

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt von Waldböden sowie den Erfolg von Eichenkulturen (ABoNae)

Zuwendungsempfänger:

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)

Förderkennzeichen:

22001817

Laufzeit:

01.09.2018 bis 31.07.2022

Monat der Erstellung:

07/2022

Datum der Veröffentlichung:

05/01/2023

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzbericht.....	5
1.1. Aufgabenstellung	5
1.2. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse	7
2. Versuchsanlage.....	10
2.1. Beschreibung des Großraumes der Projektregionen.....	10
2.2. Klima und Witterung.....	12
2.3. Versuchsflächenbeschreibung	19
2.4. Bodenkundliche Profilsprachen von den Versuchsflächen	24
2.5. Umsetzung der Bodenbearbeitungen.....	27
3. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	32
3.1. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf bodenphysikalische Parameter.....	32
3.2. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Bodenfeuchte	37
3.3. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Vegetation	40
3.4. Darstellung der Entwicklung von Eichenkulturen in den Projektregionen durch unechte Zeitreihen.....	48
3.5. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Entwicklung neu angelegter Eichenkulturen.....	64
3.6. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf Nährstofffrachten und –vorräte in Böden	81
3.7. Nebenergebnis der Analyse der Pflanzenbiomasse bei der Abschlussinventur.....	91
3.8. Einfluss von Bodenbearbeitungen auf N _{min} -Vorräte	93
3.9. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Mikrobiologie	95
4. Verwertung.....	101
4.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	101
4.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	101
4.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	101
4.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	102
4.5. Erkenntnisse von Dritten	102
4.6. Veröffentlichungen	102
5. Danksagung	104
6. Literaturverzeichnis	105

1. Kurzbericht

1.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes wurde anhand bodenchemischer Indikatoren geprüft, inwieweit Bodenbearbeitungen anhaltende und gravierende Beeinträchtigungen für das Ökosystem selbst und dessen Umwelt verursachen und welche Bedeutung sie für den Kulturerfolg haben. Auf Basis empirischer Untersuchungen wurde der Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren auf den Nährstoffhaushalt von Waldböden bei Eichenkulturen beurteilt und daraus resultierende Wechselwirkungen zum Etablierungserfolg und dem Jugendwachstum der Eichen abgeschätzt.

In drei geographischen Regionen mit sehr unterschiedlichen klimatischen, standörtlichen und waldbaulichen Ausgangssituationen sind bodenchemische Veränderungen nach Bodenbearbeitungen analysiert worden. Gleichzeitig wurden Wachstumsparameter der Eichen erfasst und mit den jeweiligen Bodenbearbeitungsverfahren in Beziehung gesetzt. Als Behandlungsvarianten wurden zum einen die für eine rationelle Begründung von Eichenbeständen regional bewährten Standardverfahren auf einem regionaltypischen Eichenstandort vor und unmittelbar nach der Kulturanlage sowie im dritten, sechsten und neunten Standjahr untersucht. Zum anderen wurde in allen Untersuchungsgebieten dasselbe Alternativverfahren erprobt und in seinen Effekten analysiert. Als Vergleich diente eine Kontrolle ohne Bodenbearbeitung.

1.2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das erarbeitete Projektkonzept für das geplante Vorhaben umfasste vier inhaltlich abgegrenzte Arbeitspakete (AP; Tabelle 1):

AP 1: Standort-, Flächen- und Verfahrensauswahl

Das Arbeitspaket 1 beinhaltete alle notwendigen Schritte, um die Grundvoraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens zu schaffen. In einem ersten Schritt wurden in drei Naturräumen mit Eichenanbauschwerpunkten – „Hoher Fläming“ (Sachsen-Anhalt), „Hessisches Ried“ (Hessen) und „Ostbraunschweigisches Flachland“ (Niedersachsen) –, die sich hinsichtlich ihrer klimatischen, standörtlichen und waldbaulichen Ausgangssituation deutlich voneinander unterscheiden, Untersuchungsbestände ausgewählt. Es handelte sich um Bereiche, wo in der forstlichen Praxis einer Bestandesbegründung mit Eiche eine Bodenvorbereitung zur kurzfristigen Ausschaltung von starker Konkurrenzvegetation oder Beseitigung verjüngungshemmender Auflagehumusdecken regelmäßig durchgeführt wird. Innerhalb der Regionen wurde jeweils eine unechte Zeitreihe mit Eichenjungbeständen aufgebaut. Zur Untersuchung der Initialphase erfolgte die Neubegründung eines Eichenbestandes nach entsprechender Bodenbearbeitung. Neben dem ortsüblichen Standardverfahren, wurde über alle Untersuchungsregionen hinweg einheitlich ein definiertes Alternativverfahren als Referenz angewandt sowie eine geräumte, bepflanzte, aber nicht bodenbearbeitete Kontrolle eingerichtet. Darüber hinaus wurden Flächen für die unechte Zeitreihe ausgewählt, die vor 3, 6 und 9 Jahren nach dem gleichen ortsüblichen Verfahren begründet worden sind.

Im „Hohen Fläming“ handelte es sich bei dem ortsüblichen Verfahren um den Waldstreifenpflug, einem Schlepperanbaugerät, der den Bodenüberzug zerschneidet, abschält, nach beiden Seiten umklappt und damit den Mineralboden freilegt. Im „Ostbraunschweigischen Flachland“ wurden die zur Pflanzung oder Saat vorgesehenen Flächen oberflächennah gemulcht, wobei Schlagabraum mit zerkleinert, aber kaum in den Mineralboden eingegriffen wird. Im „Hess. Ried“ wurden die Flächen bis in eine Mineralbodentiefe von 30 cm gefräst, wobei es zu einer innigen Durchmischung von organischem Material (Humus, Schlagabraum, Vegetation) und Mineralboden kommt. Alle genannten ortsüblichen Verfahren erfordern mindestens eine einmalige flächige Befahrung. Als Alternativverfahren wurde das baggergestützte „Silvafix-Verfahren“ in die Untersuchungen einbezogen. Das Baggeranbaugerät „Silvafix“ hat eine Arbeitsbreite von ca. 2 m und 13 Zinken, die

beidseitig angefräst sind und mit denen Vegetationsdecken humusschonend abgezogen werden. Eine flächige Befahrung ist nicht erforderlich.

Bei der Auswahl der Flächen für die unechten Zeitreihen wurde darauf geachtet, dass die standörtlichen Verhältnisse (Nährstoffausstattung u. Wasserversorgung, Bodensubstrat) und waldbaulichen Ausgangsbedingungen (Überschirmung, Vorbestand bei Freiflächensituation usw.) vergleichbar waren. Hierzu wurden die Ergebnisse der Standortkartierung und der Forsteinrichtung der drei beteiligten Bundesländer herangezogen.

AP 2: Datenerhebung

a.) Bodensystematik, Vegetation sowie Stoffhaushalt

Nachdem die Untersuchungsflächen festgelegt worden sind, ist mit den empirischen Erhebungen begonnen worden. Diese beinhalteten feldbodenkundliche Kartierungsarbeiten, Vegetationsaufnahmen im Gelände sowie bodenphysikalische, -mikrobiologische und -chemische Untersuchungen im Labor.

Bei den neu angelegten Intensivflächen waren in der Initialphase nach erfolgter Bodenbearbeitung Reaktionen im Chemismus, v.a. im Sickerwasser zu erwarten. Kontinuierliche Messungen waren deshalb von besonderer Bedeutung.

Zur quantitativen und qualitativen Beurteilung der Effekte von Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf den Nährstoffhaushalt ist eine Untersuchung des Sickerwassers und der Bodennährstoffvorräte erforderlich. Zur Untersuchung des Sickerwassers wurden nach erfolgter Bodenbearbeitung Mikrokosmenlysimeter (Durchmesser: 150 mm; Höhe: 50 cm) im Boden installiert. Diese haben den Vorteil eines konkreten Raumbezugs und erfordern keine aufwendige Wasserhaushaltsmodellierung, um Frachten berechnen zu können. Das Sickerwasser wurde alle zwei Wochen über einen Zeitraum von 2 Jahren untersucht. Aussagen über die Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnisse im Boden wurden mittels Sensoren kontinuierlich festgehalten. Am Ende des Untersuchungszeitraumes wurden die Mikrokosmenlysimeter im Gelände gewonnen und im Labor bodenchemisch untersucht.

Die innerhalb des geplanten Vorhabens erhobenen Daten wurden in das Datenbanksystem ECO (Environmental Control) der NW-FVA integriert. ECO ist auf die langfristige Dokumentation forstökologischer Daten aus Monitoringprogrammen, Inventuren und Versuchen ausgerichtet. Durch die Integration in ECO wurde die langfristige Datenhaltung gesichert und der Datenzugang für andere Arbeitsgruppen sichergestellt.

b.) Wachstum der Eichen

Die quantitativen (Höhe, Wurzelhalsdurchmesser) und qualitativen Wachstumsparameter (Schäden, Ausfälle) der Eichen wurden erfasst. Grundlage für die Schadensbonitur ist ein sehr differenzierter Schadschlüssel der Abt. Waldwachstum.

AP 3: Datenanalyse und Erkenntnisgewinn

In der Phase des Arbeitspaketes 3 wurden die erhobenen Daten ausgewertet. Dabei wurde neben deskriptiven Statistiken auf bayesianische Methoden zurückgegriffen, um vergleichende Analysen auf den Intensivflächen und den unechten Zeitreihen durchzuführen zu können. Zudem wurden die ermittelten Unterschiede hinsichtlich ihrer bodenfunktionalen und ökosystemaren Bedeutung eingeordnet und bewertet.

AP 4: Erkenntnistransfer in die Praxis

Die gewonnenen Erkenntnisse zu den Effekten der Bodenbearbeitung auf Etablierung und Wachstum junger Eichen sowie Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit des Waldbodens wurden für die Wissenschaft durch Vorträge auf Fachtagungen bereits zugänglich gemacht werden. Weitere Vorträge und Fachartikel sind in Vorbereitung.

Aufgrund der Unsicherheiten der Coronapandemie war es bisher unmöglich, einen Workshop zu Bodenbearbeitungen mit allen Akteuren durchzuführen. Von Seiten der Forstpraxis besteht ein

reges Interesse an den Projektergebnissen, da in weiten Teilen Deutschlands große kalamitätsbedingte Kahlfächen zur Wiederaufforstung anstehen, welche ohne Bodenverwundungen in der Regel nicht durchführbar sind. Daher sollen die Projektergebnisse neben Fachtagungen auch dezentral bei Waldbauschulungen in den Ländern und in den beteiligten Forstämtern präsentiert, und somit in die Forstpraxis getragen werden. Des Weiteren sind Artikel in Auflagenstarken Zeitschriften wie z.B. der Land & Forst oder auch der Forst & Technik geplant.

Darüber hinaus können die Projektergebnisse bei zukünftigen Novellierungen von Förderrichtlinien, Betriebsanweisungen oder Gesetzesnovellen berücksichtigt und so für die unterschiedlichen Waldbesitzarten Anwendung finden.

Die NW-FVA beabsichtigt eine Beteiligung an dem Internetportal „Waldwissen.net“. Hierüber ist es möglich einer breiten Nutzergruppe von Forstpraktikern die Projekterkenntnisse in Form eines Merkblattes zur Verfügung zu stellen.

1.3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete, Bearbeitungszeiträume und der Zielerreichung.

Arbeitspakete (AP)	Bearbeitungszeitraum	Zielerreichung
AP 1 Flächenauswahl und – einrichtung	06/2018 bis 10/2018	Es wurden in allen Untersuchungsregionen Flächen ausgewählt und eingerichtet. Die standörtliche Kartierung und die Bodenbearbeitungen wurden planmäßig durchgeführt.
AP 2 Datenerhebung	10/2018 bis 11/2021	Alle Datenerhebungen konnten abgeschlossen und in Datenbanken der NW-FVA überführt werden.
AP 3 Datenanalyse und Erkenntnisgewinn	11/2018 bis 07/2022	Die Daten konnten analysiert werden, allerdings haben sich die Analysen aufgrund der Komplexität der Daten verzögert.
AP 4 Erkenntnistransfer	09/2021 bis 07/2022	Die Projektergebnisse konnten auf Tagungen und Waldbauschulungen vermittelt werden. Etwaige Publikationen stehen noch aus.

Tabelle 2: Übersicht der Meilensteine, Fälligkeiten und der Zielerreichung.

Meilensteine (M)	Fälligkeit	Zielerreichung
M 1 Untersuchungsflächen lokalisiert, Varianten umgesetzt, Messnetz festgelegt	10/2018	Meilenstein M 1 wurde erreicht.
M 2 Empirische Untersuchungen durchgeführt und Datenbasis generiert	09/2021	Meilenstein M 2 wurde erreicht.
M 3 Datenbasis ausgewertet	03/2022	Meilenstein M 3 wurde erreicht.
M 4 Umsetzungsstrategien zum Erkenntnistransfer in die forstliche Praxis	07/2022	Es sind weitere Vorträge auf Fachtagungen, einschlägige Publikationen und die Implementierung der Projektergebnisse in die Waldbauplanungen der Länder geplant.

b) Zusammenfassung

Die in diesem Projekt untersuchten Bodenbearbeitungsverfahren zeigten einen positiven Einfluss auf die Entwicklung von Eichenkulturen. Maßgeblich dafür waren die erfolgreiche Reduktion der Konkurrenzvegetation und die damit einhergehende Verbesserung der Bodenfeuchteverhältnisse. Saaten in Beständen mit einer ausgeprägten Bodenvegetationdecke führten ohne eine vorherige Bodenbearbeitung zu einem Totalausfall. Kulturen aus Pflanzungen zeigten bei ausgeprägter Konkurrenzvegetation reduzierte Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserzuwächse auf. Der Bodenfeuchtehaushalt profitierte besonders auf sandigen Standorten mit einer geringen nutzbaren Feldkapazität über mehrere Jahre von den Bodenbearbeitungsmaßnahmen.

Negative Einflüsse der Bodenbearbeitungsverfahren auf die hier untersuchten physikalischen Bodenparameter Bodenverdichtung und Korngrößenzusammensetzung konnten ebenso wenig ausgemacht werden wie positive. Durch die Bodenbearbeitungen kam es weder zu Bodenverdichtungen bei vollflächiger Befahrung im Zuge mancher Bodenbearbeitungsverfahren (durch die Trockenheit während der Bodenbearbeitungen lagen die Böden in befahrungsunempfindlichen Zuständen vor), noch zu nennenswerten Bodenlockerungen durch Bodenbearbeitungsverfahren, welche in den Mineralboden eingriffen. Eine Änderung in der Korngrößenzusammensetzung konnte nicht beobachtet werden.

Bodenbearbeitungen beeinträchtigten kurzfristig die Bodenmikrobiologie, indem sie zu ineffizienteren Stoffumsätzen führten, ließen aber keinerlei langfristige negative Folgen erkennen. Bodenbearbeitungen, welche mit einer Humusverlagerung einhergehen, führten zu einer Reduktion der mikrobiellen Biomasse, Bodenbearbeitungen, welche mit einer Zerkleinerung und Einarbeitung in den Mineralboden einhergehen, erhöhten die mikrobielle Biomasse.

Bodenbearbeitungen führten nicht pauschal zu höheren Nährstofffrachten in der Bodenlösung. Die Verfahren des Mulchens und Fräsens haben die Nährstofffrachten im Vergleich zur unbearbeiteten Kontrolle nur wenig verändert, so dass der pflanzenverfügbare Nährstoffvorrat nahezu unverändert blieb und nicht mit Nitratausträgen zu rechnen ist. Auf den untersuchten Standorten werden die beiden Verfahren (Mulchen bzw. Fräsen) folglich als nährstoffnachhaltig bewertet.

Bodenbearbeitungen mit dem Silvafix bzw. dem Streifenpflug führten zu groß- bzw. kleinräumigen Verlagerungen organischen Materials und damit auch zu Nährstoffverlagerungen auf der Fläche. Die jährlichen Nährstofffrachten in den Lysimetern sind auf der Silvafix-geräumten Fläche und den Pflugsohlen absolut gering gewesen. Allerdings reduzierten sie die auf der Fläche bzw. in der Pflugsohle verbliebenen Nährstoffvorräte erheblich (z.B. für Mg um ca. 40 %), was im Falle des Silvafix-Verfahrens zu einer flächigen und im Falle des Streifenpflugverfahrens zu einer kleinräumigen Nährstoffreduzierung führte. In den Pflugbalken (Bereiche mit Humuskonzentrierung) wurden im Vergleich zur Kontrolle und den Pflugsohlen hohe Nährstofffrachten gemessen. Im Rahmen der N_{min} -Analyse deuteten sich allerdings geringere Nitratverlagerungen an. Es liegt die Vermutung nahe, dass die anliegende Begleitvegetation das erhöhte Nährstoffpotential der Pflugbalken nutzen konnte, so dass in der N_{min} -Analyse geringere Nitratmengen gemessen wurden, als in den unbewachsenen Lysimetern. In den Rückegassen der Silvafix-bearbeiteten Flächen konnten keine Mikrokosmenlysimeter installiert werden, allerdings wiesen die Nitratmengen der N_{min} -Analyse auf sehr hohe Nitrat- und Nährstofffrachten in den mit organischem Material und teilweise auch Auflagehumus angereicherten Rückegassen hin. Folglich führte das Streifenpflugverfahren zwar zu kleinräumigen Nährstoffverlagerungen, die mit der Gefahr von Nitratausträgen und Nährstoffverlusten einhergingen, allerdings scheint das Vorhandensein von Bodenvegetation die Gefahr zu bannen, so dass auch der Streifenpflug am untersuchten Standort weitgehend als bodenschonend (da nicht mit vollflächiger Befahrung verbunden) und nährstoffnachhaltig eingestuft werden kann.

Hingegen sollten Bodenbearbeitungsverfahren, die mit einer großräumigen Verlagerung von organischem Material und damit auch von Nährstoffen einhergehen (Silvafix-Verfahren), gemieden werden. Neben flächigen Nährstoffvorratsminderungen (Abnahme des Mg-Vorrates um bis zu

80 %), die bereits nach zwei Jahren zu einer Verschlechterung der Pflanzenernährung der Begleitvegetation führten, gehen diese Verfahren mit erhöhten Nitrat- und Nährstoffauswaschungsrisiken in den Ablagerungsbereichen (Rückegassen) einher. Auf armen Standorten war der Effekt stärker ausgeprägt als auf reichen Standorten. Daher sollte auf armen Standorten ein besonderes Augenmerk auf die Verfahrensauswahl gelegt werden.

Das Silvafixverfahren kann den Ergebnissen dieses Projektes zufolge nicht als nährstoffnachhaltiger im Vergleich zu den anderen Verfahren beurteilt werden. Daher sollte dieses Verfahren nicht überregional als Musterlösung empfohlen werden. Vielmehr bestätigt sich das Gesetz des Örtlichen, welches in Abhängigkeit vom Standort gesonderte Lösungen erfordert. Die regional bewährten Standardverfahren zeigten sich an die Gegebenheiten der Standorte angepasst.

Ein wesentlicher Faktor zur Minderung von Nährstofffrachten nach Bodenbearbeitungen ist eine ausgeprägte Vegetationsdecke. Da Bodenbearbeitungen in der Regel eingesetzt werden, um den Begleitwuchs zu reduzieren, stellt dies ein Spannungsfeld dar. Eine mögliche Abhilfe können Nutzpflanzendecken schaffen, welche die Fläche zeitnah eingrünen aber keine Konkurrenz zu der Kultur darstellen und den zuvor durch Bodenbearbeitungen gelockerten Boden gegen natürliche Setzungen stabilisieren.

2. Versuchsanlage

2.1. Beschreibung des Großraumes der Projektregionen

Im Folgenden werden die drei Versuchsregionen Hessisches Ried, Ostbraunschweigisches Flachland und Hoher Fläming beschrieben. In jeder Region spielt die Eiche forstwirtschaftlich eine wichtige Rolle. Abbildung 1 zeigt die Lage der Regionen in Deutschland.

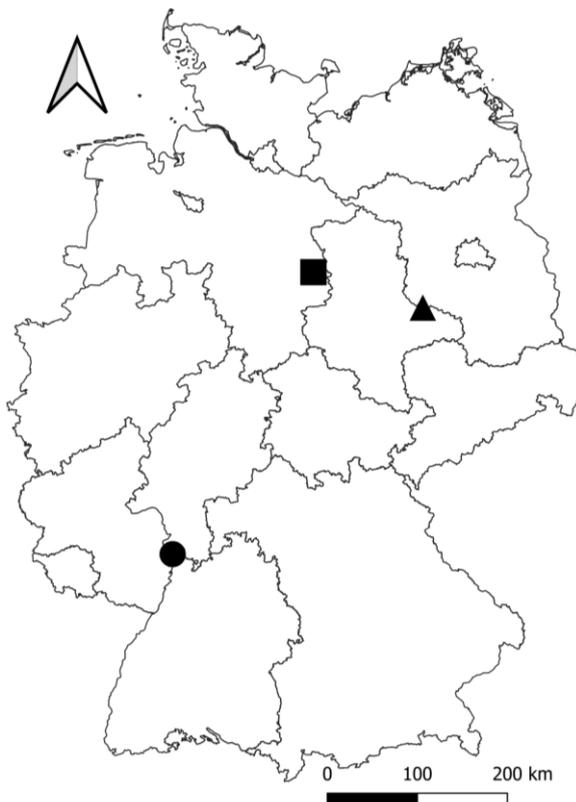


Abbildung 1: Übersichtskarte von Deutschland mit Bundesländern (© GeoBasis-DE / BKG 2020) und Lage der Versuchsregionen (● = Hessisches Ried, ■ = Ostbraunschweigisches Flachland, ▲ = Hoher Fläming).

2.1.1. Hessisches Ried

Das Hessische Ried befindet sich im Süden Hessens im Wuchsgebiet Hessische Rhein-Main-Ebene. Im Norden wird es von dem Großraum Frankfurt begrenzt, im Süden durch die Baden-Württembergische Landesgrenze, im Osten durch den Odenwald und im Westen durch den Rhein. Gegliedert ist das Wuchsgebiet Hessische Rhein-Main-Ebene in drei Wuchsbezirke: die Untermainebene im Norden, die Hessische Rheinniederung im Westen und Hessische Rheinebene im Osten. Dem Hessischen Ried können die beiden letztgenannten Wuchsbezirke zugeordnet werden (NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT 2013). Die Versuchsflächen im Hessischen Ried liegen allesamt im Wuchsbezirk Hessische Rheinebene. Das Hessische Ried liegt geologisch im Oberrheingraben und ist mit tertiären und quartären Kiesen und Sanden gefüllt. Hierbei handelt es sich sowohl um kalkhaltige zum Teil verlehnte Flugsande als auch um Sedimentationen aus der Auendynamik des Rheins. Eine Besonderheit stellt für diese Region das „Rheinweiß“ dar. Rheinweiß wird durch den kapillaren Aufstieg von kalkhaltigem Grundwasser und Ausfällung von Carbonaten gebildet. Meist fand im Hessischen Ried eine Ausfällung in einer Tiefe von ca. 1 m statt, in welcher sich das Rheinweiß akkumulierte und z.T. für Pflanzen und Wasser undurchdringbare Horizonte ausbildet. Heute handelt es sich hierbei um reliktsche Grundwasserhorizonte (GAUER 2005).

2.1.2. Ostbraunschweigisches Flachland

Der Wuchsbezirk Ostbraunschweigisches Flachland liegt in der niedersächsischen Waldbauregion Süd-Ostniedersächsisches Tiefland. Südlich wird der Bezirk durch das angrenzende Hügelland und den Lappwald begrenzt. Im Westen liegt der Großraum Braunschweig, nach Osten begrenzt die Landesgrenze zu Sachsen-Anhalt den Bezirk und im Norden der Übergang zur Heide nördlich der Stadt Wolfsburg (BÖCKMANN et al. 2019). Im Überwiegenden handelt es sich um das Urstromtal der Aller und Nebenflüsse mit landwirtschaftlicher Nutzung. Geologisch ist das Gebiet durch lehmige, auch mergelhaltige von schluffig/tonig bis hin zu kiesigen Grundmoränen der Saale-Kaltzeit oder aus den Grundgesteinen der Kreide-Kalke, Lias- und Keupertonsteine geprägt (GAUER 2005). Der Bodentyp der Waldstandorte besteht vorwiegend aus Pseudogleyen.

2.1.3. Hoher Fläming

Das Wuchsgebiet Hoher Fläming liegt im Nordosten Sachsen-Anhalts und setzt sich aus den Wuchsbezirken Wiesenburger Fläminghochfläche und Nedlitzer Flämingrandplatte zusammen. Im Süden reicht es fast bis an das Elbeurstromtal und nach Norden und Osten durchtrennt die Landesgrenze zu Brandenburg den Fläming. Zu den anderen Randbereichen erfolgt eine höhenbedingte Abgrenzung bei etwa 100 m NN. Der Fläming wird überwiegend forstwirtschaftlich genutzt. Die Hauptbaumart bildet die Kiefer. Geologisch ist der Fläming durch Endmoränen aus der Saale-Kaltzeit mit lehmigen bis kiesigen Geschieben geprägt. Hügel und flache Kuppen, durchzogen mit Schmelzwasserrinnen, prägen das Relief. Die vorwiegenden Bodentypen sind Braunerden und Podsole (SCHWANECKE und KOPP 1994).

2.2. Klima und Witterung

Im Folgenden wird das Klima der Versuchsregionen beschrieben und die Witterung während der Versuchsdauer dargestellt. Die zugrundeliegenden Daten stammen von DWD und wurden mit dem NW-FVA-internen R-Paket „KSPclimpredict“ (SCHMIDT-WALTER 2018) für die jeweilige Intensivfläche regionalisiert und mit dem R-Paket „climatol“ (GUIJARRO 2019) dargestellt.

2.2.1. Hessisches Ried

Die Versuchsflächen befinden sich auf einer Höhenlage von 94 – 98 mNN und liegen somit in der Wuchszone der zentralen Eichen-Mischwald-Zone. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 10 °C, während der Vegetationszeit 16 °C. Die jährlichen Niederschläge belaufen sich auf 660 mm im langjährigen Mittel, für die Vegetationsperiode können 340 mm angenommen werden (NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT 2013).

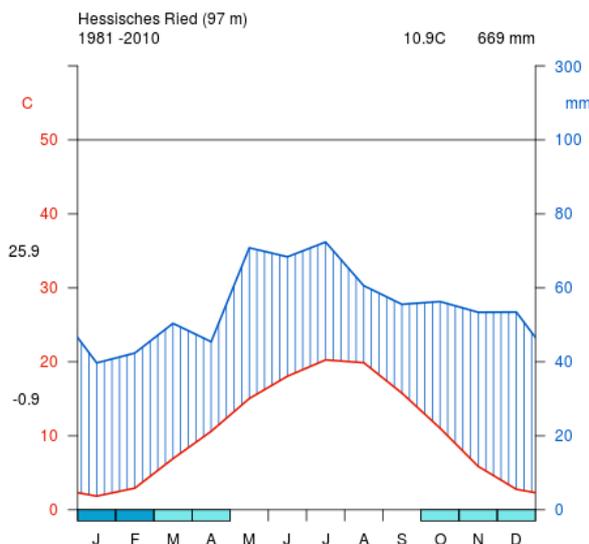


Abbildung 2: Klimadiagramm der Referenzperiode 1981 - 2010 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hessischen Ried.

Abbildung 2 zeigt das Klimadiagramm aus regionalisierten Wetterdaten für die Referenzperiode 1981 – 2010 der Intensivfläche im Hessischen Ried. Mit einer jährlichen Durchschnittstemperatur von 10,9 °C und durchschnittlich 669 mm Niederschlag entsprach es den für die Region typischen Werten. Die höchste durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur je Monat betrug 25,9 °C, die geringste durchschnittliche Tagesminimaltemperatur je Monat betrug -0,9 °C. Über den Jahresverlauf zeigte sich ein, für die gemäßigte Zone typisches, humides Klima.

In Anlehnung an das Klimadiagramm wird in Abbildung 3 die Witterung im Jahr des Versuchsbeginns dargestellt. In den folgenden Abbildungen ist die Witterung im weiteren jährlichen Versuchsverlauf dargestellt.

Das Jahr 2018 wurde im Hessischen Ried von einer Trockenperiode mit hohen Temperaturen im Sommer geprägt (Abbildung 3). Mit einer Jahresmitteltemperatur von 12,5 °C lag diese um 1,6 °C über dem langjährigen Mittel. Der jährliche Niederschlag lag mit 486 mm um 183 mm unter dem langjährigen Mittel (Abweichung von ca. 27,3 %). Mit einer maximalen durchschnittlichen Tagesmaximaltemperatur je Monat von 30,3 °C lag dieser Wert um 4,4 °C über dem der Klimaperiode. Neben auffallend wenigen Niederschlägen im Februar fehlten in der Periode Juli – November Niederschläge. In den Monaten Juli – Oktober herrschten aride Witterungsverhältnisse vor.

Im Jahr 2019 betrug die Durchschnittstemperatur 11,9 °C und der Jahresniederschlag 593 mm (Abbildung 4). Die maximale durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur je Monat betrug 28,4 °C und die minimale durchschnittliche Tagesminimaltemperatur -0,6 °C. Somit waren die Witterungsverhältnisse nicht so extrem wie im Vorjahr. Bis auf den Februar zeigte der Jahresverlauf der Niederschläge humide Verhältnisse. Die geringen Winterniederschläge, besonders im Februar mit etwa 10 mm Niederschlag, konnten den Bodenspeicher, der aus dem Vorjahr stark ausgetrockneten Böden, nicht vollständig auffüllen.

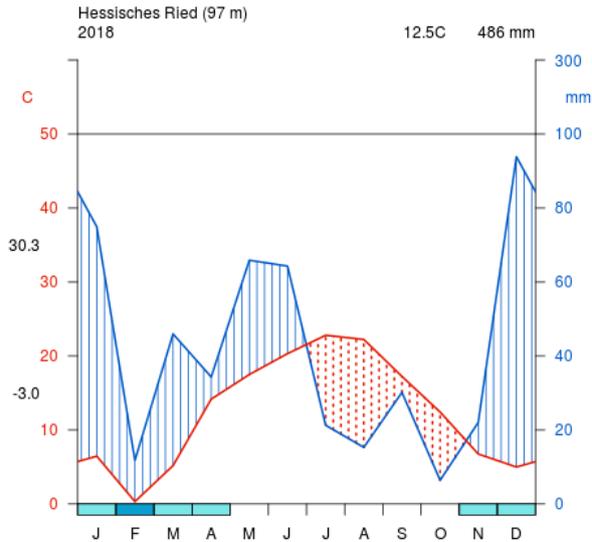


Abbildung 3: Witterungsverlauf im Jahr 2018 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hessischen Ried.

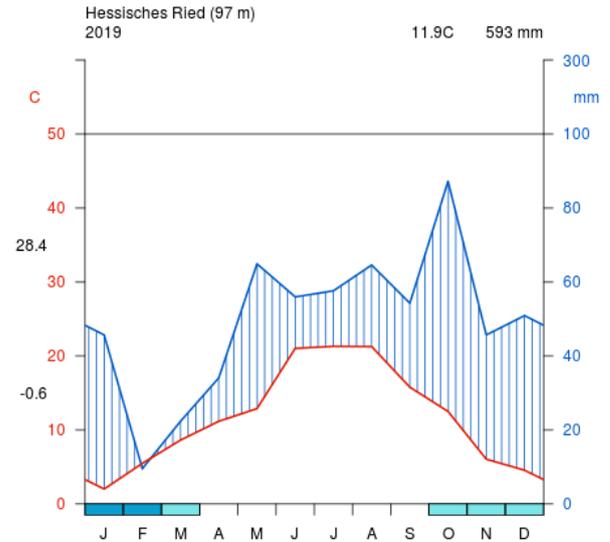


Abbildung 4: Witterungsverlauf im Jahr 2019 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hessischen Ried.

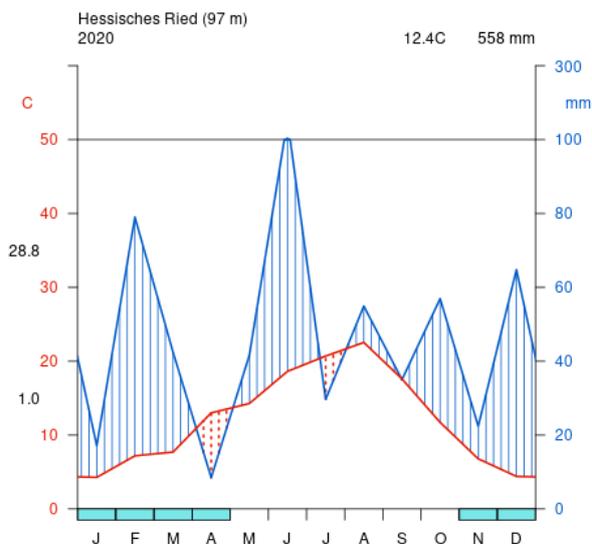


Abbildung 5: Witterungsverlauf im Jahr 2020 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hessischen Ried.

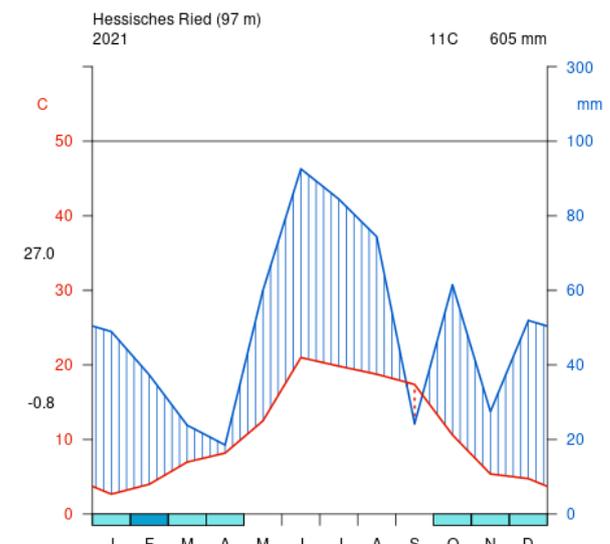


Abbildung 6: Witterungsverlauf im Jahr 2021 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hessischen Ried.

Mit einer Durchschnittstemperatur von 12,4 °C war das Folgejahr 2020 um 0,5 °C wärmer als 2019 und die Jahresniederschläge waren mit 558 mm um 35 mm geringer als 2019 (Abbildung 5). Bis auf eine Trockenperiode im April herrschten auch im Juli aride Witterungsverhältnisse. In den anderen Monaten war die Witterung humid. Aufgrund der hohen Niederschläge in den Monaten vor den ariden Perioden war die Vegetation keinem Trockenstress ausgesetzt, da der Boden über ausreichend Reserven verfügte. Die mittlere Maximaltemperatur des wärmsten Monats betrug 28,8 °C und die durchschnittliche Minimaltemperatur des kältesten Monats betrug 1,0 °C. Damit wies das Jahr 2020 die geringste Amplitude dieser Werte auf. In 2019 war die Differenz um 1,2 °C und in 2018 um 5,5 °C höher.

Im letzten Jahr des Beobachtungszeitraums (2021, Abbildung 6) lag die Jahresdurchschnittstemperatur im Hessischen Ried mit 11 °C nur um 0,1 °C über dem langjährigen Mittel. Der Jahresniederschlag von 605 mm war zwar der höchste im Beobachtungszeitraum, doch lag er 64 mm unter dem der Vergleichsperiode. Die Niederschläge im Juni und Juli fielen mit über 80 mm in 2021 besonders hoch aus. Der September zeigte leicht aride Verhältnisse.

2.2.2. Ostbraunschweigisches Flachland

Die Versuchsflächen liegen allesamt auf einer Höhe von ca. 100 mNN in der planaren Höhenstufe im Übergangsbereich zu einem subkontinentalen Klima. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme beträgt ca. 700 mm und die Jahresmitteltemperatur 9,0 °C (BÖCKMANN et al. 2019).

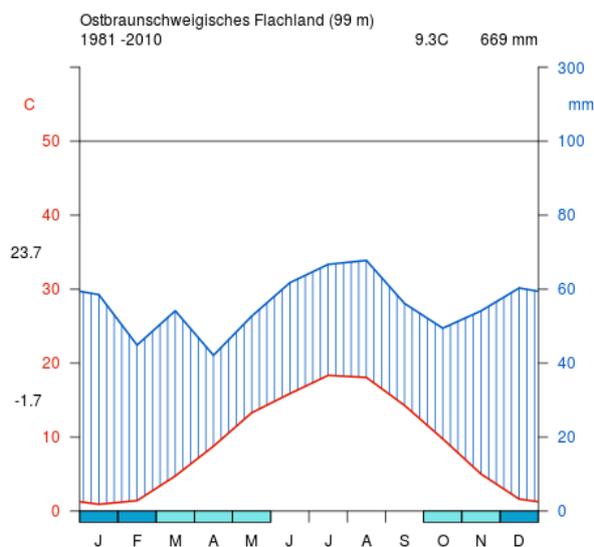


Abbildung 7: Klimadiagramm der Referenzperiode 1981 - 2010 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.

10,7 °C war es um 1,4 °C wärmer als in der Referenzperiode. Lediglich 414 mm betrug die Niederschlagssumme. Dies waren 255 mm (ca. 38 %) weniger als im langjährigen Mittel. Die durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur des wärmsten Monats lag mit 28,1 °C um 4,4 °C über der Referenzperiode. Neben einem sehr geringen Niederschlag im Februar wiesen die Monate Mai – Oktober aride Verhältnisse auf. Lediglich der September war noch knapp humid.

Das Klimadiagramm der Abbildung 7 zeigt das Klima der Referenzperiode 1981 – 2010 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland. Die jährliche Durchschnittstemperatur von 9,3 °C und die Niederschlagssumme von 669 mm stellen für die Region typische Werte dar. 23,7 °C betrug die höchste durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur je Monat und - 1,7 °C die geringste durchschnittliche Tagesminimaltemperatur je Monat. Über den Jahresverlauf zeigte sich ein humides Klima.

Abbildung 8 zeigt den Witterungsverlauf aus regionalisierten Wetterdaten der Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland für das Jahr 2018. Mit einer Durchschnittstemperatur von

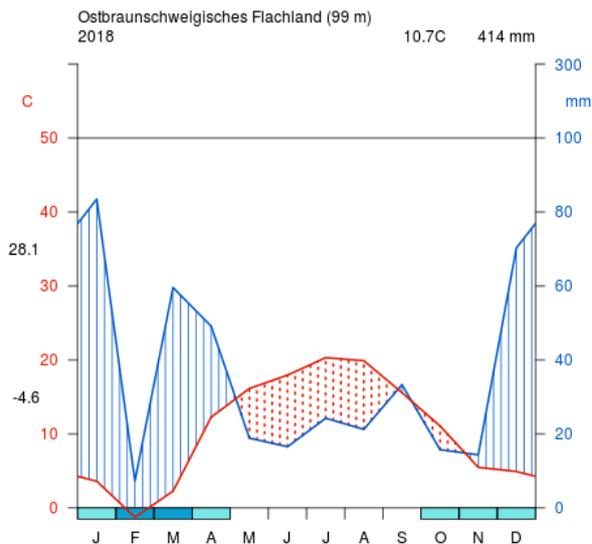


Abbildung 8: Witterungsverlauf im Jahr 2018 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.

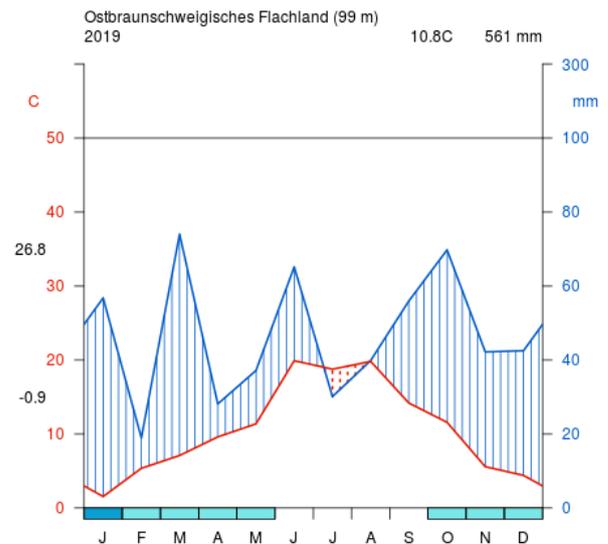


Abbildung 9: Witterungsverlauf im Jahr 2019 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.

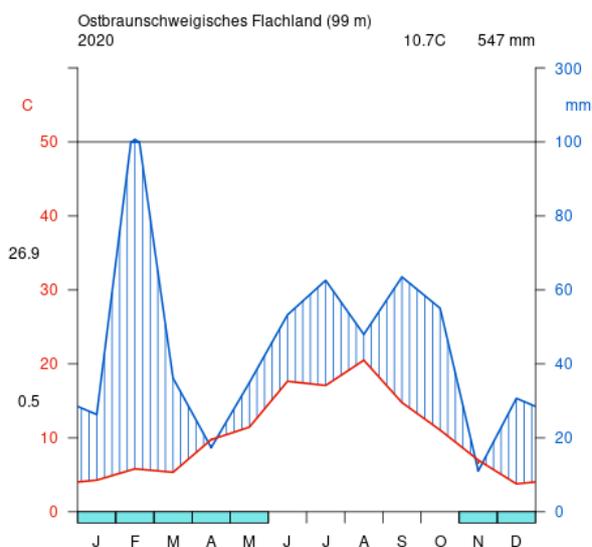


Abbildung 10: Witterungsverlauf im Jahr 2020 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.

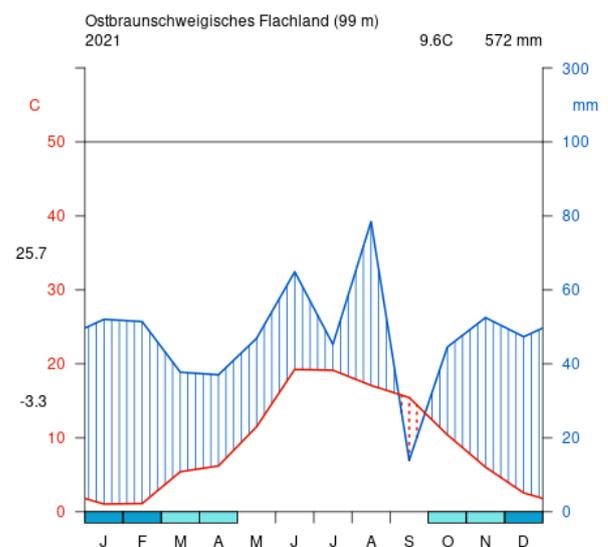


Abbildung 11: Witterungsverlauf im Jahr 2021 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.

Im Folgejahr 2019 (Abbildung 9) lag die Jahresdurchschnittstemperatur noch um 0,1 °C über der von 2018 (4,5 °C über der Referenzperiode). Der Jahresniederschlag lag mit 561 mm deutlich über dem von 2018, hat aber das Niveau der Referenzperiode mit einem um 100 mm geringeren Niederschlag ebenfalls deutlich unterschritten. Mit einer höchsten durchschnittlichen Tagesmaximaltemperatur je Monat von 26,8 °C war der Sommer nicht so heiß wie in 2018, aber dennoch lagen die Temperaturen über dem langjährigen Mittel. Im Jahresverlauf herrschten bis auf den Juli humide Verhältnisse. Aufgrund der geringen Winterniederschläge, besonders im Februar, waren die Böden zu Beginn der Vegetationsperiode nicht wassergesättigt.

Abbildung 10 veranschaulicht den Witterungsverlauf im Jahr 2020. Die Jahresdurchschnittstemperatur betrug 10,7 °C und der Jahresniederschlag betrug 547 mm. Somit lag die Durchschnittstemperatur auf dem Niveau von 2018, aber der Niederschlag war um 133 mm höher ausgefallen. Beide Werte waren ähnlich zu 2019. Ein Großteil des Niederschlags war im Februar mit über 100 mm gefallen. Im April herrschte eine aride Witterung und in den Sommermonaten waren die Niederschläge leicht unterdurchschnittlich. Zum Ende des Jahres gingen die Niederschläge zurück und der November war arid. Mit 26,9 °C war die maximale mittlere Maximaltemperatur je Monat um 0,1 °C über dem Wert von 2019 und die minimale durchschnittliche Minimaltemperatur je Monat mit 0,5 °C im Vergleich mit den Jahren 2018 und 2019 am höchsten. Die Differenz war zu den Vergleichsjahren am geringsten und zeigte ein von den Temperaturen her ausgeglichenes Jahr.

Der Witterungsverlauf für 2021 im Ostbraunschweigischen Flachland wird in Abbildung 11 veranschaulicht. Mit 572 mm lag der höchste Jahresniederschlag im Beobachtungszeitraum vor, dieser lag dennoch um 97 mm unter dem der Klimavergleichsperiode. Bis auf September lag in jedem Monat eine humide Witterung vor. Die Jahresdurchschnittstemperatur lag mit 9,6 °C um etwa einen Grad unter den Vorjahren und um 0,3 °C über der Klimavergleichsperioden. Somit war es im gesamten Beobachtungszeitraum im Vergleich mit der Klimaperiode deutlich trockener und wärmer.

2.2.3. Hoher Fläming

Klimatisch herrscht in der Umgebung des Flämings ein eher kontinentales Klima vor. Durch die Erhebung des Flämings und dem folgenden Stauereffekt weist dieser ein eher ozeanisch geprägtes Klima auf mit jährlichen Niederschlägen von 540 – 620 mm pro Jahr. Die jährliche Durchschnittstemperatur beträgt 7,5 – 8,0 °C (SCHWANECKE und KOPP 1994). In einer Höhenlage von 131 – 152 mNN liegen die Versuchsflächen.

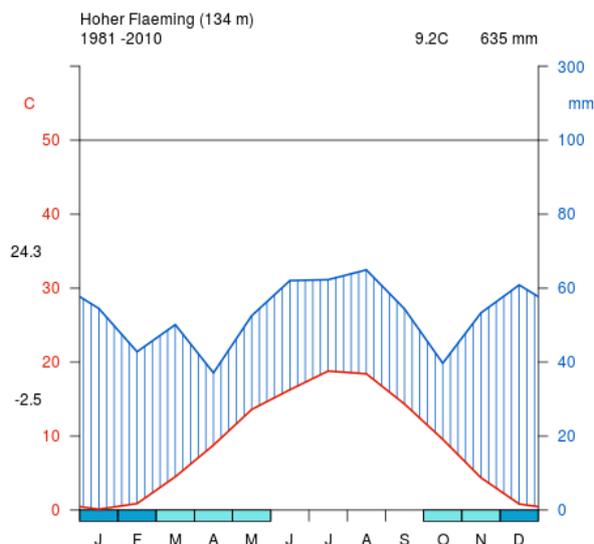


Abbildung 12: Klimadiagramm der Referenzperiode 1981 – 2010 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hohen Fläming.

Abbildung 12 zeigt das Klimadiagramm der Referenzperiode 1981 – 2010 aus regionalisierten Wetterdaten für den Standort der Intensivfläche im Hohen Fläming. Mit 9,2 °C lag die Jahresdurchschnittstemperatur um mehr als 1 °C über den Durchschnittswerten für die Region. Etwa gleichauf mit den oberen Durchschnittswerten der Niederschlagssummen für die Region, welche 620 mm betragen, lagen die Niederschlagssummen von 635 mm. Die höchste durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur je Monat betrug 24,3 °C und die geringste durchschnittliche Tagesminimaltemperatur je Monat - 2,5 °C. Im

Jahresverlauf herrschten in jedem Monat humide Verhältnisse vor.

In der Abbildung 13 ist die Witterung am Standort der Intensivfläche im Hohen Fläming aus regionalisierten Wetterdaten für das Jahr 2018 dargestellt. Die Jahresdurchschnittstemperatur lag mit 10,9 °C um 1,7 °C über der Referenzperiode. Gleichzeitig lag der Jahresniederschlag mit 372 mm um 41,4 % unter dem der Referenzperiode. 28,3 °C betrug die höchste durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur je Monat. Nach unterdurchschnittlichen Niederschlägen im Februar folgte ein niederschlagsarmer Sommer. Für die Monate Mai – Oktober herrschten durchgängig aride Witterungsverhältnisse.

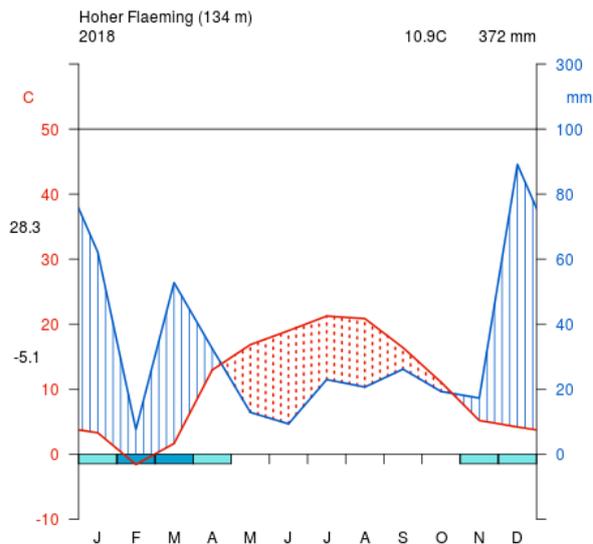


Abbildung 13: Witterungsverlauf im Jahr 2018 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hohen Fläming.

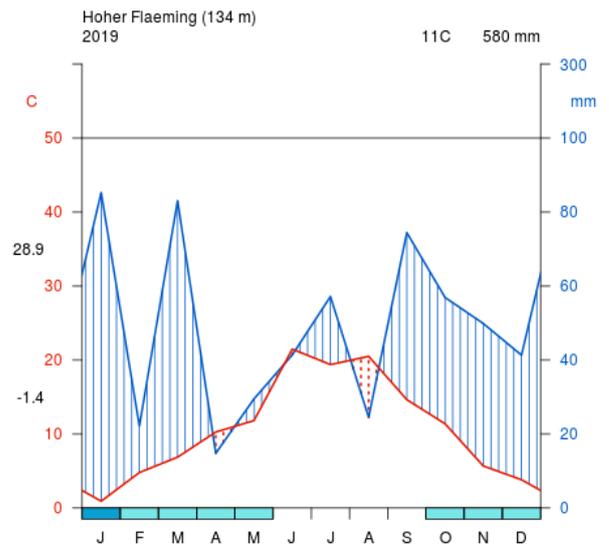


Abbildung 14: Witterungsverlauf im Jahr 2019 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hohen Fläming.

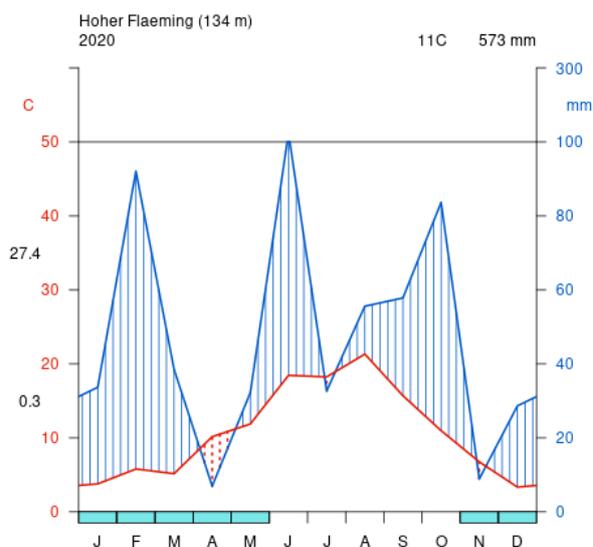


Abbildung 15: Witterungsverlauf im Jahr 2020 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hohen Fläming.

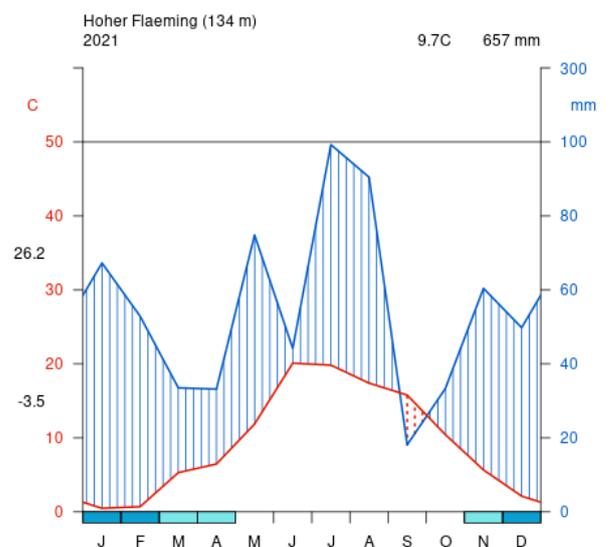


Abbildung 16: Witterungsverlauf im Jahr 2021 aus regionalisierten Wetterdaten für die Intensivfläche im Hohen Fläming.

Im Folgejahr lag die jährliche Durchschnittstemperatur mit 11 °C (Abbildung 14) um 0,1 °C über der von 2018. Mit einem Jahresniederschlag von 580 mm wird der Referenzwert zu 91,3 % erreicht. Die maximale durchschnittliche Tagesmaximaltemperatur je Monat lag mit 28,9 °C um 0,6 °C über dem Wert von 2018. Nach einem sehr trockenen Februar herrschten lediglich in den Monaten April, Juni und August aride Verhältnisse. Der Niederschlag fiel überwiegend in den Herbst- und Wintermonaten.

Mit einer durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur von 11 °C und einem Jahresniederschlag von 573 mm für das Jahr 2020 (Abbildung 15) lagen die Werte auf Vorjahreshöhe bei einer ungleichmäßigeren Verteilung. In den Monaten April, Juli und November war die Witterung arid und in den Monaten Februar, Juni und Oktober lagen die Niederschläge bei über 80 mm.

Vergleichsweise kühler war die höchste durchschnittliche Maximaltemperatur je Monat mit 27,4 °C zu 2018 und 2019 mit 28,3 °C und 28,9 °C und die geringste durchschnittliche Minimaltemperatur je Monat ist mit 0,3 °C um 5,4 °C wärmer als 2018 und 1,7 °C wärmer als 2019.

In 2021 war der Jahresniederschlag mit 657 mm der höchste in dem hier dargestellten Beobachtungszeitraum (Abbildung 16) und lag über dem Durchschnitt der Klimaperiode (Abbildung 12). Die Niederschläge kamen über das Jahr in einer für die Vegetation günstigen Verteilung. Lediglich im September herrschte aride Witterung vor. Die Jahresdurchschnittstemperatur für 2021 lag mit 9,7 °C um 0,5 °C über dem langjährigen Mittel, aber um 1,3 °C unter den Durchschnittstemperaturen der Vorjahre.

2.3. Versuchsflächenbeschreibung

Neben einer neu anzulegenden Versuchsfläche je Region, auf der permanente Messungen erfolgten (Intensivflächen), wurden auch ältere Kulturen in den Regionen zur Untersuchung der Langzeitauswirkungen von Bodenbearbeitung aufgesucht (Extensivflächen). Im Optimalfall lagen die Bodenbearbeitungen 3, 6 und 9 Jahre zurück. Es folgt eine Beschreibung der Intensiv- und Extensivflächen nach Regionen. Die Beschreibung der Extensivflächen erfolgte zum Zeitpunkt der einmaligen Bestandesaufnahme im Winter 2018/2019 (Stichtag 1.1.2019).

2.3.1. Hessisches Ried

2.3.1.1. Intensivfläche

Die Intensivfläche im Hessischen Ried befand sich im Forstamt Lampertheim in der Revierförsterei Viernheim in der Abteilung 411A1 (Abbildung 18 Nr. 1). Im nördlichen Bereich der Abteilung wurde ein Eichenherkunftsversuch im Frühjahr 2018 angelegt. Der südliche Bereich wurde für den hier beschriebenen Bodenbearbeitungsversuch vorgehalten. Im Herbst 2017 fand ein Kahlhieb auf der Gesamtfläche der Abteilung statt. Das Kronenholz wurde als Energieholz mit entnommen. Der Bestand war ein 94-jähriger Buchenbestand schlechter Bonität mit 169-jähriger Kiefer als Mischbaumart mit 40 % Flächenanteil, einzelstamm bis horstweise eingemischt. Als Nebenbaumarten sind horstweise Einmischungen von 68-jähriger Kiefer (ca. 10 % Flächenanteil) und 85-jähriger Fichte (ca. 1 % Flächenanteil) zu nennen. Der Gesamtbestockungsgrad betrug 0,6. Auf ganzer Fläche war ein Unterstand aus Eberesche und Traubenkirsche. Letztere bildete durch Stockausschläge einen mannshohen Bestand zum Zeitpunkt der Bodenbearbeitung im Herbst 2018 (Abbildung 17).



Abbildung 17: Im Vordergrund: Intensivfläche nach Kalamitätsnutzung und vor der Räumung. Ausgangsbestand im Hintergrund.

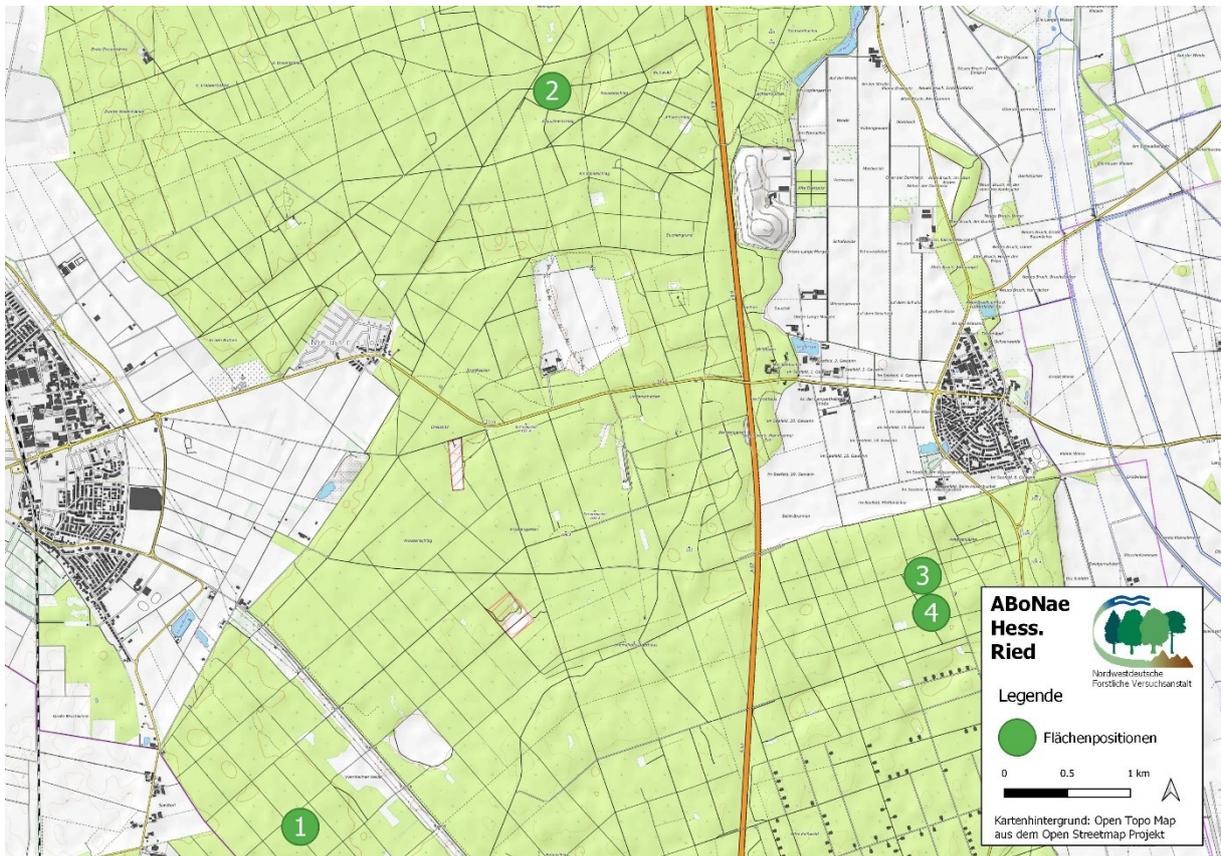


Abbildung 18: Lage der Flächenpositionen kartographisch im Hessischen Ried (1 = Intensivfläche, 2 = LE1, 3 = LE2, 4 = LE3).

2.3.1.2. Extensivflächen

Im Hessischen Ried lagen die Extensivflächen allesamt im Forstamt Lampertheim. Die genaueren Lageparameter sind der Tabelle 3 und Abbildung 18 zu entnehmen, sowie die Bezeichnungen der Flächen im weiteren Verlauf der Arbeit.

Tabelle 3: Lageparameter der Extensivflächen im Hessischen Ried.

Bezeichnung	Region	Forstamt	Abteilung	Koordinaten	Höhe mNN
LE1			41B2	49°37'13.1"N 8°32'17.0"E	95
LE2	Hessisches Ried	Lampertheim	126A3	49°35'08.1"N 8°34'43.8"E	98
LE3			120A5	49°34'58.1"N 8°34'47.8"E	97

Bei dem Bestand der Fläche LE1 handelt es sich um eine 6-jährige Stieleichenkultur aus Pflanzung im Ausgangsverband 2 x 0,7 m. Als Mischbaumart war Hainbuche eingebracht. Sie war gleichaltrig und einzelstammweise als jede sechste Pflanze beigemischt. Vereinzelt standen Kiefernüberhälter, ca. 80-jährig.

Die Fläche LE2 bestand aus drei Teilflächen eines Eichenversuchs. Für diese Untersuchung fanden lediglich die Stieleichenparzellen Berücksichtigung. Das Alter der Kultur war 9 Jahre, sie durch Pflanzung begründet worden und der Ausgangsverband betrug 2 x 1 m. Die Eichen waren im Kultur- bis Dickungsstadium, überwiegend schlechtwüchsig mit großen Fehlstellen. Fast die Hälfte der Ausgangspflanzen war ausgefallen. Angrenzend an einer Parzelle befindet sich ein ca. 200-jähriger Eichenüberhälter.

Die Extensivfläche LE3 war 13-jährig und durch Stieleichensaat begründet. Zum Zeitpunkt der Aufnahme lag die Stammzahl bei ca. 12.000 Stück/ha. Einzelstammweise war gleichaltrige Roteiche (*Quercus rubra* [L.]) eingemischt und von vorherrschender Stellung. Vereinzelt waren Fehlstellen durch Brunftkuhlen in den Saatreihen zu verzeichnen.

2.3.2. Ostbraunschweigisches Flachland

2.3.2.1. Intensivfläche

In der Abteilung 6232a1 (Abbildung 19 Nr. 1) der Revierförsterei Wolfsburg des Forstamtes Wolfenbüttel lag die Intensivfläche der Region Ostbraunschweigisches Flachland. Den Bestand bildete ein 0,8 bestockter über 200-jähriger Stieleichengrundbestand in einzelstamm bis horstweiser Mischung mit 180-jähriger Buche. Auf ganzer Fläche war ein 150-jähriger Buchenunterstand, gemischt mit Hainbuche, vorhanden. Nachwuchs war auf ganzer Fläche aus 10-jährigen Buchen und Hainbuchen vorhanden. Im Bereich der Versuchsanlage wurde der Bestand auf einer Fläche von 0,5 ha vollständig geräumt. Lediglich zwei Habitatbäume sind verblieben. X-Holz, Kronen und Astmaterial wurden grob von einem Rückezug geräumt.

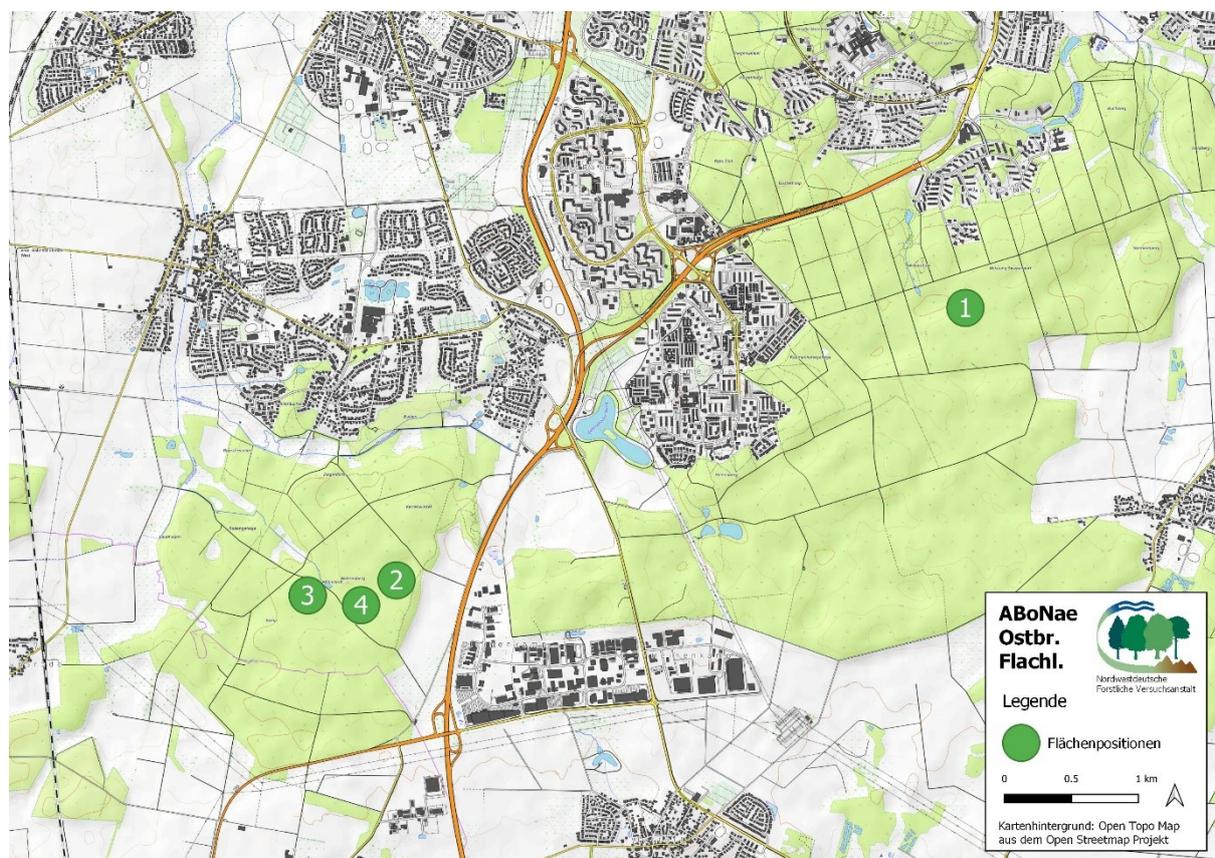


Abbildung 19: Lage der Flächenpositionen kartographisch im Ostbraunschweigischen Flachland (1 = Intensivfläche, 2 = WE1, 3 = WE2, 4 = WE3).

2.3.2.2. Extensivflächen

In der Tabelle 4 sind die Lageparameter der Extensivflächen für die Untersuchungsregion des Ostbraunschweigischen Flachlands aufgeführt. Die erste Spalte beschreibt die weitere Bezeichnung der Flächen. Abbildung 19 zeigt die Flächenpositionen kartographisch.

Tabelle 4: Lageparameter der Extensivflächen im Ostbraunschweigischen Flachland.

Bezeichnung	Region	Forstamt	Abteilung	Koordinaten	Höhe mNN
WE1			5053a3	52°22'39.6"N 10°43'02.7"E	96
WE2	Ostbraunschweigisches Flachland	Wolfenbüttel	5057b	52°22'35.7"N 10°42'28.1"E	93
WE3			5053a1	52°22'33.2"N 10°42'49.6"E	97

Bei der Fläche WE1 handelte es sich um eine 8-jährige Stieleichenkultur aus Pflanzung in einem Verband von 2 x 0,6 m. Zur Vorwaldbildung wurde gleichaltrige Schwarzerle (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.) in einem Weitverband von 4 x 10 m eingemischt. Die Schwarzerle war stark vorwüchsig. Einzelstammweise war Hainbuche aus Naturverjüngung eingemischt.

Die Parzelle WE2 war eine 9-jährige Stieleichendickung aus Pflanzung in einem Ausgangsverband von 2 x 0,6 m.

Ebenfalls dem Dickungsstadium zuzuordnen war die 11-jährige aus Pflanzung mit Stieleichen begründete Fläche WE3. Als Ausgangspflanzverband wurde ein Reihenverband von 2 x 0,6 m angenommen. Es sind kleinflächige Fehlstellen von bis zu 25 m² vorhanden.

2.3.3. Hoher Fläming

2.3.3.1. Intensivfläche

In der Abteilung 2653a1 des Forstamtes Anhalt in dem Revier Göritz lag die Intensivfläche im Wuchsbezirk „Hoher Fläming“ (Abbildung 20 Nr. 1). Den Ausgangsbestand bildete ein einschichtiger 94-jähriger Kiefernreinbestand des mittleren bis starken Baumholzes. Der Bestockungsgrad betrug 0,7. Für die Versuchsanlage wurde der Bestand im Sommer 2018 auf einen Bestockungsgrad von 0,4 – 0,5 gestellt.



Abbildung 20: Lage der Flächenpositionen kartographisch im Hohen Fläming (1 = Intensivfläche, 2 = AE1, 3 = AE2, 4 = AE3).

2.3.3.2. Extensivflächen

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die weitere Bezeichnung der Extensivflächen und der Lageparameter des Hohen Flämings. In der Abbildung 20 werden diese auf einer Karte gezeigt.

Tabelle 5: Lageparameter der Extensivflächen im Hohen Fläming.

Bezeichnung	Region	Forstamt	Abteilung	Koordinaten	Höhe mNN
AE1			2614a2	51°58'54.5"N 12°29'54.3"E	131
AE2	Fläming	Anhalt	2655a4	51°59'58.7"N 12°31'19.9"E	133
AE3			2659a2	51°59'57.5"N 12°30'24.7"E	152

Die Fläche AE1 bildete im Hauptbestand eine 10-jährige Traubeneichenkultur aus Saat in einem Reihenverband von ca. 2 m. Mischbaumart war eine etwa gleichaltrige Kiefernaturverjüngung auf ganzer Fläche. Die Kiefer war vorwüchsig. Entlang der Saatreihen wurde die Traubeneiche herausgepflegt. Auf ganzer Fläche ist ein 99-jähriger Überhalt aus Kiefer des mittleren Baumholzes vorhanden.

Den Hauptbestand der Parzelle AE2 bildete eine 12-jährige Traubeneichenkultur aus Saat in einem Reihenverband von ca. 2 m. Sie ist mattwüchsig. Die vorwüchsig gleichaltrige Kiefer aus Naturverjüngung wurde vollflächig entnommen. Ein Überhalt aus 129-jähriger Kiefer der natürlichen Altersstufe des mittleren Baumholzes war auf ganzer Fläche gegenwärtig.

Eine wüchsige Traubeneichendickung aus Saat in einem Reihenverband von ca. 2 m stellte den Hauptbestand der Fläche AE3 dar. Wenige 104-jährige Kiefernüberhälter des mittleren Baumholzes waren noch vorhanden.

2.4. Bodenkundliche Profilsprachen von den Versuchsf lächen

Im Rahmen der bodenkundlichen Basiserfassung wurden Ende August 2018 Bodenprofile auf den Versuchsf lächen aufgenommen. Fortlaufend werden diese hier dargestellt. Die Kartierung wurde auf Grundlage der KA5 (SPONAGEL et al. 2005) durchgeföhrt. Das Relief der Profile im Hessischen Ried und im Ostbraunschweigischen Flachland war eben. Im Hohen Fläm ing wiesen die Versuchsp arzellen eine schwache Neigung in südlicher bis südwestlicher Exposition auf.

2.4.1. Hessisches Ried

2.4.1.1. Intensivfl äche

Der Bodentyp auf der Intensivfl äche im Hessischen Ried entsprach einem Braunerde-Podsol. Die Humusform stimmte mit einem mullartigen Moder überein. In der Tabelle 6 ist eine Übersicht des Profils gegeben.

Tabelle 6: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils auf der Intensivfl äche im Hessischen Ried.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Aeh	8	fSu3	0	2	4	W2
Bsh	19	fSu3	0	3	1	W3
fGo-Bv	49	fSu2	0	3	0	W2
fGo-ICv	100	fSu2	0	3	0	W1

2.4.1.2. Extensivfl ächen

Aufgrund der zeitlich nicht sehr weit zurückliegenden Bodenbearbeitungen auf den Extensivfl ächen LE1, LE2 und LE3 hatte sich der Humuskörper noch nicht vollständig regeneriert. Die Humusformen wurden dem F-Mull zugeordnet. Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen Übersichten der Bodenprofile auf den Extensivfl ächen LE1, LE2 und LE3 im Hessischen Ried. Die Bodentypen sind Braunerden.

Tabelle 7: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfl äche LE1 im Hessischen Ried.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Ah	12	fSu2	0	3	3	W4
fAp	35	fSu2	0	4	3	W3
Bv	90	fSu2	0	3	0	W1
fGo-ICv	100	fSu2	0	3	0	W0

Tabelle 8: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfl äche LE2 im Hessischen Ried.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Ap	30	Su3	0	2	3	W3
Bv	60	fSu2	0	3	1	W2
fGo-ICv	100	Fsl2	0	3	0	W1

Tabelle 9: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfl äche LE3 im Hessischen Ried.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Ap	5	fSu3	0	3	2	W2
fAp	35	fSu3	0	3	3	W4
IlfAp	52	Su4	0	4	2	W3
Bv	80	Su4	0	3	0	W2
ICv	100	fSu3	0	3	0	W0

2.4.2. Ostbraunschweigisches Flachland

2.4.2.1. Intensivfläche

Die Humusform der Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland entspricht einem für Eichenwälder häufigen feinhumusarmen typischen Moder. Die Bodentypisierung nach der KA5 wies eine podsolige Pseudogley-Braunerde aus. In der Tabelle 10 sind die Mineralbodenhorizonte bis zu einer Tiefe von 1 m dargestellt.

Tabelle 10: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Aeh	2	fSu3	1	3	2	W2
Bh	6	fSu3	1	4	1	W3
Bs	9	fSu3	1	4	0	W2
Sw-Bv	55	fSu3	1	4	0	W2
Sw	79	fSl2	1	3	0	W2
Sd	100	Sl4	2	3	0	W2

2.4.2.2. Extensivfläche

Die Humusansprache in Zuge der bodenkundliche Profilsprache auf den Extensivflächen WE1, WE2 und WE3 wies eine Humusform des L-Mulls für jede Fläche aus. Eine Übersicht je Profil ist der Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13 zu entnehmen. Es wurden die Bodentypen Pseudogley, Pseudogley-Braunerde und Pseudogley-Braunerde bestimmt.

Tabelle 11: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfläche WE1 im Ostbraunschweigischen Flachland.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Ah	12	Ut4	0	3	3	W3
Sw	34	Tu4	0	4	2	W2
Sd	61	Tu3	0	4	3	W2
Swd	74	Tu2	0	3	2	W2
Sd-ICv	100	Tu3	0	3	3	W2

Tabelle 12: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfläche WE2 im Ostbraunschweigischen Flachland.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Ah	9	Sl2	1	3	3	W3
Sw-Bv	54	Sl2	1	3	2	W2
Sd-ICv	100	Ls2	0	4	0	W2

Tabelle 13: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfläche WE3 im Ostbraunschweigischen Flachland.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Aeh	7	Uls	0	3	3	W3
Bv	28	Uls	0	3	0	W2
Sw	60	Ls2	3	4	0	W3
Swd	73	Lts	1	4	0	W1
Sd	100	Tu2	0	4	0	W2

2.4.3. Hoher Fläming

2.4.3.1. Intensivfläche

In der Tabelle 14 werden die Mineralbodenhorizonte des Profils auf der Intensivfläche der Anfangsinventur präsentiert. Als Humusform wurde ein feinhumusreicher rohhumusartiger Moder kartiert. Der Bodentyp entsprach einem Braunerde-Podsol.

Tabelle 14: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Intensivfläche im Hohen Fläming

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Aeh	2	fSu2	1	3	2	W2
rAp-Bh	19	fSu2	1	3	3	W3
Bv	63	fSu2	5	3	0	W1
ICv	100	mSfs	0	3	0	W0

2.4.3.2. Extensivfläche

Auf jeder der Extensivflächen AE1, AE2 und AE3 im Hohen Fläming zeigte die Profilsprache eine Humusform des feinhumusreichen rohhumusartigen Moders. Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 beschreiben die Mineralbodenhorizonte der jeweiligen Bodenprofile. Als Bodentypen wurden ihnen Braunerde, Podsol und podsolige Braunerde zugeordnet.

Tabelle 15: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfläche AE1 im Hohen Fläming.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Ah	3	Su3	2	3	3	W4
rAp-Bh	16	Su3	2	3	1	W4
Bv	47	Su3	2	3	0	W4
ICv	70	fSms	20	3	0	W1
ICv	100	fSms	0	3	0	W0

Tabelle 16: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfläche AE2 im Hohen Fläming.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Aeh	3	fSu2	0	3	2	W3
rAp-Bh	16	fSu2	0	3	2	W3
Bs	47	fSu2	0	3	0	W2
I ICv	70	fSu2	0	3	0	W2
ICv	100	fSI2	0	4	0	W0

Tabelle 17: Übersicht der Mineralbodenhorizonte des Bodenprofils der Extensivfläche AE3 im Hohen Fläming.

Horizont	Tiefe	Bodenart	Skelett	Lagerungsdichte	Humusgehalt	Durchwurzelung
Aeh	3	Su4	1	2	3	W3
rAp-Bv	22	Su4	1	3	1	W2
Bv	61	Su4	1	3	0	W1
ICv	100	Fsms	1	3	0	W0

2.5. Umsetzung der Bodenbearbeitungen

Für die Anlage der Bodenbearbeitungsvarianten auf den Intensivflächen wurden diese in drei Parzellen unterteilt. Die Bodenbearbeitungen fanden ab dem 16.10.2018 statt und wurden bis Ende des Monats abgeschlossen. Das Silvafixverfahren wurde in jeder Region angewendet (Tabelle 18). Bei dieser Variante handelte es sich um eine baggergestützte Flächenräumung. Hierbei wurde mit einer Art Rechen der Schlagabraum hinter dem Bagger auf die von ihm befahrene Gasse gezogen. Somit wird eine vollflächige Befahrung vermieden. Dieses Verfahren galt in den Niedersächsischen Landesforsten als Standardverfahren für Flächenräumungen und wurde neben einer Kontrollvariante in jeder Projektregion umgesetzt. Die dritte Variante variiert zwischen den Regionen und stellte das örtlich etablierte Standardverfahren dar.

Die Bestandesbegründungen richteten sich nach den lokal bevorzugten Verfahren. Im Hessischen Ried und im Ostbraunschweigischen Flachland wurden Eichenpflanzungen bevorzugt; in der Region des Hohen Flämings die Eichensaat (Tabelle 18).

Es werden nach Regionen die Bodenbearbeitungen der Parzellen sowie die Bestandesbegründungen beschrieben.

Tabelle 18: Übersicht der Bearbeitungsvarianten und Verjüngungsverfahren nach Regionen

Region	Bearbeitungsvarianten		Verjüngungsverfahren	
Hessisches Ried	Silvafix	Kontrolle	Mulcher + Fräse	Pflanzung
Ostbraunschweigisches Flachland	Silvafix	Kontrolle	Mulcher	Pflanzung
Hoher Fläming	Silvafix	Kontrolle	Streifenpflug	Saat

2.5.1.1.1. Hessisches Ried

Auf der nordwestlichen Parzelle wurde die Kontrollvariante angelegt (Abbildung 21). Es fand keine Bodenbearbeitung statt, lediglich die Stockausschläge der Traubenkirschen wurden motormanuell zur Flächenvorbereitung für die Pflanzung entfernt. Mit dem Silvafix-Aggregat wurde die mittlere Parzelle geräumt (Abbildung 22). Im südwestlichen Bereich wurde die Parzelle erst mit einem Forstmulcher bearbeitet und anschließend mit einer Forstfräse. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine schleppergestützte Bearbeitung. Es werden zumeist landwirtschaftliche Schlepper als Trägerfahrzeug mit einer Leistung von mehr als 150 kW eingesetzt. Die Arbeitsbreiten betragen häufig 3 m und erfordern durch den Anbau in der Dreipunkthydraulik eine flächige Befahrung. Im ersten Bearbeitungsgang, des Mulchens, wird alles über dem Mineralboden befindliche Material (Baumstümpfe, Schlagabraum etc.) zerkleinert. Beim nachgelagerten Fräsen wurde hier 30 cm tief in den Mineralboden eingegriffen, der Boden durchmischt und die Baumwurzeln zerkleinert.

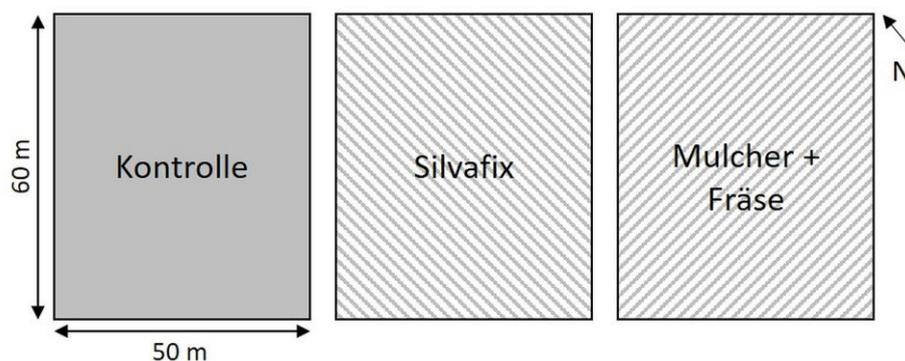


Abbildung 21: Parzellenanordnung der Intensivfläche im Hessischen Ried.



Abbildung 22: Flächenräumung mit dem Silvafix im Hessischen Ried.

2.5.1.1.2. Ostbraunschweigisches Flachland

Im Westen (Abbildung 23) wurde die Kontrollparzelle angelegt. Es wurde der verbliebene Schlagabraum von Hand auf kleine Haufen gepackt, da ansonsten eine Bepflanzung nicht möglich gewesen wäre. Im Osten lag die Silvafixparzelle. Mittig befand sich die Lokalvariante Mulchen (Abbildung 24).

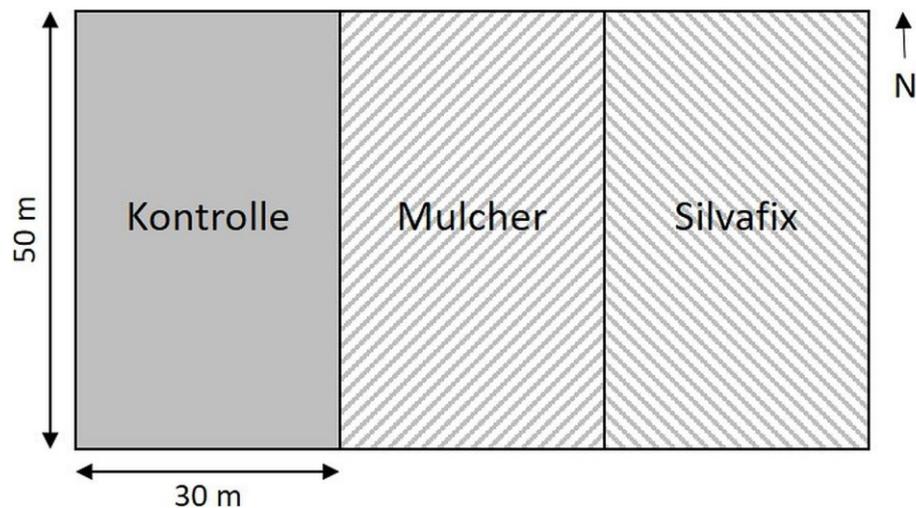


Abbildung 23: Parzellenanordnung der Intensivfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.



Abbildung 24: Mulchen der Fläche im Ostbraunschweigischen Flachland. Im Hintergrund ist ein Reisighaufen zu sehen.

2.5.1.1.3. Hoher Fläming

Die Räumung der Silvafixparzelle im Westen (Abbildung 25) erfolgte am 23.10.2019. Hierbei wurde aufgrund der starken Vergrasung der Mineralboden fast vollständig freigelegt (Abbildung 26). Zeitgleich wurde der Schlagabraum der Streifenpflugparzelle (im Osten) und der umliegende Fläche des Versuchs mit einem Räumfix auf die Gassen geschoben (Abbildung 27). Dies war vor dem Anlegen der Pflugstreifen – mit einem Waldstreifenpflug, welcher an einem leichten Schlepper angebaut wurde – notwendig. Wenige Tage später ist die Anlage der Pflugstreifen auf der Versuchsparzelle erfolgt. Ein Streifenpflug legt den Mineralboden für die bevorstehende Verjüngung eines Bestandes auf einem ca. 50 cm breiten Streifen frei. Dies geschieht durch mittiges einschneiden des Humuskörpers mit einem Sech. Dadurch werden Wurzeln und ähnlich verfilzendes Material durchtrennt. Dass nachgelagerte Doppelschar kann somit den Humuskörper sauber zu den Seiten wegklappen (Abbildung 28). Auf der Kontrollparzelle fand eine händische Räumung der Fläche direkt vor der Saat statt.

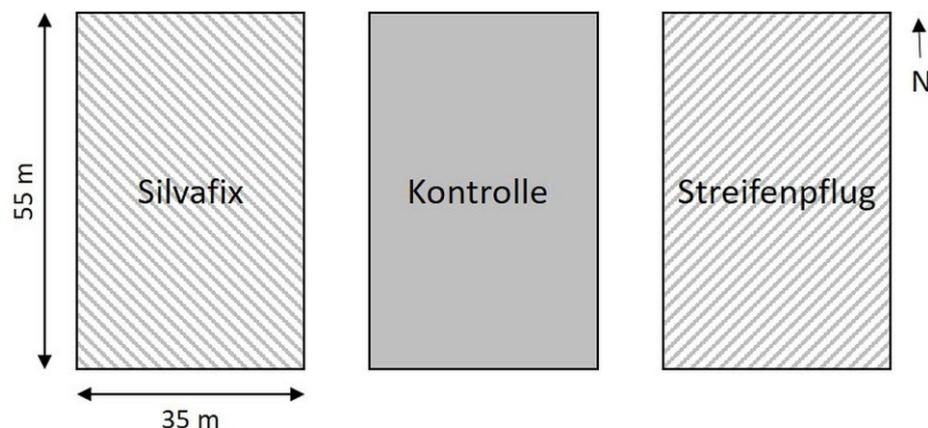


Abbildung 25: Parzellenanordnung der Intensivfläche in Hohen Fläming.



Abbildung 26: Räumung der Silvafixparzelle. Aufgrund des Grasfilzes wurde der gesamte Humus mit abgezogen.



Abbildung 27: Räumung der Pflugvariante mit dem Räumfix.



Abbildung 28: Anlage von Pflugstreifen mit dem Streifenpflug.

3. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

3.1. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf bodenphysikalische Parameter

3.1.1. Korngrößenanalyse

3.1.1.1. Methodik

Durch Korngrößenbestimmung wurden die Massenanteile des Bodens an den Korngrößenfraktionen Ton, Schluff und Sand exakt bestimmt. Diese war notwendig um die Ergebnisse der Vorratsuntersuchungen korrekt interpretieren zu können. So können z.B. Vorratsunterschiede an basischen Kationen auf unterschiedliche Tongehalte zurückgeführt werden. Einige Tonminerale lagern Kationen, aufgrund ihrer negativen Ladung durch den isomorphen Ersatz, als Ladungsausgleich an.

Die Probennahme wurde im Herbst 2019 durchgeführt. Von jeder Parzelle der Bodenbearbeitungsvarianten auf den Intensivflächen und von jeder Extensivfläche wurden an drei Beprobungspunkten Mischproben aus fünf Tiefenstufen nach Abbildung 29 genommen. Aus Kostengründen wurden die drei Mischproben je Tiefenstufe einer Parzelle zu einer Mischprobe je Tiefenstufe vereinigt.

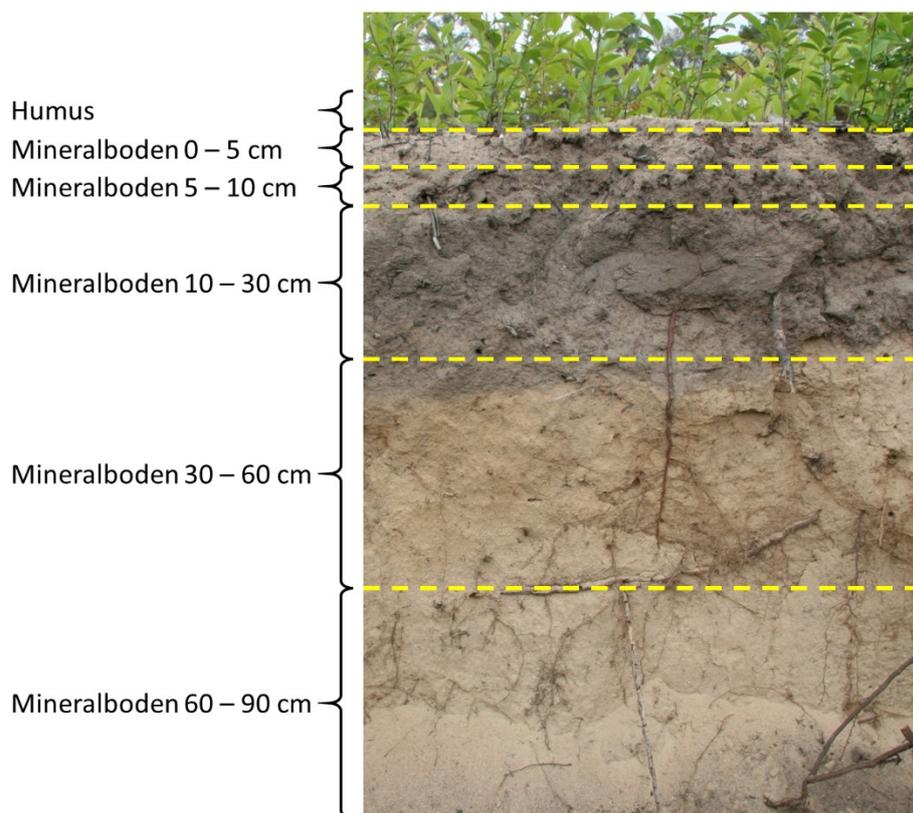


Abbildung 29: Darstellung der Beprobungstiefen am Beispiel eines Bodenprofils einer gefrästen Fläche im Hessischen Ried.

Nach Ausschreibung wurde der Analyseauftrag an das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz vergeben. Die Analyse wurde nach der „Korngrößenzusammensetzung in Mineralböden“ (KÖNIG 2014) durchgeführt. Hierzu wurden die Proben in einem ersten Schritt vorbereitet und auf 2 mm gesiebt, da Sand bis zu einer Korngröße von 2 mm definiert ist. Mittels weiterer Siebungen wurden die Gehalte der Sandfraktionen ($> 0,063$ mm) bestimmt. Im weiteren Verlauf zur Bestimmung der Schluff- und Tonanteile wurde das Sedimentationsverfahren nach der Köhn-Pipett-Methode angewendet.

3.1.1.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Korngrößenanalyse zeigten homogene Verhältnisse innerhalb der Regionen (Abbildung 30). Mittelsand war die dominierende Korngröße im Hohen Fläming mit 40 – 60 % über alle Tiefenstufen und Behandlungen, gefolgt von Grobsand mit 20 – 40 % und Feinsand mit 5 – 15 %. Alle anderen Bodenarten lagen auf jeder der Parzellen unter 10 % je Tiefenstufe. Im Hessischen Ried dominierte ebenfalls die Korngröße des Mittelsands mit einem Anteil von 50 – 70 % der Kornfraktionen. 20 – 40 % nahm die Korngröße des Mittelsands ein. Bei einem Anteil von unter 10 % je Tiefenstufe lagen die übrigen Korngrößenanteile. Am geringsten waren die Mittelsandanteile im Ostbraunschweigischen Flachland mit 25 – 40 % im Vergleich zwischen den Regionen, stellten aber die größten Anteile unter den Parzellen in den oberen Tiefenstufen I – IV dar. Der Feinsandanteil lag zwischen 20 – 40 % und stellte bei der Kontrolle in der untersten Tiefenstufe (V) und auf der Silvafixparzelle in den untersten beiden Tiefenstufen (IV und V) den höchsten Anteil. Die Ton- und Grobschluffgehalte waren im Ostbraunschweigischen Flachland mit 10 – 20 % am höchsten. Die übrigen Fraktionen an der Korngröße lagen bei unter 10 %.

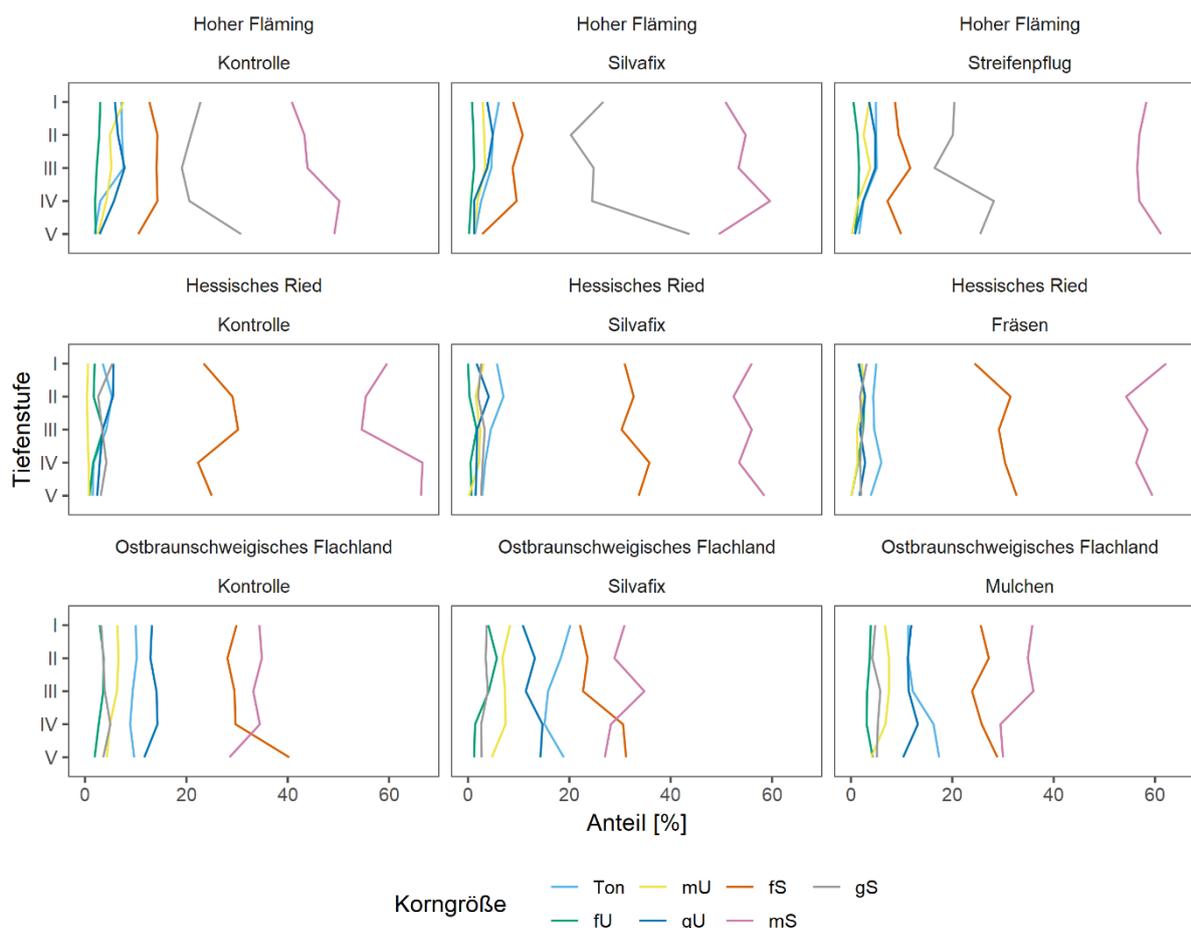


Abbildung 30: Korngrößenmasseanteile auf den Intensivflächen nach Tiefenstufen (Ton < 0,002 mm; fU = 0,002 – 0,0063 mm; mU = 0,0063 – 0,02 mm; gU = 0,02 – 0,063 mm; fS = 0,063 – 0,2; mS = 0,2 – 0,63 mm; gS = 0,63 – 2,0 mm; Tiefenstufe I = 0 – 5 cm; Tiefenstufe II = 5 – 10 cm; Tiefenstufe III = 10 – 30 cm; Tiefenstufe IV = 30 – 40 cm; Tiefenstufe V = 60 – 90 cm).

In Abbildung 31 werden die Ergebnisse der Korngrößenanalyse der Extensivflächen veranschaulicht. Die Extensivflächen im Hohen Fläming (AE1 – AE3) wiesen ähnliche Gehalte wie die Intensivfläche des Hohen Flämings auf, unterschieden sich aber auf den Flächen AE2 und AE3 durch einen höheren Gehalt an Feinsand zulasten der Anteile an Grob- und Mittelsand. Im Hessischen Ried waren die Korngrößenverteilungen der Extensivflächen untereinander nahezu identisch und auch im Vergleich mit der Intensivfläche. Aufgrund ihrer räumlichen Nähe waren die Korngrößenverteilungen der Extensivflächen WE1 und WE3 im Ostbraunschweigischen Flachland sehr ähnlich, unterschieden sich aber hinsichtlich ihres deutlich höheren Tongehaltes von 40 – 70 %

und 25 – 55 % gegenüber der Extensivfläche WE2, welche wiederum der Intensivfläche sehr ähnlich ist.

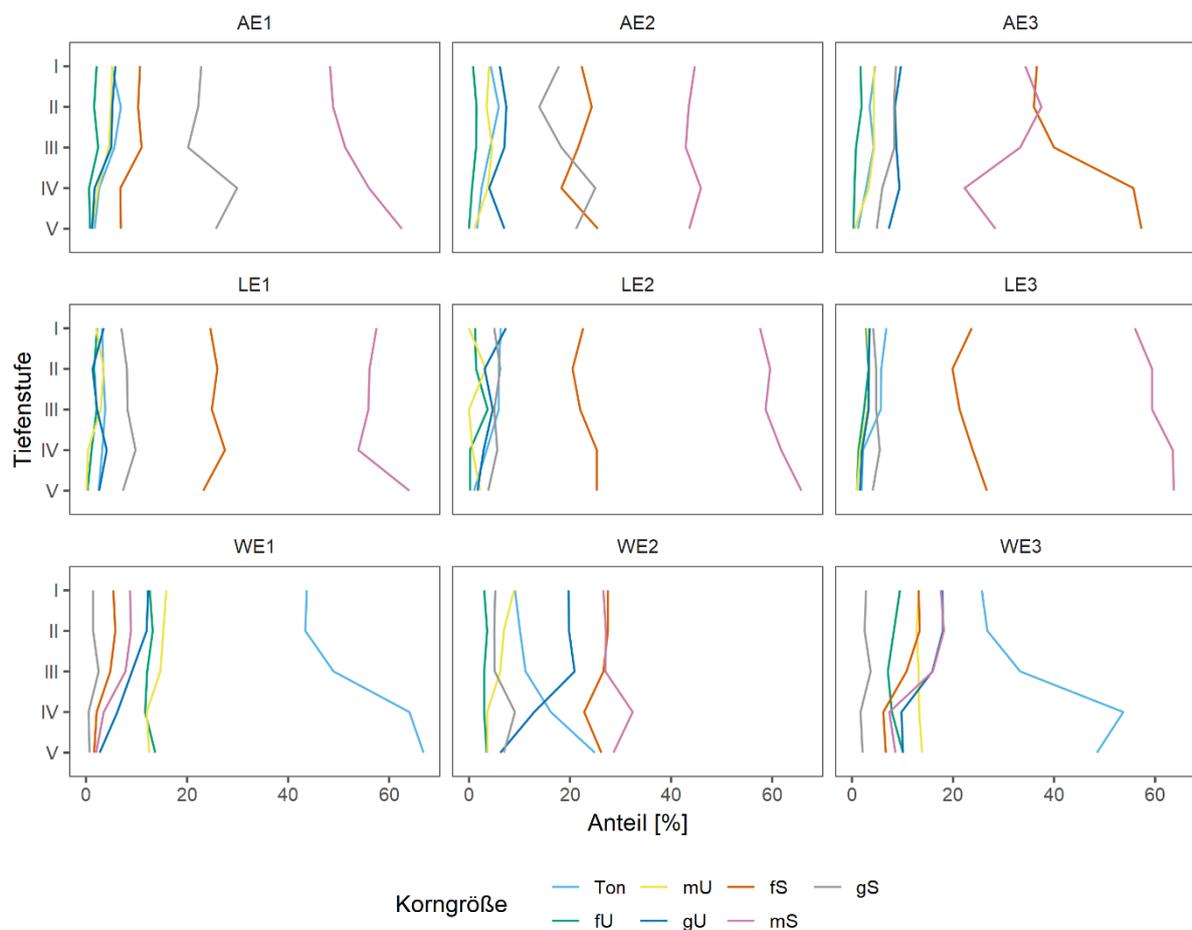


Abbildung 31: Korngrößenmasseanteile auf den Extensivflächen nach Tiefenstufen (Ton < 0,002 mm, fU = 0,002 – 0,0063 mm, mU = 0,0063 – 0,02 mm; gU = 0,02 – 0,063 mm, fS = 0,063 – 0,2, mS = 0,2 – 0,63 mm, gS = 0,63 – 2,0 mm; Tiefenstufe I = 0 – 5 cm; Tiefenstufe II = 5 – 10 cm; Tiefenstufe III = 10 – 30 cm; Tiefenstufe IV = 30 – 40 cm; Tiefenstufe V = 60 – 90 cm).

3.1.2. Trockenrohdichtebeprobung

3.1.2.1. Methodik

Im Rahmen der Beprobung von bodenphysikalischen Parametern sollte die Trockenrohdichte des Feinbodens (TRD_{FB}) (KÖNIG 2014) bestimmt werden. Hierzu wurden aus den unter Punkt 2.4 beschriebenen Bodenprofilen, vor dem Verfüllen, Proben entnommen. Die Beprobung erfolgte volumengerecht mit sechs Stechzylinderproben (250 cm^3) je Tiefenstufe, welche zu einer Mischprobe vereinigt wurden. Es wurden fünf Tiefenstufen (0 – 5, 5 – 10, 10 – 30, 30 – 60 und 60 – 90 cm) nach dem Schema der Abbildung 29 ausgewiesen. Auf den bearbeiteten Parzellen der Intensivflächen wurde im Frühjahr 2021 eine TRD_{FB} -Beprobung an Profilen nach gleichem Schema durchgeführt, allerdings wurde eine Mischprobe aus vier Stechzylindern gebildet.

Die Proben wurden im Umweltanalytik-Labor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt bei 105 °C getrocknet, gewogen und die TRD_{FB} berechnet (KÖNIG 2014).

3.1.2.2. Ergebnis

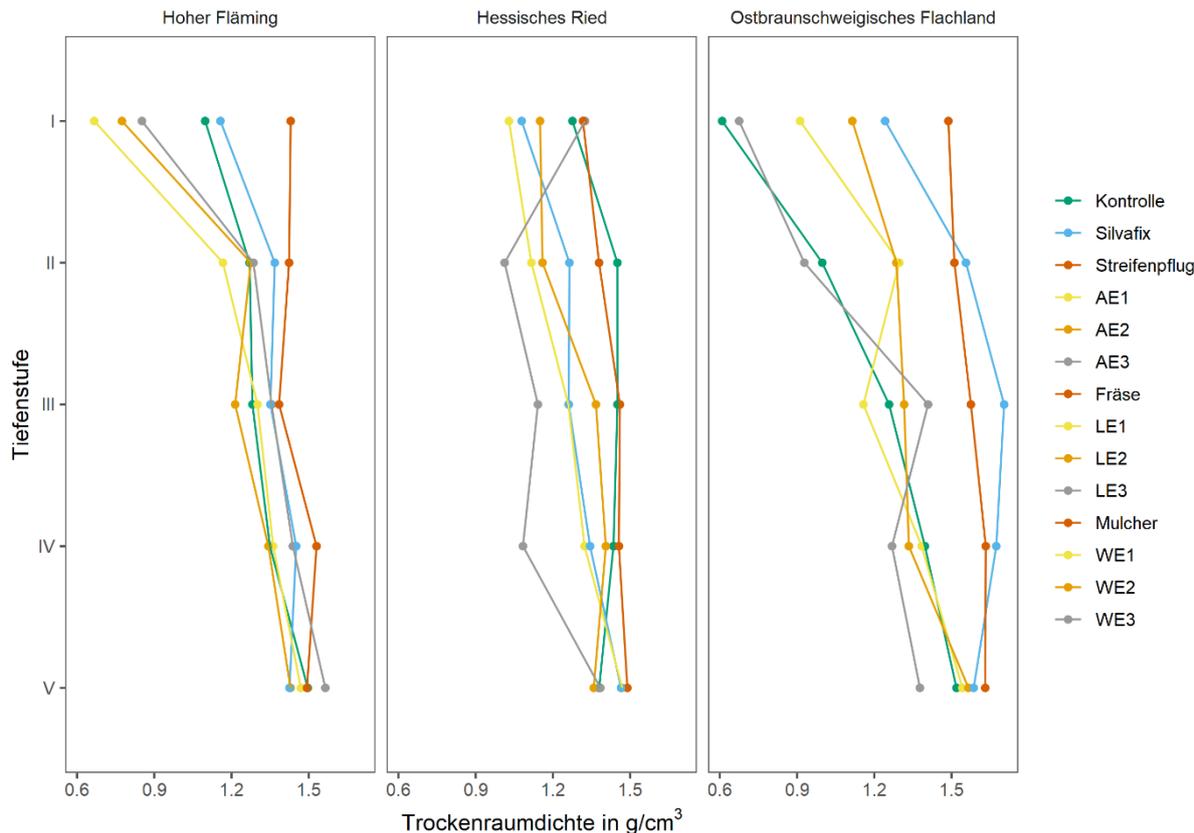


Abbildung 32: Trockenraumdichte nach Region und Tiefenstufe für die Intensiv- und Extensivflächen (Tiefenstufe I = 0 – 5 cm; Tiefenstufe II = 5 – 10 cm; Tiefenstufe III = 10 – 30 cm; Tiefenstufe IV = 30 – 40 cm; Tiefenstufe V = 60 – 90 cm).

Abbildung 32 veranschaulicht das Ergebnis der TRD_{FB}-Beprobung. Im Hohen Fläming zeigte sich ein homogenes Bild über alle Parzellen. Bis auf die jüngste Streifenpflugbearbeitung war der Oberboden lockerer gelagert als der Unterboden. Im Oberboden wiesen die Werte eine große Streuung von 0,6 – 1,5 g/cm³ auf. Ab der Tiefenstufe II streuten die Werte von 1,2 – 1,5 g/cm³ und in der Tiefenstufe V von 1,4 – 1,6 g/cm³. Im Hessischen Ried zeigte sich ein ähnliches Bild. Hier zeigte die Fläche LE3 ein indifferentes Bild bei der der Oberboden (Tiefenstufe I) die höchste Lagerungsdichte aufwies, die Tiefenstufen II – IV die geringsten und die Tiefenstufe V lag im Mittel. Die Streuung im Oberboden reichte von 1 – 1,4 g/cm³ und im Unterboden von 1,3 – 1,5 g/cm³. Im Ostbraunschweigischen Flachland war die Streuung im Vergleich zu den anderen Regionen am größten. Auch hier war der Oberboden (Tiefenstufe I) lockerer gelagert als der Unterboden (Tiefenstufe V). Die Streuung reichte im Oberboden von 0,6 – 1,6 g/cm³ und im Unterboden von 1,4 – 1,7 g/cm³. Die Kontrollfläche zeigte beim Vergleich über die Regionen keine Besonderheiten in der Lagerungsdichte. Hingegen war beim Silvafixverfahren die Tiefenstufe I im Vergleich mit den örtlichen regionalen Standardverfahren nachhaltiger gelockert. Bei Betrachtung der regionalen Standardverfahren wiesen die jüngsten Bearbeitungen in der Tiefenstufe I in allen Regionen hohe Lagerungsdichten auf, welche auf den älteren Flächen der Extensivflächen sich nicht widerspiegelten.

3.1.3. Diskussion

Die Abweichungen in den Bodendichten zwischen den Regionen und die Streuungen innerhalb der Regionen passten gut zu den Standorten mit ihren unterschiedlichen Korngrößenverteilungen (Abbildung 30 und Abbildung 31). Die sandigen und homogeneren Standorte im Hohen Fläming und im Hessischen Ried zeigten ähnliche Werte und eine geringere Streuung. Die tonigeren Böden des Ostbraunschweigischen Flachlands waren aufgrund ihres höheren Feinbodenanteils dichter gelagert und wiesen entsprechend ihrer Heterogenität in der Korngrößenverteilung eine weitere

Streuung auf. Eine Erklärung für die große Abweichung der Dichte der Kontrolle zu den Bearbeitungsvarianten erscheint schwierig. Aufgrund der Trockenheit in 2018 waren die Böden im Ostbraunschweigischen Flachland zum Zeitpunkt der Bodenbearbeitung sehr hart. Somit war eine Verdichtung durch Befahrung von Forstmaschinen unwahrscheinlich (ALLMAN et al. 2017). Eine weitere Ursache konnte in den unterschiedlichen Witterungsverhältnissen an den Beprobungsterminen begründet sein. Am Beprobungstermin in 2018 waren die Böden in einem ausgetrockneten Zustand; in 2021 in einem wassergesättigten Zustand. Da die Böden im Ostbraunschweigischen Flachland tonhaltig sind neigen sie zum Quellen und Schrumpfen. Das heißt, dass die Böden sich bei Trockenheit zusammen ziehen und ihre TRD_{FB} steigt. Nehmen die Böden Feuchte auf, Quellen die Tonminerale auf und die TRD_{FB} verringert sich. Somit müssten die Beprobungen aus 2021 aufgrund des gequollenen Zustands eine systematische Unterschätzung der TRD_{FB} begünstigen. Somit bleibt lediglich der höhere Feinbodengehalt auf der Silvafix- und Mulchparzelle als Erklärung der höheren Dichte.

Weiterhin zeigte sich, dass die Oberböden (Tiefenstufe I) der regionalen Standardverfahren eine im Vergleich geringere Lagerungsdichte gegenüber der jüngsten Bearbeitung mit dem regionalen Standardverfahren aufwiesen, ausgenommen die Fläche LE3. Die Differenz war in der obersten Tiefenstufe größer als in den unteren Tiefenstufen. Dies könnte auf eine raschere Regeneration des Oberbodens nach Bodenbearbeitung hindeuten, wie es für Fahrspuren beobachtet wurde (FROEHLICH et al. 1985).

Bei zu hohen Bodendichten wird die Wurzel Ausbildung gehemmt. Für Buche werden Werte von $1,35 \text{ g/cm}^3$ für befahrene Lösslehm-Standorte angegeben, welche nicht überschritten werden sollten, um einen Sauerstoffmangel im Boden zu vermeiden und eine erfolgreiche Buchenkeimwurzel Ausbildung zu gewährleisten (HILDEBRAND 1983). Bei jeder der neu angelegten Parzellen der regionalen Standardverfahren auf den Intensivflächen überstieg die Lagerungsdichte diesen Wert. Auf den sandigen Standorten im Hohen Fläming und Hessischen Ried ist dies als nicht problematisch zu werten, da sandige Böden über ausreichend Grobporen verfügen und es somit zu keinem Sauerstoffmangel im Wurzelraum kommt. Hingegen könnte die Verdichtung im Ostbraunschweigischen Flachland negative Auswirkungen auf weitere bodenphysikalische Parameter haben, wie z.B. die Porengröße, welche durch TRD-Beprobungen nicht nachweisbar sind (LENHARD 1986). Diese wurden vermutlich durch die Bodenbearbeitung selbst hervorgerufen, da jede Bearbeitung, unabhängig von der Bodenart, den Gasaustausch im Boden beeinträchtigt (RICHTER und GROßGEBAUER 1978). HILDEBRAND (1983) schlägt bei Bodenverdichtungen eine Bodenlockerung vor, bei welcher die Lockerungen durch biologische Maßnahmen (Wühlaktivitäten, Wurzelwachstum) gegen die natürliche Sackung stabilisiert werden sollten. Hierdurch sollen auch Porenvolumina und eine Porenkontinuität gesichert werden.

3.2. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Bodenfeuchte

3.2.1. Einleitung

Bodenbearbeitungen regulieren den Begleitwuchs (DINGER und ROSE 2009; LÖF et al. 1998), bei intensiver Ausführung auch über mehrere Jahre (KRAMER 1978). Neben einer Begünstigung des Wachstums, durch Verminderung der oberirdischen Konkurrenz (hauptsächlich Licht), wird vor allem die Konkurrenz um unterirdische Ressourcen gesteuert (Wasser und Nährstoffe). Dies wirkt sich zu Gunsten von Kulturen aus, da für diese in erster Linie eine Konkurrenz um unterirdische Ressourcen besteht (NILSSON et al. 1996a). Bei gleichem Lichtgenuss konnte gezeigt werden, dass Buchen bei Wasserdefizit ein verringertes Wachstum aufweisen (COLL et al. 2004; COLL et al. 2003). Unter Trockenstress sind frisch begründete Kulturen nicht in der Lage neue Wurzeln auszubilden (GROSSNICKLE 2005). Mehrere Untersuchungen konnten zeigen, dass durch Bodenbearbeitungen der Trockenstress reduziert werden konnte (HANSSON et al. 2018; LÖF et al. 1998; ÖRLANDER et al. 1998). In der Literatur werden Angaben zum Beginn von Trockenstress in einem Bereich von Bodenmatrixpotentialen von – 500 hPa bis – 1300 hPa, in Abhängigkeit von Boden- und Baumart, gegeben (GROH et al. 2013; ROSENQVIST et al. 2010). Wuchsreduktionen werden bereits ab Bodenmatrixpotentialen von – 600 hPa beobachtet (GROSSNICKLE 2005; WAGNER et al. 2019). Eine Begleitwuchsregulierung mit chemischen Mitteln erzielt die gleichen positiven Effekte auf die Bodenfeuchte (DINGER und ROSE 2009; LÖF et al. 2006; NILSSON et al. 1996a), findet in Deutschland aber kaum Anwendung (WILLOUGHBY et al. 2009).

Unsere Hypothesen lauteten: Bodenbearbeitungen begünstigen die Bodenfeuchte und der Silvafix begünstigt ebenso gut die Bodenfeuchte, wie die regionalen Standardverfahren.

3.2.2. Methodik

Das Matrixpotential beschreibt die Saugspannung des Wassers im Boden und nimmt mit zunehmender Trockenheit ab. Anhand des Matrixpotentials wird der Unterdruck bestimmt, welchen die Bäume mindestens aufbringen müssen, um Wasser aus der Bodenmatrix aufzunehmen.

Das Matrixpotential wird mit Watermark Sensoren (200SS-15) der Firma Irrrometer® gemessen und im Watermark Monitor (900M) desselben Herstellers gespeichert. Für das System werden zudem Temperaturfühler zur Korrektur der automatisierten Berechnung des Matrixpotentials benötigt. Hier sind die zugehörigen Bodentemperaturfühler 200TS eingesetzt worden. Auf der Homepage des Herstellers ist der Berechnungsalgorithmus hinterlegt (IRRROMETER COMPANY 2019). Watermark Sensoren funktionieren wie übliche elektrische Matrixpotentialsensoren, welche über Messung eines elektrischen Widerstandes das Matrixpotential abschätzen. Das Wirkungsprinzip beruht darauf, dass im Watermark Sensor zwei Elektroden in einer granulierten Matrix aus Keramik eingebettet sind. Bei Bodenkontakt nimmt der Sensor die gleiche Bodenfeuchte an wie die umgebende Bodenmatrix. Der Sensor misst den Widerstand eines elektrischen Impulses zwischen den Elektroden. Hierbei nimmt der Widerstand mit steigender Feuchtigkeit (IRMAK et al. 2016) und steigender Temperatur ab (Irmak u. Haman 2001; Shock et al. 1998).

Die Sensoren wurden für eine möglichst rasche Konditionierung an die örtlichen Gegebenheiten, zeitnah nach der Bodenbearbeitung eingebaut. Im Vorfeld der Installation im Feld wurden die Watermark Sensoren gemäß Bedienungsanleitung konditioniert (mehrmaliges Anfeuchten und Abtrocknen lassen), sowie der Watermark Monitor auf ein halbstündiges Messintervall programmiert. Im Anschluss an die Konditionierung wurden die Sensoren in der Nähe der Lysimeterpärchen in einer Bodentiefe von 15 cm im Mineralboden installiert und mit Kabeln an den Watermark Monitor angeschlossen. Dies entsprach der halben maximalen Bodenbearbeitungstiefe. Je Watermark Sensor wurde ein Temperaturfühler in unmittelbarer Nähe und in gleicher Tiefe installiert und zum Temperatenausgleich vorgeschaltet (vom Hersteller empfohlen für exaktere Messungen). Ein zusätzliches Fühlerpaar wurde in der Nähe des Loggers verbaut. Insgesamt wurden 36 Watermark Sensoren und 36 Temperaturfühler ausgebracht, auf jeder Parzelle je 4, da die Watermarkmonitore über acht Steckplätze verfügen.

In sandigen Böden soll der Messbereich des Systems für das Matrixpotential bei bis zu -2390 hPa liegen (IRMAK et al. 2016).

Die Messungen der Sensoren erfolgten automatisch und wurden auf dem internen Speicher des Watermark Monitors abgelegt. Dieser wurde mittels manueller Auslesung über ein Verbindungskabel mit einem Standard Computer, auf dem die Software für die Watermarkmonitorbedienung installiert war, wieder freigegeben. In dem Zuge wurde vom Techniker die Funktionalität des Systems mitgeprüft (Ladezustand der Batterie, Prüfung der Kabel auf Beschädigungen durch z.B. Fraß) und bei Bedarf wieder hergestellt.

Im negativen Temperaturbereich (in °C) liegt das Bodenwasser im gefrorenen Zustand vor, so dass Matrixpotentialmessungen nicht möglich waren. Zudem konnten die hier verwendeten Temperaturfühler nicht im negativen Temperaturbereich messen.

3.2.3. Ergebnisse

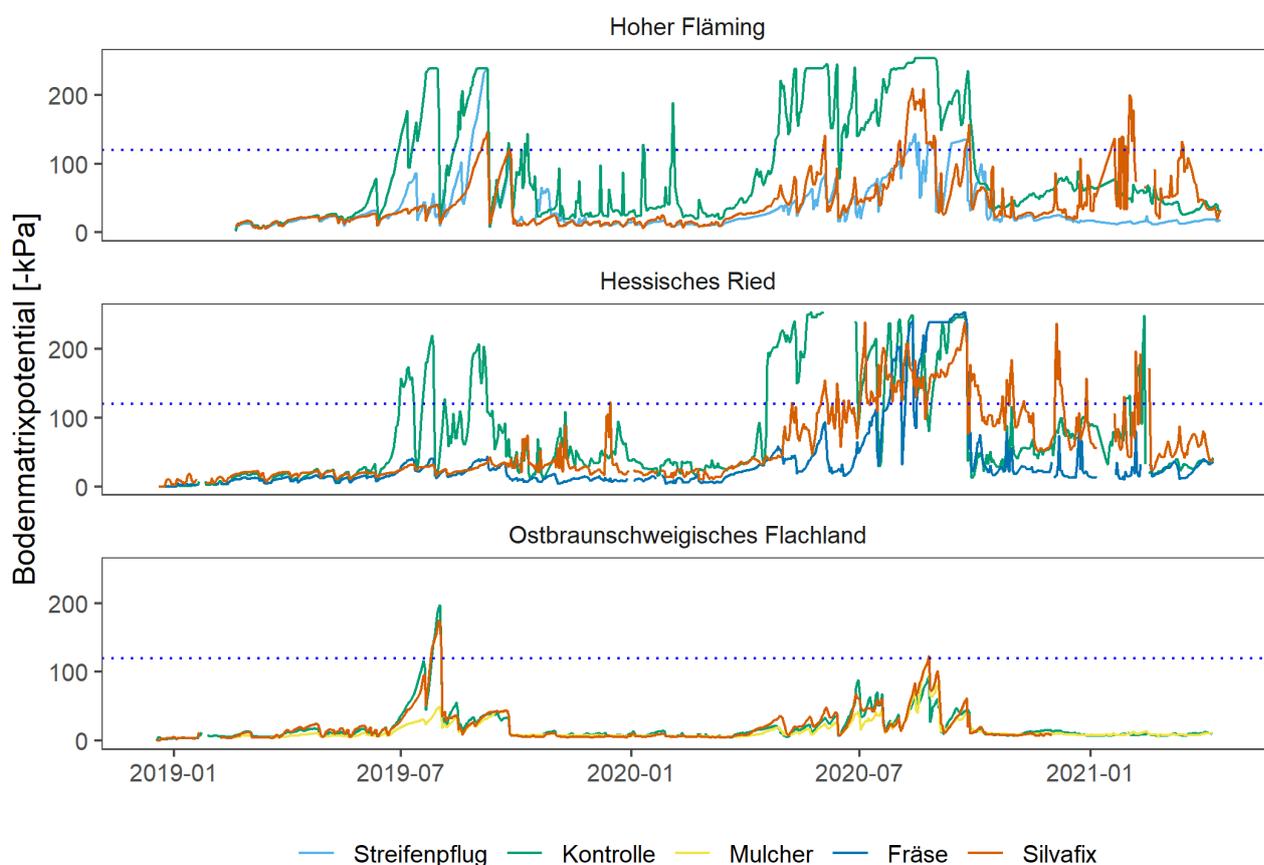


Abbildung 33: Mediane der Bodenfeuchtemessungen im Untersuchungszeitraum nach Regionen und Bearbeitungsvarianten. Die in blau gehaltene gepunktete Linie entspricht einem Wert von -120 kPa als Vergleichsmaßstab für Trockenstress.

In allen Regionen zeigte die Bodenfeuchte einen jährlichen Verlauf mit feuchten Böden im Winter und trockenen im Sommer (Abbildung 33). Die Kontrollen im Hohen Fläming und Hessischem Ried zeigten 2019 für mehrere Wochen Trockenstress für Forstkulturen und 2020 für mehrere Monate. Die bearbeiteten Varianten zeigten sowohl in 2019 als auch in 2020 gegenüber den Kontrollen deutlich bessere Bodenfeuchtebedingungen. Im Hessischen Ried zeigte die gefräste Parzelle bessere Wiederbefeuchtungseigenschaften gegenüber den anderen Varianten. Im Ostbraunschweigischen Flachland waren die Böden im Beobachtungszeitraum nur kurzfristig 2019 im Trockenstressbereich. Die Bearbeitungen zeigten sehr ähnliche Bodenwasserspannungen.

3.2.4. Diskussion

In Abhängigkeit von Bodenart und Bewuchs zeigten die Kontrollen mit zunehmendem Sandgehalt und Bewuchs eine stärkere Austrocknung im Sommer, welche im Hohen Fläming über mehrere Wochen 2019 und mehrere Monate 2020 Trockenstress für die Forstkulturen bedeuteten. Die stärkere Austrocknung 2020 gegenüber 2019 im Hohen Fläming und im Hessischen Ried bei den bearbeiteten Varianten konnte auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Erstens lagen die Niederschläge 2020 etwas unter denen 2019; zweitens hat sich im Laufe der Jahre Begleitwuchs etabliert, wodurch höhere Verdunstungsraten hervorgerufen werden (DINGER und ROSE 2009). Die höheren Verdunstungsraten stellten den Haupteffekt dar, da die geringeren Niederschläge ebenfalls auf die Kontrolle wirkten. Eine Studie zur Grundwasserneubildung aus Dänemark und Schweden bestätigt die Beobachtungen. Sie konnten erhöhte Grundwasserspenden auf Freiflächen gegenüber Wald (und dadurch auch bessere Bodenfeuchteverhältnisse für Pflanzen) nachweisen (ROSENQVIST et al. 2010).

Fräsen förderte die Wasserinfiltration des Oberbodens im Hessischen Ried durch schließen von Megaporen, in welchen das Niederschlagswasser ansonsten zügig in den Unterboden gelangte und für Forstkulturen unerreichbar war (BENECKE 1992; HORN und LEBERT 1992; SCHULTE-KARRING und SCHRÖDER 1992).

Aufgrund des hohen Wasserspeichervermögens des Bodens im Ostbraunschweigischen Flachland und der geringen Verdunstungsleistung der Waldbodenflora und den im Untersuchungszeitraum recht gleichmäßig gefallenen Sommerniederschlägen zeigte der Standort keinerlei Gefahren für eine Trockenstressgefährdung von Forstkulturen.

Bodenbearbeitungen mit einer effektiven Begleitwuchsreduktion waren auf Trockenstressgefährdeten Böden in der Lage das Trockenstressrisiko für Forstkulturen in den ersten beiden Jahren zu senken und je nach Bearbeitungsverfahren die Wasserinfiltration zu steigern. Das Silvafixverfahren minderte im Vergleich mit anderen Bodenbearbeitungsverfahren ähnlich effektiv das Trockenstressrisiko, hingegen wurde die Wasserinfiltrationsrate in den Wintermonaten nicht so stark verbessert wie bei den regionalen Standardverfahren.

3.3. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Vegetation

3.3.1. Einleitung

Vegetationsaufnahmen sollten Aufschluss über die Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Flora geben. Diese sind durch den direkten mechanischen Eingriff zu erwarten oder auch durch eine indirekte Standortänderung durch z.B. Mineralisationsschübe (KRISO 1952).

Es wurde vermutet, dass nach Bodenbearbeitungen: (I) die Artenzahlen abnehmen, (II) die Feuchtezahl durch eine geminderte Transpiration zunimmt, (III) die Lichtzahl durch die aufkommende Sukzessionsflora zunimmt, (IV) die Stickstoffzahl durch einen Anstieg der Mineralisation zunimmt, (V) die Trockenbiomasse durch die Bodenbearbeitungen abnimmt.

3.3.2. Methodik

Auf jeder Parzelle der Intensivflächen wurde vor der Bodenbearbeitung eine 100 m² (10 x 10 m) große Parzelle für Vegetationsaufnahmen eingemessen und markiert. Vor der Bodenbearbeitung wurde im Sommer 2018 eine erste Vegetationsaufnahme durchgeführt. Zeitgleich wurde die Vegetation auf den Extensivflächen mit je einer 100 m² großen Parzelle pro Fläche erfasst. Hier soll die längerfristige Vegetationsentwicklung nach der örtlichen Bodenbearbeitungsvariante (Tabelle 18) und Eichenkultur dargestellt werden. Auf den Intensivflächen erfolgte eine Wiederholungsinventur an der gleichen Stelle im Sommer 2020 zur Abschätzung des kurzfristigen Einflusses der Bodenbearbeitung auf die Flora und zum Vergleich der Bodenbearbeitungsvarianten.

Bei den Aufnahmen sind die Deckungsgrade des Gesamtartenbestandes an Gefäßpflanzen und Moosen erfasst worden. Zudem wurden Sprosslängen erhoben. Diese zerstörungsfreie Aufnahmemethode ist besonders für Wiederholungsinventuren geeignet.

Die Auswertung fand mit dem Programm PhytoCalc statt. Diesem Programm sind Schätztafeln mit Elementgehalten von Waldpflanzen und ihren Wachstumsfunktionen hinterlegt (BOLTE et al. 2009; BOLTE et al. 2002; BOLTE 1999). Aus den ermittelten Deckungsgraden und den gemessenen Höhen errechnet das Programm die in der Bodenvegetation gebundenen Nährelemente. Eine notwendige Anpassung des Modells an Freiflächenbedingungen wurde durchgeführt (HEINRICHS et al. 2010; KLINCK und FRÖHLICH 2009).

3.3.3. Ergebnisse

3.3.3.1. Artenanzahlen

Die Abbildung 34 veranschaulicht die Entwicklung der Artenanzahlen in der Krautschicht über die Zeit nach der Bodenbearbeitung für die regionalen Standardverfahren. Im Hohen Fläming und Hessischen Ried nahm die Artenanzahl nach der Bodenbearbeitung zu. Im Ostbraunschweigischen Flachland hatten sich aufgrund der vorausgegangenen Auflichtung vor dem Projektbeginn bereits viele Arten eingestellt. Die größte Anzahl an Arten wies das Ostbraunschweigische Flachland mit 30 Arten auf, gefolgt vom Hessischen Ried (24 Arten) und dem Hohen Fläming mit 20 Arten. Bei allen Bearbeitungen nahm die Artenanzahl mit der Zeit ab und endete auf dem Niveau vor der Bodenbearbeitung bei etwa zehn Arten.

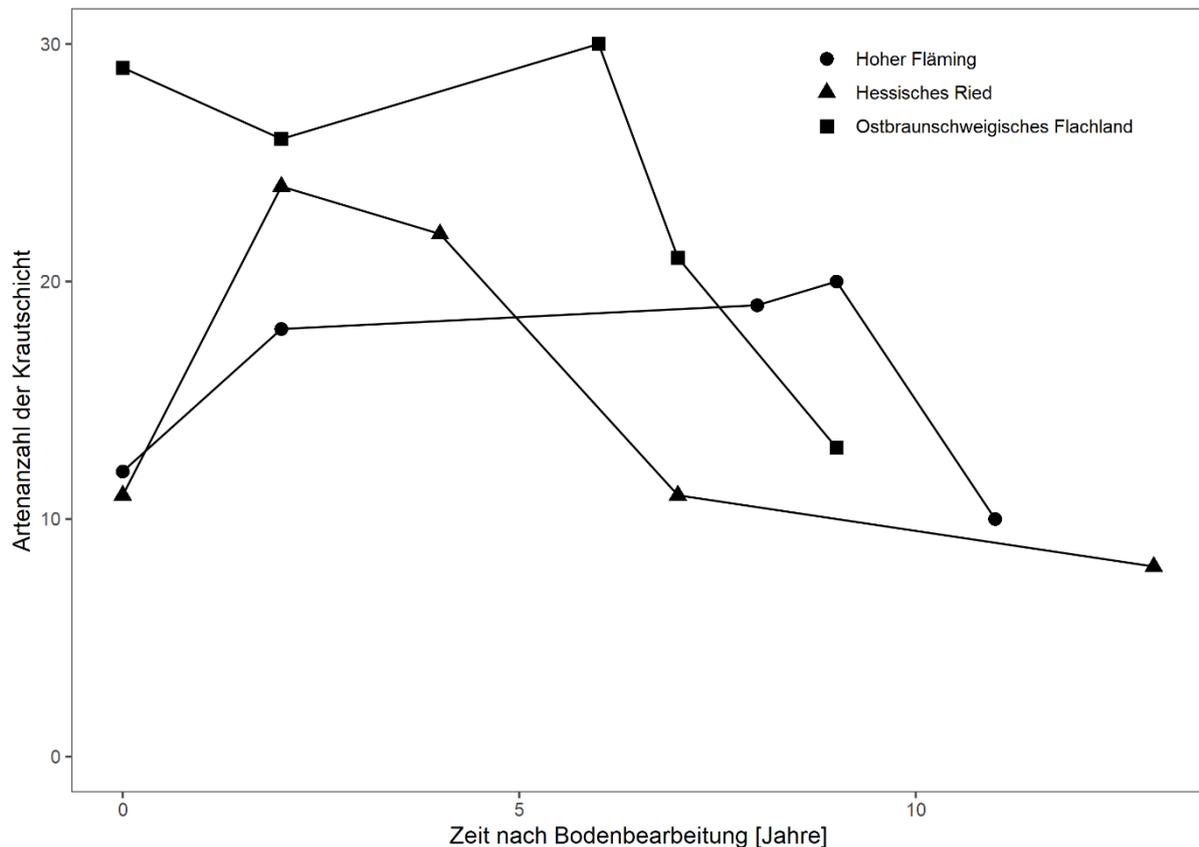


Abbildung 34: Entwicklung der Artenzahlen in der Krautschicht über die Zeit nach regionalen Standardverfahren.

Abbildung 35 zeigt die Entwicklung der Artenzahlen der Krautschicht auf den Intensivflächen nach Regionen und Bodenbearbeitungsverfahren. Im Hohen Fläming und im Hessischen Ried nahmen die Artenzahlen auf den bearbeiteten Parzellen im Vergleich zur Kontrolle 2 Jahre nach Bodenbearbeitung zu. Ebenfalls war die Zunahme der Artenzahlen des regionalen Standardverfahrens gegenüber dem Silverfixverfahren höher (Δ Artenanzahl Kontrolle/ Silverfix/ regionales Standardverfahren; Hoher Fläming: 2/ 5/ 6; Hessisches Ried: 7/ 10/ 13). Aus oben genannten Gründen waren die Artenzahlen vor der Bodenbearbeitung im Ostbraunschweigischen Flachland bereits erhöht. In der Folge wies die Kontrolle eine Zunahme von zwei Arten nach 2 Jahren nach Bodenbearbeitung auf, die Silverfixbearbeitung von acht Arten und die Mulchvariante eine Abnahme der Artenanzahl von drei Arten. Die Abnahme bei der Mulchvariante könnte durch einen starken verdämmenden Brombeerbewuchs auf einem Teilbereich der Vegetationsaufnahme-parzelle hervorgerufen worden sein und auch im Zusammenhang mit der Mulchauflage gestanden haben, welche den Mineralboden bedeckte und ein Auflaufen von Mineralbodenkeimern erschwerte.

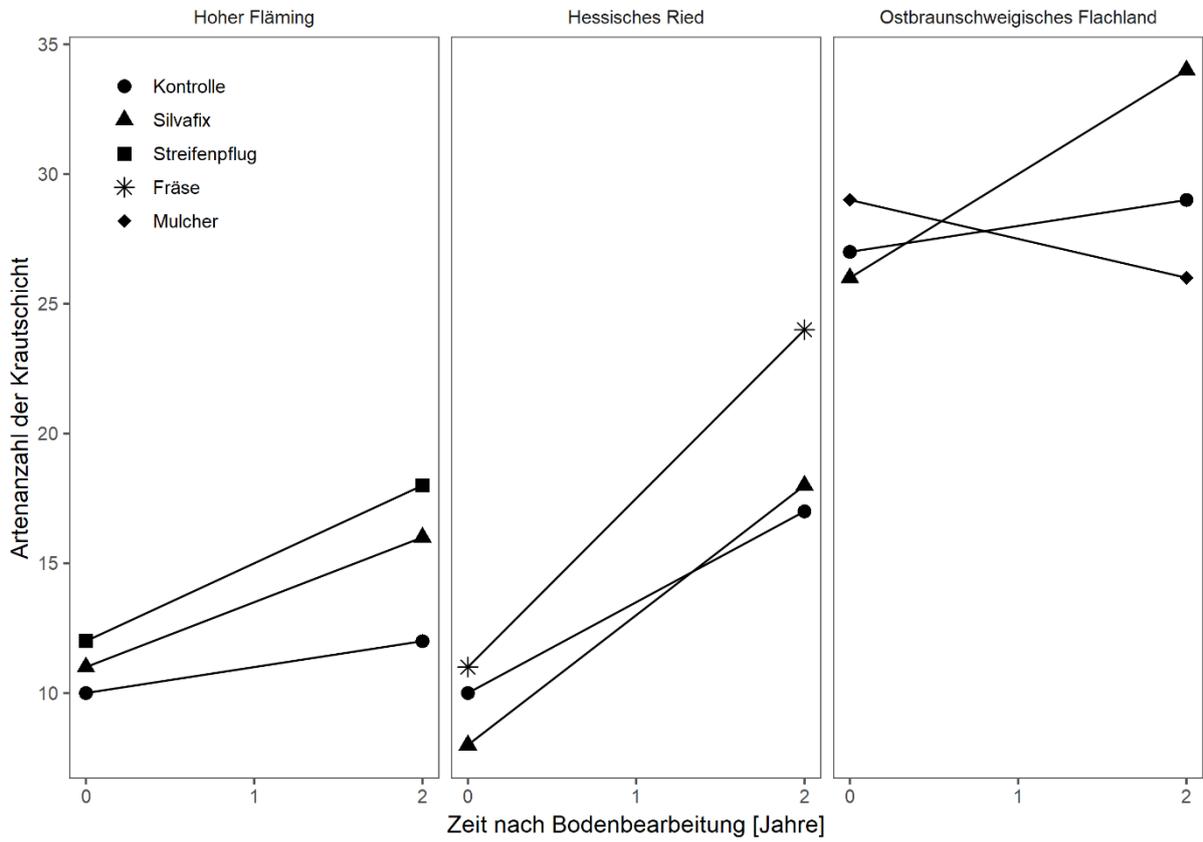


Abbildung 35: Entwicklung der Artenzahl auf den Intensivflächen nach Region und Bearbeitungsverfahren.

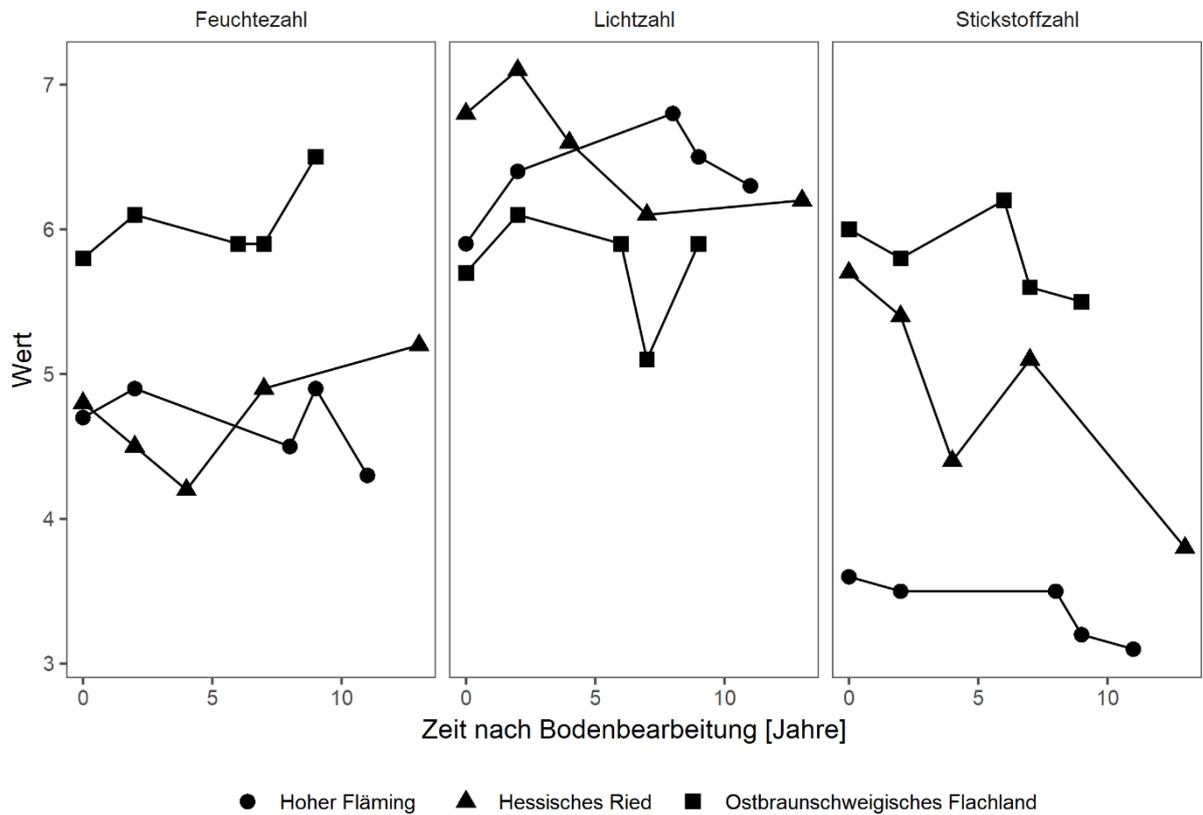


Abbildung 36: Entwicklung der Feuchte-, Licht- und Stickstoffzahl über die Zeit nach regionalen Standardverfahren.

3.3.3.2. Feuchtezahl

Abbildung 36 zeigt die Entwicklung ausgewählter Zeigerwerte über die Jahre nach Bodenbearbeitung für das regionale Standardverfahren der jeweiligen Region. Im Ostbraunschweigischen Flachland lag der Wert der Feuchtezahl etwa um eine Einheit über denen des Hessischen Rieds und des Ostbraunschweigischen Flachlands bei 6. Dies entsprach einem frisch bis feuchtem Zustand (ELLENBERG et al. 2010). Über die Zeit nahm der Wert zu. Mit steigendem Wert werden die Flächen feuchter (ELLENBERG et al. 2010). In den Regionen Hoher Fläming und Hessisches Ried lag die Feuchtezahl bei 5 (Frischer Standort (ELLENBERG et al. 2010)) und zeigte ein indifferentes Bild bei dem kein Trend über die Zeit nach Bodenbearbeitung erkennbar war.

Beim Vergleich des regionalen Standardverfahrens mit dem Silvafixverfahren und der unbearbeiteten Kontrolle (Abbildung 37) über 2 Jahre zeigte die Feuchtezahl im Hohen Fläming keine Änderung, im Hessischen Ried nahm die Feuchtezahl bei allen Varianten ab und im Ostbraunschweigischen Flachland bei allen Varianten zu.

3.3.3.3. Lichtzahl

Der Zeigerwert der Lichtzahl (je höher die Zahl, desto höher der Lichtanspruch) stieg bei allen regionalen Standardverfahren nach der Bearbeitung an und fiel über die Jahre mit zunehmendem Bestandesschluss auf das Ausgangsniveau zurück (Abbildung 36). Über die ganze Dauer waren die Pflanzen dem Spektrum von Halbschattenpflanzen bis Halblichtpflanzen zuzuordnen (ELLENBERG et al. 2010). Der hohe Ausgangswert im Hessischen Ried ist auf den erfolgten Abtrieb im Vorjahr der Erstaufnahme zurückzuführen. In einem intakten Nachbarbestand mit einer vergleichbaren Bestandesstruktur, wie der des Vorbestandes der Versuchsfläche, lag die Lichtzahl bei 5,5.

Beim Vergleich der Entwicklung der Lichtzahl auf den Intensivflächen nahmen unabhängig von der Region oder Behandlung die Lichtzahlen zu (Abbildung 37). Lediglich auf der Kontrollparzelle im Hohen Fläming war eine Abnahme der Lichtzahl um 0,1 zu verzeichnen.

3.3.3.4. Stickstoffzahl

Ein Vergleich der Stickstoffzahl der Vegetation der regionalen Standardverfahren (Abbildung 36) zeigt, dass die Stickstoffversorgung vom Hohen Fläming zum Ostbraunschweigischen Flachland zunimmt. Die Spanne reicht von stickstoffarmen Standorten bis mäßig stickstoffreichen und stickstoffreichen Standorten (ELLENBERG et al. 2010). Über die Zeit zeigten alle regionalen Standardverfahren einen Abfall der Stickstoffzahl. Dieser nahm beim Fräsverfahren im Hessischen Ried den größten Wert an und betrug ca. 2. Bei den anderen Verfahren betrug die Abnahme eine Größenordnung von 0,5.

Beim Vergleich der regionalen Standardverfahren mit dem Silvafixverfahren und einer Kontrolle zeigt sich ein uneinheitliches Bild (Abbildung 37). Im Hohen Fläming zeigte sich ein einheitlicher Trend einer Abnahme der Stickstoffzahl (Silvafix -0,6; Kontrolle -0,5, Streifenpflug -0,1) nach 2 Jahren. Hingegen wies die Kontrollparzelle im Hessischen Ried einen Anstieg von 0,4 und im Ostbraunschweigischen Flachland von 0,2 auf. Die mit dem Silverfixverfahren bearbeitete Fläche im Hessischen Ried zeigte einen Anstieg der Stickstoffzahl von 0,7 und im Ostbraunschweigischen Flachland eine Abnahme von 0,8.

3.3.3.1. Trockenmasse

Eine Betrachtung der Trockenmasseentwicklung der regionalen Standardverfahren über einen längeren Zeitraum erscheint vor dem Hintergrund einer zunehmenden Akkumulation von Biomasse in Bäumen, welche aufgrund ihrer Größe in einem Bereich außerhalb des Parametrisierungsbereiches von PhytoCalc liegen und nicht berücksichtigt werden können, fraglich. Daher wurde auf eine Darstellung verzichtet. Abbildung 38 zeigt die Entwicklung der Trockenmasse als Index in Abhängigkeit der Kontrolle vor und 2 Jahre nach Bodenbearbeitung für die Intensivflächen. In allen Fällen führten die Bodenbearbeitungsmaßnahmen zu einer deutlichen Reduzierung der Biomasse gegenüber der Kontrolle.

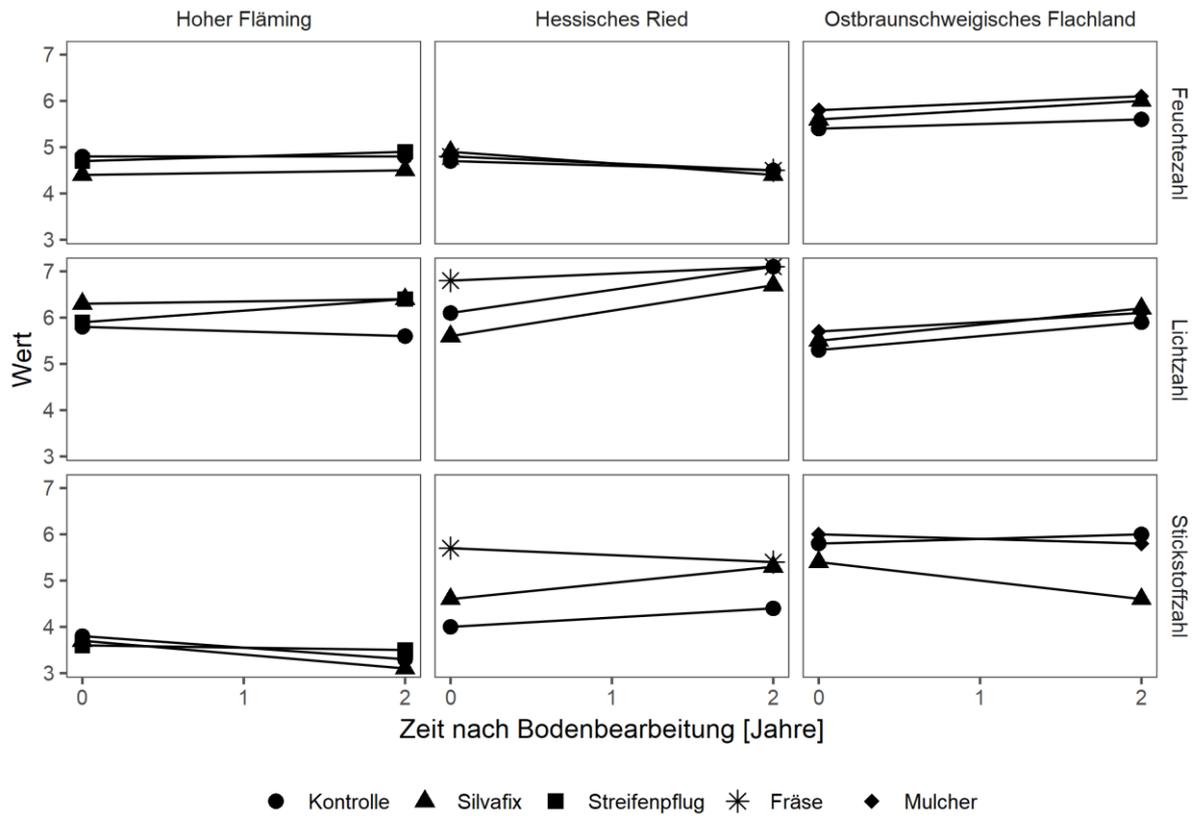


Abbildung 37: Entwicklung von Feuchte-, Licht- und Stickstoffzahl auf den Intensivflächen nach Regionen vor und 2 Jahre nach Bodenbearbeitung.

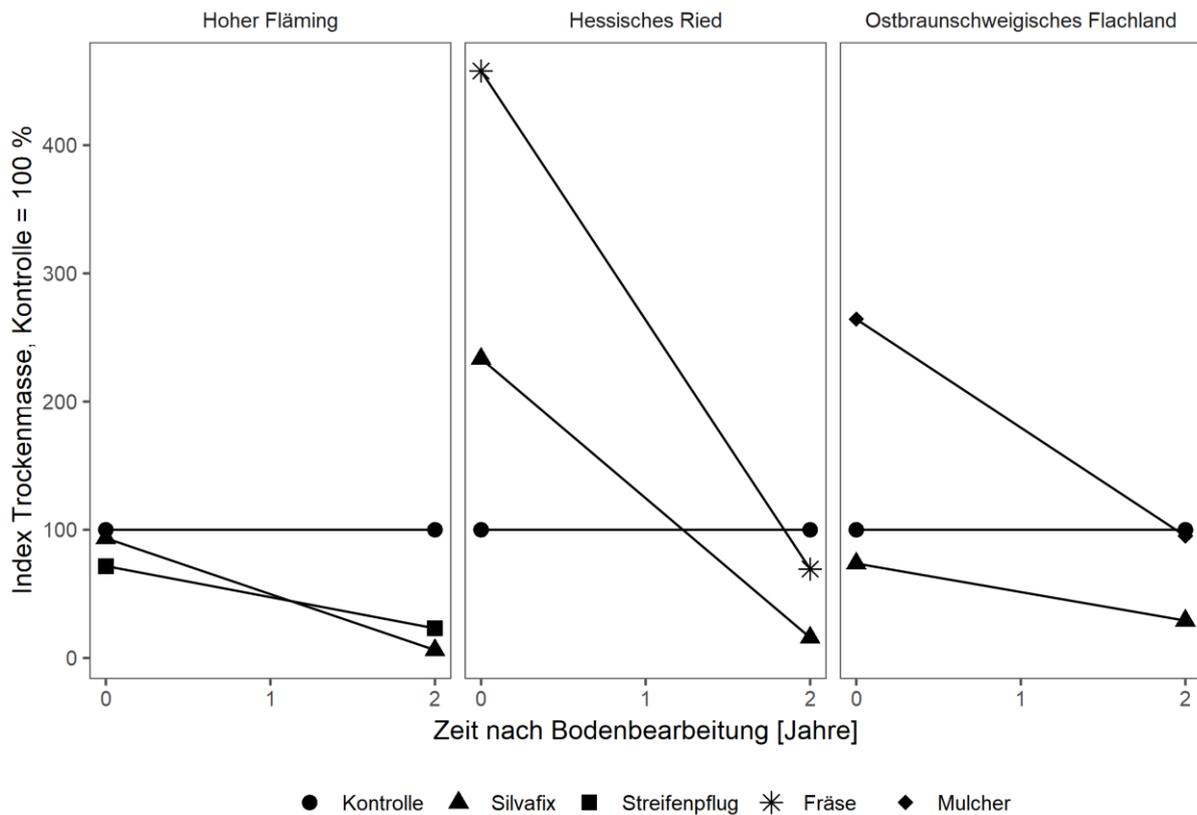


Abbildung 38: Entwicklung der Trockenmasse auf den Intensivflächen als Index der Kontrolle nach Regionen vor und 2 Jahre nach Bodenbearbeitung.

3.3.4. Diskussion

3.3.4.1. Artenanzahlen

Eine Abnahme der Artenanzahlen nach Bodenbearbeitungen lässt sich nicht bestätigen. Vielmehr nehmen die Artenanzahlen in den ersten Jahren nach der Bodenbearbeitung zu, um mit zunehmendem Bestandesschluss des Folgebestandes abzunehmen.

Auch andere Autoren konnten einen Anstieg der Artenzahlen nach Kahlhieb und eine Abnahme in den Folgejahren beobachten (AMMER 1996; HEINRICHS und SCHMIDT 2009; NYKVIST 1997). Hierbei wurde die Artenzunahme dem höheren Lichtangebot zugeschrieben und nahm mit Abnahme des Lichtangebots ab (AMMER 1996).

Eine Untersuchung der Entwicklung der Artenanzahlen in den anderen Schichten (Mooschicht oder Strauchschicht) erschien aufgrund fehlender oder nur geringer Arten Anzahlen nicht sinnvoll.

3.3.4.2. Feuchtezahl

Eine Zunahme der Feuchtezahl konnte hier nicht bestätigt werden. Allerdings kann eine Zunahme der Feuchtezahl aufgrund der trockenen Witterung auch nicht ausgeschlossen werden und erscheint aufgrund der Transpirationsminderung plausibel.

Der höhere Wert der Feuchtezahl im Ostbraunschweigischen Flachland ist gegenüber dem Hohen Fläming und dem Hessischen Ried auf die unterschiedliche Bodenart zurückzuführen. Tonige Schichten im Unterboden, wie im Ostbraunschweigischen Flachland, stellen einen natürlichen Staukörper dar und verzögern einen Abfluss überschüssigen Regenwassers in den Unterboden (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31). Hingegen versickert auf sandigen Böden das Wasser schnell und bei einem niedrigen Grundwasserstand, wie im Hohen Fläming und Hessischen Ried, auch in große Tiefen. Hierdurch sind die Flächen im Ostbraunschweigischen Flachland, bei etwa gleichen Niederschlägen in der Klimaperiode (vgl. Abbildung 2, Abbildung 7 und Abbildung 12), feuchter.

Eine mögliche Ursache für den Anstieg der Feuchte im Ostbraunschweigischen Flachland stellt die Bodenbearbeitung dar. Beim Mulchen wird die Fläche befahren und nur oberflächlich bearbeitet, wodurch es zu Bodenverdichtungen kommen kann und folglich das Niederschlagswasser gestaut wird (FREY und HARTMANN 2013; HILDEBRAND 1983; LENHARD 1986). Flächen mit einem hohen Schluffanteil gelten als verdichtungsempfindlich (HILDEBRAND 1983). Die Flächen im Hohen Fläming und Hessischen Ried zeigten hingegen keinen Anstieg der Feuchtezahl über die Zeit, trotz Befahrung. Dies kann zum einen an der Bodenart Sand liegen, welche als nicht verdichtungsempfindlich gilt, zum anderen an der unterschiedlichen Bodenbearbeitung, welche im Hohen Fläming ebenfalls nur oberflächlich wirkte, aber das Fräsen im Hessischen Ried bis in eine Tiefe von 30 cm den Boden lockerte und einer Verdichtung durch Befahrung entgegenwirkte.

Eine weitere Ursache für einen Anstieg der Feuchtezahl könnte die verminderte Transpiration auf der Fläche durch Ernte des Hauptbestandes und Ausschaltung der Begleitvegetation durch Mulchen sein. Dieser Effekt müsste in den Jahren unmittelbar nach der Bodenbearbeitung, bevor sich die Neukultur etabliert hat, am stärksten sein, lässt sich aus der Abbildung 37 aber nicht bestätigen und könnte durch die Trockenperiode während der Aufnahmen beeinflusst worden sein.

Da sowohl die Kontrolle, als auch das Silvafixverfahren, ähnlich dem jeweiligen regionalen Standardverfahren reagierten, scheinen die Unterschiede nicht durch die unterschiedlichen Bodenbearbeitungsverfahren hervorgerufen zu werden, sondern sind vielmehr auf die Standortunterschiede zurückzuführen. Vor dem Hintergrund der Bodenschädigung durch Befahrung, welche vom Wassergehalt des Bodens abhängt (ALLMAN et al. 2017) und der Trockenheit während der Bodenbearbeitung ist es möglich, dass es hier zu keinen Bodenverdichtungen gekommen war und somit kein Effekt zwischen den Verfahren beobachtet werden konnte. Aus den Ergebnissen der Trockenraumdichteanalyse sind keine verfahrensbedingten Verdichtungen ersichtlich.

Bei einem Vergleich der Auswirkung eines Kahlhiebs gegenüber einem intakten Bestand auf die Auswirkung der Feuchtezahl, hat sich die Feuchtezahl beim Kahlhieb erhöht (ČESONIENĚ et al.

2019). In dieser Untersuchung wurde durch die Gleichbehandlung des Hauptbestandes wurde die Bestandesschicht mit der größten Transpirationsleistung gleichmäßig reguliert, so dass durch die Gleichbehandlung möglicherweise kein Effekt unter den Behandlungen registriert werden konnte.

3.3.4.3. Lichtzahl

Die Ergebnisse zeigen, dass Bodenbearbeitungen, unabhängig vom Verfahren, zu einem Anstieg der Lichtzahl der Artenzusammensetzung führen und diese über die Zeit abnehmen.

Eine Abnahme der Lichtzahl über die Zeit konnten DÖLLE und SCHMIDT (2009) ebenfalls beobachten. Der Anstieg ist zum einen auf die Regulierung der Begleitvegetation zurückzuführen, zum anderen auf den Eingriff in den Hauptbestand. Der Einfluss dieser Eingriffe wird besonders bei der Betrachtung des Hohen Flämings deutlich. Da es sich hier um keine Freifläche handelte und der Hauptbestand lediglich gering aufgelichtet wurde, zeigte die Kontrolle im Vergleich zu den anderen Standorten keinen Anstieg. Hingegen zeigte die Kontrollparzelle im Ostbraunschweigischen Flachland einen moderaten Anstieg, welcher ohne Abschattung durch den angrenzenden Nachbarbestand vermutlich höher ausgefallen wäre. Die Kontrollparzelle im Hessischen Ried zeigte den größten Anstieg. Eine unterschiedliche Wirkung des Silverfixverfahrens gegenüber dem regionalen Standardverfahren konnte nicht beobachtet werden.

3.3.4.4. Stickstoffzahl

Es wurde vermutet, dass durch die Bodenbearbeitungen und dem Kahlhieb die Mineralisationsraten steigen und durch die erhöhte Stickstoffverfügbarkeit es zu einem Anstieg der Stickstoffzahl kommt. Diese Vermutung kann nicht bestätigt werden.

Die Abnahme der Stickstoffzahl erscheint vor den Ergebnissen eines Sukzessionsversuches über einen Beobachtungszeitraum von über 30 Jahren plausibel. Hier betrug die Abnahme im Zeigerwert eine Größenordnung von 0,5 in den ersten 10 Jahren, in den folgenden 20 Jahren blieb der Wert konstant (DÖLLE und SCHMIDT 2009).

3.3.4.5. Trockenmasse

Vor dem Hintergrund der Subjektivität der Deckungsgradschätzung und den unterschiedlichen Aufnahmeteams zwischen der Erst- und Zweitinventur wurde mittels einer Indexberechnung eine Objektivierung der Daten angestrebt. Gegenüber den regionalen Standardverfahren war das Silverfixverfahren lediglich im Hohen Fläming effektiver. Doch unter Einbeziehung der Tatsache, dass beim Einsatz des Streifenpfluges, im Gegensatz zum Silverfix, verfahrensbedingt nicht die gesamte Fläche bearbeitet wurde, stellt der Streifenpflug für die „Nettofläche“ der Bearbeitung das effektivere Verfahren dar. Die Hauptkonkurrenz zur Kultur bildete im Hohen Fläming das Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos* (L.) ROTH). Dieses wurde sowohl durch den Silverfix, als auch durch den Streifenpflug in der Phase der Etablierung für einen Kulturerfolg ausreichen reduziert. Das Hauptkulturhindernis stellte im Hessischen Ried das flächendeckende Vorkommen der Spätblühenden Traubenkirsche (*Prunus serotina* EHRH.) dar. Sowohl ein Einsatz des Silverfix, als auch Fräsen verminderten die Konkurrenz erheblich und steigerten den Kulturerfolg. Beim Silverfixverfahren verblieben zum Teil Stuken und Wurzeln auf der Fläche, welches zu Stockausschlägen von Spätblühender Traubenkirsche führte. Zudem wurde der Schlagabraum mit gezogenen Stuken und Wurzeln auf der Gasse abgelagert. Hier wuchsen die verbliebenen und abgelagerten Spätblühenden Traubenkirschen weiter, lehnten sich in die Kultur und werden in Zukunft neue Samenbäume auf der Rückegasse bilden. Somit scheint das Fräsverfahren gegenüber dem Silverfix, vor dem Hintergrund der Konkurrenzreduzierung, überlegen. Im Ostbraunschweigischen Flachland waren keine Arten so dominant, dass von ihnen eine Kulturgefährdung ausging. Dennoch zeigten auch hier Bodenbearbeitungsmaßnahmen eine Reduktion der Begleitvegetation, welche positiv auf die Kulturetablierung wirkte. NYKVIST (1997) konnte keinen signifikanten Unterschied in der Biomasse nach drei Vegetationsperioden feststellen. Hingegen zeigen PALVIAINEN et al. (2007) das 5 Jahre nach einer TTS-Bearbeitung sich noch keine gleichmäßige Vegetation eingestellt hat.

3.3.4.6. Methodendiskussion

Aufgrund lediglich eines Aufnahmeplots je Parzelle für Vegetationsaufnahmen ist eine Aussage für die Gesamtfläche mit Vorsicht zu genießen, da die Vegetation nicht homogen auf der Fläche verteilt war und sehr wahrscheinlich die Flächenheterogenität unvollständig erfasst wurde. Bei zukünftigen Studien dieser Art sollten, wie zum Beispiel beim Hiebsformenversuch im Solling, mehrere Vegetationsaufnahmeplots je Parzelle von geringerer Größe angelegt werden (HEINRICHS et al. 2010). Zur Beantwortung der Fragestellung, in wie weit die Bodenbearbeitungsverfahren eine Konkurrenzreduktion bewirken, wären auch Solariskopmessungen auf Höhe der Kultur denkbar. Dies hätte den Vorteil, dass der Zeitaufwand der Aufnahmen um ein Vielfaches verringert werden könnte. Darüber hinaus wären auch Aufnahmeverfahren, bei denen eine Beerntung durchgeführt wird, denkbar. Durch die Bodenbearbeitung wird auf den meisten Intensivflächen die Vegetation zerstört und auf den Extensivflächen findet lediglich eine einmalige Aufnahme statt. Hierdurch wäre ein genaueres Ergebnis, als durch Schätzung mit PhytoCalc, zu erwarten gewesen. Zudem wäre eine Kontrolle in einem unberührten Bestand ohne Veränderungen vorteilhaft gewesen, um den Einfluss der Extremjahre auf die Vegetationsentwicklung abzuschätzen.

3.4. Darstellung der Entwicklung von Eichenkulturen in den Projektregionen durch unechte Zeitreihen

3.4.1. Einleitung

Langzeitstudien über die Auswirkung der Bodenbearbeitung auf den Wuchs von Eichen fehlen für den deutschen Raum. Untersuchungen in Skandinavien und Nordamerika zeigen einen positiven Effekt der Begleitwuchsregulierung (DINGER und ROSE 2009; LÖF et al. 1998; MASON et al. 2007; NILSSON et al. 1996a; NILSSON und ALLEN 2003; ROSE und ROSNER 2005). Diese Ergebnisse sind aufgrund der klimatischen, standörtlichen und innerartlichen Abweichungen sowie der unterschiedlichen Eintragsituation aber auf hiesige Verhältnisse nicht direkt übertragbar. Bisherige Versuche in Deutschland zur Reaktion von Böden auf Bodenbearbeitungen waren vorwiegend auf Fragestellungen der Bodensanierung und Melioration fokussiert (SAUTER und MEIWES 1990).

Das Ziel der Untersuchung war, das Wachstum von Eichenkulturen in den Eichenanbauschwerpunkten im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA (Ostbraunschweigisches Flachland, Hoher Fläming und Hessisches Ried) zu analysieren und die langfristige Auswirkung von Bodenbearbeitungen herauszustellen. Praxisflächen (im Folgenden: Extensivflächen) mit Bodenbearbeitungen wurden mit Referenzflächen aus dem QuerCon-Projekt in unechten Zeitreihen verglichen. Unechte Zeitreihen eignen sich bei der Untersuchung langjähriger Fragestellungen, da sie in kurzer Zeit Ergebnisse durch Analyse von unterschiedlich alten Parallelobjekten liefern. „Die zeitliche Abfolge von Wiederholungsaufnahmen wird durch ein räumliches Nebeneinander einmaliger Aufnahmen ersetzt“ (GADOW 2003). Auf den Extensivflächen wurden zudem Schadensbonituren sowie Stamm- und Kronenausformungen bestimmt.

Die zu prüfenden Hypothesen waren (1.) das Wachstum der Eichen unterscheidet sich nicht zwischen den Regionen, (2.) aber die regional unterschiedlichen Bestandesbegründungs- und Bodenbearbeitungsverfahren der Extensivflächen unterscheiden sich in ihrem quantitativen (Höhe, Durchmesser) und (3.) qualitativen (Schäden, Kronen- und Stammform) Wachstum.

3.4.2. Methodik

3.4.2.1. Flächenauswahl

Neben den Extensivflächen des ABoNae-Projektes (Tabelle 19) in den Untersuchungsregionen, wurden zum Vergleich weitere Bestände aus dem QuerCon-Projekt (MÖLDER et al. 2019) der gleichen Regionen mit und ohne Bodenbearbeitung, zur Erweiterung der Datenbasis, einbezogen.

Tabelle 19: Übersicht der Extensivflächen des ABoNae-Projektes (die Anzahl der Eichen je Hektar bezieht sich auf den Aufnahmezeitpunkt in der Nichtvegetationszeit 2018/2019).

Bezeichnung	Alter	Begründungsart	Anz. Ei/ha
AN2	10	Saat	7.400
AN3	12	Saat	6.600
AN4	14	Saat	19.000
LAM2	6	Pflanzung, 2j. (30-50), 2 x 0,7	7.000
LAM3	9	Pflanzung, 2j. (50-80), 2 x 1	2.800
LAM4	13	Saat	12.200
WF2	8	Pflanzung, 2j. (50-80), 2 x 0,6	7.000
WF3	9	Pflanzung, 2j. (50-80), 2 x 0,6	6.000
WF4	11	Pflanzung, 2j. (50-80), 2 x 0,6	4.500

Im Ostbraunschweigischen Flachland wurden alle Bestände aus der QuerCon Datenbank des Forstamtes Wolfenbüttel hinzugezogen (Abbildung 39 in Verbindung mit Tabelle 20). Im Hohen Fläming wurden Bestände nord-östlich der Elbe bei Coswig (Anhalt) ausgewählt (Abbildung 40 in Verbindung mit Tabelle 21) und im Hessischen Ried die Bestände der QuerCon Datenbank in dieser Region (Abbildung 41 in Verbindung mit Tabelle 22).

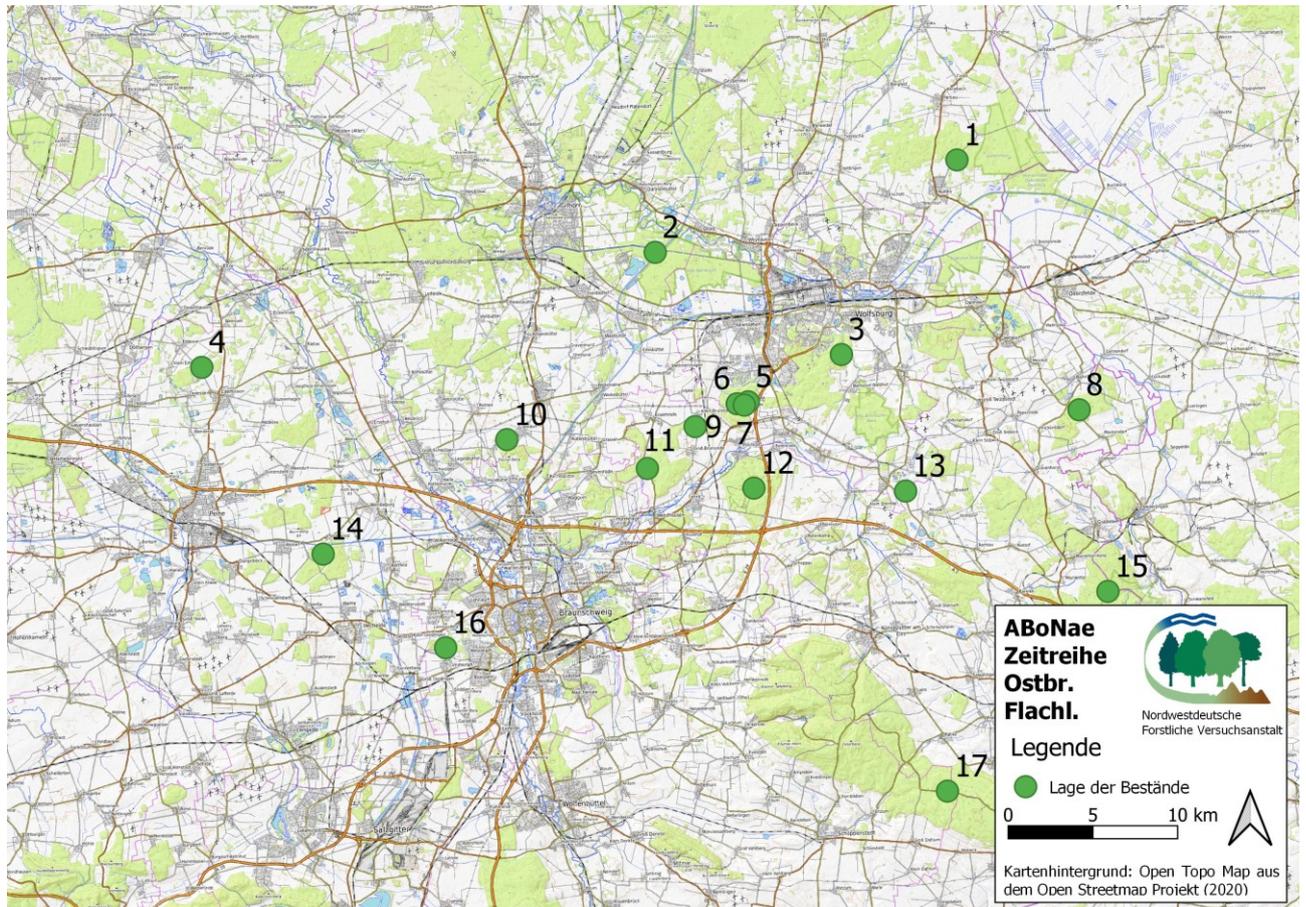


Abbildung 39: Bestände der unechten Zeitreihe im Ostbraunschweigischen Flachland. Bestände 5-7 entsprechen den Extensivflächen WF2 – WF4.

Tabelle 20: Weiterführende Informationen zu den hinzugezogenen Beständen des QuerCon-Projektes im Ostbraunschweigischen Flachland.

Bestand Karte	Alter	Begründungsart	Anz. Ei/ha	Zaun	Bodenbearbeitung
1	19	Pflanzung	7.142	ja	ja
2	17	Pflanzung	5.000	ja	nein
3	13	Pflanzung	11.111	ja	nein
4	14	Pflanzung	10.000	ja	ja
8	6	Saat		ja	nein
9	14	Pflanzung	8.333	ja	ja
10	13	Pflanzung	10.000	ja	ja
11	13	Pflanzung	8.333	ja	ja
12	14	Pflanzung	7.142	nein	ja
13	9	Pflanzung	10.000	ja	ja
14	10	Pflanzung	10.000	ja	ja
15	11	Pflanzung	5.000	ja	ja
16	11	Pflanzung	10.000	ja	ja
17	14	Pflanzung	6.666	ja	ja

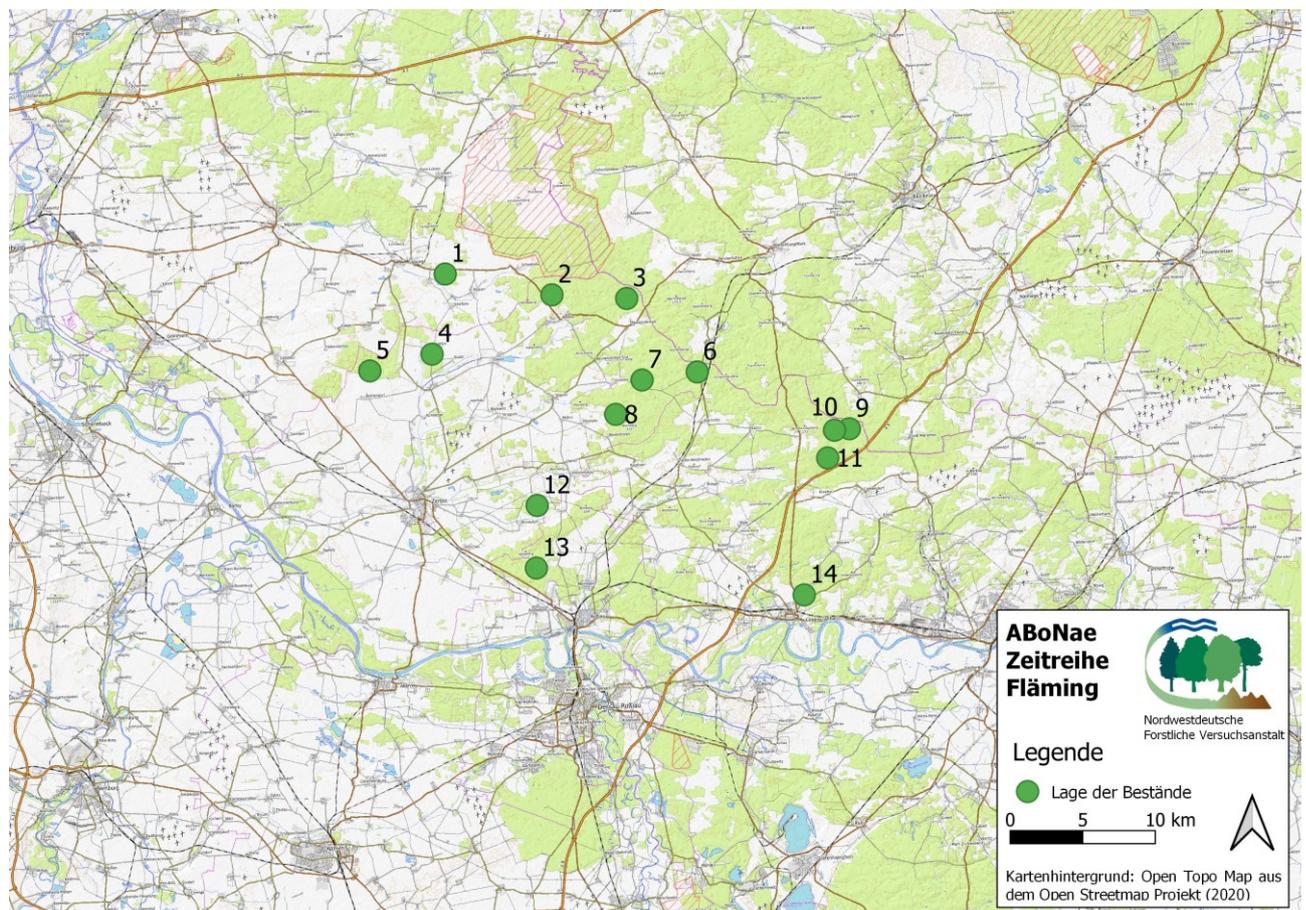


Abbildung 40: Bestände der unechten Zeitreihe im Fläming. Bestände 9-11 entsprechen den Extensivflächen AN2 – AN4.

Tabelle 21: Weiterführende Informationen zu den hinzugezogenen Beständen des QuerCon-Projektes im Fläming (NV = Naturverjüngung).

Bestand Karte	Alter	Begründungsart	Anz. Ei/ha	Zaun	Bodenbearbeitung
1	7	NV		nein	nein
2	15	Pflanzung	13.333	ja	ja
3	9	Pflanzung + NV	8.333	ja	nein
4	13	Pflanzung	6.250	ja	nein
5	10	Pflanzung	6.250	ja	ja
6	19	Pflanzung	8.333	ja	ja
7	12	Pflanzung	10.000	ja	ja
8	14	Pflanzung	6.250	ja	ja
12	16	Pflanzung	10.000	nein	nein
13	11	Pflanzung + NV	7.142	ja	ja
14	13	Pflanzung	10.000	ja	ja

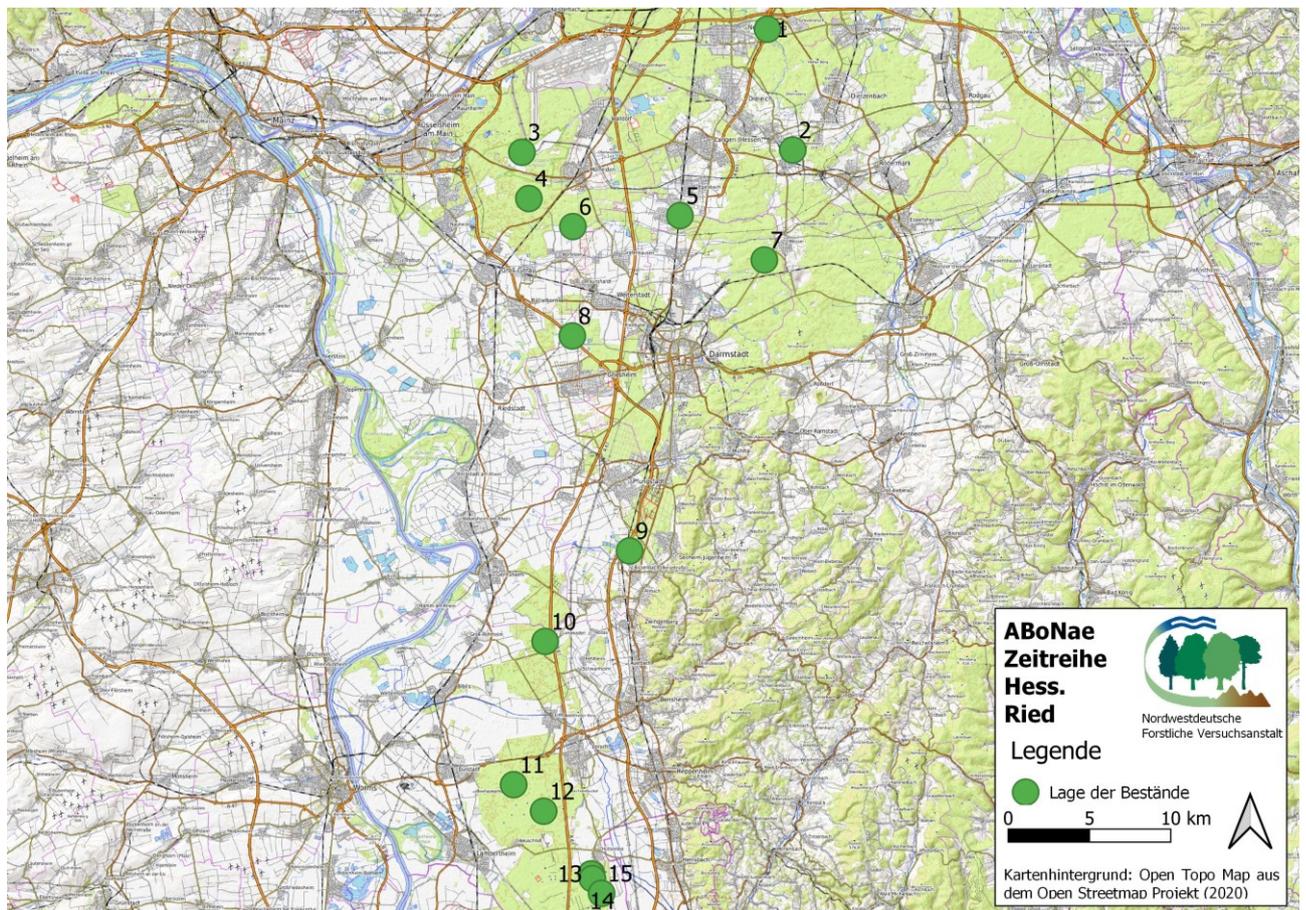


Abbildung 41: Bestände der unechten Zeitreihe im Hessischen Ried. Bestände 12-14 entsprechen den Extensivflächen LAM2 – LAM4.

Tabelle 22: Weiterführende Informationen zu den hinzugezogenen Beständen des QuerCon-Projektes im Hessischen Ried (NV = Naturverjüngung).

Bestand Karte	Alter	Begründungsart	Anz. Ei/ha	Zaun	Bodenbearbeitung
1	13	Pflanzung	8.000	ja	ja
2	20	Pflanzung		ja	nein
3	19	Pflanzung	4.000	ja	nein
4	18	Pflanzung		ja	nein
5	18	Pflanzung	10.000	ja	nein
6	13	Pflanzung	10.000	ja	ja
7	20	Pflanzung	6.250	ja	nein
8	20	Pflanzung	2.000	ja	nein
9	20	Pflanzung		ja	ja
10	18	Pflanzung		ja	nein
11	7	Pflanzung	10.000	ja	ja
15	6	Pflanzung + NV	8.333	ja	nein

3.4.2.2. Messungen und Qualitätsansprachen

Die Feldaufnahmen der Extensivflächen wurden im Winter 2018/2019 durchgeführt. Je nach Größe der Fläche und Dichte der Verjüngung wurden Vollaufnahmen oder reihenweise Stichproben erhoben. An den ausgewählten Bäumen wurden die Höhe (H) und der Wurzelhalsdurchmesser in 5 cm Höhe (WHD) gemessen. Zusätzlich erfolgte an den drei höchsten Bäumen innerhalb jeder Sektion von 5 m Reihenlänge eine Qualitätsansprache. Bei den Saaten wurde aufgrund der hohen Stammzahl in nur jedem zweiten 5 m-Abschnitt die Qualität bestimmt.

Für die Qualitätsbestimmung wurden die Kronen- und Stammausformungen angesprochen (verändert nach FISCHER 1998: S. 20). Bei der Kronenausformung wurde lediglich nach wipfelschäftig, steilastig und zwieselig unterschieden (Abbildung 42). Mehrfachzwiesel und buschige Kronenausformungen sind bei Ansprachen im herrschenden Kollektiv nicht zu erwarten und werden, falls sie doch auftreten, unter Zwiesel erfasst. Stammformen wurden an den gleichen Bäumen in gerade, bogig und knickig unterteilt (nach KINOWSKI (2010), Abbildung 42).

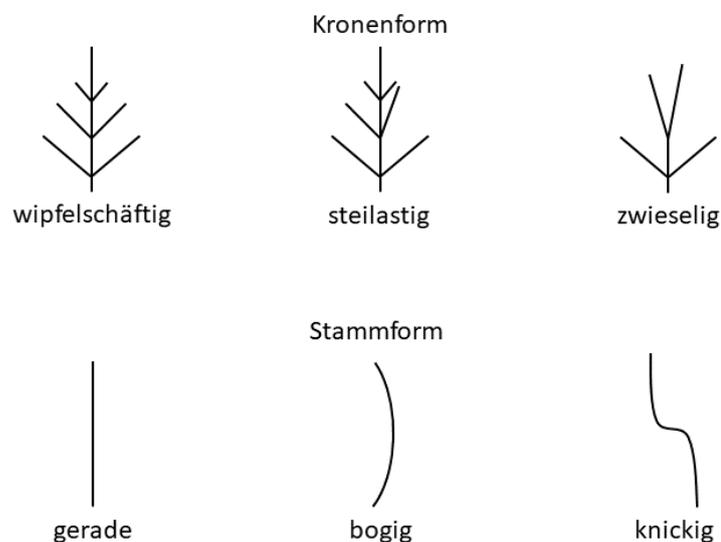


Abbildung 42: Ansprache der Kronen- und Stammformen, Abbildung verändert nach SAHA et al. (2012).

Schadensbonituren wurden an allen gemessenen Pflanzen, nach dem Schadschlüssel der Abt. Waldwachstum der NW-FVA, durchgeführt. Eine Pflanze wurde als tot angesprochen, wenn sie bei der Aufnahme physisch vorhanden aber bereits abgestorben war. Zudem wurde in Beständen mit bekanntem Ausgangspflanzverband (Pflanzungen) der Anteil an Pflanzen ohne Schäden zum Zeitpunkt der Aufnahme zum Ausgangspflanzverband errechnet.

Das Aufnahmeverfahren der Vergleichsbestände aus dem QuerCon-Projekt ist bei MÖLDER et al. (2019) beschrieben.

Die Ergebnisse der Qualitäts- und Schadensansprachen werden in Tabellenform präsentiert.

3.4.2.3. Statistik

3.4.2.3.1. Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Alter

In einem bayesianischen Ansatz wurde die Chapman-Richards Wachstumsfunktion für die Höhe in Abhängigkeit vom Alter der Extensivflächen im Vergleich mit den Vergleichsbeständen nach Regionen, mit oder ohne Bodenbearbeitung, angepasst. Für die Wahl der Chapman-Richards Wachstumsfunktion spricht der Verlauf durch den Punkt 0 cm Höhe und Alter 0 Jahre, welcher bei den hier besonders jungen Beständen als maßgeblich erscheint. Zudem sind die Funktionsparameter biologisch interpretierbar und die Funktion ist als forstliches Wachstumsmodell anerkannt (PIENAAR und TURNBULL 1973).

In der folgenden Chapman-Richards Wachstumsfunktion bezeichnet der Index i den Baum i in Gruppe $j = 1, 2, \dots, 9$ (9 Gruppen ergeben sich aus 3 Regionen mit 3 Extensivflächen, 3 Vergleichsbeständen mit Bodenbearbeitung und 3 Vergleichsbeständen ohne Bodenbearbeitung); aus dem Bestand $k = 1, 2, \dots, 46$:

$$E(\text{Höhe}_{i,j,k} | \text{Alter}_i) = a_{j,k} (1 - e^{-b_j \cdot \text{Alter}_i})^{c_j}, \text{ mit:}$$

$$a_{j,k} = \exp(2,85 + \beta_{0,a} + \gamma_{j,a} + \delta_{k,a}),$$

$$b_j = \exp(-2,47 + \beta_{0,b} + \gamma_{j,b}),$$

$$c_j = \exp(1,08 + \beta_{0,c} + \gamma_{j,c})$$

Unter Annahme einer Weibull-Verteilung wird der Shape-Parameter nach folgender Gleichung geschätzt:

$$\text{shape}_{i,j,k} = \exp(1 + \beta_{0,shape} + \beta_{\text{shape},c} \text{Alter}_i + \gamma_{j,shape} + \delta_{k,shape})$$

Die β -Parameter geben die Intercepts an, wobei $c \text{Alter}$ das um den Wert 10 Jahre zentrierte Alter bezeichnet. Die Einflüsse der Region und der Bodenbearbeitung bildet der γ -Parameter ab. Als Bestandesparameter geht δ in das Modell ein. Für die Gammparameter wird eine Normalverteilung mit $N(0; \sigma_\gamma)$ und für die Deltaparameter eine Normalverteilung mit $N(0, \sigma_\delta)$ angenommen.

Die Prioris wurden anhand der Höhe-Alter-Funktion von FISCHER (1998: S. 129) geschätzt. Prioris berücksichtigen Vorwissen und verbessern dadurch die Schätzung. Es wurden Prioris mit einem schwachen Informationsgehalt gewählt (Tabelle 23), denn Prioris mit einem schwachen Informationsgehalt gewähren eine flexible Anpassung des Modells (BANNER et al. 2020; LEMOINE 2019).

In die Datengrundlage des Modells wurden für Pflanzen der Extensivflächen nur welche ohne Schäden aufgenommen. Die Modellanpassung wurde mit dem R-Paket „brms“ (BÜRKNER 2018; BÜRKNER 2017; CARPENTER et al. 2017) vorgenommen.

In einem zweiten Schritt wurden die Zuwächse abgeleitet und für das 5 %-Quantil, den Erwartungswert und das 95 %-Quantil errechnet. Hieraus sind Auswirkungen der Behandlungsunterschiede auf vorwüchsige und unterständige Pflanzen erkennbar.

Tabelle 23: Priori-Verteilungen des Höhe-Alter-Modells.

Parameter	Priori-Verteilung
$\beta_{0,a}$	N (0; 0,5)
$\beta_{0,b}$	N (0; 0,5)
$\beta_{0,c}$	N (0; 0,5)
$\beta_{0,shape}$	N (0; 0,5)
$\beta_{shape,cAlter}$	N (0; 0,5)
σ_γ	N (0; 0,25)
σ_δ	N (0; 0,1)

3.4.2.3.2. Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Durchmesser

Eine Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Durchmesser konnte nur für die Extensivflächen durchgeführt werden, da in den Vergleichsbeständen keine Wurzelhalsdurchmesser (WHD) erhoben wurden. Aufgrund der Inhomogenität der Standräume zwischen den Beständen einer Region und der damit durch diesen Faktor einhergehenden starken Beeinflussung der Durchmesser, wurden die Beziehungen auf Bestandesebene errechnet. Hier zeigt sich der Nachteil einer unechten Zeitreihe gegenüber einer echten Zeitreihe. So liefern unechte Zeitreihen für die vorliegende Fragestellung lediglich unabhängige Alters-Höhenwerte (GADOW 2003). Aufgrund der jungen Alter liegen in manchen Beständen erst wenige Brusthöhendurchmesser vor. Daher wird mit dem WHD gerechnet. Wie bei der Höhenschätzung in Abhängigkeit vom Alter wird die Chapman-Richards Wachstumsfunktion in einem bayesianischen Modellansatz angepasst. Die Prioris sind ebenfalls nach FISCHER (1998: S. 134) geschätzt und schwach informativ gewählt. Eine Umrechnung auf WHD ist mittels einer Transformationsfunktion des BHD anhand der Messdaten erfolgt.

Folgender Modellaufbau wurde gebildet, mit der Indexbezeichnung i des Baumes i in Bestand $j = 1, 2, \dots, 9$ und der Region $k = 1, 2, 3$:

$$E(\text{Höhe}_{i,j,k} | WHD_i) = a_{j,k} (1 - e^{-b_j \cdot WHD_i})^{c_j}, \text{ mit:}$$

$$a_{j,k} = \exp(5,49 + \beta_{0,a} + \gamma_{j,a} + \delta_{k,a}),$$

$$b_j = \exp(-13,91 + \beta_{0,b} + \gamma_{j,b}),$$

$$c_j = \exp(-1,08 + \beta_{0,c} + \gamma_{j,c})$$

Der Shape-Parameter der Weibull-Verteilungsannahme wird nach folgender Gleichung geschätzt:

$$shape_{j,k} = \exp(1 + \beta_{0,shape} + \gamma_{j,shape} + \delta_{k,shape})$$

Die β -Parameter geben die Intercepts an. Den Bestandeseinfluss (Pflanzverband, Begründungsverfahren, etc.) bildet der γ -Parameter ab. Aufgrund der großen Distanzen zwischen den Regionen, und den damit einhergehenden großen Unterschieden (Klima, Standort, etc.), wird zusätzlich ein Regionsparameter δ geschätzt. Für die Gammaparameter wird eine Normalverteilung mit $N(0; \sigma_\gamma)$ und für die Deltaparameter eine Normalverteilung mit $N(0; \sigma_\delta)$ angenommen. Die Annahme dieser Normalverteilung entspricht dem in der herkömmlichen Inferenz-Statistik als Random Intercepts bezeichneten Zufallseffekten (EFRON und MORRIS 1977).

Die Annahmen für die Priori-Verteilungen sind in Tabelle 24 gegeben.

Tabelle 24: Priori-Verteilungen des Höhe-WHD-Modells.

Parameter	Priori-Verteilung
$\beta_{0,a}$	N (0; 0,5)
$\beta_{0,b}$	N (0; 0,5)
$\beta_{0,c}$	N (0; 0,5)
$\beta_{0,shape}$	N (0; 0,5)
σ_γ	N (0; 0,1)
σ_δ	N (0; 0,1)

3.4.3. Ergebnisse

3.4.3.1. Schadens- und Qualitätsansprache

Die Ergebnisse der Schadensansprache sind in Tabelle 25 nach Flächenzugehörigkeit angegeben. Die prozentualen Anteile sind auf die Gesamtanzahl der aufgefundenen Pflanzen bezogen. In der letzten Spalte sind die vorhandenen Pflanzen ohne Schäden in Relation zu den Ausgangspflanzverbänden gesetzt (s.a. Tabelle 19). Für Saatflächen konnte kein Rückschluss auf die Ausgangsdichten hergestellt werden und somit ist eine Berechnung des Anteils vorhandener und unbeschädigter Pflanzen zur Ausgangsdichte unterblieben. In Feldern ohne Eintrag gab es keine Beobachtungen. Felder mit dem Eintrag „Null“ repräsentieren wenige Beobachtungen, welche sich durch mathematisches Runden auf Ganzzahlen bedingen.

Tabelle 25: Flächenbezogene Auswertung der Schadensansprachen (Gesamt = Anzahl gezählter Pflanzen; HS = Hiebsschäden; FS = Freischneider; VB = Wildverbiss; OS = ohne Schäden; OSAP = ohne Schäden im Verhältnis zum Ausgangspflanzverband).

Fläche	Gesamt	HS [%]	FS [%]	Tot [%]	VB [%]	OS [%]	OSAP [%]
AN2	388	1			13	86	
AN3	469		1	0	1	99	
AN4	480			0		100	
LAM2	511		0			100	79
LAM3	356		1	4		95	56
LAM4	537			3	4	93	
WF2	589		5	11		85	83
WF3	463			1		99	71
WF4	388			1		99	51

Hiebsschäden wurden lediglich auf einer Parzelle im Fläming (AN2) in einem Umfang von 1 % beobachtet. In jungen und mittleren Beständen der Zeitreihe wurden Mähsschäden (FS) ausgemacht. Maximal wurden 5 % der Pflanzen geschädigt. Lediglich auf zwei Flächen wurden keine toten Pflanzen aufgefunden. Der Ausfall betrug 0 – 5 %, wobei auf der jüngsten Fläche im Ostbraunschweigischen Flachland (WF2) 11 % beobachtet wurden. Verbisssschäden durch Wild wurden trotz Zäunung verzeichnet. Auf der jüngsten im Gatter stehenden Fläche im Fläming (AN2) waren es 13 % und 1 % in der mittelalten Fläche AN3, ebenfalls gegattert. Auf der ältesten Fläche im Hessischen Ried (LAM4), welche nicht mehr gegattert ist, sind 4 % verbissen. Insgesamt weisen viele Flächen nur minimale Schädigungen von weniger als 10 % auf. Mit 14 % und 15 %

geschädigter Pflanzen liegen die jüngste Fläche im Fläming (AN2) und im Ostbraunschweigischen Flachland (WF2) darüber. Der Anteil lebender unbeschädigter Pflanzen vom Ausgangspflanzverband nimmt mit zunehmendem Alter ab und beträgt im Ostbraunschweigischen Flachland 51 %. Auch im Hessischen Ried nimmt die Pflanzenzahl ab.

Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse der Qualitätsansprachen. Die geringsten Anteile an wipfelschäftigen Pflanzen wiesen die Flächen im Hessischen Ried mit ca. 50 % auf. Steilastige und zwieselige Kronenausformungen lagen im Schnitt bei ca. 18 % und 33 %. Im Fläming und Ostbraunschweigischen Flachland lagen die Anteile mit wipfelschäftiger, steilastiger und zwieseliger Kronenausformung gleichauf mit 54 – 72 %, 5 -11 % und 19 – 37 %. Die Stammformen waren überwiegend gerade und erreichten im Ostbraunschweigischen Flachland mit 53 – 72 % die höchsten Anteile. Auf der mittleren Fläche im Hessischen Ried (LAM3) war der Anteil mit geraden Stammformen am geringsten (22 %). Hier herrschten bogige und knickige Stammformen vor. Bogige und knickige Stammformen nahmen im Fläming 36 – 49 % und 8 – 20 % ein und im Ostbraunschweigischen Flachland 17 – 31 % und 9 – 18 %.

Tabelle 26: Flächenbezogene Auswertung der Kronen- und Stammform.

Fläche	Gesamt	Kronenform			Stammform		
		wipfelschäftig [%]	steilastig [%]	zwieselig [%]	gerade [%]	bogig [%]	knickig [%]
AN2	102	57	7	36	47	42	11
AN3	121	66	7	27	44	36	20
AN4	75	70	11	19	43	49	8
LAM2	199	48	19	33	54	32	14
LAM3	192	49	18	33	22	43	35
LAM4	241	51	15	34	47	38	15
WF2	134	72	5	23	65	17	18
WF3	234	54	9	37	72	19	9
WF4	250	68	7	25	53	31	16

3.4.3.2. Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Alter

Die Abbildung 43 zeigt die „Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Alter“-Modelle nach Regionen, Bodenbearbeitungen und Datenquelle.

In keiner Region war das Höhenwachstum gegenüber einer anderen Region überlegen. Die QuerCon-Daten der Bodenbearbeitung zeigten insgesamt ein größeres Höhenwachstum nach Regionen als die Bodenbearbeitungen aus dem ABoNae-Projekt (oberste Zeile). Bis auf das Hessische Ried galt dies ebenfalls im Vergleich mit den unbearbeiteten Flächen aus dem QuerCon-Projekt. Einzig im Höhenwachstum deutlich unterlegen war die Region Fläming (AN) aus dem ABoNae-Projekt.

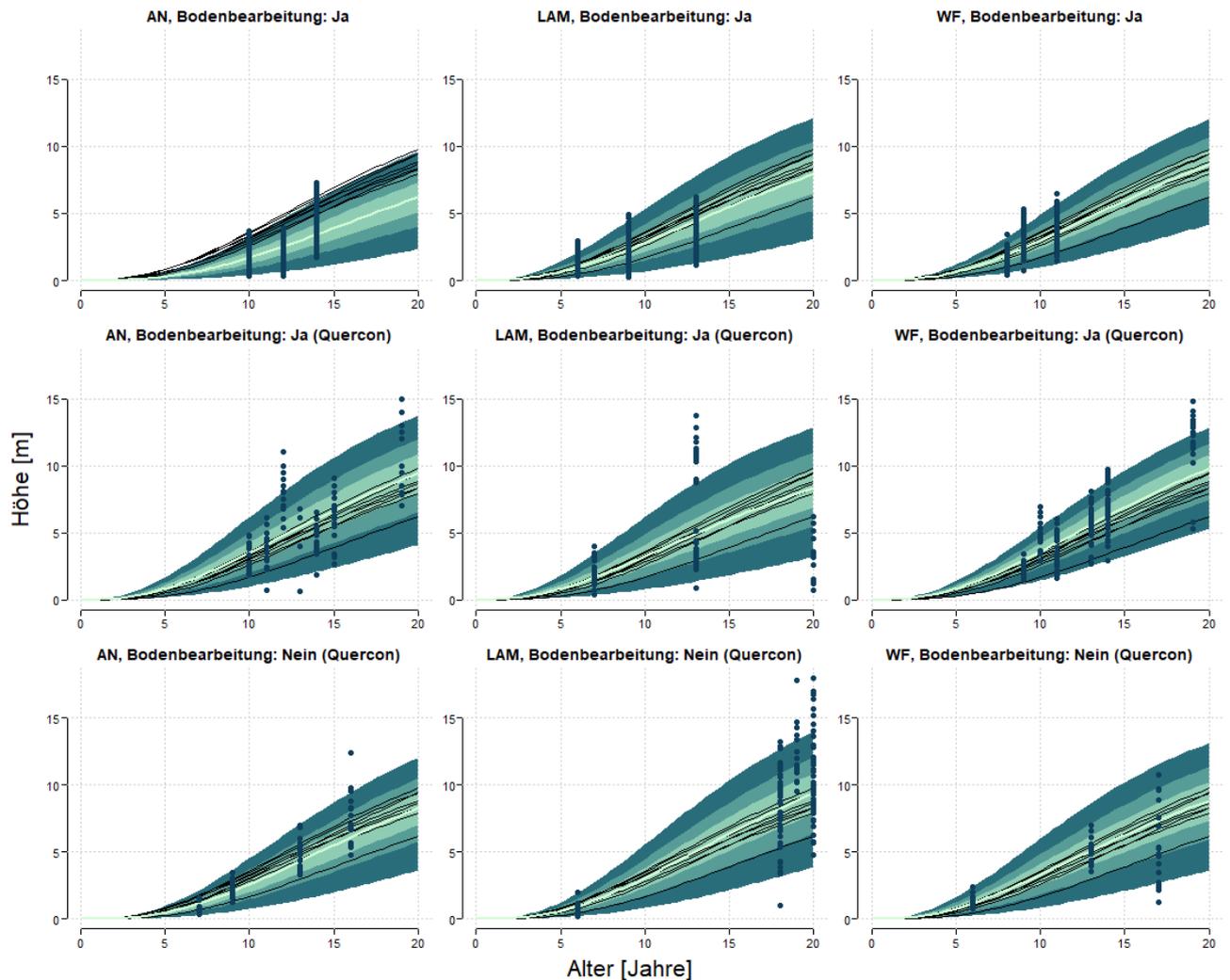


Abbildung 43: Höhe-Alter-Modelle im Vergleich nach Regionen, Bodenbearbeitung und Datenquelle (Punkte = Messdaten. In Abstufung von der hellen Linie zur dunklen Fläche: Erwartungswert, 50 %-Quantil, 80 %-Quantil, 98 %-Quantil; schwarze Linien zeigen die Erwartungswerte der mit abgebildeten Plots als Vergleich).

In der Tabelle 27 werden die Funktionen für die Erwartungswerte der Abbildung 43 wiedergegeben.

Tabelle 27: Funktionen der Erwartungswerte in Abhängigkeit des Alters für die Bestände der Abbildung 43.

Fläche	Funktion des Erwartungswertes
AN, Bodenbearbeitung: Ja	$13.268 * (1 - \exp(-\exp(-2,501) * WHD))^{3,621}$
AN, Bodenbearbeitung: Ja (Quercon)	$15,841 * (1 - \exp(-\exp(-2,39) * WHD))^{3,002}$
AN, Bodenbearbeitung: Nein (Quercon)	$15,591 * (1 - \exp(-\exp(-2,433) * WHD))^{3,428}$
LAM, Bodenbearbeitung: Ja	$13,844 * (1 - \exp(-\exp(-2,433) * WHD))^{3,001}$
LAM, Bodenbearbeitung: Ja (Quercon)	$13,724 * (1 - \exp(-\exp(-2,395) * WHD))^{2,828}$
LAM, Bodenbearbeitung: Nein (Quercon)	$17,029 * (1 - \exp(-\exp(-2,405) * WHD))^{3,352}$
WF, Bodenbearbeitung: Ja	$15,255 * (1 - \exp(-\exp(-2,419) * WHD))^{3,172}$
WF, Bodenbearbeitung: Ja (Quercon)	$16,482 * (1 - \exp(-\exp(-2,389) * WHD))^{3,063}$
WF, Bodenbearbeitung: Nein (Quercon)	$14,843 * (1 - \exp(-\exp(-2,404) * WHD))^{2,938}$

Abbildung 44 stellt die jährlichen Höhenzuwächse des 5 %-Quantils, des Erwartungswertes und des 95 %-Quantils dar. Die 95 %-Quantile aller Beobachtungsflächen wiesen während der gesamten Beobachtungsdauer die größten Höhenzuwächse auf und das 5 %-Quantil die niedrigsten. Hingegen kulminierte das Höhenwachstum des 95 %-Quantils früher als das Höhenwachstum des 5 %-Quantils. Die Individuen der 95 %-Quantile zeigten von Beginn an ein stärkeres Höhenwachstum. In der Region des Ostbraunschweigischen Flachlands (WF) wirkte sich die Bodenbearbeitung positiv auf die Pflanzen des 5 %-Quantils aus. Für die Pflanzen des 95 %-Quantils schient die Bodenbearbeitung keinen Effekt zu haben. Im Fläming (AN) zeigte beim Vergleich der Bearbeitungsvarianten aus den Quercon-Daten die Variante mit Bodenbearbeitung einen Vorteil. Aus den Daten des ABoNae-Projektes war ersichtlich, dass die Pflanzen des 5 %-Quantils von der Bodenbearbeitung stärker profitierten als die des 95 %-Quantils im Vergleich mit den Quercon-Daten der Region. Für das Hessische Ried (LAM) zeigten die Varianten mit Bodenbearbeitung in den Altern unter 5 Jahren ein besseres Höhenwachstum als die Varianten ohne Bodenbearbeitung.

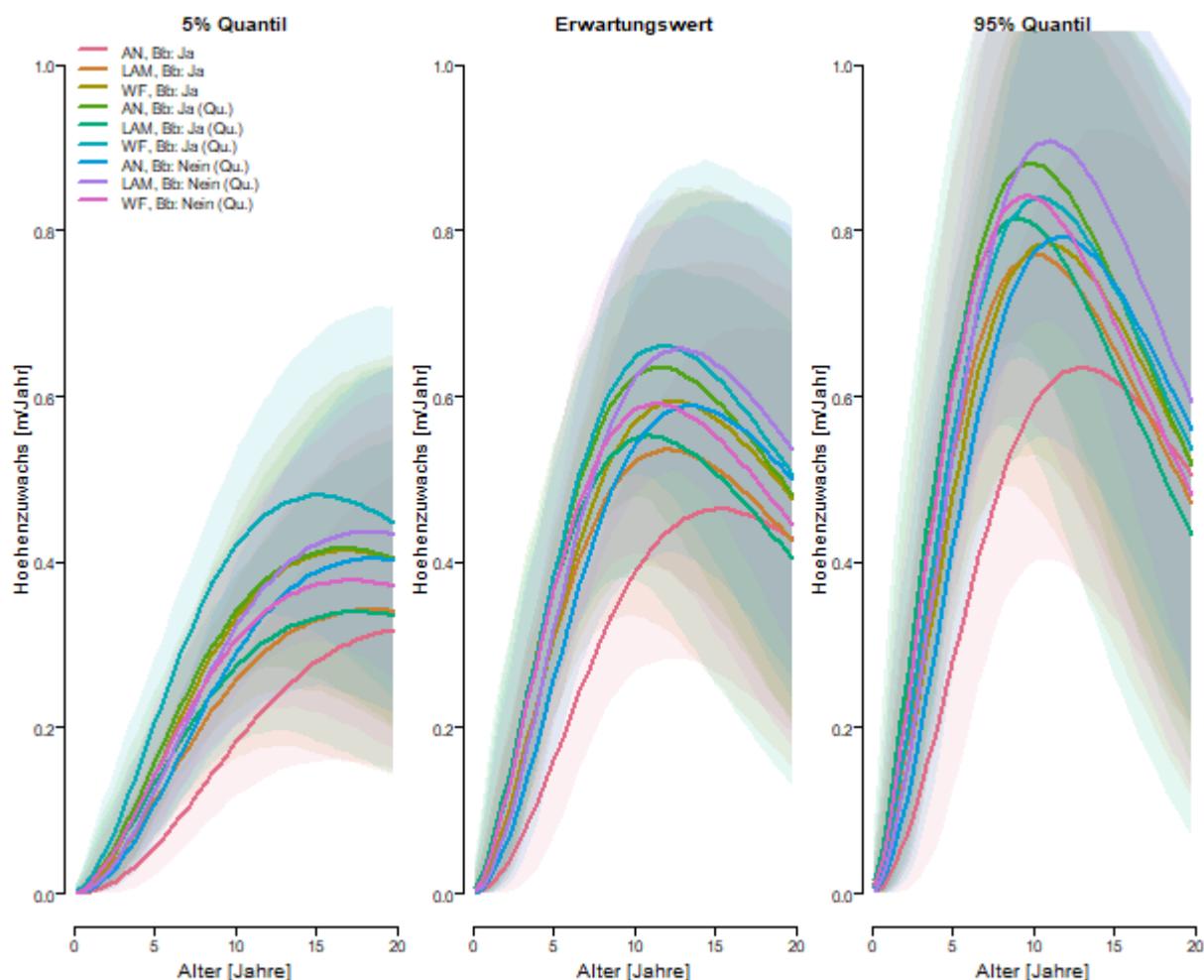


Abbildung 44: Jährliche Höhenzuwächse des 5 %-Quantils, des Erwartungswertes und des 95 %-Quantils. Schattierungen entsprechen dem jeweiligen 95 %-Kreditintervall.

3.4.3.3. Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Durchmesser

Abbildung 45 zeigt die Modellanpassungen nach Beständen. In der Abbildung werden die Erwartungswerte der Bestände als helle Linie dargestellt und in Tabelle 28 sind die zugehörigen Funktionen der Erwartungswertschätzung gegeben. AN2 und AN4 zeigten die höchsten Erwartungswerte der Höhen in Abhängigkeit vom WHD bei der größten Varianz. Die Fläche AN3 war hingegen deutlich zurückgeblieben. Ein Vergleich der Flächen LAM2 – LAM4 zeigte ein ähnliches Wachstum für die Flächen LAM2 und LAM3 mit einem geringeren Höhenzuwachs. Hingegen zeigte die Fläche LAM4 einen stärkeren Höhenzuwachs. Die Flächen WF2 – WF4 wiesen die geringsten Streuungen auf. Am geringsten von allen Flächen war das erwartete Höhenwachstum auf der Fläche WF2. Auf den Flächen WF3 und WF4 war das Wachstum im Vergleich ähnlich.

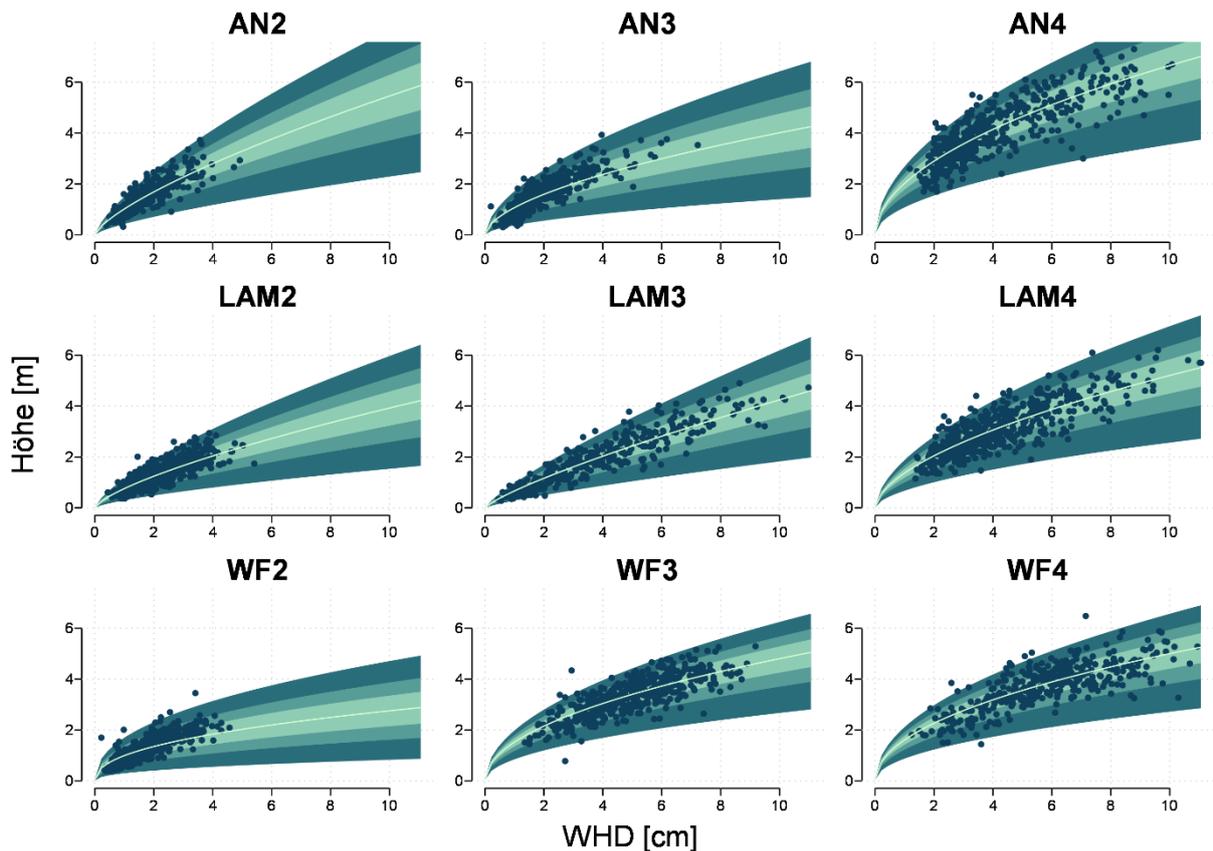


Abbildung 45: WHD-Höhen-Modelle nach Beständen. (Punkte = Messdaten. In Abstufung von der hellen Linie zur dunklen Fläche: Erwartungswert, 50 %-Quantil, 80 %-Quantil, 98 %-Quantil).

Tabelle 28: Funktionen der Erwartungswerte in Abhängigkeit des WHD für die Bestände der Abbildung 45.

Fläche	Funktion des Erwartungswertes
Gesamtmodell	$1085,79 * (1 - \exp(-\exp(-12,1) * \text{WHD}))^{0,578}$
AN2	$6298,6 * (1 - \exp(-\exp(-12,005) * \text{WHD}))^{0,728}$
AN3	$1106,93 * (1 - \exp(-\exp(-12,117) * \text{WHD}))^{0,573}$
AN4	$1043,06 * (1 - \exp(-\exp(-12,119) * \text{WHD}))^{0,516}$
LAM2	$4084,87 * (1 - \exp(-\exp(-12,06) * \text{WHD}))^{0,713}$
LAM3	$10081,28 * (1 - \exp(-\exp(-11,986) * \text{WHD}))^{0,804}$
LAM4	$1517,26 * (1 - \exp(-\exp(-12,12) * \text{WHD}))^{0,579}$
WF2	$214,7 * (1 - \exp(-\exp(-12,154) * \text{WHD}))^{0,442}$
WF3	$626,4 * (1 - \exp(-\exp(-12,104) * \text{WHD}))^{0,498}$
WF4	$613,88 * (1 - \exp(-\exp(-12,107) * \text{WHD}))^{0,492}$

3.4.4. Diskussion

3.4.4.1. Schadens- und Qualitätsansprache

Ein Zusammenhang zwischen der Pflanzenqualität und der Bestandesdichte war nicht eindeutig erkennbar. Die höchsten Anteile wipfelschäftiger Kronen wiesen die Flächen AN4 und WF2 auf. Aufgrund des Dichtstandes der Fläche AN4 war dies zu erwarten, da allgemein die Annahme vertreten wird, dass ein Dichtstand bessere Qualitäten hervorbringt (BEHRNDT 1979; KLEINSCHMIT et al. 1978; KNOCKE 2016). Dies galt hingegen nicht für die Fläche WF2. Die Fläche mit der zweithöchsten Eichendichte war die Fläche LAM4. In dieser lag der Anteil wipfelschäftiger Eichen

lediglich bei 51 %. Im Bereich um 50 % lagen alle Flächen im Hessischen Ried. Bei der Fläche LAM3 mit der geringsten Pflanzendichte wurde dies auch erwartet. Die Anteile zwieseliger Kronenausformungen stimmen mit den Angaben anderer Autoren gut überein (KINOWSKI 2010; MANDERSCHIED 1984; MOSANDL et al. 1988; SCHAPER 1978; SPELLMANN und BADERSCHNEIDER 1988). MANDERSCHIED (1984), KLEINSCHMIT et al. (1978) und KNOCKE (2016) konnten einen geringeren Anteil an zwieseligen Stammformen mit zunehmenden Pflanzdichten bestätigen. Andere Autoren konnten keinen Einfluss des Pflanzverbandes auf die Ausprägung von Kronenausformungen, wie z. B. Zwieselbildung, nachweisen (KINOWSKI 2010; SPELLMANN und BADERSCHNEIDER 1988; WALLRAF und WAGNER 2019). SCHAPER (1978) konnte eine Abnahme der Anteile zwieseliger Ausformungen über das Alter nachweisen. In etwa 10-jährigen Beständen betrug der Anteil maximal 31 %, in jüngeren Beständen im Maximum bei über 50 % und bei den Beständen über 20 Jahre bei maximal 2,5 %. In einer Untersuchung zur Entwicklung von Ackererstaufforstungen mit Eiche konnte die Beobachtung verifiziert werden (FISCHER 1998).

Ähnlich heterogen stellte sich das Bild bei der Stammausformung dar. Hier wies die Fläche mit der höchsten Eichendichte einen hohen Anteil bogiger Schäfte auf. Dies ließ sich dadurch erklären, dass die Pflanzen aufgrund der hohen Konkurrenz in der Reihe in die Reihenzwischenräume wachsen, um den Raum am besten auszunutzen, ähnlich wie bei Nesterpflanzungen, bei denen die äußersten Pflanzen die größten Anteile krummer Schafformen aufwiesen (GUERICKE et al. 2008; LEDER 2007). MOSANDL et al. (1988) konnten in dichten Beständen ebenfalls viele Pflanzen mit Schaftkrümmungen beobachten. Sie begründen dies mit der Lichtwendigkeit der Eiche. MANDERSCHIED (1984) konnte für diesen Effekt bei Saaten keinen signifikanten Zusammenhang herstellen. Er ermittelte lediglich einen Anteil bogiger Stämme von 9 %. KINOWSKI (2010) gibt in seiner Untersuchung die Anteile bogiger Stammausprägungen mit 30 % und die der knickigen mit 20 % an, welches sich mit den Ergebnissen dieser Untersuchung deckt. Somit besteht die Vermutung, dass andere Faktoren, wie z. B. genetische Veranlagungen, eine größere Bedeutung für die Qualität hatten, als die unterschiedlichen Standorte, Bestandesvorbereitungen und Bestandesbegründungsverfahren. Dementsprechend widersprüchlich sind auch die Angaben in der Literatur. SPELLMANN und BADERSCHNEIDER (1988), STRUCK (1999) und WALLRAF und WAGNER (2019) konnten keinen Zusammenhang zwischen dem Pflanzverband und der Stammausformung ableiten. In ihrer Untersuchung geben SPELLMANN und BADERSCHNEIDER (1988) für etwas mehr als die Hälfte der Pflanzen eine gerade Stammform an und für ein Drittel eine knickige. SCHAPER (1978) gibt den Anteil gekrümmter Stämme mit 17 – 49 % an. KLEINSCHMIT et al. (1978) konnten hingegen einen positiven Effekt eines geringeren Standraumes auf die Stammform von Eichenheisterpflanzungen zeigen. Dies stimmt mit unserer Untersuchung überein, bei der die Fläche LAM3 mit dem weitesten Standraum die deutlich schlechtesten Stammformen zeigte.

Durch eine hohe Konkurrenz von Weichlaubebäumen wird die Qualität von Eichenkulturen nicht in Mitleidenschaft gezogen (AMMER und DINGEL 1997; LÜPKE 1991). Bei gleichzeitig hohem Pflegeaufwand konnte gezeigt werden, dass durch die Integration von Weichlaubebäumen aus Naturverjüngung weder die Qualität, noch die Wuchsleistung von weiten Pflanzverbänden denen enger Pflanzverbänden unterlegen ist (ANDRZEJCZYK et al. 2015). Hingegen geben SAHA et al. (2014) eine gleiche Qualitätsentwicklung bei intraspezifischer oder interspezifischer Konkurrenz an. WALLRAF und WAGNER (2019) konnten keinen Einfluss von interspezifischer Konkurrenz auf die Häufigkeit von Zwieselbildungen nachweisen.

3.4.4.2. Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Alter

Der größte Kritikpunkt an der Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Alter war die geringe Anzahl an Beständen, welche in die Untersuchung einbezogen wurden. Aufgrund dessen lagen Fälle vor, in denen die Verteilung der Bestände über das Alter sehr inhomogen war. Bei den Flächen aus dem ABoNae-Projekt wiesen die Bestände überwiegend mittlere Alter auf (Abbildung 43; obere Zeile), es fehlten jüngere bzw. ältere Bestände. Ein anderes Extrem stellte die Gruppe der Bestände im Hessischen Ried aus dem QuerCon-Projekt ohne Bodenbearbeitung dar (Abbildung 43; mittlere Grafik untere Zeile). Neben einem sehr jungen Bestand gingen nur alte Bestände in das Modell ein.

Für Bereiche, in denen keine Bestände vorlagen, wies das Modell eine größere Unsicherheit auf, da hier eine Parametrisierung fehlte.

Erklärbar ist die Unterlegenheit des Höhenwachstums in der Region Fläming auf den Flächen aus dem ABoNae-Projekt (Abbildung 43, linke Grafik obere Zeile) durch die Art der Bestandesbegründung. Dies war die einzige Gruppe, in der ausschließlich Saat als Bestandesbegründungsverfahren Anwendung fand. Durch Anzucht der Baumschulpflanzen in gedüngten Beeten und unter Bewässerung, werden bei Pflanzungen kräftigere Pflanzen ausgebracht, welche in Folge, trotz Pflanzchock, einen Konkurrenzvorteil aufgrund ihrer Größe gegenüber Saaten besitzen. Ähnlich verhielt es sich bei den Beständen aus dem ABoNae-Projekt für die Region Hessisches Ried (Abbildung 43; mittlere Grafik obere Zeile). Im Bereich der jungen Bestände lag der Erwartungswert des Höhenwachstums mit den anderen gleich auf. In den höheren Altern war es den anderen unterlegen. Dies ist plausibel, da im hohen Alter ein Bestand aus Saat als Bestandesbegründungsverfahren hinterlegt war und in den jungen Altern Bestände aus Pflanzung. Hieraus wird die gute Anpassung des Modells an die Daten ersichtlich und zeigt, dass Saaten gegenüber Pflanzungen in jungen Jahren im Höhenwachstum zurück bleiben. Für das Alter 20 gibt FISCHER (1998) eine Höhe von etwa 10 m an. Diese Höhe erreichten nur wenige der Behandlungen. Für ein Alter von 14 Jahren geben SPELLMANN und BADERSCHNEIDER (1988) durchschnittliche Höhen von 4,01 – 5,43 m an. Dieser Rahmen wurde von den Saaten in der Abbildung 43 (linke Grafik obere Zeile) unterschritten. Die übrigen Varianten streuen um die obere Höhenangabe und entsprachen im Alter von 20 Jahren der Mittelhöhe der Ertragstafel für Eiche (I. Ertragsklasse) bei starker Durchforstung (SCHÖBER 1995).

Die Beobachtung von SWAIM et al. (2016), dass Pflanzen mit einem anfänglich größeren Höhenwachstum zu einem späteren Zeitpunkt noch immer die höchsten Pflanzen sind, bestätigte der Vergleich des jährlichen Höhenzuwachses des unteren 5 %-Quantils mit dem oberen 95 %-Quantil (Abbildung 44). MÖLDER et al. (2019) und SWAIM et al. (2016) kommen zu dem Schluss, dass der Standort nicht geeignet ist, die Wuchsunterschiede zu erklären, hingegen aber die Bodenbearbeitungen. Bei genauerer Betrachtung der Abbildung 44 zeigt sich, beim Außenvorlassen der Saaten im Fläming der ABoNae-Flächen, dass bei den Varianten mit Bodenbearbeitung das Wachstum in jungen Jahren denen der Varianten ohne Bodenbearbeitung überlegen war. Mit zunehmendem Alter zeigten die 95 %-Quantile ohne Bodenbearbeitung keine Wuchsunterlegenheit gegenüber den Beständen mit Bodenbearbeitung. Hingegen zeigten die 5 %-Quantile ohne Bodenbearbeitung, im Vergleich zu denen mit Bodenbearbeitung, einen schlechteren Höhenzuwachs. Hieraus lässt sich ableiten, dass eine Bodenbearbeitung ein homogeneres Aufwachsen der Bestände ermöglichte. Dies wurde durch Konkurrenzminimierung von Begleitvegetation oder Homogenisierung der Pflanz-/Saatplätze erreicht. Generell wird ein gleichmäßiges Aufwachsen der Kultur als Grundvoraussetzung für das Erziehen wertholzhaltiger Eichenbestände, angestrebt, welches durch geeignete Bodenbearbeitung gefördert werden kann (BEHRNDT 1968). NOPP et al. (1998) konnten keine Wuchsunterlegenheit in Beständen ohne Bodenbearbeitung feststellen, hingegen ließ die Qualität zu wünschen übrig.

3.4.4.3. Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Durchmesser

Die Schätzung der Höhe in Abhängigkeit vom Durchmesser zeigt ein differenziertes Bild. Bei Saaten war das Höhenwachstum im Verhältnis zum Durchmesserwachstum stärker ausgeprägt. Dies ist auf die höheren Pflanzenzahlen je Hektar zum Aufnahmezeitpunkt mit ca. 19.000 und 12.200 für die Flächen AN4 und LAM4 zurückzuführen. Auf der Fläche AN2 war die Anzahl an Eichen mit 7.400 je Hektar deutlich geringer, jedoch war sehr viel Kiefern timerverjüngung vorhanden, welche nicht aufgenommen wurde. Eine eindeutige Erklärung des Wuchsunterschiedes auf der Fläche AN3 von den anderen Saaten ist nicht möglich. Zwar war die Pflanzenzahl mit ca. 6.600 zum Aufnahmezeitpunkt noch geringer, doch konnte man zum Aufnahmezeitpunkt die Reste einer starken Kulturpfl egemaßnahme sehen, die keine Begleitbaumarten übrig gelassen hatte. Somit hat entweder die Konkurrenz durch die Begleitbäume zu einer Wuchsdepression geführt (AMMER und DINGEL 1997), oder nach der Pfl egemaßnahme konnten die Pflanzen den größeren Standraum direkt nutzen und wiesen ein verstärktes Dickenwachstum auf.

Besonders auffällig war das Wachstum auf der Fläche LAM3. Mit 2 x 1 m war der Ausgangspflanzverband im Vergleich mit den anderen Flächen am weitesten. Zudem waren die Ausfälle sehr hoch. Zum Aufnahmezeitpunkt waren ca. 2.800 Pflanzen je Hektar vorhanden. Durch die geringe Pflanzendichte wiesen die Pflanzen besonders in den unteren Höhen stärkere Durchmesser auf. In den größeren Höhen näherte sich das Wuchsverhalten dem der anderen Bestände an. Da in diesen Bereichen Bestandesschluss herrschte, war dies ein Anzeichen für eine Änderung des Wuchsverhaltens bei steigender Konkurrenz.

Ein verändertes Wuchsverhalten bei fehlendem Bestandesschluss erklärt das Wachstum auf den Flächen LAM2 und WF2, welche mit einer hohen Ausgangspflanzenzahl begründet wurden und zum Aufnahmezeitpunkt einen guten Pflegezustand aufwiesen, aber noch keinen Bestandesschluss erreicht hatten.

Unter Betrachtung der Varianzen war die Selbstdifferenzierung bei den Saaten größer als bei den Pflanzungen. Dies zeigt sich an der größeren Streuung. Zurückzuführen ist dieser Effekt zum einen auf einen höheren Selektionsdruck durch höhere Pflanzenzahlen bei der Saat, zum anderen auf homogenere Ausgangspflanzen bei Pflanzungen durch das Sortieren in den Baumschulen.

Die Höhenvarianzen oberhalb des Erwartungswertes wiesen eine geringere Streuung auf als unterhalb des Erwartungswertes. Eine Interpretationsmöglichkeit ist das geringere Vorkommen vorwüchsiger Pflanzen im Vergleich zum vermehrten Vorkommen unterständiger Pflanzen.

Ein regionaler Effekt der Umwelteinflüsse auf das Wuchsverhalten lässt sich nicht quantifizieren. Eher resultierten die regionalen Unterschiede aus den abweichenden Bestandesbegründungsverfahren, Herkünften und Pflegeintensitäten je Fläche. Dies bestätigt das Ergebnis von MÖLDER et al. (2019), welche keinen Regionseffekt in einer großräumigen Untersuchung von Eichenverjüngungen belegen konnten.

Im Allgemeinen ist ein geringerer Einfluss des Pflanzenstandraumes auf die Höhenentwicklung zu erwarten als auf die Durchmesserentwicklung (LÜPKE 1991). STRUCK (1999) konnte in seiner Arbeit einen alleinigen Einfluss der Pflanzendichte auf den Durchmesser zeigen. Andere Autoren konnten sowohl eine Steigerung des Höhenwachstums mit zunehmender Pflanzendichte (SPELLMANN und BADERSCHNEIDER 1988), als auch eine Depression des Höhenwachstums bei zu hohen Pflanzendichten nachweisen (AMMER und DINGEL 1997). Nach Auswertung eines Nelderversuchs, bei dem extrem dichte und weite Verbände mit einbezogen werden, konnten UHL et al. (2015) beweisen, dass sowohl weite als auch sehr enge Verbände zu einem reduzierten Höhenwachstum führen. Dem widerspricht das Ergebnis dieser Untersuchung nicht.

Statt einer einzelbestandesweisen Betrachtung der Höhe-Durchmesserbeziehung, sollte eine unechte Zeitreihe, analog zum Vorgehen bei WALLRAF und WAGNER (2019), entwickelt werden. Dies ist hier nicht gelungen, da keine unabhängigen Beobachtungen vorlagen. WALLRAF und WAGNER (2019) konnten das Problem der abhängigen Beobachtungen durch Korrekturen anhand Konkurrenzindizes beheben. Dies erschien aus Gründen von nicht reproduzierbaren Konkurrenzsituationen vor Pflegemaßnahmen, welche wenige Jahre vor der Aufnahme durchgeführt wurden, hier nicht sinnvoll. Alternativ besteht die Möglichkeit, echte Zeitreihen aus Stammscheibenanalysen zu generieren (STRUCK 1999). Dies ist für Untersuchungen mit wenigen Beständen und dem Ziel einer Wachstumsanalyse eine geeignete Methode und sollte für ähnliche Projekte zukünftig in Betracht gezogen werden.

3.4.5. Fazit

Unter Einbeziehung von Daten aus dem QuerCon-Projekt konnte die Hypothese 1 bestätigt werden. Trotz der großen räumlichen und standörtlichen Differenz zeigen die Bestände im regionalen Vergleich in ihrem Jugendwachstum keine Unterschiede. Hingegen konnte auf lokaler Ebene ein Einfluss der Bestandesbegründung und Bodenbearbeitung auf quantitative Wachstumsparameter ausgemacht werden. Somit ist die Hypothese 2 ebenfalls bestätigt. Dies zeigt die Bedeutung der Verantwortungsträger vor Ort für das Gelingen von Kulturen und deren Wuchssteuerung. Durch unterschiedliche Verfahren der Bestandesbegründung (Saat/Pflanzung) und Bodenbearbeitung liegt

die Vermutung nahe, dass der Unterschied durch das Bestandesbegründungsverfahren hervorgerufen wird und nicht durch eine abweichende Bodenbearbeitung, denn die Pflanzvarianten liegen in ihrem Wuchs gleich auf. Zur eindeutigen Herausstellung des Einflusses der Bodenbearbeitung auf die Entwicklung von Eichenkulturen sind weitere Feldversuche erforderlich, bei denen direkte Ursache-Wirkung Zusammenhänge abgeleitet werden können. Die Hypothese 3 konnte nicht bestätigt werden. Durch verschiedene Bodenbearbeitungen und Pflegemaßnahmen waren keine Unterschiede in den Qualitäten der Eichen zu verzeichnen.

3.5. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Entwicklung neu angelegter Eichenkulturen

3.5.1. Einleitung

Generell steigern Bodenbearbeitungen den Kulturerfolg bei Eiche (MÖLDER et al. 2019). Dies ist im Überwiegenden auf eine Verbesserung des Wärmehaushalts (WALLERTZ und MALMQVIST 2013), der Bodenfeuchte (LÖF et al. 1998; ÖRLANDER et al. 1998) und durch eine daraus resultierende verbesserte Nährstoffverfügbarkeit durch erhöhte Mineralisationsraten zurückzuführen (LUNDMARK-THELIN und JOHANSSON 1997). Darüber hinaus wird die Konkurrenz durch Begleitwuchs reduziert (LÖF und BIRKEDAL 2009) und die Überlebenswahrscheinlichkeit gesteigert (HANSSEN et al. 2003; LÖF et al. 2006; ÖRLANDER et al. 1998). Zudem wird durch die Bodenbearbeitung der Boden gelockert, wodurch die Pflanzen eine geringere Energie aufbringen müssen, um in den Boden einzudringen. Dieses verbessert die Wurzelentwicklung (DASSOT und COLLET 2021) und führt zu erhöhten Wuchsraten nach Bodenbearbeitungen (HALLSBY und ÖRLANDER 2004; LÖF et al. 1998; NORDBORG et al. 2006; SIKSTRÖM et al. 2020). Jandl et al. (2007) konnten in ihrem Review zeigen, dass Kohlenstoff-Verluste, hervorgerufen durch Bodenbearbeitung, eine Kompensation durch ein erhöhtes Wachstum infolge der Bodenbearbeitung erfahren. Weitere Reviews kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass Bodenbearbeitungen die Pflanzenentwicklung fördern (LÖF et al. 2012; SUTTON 1993). Darüber hinaus können Bodenbearbeitungen einen negativen Effekt auf biologische Schadorganismen ausüben (SIKSTRÖM et al. 2020; VILLALOBOS et al. 2020; WALLERTZ et al. 2018).

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen von Bodenbearbeitungen auf das Wuchsverhalten (Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserentwicklung (WHD)) und die Überlebensraten von neu begründeten Eichenkulturen analysiert.

3.5.2. Material und Methoden

3.5.2.1. Ausgangspflanzmaterial

3.5.2.1.1. Hessisches Ried

Bei der Versuchsanlage konnte auf ein Spektrum von sechs Herkünften unterschiedlicher Sortimente (Tabelle 29) zurückgegriffen werden, welche in einem Verband von 2 x 0,5 m mittels Erdbohrer gepflanzt wurden. Für Wurzel- und Sprossanalysen des Ausgangsmaterials wurden je Herkunft 30 Pflanzen zufällig ausgewählt, beprobt (Abbildung 46) und das Wurzel/Spross-Verhältnis errechnet (Abbildung 47). Während des Beobachtungszeitraumes wurden fünf Pflegemaßnahmen auf der Kontrollparzelle durchgeführt, da ansonsten ein Totalausfall durch die Stockausschläge der Spätblühenden Traubeneiche zu befürchten war. Auf der Silvafix- und der Fräsparzelle wurden lediglich einmal, im zweiten Standjahr, auf Teilflächen die überwiegend aus Gras- und Amerikanischer Kermesbeere (*Phytolacca americana* [L.]) bestehende Begleitvegetation zurückgeschnitten.

Tabelle 29: Übersicht der gepflanzten Herkünfte im Hessischen Ried (TEi = Traubeneiche, SEi = Stieleiche)

Name	Art	Sortiment
Fulda	TEi	1+0 15-30
Nidda	TEi	2+0 30-50
Spessart	TEi	2+0 30-50
Karben	TEi	1+2 30-50 +
Dieburg	SEi	1+0 15-30
Wolfgang	SEi	2+0 50-80 ++

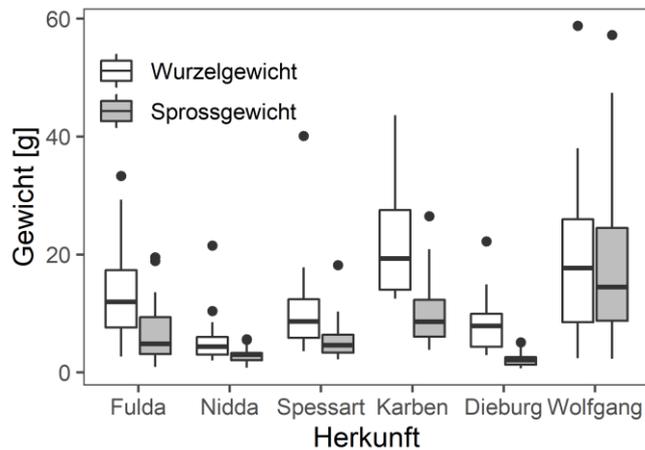


Abbildung 46: Boxplots der Wurzel- und Sprossgewichte des Ausgangspflanzmaterials im Hessischen Ried nach Herkünften.

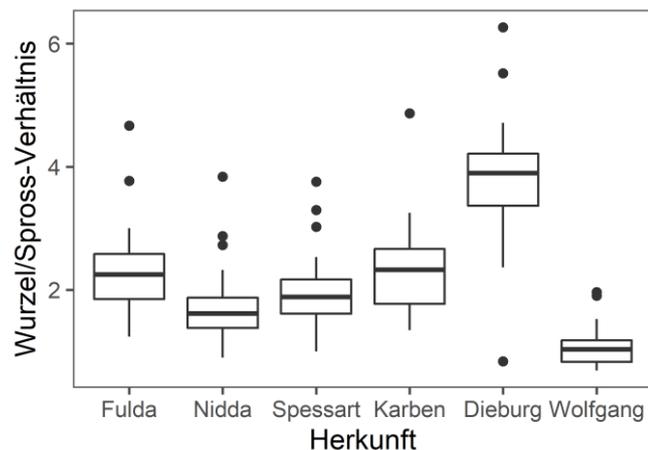


Abbildung 47: Boxplots der Wurzel/Spross-Verhältnisse der Sortimente im Hessischen Ried.

3.5.2.1.2. Ostbraunschweigisches Flachland

Im Ostbraunschweigischen Flachland wurde eine zweijährige Stieleiche (*Quercus robur* [L.] des Sortimentes 2+0 50-80 in einem Verband von 2 x 0,6 m mit dem Göttinger Fahrradlenker gepflanzt. Das mittlere Wurzel- und Sprossgewicht des Pflanzgutes betrug 13,0 g und 10,3 g, woraus sich ein Wurzel/Spross-Verhältnis von 1,3 errechnet. Ein Pflegedurchgang wurde im Sommer 2021 vor der letzten Aufnahme durchgeführt.

3.5.2.1.3. Hoher Fläming

Bei der Kultur im Hohen Fläming handelte es sich um eine Traubeneichen-Saat (*Quercus petraea* [(MATTUSCHKA) LIEBL.]) unter einem 90-jährigen Kiefernreinbestand, welcher zuvor auf einen Bestockungsgrad von 0,5 aufgelichtet worden war. Es wurden Eicheln mit einer Saatmenge von 120 kg/ha Nettosaatfläche ausgebracht. Die Eicheln stammten aus einem Saatgutbestand der Försterei. Der Boden war vollständig mit Moosen, Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos* [(L.) ROTH]) und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus* [L.]) bedeckt, so dass bei der Kontrollvariante mit einer Hacke der Mineralboden auf einem schmalen Streifen von 10 cm breite freigelegt wurde, in den die Eicheln gesät wurden.

3.5.2.2. Aufnahmen

Im Ostbraunschweigischen Flachland und im Hessischen Ried wurden nach der Pflanzung systematisch in den inneren Reihen (jede dritte Pflanze) Probebäume markiert. An den Probebäumen wurden nach der Pflanzung, sowie nach den Vegetationsperioden 2019, 2020 und 2021, die Höhe und der Wurzelhalsdurchmesser (in einer Höhe von 5 cm über dem Boden) gemessen. Des Weiteren fand eine Schadansprache statt.

Aufgrund des Vorkommens des Waldmaikäfers (*Melontha hippocastani* [FABRICIUS]) im Hessischen Ried waren Schädigungen der Kultur durch Wurzelfraß der Engerlinge aufgetreten. Damit der Einfluss der Engerlinge auf den Versuch abgeschätzt werden konnte, wurde im Mai 2021 eine Engerlinggrabung auf der Versuchsfläche in einem systematischen Raster mit zwölf Grabungspunkten je Parzelle durchgeführt.

Im Hohen Fläming wurden Vollaufnahmen auf jedem zehnten Meter durchgeführt. Dabei wurden nach den Vegetationsperioden 2019, 2020 und 2021 alle Höhen gemessen und ggf. die Schäden bestimmt, zusätzlich erfolgte die Messung der Wurzelhalsdurchmesser nach den Vegetationsperioden 2020 und 2021.

3.5.2.3. Statistische Auswertungen

Aufgrund regionaler Unterschiede, sowie unterschiedlicher Sortimente, Herkünfte und Bestandesbegründungsverfahren, erschien eine Auswertung regionenübergreifend nicht zielführend. Folglich wurde jede Region gesondert betrachtet.

Vor dem Hintergrund einer geänderten Populationsgröße durch Mähschäden war eine statistische Auswertung der Überlebenswahrscheinlichkeiten nicht möglich, da ein Mähschaden nicht einem Pflanzenausfall gleichkommt. Daher werden die Ergebnisse der Schadansprachen deskriptiv präsentiert.

Für jede Region wurden bayesianische Regressionsmodelle der Höhen- und Durchmesserentwicklung unter Verwendung des Zusatzpaketes *brms* (BÜRKNER 2018; BÜRKNER 2017) (Version 2.6.1) für die Statistiksoftware R (R CORE TEAM 2021) (Version 4.1.0) auf einer Linux-gnu x86_64 Plattform berechnet. *brms* bietet eine Schnittstelle zwischen der Statistiksoftware R und *Stan* (CARPENTER et al. 2017), einer probabilistischen Programmiersprache zur Spezifikation statistischer Modelle. Ein in *Stan* geschriebenes Programm definiert eine Wahrscheinlichkeitsfunktion über Parameter – bedingt auf Daten und weitere anwendungsrelevante Informationen – eines statistischen Modells. *Stan* bietet vollständige bayesianische Inferenz für diese Parameter durch Sampling-basierte Markov-Ketten-Monte-Carlo-Methoden. Die Datenaufbereitungen und Darstellungen wurden mit dem *tidyverse* Paket (WICKHAM et al. 2019) und der Erweiterung *ggthemes* (ARNOLD 2021) ausgeführt. Das Arrangement der Abbildungen wurde mit dem *gridExtra* Paket (AUGUIE 2017) umgesetzt.

Da Höhen und Wurzelhalsdurchmesser bei jungen Bäume positive Messwerte mit gleichzeitig bedeutsamer Variabilität im Bereich Nahe eines allometrischen Minimalwertes von 0 ergeben, ist die Annahme einer bedingten Normalverteilung an die Messungen kein valides statistisches Modell. Folglich werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen genutzt, welche nur im positiven Wertebereich definiert sind. Hierbei schied die Lognormalverteilung aus, da sie biologischen Grundlagen bei Integration in einer Wachstumsfunktion widerspricht (da $\exp(0) = 1$, ist ein Verlauf des bedingten Erwartungswertes von Höhe oder Durchmesser durch den Wert 0 im Alter 0 nicht möglich). Ein Vergleich der Gamma- und Weibullverteilung zeigte in vier von sechs Fällen eine bessere Anpassung der Weibullverteilung an die Daten. Aus Gründen der einheitlichen Interpretation der Modelle werden immer die Ergebnisse der Weibullverteilung berichtet. Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Wahl der Verteilung ergab hier keine relevante Differenz in den Ergebnissen bezüglich der inhaltlich relevanten Modellparameter, wenn mit der Weibullverteilung anstatt mit der Gammaverteilung gerechnet wurde.

3.5.2.3.1. Höhenwachstumsmodell Hessisches Ried

Die Höhe (in cm) Y_i , $i = 1, \dots, n$, wird im Hessischen Ried als Weibull-verteilte Zielvariable mit Lageparameter $scale_i$ und Formparameter $shape_i$ modelliert: $Y_i \sim \text{Weibull}(scale_i, shape_i)$. Für den bedingten Erwartungswert gilt: $\mu_i = E(Y_i|x_i)$, hierbei stellt Y_i die Zielvariable in Abhängigkeit der Modellparameter x_i dar.

Es besteht hier der folgende Zusammenhang zwischen dem bedingten Erwartungswert und den beiden Verteilungsparametern $scale_i$ und $shape_i$:

$$\mu_i = scale_i \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{shape_i}\right),$$

wobei $\Gamma(0)$ die Gammafunktion bezeichnet.

Für ein inhaltlich direkter zu interpretierendes Ergebnis parametrisiert *brms* die Weibull-Verteilung direkt auf μ_i . Um die Positivität dieses bedingten Erwartungswertes einzuhalten, wird dieser dabei mit der Log-Link Funktion an den linearen Prädiktor geknüpft. Der lineare Prädiktor selbst ist aus den Haupteffekten, Zweifach- und Dreifachinteraktionen zweier kategorialer Variablen (Bodenbearbeitungsvariante $V \in \{1, 2, 3\}$ und Herkunft $H \in \{1, \dots, 6\}$) und einer stetig skalierten Variable (Aufnahmezeitpunkt $Z \in \{1, 2, 3, 4\}$) nach folgender Additionsformel aufgebaut:

$$\begin{aligned}
 \exp(\mu_i) = & \beta_{\mu,0} & + & \beta_{\mu,V2} \cdot (V_i = V2) & + & \beta_{\mu,V3} \cdot (V_i = V3) \\
 & + & & \beta_{\mu,H2} \cdot (H_i = H2) & + & \beta_{\mu,H3} \cdot (H_i = H3) & + \dots \\
 & + & & \beta_{\mu,H2,V2} \cdot (H_i = H2) \cdot (V_i = V2) & + & \dots \\
 & + & \beta_{\mu,Z} \cdot Z_i & + & \beta_{\mu,V2,Z} \cdot (V_i = V2) \cdot Z_i & + & \dots \\
 & + & & \beta_{\mu,H2,Z} \cdot (H_i = H2) \cdot Z_i & + & \dots \\
 & + & & \beta_{\mu,H2,V2,Z} \cdot (H_i = H2) \cdot (V_i = V2) \cdot Z_i & + & \dots \\
 & + & \gamma_{\mu,1} \cdot (B = B1) & + & \gamma_{\mu,2} \cdot (B = B2) & + & \dots
 \end{aligned}$$

mit dem Intercept $\beta_{\mu,0}$ (steht für Bearbeitungsvariante „Kontrolle“, Herkunft „Fulda“ und Aufnahmezeitpunkt 0), Verschiebungen des Intercepts für die jeweilige Bearbeitungsvariante $\beta_{\mu,V2} \cdot (V_i = V2)$ und Herkunft $\beta_{\mu,H2} \cdot (H_i = H2)$, sowie Verschiebungen des Intercepts der Kombination aus Bearbeitungsvariante und Herkunft $\beta_{\mu,H2,V2} \cdot (H_i = H2) \cdot (V_i = V2)$.

Führen die in der obigen Beschreibung des linearen Prädiktors – notationell durch (... = ...) dargestellten – Indikatorfunktionen zu einer wahren Aussage, so resultiert die jeweilige Indikatorfunktion im Wert 1; der jeweilige Modellterm beeinflusst den bedingten Erwartungswert. Führt die Bedingung hingegen zu einer falschen Aussage, dann resultiert die Indikatorfunktion im Wert 0; durch Multiplikation wird der betroffene Modellterm gleich dem Wert 0 und verändert dadurch nicht den bedingten Erwartungswert.

Für den Aufnahmezeitpunkt Z_i aus der Bearbeitungsvariante „Kontrolle“ und der Herkunft „Fulda“ wird der bedingte Erwartungswert μ_i durch das Produkt aus Steigungsparameter und Aufnahmezeitpunkt, also um $\beta_{\mu,Z} \cdot Z_i$, additiv verschoben. Zusätzlich werden Steigungsparameter für Bearbeitungsvariante und Zeit $\beta_{\mu,V2,Z} \cdot (V_i = V2) \cdot Z_i$, Herkunft und Zeit $\beta_{\mu,H2,Z} \cdot (H_i = H2) \cdot Z_i$, sowie Herkunft, Bearbeitungsvariante und Zeit $\beta_{\mu,H2,V2,Z} \cdot (H_i = H2) \cdot (V_i = V2) \cdot Z_i$ berechnet. Da sich die Probebäume über mehrere Aufnahmen in ihren Höhen-Niveaus unterscheiden, werden diese zeitkonstanten Unterschiede mittels probebaumspezifischer Verschiebungen des Intercepts berücksichtigt und durch den Term $\gamma_{\mu,1} \cdot (B = B1)$ für jeden Probebaum von 1, ..., m (m ist Anzahl der Probebäume) berechnet.

Analog zur Höhenschätzung wurde die Schätzung des Wurzelhalsdurchmessers durchgeführt. Es wurden schwach informative Priori (BANNER et al. 2020; LEMOINE 2019) gewählt (Tabelle 30). Eine Prüfung der Priori ergab keine sensitive Beeinflussung des Modellergebnisses im Vergleich zu einer flachen Priori.

Tabelle 30: Priori der Parameter für die Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung im Hessischen Ried.

Parameter	Höhenschätzung	WHD-Schätzung
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; 3,7; 2,5)	<i>Student</i> (3; 2,1; 2,5)
$\beta_{\mu,V}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,H}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,Z}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,H,V}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,H,Z}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V,Z}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,H,V,Z}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\gamma_{\mu,m}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
<i>shape</i>	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)

3.5.2.3.2. Höhenwachstumsmodell Ostbraunschweigisches Flachland

Analog zum Höhenwachstumsmodell für das Hessische Ried wurde die Höhe (in cm) Y_i , $i = 1, \dots, n$, im Ostbraunschweigischen Flachland als Weibull-verteilte Zielvariable mit Lageparameter $scale_i$ und Formparameter $shape_i$ modelliert: $Y_i \sim Weibull(scale_i, shape_i)$.

Alle Probestämme waren gleicher Herkunft. Dementsprechend vereinfachte sich die Modellierung des Höhenwachstums im Vergleich zur Modellierung im Hessischen Ried, da die Variable Herkunft entfiel. Der lineare Prädiktor für den bedingten Erwartungswert μ_i wurde über eine Log-Link Funktion aus der kategorialen Variable Bodenbearbeitungsvariante $V \in \{1, 2, 3\}$ und der stetigen Variable Aufnahmezeitpunkt $Z \in \{1, 2, 3, 4\}$ berechnet. Ebenfalls wurde ein unterschiedlich wirkender Gruppeneffekt $\gamma_{\mu,m}$ für jeden Probestamm B (1, ..., m) hinzugefügt. Nach folgender Additionsformel wurde der Erwartungswert geschätzt:

$$\begin{aligned} \exp(\mu_i) = & \beta_{\mu,0} & + & \beta_{\mu,V2} \cdot (V_i = V2) & + & \beta_{\mu,V3} \cdot (V_i = V3) \\ & + & \beta_{\mu,Z} \cdot Z_i & + & \beta_{\mu,V2,Z} \cdot (V_i = V2) \cdot Z_i & + & \beta_{\mu,V3,Z} \cdot (V_i = V3) \cdot Z_i \\ & + & \gamma_{\mu,1} \cdot (B = B1) & + & \gamma_{\mu,2} \cdot (B = B2) & + & \dots \end{aligned}$$

Die Modellierung des Wurzelhalsdurchmessers folgte dem Modell der Höhenentwicklung (Tabelle 31).

Tabelle 31: Priori der Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland.

Parameter	Priori Höhenmodell	Priori WHD Modell
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; 4,3; 2,5)	<i>Student</i> (3; 2,2; 2,5)
$\beta_{\mu,V_{Silvafix}}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V_{Mulchen}}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,Z}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V_{Silvafix,Z}}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V_{Mulchen,Z}}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\gamma_{\mu,m}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
<i>shape</i>	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)

3.5.2.3.3. Höhenwachstumsmodell Hoher Fläming

Bei der Modellbildung des Höhenwachstums im Hohen Fläming wurde eine Weibullverteilung angenommen: $Y_i \sim \text{Weibull}(scale_i, shape_i)$.

Da das Höhenwachstum keine plötzliche – im Sinne von z.B. Sprüngen – Veränderung durch Verpflanzen erfährt und im Alter 0 bei 0 cm Höhe startet, war die Anpassung einer Wachstumsfunktion angebracht, die diese Eigenschaften berücksichtigt. Aufgrund ihrer biologischen Interpretierbarkeit wurde die Chapman-Richards Wachstumsfunktion verwendet (PIENAAR und TURNBULL 1973). Nach folgender Gleichung wurde der bedingte Erwartungswert μ_i mit identity-Link-Funktion in Abhängigkeit des Alters $Alter_i$ (Jahre), der kategorialen Bodenbearbeitungsvariante $V \in \{1, 2\}$ und eines Gruppeneffektes durch wiederholte Messungen an demselben Probebaum $B \in \{1, \dots, m\}$ berechnet:

$$\mu_{i,V,B} = a_{V,B} (1 - e^{-b_{V,B} \cdot Alter_i})^{c_{V,B}}, \text{ mit:}$$

$$a_{V,B} = \exp(\beta_{0,a} + \beta_{cISF,a} \cdot cISF_i + \beta_{V2,a} \cdot (V = V2) + \delta_{B2,a} \cdot (B = B2) + \dots)$$

$$b_{V,B} = \exp(\beta_{0,b} + \delta_{B1,b} \cdot (B = B1) + \delta_{B2,b} \cdot (B = B2) + \dots)$$

$$c_{V,B} = \exp(\beta_{0,c} + \delta_{B1,c} \cdot (B = B1) + \delta_{B2,c} \cdot (B = B2) + \dots)$$

$$Alter \in \{1, 2, 3\}$$

$$cISF \in [-21; 16]$$

Da die Saat unter Schirm durchgeführt wurde und dadurch Unterschiede in der Belichtung auftraten, wurde die Beleuchtungsstärke, gemessen als *Indirect site factor* (*ISF*; diffuse Strahlung als relativer Anteil der Freilandstrahlung) um den empirischen Mittelwert (56,02 %) zentriert (ergibt *cISF*) in das Modell aufgenommen. Die Modellergebnisse werden mit einer Korrektur des Lichtfaktors auf den mittleren Lichteinfall ($cISF = 0$) präsentiert.

Abweichend zur Höhenmodellierung sind in die WHD-Modellierung lediglich zwei Aufnahmen (Alter 2 und 3) eingegangen, das Höhenwachstumsmodell wurde hier dennoch ebenfalls unverändert angewendet. Da es sich in diesem Fall um ein nichtlineares Modell handelte, verlangt *brms* die Wahl informativer Prioriverteilungen (Tabelle 32). Dies hat eine Steuerungswirkung, die mit dem Festlegen von Startwerten in frequentistischen, numerischen Lösungsalgorithmen zum Auffinden des Maximum-Likelihood Schätzers vergleichbar ist. In nichtlinearen Modellierungen unterliegen die Likelihoodoberflächen häufig mehreren lokalen Minima, was solch eine bayesianische bzw. frequentistische Steuerungseinwirkung notwendig macht.

Tabelle 32: Priori für das Wachstumsmodell der Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserschätzung im Hohen Fläming.

Parameter	Priori Höhe	Priori WHD
$\beta_{0,a}$	<i>Normal</i> (0; 1)	<i>Normal</i> (0; 1)
$\beta_{cISF,a}$	<i>Normal</i> (0; 1)	<i>Normal</i> (0; 1)
$\beta_{Vstreifenpflug,a}$	<i>Normal</i> (0; 1)	<i>Normal</i> (0; 1)
$\beta_{0,b}$	<i>Normal</i> (0; 1)	<i>Normal</i> (0; 1)
$\beta_{0,c}$	<i>Normal</i> (0; 1)	<i>Normal</i> (0; 1)
$\delta_{B,a}$	<i>Student</i> (3; 0; 8,9)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\delta_{B,b}$	<i>Student</i> (3; 0; 8,9)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\delta_{B,c}$	<i>Student</i> (3; 0; 8,9)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
<i>shape</i>	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)

Die beschriebenen Modelle wurden mit dem in Stan implementierten Hamiltonian Monte Carlo Algorithmus (NEAL 2011) geschätzt. Dabei wurden je Modell vier unabhängige Markov-Ketten mit je 500 Warmup-, und 500 Sample-Iterationen geschätzt (Hoher Fläming 1.500 Sample-Iterationen). In *brms* wurde der *treedepth*-Parameter gleich 15, der *adaptdelta*-Parameter gleich 0.95 gesetzt. Alle weiteren Parameter wurden auf den voreingestellten Werten gehalten. Die erzielten Simulationen aus den Posteriori-Verteilungen wurden den für eine valide Inferenz notwendigen Überprüfungen (u.A. Rhat-Koeffizient, Traceplots) unterzogen; alle im Folgenden berichteten Ergebnisse konnten diesen standhalten.

3.5.3. Ergebnisse

3.5.3.1. Schadensansprache

3.5.3.1.1. Hessisches Ried

Nach drei Vegetationsperioden konnten für alle Herkünfte und Bearbeitungsvarianten nur geringe Anteile unbeschädigter Pflanzen vorgefunden werden (Abbildung 48). Mit 18 % unbeschädigter Pflanzen zeigte die Herkunft Dieburg in der Fräsbehandlung den geringsten Anteil, wohingegen die gleiche Herkunft in der Kontrollbehandlung den höchsten Anteil von 93 % aufwies. Im direkten Vergleich zeigte kein Bearbeitungsverfahren einen Vorteil. Ein erheblicher Anteil der Ausfälle in der Kontrollvariante nach der 3. Vegetationsperiode war auf Mähschäden in der 2. Vegetationsperiode zurückzuführen. Auffällig war der unerwartet hohe Anteil der Ausfälle bei der Fräs- und Silvafixbehandlung nach der 3. Vegetationsperiode.

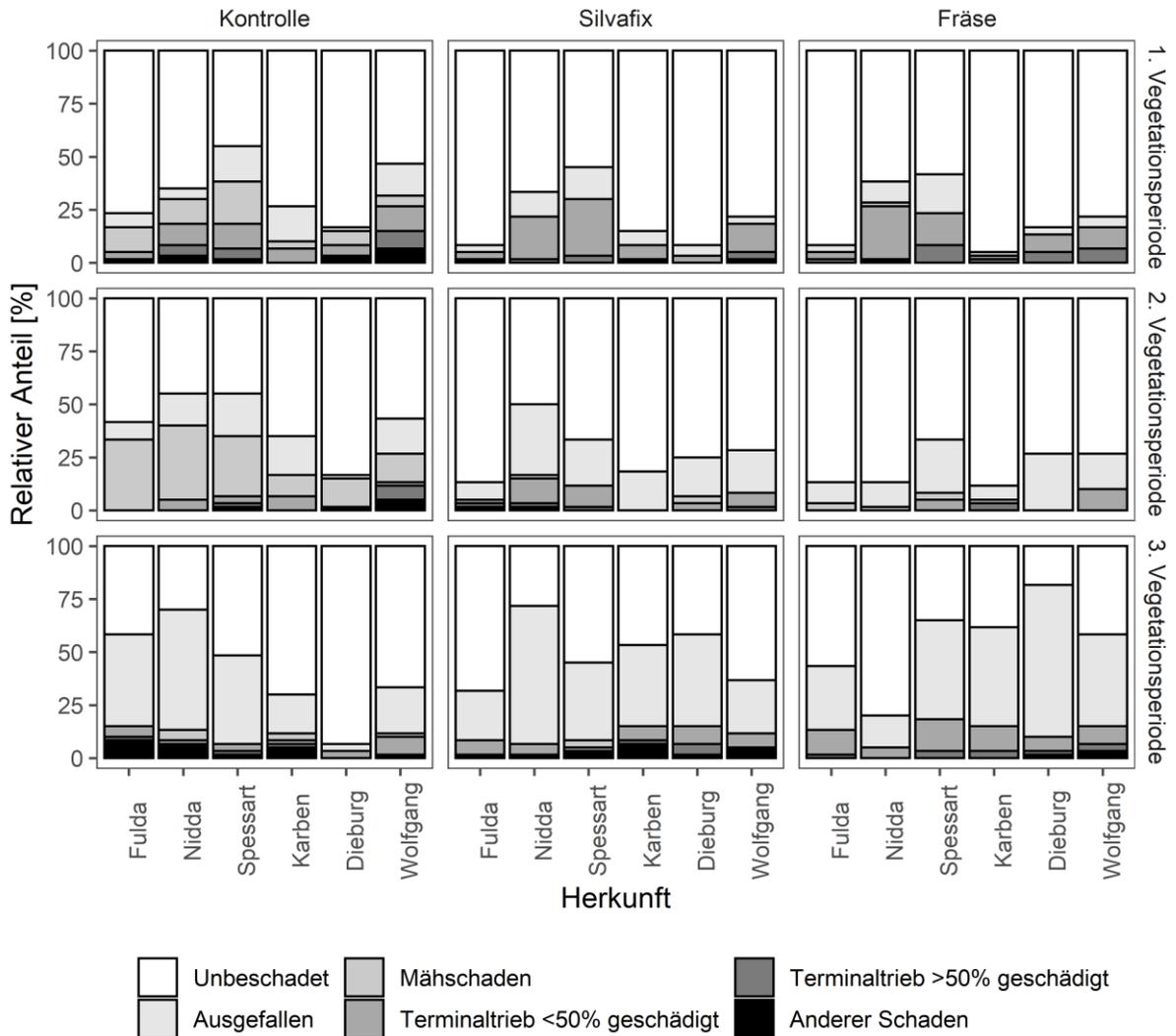


Abbildung 48: Darstellung der Schäden im Hessischen Ried nach Vegetationsperioden, Herkünften und Behandlungen.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Engerlinggrabung spiegeln sich die Ergebnisse in den Ausfällen wider. Im Mittel wurden die höchsten Dichten des E3 Stadiums auf der Fräseparzelle gefunden (Abbildung 49). Engerlinge im E3 Stadium befinden sich im letzten Jahr vor der Verpuppung und verursachen aufgrund ihrer Größe die meisten Schäden.

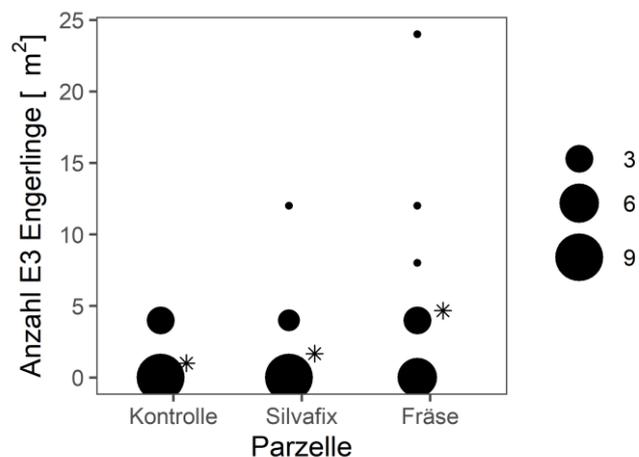


Abbildung 49: Ergebnisse der Engerlinggrabung im Hessischen Ried. Die Kreise zeigen die Häufigkeit der Dichten und die Sterne geben den Mittelwert je Bearbeitung wider.

Da die Bodenbearbeitungen nach der Eiablage der jetzigen E3 Stadien stattgefunden hatten, schien die Häufigkeit der Funde weitere unbekannte Ursachen zu haben, die nicht kausal mit der

Bodenbearbeitung im Zusammenhang gebracht werden konnten. So wurden keine Engerlinge in den Bereichen der Herkünfte Nidda und Fulda auf der Fräsfläche gefunden, hingegen aber in den Bereichen der anderen Herkünfte mit 1-10 Engerlingen/m². Bei der Silvafixbearbeitung lag die Dichte bei 1-3 Engerlingen/m² und bei der Kontrolle bei 1 Engerling/m².

3.5.3.1.2. Ostbraunschweigisches Flachland

Im Ostbraunschweigischen Flachland lag mit 70 % der geringste Anteil unbeschädigter Probestämme in der Kontrolle vor (Tabelle 33), der höchste Anteil befand sich in der Bearbeitungsvariante Silvafix (86 %) und bei der Mulchvariante betrug die Rate geschädigter Eichen 71 %. Die Anteile ausgefallener Pflanzen lagen beim Silvafixverfahren, der Mulchbearbeitung und der Kontrolle bei 3 %, 13 % und 15 %. Weitere Schäden wurden hauptsächlich durch Mäharbeiten hervorgerufen.

Tabelle 33: Schäden an Probestämmen im Ostbraunschweigischen Flachland nach drei Vegetationsperioden in %.

Schaden	Bearbeitungsvariante		
	Silvafix [N=90]	Mulcher [N=96]	Kontrolle [N=84]
Unbeschadet	86	70	70
Ausfall	3	13	16
Mähschaden	7	16	13
Anderes	4	1	1

3.5.3.1.3. Hoher Fläming

Bei der Traubeneichensaat im Hohen Fläming hatte das Saatgut eine Keimfähigkeit von 60,5 % und ein Tausendkorngewicht von 3,65 kg (ISOGEN GmbH & Co. KG, Göttingen, 2019). Auf den Versuchspartellen wies die Pflugvariante die höchste Auflaufquote mit 78 % auf. Bei der Silvafixvariante lag das Auflaufprozent bei 71 %. Unter Einbeziehung von Keimfähigkeit, Tausendkorngewicht und Auflaufprozent errechnete sich eine Anzahl von 15.500 bzw. 14.100 Eichen/ha. Bei der Kontrolle betrug die Auflaufquote lediglich 3 %, dies kam einem Totalausfall gleich.

Ein Probestamm war am Ende der dritten Vegetationsperiode in der Silvafix-Variante ausgefallen. Sowohl in der Silvafix- als auch in der Streifenpflugparzelle wiesen sehr viele der Eichen keine Schäden auf (97 % und 98 %) (Tabelle 34).

Tabelle 34: Schäden an Probestämmen im Hohen Fläming nach drei Vegetationsperioden in %.

Schaden	Bearbeitungsvariante		
	Silvafix [N=181]	Streifenpflug [N=185]	Kontrolle [N=8]
Unbeschadet	97	98	100
Ausgefallen	1	0	0
Anderer	2	2	0

3.5.3.2. Wachstumsmodellierung

Überprüfungen der Modell-Prädiktionsgüte, basierend auf der durch die Posteriori voll spezifizierten bedingten (Weibull-)Verteilung für jede Beobachtungseinheit (auch als Posterior-Predictive-Check bezeichnet), zeigten eine gute Anpassung der Modelle an die Daten (Abbildung 50).

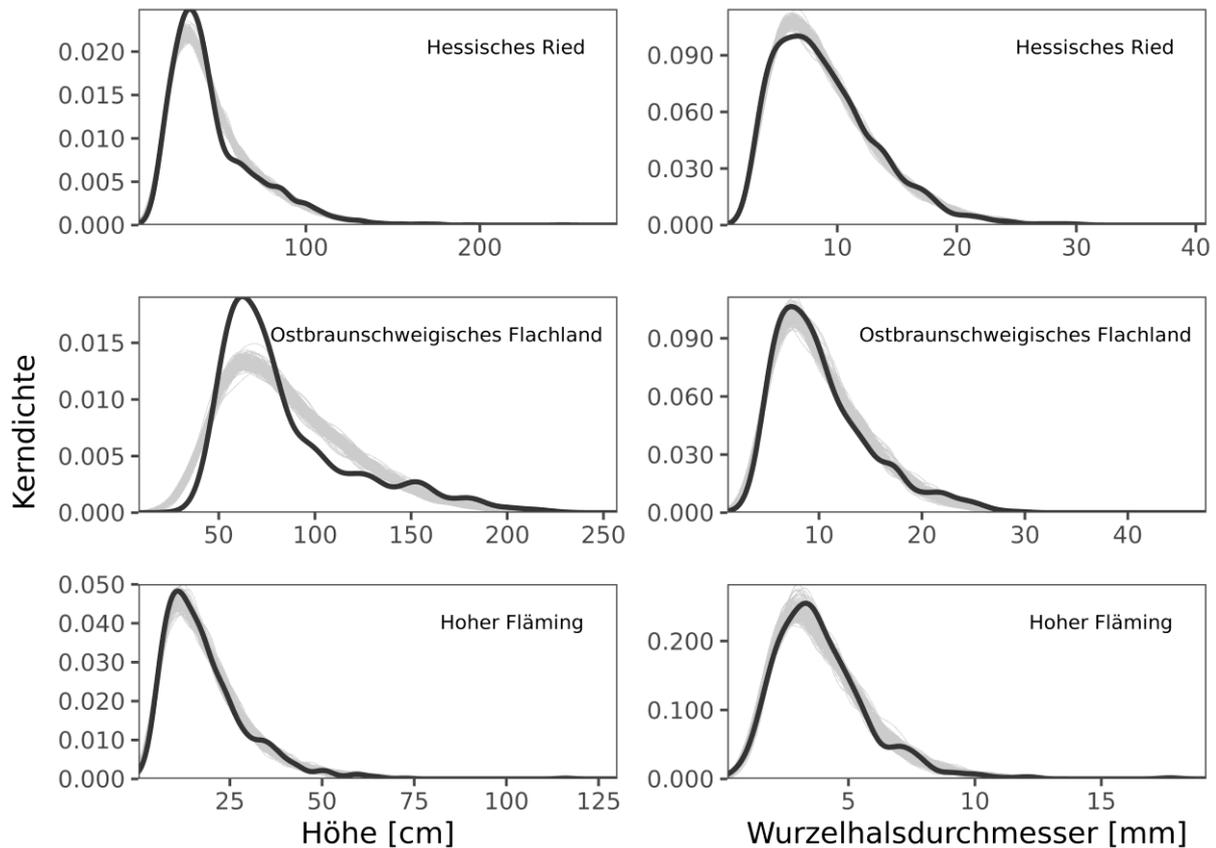


Abbildung 50: Visualisierung des Posterior-Predictive-Check für jedes der sechs Modelle. Jeweils dargestellt ist eine Kerndichteschätzung der Messdaten y_i (schwarz), sowie für 100 zufällige ausgewählte Samples s aus der Posteriori jeweils eine Kerndichteschätzung (grau) für simulierte Prädiktionen $\tilde{y}_i^{(s)}, i = 1, \dots, n$ (zufällige Ziehungen aus den voll spezifizierten Weibull-Verteilungen) basierend auf den Kovariablenwerten x_i .

Dargestellt werden die Ergebnisse in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die jeweils der Median, sowie die inneren 50 %-, 75 %-, 90 %- und 95 % Wahrscheinlichkeitsintervalle dargestellt werden. Die Auswahl der Wahrscheinlichkeitswerte für diese Intervalle wurde getroffen, da sie nach MCELREATH (2015) eine gute Darstellung der Verteilungen ermöglicht.

3.5.3.2.1. Hessisches Ried

Mit zunehmendem Alter nahm der Höhenzuwachs zu (Abbildung 51). Spalte 2 zeigt die Differenzen aus der Silvafixbearbeitung abzüglich der Kontrolle. Liegen die Werte im positiven Bereich, ist die Silvafixvariante höher als die Kontrolle. Anhand der Steigung ist die Entwicklung über der Zeit ablesbar. Liegen positive Steigungen vor, entwickelte sich die Silvafixvariante besser als die Kontrolle. Die Plots B2 und E2 zeigen evident bessere Entwicklungen der Kontrolle gegenüber der Silvafixvariante und der Plot C2 eine evident bessere Entwicklung der Silvafixvariante gegenüber der Kontrolle. Die verbleibenden Plots zeigen ein indifferentes Bild. In der Spalte 3 wird die Fräsbearbeitung mit der Kontrolle verglichen. Lediglich der Plot E3 zeigt ein evident besseres Wachstum der Kontrolle. Die weiteren Plots in Spalte 3 zeigen ein besseres Wachstum der Fräsbearbeitung, aufgrund der positiven Steigung, bei der alle bis auf Plot F3 mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 % und mehr evident sind. Spalte 4 vergleicht die Fräsbearbeitung mit dem Silvafix. In allen Plots außer E4 zeigt sich eine Überlegenheit im Höhenwachstum der Fräsbearbeitung gegenüber dem Silvafix, von denen zwei eine Wahrscheinlichkeit von über 97,5 % zeigen. Plot E4 zeigt eine bessere Entwicklung des Silvafixverfahrens gegenüber der Fräsbearbeitung.

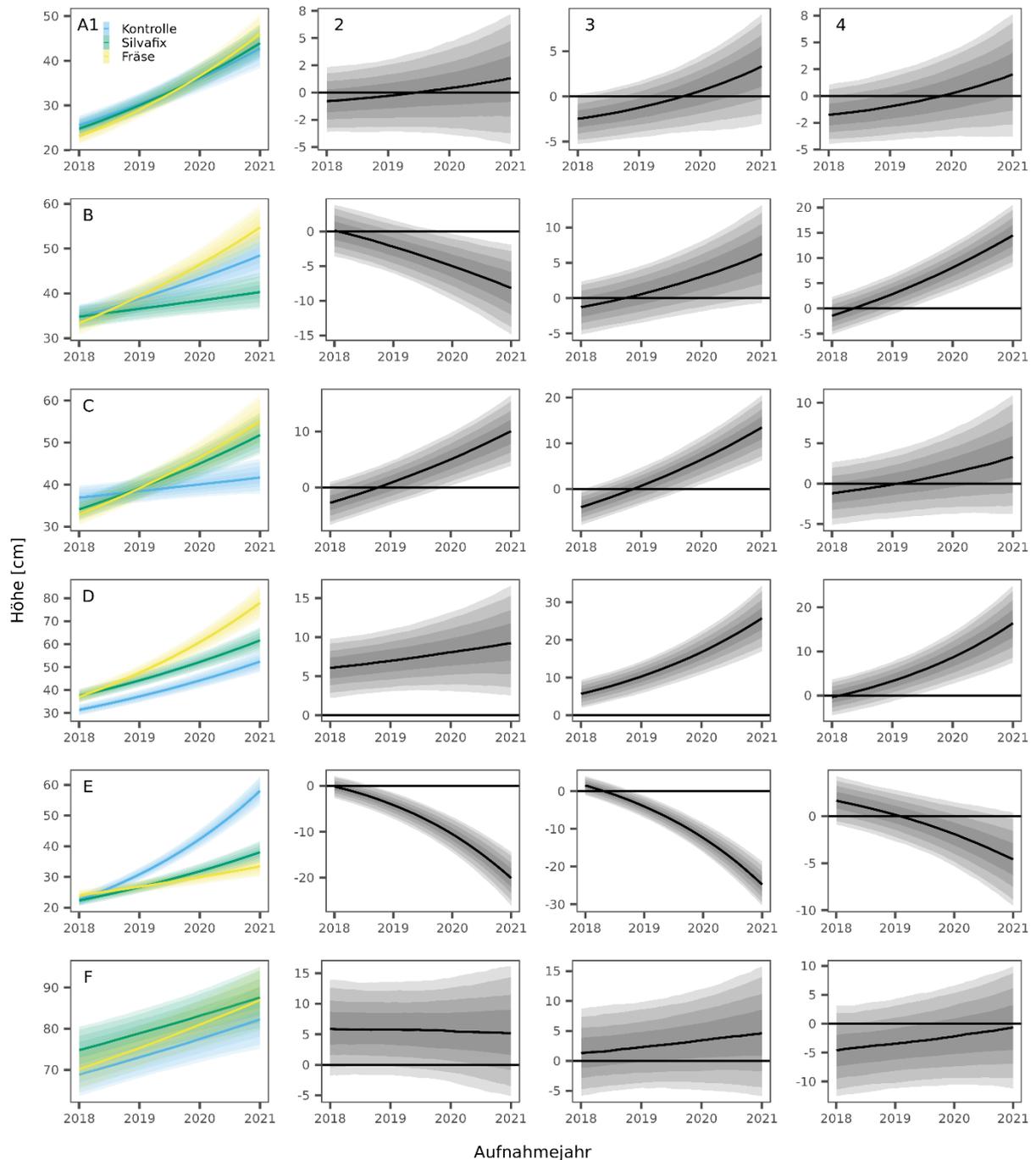


Abbildung 51: Höhenentwicklung, als bedingte Erwartungswerte, der Herkünfte im Hessischen Ried über Aufnahmejahre in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungsverfahren. In den Zeilen werden die Herkünfte wiedergegeben (A= Fulda, B=Nidda, C=Spessart, D=Karben, E=Dieburg, F=Wolfgang), in der Spalte 1 der Median, das 50 %-, 75 %-, 90 %- und 95 %-Quantil von $E(Y_i|V_i)$, analog dazu in der Spalte 2 $E(Y_i|V_i = Silvafix) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$; Spalte 3 $E(Y_i|V_i = Fräse) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$, Spalte 4 $E(Y_i|V_i = Fräse) - E(Y_i|V_i = Silvafix)$.

Bei allen Herkünften und Bearbeitungen nahm mit zunehmendem Alter der Wurzelhalsdurchmesserzuwachs zu (Abbildung 52). In Spalte 2 ist ersichtlich, dass die Kontrolle im Plot B2 eine evident bessere Wurzelhalsdurchmesserentwicklung aufwies als die Bearbeitung mit dem Silvafix. In zwei Fällen zeigte sich eine gleiche Entwicklung und in drei Fällen war die Silvafixvariante der Kontrolle überlegen. Beim Vergleich der Fräsvariante mit der Kontrolle zeigt sich lediglich im Plot B3 keine positive Steigung, ansonsten waren die Entwicklungen der Fräsvariante denen der Kontrollen immer überlegen, in drei Fällen mit Wahrscheinlichkeiten von über 97,5 %. Werden die beiden Bodenbearbeitungen miteinander verglichen, zeigt sich immer eine positive Steigung. Dies kam einer Überlegenheit der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung bei der Fräsvariante gegenüber dem Silvafix gleich. In zwei Fällen zeigen sich Wahrscheinlichkeiten von über 97,5 %.

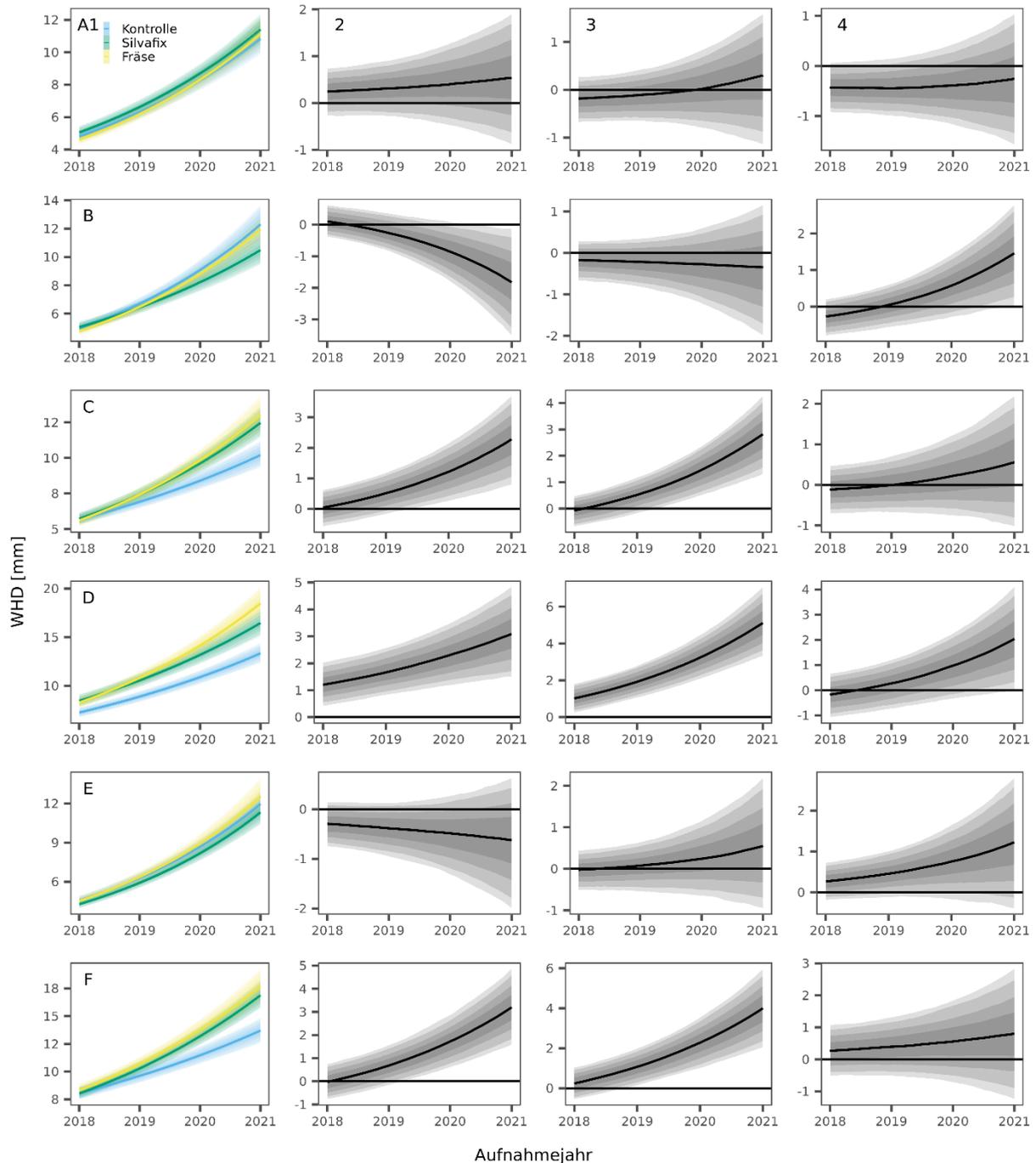


Abbildung 52: Wurzelhalsdurchmesserentwicklung als bedingte Erwartungswerte der Herkünfte im Hessischen Ried über Aufnahmejahre in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungsverfahren. In den Zeilen werden die Herkünfte wiedergegeben (A= Fulda, B=Nidda, C=Spessart, D=Karben, E=Dieburg, F=Wolfgang), in der Spalte 1 der Median, das 50 %-, 75 %-, 90 %- und 95 %-Quantil von $E(Y_i|V_i)$, analog dazu in der Spalte 2 $E(Y_i|V_i = Silvafix) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$; Spalte 3 $E(Y_i|V_i = Fräse) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$, Spalte 4 $E(Y_i|V_i = Fräse) - E(Y_i|V_i = Silvafix)$.

3.5.3.2.2. Ostbraunschweigisches Flachland

Die Kontrolle zeigte gegenüber den Bodenbearbeitungsvarianten ein evident besseres Höhenwachstum (Plot B und C) (Abbildung 53). Im Plot D zeigt sich ein evident besseres Höhenwachstum der Eichen nach der Silvafixbearbeitung gegenüber dem Mulchen.

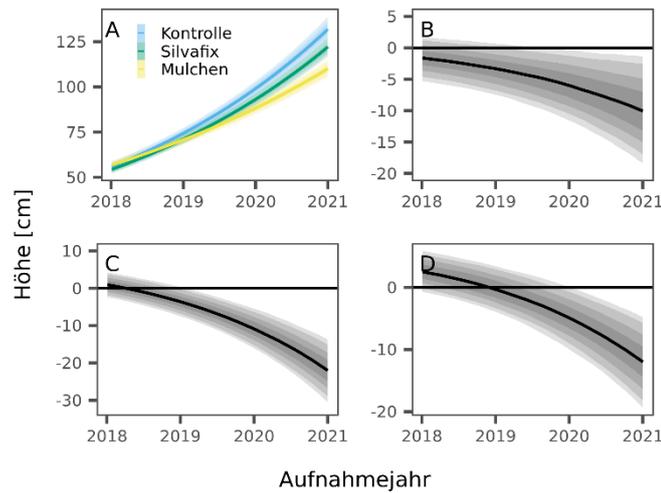


Abbildung 53: Ergebnisse der Höhenmodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland ($A = E(Y_i|V_i)$, $B = E(Y_i|V_i = Silvafix) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$, $C = E(Y_i|V_i = Mulchen) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$, $D = E(Y_i|V_i = Mulchen) - E(Y_i|V_i = Silvafix)$).

Bei den Ergebnissen der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung (Abbildung 54) zeigte sich ein anderes Bild als bei der Höhenentwicklung. Hier wiesen die Pflanzen mit der Silvafixbearbeitung die größten Zuwächse gegenüber der Kontrolle (Plot B) und der Mulchvariante (Plot D) auf. Gegenüber der Kontrolle waren die Pflanzen der Mulchvariante im Wurzelhalsdurchmesserzuwachs unterlegen (Plot C).

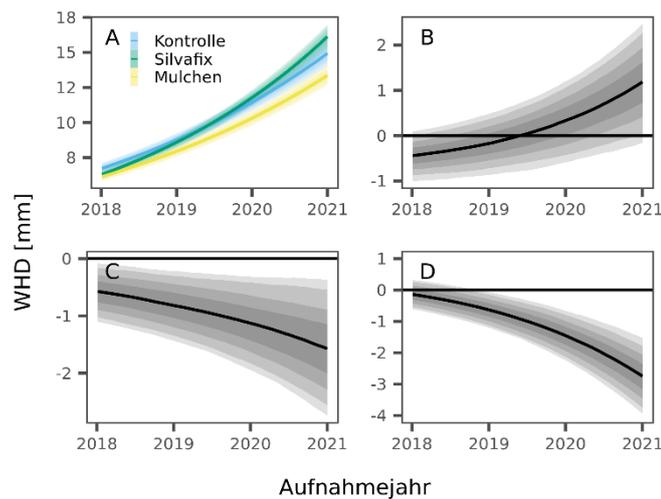


Abbildung 54: Ergebnisse der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung im Ostbraunschweigischen Flachland ($A = E(Y_i|V_i)$, $B = E(Y_i|V_i = Silvafix) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$, $C = E(Y_i|V_i = Mulchen) - E(Y_i|V_i = Kontrolle)$, $D = E(Y_i|V_i = Mulchen) - E(Y_i|V_i = Silvafix)$).

3.5.3.2.3. Hoher Fläming

Plot A veranschaulicht das Modell (Abbildung 55), Plot B lässt ein evident besseres Höhenwachstum der Silvafixbearbeitung gegenüber der Streifenpflugbearbeitung erkennen.

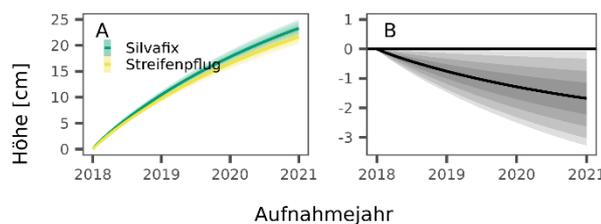


Abbildung 55: Ergebnis der Höhenwachstumsmodellierung im Hohen Fläming ($A = E(Y_i|V_i)$, $B = E(Y_i|V_i = Streifenpflug) - E(Y_i|V_i = Silvafix)$).

Die Wurzelhalsdurchmessermodellierung (Abbildung 56) zeigt eine evident bessere Entwicklung nach Bearbeitung mit dem Silvafix als mit dem Streifenpflug.

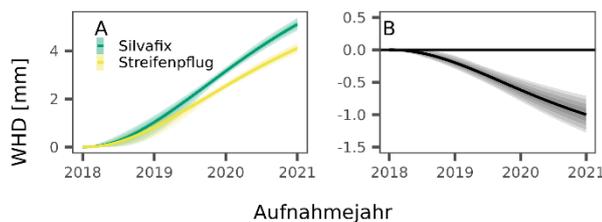


Abbildung 56: Ergebnis der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung im Hohen Fläming ($A = E(Y_i|V_i)$, $B = E(Y_i|V_i = \text{Streifenpflug}) - E(Y_i|V_i = \text{Silvafix})$).

3.5.4. Diskussion

3.5.4.1. Anwuchs

Die Ergebnisse des Anwuchses im Hessischen Ried sollen anhand der Wurzel- und Sprossgewichte, den Wurzel/Spross-Verhältnissen sowie den Ergebnissen der Engerlinggrabung diskutiert werden.

Ein Zurücktrocknen des Terminaltriebes wurde wie ein Ausfall gewertet. Ein hohes Wurzel/Spross-Verhältnis wirkt sich im Allgemeinen günstig auf den Anwuchs aus (DAVIS und JACOBS 2005). Die Herkunft „Dieburg“ zeigte das günstigste Wurzel/Spross-Verhältnis und auch einen sehr guten Anwuchs auf allen Parzellen nach der ersten Vegetationsperiode. Dies galt ebenso für die Herkünfte „Fulda“ und „Karben“. Die Herkünfte mit einem nicht so günstigen Wurzel/Spross-Verhältnis zeigten einen nicht so guten Anwuchs. Die Herkunft „Wolfgang“ mit dem ungünstigsten Wurzel/Spross-Verhältnis schnitt hingegen nicht am schlechtesten ab. Auf den bearbeiteten Flächen waren am wenigsten geschädigte Pflanzen zu finden, aufgrund der Begleitwuchsregulierung durch die Bodenbearbeitung und der dadurch besseren Bodenfeuchte. Die Entwicklungen nach der zweiten Vegetationsperiode zeigten ebenfalls eine Überlegenheit der bodenbearbeiteten Flächen, auch wenn die Ausfälle zugenommen hatten. Nach der dritten Vegetationsperiode zeigten sich unerwartet hohe Ausfälle auf allen Parzellen, welche mit Vorsicht zu interpretieren sind. Neben den zum Teil erheblichen Mähschäden in der zweiten Vegetationsperiode auf der Kontrolle, wodurch es zu hohen Ausfällen gekommen war, wurde Engerlingsfraß auf der Fläche festgestellt.

Da durch das Fräsen der Begleitwuchs am effektivsten reduziert wurde, liegt die Vermutung nahe, dass sich dadurch der Fraß auf die Eichenkultur konzentriert hat und Herkünfte mit geringen Wurzelbiomassen stärker in Mitleidenschaft gezogen wurden. Besonders auffällig war hier die Herkunft „Nidda“ mit dem absolut niedrigsten Wurzelgewicht und den geringsten Ausfällen auf der gefrästen Parzelle sowie keinen Engerlingsfunden. Hingegen liegt die Vermutung nahe, dass auf der Kontrollparzelle der üppige Begleitwuchs einer Fraßkonzentration auf die Kulturpflanzen entgegenwirkte.

Für Freiflächenbedingungen gibt (LÜPKE 1982) einen Anwuchs von 77-80 % nach drei Vegetationsperioden für Eiche ohne Einfluss von Engerlingen an, diese Werte wurden nur für die Herkunft „Dieburg“ der Kontrolle und der Herkunft „Nidda“ der Fräsbearbeitung erreicht. In den anderen Bearbeitungen lagen die Werte mit 30–80 % Ausfall deutlich darüber.

Die Anwuchsraten waren im Ostbraunschweigischen Flachland mit über 80 % in allen Varianten akzeptabel und lagen in dem Rahmen von 75–100 %, welcher von LÖF et al. (2004) angegeben wird. Wie LÖF et al. (2004) zeigen konnte, führen die Bearbeitungen mit Begleitwuchsregulierung zu höheren Anwuchsraten. Die hohen Schädigungen durch die Kulturpflege von bis zu 16 % hätten durch eine frühere Pflege vermieden werden können. Die deutlich geringeren Schädigungen bei der Silvafixbearbeitung (7 %) sprechen für einen geringeren Begleitwuchs gegenüber der Mulchvariante und der Kontrolle. Das Mulchen konnte den Schlagabraum zerkleinern, aber eine langfristige

Unterdrückung von Gräsern und Kräutern durch die oberflächennahe Arbeitsweise nicht gewährleisten.

Der Totalausfall auf der Kontrollparzelle im Hohen Fläming war vermutlich ein Resultat aus zu geringer Bodenfeuchte und Prädation. Durch die geschlossene Vegetationsdecke konnte im Winter der Oberboden nicht durchfeuchtet und die Keimung der Eichen wurde gehemmt. In einem Experiment unter Ausschluss von Prädation hat die Anzahl aufgelaufener Eicheln mit Zunahme der Vegetation abgenommen (DE LOMBAERDE et al. 2020). Einen Totalausfall von gesäten Eicheln in eine Grasdecke berichten auch ERDÖS et al. (2021). Üppige Vegetation in der Krautschicht bietet Mäusen einen guten Lebensraum. Werden in diese nun noch Eicheln eingebracht, ist ein Verlust durch Nager unausweichlich. Saaten sind generell durch Nager gefährdet (BIRKEDAL et al. 2009). Es konnte nachgewiesen werden, dass mit Zunahme des Flächenbewuchses die Prädation durch Mäuse zunimmt (VILLALOBOS et al. 2020).

Der gute Anwuchs in den bearbeiteten Varianten von über 70 % lag im oberen Bereich im Vergleich zu Angaben aus der Literatur. LÖF et al. (2021) konnten lediglich eine Überlebensrate von 25 % feststellen. DE LOMBAERDE et al. (2020) geben eine Überlebensrate von 50 % nach 2 Jahren an und LÖF et al. (2004) berichten von 50–90 % lebenden Eichen nach 4 Jahren. Empfehlungen anderer Autoren für eine gelungene Saat sind eine Durchführung unter Schirm für einen geringen Begleitwuchs (FLEDER 1981), eine geringe Saattiefe für ein schnelles Auflaufen, aber nicht oberflächlich als Schutz vor Fraß (BIRKEDAL et al. 2010; NILSSON et al. 1996b; RÖHRIG 1976), eine Saat im Frühjahr (LÖF und BIRKEDAL 2009; RUMPF 2007) und das Entfernen von Schlagabraum und Bewuchs zur Reduzierung der Prädation von Eicheln (BIRKEDAL et al. 2010). PREUHLER et al. (1994) geben für eine Eichensaat von 380 kg/ha in Frässtreifen unter Kiefernschirm nach 3 Jahren eine Anzahl von 19.000 Eichensämlingen/ha an. Trotz der im Vergleich hier um 60 % geringeren Saatmenge werden diese Werte lediglich um 25 % in den bearbeiteten Parzellen unterschritten. Zudem wird mit einem Auflaufen von Kiefern naturverjüngung gerechnet, welche hier nicht Gegenstand der Untersuchung war, aber Sämlingsdichten von über 30.000 Pflanzen/ha annehmen können (PREUHLER et al. 1994), so dass ein früher Bestandesschluss gewährleistet ist.

3.5.4.2. Höhenentwicklung

Unter Ausschluss der Herkunft „Dieburg“ (aufgrund der geringen Anzahl an Probestämmen nach der dritten Vegetationsperiode in der Fräsbearbeitung), zeigte sich ein deutlicher Vorteil der Bodenbearbeitungsvarianten für den Höhenzuwachs gegenüber der Kontrolle. Dies wird auf eine geringere Konkurrenz durch Begleitwuchs zurückgeführt, welcher von anderen Autoren bestätigt wird (LÜPKE 1982) und auch für andere Baumarten gezeigt werden konnte (COLL et al. 2004; DINGER und ROSE 2009; MASON et al. 2007; NILSSON et al. 1996a; ROSE und ROSNER 2005). JENSEN et al. (2012) haben eine sehr flexible Reaktion der Eiche auf Umweltbedingungen nachweisen können, wonach durch Konkurrenz der Höhenzuwachs weniger stark beeinflusst wird als der Biomassezuwachs. Nach Jensen und LÖF (2017) spiegelt sich dieser Effekt in einem ähnlichen Höhenwachstum unter Konkurrenzbedingungen aber monopodialeren Pflanzen wider.

Im Ostbraunschweigischen Flachland zeigte die Eiche auf der Silvafixbearbeitung trotz der besseren Anwuchsraten nicht das beste Höhenwachstum. LÖF et al. (2004) konnten hingegen ein größeres Höhenwachstum bei Eichen mit Begleitwuchsregulierung feststellen. Eine Untersuchung zur Wirkung von interspezifischer Konkurrenz auf das Wachstum von Eichen in den ersten 8 Wuchsjahren zeigt, dass kraut- und grasartige Begleitvegetation, wie sie im Ostbraunschweigischen Flachland überwiegen vorkamen, im Gegensatz zu baumartigem Begleitwuchs keinen Effekt auf das Höhenwachstum ausüben (JENSEN und LÖF 2017).

Es scheint, dass das Wachstum gesäter Eichen von einer intensiveren Bodenbearbeitung profitierte. Dies bestätigen auch andere Autoren, die einen positiven Effekt auf das Wachstum gesäter Eichen durch Bodenbearbeitung und Begleitwuchsregulierung nachweisen (LÖF et al. 2004; LÖF und BIRKEDAL 2009; NILSSON et al. 1996b). Die von uns beobachteten Höhen von ca. 10 cm nach einer Vegetationsperiode liegen unter den von anderen Autoren berichteten Werten von 13–40 cm in Abhängigkeit von Lichtgenuss und Bodenfeuchte (DEVETAKOVIĆ et al. 2019; ERDÖS et al. 2021; VAN HEES 1997). Mit Abnahme des Lichtangebotes und der Bodenfeuchte nimmt auch das

Höhenwachstum ab (VAN HEES 1997). Somit sind die hier ermittelten Werte plausibel, da es zum einen sehr trockene Jahre waren und zum anderen die Saat unter Schirm ausgeführt wurde. Das Wachstum in den Folgejahren verläuft moderat. Nach drei Wuchsperioden gibt RUMPF (2007) eine Höhe von ca. 30 cm im Median nach Streifenpflugbearbeitung an. Dieser Wert liegt ca. 10 cm über den hier gemessenen Werten. ERDÖS et al. (2021) konnten nur ein geringes Höhenwachstum bis zum Ende der vierten Vegetationsperiode von ca. 17 cm nachweisen. PREUHLER et al. (1994) beobachteten bei zwei Drittel aller Pflanzen nach 3 Jahren eine Höhe von unter 25 cm und begründen dies mit einem verstärkten Wurzelwachstum bei Eichen im Sämlingsstadium.

3.5.4.3. Wurzelhalsdurchmesserentwicklung

Nach Dassot und Collet (2021) besteht eine enge Korrelation zwischen der Wurzelentwicklung und dem Wurzelhalsdurchmesser. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Eiche in den ersten Wuchsjahren verstärkt in das Wurzelwachstum investiert (BEBRE et al. 2020).

Auf den bodenbearbeiteten Parzellen im Hessischen Ried konnte gegenüber der Kontrolle ein besseres Durchmesserwachstum beobachtet werden. Die Bodenbearbeitung in beiden Verfahren lockert den Oberboden und beseitigt die Konkurrenzvegetation. Hierdurch ist eine gute Ausführung der Pflanzung gewährleistet und die Pflanzen konnten den Boden leichter erschließen. Auf der Kontrollparzelle hingegen herrschte ein großer Konkurrenzdruck durch die Begleitvegetation, vor allem Spätblühende Traubenkirsche, welches zu einer verringerten Wurzelmasse führte (ANDERSEN 2004). Ein den Bodenbearbeitungsverfahren überlegenes Durchmesserwachstum konnte bei keiner der Herkünfte auf der Kontrollparzelle festgestellt werden. Die Bodenlockerung wird nicht als Hauptkriterium der Wuchsüberlegenheit angesehen, da sandiges Ausgangssubstrat nicht verdichtungsempfindlich ist, eher wirkte ein Effekt der Konkurrenzreduktion. Unter Ausschluss von Vegetation konnte LÜPKE (1982) nach vier Vegetationsperioden einen fast doppelt so großen Wurzelhalsdurchmesser ermitteln wie mit Vegetationseinfluss. JENSEN und LÖF (2017) bestätigen die Beobachtung, dass besonders bei baumartiger Konkurrenz das Wachstum des Wurzelhalsdurchmessers frühzeitig nachlässt.

Aus der Beziehung zwischen Wurzelmasse und Wurzelhalsdurchmesser wird nach DASSOT und COLLET (2021) für den Standort des Ostbraunschweigischen Flachland deutlich, dass die Mulchbearbeitung die schlechteste Wurzelentwicklung aufwies. Dies konnte vielerlei Gründe haben. Einerseits durch Bodenverdichtungen aufgrund der ganzflächigen Befahrung während des Mulchens, andererseits durch eine schlechtere Pflanzung aufgrund der Mulchaufgabe. Indessen zeigte die Variante, bei der der Mineralboden durch den Silvafix aufgelockert wurde, das beste Wurzelhalsdurchmesserwachstum. Durch das Auflockern konnten die Pflanzen den Boden leichter erschließen und ein größeres Wurzelsystem ausbilden (DASSOT und COLLET 2021). Vermutlich wirkten beide Effekte, da die Kontrollvariante in deren Mitte lag.

Bei der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung der Saaten im Hohen Fläming erreichten die Pflanzen der Streifenpflugbearbeitung mit 4 mm im Median nicht die von RUMPF (2007) nach 3 Jahren ermittelten 5 mm, hingegen aber die der Silvafixbearbeitung, welches, wie bereits oben erwähnt, für eine bessere Pflanzenentwicklung durch die intensivere Bearbeitung spricht. DEVETAKOVIĆ et al. (2019) und RÖHRIG (1976) geben nach einem Jahr Durchmesser von 2,1 mm und 2,8 mm an. Diese liegen in etwa um das doppelte bis dem dreifachen über den hier modellierten Werten.

3.5.5. Fazit

Bodenbearbeitungen sind für Saaten in Beständen mit einer flächigen Bodenvegetation unumgänglich. Eine vollflächige Bearbeitung der Fläche ist nicht zwingend erforderlich. In Beständen mit einem wenig konkurrenzstarken Begleitwuchs (Ostbraunschweigisches Flachland) ist eine Bodenbearbeitung vor der Kulturbegründung mittels Pflanzung nicht zwingend erforderlich, bei Beständen mit einem konkurrenzstarken Begleitwuchs (Hessisches Ried) hingegen schon. Das Silvafixräumverfahren steht in der Wirkung auf das Wuchsverhalten von Eichenkulturen den regionalen Standardverfahren als Vergleichsverfahren in nichts nach und stellt eine Alternative zu Bearbeitungsverfahren mit flächiger Befahrung dar. Lediglich die Fräsbearbeitung im Hessischen Ried zeigt ein besseres Ergebnis. Das Fräsen erbringt, als intensiveres Bearbeitungsverfahren, bei

der konkurrenzstarken Begleitvegetation eine bessere Wirkung als das Silvafixverfahren. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass mit zunehmender Konkurrenzkraft der Begleitvegetation auch zunehmend intensivere Bearbeitungsverfahren zu wählen sind. Der kontraproduktiven Wirkung der Bodenbearbeitung auf den Einfluss von Fraßschäden durch Engerlinge an Kulturen könnte durch die Einsaat einer Nutzpflanzendecke entgegengewirkt werden, wodurch ein größeres Nahrungsangebot geschaffen wird und ein konzentrierter Fraß an den Kulturpflanzen vermindert werden könnte.

3.6. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf Nährstofffrachten und –vorräte in Böden

3.6.1. Einleitung

Der Effekt von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt ist unklar. Bodenbearbeitungen stehen in Verdacht, Nährstoffausträge zu fördern, da sie die Mineralisierung anregen, die nährstoffaufnehmende Begleitvegetation beseitigen und die Wasserinfiltration steigern (JANDL et al. 2007; LUNDMARK-THELIN und JOHANSSON 1997; STOLL 2011). Die Vermutung liegt nahe, dass durch eine Bodenbearbeitung eine zusätzliche Grundwasserbelastung durch Nitrat verursacht wird. Unsachgemäß ausgeführte Bodenbearbeitungen mindern die Leistungsfähigkeit des Standortes nachhaltig (NOPP et al. 1998; STRUCK 1999).

Zumeist bedingen die regionalen Standardverfahren eine vollflächige Befahrung der Fläche und stehen dadurch im Widerspruch zu Zertifizierungen wie PEFC oder FSC, werden aber in der Praxis für einen Kulturerfolg als zwingend notwendig angesehen. Flächenräumungen mit dem Silvafix arbeiten von der Gasse aus und entsprechen somit den Zertifizierungen. Baggerräumungen versprechen eine Humusschonung und lassen somit geringe Nährstofffrachten erwarten (ABELE und LIESER 1991).

Die Hypothesen sind, (1.) dass die Bodenbearbeitung anfänglich zu höheren Nährstofffrachten in der Bodenlösung des Oberbodens führt. Es wird allerdings vermutet, (2.) dass das relativ bodenschonende Silvafixverfahren wesentlich geringere Nährstofffrachten zur Folge hat als die ortsüblichen Verfahren. (3.) Des Weiteren sind die Nährstofffrachten nach Bodenbearbeitungen im Verhältnis zu den Bodennährstoffvorräten gering.

3.6.2. Methodik

3.6.2.1. Aufbau, Beprobung und Analytik

Auf jeder Parzelle der Intensivflächen wurden sechs Mikrokosmenlysimeter installiert. Außer auf der Streifenpflugvariante im Hohen Fläming, hier wurden zehn verbaut. Je fünf in der Furche und fünf in dem hochgepflügten Bereich. Der Einbau fand vom 26.11.2018 – 12.12.2018 statt.

Die Mikrokosmenlysimeter bestanden aus einer 50 cm langen Acrylglasäule mit einem Durchmesser von 15 cm (Abbildung 57), welche zur Gewinnung der Bodensäulen 30 cm tief in den Mineralboden eingeschlagen wurden. Nach dem Ausgraben der Säulen wurden diese mit der Unterseite in eine wenige Millimeter betragende Vertiefung eines Acrylglasblocks gestellt und am selben Ort wieder in den Boden eingesetzt. In dem Acrylglasblock war eine weitere, wenige mm betragende Vertiefung mit einem etwas geringeren Durchmesser und einem spiralenförmigen Abfluss nach außen eingefräst. In das Gewinde des Abflusses wurde ein Schlauchanschluss geschraubt, dieser wurde mit einem Schlauch an einer Sammelflasche (2,5 L Fassungsvermögen) angeschlossen (Abbildung 58). In die zweite Vertiefung wurde eine Keramikplatte (Material Mullit M3-S20, von HiPer Ceramics GmbH, 16727 Oberkrämer) (mit Pattexrepair) eingeklebt und nach Meiwes et al. (1984) mit HCl und deionisiertem Wasser gespült, die erste Probe wurde verworfen, da die Keramik sich erst an die Bodenbedingungen konditionieren musste.

Der Verbindungsbereich zwischen Acrylglasröhre und Acrylglasblock wurde mit wasserfestem Silikon abgedichtet. An der Sammelflasche wurde ein Vakuum angelegt um die Bodenlösung aus dem Mikrokosmenlysimeter abzusaugen. Nach der Beprobung der Sammelflaschen, welche 14-tägig stattfand, wurde erneut Vakuum angelegt. Bei der Beprobung wurde die

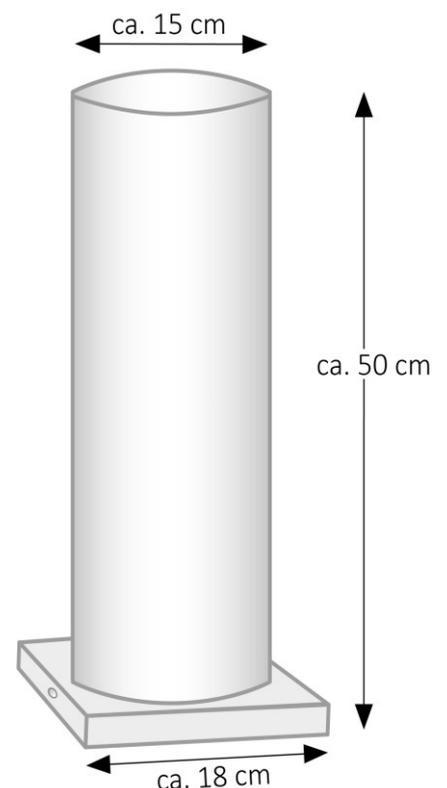


Abbildung 57: Skizze der Lysimetersäule.

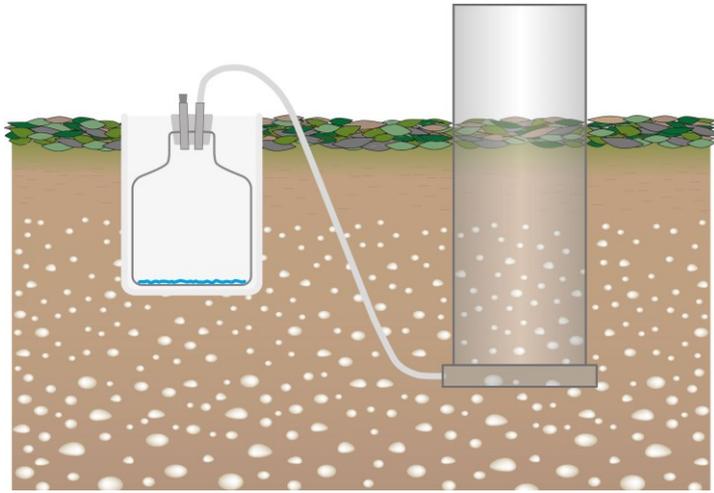


Abbildung 58: Darstellung des Lysimeterbaus im Gelände.

Menge der zu nehmenden Probe vor Ort mittels Messzylinder gemessen. Probemengen ab 30 ml wurden genommen, bei geringeren Mengen reichte die Probe nicht für die durchzuführenden Analysen aus und verblieb in der Sammelflasche. An Proben über 250 ml wurde das Volumen bestimmt und eine Teilprobe von 250 ml gewonnen. Im Labor wurden die Proben nach den Empfehlungen von (KÖNIG 2014) gefiltert und bis zur Analyse kühl gelagert.

Das Funktionsprinzip ist, dass der Regen in die Acrylglassäule fällt, durch den Boden in der Säule sickert und auf die Keramikplatte trifft. Ist die Keramikplatte feucht, schließt sie luftdicht ab und hält das Vakuum. Das Bodenwasser ist in der Lage die Keramikplatte zu durchdringen und gelangt aufgrund des Unterdrucks aus dem spiralförmigen Abfluss in die Sammelflasche. Ist der Boden trocken, trocknet die Keramikplatte aus und lässt Luft durch, das Vakuum wird nicht gehalten. Sobald die Keramik wieder feucht ist, hält sie nach erneuter Unterdrückanlage diesen.

Die Probenanalyse erfolgte im Umweltanalytischen Labor der NW-FVA. Neben der Leitfähigkeit und dem pH-Wert (elektrochemische Bestimmung) wurde in einem ersten Analyseschritt die Alkalinität nach Gran (KÖNIG 2014) bestimmt. Per Ionenchromatographie (IC) und optischer Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas (ICP-OES) [inductively coupled plasma optical emission spectrometry] fand eine Konzentrationsbestimmung der Ionen statt. Nach der Analyse der TN- (Total Nitrogen) und TC- (Total Carbon) Gehalte wurde abschließend eine Qualitäts- und Plausibilitätsprüfung vor der Übertragung der Daten in die ECO-Datenbank (Environmental Control) der NW-FVA (SCHULZE 2006) durchgeführt.

Mit Ende der kontinuierlichen Sickerwasserbeprobung wurden die Mikrokosmenlysimeter ausgegraben und der Inhalt in die Bestandteile Pflanze, Humus und Mineralboden getrennt, die jeweiligen Nährstoffgehalte bestimmt und saldiert. Mit einem Druckaufschluss wurden die Elementgehalte der pflanzlichen Biomasse aufgeschlossen und mittels eines ICP gemessen. Die Elementgehalte des Humus wurden über einen Königswasseraufschluss mit anschließender ICP-Messung ermittelt. Die leicht löslichen pflanzenverfügbaren Mineralbodenvorräte wurden mit der Methode der effektive Kationenaustauschkapazität (AKe) bestimmt. Für die Anionen kann mit der AKe-Methode kein Gehalt im Mineralboden bestimmt werden. Für Stickstoff wurden die Werte des Gesamt-N aus dem Mineralboden herangezogen und für Schwefel aus einem Königswasseraufschluss des Mineralbodens. Die C- und N-Gehalte der pflanzlichen Biomasse, sowie des Humus, und des Mineralbodens wurden mittels CN-Elementaranalysator Euro EA (Fa. Hekatech) bestimmt.

3.6.2.2. Statistische Auswertung

Es wurden für die durchzuführenden Analysen bayesianische Regressionsmodelle auf Basis der Statistiksoftware R (Version 4.1.0 auf einem Linux-gnu, x86_64 System) (R CORE TEAM 2021) und dem Erweiterungspaket *brms* (Version 2.6.1) (BÜRKNER 2018; BÜRKNER 2017) geschätzt. *brms* generiert einen Stancode der Statistiksoftware *Stan* (CARPENTER et al. 2017) auf Grundlage der vielen R-Nutzern bekannten lme4-Syntax und übergibt diesen an *Stan*. Ein Stancode berechnet eine vollständige bayesianische Inferenz auf Grundlage von Markov-Ketten-Monte-Carlo-Simulationen für statistische Modelle. Bei den hier zu berechnenden Modellen wurde auf den in *Stan* implementierten Hamiltonian Monte Carlo Algorithmus (NEAL 2011) zurückgegriffen. Soweit nicht anders angegeben wurden die Modelle mit vier Ketten je 500 Aufwärm- und 500 Stichprobeniterationen berechnet. Die *brms* spezifischen Parameter der *max_treedepth* und *adapt_delta* wurden auf die Werte 15 und 0,95 gesetzt. Für die weiteren Einstellungsoptionen

wurden die Ursprungseinstellungen beibehalten. Die Modellergebnisse wurden einer Inferenzüberprüfung unterzogen (Rhat, Traceplots, Posterior-predictive Check).

Die Datenaufbereitung und Darstellungen wurden unter Zuhilfenahme des *tidyverse*-Paketes (WICKHAM et al. 2019), der Erweiterung des *ggthemes*-Paketes (ARNOLD 2021) und dem *tidybayes*-Paketes (KAY 2022), mit der Erweiterung des *ggdist*-Paketes (KAY 2021) ausgeführt. Die Anordnung von Abbildungen wurde unter Anwendung des *gridExtra*-Paketes (AUGUIE 2017) ausgeführt.

Numerische Kovariablen wurden vor der Modellierung um den Mittelwert zentriert. Dies hat den Vorteil, dass eine Multikollinearität vermieden wird und das Intercept in einem für die Daten bedeutsamen Bereich geschätzt wird und dadurch die Modellinterpretation vereinfacht wird (GREENLAND und MANSOURNIA 2015).

3.6.2.2.1. Sickerwasser

Für die Modellierung der Zielvariable „Sickerwasserfracht“ $y_{i,t}$, mit:

$$y_{i,t} \sim \text{Gamma}(\mu_{i,t}, \text{shape}_{i,t});$$
$$y_{i,t} \in (0, \infty); i \in \{1, 2, \dots, 57\}; t \in \{01.04.2019, 02.04.2019, \dots, 31.03.2021\},$$

wobei ein Austrag y für eine der folgenden chemischen Verbindungen (jeweils in einem eigenen statistischen Modell analysiert) steht: $\{NO_3^-, N, SO_4^{2-}, S, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Mn^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+}\}$.

Als statistisches Verteilungsmodell wurde eine Gammaverteilung gewählt. Da Gammaverteilungen nur für positive Werte definiert sind, wurde allen Werten der Größe 0 ein sehr kleiner Wert zugeordnet, welcher die Höhe des Austrags vernachlässigbar gering beeinflusst (BAIO 2013). Viele der Fehlwerte sind keine echten Fehlwerte und auf die methodisch bedingte Mindestprobemenge zurückzuführen. Unter diesen Umständen ist das Vorgehen angebracht. i entspricht dem Lysimeterindex und t den Beobachtungszeitpunkt in Tagen.

In die Modellierung des Erwartungswertes $\mu_{i,t}$ der Austräge sind die zentrierten numerischen Kovariablen der Humusmächtigkeit je Lysimeter zum Zeitpunkt des Versuchsendes ($CHumusmächtigkeit_i$), der vegetativen Trockenbiomasse je Lysimeter zum Zeitpunkt des Versuchsendes ($CTrockenbiomasse_i$) und der Flussraten je Lysimeter und Beobachtungszeitpunkt ($CFlussrate_{i,t}$) eingeflossen. Zudem sind die kategorial skalierten Kovariablen Ort_i , $Jahr_{i,t}$ und $Behandlung_i$ mit eingeflossen.

Die Koeffizienten für die der $BehandlungII_i$ und i (Also die Lysimeter) wurden über Gruppierungsterme – in frequentistischen gemischten Modelle als „Random Effects“ bezeichnet – geschätzt. Gruppierungsterme sollten ab Gruppengrößen von $N > 5$ zur Schätzung verwendet werden, da sie die Schätzung für viele Koeffizienten verbessert und den Standardfehler verringern (EFRON und MORRIS 1977; GELMAN und HILL 2007).

Zwischen den Variablen $Behandlung_i$ und $BehandlungII_i$ wurde aufgrund der unterschiedlichen Qualität der Daten unterschieden. In allen Regionen liegen Kontroll- und Baggergeräumteflächen vor. Hieraus lassen sich allgemeingültige Aussagen zu der Baggerräumung ableiten, welche durch die Gruppierung nach $Behandlung_i$ ermöglicht wird. Hingegen lagen für die regionalen Vergleichsverfahren keine Wiederholungen in anderen Regionen vor, wodurch lediglich eine Aussage nach Bearbeitungsmethode und Region abgeleitet werden kann. $BehandlungII_i$ repräsentiert die Regionalkombinationen.

Nichtlineare Effekte wurden mit einem Spline über die Beobachtungszeitpunkte je Lysimeter ($f_{\mu,i}(t)$) geschätzt. Dieser wurde anstelle eines Autokorrelationsterms verwendet, da die Autokorrelation auf der gleichen Skala wie der Spline geschätzt werden würde (FAHRMEIR et al. 2008).

Das Intercept $\beta_{\mu,0}$ ist der Wert des linearen Prädiktors wenn (1) die numerischen Kovariablen gleich 0 (wenn linear bzw. parametrisch modelliert, hier: CHM, CTM und CFlussrate), (2) kategorial skalierte Kovariablen gleich der Referenzkategorie sind. Die Referenzkategorie für Ort ist A, für Jahr

ist 2019 und für Behandlung = A. (3) Die Koeffizienten der Gruppierungsterme sind gleich 0 und (4) nicht lineare Effekte der Splines gleich 0 ($f(x) = 0$).

$$\begin{aligned}
\log(\mu_{i,t}) &= \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,OrtB} \cdot (Ort_i = B) + \beta_{\mu,OrtC} \cdot (Ort_i = C) + \\
&\quad \beta_{\mu,Jahr2020} \cdot (Jahr_{i,t} = 2020) + \\
&\quad \beta_{\mu,BehandlungB} \cdot (Behandlung_i = B) + \beta_{\mu,BehandlungC} \cdot (Behandlung_i = C) + \dots + \\
&\quad \beta_{\mu,CHumusm\u00e4chtigkeit} CHumusm\u00e4chtigkeit_i + \beta_{\mu,CTrockenbiomasse} CTrockenbiomasse_i + \\
&\quad \beta_{\mu,CFlussrate} CFlussrate_{i,t} + \\
&\quad (i = 1)f_{\mu,1}(t) + (i = 2)f_{\mu,2}(t) + \dots + \\
&\quad \gamma_{\mu,A} \cdot (BehandlungII_i = A) + \gamma_{\mu,B} \cdot (BehandlungII_i = B) + \dots + \\
&\quad \gamma_{\mu,1} \cdot (i = 1) + \gamma_{\mu,2} \cdot (i = 2) + \dots; \\
&\quad Ort_i \in \{A, B, C\}; Jahr_i \in \{2019, 2020\}; Behandlung_i \in \{A, B, C\}; \\
&\quad BehandlungII_i \in \{A, B, \dots, J\}; \\
&\quad \gamma_{\mu,\xi} \sim Normal(0, \sigma_{\gamma_{\mu, BehandlungII}}); \\
&\quad \gamma_{\mu,\xi} \sim Normal(0, \sigma_{\gamma_{\mu,i}}); \\
f_{\mu,i}(t) &= \beta_{\mu,t,i} + \sum_{k=1}^K B_k(t) b_{k,i}, \text{ mit } b_{k,i} \sim Normal(\mu = 0, \sigma = \sigma_{b_{\mu}})
\end{aligned}$$

F\u00fcr den Skalenparameter $shape_{i,t}$, welcher \u00fcber eine Log-Link Funktion gesch\u00e4tzt wird, wurde neben dem Intercept $\beta_{shape,0}$ die Kovariable der zentrierten Flussrate ($CFlussrate_{i,t}$), ein Koeffizient f\u00fcr den Gruppierungsterm nach $BehandlungII_i$ und ein Spline \u00fcber die Beobachtungszeitpunkte je Lysimeter ($f_{shape,1}(t)$) gesch\u00e4tzt. Der Wert f\u00fcr das Intercept $\beta_{shape,0}$ ergibt sich analog zu dem Intercept $\beta_{\mu,0}$.

$$\begin{aligned}
\log(shape_{i,t}) &= \beta_{shape,0} + \beta_{shape,CFlussrate} CFlussrate_{i,t} + \\
&\quad \gamma_{shape,A} \cdot (BehandlungII_i = A) + \gamma_{shape,B} \cdot (BehandlungII_i = B) + \dots + \\
&\quad (i = 1)f_{shape,1}(t) + (i = 2)f_{shape,2}(t) + \dots; \\
&\quad BehandlungII_i \in \{A, B, \dots, J\} \\
&\quad \gamma_{shape,\xi} \sim Normal(0, \sigma_{\gamma_{shape, BehandlungII}}) \\
f_{shape,i}(t) &= \beta_{shape,t,i} + \sum_{k=1}^K B_k(t) b_{k,i}, \text{ mit } b_{k,i} \sim Normal(\mu = 0, \sigma = \sigma_{b_{shape}})
\end{aligned}$$

Aufgrund des Fehlens anderweitiger Informationen \u00fcber die H\u00f6he der Austr\u00e4ge in den Versuchsregionen nach Bodenbearbeitungen, wurden nichtinformative Prioris f\u00fcr die Populationsparameter gew\u00e4hlt. Tabelle 35 gibt eine \u00dcbersicht der Prioris. Eine Pr\u00fcfung der Prioris ergab eine unbedeutende Beeinflussung der Parametersch\u00e4tzung gegen\u00fcber keiner Priori. Nicht informative Prioris verbessern das Sch\u00e4tzergebnis, da sie die Vorkenntnis des m\u00f6glichen Wertebereiches ber\u00fccksichtigen, lassen aber noch ausreichend Raum f\u00fcr Extremwerte (GABRY et al. 2019).

Tabelle 35: Priors für die Sickerwasserfrachtenmodelle.

Parameter	NO3-N	SO4-S	Ca	Mg	K	Mn	Al	Fe
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; -4,1; 3,7)	<i>Student</i> (3; -4,2; 2,5)	<i>Student</i> (3; -3,6; 2,5)	<i>Student</i> (3; -4,9; 2,5)	<i>Student</i> (3; -5,1; 2,5)	<i>Student</i> (3; -6,1; 2,5)	<i>Student</i> (3; -4,6; 2,5)	<i>Student</i> (3; -9,4; 2,5)
$\beta_{\mu, \text{Behandlung}\xi}, \xi \in \{B, C\}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\beta_{\mu, \text{Ort}\xi}, \xi \in \{B, C\}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\beta_{\mu, \text{Jahr}\xi}, \xi \in \{2019, 2020\}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\beta_{\mu, \text{CHumusmächtigkeit}}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\beta_{\mu, \text{CTrockenbiomasse}}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\beta_{\mu, \text{CFlussrate}}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\sigma_{Y_{\mu, \text{BehandlungII}}}$	<i>Student</i> (3; 0; 3,7)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)						
$\sigma_{Y_{\mu, i}}$	<i>Student</i> (3; 0; 3,7)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)						
$\beta_{\mu, t, i}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\sigma_{b_{\mu}}$	<i>Student</i> (3; 0; 3,7)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)						
$\beta_{\text{shape}, 0}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)							
$\beta_{\text{shape}, \text{CFlussrate}}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\sigma_{Y_{\text{shape}, \text{BehandlungII}}}$	<i>Student</i> (3; 0; 3,7)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)						
$\beta_{\text{shape}, t, i}$	<i>Normal</i> (0; 100)							
$\sigma_{b_{\text{shape}}}$	<i>Student</i> (3; 0; 3,7)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)						

Tabelle 36: Priors für die Vorratsmodelle.

Parameter	N	S	Ca	Mg	K	Mn	Al	Fe
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; 1,3; 2,5)	<i>Student</i> (3; -0,5; 2,5)	<i>Student</i> (3; -0,7; 2,5)	<i>Student</i> (3; -2,2; 2,5)	<i>Student</i> (3; -1,5; 2,5)	<i>Student</i> (3; -2,1; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0,2; 2,5)	<i>Student</i> (3; -1; 2,5)
$\beta_{\mu, \text{Behandlung}\xi}, \xi \in \{B, C\}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu, \text{Ort}\xi}, \xi \in \{B, C\}$	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)	<i>Normal</i> (0; 100)
$\sigma_{Y_{\mu, \text{BehandlungII}}}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\beta_{\text{shape}, 0}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\sigma_{Y_{\text{shape}, \text{BehandlungII}}}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)

3.6.2.2.2. Vorrat

Die Zielvariable Vorrat (in kg/ha) $Y_i; i = 1, \dots, n$ (n = Anzahl der beprobten Lysimeter) wurde als Gammaverteilung mit dem Erwartungswert μ_i und dem Formparameter $shape_i$ über eine sogenannte Log-Link Funktion modelliert: $Y_i \sim Gamma(\mu_i, shape_i)$, wobei der Vorrat für jedes Element (N, S, Ca, Mg, K, Mn, Al, Fe) in einem separaten statistischen Modell geschätzt wurde. Für den bedingten Erwartungswert μ_i wurde folgende Modellgleichung aufgestellt:

$$\begin{aligned} \exp(\mu_i) = & \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,OrtB} \cdot (Ort_i = B) + \beta_{\mu,OrtC} \cdot (Ort_i = C) + \\ & \beta_{\mu,BehandlungB} \cdot (Behandlung_i = B) + \beta_{\mu,BehandlungC} \cdot (Behandlung_i = C) + \\ & \gamma_{\mu,A} \cdot (BehandlungII_i = A) + \gamma_{\mu,B} \cdot (BehandlungII_i = B) + \dots; \end{aligned}$$

, hierbei entsprechen die Kovariablen den Kovariablen aus dem Modell der Lysimeterausträge. Der Formparameter wurde nach folgender Gleichung geschätzt:

$$\exp(shape_i) = \beta_{shape,0} + \gamma_{shape,A} \cdot (BehandlungII_i = A) + \gamma_{shape,B} \cdot (BehandlungII_i = B) + \dots$$

Die Prioris sind in Tabelle 36 gegeben.

3.6.3. Ergebnisse

3.6.3.1. Nährstofffracht

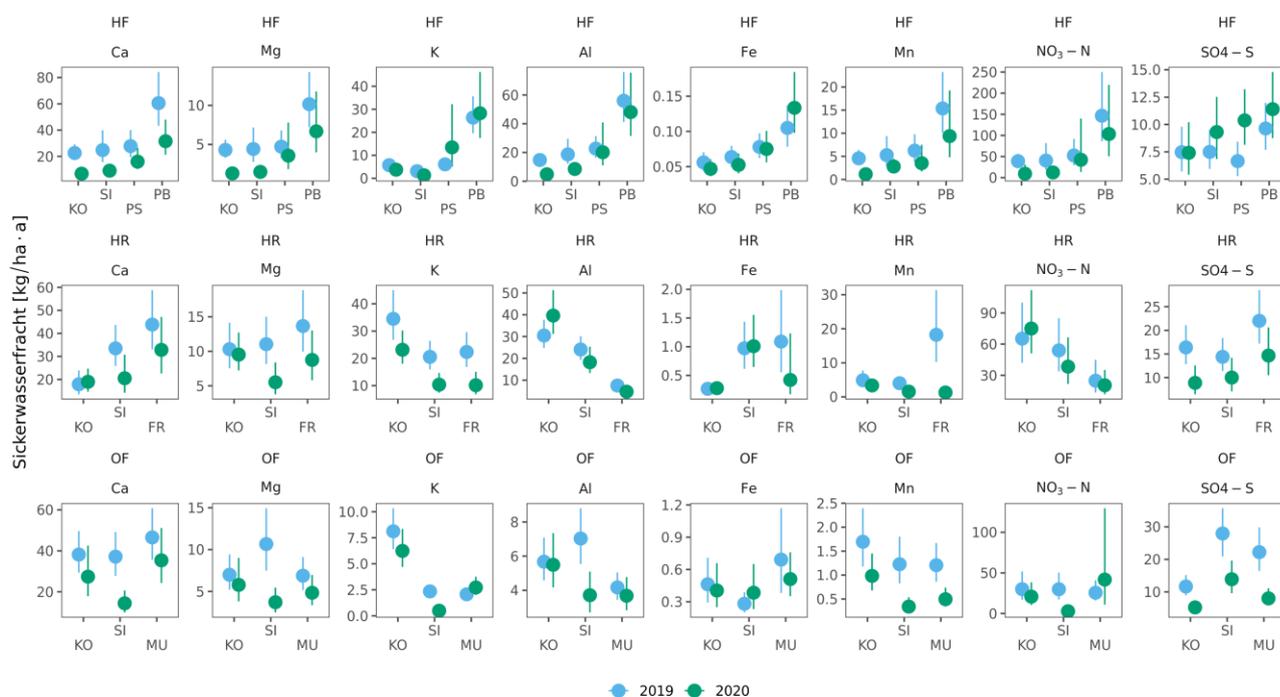


Abbildung 59: Sickerwasserfrachten nach Region (HF = Hoher Fläming, HR = Hessisches Ried, OF = Ostbraunschweigisches Flachland), Element und Jahr für die unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten (KO = Kontrolle, SI = Silvafix, PS = Streifenpflugsohle, PB = Streifenpflugbalken, FR = Fräse, MU = Mulchen). Der Punkt stellt den Erwartungswert und die Intervalle das 95 % Kreditivitätsintervall dar.

Im Hohen Fläming waren die Sickerwasserfrachten der Pflugbalken deutlich höher als alle anderen Bearbeitungsvarianten, allem voran beim Nitrat-Stickstoff (Abbildung 59). Im Hessischen Ried zeigte sich ein diffuses Bild bei den Austrägen der Kationen, beim Nitrat-Stickstoff fiel die Abnahme mit zunehmender Bodenbearbeitungsintensität auf. Im Ostbraunschweigischen Flachland waren die Sickerwasserfrachten aller Bodenbearbeitungsvarianten je Element gleichauf.

Im zweiten Beobachtungsjahr lagen die Sickerwasserfrachten bei den meisten Regionen, Bodenbearbeitungen und Elementen unter denen im ersten; teilweise auch für die Kontrolle. Eine besonders auffällige Ausnahme stellte der Sulfat-Schwefel im Hohen Fläming dar.

3.6.3.2. Nährstoffvorräte

Das Silvafixbearbeitungsverfahren zeigte im überregionalen Vergleich deutlich geringere Vorräte an basischen Kationen als die Kontrolle. Am stärksten war dieser Effekt im Hohen Fläming ausgeprägt, für Magnesium wurde der Vorrat in einer Bodentiefe bis 30 cm z.B. um 80 % gemindert. Das Streifenpflugverfahren reduzierte in den Pflugsohlen die Nährstoffe in der Größenordnung wie der Silvafix, allerdings nahm in den Bereichen der Pflugbalken die Nährstoffversorgung in gleicher Größenordnung zu. Im Hessischen Ried zeigte die Fräsbearbeitung keine Vorratsminderungen. Im Ostbraunschweigischen Flachland zeigte die Mulchbearbeitung keine Vorratsminderungen.

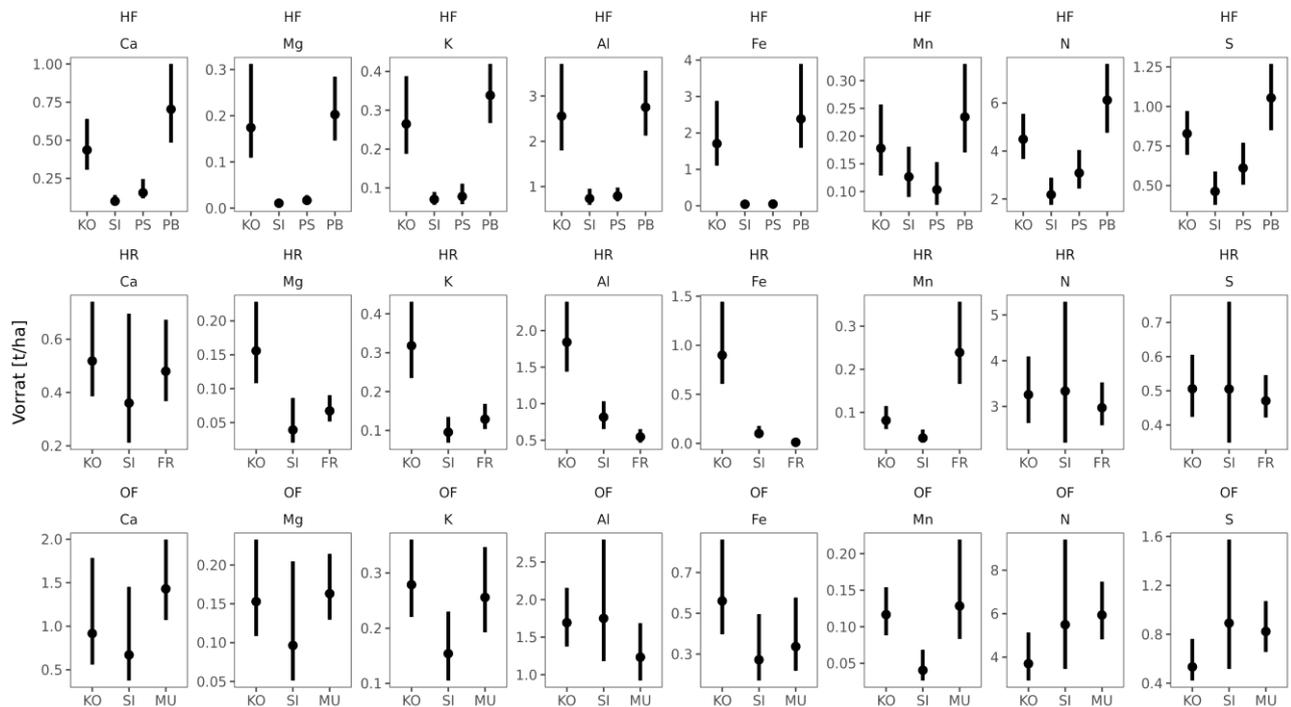


Abbildung 60: Nährstoffvorräte in den Lysimetern am Ende des zweijährigen Beobachtungszeitraums (Humusaufgabe bis 30 cm Bodentiefe) nach Region (HF = Hohen Fläming, HR = Hessisches Ried, OF = Ostbraunschweigisches Flachland) und Element für die unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten (KO = Kontrolle, SI = Silvafix, PS = Streifenpflugsohle, PB = Streifenpflugbalken, FR = Fräse, MU = Mulchen). Der Punkt stellt den Erwartungswert und die Balken das 95 % Kreditibilitätsintervall dar.

3.6.4. Diskussion

Hypothese 1: Die Hypothese, dass Bodenbearbeitungen zu höheren Nährstofffrachten führen als nicht bodenbearbeitete Flächen, können wir nicht pauschal bestätigen. Nur für die Pflugbalken im Hohen Fläming kann die Hypothese bestätigt werden. Nicht nur bei den Bodenbearbeitungen, sondern auch bei den Kontrollen nahmen die Sickerwasserfrachten im zweiten Jahr ab. Einerseits steigerten Bodenbearbeitungen die Nährstofffrachten, andererseits waren Faktoren wie Vegetation und Humusmächtigkeit steuernde Einflussgrößen und alle interagierten.

Neben dem Bestandesalter ist das Risiko von Austrägen auch von der Baumart abhängig (ROTHE und MELLERT 2004). Ökosystemstörungen begünstigen Nährstofffrachten (VITOUSEK et al. 1979). Störungen durch Sturmschäden (MELLERT et al. 1998; ROTHE und MELLERT 2004), Borkenkäferkalamitäten (HUBER 2005; HUBER et al. 2004; MIKKELSON et al. 2013) oder auch Hiebsmaßnahmen (BORMANN et al. 1968; KLINCK et al. 2013; KOHLPAINTNER et al. 2009; WEIS et al. 2006; WEIS et al. 2001), können ebenso erhöhte Frachten hervorrufen wie Bodenbearbeitungen (LUNDMARK-THELIN und JOHANSSON 1997; MCLAUGHLIN et al. 2000; STAAF und OLSSON 1994).

Da Bodenbearbeitungen zur Bestandesverjüngung durchgeführt werden, gehen sie mit anderen Störungen einher. Ob Bodenbearbeitungen ein zusätzlicher Treiber für Nährstoffverluste sind hängt von ihrer jeweiligen Wirkung auf die verbliebene Vegetation und den Humus ab. Zunehmende Begleitvegetation ist bereits nach wenigen Jahren in der Lage durch Ökosystemstörungen hervorgerufene Nähelementausträge vollständig zu absorbieren (HEDWALL et al. 2013; KLINCK et al.

2013; MELLERT et al. 1998; ROTHE und MELLERT 2004; WEIS et al. 2001). Störungen regen die Mineralisation des näherelementreichen Humus an. Somit nimmt mit zunehmender Humusmächtigkeit und Humusabbaubarkeit das Potential als Quelle für Nährelementfrachten zu (KOHLPAINNER et al. 2009; MATEJEK et al. 2008), welche in den Wintermonaten mit zunehmender Flussrate realisiert werden (BORMANN et al. 1968; STREBEL et al. 1989).

Stark den Begleitwuchs regulierende Bodenbearbeitungen führen auf vegetationsreichen Standorten zu erhöhten Frachten, wie im Hohen Fläming. Auf vegetationsarmen Standorten ist prinzipiell nach Bodenbearbeitungen mit hohen Frachten zu rechnen, wenn allerdings im Rahmen der Bodenbearbeitung Humus und Schlagabraum in den Mineralboden eingearbeitet werden, kann das zu einer gehemmten Mineralisierung und dadurch verringerten Frachten führen, wie im Hessischen Ried die Fräsbearbeitung zeigte. Eine Studie zu CO₂-Emissionen bestätigt dies durch Messung verminderter CO₂-Emissionen bei steigender Bodenbearbeitungsintensität (MJÖFORS et al. 2015). Auf reichen Standorten mit einer hohen Kationenaustauschkapazität und einer ausgeprägten Vegetation, welche sich zeitnah trotz Bodenbearbeitungen wieder einstellt, sind keine erhöhten Frachten erkennbar, wie im Ostbraunschweigischen Flachland.

Eine differenzierte Betrachtung der Streifenpflugbearbeitung im Hohen Fläming zeigt die mikrostandörtlichen Effekte. Bereiche in denen der Mineralboden freigelegt wurde zeigten geringe Frachten auf dem Niveau der Kontrolle. Bereiche in denen der Humus konzentriert wurde zeigten erhöhte Frachten. Bei streifenweiser Bodenbearbeitung in Finnland wurde in Bereichen mit Mineralbodenfreilegung der geringste Austrag, unterlassener Bearbeitung ein mittlerer Austrag und in Bereichen mit Humusablagerung (Humuswällen) der höchste Austrag gemessen (PIIRAINEN et al. 2007). Die Unterschiede in Bereichen mit unterlassener Bodenbearbeitung zu unseren Beobachtungen auf der Kontrollfläche sind durch Unterschiede in der Vegetationsdecke zu begründen. So zeigte die Kontrolle ohne Bodenbearbeitung im Hohen Fläming die geringsten Nährstofffrachten bei einer geschlossenen Bodenvegetationsdecke. Aus Bereichen mit Mineralbodenfreilegung wurden Nährelemente verlagert, was Nährstofffrachten reduziert (STEVENS und HORNING 1990).

Die reduzierten Nitratfrachten nach der Fräsbearbeitung erklären wir neben der gehemmten Mineralisation durch eine N-Immobilisierung. Fräsen reichert den Mineralboden bis 30 cm Tiefe mit erheblichen Mengen an organischem Material an. Große Anteile sind holzigen Ursprungs (Schlagabraum, Stubben), mit einem weiten C/N-Verhältnis (BLACK und HARDEN 1995), welche für eine N-Fixierung in Frage kommen (LAIHO und PRESCOTT 2004). Böden mit weiten C/N-Verhältnissen weisen geringere N-Austräge auf als Böden mit engen C/N-Verhältnissen (BORKEN und MATZNER 2004; LOVETT et al. 2002). Dagegen spricht die Untersuchung von FOX et al. (1986), bei der Bodenbearbeitungen zu verringerten C/N-Verhältnissen geführt haben. Ein Entfernen des groben holzigen Materials bei der Bodenhomogenisierung während der Probenvorbereitung im Labor bewirkte engere C/N-Verhältnisse im Feinboden der Fräsvariante (Werte nicht gezeigt). Dies erklärt die unterschiedlichen Ergebnisse.

Sulfatschwefel wirkte im Ostbraunschweigischen Flachland als einer der Hauptvektoren für Nährelementfrachten. Zum gleichen Ergebnis kam ein im Solling durchgeführter Hiebsformenversuch (KLINCK et al. 2013). Langzeitbeobachtungen (Level II Flächen) zeigen noch heute erhöhte Sulfatschwefel-Konzentrationen als Folge des sauren Regens (JOHNSON et al. 2018). Ein bayerischer Hiebsformenversuch wirkte unterschiedlich auf Nitrat- und Sulfatkonzentrationen im Sickerwasser (WEIS et al. 2006) und bestätigt unsere Beobachtung.

Entscheidender Faktor für die Höhe der Frachten ist die Zeitspanne der Wiederbesiedelung des Standorts nach Bodenbearbeitung durch Begleitvegetation. In einer Untersuchung im Solling wurde durch das Ausbringen von Kalk nach einem Hieb der Wuchs der Begleitvegetation so stark angeregt, dass die Nährstoffkonzentrationen in der Bodenlösung auf dem Niveau des unbehandelten Bestandes blieben (BAUHUS und BARTSCH 1995). Schlagabraum behindert die Entwicklung von Begleitvegetation (STEVENS und HORNING 1990), daher kann Schlagräumung die Begleitwuchsetablierung fördern.

Da nur gestörte Flächen untersucht wurden (auch die Kontrolle wurde geräumt), war es unmöglich zeitlich abzuschätzen wann die Frachten auf das Niveau eines ungestörten Bestandes sinken. Ein Beobachtungszeitraum von 2 Jahren erscheint zur Beantwortung dieser Fragestellung zu kurz. HEDWALL et al. (2013) konnten für einen Kahlhieb mit und ohne Schlagräumung nach 3 Jahren keine erhöhten N-Konzentrationen mehr feststellen. In einem Hiebsformenversuch im Solling wurden ähnliche Beobachtungen gemacht (KLINCK et al. 2013). Andere Untersuchungen für Schweden zeigen einen Rückgang der Austräge auf das Niveau vor der Störung durch Kahlhieb/Sturm nach etwa 5 Jahren (HELLSTEN et al. 2015; RING et al. 2013; STAAF und OLSSON 1994).

Hypothese 2: Entgegen der aufgestellten Hypothese liegen die Frachten der Silvafixräumung auf dem Niveau der Kontrollen und beim Nitrat darunter. Gegenüber den anderen Bearbeitungsverfahren zeigen sich über alle Elemente geringere Frachten. Silvafixräumungen verlagern Biomasse (und somit auch Nährstoffe) auf die Gasse. Nährstoffentzüge mindern Frachten (BORMANN et al. 1968; HELLSTEN et al. 2015; STEVENS und HORNING 1990; WALL 2008). Wie die Streifenpflugbearbeitung mikrostandörtliche Gegensätze bei den Nährstofffrachten herbeiführt (siehe oben), liegt hier der Verdacht einer ähnlichen Wirkung – auf einer größeren Skala – vor. Um diesen Verdacht zu prüfen wurden $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Beprobungen durchgeführt. Kapitel 3.8 veranschaulicht das Vorgehen und die Ergebnisse der $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Beprobung.

Im Vergleich zu den hohen Nährstoffverlagerungen durch Bodenbearbeitung mit dem Silvafix bzw. dem Streifenpflug sind die jährlichen Nährstofffrachten in den Lysimetern gering gewesen. Allerdings sind die Nährstofffrachten für das Silvafixverfahren und den Streifenpflug im Vergleich zu den auf der Fläche bzw. in der Pflugsohle verbliebenen Nährstoffvorräten hoch (z.B. für Mg ca. 40 %).

Hypothese 3: Die Nährstofffrachten nach Bodenbearbeitungen sind im Verhältnis zu den nach der Bodenbearbeitung auf der Fläche verbliebenen Bodennährstoffvorräten teilweise erheblich. Das liegt zu einem großen Teil daran, dass beim Silvafixverfahren und Pflügen groß- bzw. kleinflächig Biomasse und Nährstoffe verlagert werden, so dass selbst relativ geringe Nährstofffrachten einen großen Einfluss auf die verbliebenen geringen Nährstoffvorräte haben. Das heißt, die Biomasse- und Nährstoffverlagerungen während der Bodenbearbeitung spielen eine größere Rolle für die Nährstoffverluste auf der Fläche als die Nährstoffverlagerungen mit dem Sickerwasser. Somit kann die Hypothese für das Silvafixverfahren und die Pflugsohle nicht bestätigt werden, für den Pflugbalken und das Mulchen und Fräsen hingegen schon.

Wir konnten zeigen, dass die Silvafix-Bodenbearbeitung mit erheblichen Nährstoffverlagerungen einhergeht. Der Silvafix reduzierte den Begleitwuchs nachhaltig. Bei üppigem Schlagabraum und üppiger Vegetationsdecke wurde viel Biomasse auf die Bereiche der Rückegassen verlagert. Da in diesen Komponenten auf armen Standorten die Nährelementvorräte konzentriert sind, kommt es zu einem flächigen Nährelemententzug und einer Nährelementanreicherung auf der Rückegasse. Auf armen Standorten wirkt es sich besonders stark auf den Ca- und Mg-Vorrat aus. Nach dem Bewertungsschema der ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) verschlechterte die Silvafixbearbeitung die Nährstoffversorgung gegenüber der Kontrolle im Hohen Fläming von gering/mittel zu sehr gering, im Hessischen Ried von gering/mittel zu gering und im Ostbraunschweigischen Flachland von mittel zu gering/mittel. Wird der Oberboden abgeschoben zeigen sich signifikante Abnahmen im N-Vorrat und in den austauschbar gebundenen Kationen (BOCK und VAN REES 2002).

Das Verfahren führte zu erheblichen Nährstoffvorratsminderungen auf der Fläche, welche in der Größenordnung einem Biomasseentzug durch Vollbaumnutzung gleichkommen. Besonders betroffen sind Ca, K und Mg, weniger N. PRETZSCH et al. (2014) geben für Derbholznutzungen eines schwächer wüchsigen Bestandes im Zuge einer geregelten Forstwirtschaft jährliche Nährstoffentzüge von 4 – 6 kg/(ha*a) für Ca und 0,5 kg/(ha*a) für Mg für unterschiedliche Baumarten an. Die von ihnen angegebenen Depositionen liegen auf dem gleichen Niveau und gleichen die Nährstoffentzüge durch Derbholznutzungen aus. Für Vollbaumnutzungen geben PRETZSCH et al. (2014) etwa doppelt so hohe Nährstoffentzüge an, welche zu negativen Nährstoffbilanzen führten und somit die Leistungsfähigkeit des Standortes mindern. Bei einer Umtriebszeit von 200 Jahren für Eiche wäre dies ein zusätzlicher Entzug von ca. 1.000 kg/ha für Ca und 200 kg/ha für Mg. Die

Silvafixbearbeitung im Hohen Fläming reduzierte den Mg-Vorrat um 160 kg/ha, welches einer 160-jährigen Vollbaumnutzung gleich kommt.

Langfristig lassen flächige Nährstoffvorratsminderungen Wuchsdepression erwarten (ACHAT et al. 2015). Eine Stockrodung per Raupe (bei der der Oberboden auf Wälle geschoben wird) reduzierte die Vorräte an basischen Kationen signifikant und dadurch die Wuchsleistung von Eiche (NOPP et al. 1998). Um bei solch massiven Eingriffen Wuchsdepressionen zu minimieren sollten die Wallabstände weniger als 20 m betragen (STRUCK 1999) oder streifen- oder plätzeweise Bodenbearbeitungen Anwendung finden (ALCÁZAR et al. 2002; LÖF et al. 2006). Ein schwedischer Bodenbearbeitungsversuch weist keine Verminderung des N-Vorrates 10 Jahre nach Vollumbruch oder plätzeweiser Bodenverwundung auf Ökosystemebene nach (NORDBORG et al. 2006).

Die regionalen Bodenbearbeitungsverfahren Mulchen und Fräsen minderten nicht direkt die Nährstoffvorräte, da sie ohne Verlagerungen arbeiten. Bei streifenweiser Bearbeitung, wie im Hohen Fläming, treten allerdings mikrostandörtlich Verlagerungen auf (PIIRAINEN et al. 2007). Eine kanadische Studie bestätigt die Beobachtungen. Für Fräsen blieb der Vorrat gleichauf mit der unbearbeiteten Kontrolle (BOCK und VAN REES 2002).

3.7. Nebenergebnis der Analyse der Pflanzenbiomasse bei der Abschlussinventur

3.7.1. Einleitung und Methodik

Neben einer C/N-Analyse wurde auch ein Elementaufschluss der Pflanzen, die in den Lysimetern gewachsen sind, durchgeführt. Dies erschien nach ersten Datensichtungen und dem Verdacht von Nährstoffverlagerungen sinnvoll, um der Frage nachzugehen, ob eine unterschiedliche Nährstoffversorgung der Vegetation nachgewiesen werden kann. Klassischer Weise wäre hier eine Blattprobennahme an den Eichen in Frage gekommen, schied aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraumes aber aus, da der Verdacht bestand, dass die Pflanzen noch aus Baumschulzeiten gut mit Nährstoffen versorgt waren. So wurde alternativ die Begleitvegetation herangezogen, in dem Wissen, dass die Artenzusammensetzung variiert und die Aussagekraft einschränkt.

3.7.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse in Abbildung 61 zeigen auffällig niedrige Mediane der Silvafixbearbeitung gegenüber den Kontrollen für C, N, Ca und Mg. Für die anderen Elemente lag kein Unterschied zwischen den Behandlungen vor. Unter den Regionalverfahren sticht der Pflugbalken des Streifenpflugverfahrens mit erhöhten Gehalten an N, Mg, K, P und S sowie geringeren C-Gehalten als die anderen Verfahren im Hohen Fläming hervor. Beim Vergleich der C/N-Gehalte sind einzig die geringen Gehalte der Pflugbalken auffällig (Abbildung 62).

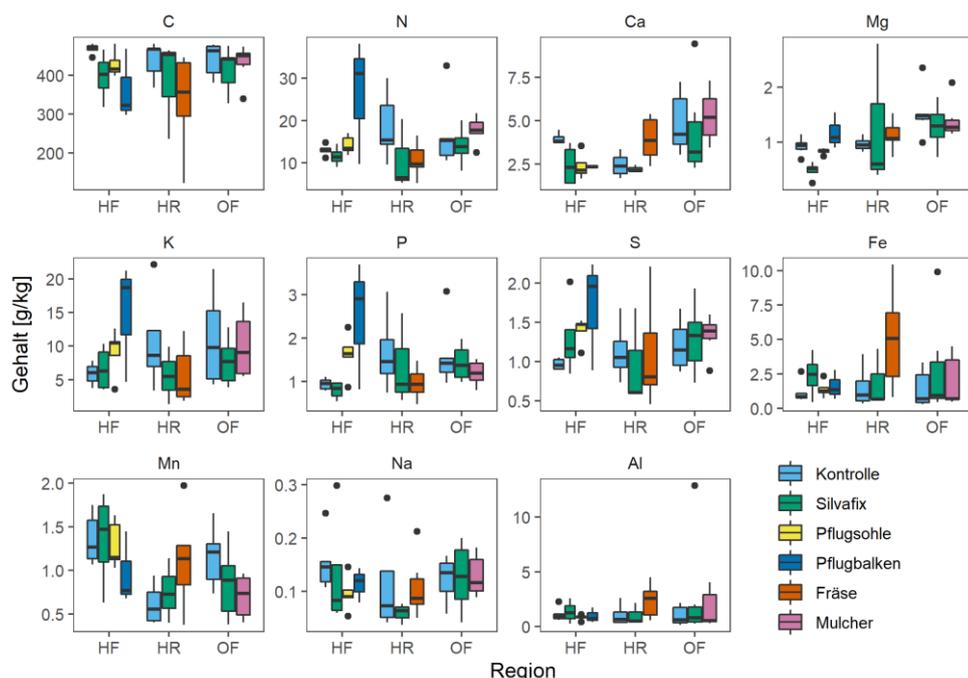


Abbildung 61: Boxplots der Nährelementgehalte der Vegetation in den Lysimetern nach Region und Bearbeitungsvariante (HF = Hoher Fläming, HR = Hessisches Ried, OF = Ostbraunschweigisches Flachland).

3.7.3. Diskussion

Die geringeren Elementgehalte in der Biomasse der Silvafixbearbeitung stimmten mit den geringen Sickerwasserfrachten der Lysimeter in der Silvafixbearbeitung überein. Dies verstärkt die Vermutung, dass durch die Flächenräumung mit dem Silvafix die Nährstoffe verlagert wurden. Die hohen Elementgehalte in der Biomasse der Pflugbalken spiegelten die hohen Elementausträge dieser Lysimeter wieder. Dies war ein weiteres Indiz für hohe Mineralisation unter Flächen mit Humuskonzentration und zeigte gleichzeitig, dass die Begleitvegetation in der Lage war, höhere Nährstoffpotentiale zu nutzen. Dies nicht nur durch die Bildung von zusätzlicher Biomasse, sondern zusätzlich durch Steigerung der Elementgehalte (PRETZSCH et al. 2014).

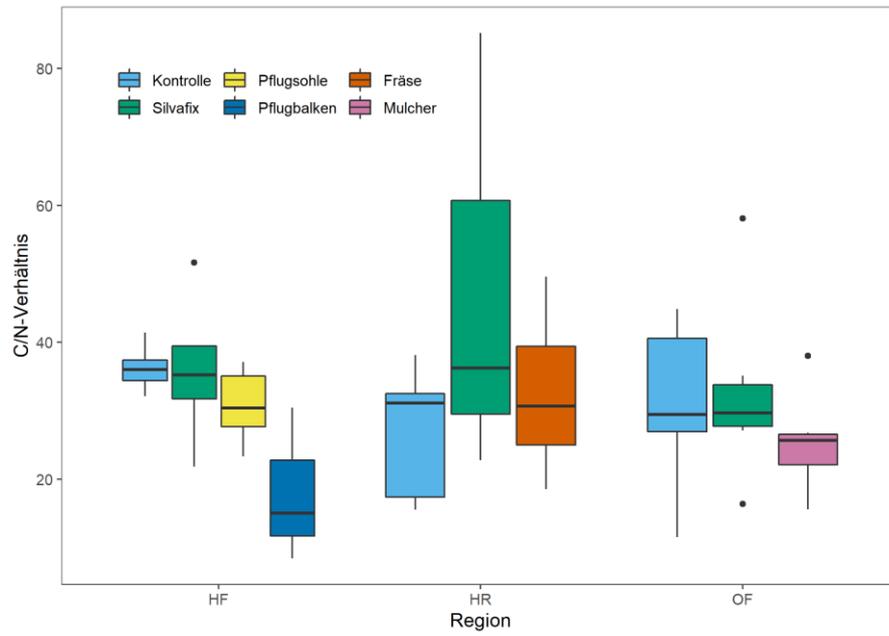


Abbildung 62: Boxplots der C/N-Verhältnisse der Vegetationsanalyse aus den Lysimetern nach Region und Bearbeitungsvariante (HF = Hoher Fläming, HR = Hessisches Ried, OF = Ostbraunschweigisches Flachland).

3.8. Einfluss von Bodenbearbeitungen auf N_{\min} -Vorräte

3.8.1. Einleitung

Die NO_3-N_{\min} -Beprobung dient der Ermittlung des pflanzenverfügbaren Stickstoffs. Anhand der Stickstoffverfügbarkeit wird der Einfluss von Bodenbearbeitung auf die Mineralisationsraten abgeleitet. Aufgrund des jährlichen Witterungsverlaufs sind die NO_3-N_{\min} -Gehalte im Herbst, vor der Bildung von Sickerwässern, am höchsten, weshalb die Proben im Optimalfall zu diesem Zeitpunkt genommen werden sollten. Da im Winter die Mineralisationsraten, und die Pflanzenaufnahme gering sind und NO_3-N_{\min} mit dem Sickerwasser leicht verlagert wird, ist die Annahme, dass bei hohen Herbst NO_3-N_{\min} -Gehalten hohe Nährstoffauswaschungen mit der Grundwasserneubildung einhergehen.

3.8.2. Methodik

Es wurden in jeder Projektregion im Oktober 2020 von jeder Parzelle der Intensivflächen und von jeder Extensivfläche je Tiefenstufe drei Mischproben aus je drei Einstichen gebildet.

Nach der Probenahme wurde ein KCl-Extrakt aufgesetzt. Im Gegensatz zum Extrakt mit $CaCl_2$ ist KCl in der Lage auch die NH_4^+ -Ionen zu lösen (KUDERNA et al. 1993). 20 g der feldfrischen Probe wurden mit 80 ml einmolarer KCl-Lösung angesetzt und 24 Std. bei 4 °C gelagert. Vor der Filtration mit einer Membranfiltrationsanlage, wurden die Proben eine Stunde lang geschüttelt. Anschließend wurde der Gehalt an NO_3^- -Ionen ionenchromatografisch bestimmt und mit der TRD zu einem Vorrat in kg/ha verrechnet. Für die Bereiche unter den Silvafix-Wällen konnten keine TRD-Proben gewonnen werden. Daher wurden hier mit den TRD-Werten der Kontrolle – im Bewusstsein einer konservativen Schätzung durch mögliche systematische Unterschätzungen im Oberboden aufgrund der Befahrung der Gasse – gerechnet.

3.8.3. Ergebnisse

In Bereichen mit Humuskonzentration (Silvafix-Wall und Pflugbalken) zeigten sich bis in die unterste Tiefenstufe erhöhte NO_3-N_{\min} -Vorräte (Abbildung 63). Am höchsten waren die Vorräte im Ostbraunschweigischen Flachland mit bis zu 40 kg/ha. Alle anderen Behandlungen zeigen geringe Vorräte. Auf den Extensivflächen (Werte sind nicht gezeigt) lagen alle Werte im Median bei unter 3 kg/ha je Tiefenstufe.

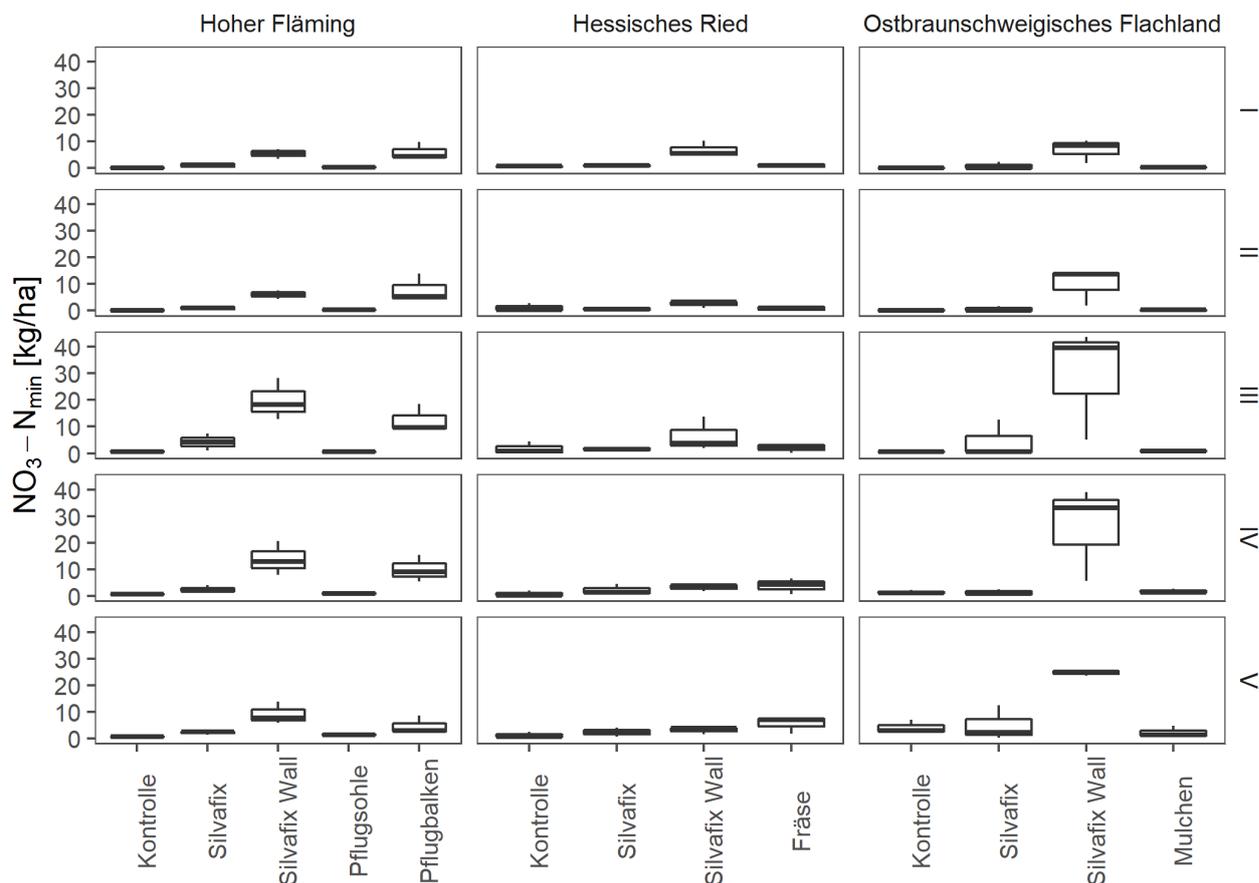


Abbildung 63: Boxplots der $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte nach Regionen, Tiefenstufen und Bodenbearbeitungsverfahren der Beprobung im Herbst 2020 (I = Tiefenstufe 0 – 5 cm; II = Tiefenstufe 5 – 10 cm; III = Tiefenstufe 10 – 30 cm; IV = Tiefenstufe 30 – 40 cm; V = Tiefenstufe 60 – 90 cm).

3.8.4. Diskussion

Die hohen $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte in der untersten Tiefenstufe in den Bereichen mit Humuskonzentration (v.a. Silvafix-Wall) legen die Vermutung nahe, dass auch in Austragtiefe mit hohen $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen im Sickerwasser zu rechnen ist und damit die Gefahr von Nährstoffverlusten und Grundwasserbeeinträchtigungen besteht.

Bei einem Vergleich der $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte mit den Austrägen der Mikrokosmenlysimeter fallen die sehr viel niedrigeren Stickstoffgehalte bei der $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Analyse für die Kontrolle im Hessischen Ried auf. Dieser Effekt lässt sich durch den unterschiedlichen Bewuchs erklären. In den Mikrokosmenlysimetern wird die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Sickerwasserfracht bei fehlender Vegetation systematisch durch Ausschluss von Wurzelaufnahme der Pflanzen im Umfeld überschätzt. Dies tritt besonders bei der Kontrolle im Hessischen Ried zutage, welche vollflächig von Spätblühender Traubenkirsche durchwurzelt ist, aber nicht vollflächig von Vegetation bedeckt wird. Um die Werte vergleichbar zu halten, wäre ein aktives Management der Begleitvegetation notwendig gewesen, welches zum Ziel hat, den Bewuchs innerhalb der Mikrokosmenlysimeter mit dem Bewuchs der umliegenden Fläche vergleichbar zu halten.

Die $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte relativieren die $\text{NO}_3\text{-N}$ Sickerwasserfrachten der Kontrolle im Hessischen Ried aus den Mikrokosmenlysimetern und zeigen die Grenzen des Systems auf. Auf der anderen Seite bestätigen die $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte die Annahme erhöhter Stickstofffrachten unter den Silvafix-Wällen, unter denen mit Mikrokosmenlysimetern nicht gemessen werden konnte.

3.9. Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf die Mikrobiologie

3.9.1. Einleitung

Mikroorganismen sind wichtige Akteure im Abbauprozess organischer Biomasse. Nach Abbau organischer Biomasse stehen die Nährstoffe den Pflanzen wieder zur Verfügung. Böden mit einer hohen mikrobiellen Aktivität sind fruchtbar und weisen eine gute Bodengare auf. Zur Bewertung der Auswirkung von Eingriffen in die Bodenstruktur durch Bodenbearbeitungen auf die Mikroorganismen, wurden Untersuchungen der mikrobiellen Biomasse und der CO₂-Atmung ausgeführt.

Die Hypothesen sind, dass Bodenbearbeitungen die mikrobielle Aktivität anregen, die C_{mik}/N_{mik}-Verhältnisse beeinflussen, und kurzfristig die mikrobiologischen Abläufe stören (als Indikator dient der metabolische Quotient).

3.9.2. Methodik

Die Probennahme im Feld fand analog der der NO₃-N_{min}-Beprobung im Herbst 2019 statt. Lediglich die Probennahmetiefen unterschieden sich. Aufgrund sehr geringer mikrobiologischer Aktivitäten in den unteren Bodenhorizonten, wurden ausschließlich die oberen drei Mineralbodentiefenstufen bis 30 cm Tiefe (Abbildung 29) beprobt.

3.9.2.1. Mikrobielle Biomasse

In einem ersten Schritt wurde an einer Teilprobe durch einen Kaliumsulfat-Extrakt (K₂SO₄) der Gehalt an C und N in der Probe ermittelt (VANCE et al. 1987), C und N in Mikroorganismen wurde bei der Extraktion nicht gelöst. Eine zweite Teilprobe wurde unterdessen über einen Zeitraum von einem Tag mit Chloroform behandelt. Chloroform tötet die Mikroorganismen und beschädigt die Zellen, so dass bei der Extraktion auch C und N aus Mikroorganismen gelöst wird. Anschließend wurde auch aus der zweiten Teilprobe ein Kaliumsulfat Extrakt gewonnen und beide Proben im Total-Organic-Carbon-Analysator (im folgenden TOC) gemessen (simultane Messung des C- und N-Gehaltes mit zwei unterschiedlichen Detektoren). Unter Berücksichtigung eines Korrekturfaktors wurde aus der Differenz der zweiten und ersten Teilprobe die mikrobielle Biomasse (C_{mik}) und der N-Gehalt der Mikroorganismen N_{mik} errechnet (WU et al. 1990).

3.9.2.2. CO₂-Atmung

Die CO₂-Atmung kann als Maß der mikrobiellen Aktivität herangezogen werden. Durch den Abbau organischer Substanz zur Energiegewinnung setzen die Mikroorganismen CO₂ frei. Nach der Probennahme wurden die Bodenproben feldfrisch auf einen Wassergehalt von 50 % eingestellt und für fünf Wochen in einem dunklen klimatisierten Raum bei 8 °C inkubiert. Im Anschluss der Inkubationsphase gelangten die Proben in gasdichte Behältnisse und verblieben in ihnen für 72 Stunden. Am Anfang und Ende des 72 Stunden-Zeitraumes wurde eine Gasprobe entnommen und in einem Gaschromatographen auf den CO₂-Gehalt untersucht. Die Differenz aus zweiter und erster Probennahme zeigte die mikrobielle Aktivität. Aus der CO₂-Atmung und der mikrobiellen Biomasse wurde anschließend der metabolische Quotient errechnet, welcher die CO₂-Atmung in Relation zur Biomasse angibt. Ist die CO₂-Atmung im Verhältnis zur mikrobiellen Biomasse (C_{mik}) hoch (großer metabolischer Quotient), deutet das auf eine Störung bzw. Veränderung des Lebensraumes der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden hin.

3.9.3. Ergebnisse

Die mikrobielle Biomasse nahm mit zunehmender Bodentiefe in allen Regionen ab (Abbildung 64). Die höchsten C_{mik}-Gehalte waren im Ostbraunschweigischen Flachland im Humus und der ersten Tiefenstufe vorzufinden. In der zweiten und dritten Tiefenstufe lagen im überregionalen Vergleich keine Unterschiede vor. Im Hohen Fläming hatten die Bearbeitungsvarianten in allen Tiefenstufen geringere C_{mik}-Gehalte als die Kontrolle. Im Hessischen Ried nahmen die Bearbeitungsvarianten in der ersten Tiefenstufe geringere C_{mik}-Gehalte an, in der zweiten Tiefenstufe waren sie mit der Kontrolle gleich auf und in der dritten Tiefenstufe lagen die C_{mik}-Gehalte über der Kontrolle. Im

Ostbraunschweigischen Flachland lagen die C_{mik} -Gehalte der Mulchbearbeitung in allen Tiefenstufen über der Kontrolle.

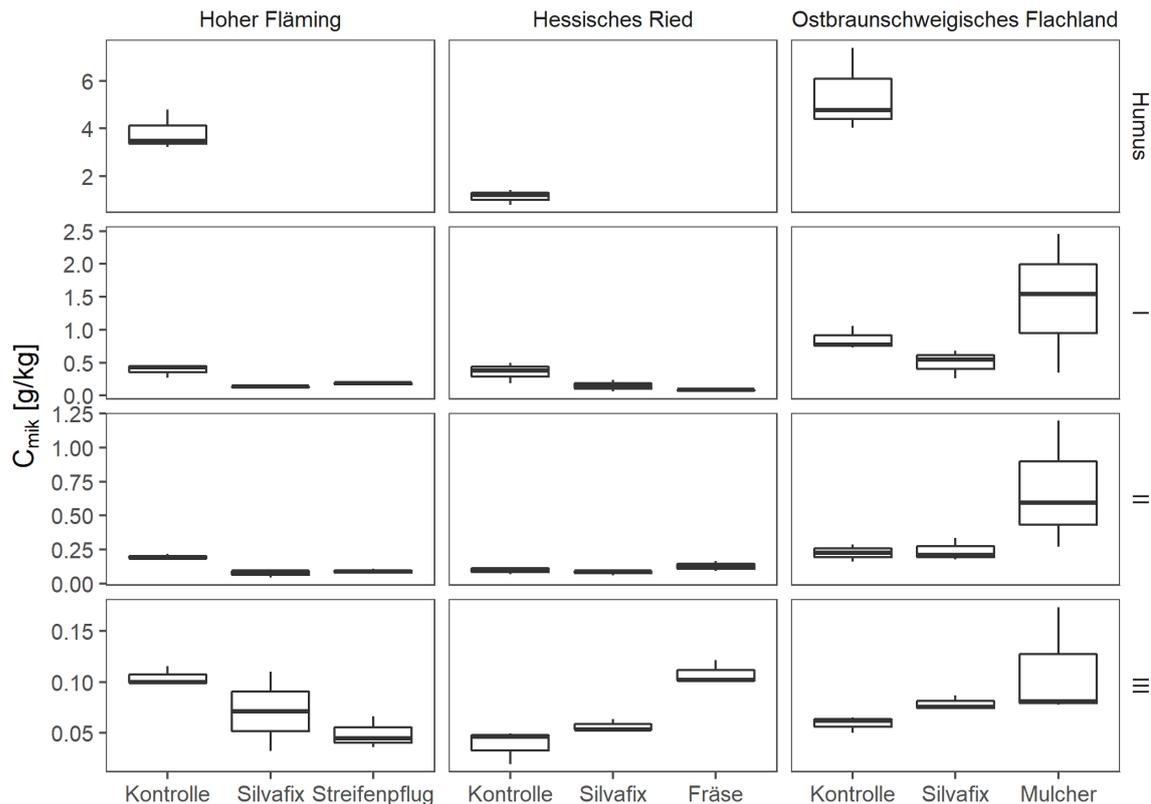


Abbildung 64: C_{mik} -Gehalte der Böden nach Regionen, Bodenbearbeitungen und Tiefenstufen (I = Tiefenstufe 0 – 5 cm; II = Tiefenstufe 5 – 10 cm; III = Tiefenstufe 10 – 30 cm).

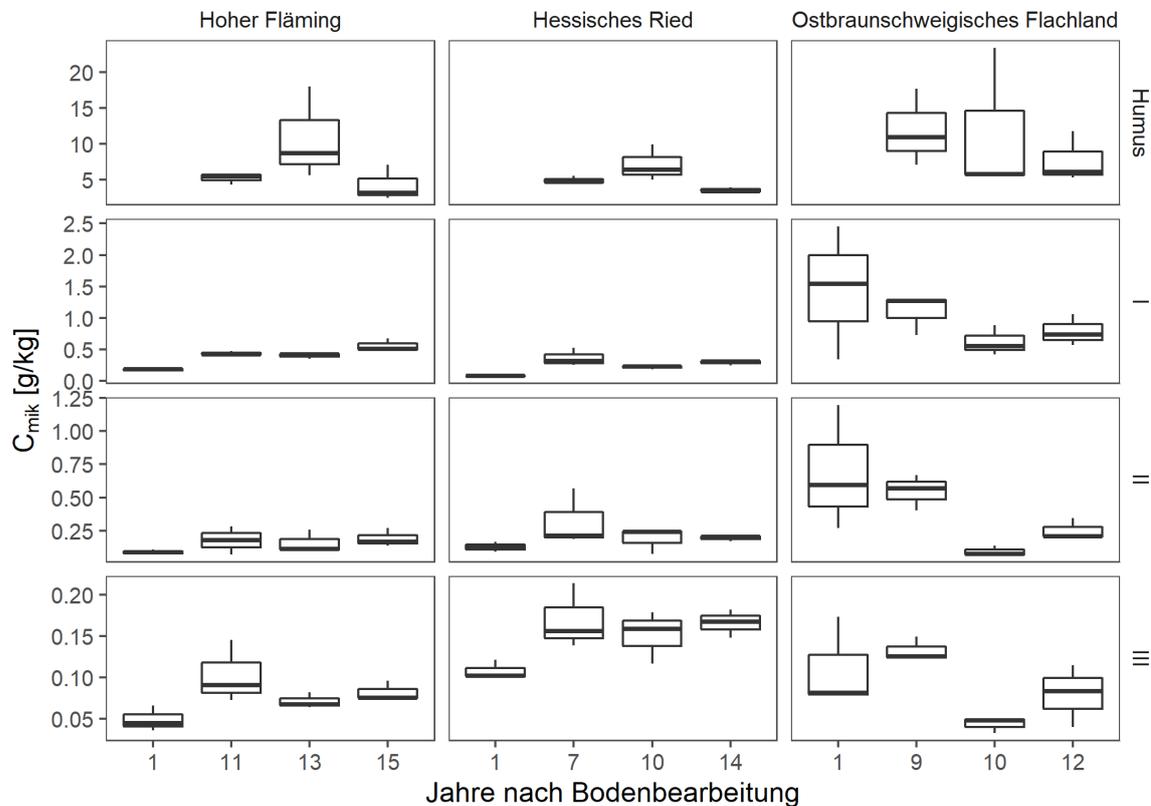


Abbildung 65: C_{mik} -Gehalte nach Regionen und Tiefenstufen für die regionalen Standardverfahren (1 = Neuanlage, 2; 3; 4 sind die zeitlich älteren Extensivflächen mit aufsteigendem Alter, I = Tiefenstufe 0 – 5 cm; II = Tiefenstufe 5 – 10 cm; III = Tiefenstufe 10 – 30 cm).

Ein Vergleich des C_{mik} -Gehalts der neu angelegten Parzelle mit den älteren der regionalen Standardverfahren zeigte, dass sich die durch Bodenbearbeitungen offensichtlich verringerten C_{mik} -Gehalte im Hohen Fläming und im Hessischen Ried nach wenigen Jahren wieder auf das Niveau von Flächen ohne Bodenbearbeitung (Kontrolle, siehe Abbildung 64) normalisierten. Im Ostbraunschweigischen Flachland nahm der C_{mik} -Gehalt über alle Tiefenstufen mit der Zeit ab und erreichte nach einigen Jahren ebenfalls das Niveau unbearbeiteter Flächen (Kontrolle, siehe Abbildung 64). Überregional zeigte die erste Tiefenstufe im Ostbraunschweigischen Flachland die absolut höchsten C_{mik} -Gehalte, hingegen das Hessische Ried in der dritten Tiefenstufe.

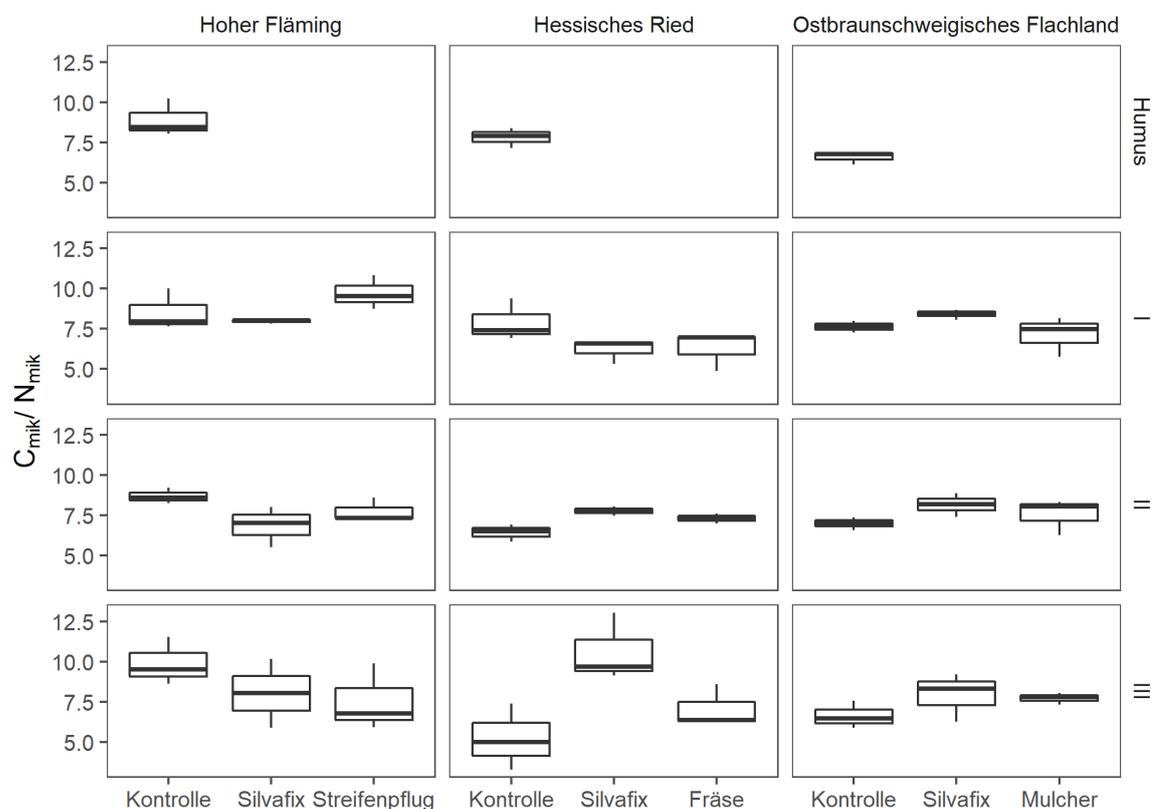


Abbildung 66: C_{mik}/N_{mik} -Verhältnisse nach Regionen, unterschiedlichen Bodenbearbeitungen und Tiefenstufen (I = Tiefenstufe 0 – 5 cm; II = Tiefenstufe 5 – 10 cm; III = Tiefenstufe 10 – 30 cm).

Bodenbearbeitungen beeinflussten die C_{mik}/N_{mik} -Verhältnisse kaum (Abbildung 66) und auch die Extensivflächen zeigten in einem Zeitraum von bis zu 15 Jahren stabile C_{mik}/N_{mik} -Verhältnisse (Abbildung 67).

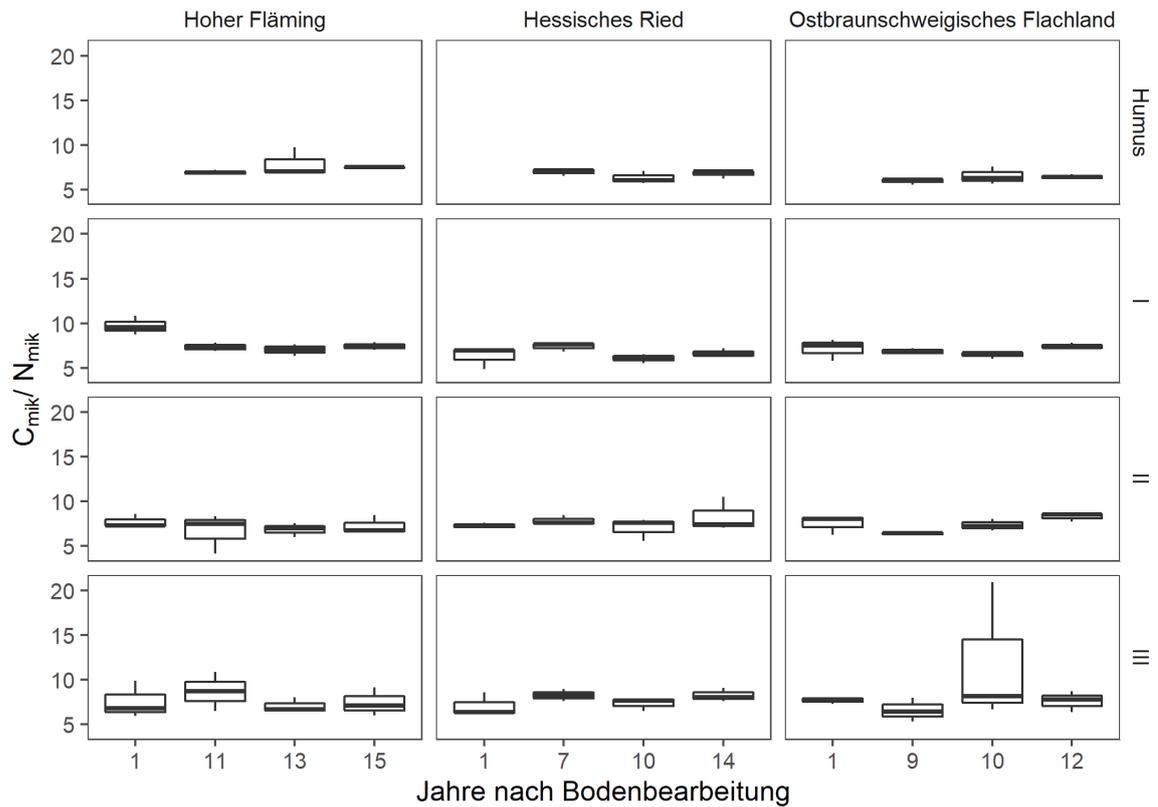


Abbildung 67: C_{mik}/N_{mik} -Verhältnisse nach Regionen und Tiefenstufen für die regionalen Standardverfahren (1 = Neuanlage, 2; 3; 4 sind die zeitlich älteren Flächen mit aufsteigendem Alter, I = Tiefenstufe 0 – 5 cm; II = Tiefenstufe 5 – 10 cm; III = Tiefenstufe 10 – 30 cm).

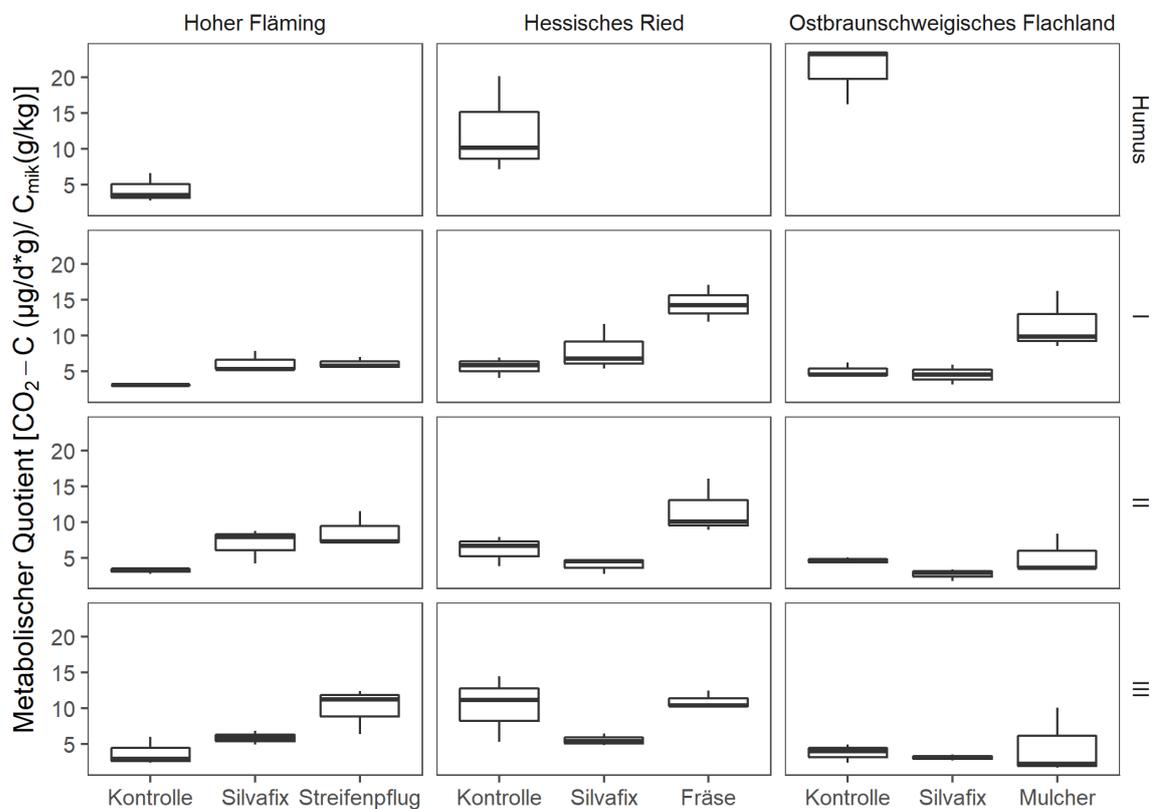


Abbildung 68: Metabolischer Quotient der mikrobiellen Biomasse nach unterschiedlichen Bodenbearbeitungen (I = Tiefenstufe 0 – 5 cm; II = Tiefenstufe 5 – 10 cm; III = Tiefenstufe 10 – 30 cm).

Der metabolische Quotient wies im Hohen Fläming über alle Tiefenstufen höhere Werte bei den Bodenbearbeitungen gegenüber der Kontrolle auf (Abbildung 68). Im Hessischen Ried war dies ebenfalls bei der Fräsbearbeitung zu beobachten und bei der Silvafixbearbeitung in der ersten Tiefenstufe. Im Ostbraunschweigischen Flachland wies lediglich die Mulchbearbeitung in der ersten Tiefenstufe erhöhte Werte auf.

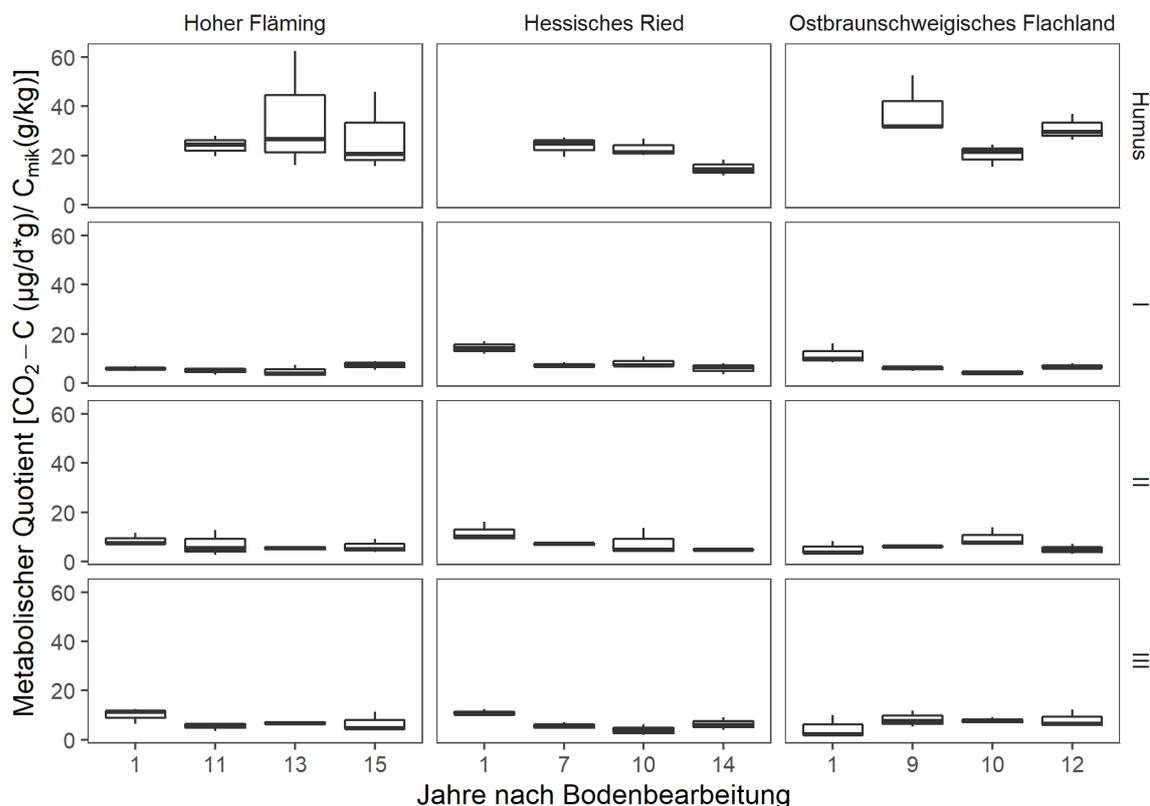


Abbildung 69: Metabolischer Quotient der mikrobiellen Biomasse nach Regionen und Tiefenstufen für die regionalen Standardverfahren (1 = Neuanlage, 2; 3; 4 sind die zeitlich älteren Flächen mit aufsteigendem Alter, I = Tiefenstufe 0 – 5 cm; II = Tiefenstufe 5 – 10 cm; III = Tiefenstufe 10 – 30 cm).

Abbildung 69 zeigt erhöhte metabolische Quotienten für die Bodenbearbeitungen der regionalen Standardverfahren ein Jahr nach Bearbeitung. Der metabolische Quotient lag bei den älteren Bodenbearbeitungen der Tiefenstufen I – III bei 5 und entsprach den Werten der Kontrollen aus Abbildung 68.

3.9.4. Diskussion

Bodenbearbeitungen mit Humusverlagerung minderten die C_{mik} -Gehalte in Böden und damit die mikrobielle Biomasse, Bodenbearbeitungen mit Humuszerkleinerung und gegebenenfalls Humuseinarbeitung in den Mineralböden erhöhten hingegen die mikrobielle Biomasse. Humusverlagerung führt zu einer schlechteren Energieversorgung der Mikroorganismen. Eine weltweite Metaanalyse zur Auswirkung von Schlagabraumnutzung zur Biomassennutzung bestätigt abnehmende mikrobielle Aktivitäten durch entziehen organischen Materials (ACHAT et al. 2015). Bei der Mulchvariante und der Fräsvariante (nur in der Tiefenstufe 0 – 30 cm) bewirkte die Humusanreicherung einen Anstieg des C_{mik} -Gehaltes durch die verbesserte Energieversorgung. Wie die Abbildung 65 zeigt, erholten sich die C_{mik} -Gehalte bereits nach wenigen Jahren, so dass nur eine kurzfristige Störung vorlag und keine langfristige mit negativen Auswirkungen. Hingegen bewirkte Fräsen in der dritten Tiefenstufe eine langfristige Anregung der C_{mik} -Gehalte – durch die Humuseinarbeitung –, welche absolut in dem hier durchgeführten Vergleich die höchsten waren.

Eine gesicherte Aussage über die langfristige Wirkung von Bodenbearbeitungen auf Mikroorganismen können wir durch das Fehlen einer Zeitreihe allerdings nicht treffen. Es gibt aber deutliche Hinweise, dass durch die Humusverlagerung beim Silvafixverfahren die mikrobielle Biomasse abnimmt, da sie von den C-Gehalten des Bodens (ACHAT et al. 2015; BORKEN et al. 2002),

der C-Nachlieferung (BAUHUS und BARTHEL 1995) und der Qualität der Energiequelle in Form von engen C/N-Verhältnissen abhängt (BORKEN et al. 2002).

Die gleichbleibenden $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ -Verhältnisse – sowohl kurzfristig als auch längerfristig – legen nahe, dass Bodenbearbeitungen die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaft nicht ändern. Ein weiteres $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ -Verhältnis könnte z.B. durch einen höheren Anteil an Nematoden mit einem weiteren C/N-Verhältnis hervorgerufen werden (HASSINK et al. 1993).

Dass Störungen zu erhöhten Bodenatmungen führen können, aber nicht zwangsläufig den C_{mik} -Gehalt steigern, konnte auch ein Hiebsversuch im Solling zeigen (BAUHUS und BARTHEL 1995) und deckt sich mit unseren Beobachtungen. Hieraus resultieren erhöhte metabolische Quotienten. Ein zeitnahes Abnehmen des metabolischen Quotienten spricht für eine nur kurzfristige Störung der mikrobiologischen Prozesse durch Bodenbearbeitungen.

4. Verwertung

4.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Es liegen keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen vor.

4.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Bei Anwendung der Projektergebnisse in der Praxis bestehen große Potentiale der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und damit einhergehend der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit von Wäldern durch Vermeidung von negativen Folgen von Bodenbearbeitungen auf die Nährstoffversorgung. Darüber hinaus sind wirtschaftliche Einsparpotentiale in Bereichen der Kulturbegründung und Pflege bei Anwendung der Ergebnisse für die Forstbetriebe zu erwarten. Flächenvorbereitungen durch Mulchen oder Fräsen ermöglichen eine maschinelle Kulturbegründung und Kulturpflege. Der Einsatz von Pflanzmaschinen reduziert die Pflanzkosten bei stammzahlreichen Kulturen oftmals um die Hälfte, wodurch sich die Maschinenpflanzung bei Eichenkulturen besonders anbietet. Neben einer höheren Flächenleistung vermindert der Einsatz von Geländemähern obendrein die Mähschäden, da im Gegensatz zum Mähen mit Freischneidern, parallel zur Pflanzreihe gemäht wird.

4.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Ergebnisse des Projektes stellen wichtige neue Erkenntnisse dar und widerlegen landläufige Vorurteile gegen Bodenbearbeitungen im Wald. Durch die Projektergebnisse wurden wissenschaftliche Fakten als Grundlage für Entscheidungen von Verjüngungsmöglichkeiten in Wäldern geschaffen. Die Projektergebnisse stellen die pauschalen Verbote von Bodenbearbeitungen durch Zertifizierungssysteme, wie FSC, in Frage. Es besteht die Möglichkeit auf Grundlage der Projektergebnisse eine Diskussion über die Einschränkungen anzustoßen mit der Option auf mehr Freiheiten für die Waldbesitzenden in ihren Möglichkeiten zur Bestandesbegründung.

Durch die Integration der Projektdaten in Datenbanken der NW-FVA ist eine langfristige Datensicherung gewährleistet. So können zum Beispiel die Bodenprofilaten aus dem Projekt den Pool an Bodenprofilaten ergänzen, der für Modellierungen mit dem Ziel der klimaangepassten Baumartenwahl verwendet wird.

Aus den Projektergebnissen können Forstpraktiker konkrete Handlungsanweisungen für anstehende Vorbereitungen von Kulturflächen ableiten. Des Weiteren werden Forstpraktiker in die Lage versetzt, in Abhängigkeit von standörtlichen Gegebenheiten die bisherigen eingesetzten Bodenbearbeitungsverfahren bezüglich ihrer Nährstoffnachhaltigkeit zu beurteilen und gegebenenfalls schonendere Verfahrensweisen zu etablieren.

Darüber hinaus können die Projektergebnisse bei zukünftigen Novellierungen von Förderrichtlinien, Betriebsanweisungen oder Gesetzesnovellen berücksichtigt und so für die unterschiedlichen Waldbesitzarten implementiert werden.

Aufgrund der Unsicherheiten der Coronapandemie war es bisher unmöglich, einen Workshop zu Bodenbearbeitungen mit allen Akteuren durchzuführen. Von Seiten der Forstpraxis besteht ein reges Interesse an den Projektergebnissen, da in weiten Teilen Deutschlands große kalamitätsbedingte Kahlfelder zur Wiederaufforstung anstehen, welche ohne Bodenverwundungen in der Regel nicht durchführbar sind. Daher sollen die Projektergebnisse neben Fachtagungen auch dezentral bei Waldbauschulungen in den Ländern und in den beteiligten Forstämtern präsentiert, und somit in die Forstpraxis getragen werden.

Ein Fachartikel befindet sich derzeit in einem Review-Verfahren und ein weiteres Manuskript ist in der Vorbereitung.

4.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Es zeigten sich z.T. große Unterschiede in den Auswirkungen von Bodenbearbeitungen in Abhängigkeit von den standörtlichen Gegebenheiten. Sandigere Standorte scheinen anders auf Bodenbearbeitungen zu reagieren als lehmig-tonigere. Auch die klimatischen Verhältnisse stellen einen wichtigen Einflussfaktor dar, und insbesondere die Witterung während eines solchen Versuches. In der hier vorliegenden Untersuchung war die Witterung durch eine Trockenphase geprägt. Von daher sollten die Ergebnisse in anderen Regionen abgesichert werden.

Die Projektergebnisse verdeutlichen das große Potential der Begleitvegetation Nährstoffausträge zu verhindern. Es konnte gezeigt werden, dass Bodenbearbeitungen nicht per se Nährstoffausträge begünstigen, sondern das Ausmaß der Austräge und Nährstoffverlagerungen maßgeblich vom gewählten Bodenbearbeitungsverfahren und vom Bewuchs der Fläche abhängen. Hier zeigt sich ein großes Managementpotential. Durch den Einsatz von Nutzpflanzendecken können die potentiellen Nährstofffrachten erheblich gemindert werden. Doch der Einsatz von Nutzpflanzendecken ist in den letzten 30 Jahren nur wenig beachtet worden. Hier ist es notwendig neue Mischungen zu entwickeln – wegen hoher Stickstoffeinträge möglichst ohne Leguminosen – um auch unter ungünstigeren Klimabedingungen eine effektive Nährstoffaufnahme zu gewährleisten, aber eine Konkurrenz zur Forstkultur zu vermeiden.

Darüber hinaus liegen keine Informationen über die Wirkung von Bodenbearbeitungen auf Insekten und Mykorrhiza vor. Die Wirkung von Bodenbearbeitungen auf Mykorrhiza könnte mithilfe von sogenannten Meshbags untersucht werden; die Auswirkung auf Insekten durch Fallen und anschließende DNA-Sequenzierung.

4.5. Erkenntnisse von Dritten

In der Projektlaufzeit sind keine Erkenntnisse von Dritten bekannt geworden. Allerdings sind als Folge der kalamitätsbedingten großen Freiflächen und die Frage der Wiederbegründung dieser Flächen Anfragen von Dritten aufgetreten.

4.6. Veröffentlichungen

Veröffentlichungen von Ergebnissen:

- Tamke, D; Talkner, U.; Sennhenn-Reulen, H. (2021): Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf den Nährstofffluss in Waldböden. Forstwissenschaftliche Tagung 2021 in Freising, Book of Abstracts, 289.
- Von Lehsten, V. (2021): Auswirkung von Bodenbearbeitung auf die initiale Entwicklung von Eichen in der Abteilung 411 des Forstamtes Lampertheim, Bachelorarbeit an der Georg-August-Universität Göttingen.

Geplante Veröffentlichungen von Ergebnissen:

- Tamke, D.; Sennhenn-Reulen, H.; Petersen, R.: Initiale Entwicklung von Eiche nach Bodenbearbeitung in Deutschland (in Review)
- Tamke, D.; Sennhenn-Reulen, H.; Talkner, U.: The influence of site preparation on nutrient fluxes in central Europe (erster Entwurf eines Manuskriptes liegt vor)
- Tamke, D.; Sennhenn-Reulen, H.; Talkner, U.: Auswirkungen von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt von Waldböden; Land & Forst

Teilnahme an Seminaren und Tagungen

- Projektvorstellung auf der Sektionstagung Waldernährung in Davos vom 4.-7.6.2019.
- Vorstellung von Projektergebnissen bei der FOWITA in Freising am 13. – 15.09.2021.
- Vorstellung von Projektergebnissen auf der Tagung „Stoffflüsse und Vorräte in Waldökosystemen: Messung, Monitoring & Modellierung" am 17.-18. März 2022 (online), ausgerichtet von der AG Waldböden der DBG, der AG Humusformen der DBG, der Sektion Wald und Wasser im DVFFA und der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft.
- Vorstellung von Projektergebnissen auf dem Seminar „Wiederbewaldung erfolgreich gestalten - Lehrgang für Wiederbewaldungsbeauftragte“ von Hessen Forst am 20.7.2022 & 21.7.2022 (online).

Geplante Teilnahme an Seminaren und Tagungen

- Vorstellung von Projektergebnissen auf der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2022 in Trier vom 5. - 8. September 2022.
- Vorstellung von Projektergebnissen auf der Sektionstagung Waldernährung vom 28. - 30. September 2022 in Nürnberg.

5. Danksagung

Die Bearbeitung des „ABoNae“-Projektes wäre ohne die zahlreiche Unterstützung von den vielen Kolleg*innen der NW-FVA unmöglich gewesen.

Besonders für die Hilfe bei den Feldarbeiten sind in alphabetischer Reihenfolge zu erwähnen: Alexander Buhr, Vanessa Dietrich, Moritz Jackermeier, Ralf Merten, André Olschewski, David Pörtner und Vicco von Lehsten.

Für die umfangreichen Laboranalysen sei dem gesamten Laborteam gedankt. Ein besonderer Dank gilt Heike Fortmann, Sandra Gries und Silke König.

Für die zahlreichen Diskussionen und die Hilfe bei der Erstellung des Abschlussberichtes seien Christoph Fischer, Regina Petersen, Holger Sennhenn-Reulen, Ulrike Talkner und Dan Zederer gedankt.

Ein besonderer Dank gilt auch der Zentralen Stelle, hier vor allem Christine Langheim, für die Projektverwaltung und der IT für die unkomplizierte Lösung technischer Probleme.

Darüber hinaus sei dem Forstamt Wolfenbüttel der Niedersächsischen Landesforsten, dem Forstamt Lampertheim von Hessen Forst und dem Forstamt Anhalt des Landesforstbetriebs Sachsen-Anhalt für die Bereitstellung der Versuchsflächen und die Unterstützung gedankt. Allem voran den Revierleitern Dirk Schäfer, Georg Ritz und Nils Schumann, welche uns bei Problemen immer unterstützt haben und wichtige Ansprechpartner vor Ort waren.

Dominik Tamke

Göttingen, im Juli 2022

6. Literaturverzeichnis

- ABELE, G. und H. LIESER (1991): Räumrechen am Bagger zur Schlagabraumbeseitigung. In: AFZ (3): 122–124.
- ACHAT, D. L., C. DELEUZE, G. LANDMANN, N. POUSSE, J. RANGER und L. AUGUSTO (2015): Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. In: Forest Ecology and Management 348: 124–141.
- ALCÁZAR, J., P. M. WOODARD und R. L. ROTHWELL (2002): Soil Disturbance and the Potential for Erosion After Mechanical Site Preparation. In: Northern Journal of Applied Forestry 19 (1): 5–13.
- ALLMAN, M., M. JANKOVSKÝ, V. MESSINGEROVÁ und Z. ALLMANOVÁ (2017): Soil moisture content as a predictor of soil disturbance caused by wheeled forest harvesting machines on soils of the Western Carpathians. In: Journal of Forestry Research 28 (2): 283–289.
- AMMER, C. (1996): Konkurrenz um Licht. Zur Entwicklung der Naturverjüngung im Bergmischwald. In: Forstliche Forschungsberichte München 158: 1–198.
- AMMER, C. und C. DINGEL (1997): Untersuchungen über den Einfluß starker Weichlaubholzkonkurrenz auf das Wachstum und die Qualität junger Stieleichen. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 116 (1–6): 346–358.
- ANDERSEN, L. (2004): Field performance of *Quercus petraea* seedlings grown under competitive conditions: influence of prior undercutting in the seedbed. In: New Forests 28 (1): 37–47.
- ANDRZEJCZYK, T., M. LIZINIEWICZ und S. DROZDOWSKI (2015): Effect of spacing on growth and quality parameters in sessile oak (*Quercus petraea*) stands in central Poland: results 7 years after planting. In: Scandinavian Journal of Forest Research 30 (8): 710–718.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (Hrsg.) (2016): Forstliche Standortsaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching bei München.
- ARNOLD, J. B. (2021): ggthemes: Extra Themes, Scales and Geoms for „ggplot2“. Internet: <https://CRAN.R-project.org/package=ggthemes>.
- AUGUIE, B. (2017): gridExtra: Miscellaneous Functions for „Grid“ Graphics. Internet: <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>.
- BAIO, G. (2013): Bayesian methods in health economics. Chapman & Hall/CRC biostatistics series. Boca Raton.
- BANNER, K. M., K. M. IRVINE und T. J. RODHOUSE (2020): The use of Bayesian priors in Ecology: The good, the bad and the not great. In: Methods in Ecology and Evolution 11 (8): 882–889.
- BAUHUS, J. und R. BARTHEL (1995): Mechanisms for carbon and nutrient release and retention in beech forest gaps: II. The role of soil microbial biomass. In: Plant and Soil 168/169: 585–592.
- BAUHUS, J. und N. BARTSCH (1995): Mechanisms for carbon and nutrient release and retention in beech forest gaps: I. Microclimate, water balance and seepage water chemistry. In: Plant and Soil 168–169 (1): 579–584.
- BEBRE, I., P. ANNIGHÖFER, C. AMMER und D. SEIDEL (2020): Growth, morphology, and biomass allocation of recently planted seedlings of seven European tree species along a light gradient. In: iForest - Biogeosciences and Forestry 13 (1): 261–269.
- BEHRNDT, W. (1979): Eichenkulturen und Bodenbearbeitung im Forstamt Göhrde. In: AFZ, Allgemeine Forst Zeitschrift 34 (13): 309–313.

- BEHRNDT, W. (1968): Zweckmäßige Methoden zur künstlichen Verjüngung der deutschen Eichen. In: Forst und Holzwirt 27 (6): 104–108.
- BENECKE, P. (1992): Die Krohn'sche Maschine - Eine Chance für restaurationsbedürftige Waldböden? In: Forsttechnische Informationen (8/9): 58–61.
- BIRKEDAL, M., A. FISCHER, M. KARLSSON, M. LÖF und P. MADSEN (2009): Rodent impact on establishment of direct-seeded *Fagus sylvatica*, *Quercus robur* and *Quercus petraea* on forest land. In: Scandinavian Journal of Forest Research 24 (4): 298–307.
- BIRKEDAL, M., M. LÖF, G. E. OLSSON und U. BERGSTEN (2010): Effects of granivorous rodents on direct seeding of oak and beech in relation to site preparation and sowing date. In: Forest Ecology and Management 259 (12): 2382–2389.
- BLACK, T. A. und J. W. HARDEN (1995): Effect of timber harvest on soil carbon storage at Blodgett Experimental Forest, California. In: Canadian Journal of Forest Research 25 (8): 1385–1396.
- BOCK, M. D. und K. C. VAN REES (2002): Forest harvesting impacts on soil properties and vegetation communities in the Northwest Territories. In: Canadian Journal of Forest Research 32 (4): 713–724.
- BÖCKMANN, T., J. HANSEN, K. HAUSKELLER-BULLERJAHN, T. JENSEN, J. NAGEL, R.-V. NAGEL, M. OVERBECK, A. PAMPE, A. PETEREIT-BITTER, M. SCHMIDT, M. SCHRÖDER, C. SCHULZ, H. SPELLMANN, V. STÜBER, J. SUTMÖLLER und P. WOLLBORN (2019): Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Walde - Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen, Band 61.
- BOLTE, A. (1999): Abschätzung von Trockensubstanz-, Kohlenstoff- und Nährelementvorräten der Waldbodenflora - Verfahren, Anwendung und Schätztafeln (Assessment of dry weight and storage of carbon and nutrients in forest ground vegetation in the north-eastern German lowlands – method, application and classification tables).
- BOLTE, A., S. ANDERS und A. ROLOFF (2002): Schätzmodelle zum oberirdischen Vorrat der Waldbodenflora an Trockensubstanz, Kohlenstoff und Makronährelementen (Assessment models for dry weight and storage of carbon and nutrients in the forest ground vegetation). In: Allgemeine Forst und Jagdzeitung 173: 57–66.
- BOLTE, A., T. CZAJKOWSKI, J. BIELEFELDT, B. WOLFF und S. HEINRICHS (2009): Schätzung der oberirdischen Biomassevorräte des Baum- und Strauchunterwuchses in Wäldern auf der Basis von Vegetationsaufnahmen (Estimating aboveground biomass of forest tree and shrub understorey based on relevées). In: Forstarchiv 80: 222–228.
- BORKEN, W. und E. MATZNER (2004): Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science 167 (3): 277–283.
- BORKEN, W., Y.-J. XU, E. A. DAVIDSON und F. BEESE (2002): Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. In: Global Change Biology 8 (12): 1205–1216.
- BORMANN, F. H., G. E. LIKENS, D. W. FISHER und R. S. PIERCE (1968): Nutrient Loss Accelerated by Clear-Cutting of a Forest Ecosystem. In: Science 159 (3817): 882–884.
- BÜRKNER, P.-C. (2018): Advanced Bayesian Multilevel Modeling with the R Package brms. In: The R Journal 10 (1): 395.
- BÜRKNER, P.-C. (2017): brms: An Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan. In: Journal of Statistical Software 80 (1). Internet: <http://www.jstatsoft.org/v80/i01/> (26.03.2020).

- CARPENTER, B., A. GELMAN, M. D. HOFFMAN, D. LEE, B. GOODRICH, M. BETANCOURT, M. BRUBAKER, J. GUO, P. LI und A. RIDDELL (2017): Stan: A Probabilistic Programming Language. In: *Journal of Statistical Software* 76 (1). Internet: <http://www.jstatsoft.org/v76/i01/> (26.03.2020).
- ČESONIENĖ, L., R. DAUBARAS, V. TAMUTIS, V. KAŠKONIENĖ, P. KAŠKONAS, V. STAKĖNAS und M. ZYCH (2019): Effect of clear-cutting on the understory vegetation, soil and diversity of litter beetles in scots pine-dominated forest. In: *Journal of Sustainable Forestry* 38 (8): 791–808.
- COLL, L., P. BALANDIER und C. PICON-COCHARD (2004): Morphological and physiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) seedlings to grass-induced belowground competition. In: *Tree Physiology* 24 (1): 45–54.
- COLL, L., P. BALANDIER, C. PICON-COCHARD, B. PRÉVOSTO und T. CURT (2003): Competition for water between beech seedlings and surrounding vegetation in different light and vegetation composition conditions. In: *Annals of Forest Science* 60 (7): 593–600.
- DASSOT, M. und C. COLLET (2021): Effects of different site preparation methods on the root development of planted *Quercus petraea* and *Pinus nigra*. In: *New Forests* 52 (1): 17–30.
- DAVIS, A. S. und D. F. JACOBS (2005): Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. In: *New Forests* 30 (2–3): 295–311.
- DE LOMBAERDE, E., H. BLONDEEL, L. BAETEN, D. LANDUYT, M. P. PERRING, L. DEPAUW, S. L. MAES, B. WANG und K. VERHEYEN (2020): Light, temperature and understorey cover predominantly affect early life stages of tree seedlings in a multifactorial mesocosm experiment. In: *Forest Ecology and Management* 461: 117907.
- DEVETAKOVIĆ, J., M. NONIĆ, B. PROKIĆ, V. POPOVIĆ und M. ŠIJAČIĆ-NIKOLIĆ (2019): Acorn size influence on the quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) one-year old seedlings. In: *Reforesta* (8). Internet: <http://journal.reforestationchallenges.org/index.php/REFOR/article/view/115> (29.11.2021).
- DINGER, E. J. und R. ROSE (2009): Integration of soil moisture, xylem water potential, and fall–spring herbicide treatments to achieve the maximum growth response in newly planted Douglas-fir seedlings. In: *Canadian Journal of Forest Research* 39 (7): 1401–1414.
- DÖLLE, M. und W. SCHMIDT (2009): Impact of tree species on nutrient and light availability: evidence from a permanent plot study of old-field succession. In: *Plant Ecology* 203 (2): 273–287.
- EFRON, B. und C. MORRIS (1977): Stein's Paradox in Statistics. In: *Scientific American* 236 (5): 119–127.
- ELLENBERG, H., C. LEUSCHNER und H. DIERSCHKE (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. UTB Botanik, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Geographie. Stuttgart.
- ERDŐS, L., K. SZITÁR, K. ÖLLERER, G. ÓNODI, M. KERTÉSZ, P. TÖRÖK, K. BARÁTH, C. TÖLGYESI, Z. BÁTORI, L. SOMAY, I. ORBÁN und G. KRÖEL-DULAY (2021): Oak regeneration at the arid boundary of the temperate deciduous forest biome: insights from a seeding and watering experiment. In: *European Journal of Forest Research*. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/s10342-020-01344-x> (27.03.2021).
- FAHRMEIR, L., T. KNEIB, S. SHALABH und C. HEUMANN (2008): On the Identification of Trend and Correlation in Temporal and Spatial Regression. In: (2008). 1–27.
- FISCHER, H. (1998): *Acker-Erstaufforstungen - Bestandesbegründung, Wachstum und Ökologie an Fallbeispielen*. PhD Thesis.
- FLEDER, W. (1981): Begründung von Werteichenbeständen durch Saat. In: *Forst und Holzwirt* 36 (12): 275–277.

- FOX, T. R., J. A. BURGER und R. E. KREH (1986): Effects of site preparation on nitrogen dynamics in the southern Piedmont. In: *Forest Ecology and Management* 15 (4): 241–256.
- FREY, B. und M. HARTMANN (2013): Biodiversität von Waldböden–Auswirkungen des Einsatzes von Holzerntemaschinen auf mikrobielle Gemeinschaften. In: (2013): *Forum Wissen*, Band 2013. 61–69.
- FROELICH, H. A., D. W. R. MILES und R. W. ROBBINS (1985): Soil Bulk Density Recovery on Compacted Skid Trails in Central Idaho. In: *Soil Science Society of America Journal* 49 (4): 1015–1017.
- GABRY, J., D. SIMPSON, A. VEHTARI, M. BETANCOURT und A. GELMAN (2019): Visualization in Bayesian workflow. In: *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)* 182 (2): 389–402.
- GADOW, K. von (2003): Waldstruktur und Wachstum: Beilage zur Vorlesung im Wintersemester 2003/2004. Göttingen. Internet: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?univerlag-isbn-3-930457-32-6> (19.09.2020).
- GAUER, J. (Hrsg.) (2005): Waldökologische Naturräume Deutschlands: forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke; mit Karte 1:1.000.000. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung. Freiburg.
- GELMAN, A. und J. HILL (2007): Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models. Analytical methods for social research. Cambridge ; New York.
- GREENLAND, S. und M. A. MANSOURNIA (2015): Penalization, bias reduction, and default priors in logistic and related categorical and survival regressions. In: *Statistics in Medicine* 34 (23): 3133–3143.
- GROH, J., H. PUHLMANN und K. VON WILPERT (2013): Kalibrierung eines Bodenwasserhaushaltsmodells mit einer kombinierten Zielfunktion für die Optimierung der Wasserretentionskurve. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung / BfG – Jahrgang: 57.2013: 4-ISSN 1439*.
- GROSSNICKLE, S. C. (2005): Importance of root growth in overcoming planting stress. In: *New Forests* 30 (2–3): 273–294.
- GUERICKE, M., R. PETERSEN und S. BLANKE (2008): Wachstum und Qualität von Eichennestern in Nordwestdeutschland. In: *FORST UND HOLZ* 63 (6): 58–63.
- GUIJARRO, J. A. (2019): climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products). Internet: <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>.
- HALLSBY, G. und G. ÖRLANDER (2004): A comparison of mounding and inverting to establish Norway spruce on podzolic soils in Sweden. In: *Forestry* 77 (2): 107–117.
- HANSEN, K. H., A. GRANHUS, F. H. BRÆKKE und O. HAVERAAEN (2003): Performance of Sown and Naturally Regenerated *Picea abies* Seedlings Under Different Scarification and Harvesting Regimens. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 18 (4): 351–361.
- HANSSON, L. J., E. RING, M. A. FRANKO und A. I. GÄRDENÄS (2018): Soil temperature and water content dynamics after disc trenching a sub-xeric Scots pine clearcut in central Sweden. In: *Geoderma* 327: 85–96.
- HASSINK, J., L. A. BOUWMAN, K. B. ZWART und L. BRUSSAARD (1993): Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils. In: *Soil Biology and Biochemistry* 25 (1): 47–55.

- HEDWALL, P.-O., H. GRIP, S. LINDER, L. LÖVDAHL, U. NILSSON und J. BERGH (2013): Effects of clear-cutting and slash removal on soil water chemistry and forest-floor vegetation in a nutrient optimised Norway spruce stand. In: *Silva Fennica* 47 (2). Internet: <http://www.silvafennica.fi/article/933> (20.08.2020).
- VAN HEES, A. (1997): Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L) and beech (*Fagus sylvatica* L) seedlings in relation to shading and drought. In: *Annales des Sciences Forestières* 54 (1): 9–18.
- HEINRICHS, S., M. BERNHARDT-RÖMERMANN und W. SCHMIDT (2010): The estimation of aboveground biomass and nutrient pools of understorey plants in closed Norway spruce forests and on clearcuts. In: *European Journal of Forest Research* 129 (4): 613–624.
- HEINRICHS, S. und W. SCHMIDT (2009): Vom Fichtenrein-zum Mischbestand: Welchen Beitrag leisten Strauch-und Krautschicht zum Erhalt von Ökosystemfunktionen?. From pure spruce to mixed stands: What contributes the shrub and herb layer vegetation to ecosystem functioning?. In: *Forstarchiv* 6 (1): 23–28.
- HELLSTEN, S., J. STADMARK, G. PIHL KARLSSON, P. E. KARLSSON und C. AKSELSSON (2015): Increased concentrations of nitrate in forest soil water after windthrow in southern Sweden. In: *Forest Ecology and Management* 356: 234–242.
- HILDEBRAND, E. E. (1983): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 102 (1): 111–125.
- HORN, R. und M. LEBERT (1992): Möglichkeiten und Grenzen der physikalischen Bodenrekultivierung in der Forstwirtschaft. In: *Forsttechnische Informationen* (8/9): 61–65.
- HUBER, C. (2005): Long Lasting Nitrate Leaching after Bark Beetle Attack in the Highlands of the Bavarian Forest National Park. In: *Journal of Environmental Quality* 34 (5): 1772–1779.
- HUBER, C., M. BAUMGARTEN, A. GÖTTLEIN und V. ROTTER (2004): Nitrogen Turnover and Nitrate Leaching after Bark Beetle Attack in Mountainous Spruce Stands of the Bavarian Forest National Park. In: *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 4 (2/3): 391–414.
- IRMAK, S., J. O. PAYERO, B. VAN DE WALLE, J. REES, G. ZOUBEK, D. L. MARTIN, W. L. KRANZ, D. E. EISENHAEUER und D. LEININGER (2016): Principles and Operational Characteristics of Watermark Granular Matrix Sensor to Measure Soil Water Status and Its Practical Applications for Irrigation Management in Various Soil Textures. Internet: <http://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/ec783.pdf>.
- IRRROMETER COMPANY (2019): Reading WATERMARK Soil Moisture Sensors. Internet: <https://www.irrometer.com/200ss.html> (09.12.2019).
- JANDL, R., M. LINDNER, L. VESTERDAL, B. BAUWENS, R. BARITZ, F. HAGEDORN, D. W. JOHNSON, K. MINKKINEN und K. A. BYRNE (2007): How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? In: *Geoderma* 137 (3–4): 253–268.
- JENSEN, A. M., E. S. GARDINER und K. C. VAUGHN (2012): High-light acclimation in *Quercus robur* L. seedlings upon over-topping a shaded environment. In: *Environmental and Experimental Botany* 78: 25–32.
- JENSEN, A. M. und M. LÖF (2017): Effects of interspecific competition from surrounding vegetation on mortality, growth and stem development in young oaks (*Quercus robur*). In: *Forest Ecology and Management* 392: 176–183.
- JOHNSON, J., E. GRAF PANNATIER, S. CARNICELLI, G. CECCHINI, N. CLARKE, N. COOLS, K. HANSEN, H. MEESENBURG, T. M. NIEMINEN, G. PIHL-KARLSSON, H. TITEUX, E. VANGUELOVA, A. VERSTRAETEN, L. VESTERDAL, P. WALDNER und M. JONARD (2018): The response of soil

- solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. In: *Global Change Biology* 24 (8): 3603–3619.
- KAY, M. (2022): tidybayes: Tidy Data and Geoms for Bayesian Models. Internet: <http://mjskay.github.io/tidybayes/>.
- KAY, M. (2021): ggdist: Visualizations of Distributions and Uncertainty. Internet: <https://mjskay.github.io/ggdist/>.
- KINOWSKI, S. (2010): Einflüsse von Pflanzverband und Überschirmung auf Wachstum und Qualität vorangebauter Traubeneichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) unter Kiefern-schirm (*Pinus sylvestris* L.) auf einer Versuchsfläche im ostniedersächsischen Tiefland. Masterarbeit. Dresden.
- KLEINSCHMIT, J., J. SVOLBA und P. STEINGAß (1978): Entwicklung von Eichen-Heisterkulturen im Forstamt Braunschweig. In: *Forst und Holz* 33: 172–176.
- KLINCK, U. und D. FRÖHLICH (2009): Application of the phytomass and elemental stock model „PhytoCalc“ under clear-cut conditions. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 180: 15–21.
- KLINCK, U., D. FRÖHLICH, K. J. MEIWES und F. BEESE (2013): Entwicklung der Stoffein- und -austräge nach einem Fichten-Kleinkahlschlag. In: *Forstarchiv*: 93–101.
- KNOCKE, H. C. (2016): Vergleichende Untersuchung zu Entwicklung und Qualität der Trauben-Eiche (*Quercus petraea* [MATT.] LIEBL.) in NELDER-Verbandsversuchen auf Basis von bestandes- und einzelbaumweisen Betrachtungen. Masterarbeit. Göttingen.
- KOHLPAINTNER, M., C. HUBER, W. WEIS und A. GÖTTLEIN (2009): Spatial and temporal variability of nitrate concentration in seepage water under a mature Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst] stand before and after clear cut. In: *Plant and Soil* 314 (1–2): 285–301.
- KÖNIG, N. (2014): *Handbuch Forstliche Analytik*.
- KRAMER, W. (1978): Mechanische Bodenbearbeitung oder chemische Behandlung bei der Begründung von Kulturen im Forstamt Syke. In: *Allg. Forst Zeitschr* 33: 456–461.
- KRISO, K. (1952): Die Ableitung von Standortspektren aus Vegetationsaufnahmen und ihre Anwendung als standortsdiagnostische Hilfsmittel. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 71 (5–6): 151–169.
- KUDERNA, M., E. PÖTSCH und W. BLUM (1993): Zur Wahl des Extraktionsmittels bei der Nmin-Bestimmung. In: *Bodenkultur* 44 (1): 7–14.
- LAIHO, R. und C. E. PRESCOTT (2004): Decay and nutrient dynamics of coarse woody debris in northern coniferous forests: a synthesis. In: *Canadian Journal of Forest Research* 34 (4): 763–777.
- LEDER, B. (2007): Wachstum und qualitative Entwicklung von Eichennestern. In: *AFZ - Der Wald* (8): 420–423.
- LEMOINE, N. P. (2019): Moving beyond noninformative priors: why and how to choose weakly informative priors in Bayesian analyses. In: *Oikos* 128 (7): 912–928.
- LENHARD, R. J. (1986): Changes in Void Distribution and Volume During Compaction of a Forest Soil. In: *Soil Science Society of America Journal* 50 (2): 462–464.
- LÖF, M., J. BARRERE, M. ENGMAN, L. K. PETERSSON und A. VILLALOBOS (2021): The influence of fencing on seedling establishment during reforestation of oak stands: a comparison of artificial and natural regeneration techniques including costs. In: *European Journal of Forest Research*. Internet: <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01369-w>.

- LÖF, M. und M. BIRKEDAL (2009): Direct seeding of *Quercus robur* L. for reforestation: The influence of mechanical site preparation and sowing date on early growth of seedlings. In: *Forest Ecology and Management* 258 (5): 704–711.
- LÖF, M., D. C. DEY, R. M. NAVARRO und D. F. JACOBS (2012): Mechanical site preparation for forest restoration. In: *New Forests* 43 (5–6): 825–848.
- LÖF, M., P. GEMMEL, U. NILSSON und N. T. WELANDER (1998): The influence of site preparation on growth in *Quercus robur* L. seedlings in a southern Sweden clear-cut and shelterwood. In: *Forest Ecology and Management* 109 (1–3): 241–249.
- LÖF, M., D. RYDBERG und A. BOLTE (2006): Mounding site preparation for forest restoration: Survival and short term growth response in *Quercus robur* L. seedlings. In: *Forest Ecology and Management* 232 (1–3): 19–25.
- LÖF, M., A. THOMSEN und P. MADSEN (2004): Sowing and transplanting of broadleaves (*Fagus sylvatica* L., *Quercus robur* L., *Prunus avium* L. and *Crataegus monogyna* Jacq.) for afforestation of farmland. In: *Forest Ecology and Management* 188 (1–3): 113–123.
- LOVETT, G. M., K. C. WEATHERS und M. A. ARTHUR (2002): Control of Nitrogen Loss from Forested Watersheds by Soil Carbon:Nitrogen Ratio and Tree Species Composition. In: *Ecosystems* 5 (7): 712–718.
- LUNDMARK-THELIN, A. und M.-B. JOHANSSON (1997): Influence of mechanical site preparation on decomposition and nutrient dynamics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needle litter and slash needles. In: *Forest Ecology and Management* 96 (1–2): 101–110.
- LÜPKE, B. von (1991): Einfluß der konkurrenz von Weichlaubhölzern auf das Wachstum junger Traubeneichen. In: *FORST UND HOLZ* (7): 166–171.
- LÜPKE, B. von (1982): Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbestände. Band 74. Frankfurt a.M.
- MANDERSCHIED, B. (1984): Erste Auswertung des Traubeneichen-Saatverbandsversuches in Johanneskreuz/Pfalz. Diplomarbeit. Göttingen.
- MASON, E. G., R. W. ROSE und L. S. ROSNER (2007): Time vs. light: a potentially useable light sum hybrid model to represent the juvenile growth of Douglas-fir subject to varying levels of competition. In: *Canadian Journal of Forest Research* 37 (4): 795–805.
- MATEJEK, B., M. KOHLPAINTNER, R. GASCHKE, C. HUBER, M. DANNENMANN und H. PAPPEN (2008): The small-scale pattern of seepage water nitrate concentration in an N saturated spruce forest is regulated by net N mineralization in the organic layer. In: *Plant and Soil* 310 (1–2): 167–179.
- MCLEATH, R. (2015): Statistical rethinking: a Bayesian course with examples in R. In: *Stan R and stan*, 1st ed. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.
- MCLAUGHLIN, J. W., M. R. GALE, M. F. JURGENSEN und C. C. TRETIN (2000): Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate. In: *Forest Ecology and Management* 129 (1–3): 7–23.
- MEIWES, K.-J., M. HAUHS, H. GERKE, N. ASCHE, E. MATZNER und N. LAMERSDORF (1984): Die Erfassung des Stoffkreislaufs in Waldökosystemen - Konzept und Methodik. In: (1984): *Berichte des Forschungszentrums Waldoekosysteme/ Waldsterben*, Band 7. Göttingen: 70–139.
- MELLERT, K.-H., C. KÖLLING und K. E. REHFUESS (1998): Vegetationsentwicklung und Nitrataustrag auf 13 Sturmkahlfeldern in Bayern. In: *Forstarchiv (Germany)* 69 (1): 3–11.

- MIKKELSON, K. M., L. A. BEARUP, R. M. MAXWELL, J. D. STEDNICK, J. E. MCCRAY und J. O. SHARP (2013): Bark beetle infestation impacts on nutrient cycling, water quality and interdependent hydrological effects. In: *Biogeochemistry* 115 (1–3): 1–21.
- MJÖFORS, K., M. STRÖMGREN, H.-Ö. NOHRSTEDT und A. GÄRDENÄS (2015): Impact of site-preparation on soil-surface CO₂ fluxes and litter decomposition in a clear-cut in Sweden. In: *Silva Fennica* 49 (5). Internet: <http://www.silvafennica.fi/article/1403> (07.08.2020).
- MÖLDER, A., H. SENNHENN-REULEN, C. FISCHER, H. RUMPF, E. SCHÖNFELDER, J. STOCKMANN und R.-V. NAGEL (2019): Success factors for high-quality oak forest (*Quercus robur*, *Q. petraea*) regeneration. In: *Forest Ecosystems* 6 (1): 49.
- MOSANDL, R., P. BURSCHEL und J. SLIWA (1988): Die Qualität von Ausleseebäumen in Eichenjungbeständen. In: *Forst und Holz* 43 (2): 37–41.
- NEAL, R. M. (2011): MCMC using Hamiltonian dynamics. In: BROOKS, S., A. GELMAN, G. JONES und X.-L. MENG (Hrsg.) (2011): *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. Internet: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781420079425> (03.12.2021).
- NILSSON, U. und H. L. ALLEN (2003): Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. In: *Forest Ecology and Management* 175 (1–3): 367–377.
- NILSSON, U., P. GEMMEL und J. HALLGREN (1996a): Competing vegetation effects on initial growth of planted *Picea abies*. In: *New Zealand J. For. Sci.* 1–2.
- NILSSON, U., P. GEMMEL, M. LÖF und T. WELANDER (1996b): Germination and early growth of sown *Quercus robur* L. in relation to soil preparation, sowing depths and prevention against predation. In: *New Forests* 12 (1): 69–86.
- NOPP, U., M. KAZDA und H.-P. LANG (1998): Zur Umwandlung sekundärer Fichtenwälder auf Pseudogleyböden in Stieleichen-Hainbuchen-Wälder unter besonderer Berücksichtigung von Stockrodungen. In: *Forstarchiv* 69 (1): 12–18.
- NORDBORG, F., U. NILSSON, P. GEMMEL und G. ÖRLANDER (2006): Carbon and nitrogen stocks in soil, trees and field vegetation in conifer plantations 10 years after deep soil cultivation and patch scarification. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 21 (5): 356–363.
- NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.) (2013): *Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 10*. Göttingen. Internet: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?isbn-978-3-86395-110-8> (26.03.2020).
- NYKVIST, N. (1997): Changes in species occurrence and phytomass after clearfelling, prescribed burning and slash removal in two Swedish spruce forests. In: *Studia Forestalia Suecica* 201.
- ÖRLANDER, G., G. HALLSBY, P. GEMMEL und C. WILHELMSSON (1998): Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies* — 10-year results from a site preparation trial in Northern Sweden. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 13 (1–4): 160–168.
- PALVIAINEN, M., L. FINÉR, A. LAURÉN, H. MANNERKOSKI, S. PIIRAINEN und M. STARR (2007): Development of ground vegetation biomass and nutrient pools in a clear-cut disc-plowed boreal forest. In: *Plant and Soil* 297 (1–2): 43–52.
- PIENAAR, L. V. und K. J. TURNBULL (1973): The Chapman-Richards Generalization of Von Bertalanffy's Growth Model for Basal Area Growth and Yield in Even - Aged Stands. In: *Forest Science* 19 (1): 2–22.

- PIIRAINEN, S., L. FINÉR, H. MANNERKOSKI und M. STARR (2007): Carbon, nitrogen and phosphorus leaching after site preparation at a boreal forest clear-cut area. In: *Forest Ecology and Management* 243 (1): 10–18.
- PRETZSCH, H., J. BLOCK, J. DIELER, J. GAUER, A. GÖTTLEIN, R. MOSHAMMER, J. SCHUCK, W. WEIS und U. WUNN (2014): Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen. In: *AFJZ* 185. Jg. (11/12): 261–285.
- PREUHSLER, T., S. KÜHNEL und K. BOCK (1994): Zum Wachstum von Eichensaat unter Kiefernschirm im Forstamt Nürnberg. In: *Forst und Holz* 49 (5): 123–128.
- R CORE TEAM (2021): R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Internet: <https://www.R-project.org/>.
- RICHTER, J. und A. GROßGEBAUER (1978): Untersuchungen zum Bodenlufthaushalt in einem Bodenbearbeitungsversuch. 2. Gasdiffusionskoeffizienten als Strukturmaße für Böden. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 141 (2): 181–202.
- RING, E., L. HÖGBOM, S. ANDERSSON und J. WESLIEN (2013): Soil and soil-solution chemistry after burning a clear-felled area in boreal Sweden. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 28 (8): 735–745.
- RÖHRIG, E. (1976): Einfluss unterschiedlicher Saattiefe auf die Entwicklung von einjährigen Eichen-Sämlingen. In: *Forst und Holzwirt* 31 (7): 119–121.
- ROSE, R. und L. ROSNER (2005): Eighth-year response of Douglas-fir seedlings to area of weed control and herbaceous versus woody weed control. In: *Annals of Forest Science* 62 (6): 481–492.
- ROSENQVIST, L., K. HANSEN, L. VESTERDAL und C. VAN DER SALM (2010): Water balance in afforestation chronosequences of common oak and Norway spruce on former arable land in Denmark and southern Sweden. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 150 (2): 196–207.
- ROTHE, A. und K. H. MELLERT (2004): Effects of Forest Management on Nitrate Concentrations in Seepage Water of Forests in Southern Bavaria, Germany. In: *Water, Air, & Soil Pollution* 156 (1): 337–355.
- RUMPF, H. (2007): Erste Ergebnisse eines Freisaatversuches mit Traubeneiche im Nordwestdeutschen Flachland. In: *FORST UND HOLZ* 62. Jg. (3): 13–18.
- S. IRMAK und D. Z. HAMAN (2001): PERFORMANCE OF THE WATERMARK. GRANULAR MATRIX SENSOR IN SANDY SOILS. In: *Applied Engineering in Agriculture* 17 (6). Internet: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=6848&CID=aeaj2001&v=17&i=6&T=1> (29.08.2019).
- SAHA, S., C. KUEHNE und J. BAUHUS (2014): Intra- and interspecific competition differently influence growth and stem quality of young oaks (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.). In: *Annals of Forest Science* 71 (3): 381–393.
- SAHA, S., C. KUEHNE, U. KOHNLE, P. BRANG, A. EHRING, J. GEISEL, B. LEDER, M. MUTH, R. PETERSEN, J. PETER, W. RUHM und J. BAUHUS (2012): Growth and quality of young oaks (*Quercus robur* and *Quercus petraea*) grown in cluster plantings in central Europe: A weighted meta-analysis. In: *Forest Ecology and Management* 283: 106–118.
- SAUTER, U. und K. J. MEIWES (1990): Auswirkungen der Kalkung auf den Stoffaustrag aus Waldoekosystemen mit dem Sickerwasser. In: *Forst und Holz* 45 (20): 605–610.
- SCHAPER, C. (1978): Das Jugendwachstum von Stiel- und Traubeneichen auf norddeutschen Standorten. Monographie. Göttingen.

- SCHMIDT-WALTER, P. (2018): KSPclimpredict: Predict daily climate parameters from saved ModelObjects and Data. Internet: Unveröffentlicht.
- SCHOBER, R. (1995): Ertragstabellen wichtiger Baumarten. Frankfurt am Main.
- SCHULTE-KARRING, H. und D. SCHRÖDER (1992): Die totale Waldbodensanierung, eine Voraussetzung für den erfolgreichen Wiederaufbau der Wälder. In: Forsttechnische Informationen (8/9): 65–69.
- SCHULZE, A. (2006): ECO - ein Datenbanksystem zur langfristigen, integrativen Verwaltung von Datenbeständen des Forstlichen Umweltmonitorings. In: WENKEL, K.-O., P. WAGNER, M. MORGENSTERN, K. LUZI und P. EISERMANN (Hrsg.) (2006): Land- und Ernährungswirtschaft im Wandel – Aufgaben und Herausforderungen für die Agrar und Umweltinformatik. Bonn: 253–256.
- SCHWANECKE, W. und D. KOPP (1994): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke des Landes Sachsen-Anhalt: (Naturraumareale auf der Grundlage der forstlichen Standortserkundung). Internet: <https://books.google.de/books?id=14-sGwAACAAJ>.
- SHOCK, C. C., J. M. BARNUM und M. SEDDIGH (1998): Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management. In: IRRIGATION ASSOCIATION (Hrsg.) (1998): Proceedings of the International Irrigation Show. 139–146.
- SIKSTRÖM, U., K. HJELM, K. HOLT HANSEN, T. SAKSA und K. WALLERTZ (2020): Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. In: Silva Fennica 54 (2). Internet: <https://www.silvafennica.fi/article/10172> (08.04.2020).
- SPELLMANN, H. und A. BADERSCHNEIDER (1988): Erste Auswertung eines Traubeneichen-Pflanzverbands- und Sortimentsversuches im Forstamt Hardeggen/Solling. In: Forst und Holz 43: 447–450.
- SPONAGEL, H., AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN DER STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTE UND DER BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE und BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung: mit 103 Tabellen und 31 Listen. Stuttgart.
- STAAF, H. und B. A. OLSSON (1994): Effects of slash removal and stump harvesting on soil water chemistry in a clearcutting in SW Sweden. In: Scandinavian Journal of Forest Research 9 (1–4): 305–310.
- STEVENS, P. A. und M. HORNUNG (1990): Effect of harvest intensity and ground flora establishment on inorganic-N leaching from a Sitka spruce plantation in north Wales, UK. In: Biogeochemistry 10 (1). Internet: <http://link.springer.com/10.1007/BF00000892> (24.06.2021).
- STOLL, B. (2011): Vergleich unterschiedlicher Anbaumethoden von Energieholzplantagen. Monographie. Göttingen.
- STREBEL, O., W. H. M. DUYNISVELD und J. BÖTTCHER (1989): Nitrate pollution of groundwater in western Europe. In: Agriculture, Ecosystems & Environment 26 (3–4): 189–214.
- STRUCK, G. (1999): Effekte von Pflanzverband, Kulturdüngung und Schlagräumung am Beispiel junger Traubeneichenbestände. Band 8. Göttingen.
- SUTTON, R. F. (1993): Mounding site preparation: A review of European and North American experience. In: New Forests 7 (2): 151–192.

- SWAIM, J. T., D. C. DEY, M. R. SAUNDERS, D. R. WEIGEL, C. D. THORNTON, J. M. KABRICK und M. A. JENKINS (2016): Predicting the height growth of oak species (*Quercus*) reproduction over a 23-year period following clearcutting. In: *Forest Ecology and Management* 364: 101–112.
- UHL, E., P. BIBER, M. ULBRICHT, M. HEYM, T. HORVÁTH, F. LAKATOS, J. GÁL, L. STEINACKER, G. TONON, M. VENTURA und H. PRETZSCH (2015): Analysing the effect of stand density and site conditions on structure and growth of oak species using Nelder trials along an environmental gradient: experimental design, evaluation methods, and results. In: *Forest Ecosystems* 2 (1): 17.
- VANCE, E. D., P. C. BROOKES und D. S. JENKINSON (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C. In: *Soil Biology and Biochemistry* 19 (6): 703–707.
- VILLALOBOS, A., F. SCHLYTER, G. OLSSON, J. WITZELL und M. LÖF (2020): Direct seeding for restoration of mixed oak forests: Influence of distance to forest edge, predator-derived repellent and acorn size on seed removal by granivorous rodents. In: *Forest Ecology and Management* 477: 118484.
- VITOUSEK, P. M., J. R. GOSZ, C. C. GRIER, J. M. MELILLO, W. A. REINERS und R. L. TODD (1979): Nitrate Losses from Disturbed Ecosystems: Interregional comparative studies show mechanisms underlying forest ecosystem response to disturbance. In: *Science* 204 (4392): 469–474.
- WAGNER, M., B. SCHELER, J. SUTMÖLLER, I. DAMMANN, U. PAAR, H. MEESENBURG und J. EICHHORN (2019): Die extreme Trockenheit 2018 in Norwestdeutschland, Teil 2. In: *AFZ-DerWald* (6/2019): 47–50.
- WALL, A. (2008): Effect of removal of logging residue on nutrient leaching and nutrient pools in the soil after clearcutting in a Norway spruce stand. In: *Forest Ecology and Management* 256 (6): 1372–1383.
- WALLERTZ, K., N. BJÖRKLUND, K. HJELM, M. PETERSSON und L.-G. SUNDBLAD (2018): Comparison of different site preparation techniques: quality of planting spots, seedling growth and pine weevil damage. In: *New Forests* 49 (6): 705–722.
- WALLERTZ, K. und C. MALMQVIST (2013): The effect of mechanical site preparation methods on the establishment of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in southern Sweden. In: *Forestry* 86 (1): 71–78.
- WALLRAF, A. und S. WAGNER (2019): Effects of initial plant density, interspecific competition, tending and age on the survival and quality of oak (*Quercus robur* L.) in young mixed stands in European Russia. In: *Forest Ecology and Management* 446: 272–284.
- WEIS, W., C. HUBER und A. GÄTTLEIN (2001): Regeneration of Mature Norway Spruce Stands: Early Effects of Selective Cutting and Clear Cutting on Seepage Water Quality and Soil Fertility. In: *The Scientific World JOURNAL* 1: 493–499.
- WEIS, W., V. ROTTER und A. GÖTTLEIN (2006): Water and element fluxes during the regeneration of Norway spruce with European beech: Effects of shelterwood-cut and clear-cut. In: *Forest Ecology and Management* 224 (3): 304–317.
- WICKHAM, H., M. AVERICK, J. BRYAN, W. CHANG, L. D. MCGOWAN, R. FRANÇOIS, G. GROLEMUND, A. HAYES, L. HENRY, J. HESTER, M. KUHN, T. L. PEDERSEN, E. MILLER, S. M. BACHE, K. MÜLLER, J. OOMS, D. ROBINSON, D. P. SEIDEL, V. SPINU, K. TAKAHASHI, D. VAUGHAN, C. WILKE, K. WOO und H. YUTANI (2019): Welcome to the tidyverse. In: *Journal of Open Source Software* 4 (43): 1686.
- WILLOUGHBY, I., P. BALANDIER, N. S. BENTSEN, N. MAC CARTHY und J. CLARIDGE (2009): Forest vegetation management in Europe: current practice and future requirements. Post-Print. Internet: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:hal:journl:hal-00468013>.

WU, J., R. G. JOERGENSEN, B. POMMERENING, R. CHAUSSOD und P. C. BROOKES (1990):
Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated
procedure. In: Soil Biology and Biochemistry 22 (8): 1167–1169.