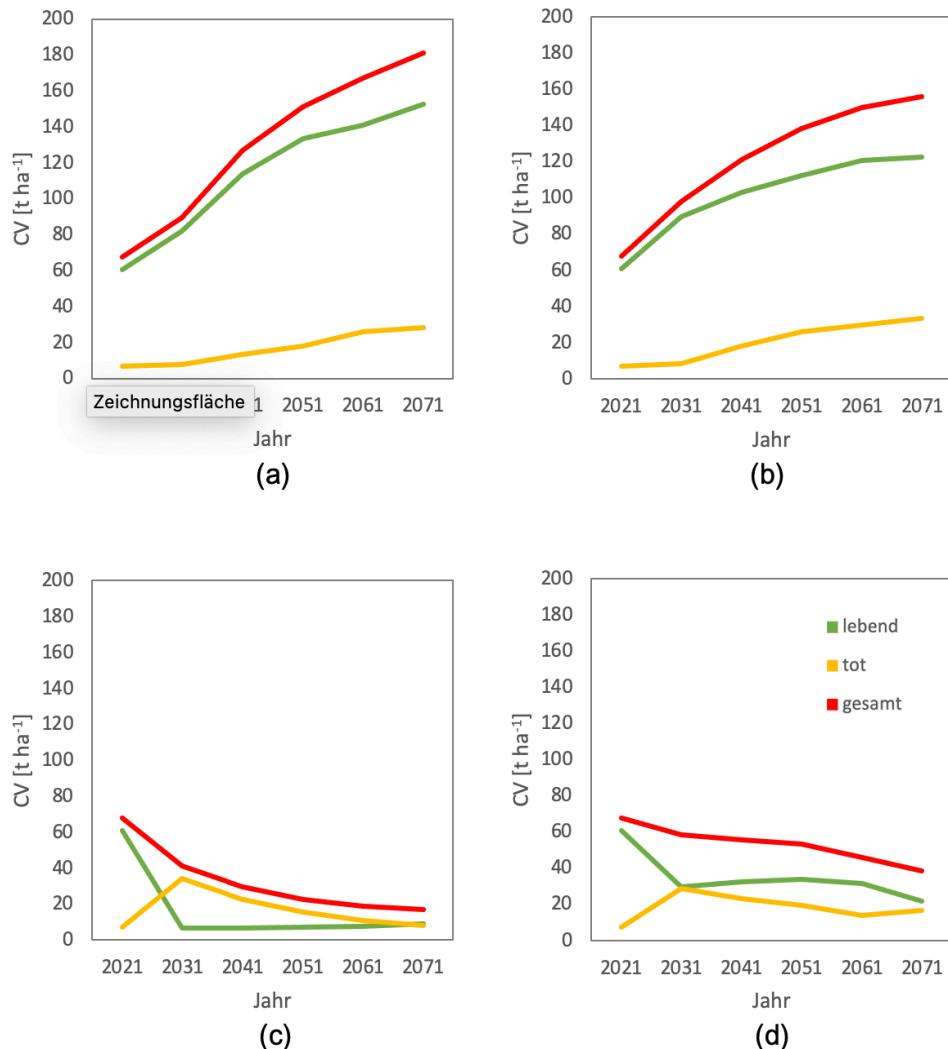


Abbildung 14: Entwicklung des Kohlenstoffvorrats der Szenarien 1 (a), 2 (b), 3 (c) und 4 (d) in Summe und getrennt nach den Speichern lebende BM und tote BM.

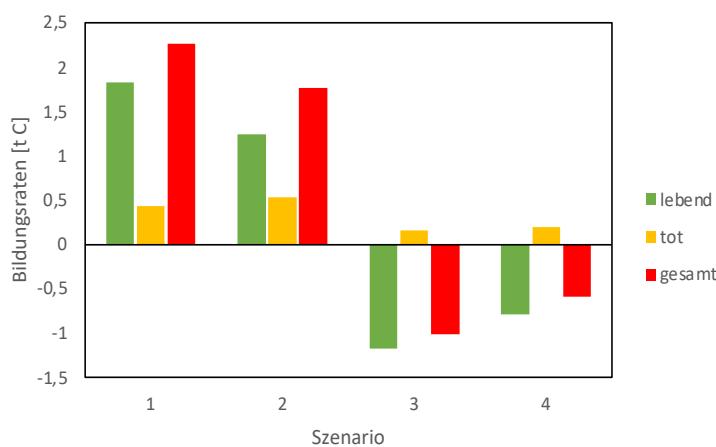


Abbildung 15: Durchschnittliche jährliche Bildungsraten im Simulationszeitraum.

6 Diskussion

Im Folgenden sollen die Methodik, sowie die Ergebnisse zusammenfassend bewertet und diskutiert werden.

6.1 Methodendiskussion

Die Verfahren zur Berechnung der Kohlenstoffspeicher sind hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit unterschiedlich zu bewerten.

In der Erfassung der Volumina birgt die Aufnahme des bestehenden Totholzes die größten Schwierigkeiten, im Speziellen die Zuordnung der Zersetzungsstufen. Methodisch einfacher zu handhaben ist hingegen die Bestimmung des Totholzzugangs und dessen weitere Beschreibung mittels Zersetzungsfunktionen (Rock, 2008a).

Durch die Abhängigkeit von vielen abiotischen und biotischen Faktoren, ist die Berücksichtigung der Totholznachlieferung und -zersetzung insgesamt jedoch erschwert (Mackensen, Bauhus & Webber, 2003). Erstere wurde durch die Wachstumsszenarien beschrieben, die Zersetzung wurde durch die Funktionen nach Rock et al. (2008b) berechnet. Dabei wurde die gesamte oberirdische Biomasse aller Kompartimente verwendet auch, wenn sich die Zersetzungsfunktionen auf das Derbholz beziehen. Es wurde in Kauf genommen, dass die Zersetzung der Kompartimente Blätter und Reisig gegebenenfalls anderen Funktionen unterliegt. Aufgrund der unter moortypischen Wasserständen bedingten, langsameren Umsetzung dieser Kompartimente, wäre eine entsprechende Abweichung zu jener dem Derbholz entsprechenden, denkbar. Dementgegen ist ebenso eine schnellere Zersetzung aller Kompartimente im eher feuchten Milieu möglich.

Da die Wurzelbiomasse ebenso Teil des Totholzspeichers ist, jedoch keine Funktionen für die unterirdische Zersetzung vorliegen und somit hier keine Abschreibung stattfand, weicht das Ergebnis vermutlich vom tatsächlichen Speicher ab.

Die Aufnahme der Verjüngung allein über die Pflanzenhöhe unter anschließender Herleitung des Wurzelhalsdurchmessers zur Bestimmung des Volumens, stellt ein praktikables Verfahren dar. Jedoch ist aufgrund der geringen Datenmenge aus Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz von einer geringen Belastbarkeit der verwendeten allometrischen Beziehungen zu sprechen.

Der Wachstumssimulator BWINPro der NW-FVA basiert auf erhobenen Daten von Versuchsflächen in Nordwestdeutschland und ist ein geeignetes Werkzeug für die Beurteilung waldbaulicher Behandlungen. Durch die Möglichkeit der Berechnung unterschiedlicher Speicher der Bestände lassen sich diese dabei auch in Hinblick auf den Kohlenstoffhaushalt bewerten, was eine wichtige Entscheidungshilfe darstellen kann. Die auf Sonderstandorten herrschenden Wachstumsbedingungen werden in dem Wachstumssimulator bisher nicht berücksichtigt, wodurch die Ergebnisse nur bedingt belastbar sind. Auf diese, für Moorstandorte spezifischen Einflussgrößen, soll im Kapitel Ausblick näher eingegangen werden.

Die Anwendung BWINPro generiert aus den Parametern Baumart und -alter, dh, hg und der Grundfläche die abzubildenden Bestände. Dabei sind jedoch die real vermessenen Kronenlängen kleiner als die im Simulator generierten, weshalb von einem geringeren Zuwachs der Individuen auf der Fläche auszugehen ist.

6.2 Ergebnisdiskussion

Wachstumsprognosen

In der vorliegenden Arbeit wurden vier unterschiedliche Szenarien der Bestandesentwicklung mittels der Anwendung BWINPro vorgenommen, welche im Folgenden bewertet werden sollen. Dabei konnten sich über den Simulationszeitraum ändernde klimatische und standörtliche Bedingungen, wie etwa die Wasserstandänderung, nicht direkt in der Anwendung berücksichtigt, jedoch in Ansätzen durch manuelle Programmeinstellungen beschrieben werden.

Im Szenario 1 wird ein Wachstum des Bestandes ohne besondere biotische oder abiotische Schädigungen angenommen. Dies stellt in erster Linie einen Referenzfall dar, ein tatsächliches Eintreten ist hingegen unwahrscheinlich. Schon zum heutigen Zeitpunkt ist der Bestand vor allem abseits der Probekreise durch biotische und abiotische Schadursachen betroffen.

Das Szenario 2 bedient sich einer waldbaulichen Behandlungskette auf Grundlage von Merkblättern der Niedersächsischen Landesforsten und soll im Wesentlichen eine vergleichbare Prognose unter forstwirtschaftlicher Nutzung darstellen. Auch hier kommt es zu keiner besonderen Schädigung des Bestandes und es wird von einer bestehenden Befahrbarkeit der Fläche ausgegangen. Da sich die Moorfläche

tatsächlich außerhalb der Bewirtschaftung befindet, wird dieses Szenario jedoch nicht eintreten.

Zu Beginn des Szenarios 3 wird mittels der Behandlung „Kahlschlag“ in der Anwendung BWINPro ein Absterben des gesamten Bestandes herbeigeführt. Dies soll die Auflösung des Fichtenbestandes durch biotische Faktoren wie dem Borkenkäferbefall oder abiotische Ursachen, wie etwa Windwurf oder für das Baumwachstum zu hohe Wasserstände, abbilden. Gerade Schäden durch die beiden erstgenannten Faktoren sind bereits heute auf der Moorfläche vorzufinden. Auf einem großen Teil dieser kam es 2006 zu einem flächigen Windwurf und vereinzelte Borkenkäferfangbäume aus dem Sommer 2021 lassen auf einen entsprechenden Befall schließen. Im weiteren Verlauf der Simulation stellt sich eine dichte Kraut- und Strauchschicht ein, welche als weitere Ausbreitung der Heidelbeere oder die Etablierung der moortypischen Rauschbeere (*Vaccinium uliginosum*) interpretiert werden kann und das Auflaufen von Naturverjüngung der Baumarten eindämmt. Lediglich im Randbereich stellt sich zum Ende der Simulation eine Bestockung mit Bäumen ein, welche beispielweise aus moortypischen Arten wie der Moorkiefer oder Fichten mit einem angepasst an höhere Wasserstände ausgebildeten Wurzelsystem, bestehen könnte.

Im Szenario 4 kommt es ebenfalls zu einer starken Schädigung der Fichte, jedoch erst im Verlaufe der Simulation zu einem flächigen Abgehen dieser. In diesem Zuge stellt sich unter dem Schirm der Fichte eine weniger dichte Krautschicht als in Szenario 3 ein, wodurch sich die Birke etablieren kann. Für den Wasserhaushalt der Moorfläche kann dies aufgrund des hohen Wasserbedarfs ebendieser als kritisch eingestuft werden. Der Bestand fungiert insgesamt als Kohlenstoffquelle, da die aufkommende Birke durch ihren Zuwachs die Zersetzungsraten des Totholzes im Simulationszeitraum nicht kompensieren kann.

Entscheidend für die tatsächliche Entwicklung des Fichtenbestandes wird zum einen sein, welcher dauerhafte Wasserstand sich auf der Moorfläche einstellen wird, inwieweit die abiotischen Schäden durch Windwurf, sowie Schnee- und Windbruch sich ausprägen und ob es durch entsprechende Wetterlagen zu einem relevanten Befall durch Borkenkäfer kommen wird. Zum heutigen Zeitpunkt wird zwar in den verschlossenen, ehemaligen Entwässerungsgräben Wasser auf der Moorfläche gehalten und in entsprechenden Verbauungen in diese geleitet, jedoch kam es nach

augenscheinlichen Betrachtungen im Bereich der Versuchsfläche bisher nicht zu einer Sättigung des Torfkörpers. Die Wurzelsysteme der Fichte befinden sich heute außerhalb des Wasserschwankungsbereichs in den Tiefenstufen ab 38 cm. Geschieht ein deutlicher Anstieg des Pegels und es kommt in Zukunft zu einer Anhebung des Wasserstandes nahe der Oberfläche, wäre ein flächiges Absterben der Fichte wahrscheinlich. Grund hierfür ist die Empfindlichkeit gegenüber Staunässe bzw. sich stark ändernder Wasserstände mit negativen Auswirkungen auf das nicht angepasste Wurzelsystem an anaerobe Bedingungen. Für diesen Fall zutreffend ist Szenario 3, welches auch nach dem Absterben des Bestandes die erneute Etablierung von Gehölzpflanzen aufgrund des hohen Wasserstandes nur im Randbereich ermöglicht. Ein für Hochmoore typischer, offener Kernbereich mit entsprechender Bodenvegetation wäre ein möglicher Zustand.

Tritt ein weniger hoher Wasserstand ein, etwa in Kombination mit einem durch langandauernde und warme Sommerwetterlagen begünstigten Borkenkäferbefall, bildet Szenario 4 dies ab. Das fortlaufende Absterben der Fichte und ein oberflächig trockener Torfkörper ermöglichen beispielsweise der Moorbirke eine flächige Besiedelung. Dieses kann durch den höheren Wasserbedarf der Birke gegenüber der aktuell stockenden Fichte zu einer geringeren Wassersättigung des Torfkörpers führen.

In bisherigen Wachstumsmodellierungen sind Risiken nicht berücksichtigt, wenngleich sie einen entscheidenden Einfluss auf die Bestandesentwicklung und die Beurteilung des waldbaulichen Handels darstellen (Schall & Ammer, 2013). In Abhängigkeit von der Baumart zählt zu diesen Risiken neben weiteren biotischen und abiotischen Faktoren auch der Einfluss von Wild, insbesondere auf die Biomasse der Verjüngung und somit den Kohlenstoffvorrat (Ammer, Vor, Knoke & Wagner, 2010). Weitere klimatische Veränderungen und sich wandelnde gesellschaftliche Ansprüche sollte zudem mit beachtet werden (Höllerl & Bork, 2013).

Die Prognosen zeigen, dass ein hoher Verlust an lebenden Bäumen (Szenario 4), den Baumbestand zu einer Kohlenstoffquelle machen, da hier der Zuwachs an lebenden Individuen die Freisetzung von Kohlenstoff durch Zersetzungsprozesse nicht ausgleichen kann.

Kohlenstoffspeicher

Auf der forstbetrieblichen Ebene geht es im Falle der Kohlenstoffsequestrierung zum einen darum, die Speicher im Wald zu erhalten und zu verbessern und zum anderen darum, entsprechende Speicher in der Nutzung von Holzprodukten bzw. die stoffliche und energetische Substitution zu optimieren (Wördehoff, 2016). Auf letztere Punkte wurde in dieser Arbeit nicht eingegangen, lediglich wurden die Speicher lebende und tote Baumbiomasse im Wald betrachtet. Im Szenario 2 wurde zwar die waldbauliche Behandlung simuliert, anfallende Sortimente jedoch als im Wald verbleibendes Totholz bewertet. Verglichen mit einer stofflichen und energetischen Nutzung, ausgehend von jeweils etwa 50 % Anteil, sind jedoch die positiven ökologischen Effekte der verzögerten Freisetzung von Kohlenstoff, der Ersetzung energieaufwendig herzustellender Produkte und der geminderten Treibhausgasfreisetzung durch die Nutzung fossiler Energieträger zu nennen (Rüter, 2011). Da aufgrund der Dimensionen und Qualitäten potenziell anfallender Sortimente von einem geringen Anteil an langlebigem Bauholz und einem hohen Anteil an mittel- bzw. kurzlebigen Verbund- und Zellstoffprodukten auszugehen ist, dürfte der Effekt in diesem Fall gering ausgeprägt sein.

Wirth et al. (2004) beziffern den für Wirtschaftswälder typischen Totholzspeicher auf 1,4 bis 2,1 t C ha⁻¹, demgegenüber berechneten Mund et al. (2015) in Wachstumssimulationen für forstlich genutzte Flächen in Thüringen einen Speicher von 8,4 bis 12,1 t C ha⁻¹. Der in dieser Arbeit für den Versuchsstandort Johanngeorgenstadt ermittelte Kohlenstoffspeicher Totholz beträgt aktuell etwa 7,1 t C ha⁻¹ und entwickelt sich in den Szenarien 1 und 2 auf 28,5 bzw. 33,5 t C ha⁻¹ und in den Szenarien 3 und 4 auf 15,1 bzw. 16,8 t C ha⁻¹. Die Differenz der ermittelten Werte zu denen der Literatur ist in erster Linie durch die ausbleibende Nutzung in der Modellierung zu begründen.

Der Speicher der lebenden Baumbiomasse in Fichtenbeständen wird nach der nationalen Inventurstudie aus 2008 auf durchschnittlich 138 t C ha⁻¹ datiert, Ergebnisse aus Norddeutschland beziffern einen Speicher von etwa 90 t C ha⁻¹ (Wördehoff, Spellmann, Evers & Nagel, 2011; Wördehoff, 2016). Diese Werte werden in den Szenarien 1 und 2 mit 152 und 122 t C ha überschritten und in den Szenarien 3 und 4 mit 2 bzw. 21 t C ha⁻¹ deutlich unterschritten.

Die Bildungsraten des lebenden Baumbestandes erreichen in den Szenarien 1 und 2 Werte von 1,8 bzw. 1,2 t C ha⁻¹ a⁻¹. Demgegenüber stehen Bildungsraten naturnaher Hochmoore von 0,14 – 0,89 t C ha⁻¹ a⁻¹ nach Prager et al. (2006) und 0,24 t C ha⁻¹ a⁻¹ aus Versuchen von Tolonen und Turonen (1996) in finnischen Mooren. Die Vergleichbarkeit dieser Werte ist jedoch durch die Langfristigkeit der Kohlenstoffspeicherung im Torf erschwert bzw. ist letztere höher zu gewichten. Zudem ist die Voraussetzung für die Akkumulation in Mooren das Vorhandensein torfbildender Vegetation.

Die im betrachteten Baumbestand gespeicherten Mengen an Kohlenstoff beläuft sich im Szenario 1, ohne Schädigung, zum Ende der Simulation auf 180 t C ha⁻¹. Dieser Wert wird in Versumpfungsmooren bereits in einem Horizont der Mächtigkeit von etwa 15 cm erreicht. In diesen Mooren werden nach Roßkopf und Zeitz (2009) bei einer Torfmächtigkeit von 0,35 bzw. 1,25 m insgesamt 421 bzw. 1.164 t C ha⁻¹ gespeichert. Dies verdeutlicht die hohe Bedeutung der Wiedervernässungsmaßnahmen mit dem Ziel, eingesetzte Torfzersetzung einzudämmen, auch wenn dies mit dem Absterben des Baumbestandes einhergeht.

Moore in Deutschland speichern in Summe etwa ein Drittel der gesamten Kohlenstoffvorräte, etwa so viel wie Wälder, bedecken jedoch dabei nur 5 % der Landfläche gegenüber 30 % bewaldeter Fläche (Roßkopf, Fell & Zeitz, 2015). Mit dem Nutzungsverzicht auf Moorstandorten unter Wald, welche ohnehin meist ein geringes Nährstoffpotenzial aufweisen, wird somit auf geringer Fläche ein enormer Beitrag zum Klimaschutz geleistet.

7 Ausblick

Durch die Lagemessung aller Bäume auf den Probekreisen, lassen sich durch die genaue Zuordnung dieser bei zukünftigen Wiederholungsaufnahme zahlreiche weitere Ergebnisse generieren, wie etwa die fortlaufende Zuwachsbestimmung der Individuen. Mittels der Entnahme von Zuwachsbohrkernen, sind die Durchmesserzuwächse mit denen der Zeit vor der Wiedervernässung zu vergleichen. Ebenso kann die Altersbestimmung, welche aktuell auf Daten der Forsteinrichtung und Astquirlzählungen beruht, überprüft und präzisiert werden.

Forschungsbedarf besteht in der Herleitung der Biomasse der unterschiedlichen Speicher in den Wurzelanteilen als Verhältnis zum oberirdischen Speicher und eventuell abweichender Elementgehalte dieser Kompartimente, auch auf Moorstandorten.

Um die Wachstumsmodellierung durch die Anwendung BWINPro auf die moorspezifischen Randbedingungen zu beziehen, sind einige Anpassungen denkbar. Die Implementierung weiterer Parameter in die Simulationssoftware würde dabei das Einsatzspektrum weiter erhöhen. Dazu gehört zum einen das Einfließen der Toleranz der Baumarten gegenüber Staunässe und weitergehend der Umgang mit sich im Laufe des Baumwachstums verändernden Umweltbedingungen, wie der Wasserversorgung. Durch die Bestimmung der Wachstumsentwicklung und der Mortalitätsraten anhand von Wiederholungsaufnahmen, wäre bei einer belastbaren Datenlage zudem eine Parametrisierung der in BWINPro hinterlegten Wachstumsfunktionen, bezogen auf den Versuchsstandort, denkbar. Dies wurde ohne entsprechende Datengrundlage in Szenario 4 beispielhaft durchgeführt.

Zwar wächst mit der Anzahl der Einflussgrößen auch die Streuung der Ergebnisse der Wachstumsprognosen, jedoch könnte gerade in dieser Komplexität die softwarebasierte Modellierung ein hilfreiches Werkzeug darstellen.

8 Literaturverzeichnis

- AG Boden. (1996). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland.
- Ammer, C., Vor, T., Knoke, T., & Wagner, S. (2010). *Der Wald-Wild-Konflikt. Analyse und Lösungsansätze vor dem Hintergrund rechtlicher, ökologischer und ökonomischer Zusammenhänge*. Göttingen: Göttinger Forstwissenschaften, Universitätsverlag.
- Bernhardt, A., Haase, G., Mannsfeld, K., Richter, H., & Schmidt, R. (1986). Naturräume der sächsischen Bezirke. *Sächsische Heimatblätter*, 32(4/5), S. 46.
- Blankenburg, J. (1994). Hochmoorregeneration. *NNA-Berichte: Entwicklung der Moore*, 7(2), S. 55 - 56.
- Block, J., & Schuck, J. (2002). Nährstoffentzüge durch die Holzernte und ihr Einfluss auf den Nährstoffhaushalt armer Standorte in Rheinland-Pfalz. *Forstliche Forschungsberichte München*, 186, S. 150 - 151.
- Bonn, A., Berghöfer, A., Couwenberg, J., Drösler, M., Jensen, R., Kantelhardt, J., . . . Grützmacher, F. (2014). Klimaschutz durch Wiedervernässung von kohlenstoffreichen Böden. In *Naturkapital und Klimapolitik: Synergien und Konflikte; Kurzbericht für Entscheidungsträger* (S. 124 - 147). Berlin: TU.
- Dobbertin, M., & Jüngling, E. (2009). *Totholzverwitterung und C-Gehalt. Zwischenergebnisse*. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Drösler, M., Schaller, L., Kantelhardt, J., Schweiger, M., Fuchs, D., Tiemeyer, B., . . . Krüger, G.-M. (2012). Beitrag von Moorschutz- und Revitalisierungsmaßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel von Naturschutzgroßprojekten. *Natur und Landschaft*, 87(2), S. 70 - 75.
- DWD. (2022). *Vieljährige Mittelwerte*. Abgerufen am 15. 06 2022 von Deutscher Wetterdienst:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/vielj_mittelwerte.html

- Edom, F. (2001). Moorlandschaften aus hydrologischer Sicht. In M. Succow, & H. Joosten, *Landschaftsökologische Moorkunde* (S. 185 - 225). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Edom, F., & Wendel, D. (1998). Grundlagen zu Schutzkonzepten für Hang-Regenmoore des Erzgebirges. *Sächsische Landesstiftung Natur und Umwelt: Ökologie und Schutz der Moore im Erzgebirge*, S. 31 - 77.
- Eggelsmann, R. (1990). Moor und Wasser. In K. Göttlich, *Moor- und Torfkunde* (S. 288 - 319). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Frede, H., & Bach, M. (1996). *Landschaftshaushalt*. (H. Blume, & et al., Hrsg.) Landsberg: Ecomed Verlag.
- Göttlich, K. (1990). *Moor- und Torfkunde*. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Gabriel, M., & Pfaffner, N. (2022). *Aufnahmebogen Bodenprofil MoMoK-Wald*. Protokoll, unveröffentlicht, TI-WO, Eberswalde.
- Höllerl, S., & Bork, J. (2013). Die Kohlenstoffspeicherung von bewirtschafteten und unbewirtschafteten Fichtenbeständen unter Berücksichtigung von Ausfallrisiken - Aussagen nicht nur über Bestände der montanen Zone. *Forstarchiv*, 84(2), S. 52 - 64.
- Haase, G., & Mannsfeld, K. (Hrsg.). (2002). *Naturraumeinheiten, Landschaftsfunktionen und Leitbilder am Beispiel von Sachsen* (Bd. 250). Flensburg: Deutsche Akademie für Landeskunde.
- Hasch, B., Meier, R., Luthardt, V., & Zeitz, J. (2007). Renaturierung von Waldmooren in Brandenburg und erste Ergebnisse zum Aufbau eines Entscheidungsunterstützungssystems für das Management von Waldmooren. *TELMA-Berichte*, 37, S. 165 - 183.
- Ingram, H. A. (1978). Soil layers in mires: function and terminology. *Journal of Soil Science*, 29(2), S. 224 - 227.
- Joosten, H. (1993). Denken wie ein Hochmoor: Hydrologische Selbstregulation von Hochmooren und deren Bedeutung für Wiedervernässung und Restauration. *TELMA-Berichte*, 23, S. 95 - 115.

- Kessler, K., & Stehlik, M. (2014). Hydrologische Grundlagen und Wasserhaushalt. In S. Sachsenforst, *Moorrevitalisierung im Erzgebirge* (S. 36 - 38). Pirna.
- Kramer, H., & Akca, A. (1995). *Leitfaden der Waldmeßlehre*. Frankfurt am Main: J.D. Sauerländer's Verlag.
- Lange, J. (2002). *Untersuchungen zur Grabenverlandung in Entwässerungsgräben erzgebirgischer Moore*. Diplomarbeit, unveröffentlicht, Universität Leipzig, Institut für Geographie.
- LfULG. (2014). *Managementplan für das FFH-Gebiet 283 "Mittelgebirgslandschaft bei Johanngeorgenstadt"*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden: Freistaat Sachsen.
- LfULG. (2022). *Fichten-Moorwälder*. Abgerufen am 20. 06 2022 von Natura 2000, Sachsen: <https://www.natura2000.sachsen.de/fichten-moorwalder-23905.html>
- LWF. (2019). *Klima - Boden - Baumartenwahl*. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.
- Müller-Kroehling, S., & Zollner, A. (2015). Moorschutz im Wald – gestern, heute, morgen. *LWF aktuell*(104), S. 21 - 25.
- Männel, H. (1896). *Die Moore des Erzgebirges und ihre forstwirtschaftliche und nationalökonomische Bedeutung*. Dissertation, München.
- Mackensen, J., Bauhus, J., & Webber, E. (2003). Decomposition rates of coarse woody debris - A review with particular emphasis on Australian tree species. *Australian Journal of Botany*(51), S. 27 - 37.
- Mannsfeld, K., & Richter, H. (1995). *Naturräume in Sachsen (Forschungen zur deutschen Landeskunde)* (Bd. 238). Trier: Zentralausschuß für deutsche Landeskunde, Selbstverlag.
- Meister, K., & Liebert, H.-P. (2004). Sphagnum – Schlüsselart zur Bewertung erzgebirgischer Hochmoore und Hochmoorreste. *Beiträge zum Naturschutz im Mittleren Erzgebirgskreis*, 3, S. 40 - 50.
- Mellert, K., & Ewald, J. (2014). Nutrient limitation and site-related growth potential of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) in the Bavarian Alps. *European Journal of Forest Research*, 133(3), S. 433 - 451.

- Meyer, P., Menke, N., Nagel, J., Hansen, J., Kawaletz, H., Paar, U., & Evers, J. (2009). *Abschlussbericht des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekts: Entwicklung eines Managementmoduls für Totholz im Forstbetrieb.* Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
- Meynen, E., Schmithüsen, J., Gellert, J., Neef, E., Müller-Miny, H., & Schultze, J. (1962). *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands.* Remagen: Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde.
- Money, R. (1995). Re-establishment of a Sphagnum-dominated Flora on cut-over lowland raised bogs. In B. Wheeler, S. Shaw, W. Fojt, & R. Robertson, *Restoration of Temperate Wetlands* (S. 405 - 422). Chichester.
- Mund, M., Frischbier, N., Profft, I., Raacke, J., Richter, F., & Ammer, C. (2015). *Klimaschutzwirkung des Wald- und Holzsektors: Schutz- und Nutzungsszenarien für drei Modellregionen in Thüringen.* Bundesamt für Naturschutz, Bfn-Skripte 396, Bonn.
- Nagel, J., Duda, H., & Hanssen, J. (2014). ForestSimulator BWINPro 8. *Region Nordwestdeutschland - Version 2014.*
- NW-FVA. (2022). Software. Abgerufen am 15. 06 2022 von Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt: <https://www.nw-fva.de/veroeffentlichen/software>
- Oke, T. (2002). *Boundary layer climates.* London: Routledge.
- Pfadenhauer, J., & Klötzli, F. (1996). Restoration experiments in middle European wet terrestrial ecosystems: An overview. *Vegetatio*, 126, S. 101 - 115.
- Prager, A., Barthelmes, A., & Joosten, H. (2006). A touch of tropics in temperate mires: on Alder carrs and carbon cycles. *Peatlands International*(2), S. 26 - 31.
- Pretzsch, H. (2009). *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model.* Berlin: Springer.
- Rüter, S. (2011). Welchen Beitrag leisten Holzprodukte zur CO₂-Bilanz? *AFZ - Der Wald*(15), S. 15 - 18.
- Roßkopf, N., & Zeitz, J. (2009). *C-Speicherung und C-Freisetzungspotential der hydrologisch-genetischen Moortypen „Durchströmungsmoor“ und „Versumpfungsmoor“.* Bonn: DBG.

- Roßkopf, N., Fell, H., & Zeitz, J. (2015). Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. *Catena*, 133, S. 157 - 170.
- Rock, J. (2008a). *Klimaschutz und Kohlenstoff in Holz – Vergleich verschiedener Strategien*. Dissertation, Universität Potsdam, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- Rock, J., Badeck, F., & Harmon, M. (2008b). Estimating decomposition rate constants for European tree species from literature sources. *European Journal of Forest Research*, 127, S. 301 - 313.
- SBS. (2019). *Forsteinrichtung (WISA)*. Graupa: Staatsbetrieb Sachsenforst.
- Schütt, P., Schuck, H., & Stimm, B. (1992). *Lexikon der Baum- und Straucharten*. Landsberg: Ecomed.
- Schall, P., & Ammer, C. (2013). How to quantify forest management intensity in Central European forests. *European Journal of Forest Research*, 132, S. 379 - 396.
- Schouwenaars, J. (1994). Wasserhaushalt der Hochmoore. *NNA-Berichte: Entwicklung der Moore*, 7(2), S. 33 - 38.
- Scott, K., Kelly, C., & Rudd, J. (1999). The importance of floating peat to methane fluxes from flooded peatlands. *Biogeochemistry*, 47, S. 187 - 202.
- Slobodda, S. (1998). Entstehung, Nutzungsgeschichte, Pflege- und Entwicklungsgrundsätze für erzgebirgische Hochmoore. *Sächsische Landesstiftung Natur und Umwelt: Ökologie und Schutz der Moore im Erzgebirge*, S. 10 - 30.
- Succow, M. (1988). *Landschaftökologische Moorkunde*. Berlin: Gebrüder Bornträger.
- Succow, M. (2001a). Revitalisierung von Moorökosystemen - Beispiele aus Nordostdeutschland / Grundsätze. In F. E. M. Succow, *Landschaftökologische Moorkunde* (S. 391 - 398). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Succow, M., & Edom, F. (2001b). Regenmoore (Genese). In M. Succow, & H. Joosten, *Landschaftsökologische Moorkunde* (S. 391 - 398). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.

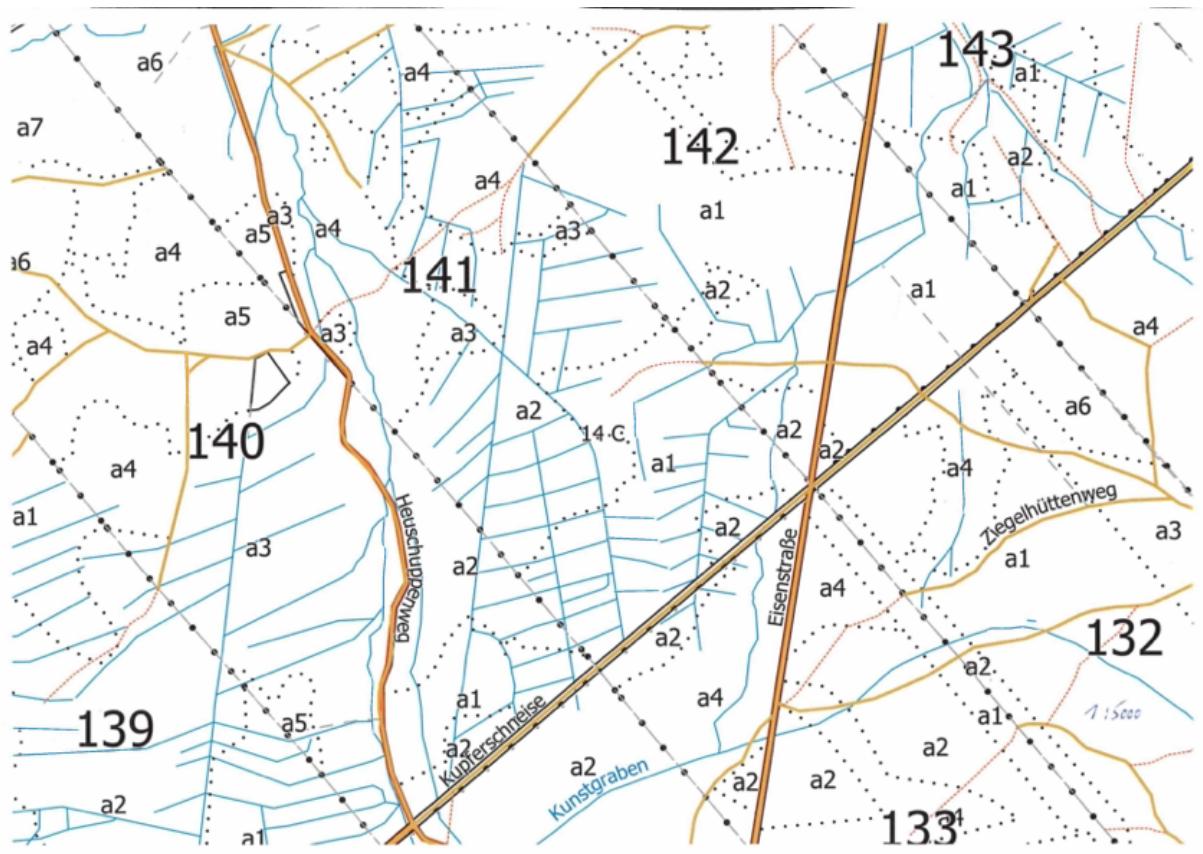
- Succow, M., & Jeschke, L. (1990). *Moore in der Landschaft. Entstehung, Haushalt, Lebewelt, Verbreitung, Nutzung u. Erhaltung der Moore.* Frankfurt: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH.
- Succow, M., & Joosten, H. (2001c). *Landschaftsökologische Moorkunde.* Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Drösler, M., Albiac-Borraz, E., Augustin, J., Bechtold, M., . . . Grünwald, T. (2013). Klimarelevanz von Mooren und Anmooren in Deutschland: Ergebnisse aus dem Verbundprojekt "Organische Böden in der Emissionsberichterstattung". *Thünen Working Paper*, No. 15.
- TI-WO. (2021). *Arbeitsanleitung Waldmoorboden Kartierung.* Eberswalde: Thünen-Institut für Waldökosysteme - Bodenschutz und Waldzustand, unveröffentlicht.
- Tolonen, K., & Turunen, J. (1996). Accumulation rates of carbon in mires in Finland and implications for climate change. *The Holocene*(6), S. 171 - 178.
- von Wilpert, K. (1990). *Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde.* Freiburg: Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre.
- vTI. (2014). *Dritte Bundeswaldinventur (2012).* Johann Heinrich von Thünen-Institut. Bonn: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- Wördehoff, R. (2016). *Kohlenstoffspeicherung als Teilziel der strategischen Waldbauplanung.* Dissertation, Georg-August-Universität, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen.
- Wördehoff, R., Spellmann, H., Evers, J., & Nagel, J. (2011). Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt.*
- Walentowski, H., Ewald, J., Fischer, A., Kölling, C., & Türk, W. (2013). *Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns.* Freising: Geobotanica.
- Wellbrock, N., Bielefeldt, J., Eickenscheidt, N., Bolte, A., Wolff, B., Block, J., . . . Mooshammer, R. (2014). *Kohlenstoff- und Nährelementspeicherung von Waldflächen des forstlichen Umweltmonitorings (BZE) in Rheinland-Pfalz.* Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Rep 16.

- Wendel, D. (1992). *Untersuchungen zum aktuellen Zustand und zur Sukzession der Vegetation im Naturschutzgebiet "Mothäuser Heide" (Erzgebirge)*. Diplomarbeit, TU Dresden, Abt. Forstwirtschaft, Tharandt.
- Wenk, G., Römisich, K., & Gerold, D. (1984). *DDR-Fichtenertragstafel*. Agrarwissenschaftliche Gesellschaft der Deutschen Demokratischen Republik, TU Dresden, Sektion Forstwirtschaft. Tharandt: Wissenschaftsbereich Forsteinrichtung und Forstliche Ertragskunde.
- Wirth, C., Schulze, E., Schwalbe, G., Tomczyk, S., Weber, G., & Weller, E. (2004). *Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens*. Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei.
- Wolff, B., Bolte, A., Bielefeldt, J., & Czajkowski, T. (2008). *Biomasse- und Elementvorräte im Unterwuchs von Flächen des forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz (BZE, Level II)*. unveröffentlicht, Fachhochschule Eberswalde/vTI, Eberswalde.
- Wolff, B., Bolte, A., Bielefeldt, J., & Czajkowski, T. (2009). Biomasse- und Elementgehalte im Unterwuchs - erste Ergebnisse für Flächen des Forstlichen Umweltmonitorings in Rheinland-Pfalz. *Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung*, S. 200 - 212.
- Worrall, F., Burt, T., & Shedden, R. (2003). Long term records of riverine dissolved organic matter. *Biogeochemistry*, 64, S. 165 - 178.
- Zeitz, J., & Velty, S. (2002). Soil properties of drained and rewetted fen soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 165(5), S. 618 - 626.
- Zinke, P. (2002). Nutzungsgeschichte, Zustand und Revitalisierung der Moore im Erzgebirge. *TELMA-Berichte*, 32, S. 267 - 280.
- Zollner, A. (1996). Moore: Wichtige Wasserspeicher in der Landschaft. *LWF aktuell, Sonderheft 17*, S. 15 - 18.
- Zollner, A. (2003). Das Abflussgeschehen von unterschiedlich genutzten Hochmooreinzugsgebieten. *LSB.(01/03)*, S. 111 - 119.

V. Anhang

Anhangsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Anhang 1: Forstgrundkarte des Versuchsstandortes (SBS, 2019)..... | VIII |
| Anhang 2: Feldarbeiten der Bestandesaufnahme. Fotos: V. Burkhardt..... | IX |
| Anhang 3: Daten der Forsteinrichtung für den Versuchsbestand (SBS, 2019)..... | X |
| Anhang 4: Zersetzunggrade (Wellbrock et al., 2014 nach Neville et al., 2006)..... | XI |
| Anhang 5: Relative Dichte der Zersetzunggrad; (Wellbrock et al., 2014) nach Dobbertin und Jüngling (2009) | XI |
| Anhang 6: Lageplan der nummerierten Einzelbäume, Probekreis 1..... | XII |
| Anhang 7: Lageplan der nummerierten Einzelbäume, Probekreis 2 | XII |
| Anhang 8: Digitaler Anhang..... | XIII |



Anhang 1: Forstgrundkarte des Versuchsstandortes (SBS, 2019).



Anhang 2: Feldarbeiten der Bestandesaufnahme. Fotos: V. Burkhardt

Anhang

| | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|------------|-----------------------|------------|-------------|-----------------------------|
| 14 C | 141 | a 1 | Fläche [ha]: | 6.7 | Kreis: | Erzgebirgskreis |
| Revier: | Johanngeorgenstadt | | Stichjahr: | 01.01.2020 | Gemeinde: | Stadt Johanngeorgenstadt |
| Bestockungsklasse: | FI-NM | | Schlagweiser Hochwald | | Gemarkung: | Johanngeorgenstadt (6.7 ha) |
| Zielzustand: | MO 55%, FI 33%, FI-TA 12% | arB | | | Flurstücke: | 1136 (6.7 ha), 1115 (0 ha) |

| STANDORT: | TECHNOLOGIE: |
|---|---|
| Standortsformengruppe: II-H-OZ3 [] 52%, II-H-NZ1z [] 33%, II-H-NZ1 [] 10%, I-H-OZ3 [] 3%, II-H-NM2z [] 2% | Befahrbarkeitsklasse: B4 kaum befahrbar 98%, B3 stark eingeschränkt befahrbar 2% |
| Lokalbodenform: ReM 55%, SaGG 43%, StGG 2% | Sensibilitätsklasse: S2 sensibel 100% Hangneigungsgruppe: H12 (0-20%) 100% |

| (G)ESETZLICHE UND (B)ESONDERE WALDFUNKTIONEN: | | | | | | |
|---|---------------|--------|------|-----------------------------------|------------|-------------|
| Bereich Wasser | | | | G 4170 Geschütztes Biotop flächig | 5542F11420 | 0,5 ha 7% |
| B 2220 Hochwasserschutzfunktion | | 6,7 ha | 100% | G 4170 Geschütztes Biotop flächig | 5542F04240 | 0,3 ha 4% |
| Bereich Natur | | | | B 4210 Wertvolles Biotop flächig | 5542F11410 | 0,3 ha 4% |
| G 4121 FFH-Gebiet | 5541-303 | 6,6 ha | 99% | B 4210 Wertvolles Biotop flächig | 5542F11300 | 5,6 ha 83% |
| G 41211 FFH-Lebensraumtyp flächig | 10082-283 | 0,5 ha | 7% | Bereich Erholung | | |
| G 41211 FFH-Lebensraumtyp flächig | 10084-283 | 0,3 ha | 4% | G 7120 Naturpark | | 6,7 ha 100% |
| G 41211 FFH-Lebensraumtyp flächig | 10079-283 | 5,6 ha | 83% | G 7122 Naturpark Zone II | Zone SZ 2 | 6,7 ha 100% |
| G 4122 SPA-Gebiet | DE 5441 - 451 | 6,4 ha | 96% | B 7211 Erholungsfunktion-Stufe I | | 4 ha 60% |

| WALDZUSTAND UND PLANUNG: | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------|--------|--------------|---------|---------------|-------------------------|-----------|------------|-------|
| Zustand | | Stratum-WISA: FI 40-60 matt wüchsig | | | Planung | | | | | | |
| Lücke: | 15% | vorhandener Zaun [ha]: | | | schichtweise | | | | | | |
| Baumart | Anteil IST [ha] | pot. waldbaulich brauchbar [ha] | Alter | | K° | Schicht | Dringlichkeit | Pflege-bzw. Hiebsfläche | Eingriffe | Pflege | Ernte |
| | | | von | Mittel | bis | [ha] | [%] | [m²/ha] (Efm) | | [m³] (Efm) | ZN |
| GFI | 2.7 | | 30 | 40 | 55 | | | | | | |
| GFI | 2.7 | | | 66 | | | | | | | |
| BKI | 0.2 | | | 25 | | | | | | | |
| OFI | 0.1 | | | 33 | | | | | | | |
| SUM OST | 5.7 | | | | 0.8 | | | | | | |
| GFI | 1.0 | 1.0 | 3 | 8 | 12 | | | | | | |
| SUM UST | 1.0 | 1.0 | | | 0.7 | | | | | | |

VERJÜNGUNGSPLANUNG:



X

The diagram illustrates the decomposition process of a tree through nine phases:

- Phase 1:** lebend (living)
- Phase 2:** absterbend (dying)
- Phase 3:** tot (dead)
- Phase 4:** Rinde abfallend (bark falling off)
- Phase 5:** ohne Rinde (without bark)
- Phase 6:** gebrochen (broken)
- Phase 7:** zersetzt (decomposed)
- Phase 8:** zusammengesunken (sunken)
- Phase 9:** Baumstumpf (tree stump)

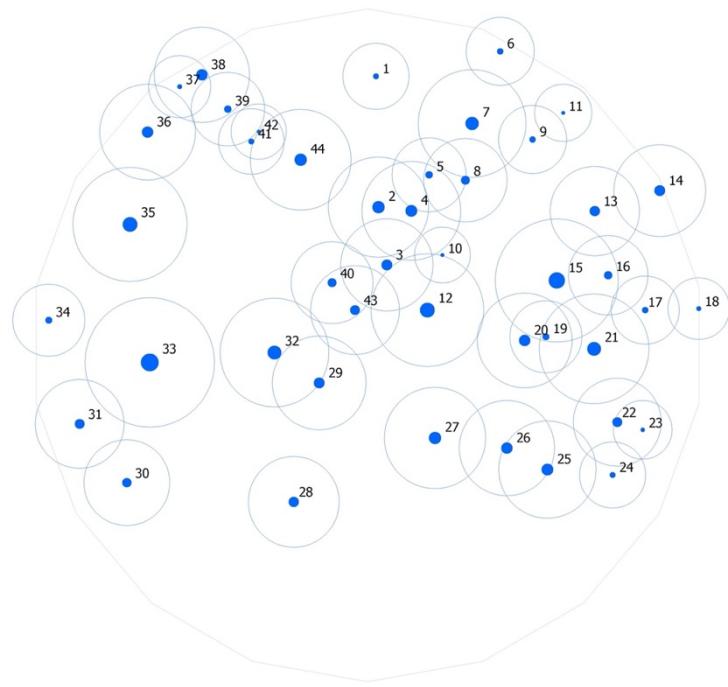
Below each phase is a small illustration of the tree's state. Arrows point from each phase to a corresponding Zersetzunggrad (ZG) column in a table below.

| | ZG 1 | ZG 2 | ZG 3 | ZG 4 | ZG 5 |
|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Rinde | intakt | intakt | in Spuren | fehlend | fehlend |
| Zweige < 3 cm | vorhanden | fehlend | fehlend | fehlend | fehlend |
| Holz | hart | hart, teilweise weich | große Stellen weich | kleine, weiche Stücke, Würfel | weich, pulverförmig |
| Form | rund | rund | rund | rund/ deformiert | deformiert |
| Holzfarbe | Originalfarbe | Originalfarbe | vergilzte Originalfarbe | vergilbtes hellbraun oder gelb | vergilbt bis hellgelb bis grau |
| Bodenkontakt | auf Stützpunkten über dem Boden | erhöht liegend, aber durchgebogen | am Boden liegend | komplett eingesunken | komplett eingesunken |

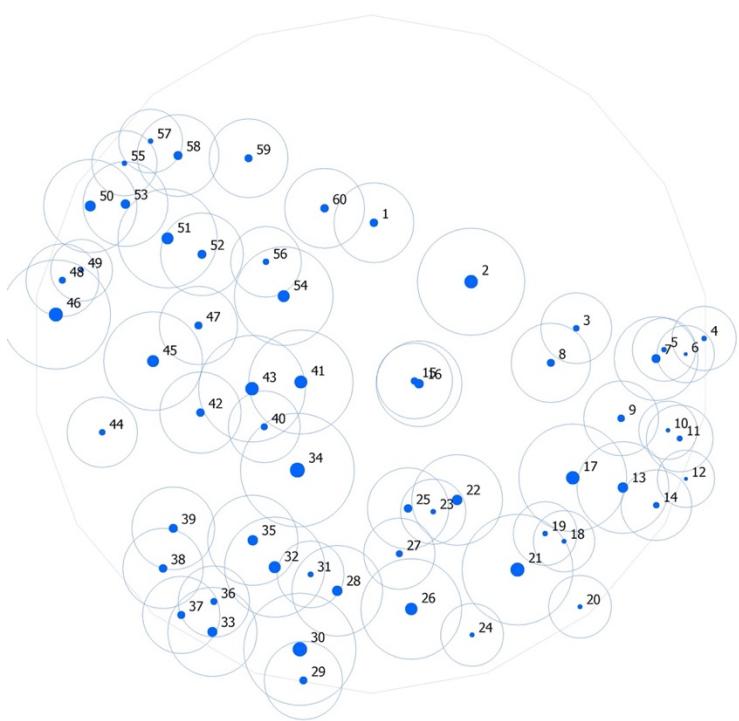
Anhang 4: Zersetzunggrade (Wellbrock et al., 2014 nach Neville et al., 2006).

| Baumart | Zersetzunggrad | Rel. Dichte [%] |
|-----------|----------------|-----------------|
| Nadelholz | 1 | 100,0 |
| Nadelholz | 2 | 100,0 |
| Nadelholz | 3 | 92,4 |
| Nadelholz | 4 | 76,5 |
| Nadelholz | 5 | 70,0 |

Anhang 5: Relative Dichte der Zersetzunggrad; (Wellbrock et al., 2014) nach Dobbertin und Jüngling (2009)



Anhang 6: Lageplan der nummerierten Einzelbäume, Probekreis 1.



Anhang 7: Lageplan der nummerierten Einzelbäume, Probekreis 2.

Digitaler Anhang

- Excel-Datei: Lagemessung_GrEisenstraßenmoor
 - Excel-Datei: Bestandesdaten
 - Excel-Datei: CV_bestehendesTotholz
 - Excel-Datei: CV_Verjüngung
 - Excel-Datei: CV_Abschreibung
 - BWINPro-Projekte der vier Szenarien
-

Anhang 8: Digitaler Anhang.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit persönlich und ohne andere als die angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Aus anderen Quellen direkt oder indirekt entnommene Sachverhalte sind als solche gekennzeichnet. Die Arbeit wurde weder im Ganzen noch in Teilen einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder veröffentlicht.

Eberswalde, den 30.08.2022

Valentin Burkhardt