

# Auswirkung von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt von Waldböden sowie den Erfolg von Eichenkulturen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. forest

der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie

der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Dominik Tamke

Geboren am 06.06.1991 in Zeven

Göttingen, April 2024

1. Gutachter: Prof. Dr. Christian Ammer
2. Gutachter: Prof. Dr. Martin Maier

Tag der mündlichen Prüfung: 5.3.2024

# Effect of site preparations on the nutrient balance of forest soils and the success of oak regeneration

Dissertation

to attain the doctoral degree

Dr. forest

of the Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology

Georg-August-Universität Göttingen

Submitted by

Dominik Tamke

born on the 06.06.1991 in Zeven

Göttingen, April 2024

1. Referee: Prof. Dr. Christian Ammer
2. Referee: Prof. Dr. Martin Maier

Date of oral examination: March 5<sup>th</sup>, 2024

---

## Danksagung

Ich hatte die Ehre, das „ABoNae“-Projekt an der NW-FVA fast 4 Jahre lang wissenschaftlich zu begleiten und bin dafür sehr dankbar. Obwohl das Projekt viele Schwierigkeiten mit sich brachte und das Scheitern drohte, konnten wir letztendlich gute Ergebnisse erzielen und ich viel lernen.

Zunächst möchte ich mich bei der FNR für die Förderung des Projekts (Förderkennzeichen: 22001817) bedanken. Diese Arbeit ist aus dem Projekt hervorgegangen und ohne dieses Projekt wäre ich vermutlich nie auf die Idee gekommen zu promovieren. Was wäre ein praxisnahes Projekt ohne Versuchsflächen? Für die Bereitstellung der Versuchsflächen und die gute Zusammenarbeit auf der Fläche möchte ich mich bei den Kollegen von Hessen Forst, dem Landesforstbetrieb Sachsen-Anhalt und den Niedersächsischen Landesforsten bedanken.

Besonderer Dank gebührt auch Herrn Prof. Spellmann. Ohne Ihn wäre die Promotion wahrscheinlich nicht auf den Weg gebracht worden. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Eichhorn, Herrn Prof. Ammer und Frau Dr. Talkner für ihre Bereitschaft danken, die Arbeit zu betreuen. Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Maier, der nach dem Ausscheiden von Herrn Prof. Eichhorn als Gutachter eingesprungen ist.

Mein besonderer Dank gilt auch Holger Sennhenn-Reulen und Dan Zederer. Für die Freundschaft und die Zeit, die ihr in mich investiert habt (ihr habt mich sehr unterstützt). An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Idee zur Auswertung mit Methoden der Bayesischen Statistik von Holger Sennhenn-Reulen stammt. Holger konnte mich auch überzeugen, dass es sich lohnt, sich mit der Modellierung näher auseinander zu setzen. Er hat die Auswertungen überwacht und mich bei Fehlern korrigiert.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Kollegen der NW-FVA. Es war schön mit euch ein Stück des Lebensweges zu gehen. Ihr seid super! Egal welches Problem ich hatte, ich konnte jederzeit zu jedem Kollegen fragen. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei den Teams des Labors, der IT und der ZS bedanken. Auch ihr seid ein Teil dieser Arbeit.

Auch die umfangreichen Geländearbeiten konnte ich nicht alleine bewältigen. Dafür möchte ich mich besonders bei Alex, André, David, Moritz, Ralf, Vanessa und Vicco bedanken. Mein Dank gilt auch Etta Starick für die tollen Grafiken (Abbildung 3 und Abbildung 10) und Maximilian Axer für das Korrekturlesen und die Anregungen zur Verbesserung meines Schreibstils.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen aus dem Sachgebiet Waldverjüngung für die tolle Zeit: Regina, André, Nikolas, Patricia und Volker.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Vermieter Herrn Schäfer, dass ich bei ihm wohnen durfte und so, wie schon während meines Studiums, eine sehr schöne Zeit auf dem Nikolausberg hatte. Bedanken möchte ich mich auch bei der Jagdhornbläsergruppe Güntersen. Danke, dass ich trotz meiner mangelnden Begabung bei euch mitblasen durfte und für die schöne Zeit.

Ich möchte mich auch bei meinen Glaubensgeschwistern Christina, Henning, Justus und Xenia bedanken. Danke, dass wir unsere Herzen teilen durften und für die Gebete.

Abschließend möchte ich mich noch herzlich bei meiner Familie bedanken, welche in der Heimat die „Stellung“ gehalten hat. Ihr habt mir ermöglicht trotz meiner Verpflichtungen noch einmal in die Ferne zu gehen, meinen Horizont zu erweitern und viele tolle Menschen kennen zu lernen. Danke dafür!

## Zusammenfassung

Bodenbearbeitungen im Wald stehen in der Kritik, die Leistungsfähigkeit des Standortes, durch Bodenverdichtung und Nährstoffausträge, zu beeinträchtigen. Allerdings sind Bodenbearbeitungen aus Sicht der Praxis für eine erfolgreiche Kulturbegründung von lichtbedürftiger Eiche unverzichtbar. Ein neu entwickeltes, baggergestütztes Bodenbearbeitungsverfahren, das unter dem Namen „Silvafixverfahren“ bekannt ist, wird im Vergleich zu herkömmlichen Bodenbearbeitungsverfahren sowohl als bodenpfleglich als auch effektiv in der Begleitwuchsregulierung angesehen. Fraglich ist jedoch, ob das Silvafixverfahren den technischen und ökologischen Anforderungen an Bodenbearbeitungsverfahren gerecht werden kann. Um dies zu beantworten, wurde das Silvafixverfahren mit etablierten Bodenbearbeitungsverfahren verglichen. Untersucht wurde die Wirkung auf Bodenparameter (Nährstofffrachten, Nährstoffvorräte und Bodenwasserspannung) sowie die Entwicklung von Eichenkulturen (Überlebenswahrscheinlichkeiten, Höhenzuwachs, Wurzelhalsdurchmesserzuwachs).

Im Zuständigkeitsbereich der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt wurden in 3 Regionen mit einem Schwerpunkt auf dem Eichenanbau Versuchsfelder angelegt. Neben einer Kontrollgruppe ohne Bodenbearbeitung wurde das Silvafixverfahren als Vergleichsverfahren in allen 3 Regionen angewendet. Zusätzlich wurde in jeder Region das dort übliche Standardverfahren zur Bodenbearbeitung ausgeführt (Hoher Fläming: Streifenpflug, Hessisches Ried: Fräsen, Ostbraunschweigisches Flachland: Mulchen). Über einen Zeitraum von 2 Jahren nach den Bodenbearbeitungen wurden mit Mikrokosmen-Lysimetern Sickerwässer gewonnen. Am Ende des Versuchs wurden die Bodennährstoffvorräte in den Mikrokosmen-Lysimetern ermittelt. Auf einem Teil der Versuchsfelder wurde außerdem eine  $N_{\min}$ -Analyse durchgeführt. Die Bodenwasserspannung wurde mit Matrixpotentialsensoren gemessen. Zur Beurteilung der Kulturentwicklung wurden Probestämme ausgewählt. Am Ende der Vegetationsperiode fanden jährlich eine Überlebensanalyse sowie eine Messung der Höhe und des Wurzelhalsdurchmessers statt. Mithilfe bayesianischer Parameterschätzungen wurden die Daten ausgewertet.

Es zeigte sich, dass Nährstofffrachten stärker vom Bewuchs als vom Bodenbearbeitungsverfahren beeinflusst wurden. Manche Bodenbearbeitungsverfahren, wie z. B. Fräsen, konnten die Nährstofffrachten im Vergleich zur Kontrolle verringern. Bodenbearbeitungsverfahren, die mit einer horizontalen Verlagerung von Nährstoffen einhergingen, minderten die Nährstoffvorräte besonders auf schwach versorgten Sandstandorten erheblich, wie im Hohen Fläming. Hierbei schien eine kleinräumige Verlagerung, wie beim Streifenpflug, unproblematisch; hingegen schien eine großräumige Verlagerung, wie bei der Silvafix-Baggerräumung, problematisch. Zudem wurden in den Ablagerungsbereichen erhöhte Nährstofffrachten beobachtet. Durch die Regulierung der Begleitvegetation konnten Bodenbearbeitungen die Bodenwasserspannung in Regionen mit Trockenstress erheblich verbessern. Bodenbearbeitungen begünstigten die Überlebenswahrscheinlichkeit im Hohen Fläming. Ohne Bodenbearbeitung war die Eichensaat in einem vergrasteten Bestand ein Totalausfall. Darüber hinaus verbesserten Bodenbearbeitungen das Höhen- sowie das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen bei intensiver Konkurrenz.

Für die waldbauliche Praxis lässt sich ableiten, dass die etablierten Standardverfahren als nährstoffnachhaltig bewertet werden können und eine gute Kulturentwicklung ermöglichen. Hinsichtlich der Begleitwuchsregulierung steht das Silvafixverfahren den regionalen Standardverfahren in nichts nach. Allerdings geht dieses Verfahren mit einer massiven Nährstoffvorratsminderung auf schwachen Standorten einher und kann daher nur für Standorte mit einer guten Nährstoffversorgung empfohlen werden. Auf Bodenbearbeitung kann für eine gute Kulturentwicklung nur auf Standorten ohne Konkurrenzvegetation verzichtet werden.

Für eine gute Kulturentwicklung sollte das Bodenbearbeitungsverfahren an den Begleitwuchs angepasst sein. Es gilt: Je intensiver die Begleitvegetation, desto intensiver das Bodenbearbeitungsverfahren. Falls Bodenbearbeitungen erforderlich sind, sollten Verfahren gewählt werden, die ohne horizontale Nährstoffverlagerungen auskommen. Dadurch werden erhöhte Nährstofffrachten in den Konzentrationsbereichen von Schlagabraum und Humusaufgabe vermieden und die Nährstoffvorräte auf der Fläche nicht beeinträchtigt. Dies gilt besonders für Standorte mit schwacher mit Nährstoffversorgung. Bleibt nach der Bodenbearbeitung auflaufende Begleitvegetation aus, sollte eine



Nutzpflanzendecke zur Nährstofffixierung eingesetzt werden. Da die Baggerräumung bis auf die Nährstoffverlagerungen überzeugen konnte, sollte das Räumaggregat weiter entwickelt werden. Es könnte ein Anbauaggregat konstruiert werden, das dem Streifenpflug ähnelt und so die Nährstoffe auf der Fläche belässt.



---

## Summary

Site preparation in forests has received criticism for potentially reducing site productivity due to soil compaction and nutrient losses. Nonetheless, from a practical perspective, site preparation is an essential factor for the successful establishment of light-demanding oak. The recently introduced "Silvafix method", an excavator site preparation technique, is considered to be superior to conventional site preparation methods in terms of soil conservation and reduction of the growth of competing vegetation. It is uncertain whether the Silvafix method satisfies the technical and ecological requirements for site preparation. This study compared the Silvafix method with conventional site preparation techniques, examining their impact on soil parameters (nutrient flux, nutrient stock and soil water tension) as well as tree development (survival probabilities, height growth, and root collar diameter growth).

Study sites were established in 3 regions with a focus on oak production within the area of authority of the Northwest German Forest Research Institute. In addition to a control without site preparation, the Silvafix method was carried out as a reference method in all regions. In each region the locally established standard site preparation method was carried out (Hoher Fläming: strip plough, Hessisches Ried: milling, Ostbraunschweigisches Flachland: mulching). Soil leachate was collected for 2 years following site preparation using microcosm lysimeters. At the end of the experiment, soil nutrient stocks were determined for the microcosm lysimeters. On a subset of the study sites,  $N_{\min}$  analysis was carried out. Soil water tension was measured using matrix potential sensors. Sample trees were selected for growth control. At the end of each vegetation period, survival was controlled and the height and root collar diameter were measured. The data was analysed using Bayesian parameter estimates.

It has been demonstrated that nutrient fluxes are largely influenced by vegetation cover rather than site preparation method. Some site preparation methods, e.g. milling, showed reduced nutrient fluxes compared to the control. Site preparation methods that result in a horizontal displacement of nutrients have been found to significantly reduce nutrient stocks, especially on poorly supplied sandy sites, such as in the "Hoher Fläming" region. Small-scale displacement, as demonstrated by strip ploughing, was found to be

---

unproblematic; whereas large-scale displacement, as demonstrated by the Silvafix method, was found to be problematic. In addition, increased nutrient fluxes were observed in the deposition areas. Site preparation, which regulates competing vegetation, improved soil water tension in regions experiencing drought. Site preparation increased the probability of survival in the “Hoher Fläming” region. No site preparation led to failure of oak seed in grass dominated Pine forests. However, by carrying out site preparations, height growth and root collar diameter growth of the planted oak regeneration increased, particularly in cases of intense competition.

It could be shown that the regional standard site preparation methods were well adapted to the local conditions. They were nutrient-sustainable and allowed good plant development. The Silvafix method was comparable to the regional standard site preparation methods in terms of reducing competing vegetation. However, it should be noted that the Silvafix method resulted in a significant decrease in nutrient stocks on sites with poor nutrient supply and can therefore only be recommended on sites with rich nutrient supply. On sites without competing vegetation, there is no need for site preparation to ensure good tree development.

For optimal plant growth, site preparation methods should be adapted to the competing vegetation. The intensity of the site preparation method should correspond to the density of the competing vegetation. In case site preparation is required, techniques should be used that do not displace nutrients horizontally. This will prevent an increase in nutrient fluxes in slash and forest floor material areas while preserving nutrient reserves on the site. This is especially true for sites with limited nutrient supply. In the absence of vegetation following site preparation, a crop cover should be seeded to retain the nutrients. As the Silvafix method was convincing with the exception of nutrient displacement, the clearing unit needs to be further developed. A clearing unit could be constructed that functions comparable to the strip plough and thereby leaves the nutrients on the site.

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Material und Methoden .....	13
2.1	Versuchsflächenbeschreibung .....	16
2.1.1	Hoher Fläming.....	16
2.1.2	Hessisches Ried .....	17
2.1.3	Ostbraunschweigisches Flachland .....	18
2.2	Aufnahmen.....	20
2.2.1	Korngrößenanalyse .....	20
2.2.2	Nährstoffhaushalt .....	21
2.2.3	Bodenwasserspannung.....	25
2.2.4	Kulturentwicklung.....	26
2.3	Statistische Auswertung.....	29
2.3.1	Statistische Methoden .....	29
2.3.2	Nährstoffhaushalt .....	32
2.3.3	Bodenwasserspannung.....	38
2.3.4	Kulturentwicklung.....	40
3	Ergebnisse .....	49
3.1	Nährstoffhaushalt .....	49
3.1.1	Bodenphysikalische und -chemische Charakterisierung der Standorte... 49	49
3.1.2	Nährstofffrachten .....	52
3.1.3	Nährstoffvorrat .....	56
3.1.4	Relative Nährstofffrachten .....	60
3.1.5	NO <sub>3</sub> -N <sub>min</sub> -Vorrat .....	62
3.2	Bodenwasserspannung .....	64

---

3.3	Kulturentwicklung.....	67
3.3.1	Überlebenswahrscheinlichkeiten.....	67
3.3.2	Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserwachstum.....	71
4	Diskussion.....	80
4.1	Nährstoffhaushalt.....	80
4.1.1	Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Nährstofffrachten .....	81
4.1.2	Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Nährstoffvorräte .....	89
4.1.3	Alternativen zur Bodenschonung.....	93
4.2	Bodenwasserspannung.....	95
4.2.1	Der Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenwasserspannung .....	95
4.2.2	Alternativen zur Verbesserung der Bodenwasserspannung.....	98
4.3	Kulturentwicklung.....	101
4.3.1	Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Überlebenswahrscheinlichkeit von Eichenkulturen .....	101
4.3.2	Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf das Höhenwachstum von Eichenkulturen .....	104
4.3.3	Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen.....	105
4.3.4	Alternative Eichenverjüngungsverfahren .....	107
4.4	Entscheidungshilfe Bodenbearbeitung .....	109
4.5	Stärken und Limitierungen .....	113
4.5.1	Stärken .....	113
4.5.2	Limitierungen .....	114
5	Schlussfolgerungen .....	116
6	Literatur.....	XVII
7	Anhang .....	XXXVIII

---

7.1	Veröffentlichungen und Vorträge .....	XXXVIII
7.2	Vorräte der Mikrokosmen-Lysimeter nach Kompartimenten .....	XXXIX
7.3	Tabellen mit parameterspezifischen Posteriori-Verteilungen der Modellierungen.....	XLII





## 1 Einleitung

Eichenwälder haben in Mitteleuropa seit jeher eine große Bedeutung. In der Vergangenheit wurden Eichenwälder aufgrund der vielseitigen Nutzung (Waldweide, Schiffbau, Bauholz, Brennholz) geschätzt (VON SCHÜTZ 1870), heute wegen ihres Wertholzgehaltes und ihrer Naturschutzfunktion (HORAK et al. 2014; KENK 1993; KRAHL-URBAN 1952; LÖF et al. 2015; RANIUS et al. 2008b; RANIUS et al. 2008a; RANIUS und JANSSON 2000; SSYMANK 2016; VODKA et al. 2009). Derzeit nimmt die Eichenanbaufläche in Deutschland als aktive Anpassung an den Klimawandel zu (THÜNEN-INSTITUT 2014). Unter dem Aspekt des Waldumbaus sehen die Waldbauprogramme der Länder [z. B. Niedersachsen (BÖCKMANN et al. 2019), Nordrhein-Westfalen (WALD UND HOLZ NRW 2014) oder Mecklenburg-Vorpommern (MV ML 2002)] eine weitere Erhöhung des Eichenanteils aufgrund ihrer geringen Windwurfanfälligkeit (ALBRECHT et al. 2012; SCHMIDT et al. 2010) und hohen Trockentoleranz (KUNZ et al. 2018; ZANG et al. 2011) vor.

Historische Anleitungen zur künstlichen Begründung von Eichenbeständen empfehlen eine vorherige Bodenbearbeitung (ENDRES 1901; MÖLDER et al. 2017; MORTZFELDT 1896; VON SCHÜTZ 1870). Diese Einschätzung wird auch heute noch geteilt, wie neuere Untersuchungen zur Eichenverjüngung belegen (LÖF et al. 1998; LÖF und BIRKEDAL 2009; MÖLDER et al. 2019). Bodenbearbeitungen lassen sich mit zunehmender Intensität in plätzeweise, streifenweise und flächige Verfahren unterteilen. Plätzeweise Bodenbearbeitungsverfahren eignen sich besonders zur Verjüngung von Kulturen mit geringen Ausgangspflanzenzahlen oder zum Auspflanzen von kleineren Flächen, da die Kosten pro Pflanzplatz relativ hoch sind (LÖF et al. 2012). Die Anlage von Pflanzplätzen kann manuell oder maschinell durch Abplaggen von Vegetation und Humus erfolgen. Als mögliches schleppergestütztes Verfahren kann das Kullagerät oder bei baggergestützten Verfahren der Löffel oder das Loboaggregat eingesetzt werden. Die streifenweise Bodenbearbeitung legt im Gegensatz zur plätzeweisen Bodenbearbeitung den Mineralboden durchgehend frei und eignet sich daher für Kulturen mit hohen Ausgangspflanzenzahlen bei teilflächiger Bearbeitung. In der Regel werden von einem Schlepper gezogene Streifenpflüge oder TTS-Geräte eingesetzt zur streifenweisen Freilegung des Mineralbodens. Flächige Bodenbearbeitungen empfehlen sich für Kulturen mit hohen Ausgangspflan-

zenzahlen, wie sie für Eichenkulturen üblich sind (BEHRNDT 1969). Im Zuge der Mechanisierung, Rationalisierung und als Folge ausgedehnter Kahlfelder durch Kalamitäten, wurden in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts immer tiefer greifende Methoden der flächigen Bodenbearbeitung entwickelt (BEHRNDT 1979; BEHRNDT 1968; KRAMER 1978; NOPP et al. 1998; RIPKEN 1979; RIPKEN 1973). Der stärkste Eingriff erfolgte durch den Vollumbruch (BEHRNDT 1979; RIPKEN 1973). Dabei wurde im Vorfeld der Schlagabraum mit Raupen auf Wälle im Abstand von 40–60 m zusammengeschoben und die Fläche im Anschluss tief gepflügt. Erste negative Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf das Pflanzenwachstum durch Nährstoffverlagerung konnten bereits wenige Jahre nach dem Vollumbruch nachgewiesen werden (ARNOLD 1982; GROVE 1981) und später auch in älteren Beständen (STRUCK 1999). So waren Eichen 3 Jahre nach der Pflanzung in 10 m Entfernung vom Wall nur etwa halb so hoch wie Eichen, welche direkt am Wall gepflanzt wurden (ARNOLD 1982). In der Folge haben Verfahrensentwicklungen eingesetzt, welche den Humus stärker schonen und die Nährstoffe auf der Fläche belassen (ABELE und LIESER 1991; DENNINGER 1980; GROVE 1981).

Neue Bodenbearbeitungsverfahren haben ihren Ursprung häufig in der Praxis mit dem Ziel der technischen Verbesserung von Arbeitsverfahren (ARNOLD 1982). Rein technische Fortschritte bergen die Gefahr, im Widerspruch zu ökologischen Grundlagen, wie z. B. der biologischen Produktion, zu stehen und negative Wirkungen zu erzielen (ARNOLD 1982). Im Mittelpunkt dieser Studie stand die Bewertung der Chancen und Risiken verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren. Bewertet wurden die Nährstoffnachhaltigkeit und der Kulturerfolg. Ein Verfahren gilt als nährstoffnachhaltig, wenn die Nährstoffvorräte im Boden unverändert bleiben im Vergleich mit einer Kontrolle ohne Bodenbearbeitung. Als Indikator für die Veränderung der Bodennährstoffvorräte dienen die Nährstofffrachten in der Bodenlösung. Die Erhaltung der Bodennährstoffvorräte ist die Voraussetzung für eine langfristige konstante Nährstoffversorgung der Bestände.

## **Chancen**

Bodenbearbeitungen steigern den Kulturerfolg bei Eiche (MÖLDER et al. 2019). Dies ist vor allem auf eine Reduzierung der Konkurrenz durch Begleitwuchs zurückzuführen (LÖF und BIRKEDAL 2009) und führt zu gesteigerten Überlebenswahrscheinlichkeiten von Kulturen (HANSSEN et al. 2003; LÖF et al. 2006; ÖRLANDER et al. 1998). In einer Studie aus

Südschweden lag die Überlebenswahrscheinlichkeiten von Eichensämlingen nach 3 Jahren bei vorheriger Bodenbearbeitung bei fast 90 %, in der unbehandelten Kontrolle dagegen nur bei 58 % (LÖF et al. 2006). Besonders negativ wirkt sich die Konkurrenz von Begleitgehölzen auf die Überlebenswahrscheinlichkeit von Eichenkulturen aus. So betrug in einer Untersuchung die Überlebensrate einer Eichenkultur mit Begleitgehölzen nach 8 Jahren lediglich 20 %, während sie in der Kontrolle ohne Begleitgehölze bei über 90 % lag (JENSEN und LÖF 2017).

Darüber hinaus verbessern Bodenbearbeitungen den Wärmehaushalt (WALLERTZ und MALMQVIST 2013) und steigern die Bodenfeuchte (LÖF et al. 1998; ÖRLANDER et al. 1998). LÖF et al. (2006) konnten zeigen, dass durch Bodenbearbeitung im Herbst die Bodenwasserspannung (auch Matrixpotential genannt) günstiger ist (-900 hPa) als in der unbearbeiteten Kontrolle (-2400 hPa). Wie DAVIS et al. (1998) nachweisen konnten, hängt eine verbesserte Bodenfeuchte mit weniger Begleitvegetation zusammen. Dies wird durch eine Studie zur Wirkung der Begleitwuchsregulierung auf die Bodenfeuchte bestätigt: In der Variante mit Bodenbearbeitung lag die Bodenfeuchte im Hochsommer bei 16 %, in der unbehandelten Kontrolle bei 10 % (LÖF et al. 2004a).

Ein verbesserter Wärmehaushalt und eine verbesserte Bodenfeuchte begünstigen die Wuchsbedingungen von Kulturen, die vor allem in Konkurrenz um unterirdische Ressourcen stehen (NILSSON et al. 1996a). Die Mineralisierung organischer Substanz durch Mikroorganismen ist abhängig von der Bodentemperatur (BORKEN et al. 2002; CAMBI et al. 2017; SØE und BUCHMANN 2005) und der Bodenfeuchte (OTTOW 2011). Ein erhöhter Wärmehaushalt und eine höhere Bodenfeuchte steigern die Mineralisationsraten und führen zu einer verbesserten Nährstoffverfügbarkeit (LUNDMARK-THELIN und JOHANSSON 1997). Weiterhin kann ein erhöhter Wärmehaushalt das Wurzelwachstum fördern. ALVAREZ-URIA und KÖRNER (2007) konnten in ihrer Untersuchung zum Wurzelwachstum in Abhängigkeit von der Bodentemperatur nachweisen, dass ein signifikantes Wurzelwachstum erst ab einer Temperatur von 6 °C einsetzt. Während Hitzeperioden besteht die Möglichkeit, dass Pflanzenwurzeln durch zu hohe Temperaturen von über 35 °C geschädigt werden (DÜMIŇŠ et al. 2020). Studien zum Baumwachstum, in Abhängigkeit von der Bodentemperatur, konnten für verschiedene Baumarten unterschiedliche Optima

nachweisen. So zeigen Nadelbäume der gemäßigten Zone Wuchsoptima bei eher niedrigen Temperaturen (unter 20 °C), Buche und Linde bei 20 °C und Eiche bei 25 °C (LYR 1996; LYR und GARBE 1995). Auch eine Verbesserung der Bodenfeuchte begünstigt das Baumwachstum. Es konnte gezeigt werden, dass Buchen bei gleichem Lichtgenuss unter Wassermangel ein vermindertes Wachstum aufwiesen (COLL et al. 2004; COLL et al. 2003). Zudem ist der Bodenfeuchtezustand bei der Kulturbegründung von besonderer Bedeutung, da frisch gepflanzte Kulturen unter Trockenstress nicht in der Lage sind neue Wurzeln auszubilden (GROSSNICKLE 2005) und somit ein erfolgreicher Anwuchs misslingt. In der Literatur finden sich Angaben zum Beginn von Trockenstress im Bereich von Bodenmatrixpotentialen von -500 hPa bis -1300 hPa, in Abhängigkeit von Boden- und Baumart (GROH et al. 2013; ROSENQVIST et al. 2010). Bereits ab Bodenmatrixpotentialen von -600 hPa werden Wuchsreduktionen beobachtet (GROSSNICKLE 2005; WAGNER et al. 2019).

Weiterhin haben Bodenbearbeitungen einen positiven Einfluss auf das Mikroklima. So konnten GEIGER und FRITZSCHE (1940) bereits 1940 in Brandenburg zeigen, dass Bodenbearbeitungen die Gefahr von Spätfrösten durch Strahlungsfrost verringern. In Frostnächten konnten sie eine um bis zu 4°C höhere Temperatur auf Flächen mit Vollumbruch nachweisen gegenüber Flächen ohne Bearbeitung. Dieser Effekt kann auch durch schonendere Bodenbearbeitungsverfahren genutzt werden, wenn der Mineralboden freigelegt wird. Der auf dem Mineralboden liegende Humuskörper wirkt aufgrund seiner schlechten Wärmeleitfähigkeit isolierend. So erwärmt sich der Mineralboden unter einer Humusaufgabe tagsüber langsamer auf als der freiliegende Mineralboden (GROSSNICKLE 2005). Nachts gibt der freiliegende Mineralboden diese Wärme an die Umgebungsluft ab und erwärmt diese. Generell haben feuchte Böden eine gute Wärmeleitfähigkeit, aber eine schlechte Temperaturleitfähigkeit. Luft hingegen weist aufgrund ihrer geringen Dichte eine schlechte Wärmeleitfähigkeit, aber eine gute Temperaturleitfähigkeit auf (SYMADER 2004). Daher nimmt die den Boden umgebende Luft schnell die Temperatur des Bodens an. Bei starker Abkühlung des Bodens kann es in der Folge zu Strahlungsfrost kommen. Wind wirkt der Spätfrostgefahr durch Durchmischung der Luft entgegen (GEIGER und FRITZSCHE 1940; SYMADER 2004). BEHRNDT (1968) bestätigte die Beobachtung der Spätfrostreduktion durch Bodenbearbeitung.

---

Zudem lockern Bodenbearbeitungen den Boden auf. Die Lockerungstiefe hängt dabei von der Bearbeitungstiefe des Bodenbearbeitungsverfahrens ab. Durch die verringerte Lagerungsdichte des Bodens benötigen die Pflanzen einen geringeren Energieaufwand um mit ihren Wurzeln den Bodenraum zu erschließen. Dies 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). LÖF und BIRKEDAL (2009) konnten für Eichensaaten in gelockertem Boden eine bis zu doppelt so große Durchwurzelungstiefe von 40 cm und ein dreifach so großes Sämlingstrockengewicht von 15 g gegenüber einer unbearbeiteten Kontrolle nachweisen. JANDL et al. (2007) konnten in ihrem Review zeigen, dass Kohlenstoffverluste im Boden, 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). Bereits nach 2 Jahren waren in einem brandenburgischen Versuch die Baumhöhen und die Wurzelhalsdurchmesser von Eichensämlingen, die in Pflug- oder Frässtreifen gepflanzt wurden, denen ohne Bodenbearbeitung überlegen (KÄTZEL et al. 2005). Auch LÖF et al. (2006) konnte einen positiven Effekt der Bodenbearbeitung auf die Entwicklung einer Eichenkultur belegen. Im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle waren nach 3 Jahren der Wurzelhalsdurchmesser mit 12 mm gegenüber 9 mm und die Wuchshöhe mit 90 cm gegenüber 70 cm signifikant höher. In einer südschwedischen Studie mit 3 Bodenbearbeitungsverfahren und einer unbearbeiteten Kontrolle zeigten die Eichenpflanzen nach 3 Wuchsjahren in den Bearbeitungen ein um 5,8–8,4 cm größeres Höhenwachstum und ein mit 2,5–3,1 mm überlegenes Wurzelhalsdurchmesserwachstum (GEMMEL et al. 1996). Darüber hinaus können Bodenbearbeitungen einen negativen Effekt auf Schadorganismen ausüben (SIKSTRÖM et al. 2020; VILLALOBOS et al. 2020; WALLERTZ et al. 2018). So weist DENNINGER (1980) darauf hin, dass nach dem Fräsen als kulturvorbereitende Bodenbearbeitung keine Schäden durch Nagerfraß zu erwarten sind.

## Risiken

Neben den im vorigen Abschnitt beschriebenen positiven Wirkungen von Bodenbearbeitungen bestehen auch Risiken, die sich unter anderem aus der Veränderung bodenphysikalischer und bodenchemischer Parametern ergeben (HOFMANN 1992; HORN und LEBERT 1992).

Bodenbearbeitungsverfahren, die eine vollflächige Befahrung erfordern (Fräsen, Mulchen, Streifenpflug), weisen ein höheres Verdichtungsrisiko auf, als Bodenbearbeitungsverfahren mit einer teilflächigen Befahrung (z. B. Baggerräumung). Zahlreiche Studien belegen den negativen Einfluss auf Böden, durch Verdichtung beim Befahren (EBELING et al. 2016a; HILDEBRAND 1983; LENHARD 1986). Bei mehrmaliger Befahrung können Verdichtungen bis in eine Tiefe von über 70 cm nachgewiesen werden, aber auch eine einmalige Überfahrt verdichtet den Oberboden (LÜSCHER et al. 2010). Neben der Anzahl der Überfahrten spielt der Kontaktflächendruck zwischen Maschine und Boden eine entscheidende Rolle für den Grad der Bodenverdichtung. Bei schleppergestützten Verfahren (Fräsen, Mulchen, Streifenpflug) kann im Vergleich zu Baggerräumungen von hohen Kontaktflächendrücken ausgegangen werden, da Bagger aufgrund des Kettenlaufwerkes geringe Kontaktflächendrücke aufweisen. Um Bodenschäden durch Befahren zu minimieren, sollten Bodenbearbeitungen nur auf tiefgründig abgetrockneten Flächen durchgeführt werden. Einerseits um Bodenverdichtungen durch Befahren der Fläche zu minimieren (CAMBI et al. 2017; LABELLE et al. 2019), da die Tragfähigkeit von Böden mit abnehmendem Wassergehalt zunimmt (ALLMAN et al. 2017), andererseits um das Bodengefüge zu erhalten (HORN und LEBERT 1992). Weiter sollten die Maschinengewichte möglichst gering sein, bei einer möglichst großen Kontaktfläche durch eine angepasste Bereifung (LÜSCHER et al. 2010).

Neben einem erhöhten Eindringwiderstand für Pflanzenwurzeln (HILDEBRAND 1983; LÜSCHER et al. 2010) fördern Bodenverdichtungen auch Staunässe, die zu Sauerstoffmangel führt (FREY und HARTMANN 2013; HILDEBRAND 1983; LENHARD 1986). Beides wirkt negativ auf das Wurzelwachstum und damit auf das gesamte Pflanzenwachstum (EBELING et al. 2016a; HILDEBRAND 1983). Darüber hinaus konnten FREY und HARTMANN (2013) zeigen, dass nach Befahrung die Emissionen von Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) anstiegen, und die Anzahl von Mykorrhizapilzen und aerober Bakterien abnahmen. Die natürliche

Regeneration von Verdichtungen ist ein langjähriger Prozess. EBELING et al. (2016b) konnten für tonige Böden eine hohe Regenerationsfähigkeit mit einer Dauer von 10 bis 20 Jahren nachweisen. Schluffige und sandige Böden zeigten hingegen ein geringeres Regenerationsvermögen. Sie vermuten, dass eine vollständige Regeneration Jahrhunderte dauern kann. Neben der Bodenart spielt auch die Tiefe der Bodenverdichtung eine Rolle. So konnten FROEHLICH et al. (1985) zeigen, dass nach 23 Jahren die Bodenverdichtung noch nicht auf dem Niveau der ungestörten Kontrolle lag, aber die Oberbodenverdichtung schneller abnahm als die Unterbodenverdichtung. Darüber hinaus ist zu beachten, dass auf tonigen Böden von einer in den Mineralboden eingreifenden Bodenbearbeitung ganz abzusehen ist, um die Eigenstabilität der Böden nicht zu gefährden (HORN und LEBERT 1992). Des Weiteren steigern vollflächige Bodenbearbeitungen in Hanglagen die Erosionsgefahr (ALCÁZAR et al. 2002; DENNINGER 1980).

Zudem wird angenommen, dass Bodenbearbeitungen die Mineralisationsraten steigern und in der Folge erhöhte Nährstoffauswaschungen zu beobachten sind (DENNINGER 1980). Insbesondere durch die mechanische Zerkleinerung beim Mulchen oder Fräsen und die damit einhergehenden gesteigerten Mineralisationsraten werden erhöhte Nährstofffrachten erwartet (DENNINGER 1980; SCHÜLER 1992). SCHÜLER (1992) verglich eine 15 cm tief gefräste Fläche mit einer gemulchten Fläche. Er fand für die Fräsbehandlung gegenüber der Mulchbehandlung geringere Nährelementgehalte und eine geringere Basensättigung nach der Bearbeitung im Oberboden. Daher rät er vom Fräsen aufgrund hoher Nährstoffverluste ab. Ein besonderes Augenmerk wird bei der Untersuchung von Nährstoffauswaschungen auf Nitrat gelegt, da Nitrat aufgrund seiner negativen Ladung leicht aus dem Boden ausgewaschen wird und hohe Nitratausträge das Grundwasser belasten (GUNDERSEN et al. 2006; PRIETZEL et al. 2008; WORRELL und HAMPSON 1997). Eine Untersuchung zeigte, dass 2–3 Jahre nach einer Bodenbearbeitung mit einem Maximum der Nitratauswaschungen zu rechnen ist und 3–5 Jahre nach einer Bodenbearbeitung die Nitratauswaschung wieder das Niveau vor der Bodenbearbeitung erreicht hat (GUNDERSEN et al. 2006). Andere Untersuchungen von BENECKE (1992) und SCHULTE-KARRING und SCHRÖDER (1992) berichten hingegen von geringeren Nitratfrachten nach mechanischer Zerkleinerung und Einarbeitung des Schlagabraums, wie beim Fräsen, im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrolle.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass die Bodenbearbeitung selbst die Nährstoffvorräte mindert. So konnten NOPP et al. (1998) für Bodenbearbeitungsverfahren mit großräumiger horizontaler Humusverlagerung durch die Bodenbearbeitung eine Verringerung der Nährstoffvorräte nachweisen. Sie zeigten, dass nach dem Abschieben mit einer Raupe der austauschbare Ca-Vorrat im Boden nur noch halb so groß war im Vergleich zur Kontrolle ohne Abschieben. ABELE und LIESER (1991) wiesen auf den Vorteil von Baggerräumungen mit einem Räumrechen gegenüber einem Baggerlöffel hin. Nach ihrer Ansicht verbleiben bei der Räumung mit einem Rechen mehr Nährstoffe auf der Fläche, als bei einer Räumung mit dem Baggerlöffel. Doch auch bei der Baggerräumung mit dem Rechen besteht der Nachteil einer teilweisen Nährstoffverlagerung und -anreicherung in den Ablagerungsbereichen (ABELE und LIESER 1991). Neben flächigen Bodenbearbeitungsverfahren, die den Schlagabraum von der Fläche räumen, werden auch flächige Bodenbearbeitungsverfahren ohne horizontale Schlagabraumverbringung wie Mulchen oder Fräsen eingesetzt. Neben dem Verbleib der Nährstoffe auf der Fläche haben diese Verfahren den Vorteil, dass keine Schlagabraumwälle entstehen. Hierdurch wird das Risiko von Kulturschäden durch Nagerfraß verringert (DENNINGER 1980).

Ungeachtet darf auch nicht der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Bodenflora und -fauna bleiben, auch wenn er in dieser Arbeit nicht im Vordergrund steht. WEI et al. (2019) konnten einen positiven Effekt der Bodenbearbeitung auf die Artendiversität nachweisen. Sie begründen den Anstieg mit einer zusätzlichen Störungskomponente durch die Bodenbearbeitung. Auch in einer Studie aus Südschweden konnte gezeigt werden, dass durch Bodenbearbeitungen die Anzahl an Pflanzenarten zunahm (KARLSSON und NILSSON 2005). Die Autoren weisen darauf hin, dass hierfür auch ein entsprechendes Samenpotential in der Umgebung vorhanden sein muss. Förderlich für die Anreicherung von windverbreiteten Baumarten ist es, wenn Samenbäume in der Hauptwindrichtung stehen (TIEBEL et al. 2020). Förderlich für die Anreicherung von Pflanzen, deren Samen durch Vögel verbreitet werden, ist das Vorhandensein von Strukturelementen (TIEBEL et al. 2017). In einer Langzeitstudie konnte nachgewiesen werden, dass die Diversität in den ersten Jahren nach Bodenbearbeitung zunimmt, sich langfristig jedoch die vor der Störung etablierten Pflanzengesellschaften wieder einstellen (HAEUSSLER et al. 2021).



---

PELTZER et al. (2000) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren und -intensitäten auf die Pflanzendiversität. Sie konnten keinen signifikanten Einfluss der Bearbeitungsintensität auf die Artendiversität nachweisen.

Auf die Mikrofauna von Böden haben Bodenbearbeitungen einen positiven Einfluss (OTTOW 2011), da sie die Böden lockern und somit die Belüftung fördern. Gehen Bodenbearbeitungen jedoch mit Humusentzügen einher, wird den Mikroorganismen ihre Energiequelle entzogen und es ist mit einer Abnahme der mikrobiellen Aktivität zu rechnen (ACHAT et al. 2015). Darüber hinaus ist bekannt, dass Bodenverdichtungen durch Befahrung zu einer Abnahme der mikrobiellen Aktivität aufgrund einer schlechteren Durchlüftung des Bodens sowie zu einer Änderung der Artenzusammensetzung der Mikroorganismen hin zu mehr anaeroben Arten führen (FREY und HARTMANN 2013). Des Weiteren nimmt mit zunehmender Bodenverdichtung die Mykorrhizierung ab (FREY und HARTMANN 2013). Die Artendiversität und die Artenanzahl der Makrofauna von Böden nimmt mit steigender Bodenbearbeitungsintensität ab (EMMERLING 2001; FELTEN und EMMERLING 2011; SMITH et al. 2008; SOUZA et al. 2016). Es konnte gezeigt werden, dass die Mächtigkeit der organischen Auflage, der P-Gehalt oder auch der Ca-Gehalt von Böden geeignete Variablen zur Erklärung von Regenwurmhäufigkeiten darstellen (FALCO et al. 2015). In einer finnischen Studie wurden die Auswirkungen verschiedener Hiebsmaßnahmen auf die Entwicklung der Makrofauna untersucht. 10 Jahre nach der Versuchsanlage war die Artendiversität bei allen Hiebsmaßnahmen, mit Ausnahme der Zielstärkennutzung mit maximal 30 % Vorratsabsenkung, signifikant geringer als bei der unbehandelten Kontrolle (SIIRA-PIETIKÄINEN und HAIMI 2009). Lochhiebe mit oder ohne anschließende Bodenbearbeitung, welche dem Streifenpflug ähnlich war, zeigten nach 10 Jahren keine signifikanten Unterschiede in der Artendiversität und Artenanzahl der Makrofauna im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle (SIIRA-PIETIKÄINEN und HAIMI 2009). Somit hatte die Eingriffsintensität der Hiebsmaßnahme einen größeren Einfluss auf die Artendiversität und Artenanzahl als die Bodenbearbeitung.

## Umgang mit Chancen und Risiken von Bodenbearbeitungen

Entsprechend den Risiken von Bodenbearbeitungen gestatten die nationalen Richtlinien der FSC-Zertifizierung keinen Eingriff in den Mineralboden (FSC DEUTSCHLAND und VEREIN FÜR VERANTWORTUNGSVOLLE WALDWIRTSCHAFT EV 2018) und der PEFC-Zertifizierung keinen vollflächigen Eingriff in den Mineralboden (PEFC DEUTSCHLAND E.V. 2014) zur Verjüngung. Bei der jüngsten Gesetzesnovelle des Niedersächsischen Gesetzes über den Wald und die Landschaftsordnung (NWALDLG 2020) heißt es im § 15 Abs. 4 Nr. 5, dass auf „... eine ganzflächige maschinelle Bodenbearbeitung auf Verjüngungsflächen einschließlich Mulchen verzichtet werden“ soll. Dies stellt eine deutliche Verschärfung der ansonsten in der Land- und Forstwirtschaft üblichen Regelungen zur ordnungsgemäßen Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis für den Landeswald dar.

Dementsprechend ist die Bodenbearbeitung im Rahmen der Eichenverjüngung ein aktuelles Thema, mit dem sich viele Forstbetriebe auseinandersetzen. Eine Weiterentwicklung der Bodenbearbeitung ist angesichts steigender Ansprüche an den Bodenschutz erforderlich. Die Niedersächsischen Landesforsten (AÖR) haben ein Bodenbearbeitungsverfahren mit einem neuen Räumrechen (genannt „Silvafix“) für den Baggeranbau konzipiert. Bei diesem Verfahren fährt der Bagger auf den vorhandenen Rückegassen. Von den Gassen aus kann der Baggerfahrer den Schlagabraum auf die Rückegassen hinter dem Bagger ziehen. Da die Rückegassen nicht bepflanzt werden und der Schlagabraum bis zur nächsten Befahrung bei der Erstdurchforstung größtenteils verrottet ist, stören Schlagabraumwälle auf den Gassen aus Sicht der Kulturbegründung und Bestandeschließung nicht. Im Gegensatz zum Baggerlöffel wird bei der Flächenräumung mit dem Silvafix die Humusaufgabe nicht mit abgezogen, sondern nur das grobe Reisig. Durch das Befahren der Rückegassen, der Schonung des Humus und dennoch die Fläche geräumt wird, scheint das Silvafixverfahren den Anforderungen des Bodenschutzes gerecht zu werden und gleichzeitig die Vorteile der Bodenbearbeitung zu nutzen.

Ob das Silvafixverfahren den technischen und ökologischen Anforderungen an Bodenbearbeitungsverfahren gerecht werden kann, ist fraglich. Schließlich weisen andere Autoren darauf hin, dass auch bei baggergestützten Räumverfahren mit Rechen Nährstoffverlagerungen unvermeidbar sind (s.o.). Zudem gehen mechanische Begleitwuchs-

regulierungen mit gesteigerten Mineralisationsraten und damit auch mit einem gesteigerten Nährstoffauswaschungspotential einher. Darüber hinaus ist unklar, ob ein bodenschonendes Verfahren zwar die Anforderungen an die Nährstoffnachhaltigkeit erfüllt, aber bei massiver Konkurrenzvegetation diese für eine gute Kulturentwicklung ausreichend reguliert und unabhängig vom Standort universell eingesetzt werden kann. Daher wurde in dieser Untersuchung das „Silvafixverfahren“ mit einer Kontrolle (keine Bodenbearbeitung) und jeweils einem örtlich etablierten Standardverfahren (im Folgenden auch "Bestverfahren" genannt) in den drei Eichenanbauswerpunkten Hessisches Ried (Hessen; Bestverfahren: Fräsen), Hoher Fläming (Sachsen-Anhalt; Bestverfahren: Streifenpflug) und Ostbraunschweigisches Flachland (Niedersachsen; Bestverfahren: Mulchen) hinsichtlich der Wirkungen auf den Nährstoffhaushalt sowie das Wuchsverhalten (Überlebensrate sowie Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserentwicklung (WHD)) von Eichenkulturen verglichen.

Häufig war der Effekt von Bodenbearbeitungen auf die Kulturentwicklung Gegenstand von Untersuchungen (HALLSBY und ÖRLANDER 2004; LÖF et al. 2006; LÖF et al. 1998; MÖLDER et al. 2019; NILSSON und ALLEN 2003; SIKSTRÖM et al. 2020; WALLERTZ und MALMQVIST 2013) und es werden weitere Studien zur Bodenbearbeitung gefordert, welche die Verjüngung und das Wachstum von Begleitvegetation untersuchen (SIKSTRÖM et al. 2020). Einige Artikel befassen sich mit verschiedenen Bodenbearbeitungsmethoden (LÖF et al. 2012; SUTTON 1993). Untersuchungen zu Nährstofffrachten nach Bodenbearbeitung (MCLAUGHLIN et al. 2000; PALVIAINEN et al. 2014) und zum Einfluss von Bodenbearbeitung auf die Nährstoffvorräte (BOCK und VAN REES 2002; NOPP et al. 1998) sind dagegen selten. Die Nährstoffnachhaltigkeit von Bodenbearbeitungsverfahren, als Grundlage für eine hohe Bestandesproduktion, fand bislang wenig Berücksichtigung (LÖF und BIRKEDAL 2009). AMMER et al. (2011) weisen auf widersprüchliche Angaben über die Nährstoffversorgung von Forstkulturen nach Bodenbearbeitung in der Literatur hin. Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, sowohl die Auswirkungen von Bodenbearbeitungen auf die Kulturentwicklung als auch auf den Boden zu untersuchen, und dadurch zu einer verbesserten Grundlage für die Empfehlung von Bodenbearbeitungen beizutragen.

Folgende Arbeitshypothesen wurden daher formuliert:

- I. Bodenbearbeitungen mit den Standardverfahren (Fräsen, Mulchen und Streifenpflügen) führen zu höheren Nährstofffrachten in der Bodenlösung des Oberbodens als keine Bodenbearbeitung. Das Silvafixverfahren ist nährstoffnachhaltig, da es geringere Nährstofffrachten in der Bodenlösung des Oberbodens hervorruft, als die Standardverfahren.
- II. Bodenbearbeitungen und folgende Nährstofffrachten haben keinen messbaren Einfluss auf die Nährstoffvorräte der Standorte.
- III. Bodenbearbeitungen begünstigen die Bodenwasserspannung. Das Silvafixverfahren hat eine ebenso günstige Wirkung auf die Bodenwasserspannung wie die Standardverfahren.
- IV. Bodenbearbeitungen begünstigen die Überlebenswahrscheinlichkeit von Eichenkulturen. Das Silvafixverfahren ist gleich gut geeignet wie die Standardverfahren.
- V. Bodenbearbeitungen begünstigen das Höhenwachstum von Eichenkulturen. Das Silvafixverfahren begünstigt das Höhenwachstum von Eichenkulturen in gleichem Maße wie die Standardverfahren.
- VI. Bodenbearbeitungen begünstigen das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen. Das Silvafixverfahren begünstigt das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen in gleichem Maße wie die Standardverfahren.

## 2 Material und Methoden

In 3 Regionen Deutschlands mit einem Schwerpunkt auf den Eichenanbau wurden Versuchsflächen eingerichtet (Abbildung 1). In jeder Region wurde eine Bodenbearbeitung mit dem Silvafixverfahren (Abbildung 2) (im Folgenden: Silvafix) als Referenzverfahren durchgeführt.

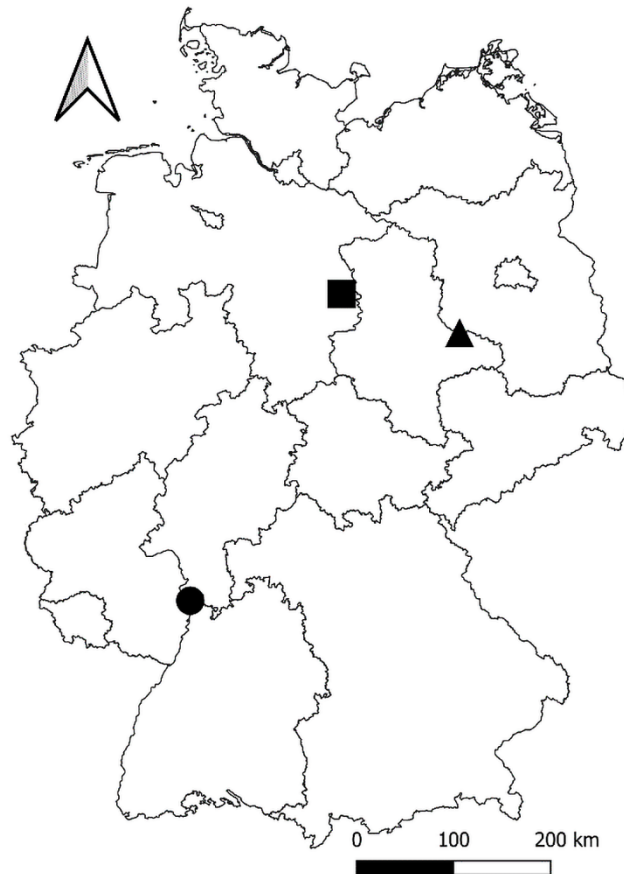


Abbildung 1: Lage der Versuchsregionen (● = Hessisches Ried, ■ = Ostbraunschweigisches Flachland, ▲ = Hoher Fläming) (© GeoBasis-DE / BKG 2020).

Das Silvafixverfahren bezeichnet eine baggergestützte Flächenräumung mit einem von den Niedersächsischen Landesforsten (AÖR) entwickelten Räumrechen. Mit diesem wird der Schlagabraum von der Kulturfläche auf den Rückegassen abgelagert (schematisch in der Abbildung 3, Teilbild B). Um das Verfahren in allen Regionen gleich umzusetzen und Fehler bei der Ausführung zu vermeiden, kam dieselbe Maschine mit demselben Fahrer in jeder Versuchsregion zum Einsatz. Neben dem Silvafix gab es in jeder Region eine Kontrolle ohne Bodenbearbeitung. Zusätzlich zu diesen Varianten wurde das örtliche „Bestverfahren“ auf seine Wirksamkeit geprüft (Tabelle 1 und Abbildung 3). Im Hohen

Fläming wurden die zu verjüngenden Bestände traditionell mit dem Streifenpflug bearbeitet. Im Hessischen Ried wurde die Kulturfläche erst gemulcht und anschließend 30 cm tief gefräst. Beim Mulchen, welches das Bestverfahren im Ostbraunschweigischen Flachland darstellte, wurde oberhalb des Mineralbodens der Schlagabraum zerkleinert. Die Bodenbearbeitungen erfolgten auf allen Flächen im Oktober 2018. Die Bestandesbegründungen fanden im Frühjahr 2019 auf gezäunten Flächen statt.



*Abbildung 2: Flächenräumung mit dem Silvafix im Hohen Fläming.*

An dieser Stelle ist anzumerken, dass dieses Versuchsdesign einen schwerwiegenden Mangel aufweist, da Wiederholungen der Bestverfahren fehlen. Wünschenswert wäre ein gekreuztes Versuchsdesign mit Wiederholungen der Bestverfahren in allen Regionen gewesen (HURLBERT 1984). Hierdurch hätte Information gepoolt werden können, welches die Auswertbarkeit und Vergleichbarkeit vereinfacht hätte. Zudem hätten generalisierbare Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Feldversuche sind jedoch kostenintensiv und mit jeder Wiederholung nehmen die Kosten weiter zu. So stellte das Versuchsdesign den Versuch dar, einen Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen zu finden. Da unter diesen Umständen eine überregionale Auswertung nicht sinnvoll erschien, erfolgte eine Betrachtung getrennt nach Regionen.

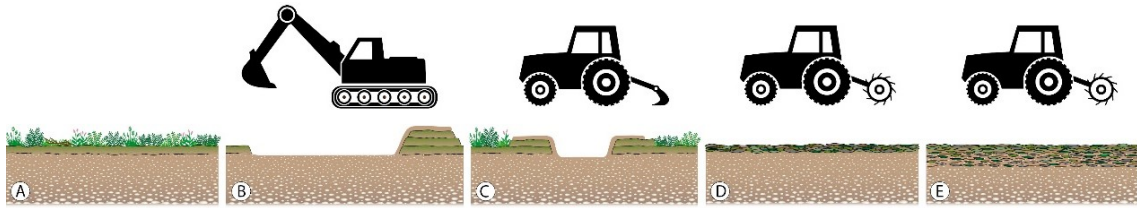


Abbildung 3: Schematische Übersicht der Bodenbearbeitungsverfahren (A: Kontrolle, B: Silvafix, C: Streifenpflug, D: Mulcher, E: Fräse).

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsflächenparameter. Der Jahresniederschlag und die Jahresdurchschnittstemperatur wurden für die Referenzperiode 1981–2010 aus Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes regionalisiert.

Kategorie	Region		
	Hoher Fläming	Hessisches Ried	Ostbraunschweigisches Flachland
Koordinaten	51°59'52,7"N 12°32'06,5"E	49°37'13,1"N 8°32'17,0"E	52°23'45,1"N 10°46'47,9"E
Höhenlage [mNN]	134	97	99
Jahresniederschlag [mm]	635	669	669
Jahresdurchschnittstemperatur [°C]	9,2	10,9	9,3
Bodentyp	Braunerde-Podsol	Braunerde-Podsol	podsolige Pseudogley-Braunerde
Bearbeitungsverfahren	Kontrolle	Kontrolle	Kontrolle
	Silvafix	Silvafix	Silvafix
	Streifenpflug	Fräse	Mulcher
Begründungsverfahren	Saat	Pflanzung	Pflanzung
Parzellengröße [m <sup>2</sup> ]	2.000	3.000	1.500
Ausgangspflanzenzahlen [je ha]	20.000	10.000	8.333



## 2.1 Versuchsflächenbeschreibung

### 2.1.1 Hoher Fläming

Auf einer Endmoräne aus der Saale-Kaltzeit lag die Versuchsfläche im Hohen Fläming. Schwach lehmiger Sand war die Bodenart des mäßig trockenen, oligotrophen Standortes. Die klimatischen Ausgangsbedingungen sowie weitere Versuchsflächenparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei der Kultur im Hohen Fläming handelte es sich um eine Traubeneichensaart (*Quercus petraea* [(MATTUSCHKA) LIEBL.]) unter einem 90-jährigen Kiefernreinbestand (*Pinus sylvestris* [L.]), der zuvor auf einen Bestockungsgrad von 0,5 aufgelichtet wurde. Der Boden war vollständig mit Moosen, Landreitgras (*Calamagrostis epigejos* [(L.) ROTH]) und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus* [L.]) bedeckt (Abbildung 4 links). Die Räumung der Silvafixparzelle im Westen der Versuchsfläche (Abbildung 5) erfolgte am 23.10.2018. Hierbei wurde aufgrund des dichten Graswurzelfilzes die gesamte Vegetationsdecke samt der Humusaufgabe abgezogen und auf die Rückegasse verbracht (Abbildung 2). Die Anlage der Pflugstreifen erfolgte in der gleichen Woche. Zuerst wurde mit einem Räumfix der grobe Schlagabraum auf die Rückegassen geschoben und im Anschluss mit einem Streifenpflug 70 cm breite Pflugstreifen in einem Abstand von etwa 2 m angelegt (Abbildung 4 rechts). Ein Streifenpflug wird von einem leichten Schlepper gezogen und legt den Mineralboden frei, indem mittig ein Sech den Humuskörper einschneidet und ein nachgelagertes Doppelschar den Humuskörper beidseitig wegklappt (Abbildung 3 Teilabbildung C). Auf der mittig gelegenen Kontrollparzelle (Abbildung 5) erfolgte eine händische Räumung von grobem Schlagabraum direkt vor der Saat.



Abbildung 4: Fotos der Versuchsparzellen im Hohen Fläming. Links die Kontrollparzelle und rechts die Streifenpflugparzelle bei der Bearbeitung.



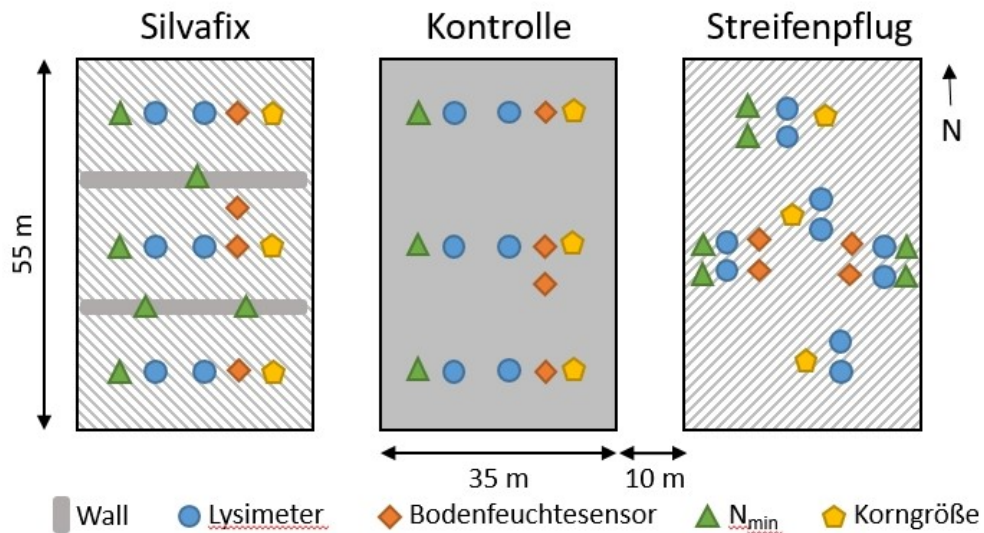


Abbildung 5: Skizze der Parzellenanordnung und des Versuchsaufbaus auf der Versuchsfläche im Hohen Fläming.

### 2.1.2 Hessisches Ried

Im Hessischen Ried handelte es sich um sandige Standorte mit mäßig trockenem Wasserhaushalt und mesotropher Nährstoffversorgung in der Rheinebene. Es wurde eine Freiflächenaufforstung nach Kalamität eines Buchen-Kiefern-Mischbestandes mit flächigem Unterstand aus Spätblühender Traubenkirsche (*Prunus serotina* [EHRH.]) durchgeführt (Abbildung 6 links oben). Auf der Kontrollparzelle wurde die verbleibende Vegetation vor der Pflanzung motormanuell auf den Stock gesetzt (Abbildung 6 rechts unten). Am 24. und 25.10.2018 erfolgte die Räumung der Silvafixparzelle. Der Silvafix hatte die Parzelle vollflächig bearbeitet und den Schlagabraum sowie die Spätblühenden Traubenkirschen samt Wurzelwerk auf den Rückegassen abgelgt (Abbildung 6 links unten). Bei der Fräsvariante wurde die Fläche zunächst gemulcht und in einem zweiten Arbeitsschritt 30 cm tief gefräst. Dadurch wurde, wie in der Abbildung 3 Teilbild E angedeutet, der Boden bis zur Bearbeitungstiefe homogen durchmischt und der zerkleinerte Schlagabraum in den Boden eingearbeitet. Als Trägerfahrzeuge wurden landwirtschaftliche Schlepper eingesetzt mit einer Leistung von mehr als 150 kW. Die Arbeitsbreiten betragen 3 m und erforderten durch den Anbau in der Dreipunkthydraulik eine flächige Befahrung. Die Abbildung 6 (rechts oben) zeigt die Fläche nach dem Fräsen. Abbildung 7 veranschaulicht skizzenhaft die Parzellenanordnung im Gelände. Neben den 10 m breiten Pufferzonen zwischen den Versuchspartellen waren auch 10 m breite Pufferzonen zu den Außengrenzen der Versuchspartellen vorhanden.



Abbildung 6: Fotos der Versuchspartellen im Hessischen Ried. Links oben: Ausgangszustand nach dem Kahlhieb und vor der Bodenbearbeitung, links unten: Silvafixpartelle während der Räumung, rechts oben: Fräspartelle und links unten die Kontrollpartelle nach motormanuellem Rückschnitt der Spätblühenden Traubenkirsche.

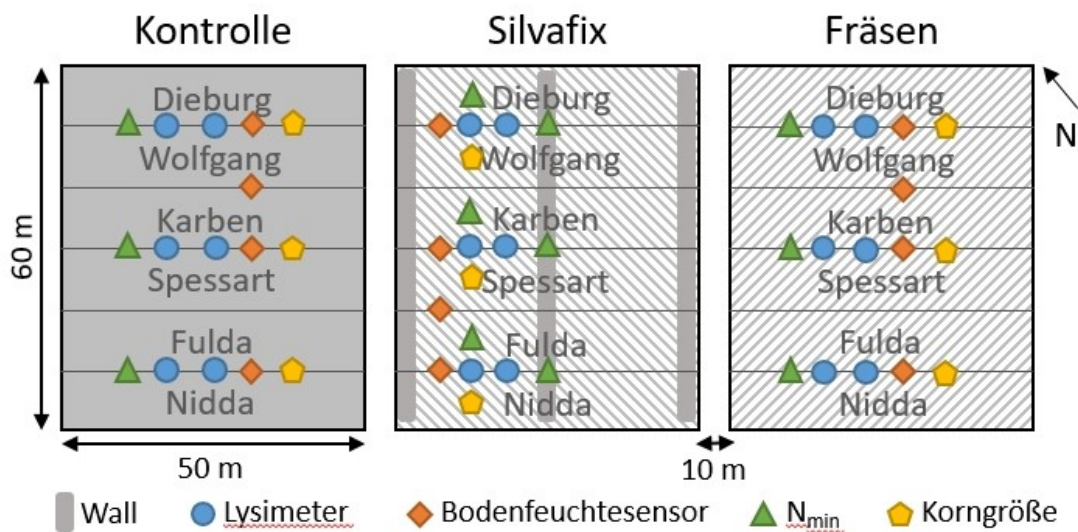


Abbildung 7: Skizze der Parzellenanordnung und des Versuchsaufbaus auf der Versuchsfläche im Hessischen Ried. Der Text in den Feldern gibt die Bereiche der jeweils angepflanzten Herkünfte an.

### 2.1.3 Ostbraunschweigisches Flachland

Die Versuchsfläche im Ostbraunschweigischen Flachland lag im Urstromtal der Aller und Nebenflüsse. Lehme prägen die Bodenart des Standortes, wodurch ein wechselfeuchter Wasserhaushalt und eine mesotrophe Nährstoffversorgung vorlagen. Den Vorbestand



der Versuchsfläche bildete ein 200-jähriger Stieleichenwald mit Buchen und Hainbuchen im Unterstand, der vollständig geräumt wurde. Ein Rückezug räumte das verbliebene Kronenmaterial von der Fläche. In der Kontrollvariante wurden die verbliebenen Äste per Hand geräumt und auf kleine Haufen aufgepackt (Abbildung 8 rechts unten), da ansonsten eine Kulturbegründung unmöglich gewesen wäre. Der Silvafix räumte am 23.10.2018 die Silvafixparzelle vollflächig und lagerte den Schlagabraum auf den künftigen Rückegassen ab (Abbildung 8 links unten). Ein Forstmulcher bearbeitete am 16.10.2018 die Parzelle der Mulchvariante (Abbildung 8 rechts oben). Hierbei wurde, wie in Abbildung 3 Teilbild D angedeutet, sämtlicher Bewuchs und Schlagabraum zerkleinert, ohne in den Mineralboden einzugreifen. Die Versuchsskizze in Abbildung 9 zeigt die Lage der Versuchspartzen im Gelände. Östlich liegt die Silvafixparzelle, westlich die Kontrollparzelle und mittig die Mulchparzelle.



Abbildung 8: Fotos der Versuchspartzen im Ostbraunschweigischen Flachland. Links oben: Ausgangszustand nach dem Kahlhieb und vor der Bodenbearbeitung, links unten: Silvafixparzelle bei der Räumung, rechts oben: nach dem Mulchen und links unten die Kontrollparzelle mit den von Hand aufgepackten Reisighaufen.

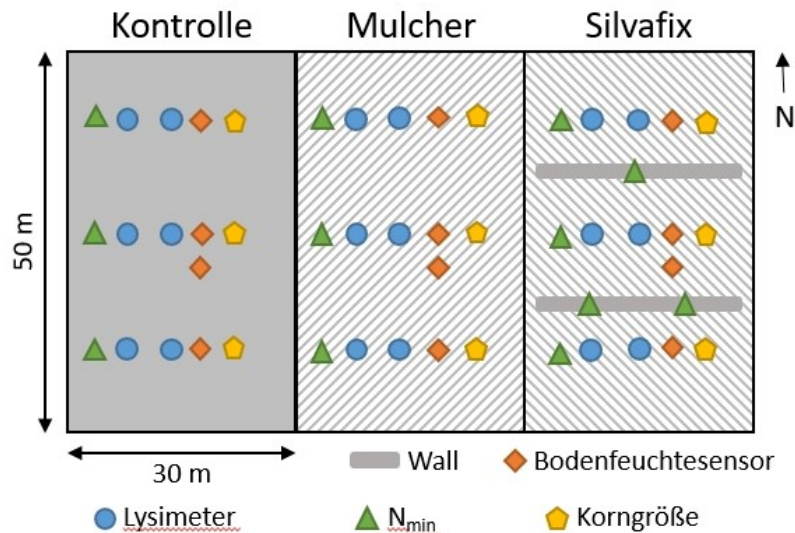


Abbildung 9: Skizze der Parzellenanordnung und des Versuchsaufbaus auf der Versuchsfläche im Ostbraunschweigischen Flachland.

## 2.2 Aufnahmen

### 2.2.1 Korngrößenanalyse

Die Korngrößenanalyse dient der genauen Bestimmung der Massenanteile des Bodens an den Kornfraktionen Ton, Schluff und Sand. Dies ist notwendig, um die Ergebnisse der Vorratsuntersuchungen korrekt interpretieren zu können. So können unterschiedliche Vorräte an basischen Kationen auf unterschiedliche Tongehalte zurückgeführt werden. Einige Tonminerale lagern Kationen, aufgrund ihrer negativen Ladung durch den isomorphen Ersatz, als Ladungsausgleich an.

Die Probenahme erfolgte im Herbst 2019. Aus Kostengründen wurden jeweils 3 Mischproben der Beprobungstiefe von 0–30 cm zu einer Mischprobe pro Parzelle vereinigt. Aus methodischen Gründen konnten die Proben nicht aus den Mikrokosmen-Lysimetern gewonnen werden. Nach Ausschreibung wurde der Analyseauftrag an das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz vergeben. Die Analyse wurde nach der „Korngrößenzusammensetzung in Mineralböden“ (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK 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. Durch weitere Siebungen wurden die Anteile der Sandfraktionen (> 0,063 mm) bestimmt. Zur Bestimmung der Schluff- und Tonanteile wurde das Sedimentationsverfahren nach der Köhn-Pipett-Methode angewendet.

## 2.2.2 Nährstoffhaushalt

### 2.2.2.1 Nährstofffrachten

Um die Nährstoffverluste bei den verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren zu bestimmen, wurde Sickerwasser mit Mikrokosmen-Lysimetern gesammelt. Ein Mikrokosmen-Lysimeter besteht aus einem abgegrenzten, umschlossenen Bodenraum. Regenwasser dringt in den Boden innerhalb des Mikrokosmen-Lysimeters ein und sobald der Boden gesättigt ist, kann Sickerwasser unterhalb des Mikrokosmen-Lysimeters aufgefangen werden.

Die Mikrokosmen-Lysimeter bestanden aus einer 50 cm langen Acrylglasäule (Abbildung 10) mit einem Durchmesser von 16 cm und einem Acrylglasblock mit einer Keramikplatte und einem Ablauf am Boden. Die Keramikplatte (Material Mullit M3-S20, von Fa. HiPer Ceramics GmbH, 16727 Oberkrämer) wurde in eine Vertiefung eingeklebt (mit Pattexrepair) und mit 0,1 molarer HCl-Lösung und deionisiertem Wasser nach MEIWEES et al. (1984) gespült, um die Sickerwässer nicht zu verunreinigen. Unterhalb der Keramik war ein spiralförmiger Abfluss nach außen in den Acrylglasblock gefräst.

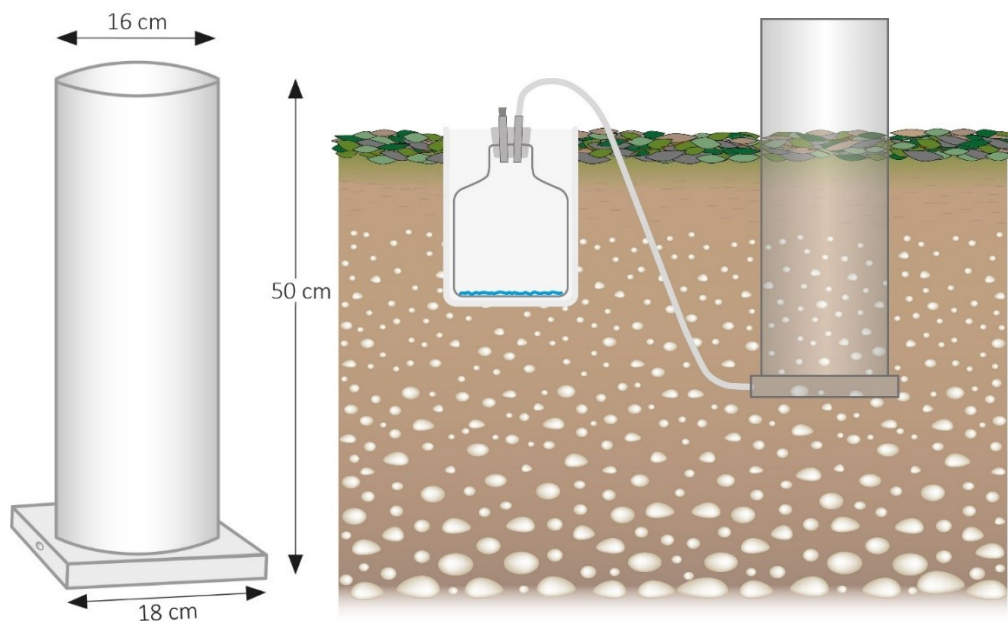


Abbildung 10: Auf der linken Seite ist die Skizze eines Mikrokosmen-Lysimeters, bestehend aus einer Acrylglasäule und einem Acrylglasblock mit einer eingefrästen Fassung und eingefrästem Ablauf, dargestellt. Rechts ist der schematische Einbau eines Mikrokosmen-Lysimeters im Feld mit Sammelflasche skizziert.

Beim Einbau im Feld wurde die Acrylglasäule 30 cm tief (größte Bodenbearbeitungstiefe) in den Mineralboden geschlagen, um ungestörte Bodenproben zu gewinnen. Nach dem Ausgraben der Säule wurde diese mit der Unterseite in eine wenige Millimeter betragende Vertiefung des Acrylglasblocks auf die Keramikplatte gestellt. Der Verbindungsbereich zwischen der Acrylglasäule und dem Acrylglasblock wurde mit wasserfestem Silikon abgedichtet und die Säule anschließend an der gleichen Stelle wieder in den Boden eingesetzt, an der sie entnommen worden war. Der Abfluss des Mikrokosmen-Lysimeters ist über einen Schlauch mit einer Sammelflasche (2,5 l Fassungsvermögen) verbunden. Durch Anlegen eines Unterdrucks (ca. -0,4 bar) an die Sammelflasche gelangte das Sickerwasser aus dem Mikrokosmen-Lysimeter in die Sammelflasche.

Das System funktioniert folgendermaßen: Regen fällt in die Acrylglasäule, sickert durch den Boden in der Säule und trifft auf die Keramikplatte. Wenn die Keramikplatte feucht ist, schließt sie luftdicht ab und hält den Unterdruck aufrecht. Das Bodenwasser durchdringt die Keramikplatte aufgrund des Unterdrucks und gelangt durch den Spiralablauf in die Sammelflasche. Ist der Boden trocken, ist auch die Keramikplatte trocken und luftdurchlässig: Der Unterdruck wird nicht gehalten. Sobald die Keramikplatte wieder feucht wird, hält sie den Unterdruck erneut. Abbildung 10 veranschaulicht den Einbau im Feld.

Eine hohe Variabilität der Nährstofffrachten ist charakteristisch für Waldböden und erfordert viele Wiederholungen, um genaue Aussagen treffen zu können. Vom 26.11.2018 – 12.12.2018 wurden auf jeder Parzelle 6 Mikrokosmen-Lysimeter installiert (siehe Versuchsskizze in Abbildung 5, Abbildung 7 und Abbildung 9), mit Ausnahme der Streifenpflugvariante im Hohen Fläming, wo insgesamt 10 Lysimeter installiert wurden: 5 in den Pflugsohlen und 5 in den Pflugbalken. NIEMINEN et al. (2016) empfehlen für eine genaue Abschätzung der Nährstoffflüsse die Installation von mindestens 10 Saugkerzen. Die erwarteten Ergebnisse tragen somit zum Verständnis der Bodenprozesse nach Bodenbearbeitung bei, können jedoch eine hohe Unsicherheit aufweisen.

Die Installation von Mikrokosmen-Lysimetern führt zu einer Störung des Bodens, welche die mikrobielle Aktivität anregt. Zudem ging dem Beginn des Probennahmezeitraums eine ungewöhnlich lange Trocken- und Hitzeperiode mit späten Winterniederschlägen voraus (SUTMÖLLER et al. 2019a; SUTMÖLLER et al. 2019b). Die Wiederbefeuchtung von Bö-

den nach Trockenperioden kann zu Versauerungsschüben und damit zu hohen Nährstofffrachten führen (KRÜGER et al. 2021; LAMERSDORF et al. 1998). Zudem muss sich die Keramik erst an die jeweiligen Bodenverhältnisse anpassen. Daher wurden die ersten Sickerwasserproben verworfen, um Auswirkungen vom Einbau der Mikrokosmen-Lysimeter, der Wiederbefeuchtung der Böden und der Anpassung der Keramikplatte an die Bodenverhältnisse auszuschließen. Ein früherer Beginn der Beprobungsperiode direkt nach der Bodenbearbeitung war wegen fehlender Niederschläge nicht möglich.

Das gesammelte Sickerwasser wurde in 14-tägigen Abständen beprobt (NIEMINEN et al. 2016). Bis zur Analyse wurden die Proben nach MEIWES et al. (1984) bei 4 °C und nicht länger als 5 Tage gelagert, um eine chemische Veränderung der Probe zu vermeiden. Vor der Analyse wurden die Proben gefiltert (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK 2014). Bei der anschließenden Analyse wurden die Ionenkonzentrationen bestimmt. Mittels Ionenchromatographie (IC) wurden  $\text{NO}_3^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  gemessen. Mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) wurden  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{K}^+$  gemessen. Wegen der Absorption von P durch die Keramikplatte wurden keine P-Analysen durchgeführt (HETSCH et al. 1979). Aufgrund der geringen P-Gehalte in der Bodenlösung von Waldökosystemen und der damit nicht gegebenen Gefahr hoher P-Verluste durch Auswaschung (BOL et al. 2016) ist dieser Umstand nicht weiter tragisch. Unplausible Werte eines Mikrokosmen-Lysimeters im Ostbraunschweigischen Flachland – die Flussrate überstieg den Niederschlag – machten einen Ausschluss notwendig. Beim Ausgraben des Mikrokosmen-Lysimeters mit den unplausiblen Werten zeigte sich eine undichte Silikonverbindung zwischen der Acrylglassäule und dem Acrylglasblock, auf dem die Säule steht. Dadurch konnte von außen Stauwasser eindringen und wurde mit angesaugt.

#### 2.2.2.2 Nährstoffvorräte

Inwieweit Bodenbearbeitungen und folgende Nährstofffrachten die Nährstoffvorräte beeinflussten, konnte nur nach Ermittlung der Nährstoffvorräte abgeschätzt werden. Hierzu wurden die Mikrokosmen-Lysimeter nach 2 Jahren Sickerwasserbeprobung ausgegraben und der Inhalt in die Komponenten Pflanze, Humus und Mineralboden getrennt. Die Nährstoffgehalte der Komponenten wurden anschließend analysiert. Für die pflanzliche Biomasse wurde ein Druckaufschluss mit anschließender ICP-Messung



durchgeführt (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK 2014). Die Nährstoffgehalte des Humus wurden mittels Königswasseraufschluss und anschließender ICP-Messung bestimmt (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK 2014). Die pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Mineralboden wurden durch die Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (Ake) ermittelt. Für Schwefel wurden die Werte dem Königswasseraufschluss aus der Bestimmung des Gesamtvorrates entnommen. Die C- und N-Gehalte der pflanzlichen Biomasse, des Humus und des Mineralbodens wurden mit dem CN-Elementaranalysator Euro EA (Hekatech) bestimmt. Zur Berechnung der Nährstoffvorräte wurden die Trockenmassen der Pflanzen und des Humus sowie die Trockenraumdichte des Mineralbodens nach Trocknung bei 105 °C bestimmt. Die Nährstoffvorräte wurden nach dem GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK (2014) berechnet. Zur Bestimmung der Gesamtnährstoffvorräte unmittelbar nach der Bodenbearbeitung wurden die Nährstofffrachten des Sickerwassers zu den Boden- und Pflanzenvorräten addiert.

#### 2.2.2.3 $N_{min}$ -Vorrat

Der Silvafix lagerte den Schlagabraum in Wällen auf den Rückegassen ab. Unerwarteterweise wurde bei der Flächenräumung Humus mit entfernt und auf die Rückegassen verbracht. Erste Datensichtungen der Sickerwasserproben ließen den Verdacht aufkommen, dass Bereiche, in denen Humus entfernt wurde, geringere Frachten aufwiesen, als Bereiche mit Humusanreicherung. Da in dieser Studie die Pflanzflächen im Fokus stehen und nicht die Ablagerungsbereiche des Schlagabraumes war eine Untersuchung der Schlagabraumwälle nicht geplant. Um den Silvafix aufgrund dieses Umstandes bei den Nährstofffrachten, nicht zu übervorteilen, wurden nachträglich Proben in Bereichen der Baggerwälle genommen. Dies wurde notwendig, um potentielle Nährstofffrachten in Bereichen der Baggerwälle zu erfassen und somit eine ganzheitliche Bewertung des Silvafixverfahrens zu ermöglichen. Aus methodischen Gründen war es unmöglich, mit Mikroskopen-Lysimetern auf den Rückegassen unter den Schlagabraumwällen zu messen. Zur Abschätzung der potentiellen Nährstofffrachten unter den Schlagabraumwällen wurde daher im Herbst 2020 eine  $\text{NO}_3\text{-N}_{min}$ -Analyse durchgeführt und der  $\text{NO}_3\text{-N}_{min}$ -Vorrat mit einem KCl-Extrakt bestimmt (KUDERNA et al. 1993). Hieraus lässt sich das Risiko von Nitratauswaschungen abschätzen, wie es in Wasserschutzgebieten gemacht wird. Weitere  $N_{min}$ -Analysen in den Folgejahren wären für eine bessere zeitliche Auflösung



wünschenswert gewesen, waren aber aufgrund begrenzter finanzieller Mittel und begrenzter Laborkapazitäten nicht möglich. Die Proben wurden von allen Behandlungen der Mikrokosmen-Lysimeter-Studie und zusätzlich aus Bereichen der Schlagabraumwälle der Silvafixbehandlung in allen Regionen genommen. Für jede Behandlung wurden 3 Mischproben aus jeweils 3 Einstichen in 3 Tiefenstufen (0–30 cm, 30–60 cm und 60–90 cm) entnommen. Wenn der  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorrat in der untersten Tiefenstufe anstieg, kann von einer Nährstoffauswaschung ausgegangen werden.

Nach der Probennahme wurde im Feld ein KCl-Extrakt hergestellt. 20 g der Probe wurden mit 80 ml einer einmolaren (1 M) KCl-Lösung angesetzt und 24 Stunden bei 4 °C gelagert. Vor der Membranfiltration wurden die Proben eine Stunde lang geschüttelt. Anschließend wurde die  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Konzentration photometrisch mit einem Continuous-Flow-Analyser gemessen. Zusätzlich wurde der feldfrische Wassergehalt gemessen, indem 10 g Boden 24 Stunden bei 105 °C getrocknet wurden, um die  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Konzentration auf die Trockenmasse des Bodens beziehen zu können und daraus den  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorrat zu errechnen.

### 2.2.3 Bodenwasserspannung

Durch Messungen der Bodenwasserspannung wurde indirekt untersucht, inwieweit die Bodenbearbeitung die Konkurrenzverhältnisse um die Ressource Wasser verbessert. Die Bodenwasserspannung (auch Matrixpotential genannt) beschreibt den Mindestunterdruck, den Pflanzen aufbringen müssen, um Wasser aus der Bodenmatrix aufnehmen zu können und nimmt mit zunehmender Trockenheit zu. Der Vorteil von Bodenwasserspannungsmessungen gegenüber Bodenfeuchtemessungen ist die Unabhängigkeit der Dateninterpretation von der Bodenart.

Die Bodenwasserspannung wurde mit Watermark Sensoren (200SS-15) der Firma Irrometer® gemessen und im Watermark Monitor (900M) desselben Herstellers gespeichert. Für das System wurden zudem Temperaturfühler benötigt, um die Funktion der automatisierten Korrektur des Matrixpotentials nutzen zu können. Es wurden die zugehörigen Bodentemperaturfühler 200TS verwendet. Der Berechnungsalgorithmus ist auf der Homepage des Herstellers hinterlegt (IRROMETER COMPANY© 2019). Watermark Sensoren funktionieren wie übliche elektrische Matrixpotentialsensoren, welche über die Messung des elektrischen Widerstandes die Bodenwasserspannung abschätzen. Das

Funktionsprinzip beruht darauf, dass im Watermark Sensor zwei Elektroden in eine granulierten Matrix aus Keramik eingebettet sind. Bei Kontakt mit dem Boden 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 (IRMAK und HAMAN 2001; SHOCK et al. 1998) ab.

Die Sensoren wurden für eine rasche Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten zeitnah nach der Bodenbearbeitung eingebaut. Vor dem Einbau im Feld wurden die Watermark Sensoren gemäß Bedienungsanleitung konditioniert (mehrmaliges Befeuchten und Trocknen lassen), sowie der Watermark Monitor auf ein halbstündiges Messintervall programmiert. Nach der Konditionierung wurden die Sensoren in einer Mineralbodentiefe von 15 cm installiert und mit Kabeln an den Watermark Monitor angeschlossen. Für jeden Watermark Sensor wurde ein Temperaturfühler in unmittelbarer Nähe und in gleicher Tiefe installiert und zum Temperatenausgleich vorgeschaltet. Insgesamt wurden 36 Watermark Sensoren und 36 Temperaturfühler ausgebracht, auf jeder Parzelle je 4, da die Watermark Monitore über 8 Steckplätze verfügten (siehe Versuchsskizze der Abbildung 5, Abbildung 7 und Abbildung 9). In sandigen Böden soll der Messbereich des Systems für das Matrixpotential bei bis zu -2390 hPa liegen (IRMAK et al. 2016). Im negativen Temperaturbereich (in °C) lag das Bodenwasser im gefrorenen Zustand vor, so dass Matrixpotentialmessungen nicht möglich waren.

#### 2.2.4 Kulturentwicklung

##### 2.2.4.1 Bestandesbegründungen

Um den Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Anwuchserfolg und das Pflanzenwachstum zu überprüfen, wurden auf den Versuchsflächen Eichenkulturen neu begründet. Im Hessischen Ried stellte das örtliche Forstamt für die Versuchsanlage 6 Eichenherkünfte unterschiedlicher Sortimenten (Tabelle 2) zur Verfügung, welche in einem Verband von 2 x 0,5 m mit dem Erdbohrer gepflanzt wurden. Die Bepflanzung der Parzellen ist in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Eichenherkünfte 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 ++

Für Wurzel- und Sprossanalysen des Ausgangsmaterials wurden je Herkunft 30 Pflanzen zufällig ausgewählt und beprobt (Abbildung 11) und das Wurzel/Spross-Verhältnis errechnet (Abbildung 12). Während des Beobachtungszeitraumes wurden 5 Pflegemaßnahmen auf der Kontrollparzelle durchgeführt, da ansonsten ein Totalausfall durch die Stockausschläge der Spätblühenden Traubenkirsche zu befürchten gewesen wäre. 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.

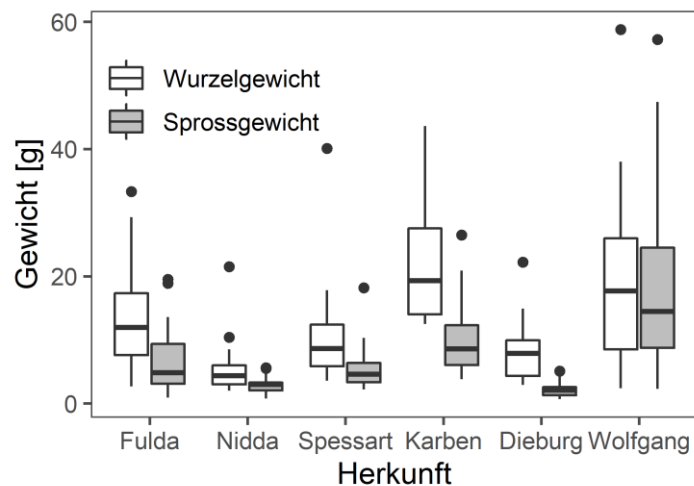


Abbildung 11: Boxplots der Wurzel- und Sprossgewichte des Ausgangspflanzenmaterials im Hessischen Ried unterteilt nach Eichenherkünften.

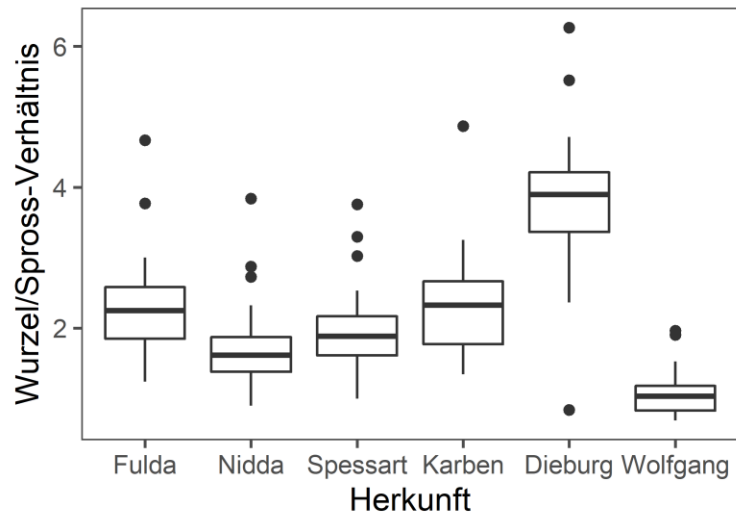


Abbildung 12: Boxplots der Wurzel/Spross-Verhältnisse des Ausgangspflanzenmaterials der Sortimente im Hessischen Ried.

Eine zweijährige Stieleiche (*Quercus robur* [L.]) des Sortiments 2+0 50–80 wurde im Ostbraunschweigischen Flachland 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 errechnete. Ein Pflegedurchgang wurde im Sommer 2021 vor der letzten Aufnahme durchgeführt. Ansonsten war an dem Standort keine Pflege notwendig.

Im Hohen Fläming wurden Eicheln mit einer Saatmenge von 120 kg·ha<sup>-1</sup> Nettosaatfläche ausgebracht. Die Eicheln stammten aus einem Saatgutbestand der Försterei. Das Saatgut hatte eine Keimfähigkeit von 60,5 % und ein Tausendkorngewicht von 3,65 kg (ISOGEN GmbH & Co. KG, Göttingen). Aufgrund des starken Bewuchses in der Kontrollvariante wurde der Mineralboden auf einem schmalen Streifen von 10 cm Breite mit einer Hacke freigelegt, in den die Eicheln gesät wurden.

#### 2.2.4.2 Bestandesaufnahmen

Um den Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Entwicklung von Eichenkulturen bestimmen zu können, wurden über einen Zeitraum von 3 Wuchsjahren die Eichenkulturen bis zum Ende der Vegetationsperiode 2021 beobachtet.

Im Ostbraunschweigischen Flachland und im Hessischen Ried wurden nach der Pflanzung systematisch Probebäume markiert (jede dritte Pflanze). Zur Vermeidung von

Randeffekten wurden die Probebäume in den inneren Pflanzreihen ausgewählt. Im Ostbraunschweigischen Flachland wurden 84–96 Probebäume und im Hessischen Ried je Herkunft und Bearbeitungsvariante 60 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. Außerdem wurde eine Schadensbeurteilung durchgeführt.

Im Hessischen Ried wurden bei einem Flächenbehang im zweiten Standjahr der Kultur Wurzelfraßschäden festgestellt. Da im Hessischen Ried der Waldmaikäfer (*Melontha hippocastani* [FABRICIUS]) vorkommt (IMMLER 2006), wurden die Schäden auf diesen zurückgeführt. Um den Einfluss der Engerlinge auf den Versuch abschätzen zu können, wurde im Mai 2021 auf der Versuchsfläche eine Engerlingsgrabung durchgeführt, in einem systematischen Raster mit 12 Grabungspunkten je Parzelle. Die Engerlinge der Population im Hessischen Ried befanden sich in dem Jahr im dritten Larvenstadium, auch E3 Stadium genannt. Engerlinge im E3 Stadium befinden sich im letzten Jahr vor der Verpuppung und verursachen aufgrund ihrer Größe die meisten Schäden (HUITING et al. 2006).

Im Hohen Fläming wurden Vollaufnahmen auf jedem zehnten Meter der Saatreihe durchgeführt. Auf der Kontrollparzelle konnten aufgrund eines sehr geringen Auflaufens der Saat nur 4 Probebäume ausgewählt werden. Auf der Silvafixparzelle konnten hingegen 181 Probebäume ausgewählt werden und auf der Streifenpflugparzelle 185. Dabei wurden nach den Vegetationsperioden 2019, 2020 und 2021 alle Höhen gemessen und ggf. die Schäden bestimmt. Zusätzlich erfolgte die Messung der Wurzelhalsdurchmesser (in einer Höhe von 5 cm über dem Boden) nach den Vegetationsperioden 2020 und 2021.

## 2.3 Statistische Auswertung

### 2.3.1 Statistische Methoden

Zur Auswertung der Daten wurden bayesianische Regressionsmodelle berechnet. Aufgrund des eingeschränkten Versuchsdesigns mit fehlenden Wiederholungen der regionalen Standardverfahren (fehlendes gekreuztes Versuchsdesign) sowie der zensierten

Datenstruktur der Bodenwasserspannungen, war eine statistische Auswertung mit herkömmlichen Methoden der frequentistischen Statistik unmöglich.

Der Ansatz der bayesischen Statistik geht auf den Satz von Bayes zurück, welcher in der statistischen (Regressions-) Modellierung wie folgt beschrieben wird (BÜRKNER und VUORRE 2019):

$$P(\theta | Y) = \frac{P(Y | \theta) \cdot P(\theta)}{P(Y)}$$

$P(\theta | Y)$  ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Modellparameter (Vektor)  $\theta$ , basierend darauf, dass die Stichprobe  $Y$  gemessen wurde. Das Ausarbeiten von  $P(\theta | Y)$ , Posteriori genannt, ist das Ziel der bayesianischen Inferenz; mit ihr können Aussagen über Werte und Bereiche des Modellparameters (Vektor)  $\theta$  getroffen werden, die – nach Bezugnahme auf die Messdaten  $Y$  – eine hohe Plausibilität aufweisen. Im Umkehrschluss können auch Aussagen dazu getroffen werden, in welchen Bereichen des Definitionsbereichs jedes Elements von  $\theta$  nur eine geringe Wahrscheinlichkeit besteht, dass Werte aus diesen Bereichen solche Messdaten wie  $Y$  erzeugt haben könnten.

$P(Y | \theta)$  beschreibt die Wahrscheinlichkeit für die Messdaten  $Y$  bedingt darauf, dass der Modellparameter (Vektor) die Werte  $\theta$  annimmt. Diese Funktion wird als Likelihood-Funktion bezeichnet und ist ebenfalls ein wesentliches Werkzeug in der frequentistischen Inferenz.  $P(\theta)$  definiert die Verteilung der für den Modellparameter (Vektor)  $\theta$  ohne Hinzunahme der Information aus den Messdaten  $Y$ , also nur auf Basis der Vorinformation (Priori). Die Wahl von Prioris erfolgt anhand nachvollziehbarer Kriterien (LEMOINE 2019) und lässt sich in unterschiedliche Klassen einteilen (BANNER et al. 2020).

$P(Y)$  ist die marginale Wahrscheinlichkeit der Messdaten und kann durch folgendes Beispiel anschaulich erklärt werden: Wenn  $\theta$  ein Parameter, also ein eindimensionaler Vektor wäre, und sowohl  $Y$  als auch  $\theta$  nur endlich viele diskrete Werte annehmen könnten – für  $Y$  z. B. das Ergebnis einer Messreihe, dann könnte man für jede Kombination von  $Y$  und  $\theta$  die Wahrscheinlichkeit für diese Kombination,  $P(Y | \theta)$ , in einer Tabelle darstellen – z. B.  $Y$  in Zeilen und  $\theta$  in Spalten. Alle Zeilensummen dieser Tabelle bilden dann gemeinsam die marginale Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P(Y)$ . Eine analytische Herlei-

tung von  $P(Y)$  ist – für in der Anwendung ausreichend komplexe Modelle – mathematisch in der Regel nicht möglich. Jedoch stehen Algorithmen (Markov-Chain Monte-Carlo, Hamiltonian Monte-Carlo (NEAL 2011)) zur Verfügung um Werte aus dem Ausdruck  $P(\theta | Y) \propto P(Y | \theta) \cdot P(\theta)$  realisieren zu können.

Die Berechnungen zur Datenanalyse wurden mit dem Zusatzpaket *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 durchgeführt. Das Softwarepaket *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 Modelle wurden mit dem in *Stan* implementierten Hamiltonian Monte Carlo Algorithmus (NEAL 2011) geschätzt. Sofern nicht anders angegeben, wurden je Modell vier unabhängige Markov-Ketten mit je 500 Warmup-, und 500 Sample-Iterationen geschätzt. In *brms* wurde der *treedepth*-Parameter auf 15, der *adaptdelta*-Parameter auf 0,95 gesetzt. Alle weiteren Parameter wurden auf den voreingestellten Werten belassen. Die erzielten Simulationen aus den Posteriori-Verteilungen wurden den für eine valide Inferenz notwendigen Überprüfungen (u.a. Rhat-Koeffizient, Traceplots) unterzogen, denen alle im Folgenden berichteten Ergebnisse standhielten.

Die numerischen Kovariablen wurden vor der Modellierung um den Mittelwert zentriert. Dadurch wird Multikollinearität vermieden und der Achsenabschnitt in einem für die Daten sinnvollen Bereich geschätzt, was die Interpretation des Modells vereinfacht (GREENLAND und MANSOURNIA 2015). Die Datenaufbereitung und Darstellungen erfolgte mit dem *tidyverse* Paket (WICKHAM et al. 2019) und der Erweiterung *ggthemes* (ARNOLD 2021) sowie dem *tidybayes* Paket (KAY 2022) mit der *ggdist* Erweiterung (KAY 2021). Waren Abbildungsarrangements notwendig, wurden diese mit dem *gridExtra* Paket (AUGUIE 2017) umgesetzt.

### 2.3.2 Nährstoffhaushalt

#### 2.3.2.1 Nährstofffrachten

Für die Modellierung der Zielvariablen „Nährstofffracht“  $Y_{i,t}$  wurde eine Gamma-Verteilung als statistisches Verteilungsmodell gewählt, mit:

$$Y_{i,t} \sim \text{Gamma}(\mu_{i,t}, \text{shape}_{i,t}),$$

wobei  $Y_{i,t} \in \{0, \infty\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, 57\}$  und  $t \in \{01.04.2019, 02.04.2019, \dots, 31.03.2021\}$ .

Eine Fracht  $y$  steht für eines der folgenden Nährstoffe, welche jeweils in einem eigenen statistischen Modell geschätzt wurden:  $y \in \{\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{NO}_3^- \text{-N}, \text{SO}_4^{2-} \text{-S}\}$ .

Da Gamma-Verteilungen nur für positive Werte definiert sind, wurde allen Werten der Größe 0 ein sehr kleiner Wert zugeordnet, der die Höhe der Fracht vernachlässigbar gering beeinflusst (BAIO 2013). Viele der Fehlwerte sind keine echten Fehlwerte, sondern sind auf die methodisch bedingte Mindestprobemenge zurückzuführen. Unter diesen Umständen ist die Verteilungsannahme angemessen.  $i$  entspricht dabei dem Lysimeterindex und  $t$  den Beobachtungszeitpunkt in Tagen.

Tabelle 3: Übersicht der Parameter des Nährstofffrachtmodells (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland).

Modell Parameter	Datentyp
CHM (zentrierte Humusmächtigkeit)	numerisch
CTM (zentrierte Trockenmasse)	numerisch
CFR (zentrierte Flussrate)	numerisch
Region (Region)	3 Faktorstufen (HF, HR, OF)
BEH (Behandlung)	3 Faktorstufen (Kontrolle, Silvafix, Bestverfahren)
RBEH (Regionale Behandlung)	10 Faktorstufen (Kombination aus Region und Behandlung. A: HF Kontrolle, B: HF Silvafix, ..., J: OF Mulchen)
Jahr	2 Faktorstufen (2019: 1.4.2019–31.3.2020, 2020: 1.4.2020–31.3.2021)



In die Modellierung des bedingten Erwartungswertes  $\mu_{i,t}$  der Nährstofffrachten sind die zentrierten numerischen Kovariablen der Humusmächtigkeit je Lysimeter zum Zeitpunkt des Versuchsendes ( $CHM_i$ ), der vegetativen Trockenbiomasse je Lysimeter zum Zeitpunkt des Versuchsendes ( $CTM_i$ ) und der Flussraten je Lysimeter und Beobachtungszeitpunkt ( $CFR_{i,t}$ ) eingegangen. Zudem wurden die kategorial skalierten Kovariablen  $Region_i$ ,  $Jahr_{i,t}$  und Behandlung ( $BEH_i$ ) einbezogen (Tabelle 3). Die Koeffizienten der regionalen Behandlung ( $RBEH_i$ ) und für das jeweilige Lysimeter  $i$  wurden mit Hilfe von Gruppierungstermen geschätzt, die in frequentistischen gemischten Modellen als „Random Effects“ bezeichnet werden. Gruppierungsterme sollten ab einer Gruppengröße von  $N > 5$  zur Schätzung verwendet werden, da sie die Schätzung für viele Koeffizienten verbessern und den Standardfehler verringern (EFRON und MORRIS 1977; GELMAN und HILL 2007).

Die Variablen  $BEH_i$  und  $RBEH_i$  weisen unterschiedliche Datenqualitäten auf. In allen Regionen liegen Kontroll- und Silvafixflächen vor. Hieraus lassen sich allgemeingültige Aussagen zum Silvafix ableiten, was durch die Gruppierung nach  $BEH_i$  ermöglicht wird. Für die regionalen Vergleichsverfahren liegen hingegen keine Wiederholungen in anderen Regionen vor, so dass nur eine Aussage nach Bearbeitungsmethode und Region abgeleitet werden kann.  $RBEH_i$  repräsentiert somit die regionalen Kombinationen von Region und Behandlung. 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 sind (bei linearer bzw. parametrischer Modellierung, hier:  $CHM_i$ ,  $CTM_i$  und  $CFR_{i,t}$ ), (2) die kategorial skalierten Kovariablen gleich der Referenzkategorie sind. Die Referenzkategorie für  $Region_i$  ist Hoher Fläming, für  $Jahr_{i,t}$  2019 und für  $BEH_i$  Kontrolle. (3) Die Koeffizienten der Gruppierungsterme sind gleich 0 und (4) die nichtlinearen Effekte der Splines sind gleich 0 ( $f(x) = 0$ ).

Für den bedingten Erwartungswert  $\mu_i$  wurde die folgende Modellgleichung aufgestellt:

$$\begin{aligned}
\log(\mu_{i,t}) = & \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,CHM} CHM_i + \beta_{\mu,CTM} CTM_i \\
& + \beta_{\mu,CFR} CFR_{i,t} + \beta_{\mu,Jahr2020} \cdot (Jahr_{i,t} = 2020) \\
& + \beta_{\mu,RegionHR} \cdot (Region_i = HR) + \beta_{\mu,RegionOF} \cdot (Region_i = OF) \\
& + \beta_{\mu,BEHSilvafix} \cdot (BEH_i = Silvafix) + \beta_{\mu,BEHBestverfahren} \cdot (BEH_i = Bestverfahren) \\
& + \gamma_{\mu,A} \cdot (RBEH_i = A) + \gamma_{\mu,B} \cdot (RBEH_i = B) + \dots \\
& + (i=1)f_{\mu,1}(t) + (i=2)f_{\mu,2}(t) + \dots \\
& + \gamma_{\mu,1} \cdot (i=1) + \gamma_{\mu,2} \cdot (i=2) + \dots;
\end{aligned}$$

$$\gamma_{\mu,\xi} \sim Normal(0, \sigma_{\gamma_{\mu,RBEH}})$$

$$f_{\mu,i}(t) = \beta_{\mu,t,i} + \sum_{k=1}^K B_k(t)b_{k,i}, \text{ mit } b_{k,i} \sim Normal(\mu = 0, \sigma = \sigma_{b_{\mu}})$$

Für den Skalenparameter  $shape_{i,t}$ , welcher über eine Log-Link-Funktion geschätzt wird, wurden neben dem Intercept  $\beta_{shape,0}$  die Kovariable der zentrierten Flussrate ( $CFR_{i,t}$ ), ein Koeffizient für den Gruppierungsterm nach  $RBEH_i$  und ein Spline über die Beobachtungszeitpunkte je Lysimeter ( $f_{shape,1}(t)$ ) geschätzt. Der Wert für das Intercept  $\beta_{shape,0}$  ergibt sich analog zum Intercept  $\beta_{\mu,0}$ .

Der Skalenparameter  $shape_{i,t}$  wurde nach folgender Modellgleichung geschätzt:

$$\begin{aligned}
\log(shape_{i,t}) = & \beta_{shape,0} + \beta_{shape,CFR} CFR_{i,t} \\
& + \gamma_{shape,A} \cdot (RBEH_i = A) + \gamma_{shape,B} \cdot (RBEH_i = B) + \dots \\
& + (i=1)f_{shape,1}(t) + (i=2)f_{shape,2}(t) + \dots;
\end{aligned}$$

$$\gamma_{shape,\xi} \sim Normal(0, \sigma_{\gamma_{shape,RBEH}})$$

$$f_{shape,i}(t) = \beta_{shape,t,i} + \sum_{k=1}^K B_k(t)b_{k,i}, \text{ mit } b_{k,i} \sim normal(\mu = 0, \sigma = \sigma_{b_{shape}})$$

Aufgrund des Fehlens anderweitiger Informationen über die Höhe der Austräge in den Versuchsregionen nach Bodenbearbeitungen, wurden nichtinformativ Prioris für die Populationsparameter gewählt. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Prioris. Eine Prüfung der Prioris ergab eine unbedeutende Beeinflussung der Parameterschätzung gegenüber keiner Priori. Nichtinformativ Prioris verbessern das Schätzergebnis, da sie das Vorwissen über den möglichen Wertebereich berücksichtigen, aber noch ausreichend Raum für Extremwerte lassen (GABRY et al. 2019).

### 2.3.2.2 Nährstoffvorräte

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

$$\begin{aligned} \log(\mu_i) = & \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,RegionHR} \cdot (Region_i = HR) + \beta_{\mu,RegionOF} \cdot (Region_i = OF) \\ & + \beta_{\mu,BEHSilvafix} \cdot (BEH_i = Silvafix) + \beta_{\mu,BEHBestverfahren} \cdot (BEH_i = Bestverfahren) \\ & + \gamma_{\mu,A} \cdot (RBEH_i = A) + \gamma_{\mu,B} \cdot (RBEH_i = B) + \dots; \end{aligned}$$

und  $shape_i$  wurde wie folgt modelliert:

$$\log(shape_i) = \beta_{shape,0} + \gamma_{shape,A} \cdot (RBEH_i = A) + \gamma_{shape,B} \cdot (RBEH_i = B) + \dots;$$

Die Kovariablen entsprachen den Kovariablen des Modells zu den Nährstofffrachten. Die Wahl der Priori ist in Tabelle 5 gegeben.

### 2.3.2.3 Relative Nährstofffrachten

Um beurteilen zu können, ob Nährstofffrachten nach Bodenbearbeitungen die pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte von Waldböden mindern, wurden relative Anteile berechnet, indem die Nährstofffrachten durch die Nährstoffvorräte dividiert wurden. Die Zielvariable relative Nährstofffracht wurde als Beta-Verteilung  $Y_i \sim \text{Beta}(\mu_i, \phi_i)$  modelliert. Hierbei wurde der Erwartungswert, für den gilt:  $0 < \mu_i < 1$ , in einer direkten Parametrisierung modelliert:

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{\mu_i}{1 - \mu_i}\right) = & \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,RegionHR} \cdot (Region_i = HR) + \beta_{\mu,RegionOF} \cdot (Region_i = OF) \\ & + \beta_{\mu,BEHSilvafix} \cdot (BEH_i = Silvafix) + \beta_{\mu,BEHBestverfahren} \cdot (BEH_i = Bestverfahren) \\ & + \gamma_{\mu,A} \cdot (RBEH_i = A) + \gamma_{\mu,B} \cdot (RBEH_i = B) + \dots; \end{aligned}$$

Und der zweite Verteilungsparameter, für den gilt:  $\phi_i > 0$ , wurde nach folgender Gleichung modelliert:

$$\log(\phi_i) = \beta_{phi,0} + \gamma_{phi,A} \cdot (RBEH_i = A) + \gamma_{phi,B} \cdot (RBEH_i = B) + \dots,$$

wobei die Kovariablen  $Region_i$ ,  $BEH_i$  und  $RBEH_i$  den Kovariablen des Modells der Nährstofffrachten entsprechen. In der Tabelle 6 werden die gewählten Prioris gezeigt.

Tabelle 4: Prioris des Nährstofffracht Modells (*Student*( $v; \mu; \sigma$ ), *Normal*( $\mu; \sigma$ )). Der Index  $\xi$  steht für die in Tabelle 3 beschriebenen Faktorstufen.

Parameter	Ca	Mg	K	NO <sub>3</sub> -N	SO <sub>4</sub> -S
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; -3,6; 2,5)	<i>Student</i> (3; -5; 2,5)	<i>Student</i> (3; -5,1; 2,5)	<i>Student</i> (3; -4,3; 3,7)	<i>Student</i> (3; -4,3; 2,5)
$\beta_{\mu,BEH\xi}$	<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)
$\beta_{\mu,Region\xi}$	<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)
$\beta_{\mu,Jahr\xi}$	<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)
$\beta_{\mu,CHM}$	<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)
$\beta_{\mu,CTM}$	<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)
$\beta_{\mu,CFR}$	<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)
$\sigma_{Y_{\mu,RBEH\xi}}$	<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; 4)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\sigma_{Y_{\mu,i}}$	<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; 4)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\beta_{\mu,t,i}$	<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)
$\sigma_{b_{\mu}}$	<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; 4)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\beta_{shape,0}$	<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)
$\beta_{shape,CFR}$	<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)
$\sigma_{Y_{shape,RBEH\xi}}$	<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; 4)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\beta_{shape,t,i}$	<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)
$\sigma_{b_{shape}}$	<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; 4)	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)

Tabelle 5: Priori des Nährstoffvorrat Modells ( $Student(v; \mu; \sigma)$ ,  $Normal(\mu; \sigma)$ ). Der Index  $\xi$  steht für die in Tabelle 3 beschriebenen Faktorstufen.

Parameter	Ca	Mg	K	N	S
$\beta_{\mu,0}$	$Student(3; -0,7; 2,5)$	$Student(3; -2,2; 2,5)$	$Student(3; -1,5; 2,5)$	$Student(3; 1,3; 2,5)$	$Student(3; -0,5; 2,5)$
$\beta_{\mu,BEH\xi}$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$
$\beta_{\mu,Region\xi}$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$
$\sigma_{Y_{\mu,RBEH\xi}}$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$
$\beta_{shape,0}$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$
$\sigma_{Y_{shape,RBEH\xi}}$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$

Tabelle 6: Priori des relative Nährstofffrachten Modells ( $Student(v; \mu; \sigma)$ ,  $Normal(\mu; \sigma)$ ). Der Index  $\xi$  steht für die in Tabelle 3 beschriebenen Faktorstufen.

Parameter	Ca	Mg	K	N	S
$\beta_{\mu,0}$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$
$\beta_{\mu,BEH\xi}$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$
$\beta_{\mu,Region\xi}$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$	$Normal(0; 100)$
$\sigma_{Y_{\mu,RBEH\xi}}$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$
$\beta_{shape,0}$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$
$\sigma_{Y_{shape,RBEH\xi}}$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$	$Student(3; 0; 2,5)$

#### 2.3.2.4 $N_{min}$ -Vorrat

Der  $\text{NO}_3\text{-}N_{min}$ -Vorrat (in  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )  $Y_i$ ;  $i = 1, \dots, n$  ( $n$  = Anzahl der Zufallseffekte) wurde als Gamma verteilte Zielvariable  $Y_i \sim \text{Gamma}(\mu_i, \text{shape}_i)$ , mit dem Erwartungswert  $\mu_i > 0$  und dem Formparameter  $\text{shape} > 0$  über eine sogenannte Log-Link-Funktion modelliert. Der Erwartungswert  $\mu_i$  wurde nach folgender Modellgleichung geschätzt:

$$\log(\mu_i) = \beta_{\mu,0} + \gamma_{\mu,A} \cdot (\text{Zufallseffekt}_i = 1) + \gamma_{\mu,B} \cdot (\text{Zufallseffekt}_i = 2) + \dots;$$

$$\text{Zufallseffekt}_i \in \{1, 2, \dots, 39\}$$

Eine stabile Modellschätzung über fixe Effekte war aufgrund des geringen Probenumfangs mit nichtinformativen Prioris nicht möglich. Daher wurden statt informativer Prioris Zufallseffekte integriert. Die Summe der Zufallseffekte wurde durch die Anzahl der Interaktionen aus den Variablen: Region, Behandlung und Tiefenstufe definiert. Folgende Prioris wurden gewählt (Tabelle 7):

Tabelle 7: Priori der  $\text{NO}_3\text{-}N_{min}$  Modellierung (*Student*( $v; \mu; \sigma$ ), *Gamma*( $\alpha; \beta$ )).

Parameter	Priori
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; 2; 2,5)
$\sigma_{\gamma_{\mu,Ranef}}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
<i>shape</i>	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)

#### 2.3.3 Bodenwasserspannung

Die Bodenwasserspannung sollte in Abhängigkeit von den Wetterdaten je Region modelliert werden. Unter Nutzung des KSPclimpredict-Paketes (SCHMIDT-WALTER 2018) wurden die Wetterdaten je Region aus regionalisierten DWD-Wetterdaten abgerufen. Da die Wetterdaten in täglicher Auflösung vorlagen, wurden für die Bodenwasserspannungen tägliche Mittelwerte berechnet. Die Messwerte der Watermark Sensoren werden im Folgenden allgemein als  $y_{i,t}$  ( $i$  entspricht der Beobachtungseinheit „Sensor“ von 1-36 und  $t$  für ein Datum vom 9.4.2019–7.4.2021) bezeichnet.

Aufgrund der Datenstruktur der Matrixpotentialmessungen (Werte zwischen 0 hPa und -2390 hPa (IRMAK et al. 2016)) wurde eine Gamma-Verteilung als Anpassungsfunktion gewählt:  $Y_{i,t} \sim \text{Gamma}(\mu_{i,t}, \text{shape})$ .

Gamma-Verteilungen eignen sich gut zur Darstellung nicht normalverteilter Zeitverläufe. Die Gamma-Verteilung ist mit  $\gamma > 0$  definiert. Um diese Bedingung zu erfüllen, wird allen Werten mit  $\gamma = 0$  ein sehr kleiner Wert zugeordnet und durch Multiplikation mit  $(-1)$  die Werte ins Positive transformiert. Nach der Transformation der Werte wirkt die Begrenzung der Sensormessungen bei 2390 hPa als Rechts-Zensierung, denn während Trockenperioden können die Sensoren nur die Information liefern, dass der tatsächliche Wert gleich oder größer 2390 hPa ist:

$$y_{i,t} \begin{cases} y_{i,t} & \text{Bodenwasserspannung} < 2390 \text{ hPa} \\ 0 & \text{Bodenwasserspannung} \geq 2390 \text{ hPa} \end{cases}$$

Der Erwartungswert  $\mu_{i,1}$  für den ersten Tag wurde frei über eine Log-Link-Funktion nach folgender Gleichung geschätzt:

$$\mu_{i,1} = \exp(\beta_{0,0} + \beta_{0,A} \cdot (RBEH_i = A) + \dots + \beta_{0,I} \cdot (RBEH_i = I) + \\ + \gamma_{\mu,A} \cdot (\text{Zufallseffekt}_i = 1) + \gamma_{\mu,B} \cdot (\text{Zufallseffekt}_i = 2) + \dots)$$

$$RBEH_i \in \{A, B, \dots, I\}$$

$$\text{Zufallseffekt}_i \in \{1, 2, \dots, 36\}$$

Hierbei entsprach  $RBEH_i$  der „Regionalbehandlung“, einer Kombination aus Region und Behandlung, aus 3 Regionen je 3 Behandlungen mit 9 Kombinationen: A–I. Die Zufallseffekte wurden für jeden der 36 Sensoren geschätzt.  $\beta$  bezeichnete die Regressionsparameter und  $\gamma$  die Koeffizienten aus einem Gruppierungsterm. Die Gruppierungsterme wurden in Abhängigkeit von der Sensor-Nummer gebildet, wobei für die Gruppierungsterme  $\gamma$  die Annahme einer Normalverteilung galt:

$$\gamma \sim \text{Normal}(0, \sigma_\gamma^2)$$

An den folgenden Tagen wurde ein „Update“ des Vortageswertes mit weiteren exponentierten und skalierten Regressionsparametern berechnet. Die weiteren Regressionsparameter waren: der Wasserdampfdruck des Vortages ( $x_1$ ), der Niederschlag des Vortages ( $x_2$ ) und die Sonnenscheindauer des Vortages ( $x_3$ ). Es galt die Annahme, dass der Sensor die Witterungseinflüsse etwa um einen Tag zeitverzögert wiedergibt, da sich so-

wohl der Boden, als auch der Sensor an die neuen Witterungsbedingungen anpassen müssen. Weiter galt die Annahme, dass der Niederschlag die Bodenwasserspannung verringerte und mit steigender Sonnenscheindauer und steigendem Wasserdampfdruck die Bodenwasserspannung zunahm:

$$\begin{aligned} \mu_{i,t} = & \exp(\log(\mu_{i,t-1}) + \\ & x_{1,i,t} \cdot \exp(\beta_{1,0} + \beta_{1,A} \cdot (RBEH_i = A) + \dots + \beta_{1,I} \cdot (RBEH_i = I)) - \\ & x_{2,i,t} \cdot \exp(\beta_{2,0} + \beta_{2,A} \cdot (RBEH_i = A) + \dots + \beta_{2,I} \cdot (RBEH_i = I)) + \\ & x_{3,i,t} \cdot \exp(\beta_{3,0} + \beta_{3,A} \cdot (RBEH_i = A) + \dots + \beta_{3,I} \cdot (RBEH_i = I))) \end{aligned}$$

Der *shape* Parameter wurde direkt geschätzt. Es wurden schwach informative Priors genutzt (Tabelle 8).

Tabelle 8: Priors der Bodenwasserspannungsmodellierung (*Normal*( $\mu; \sigma$ ), *Student*( $v; \mu; \sigma$ ), *Gamma*( $\alpha; \beta$ )).

Parameter	Priori
$\beta_{\mu,Fixef}$	<i>Normal</i> (0; 2,5)
$\sigma_{\gamma_{\mu,Ranf}}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
<i>shape</i>	<i>Gamma</i> (0,01; 0,01)

#### 2.3.4 Kulturentwicklung

Aufgrund der regionalen Unterschiede, mit unterschiedlichen Sortimenten, Herkünften und Bestandesbegründungsverfahren, erschien eine regionenübergreifende Auswertung nicht zielführend. Folglich wurde jede Region gesondert betrachtet. Neben den Überlebenswahrscheinlichkeiten, wurden die Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserentwicklungen berechnet.

Bei der Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeiten handelte es sich um intervallzensierte Beobachtungen der Verweildauern im Zustand „ungeschädigt“, da ein Probebaum zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten ausgefallen ist und somit der exakte Zeitpunkt des Ereignisses „Ausfall“ unbekannt war (KLEIN und MOESCHBERGER 2003). Überlebten Probebäume den gesamten Beobachtungszeitraum, so handelte es sich um rechtszensierte Beobachtungen, da das Ausfallereignis bis zum letzten Beobachtungstermin nicht eingetreten war (KLEIN und MOESCHBERGER 2003). Behandlungsbedingte Schäden, die z. B. durch Pflegeeingriffe zur Kultursicherung verursacht wurden, wurden zusätzlich



zu den tot aufgefundenen Probebäumen als Ausfall gewertet, da sie im Zusammenhang mit der Bodenbearbeitungsvariante stehen. Als Verteilungsmodelle für die Verweildauer einer Pflanze im vitalen Ausgangszustand wurden die Gamma-, Lognormal- und Weibull-Verteilungen geprüft, welche für Zufallsvariablen mit stetig positivem Wertebereich definiert sind. Als „technische“ Notwendigkeit für Gamma-, Lognormal- und Weibull-Verteilungen, dass eine Verweildauer – in diesem Kontext – echt größer als 0 sein muss, wurde für jede intervall-zensierte Beobachtung die Annahme getroffen, dass der jeweilige Probebaum die ersten 24 Stunden nach dem Pflanz- bzw. letzten Aufnahmedatum überlebt hat. Dies scheint in der Anwendung gerechtfertigt, und das Ergebnis der Modellierung ist auch robust gegenüber geringfügigen Änderungen dieser Setzung. Die Weibull-Verteilung zeigte in zwei von drei Fällen eine bessere Anpassung an die Daten und wurde aus Gründen der Einheitlichkeit für alle hier modellierten Überlebenswahrscheinlichkeiten genutzt. Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Wahl der Verteilung ergab hier keine relevante Differenz in den Ergebnissen bezüglich der inhaltlich relevanten Modellparameter.

Da Höhen und Wurzelhalsdurchmesser junger Bäume positive Messwerte mit gleichzeitig bedeutsamer Variabilität im Bereich eines allometrischen Minimalwertes von 0 darstellen, ergibt die Annahme einer bedingten Normalverteilung der Messungen kein inhaltlich gültiges statistisches Modell. Folglich wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen genutzt, die nur im positiven Wertebereich definiert sind. Die Lognormal-Verteilung schied aus, da sie bei Integration in eine Wachstumsfunktion den biologischen Grundlagen widerspricht. Denn für  $\exp(0) = 1$ , ist ein Verlauf des bedingten Erwartungswertes der Höhe bzw. des Durchmessers durch den Wert 0 im Alter 0 nicht möglich. Ein Vergleich der Gamma- und Weibull-Verteilung zeigte in vier von sechs Fällen eine bessere Anpassung der Weibull-Verteilung an die Daten. Aus Gründen der einheitlichen Interpretation der Modelle wurden immer die Ergebnisse der Weibull-Verteilung dargestellt. Eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Wahl der Verteilung ergab keine relevante Differenz in den Ergebnissen bezüglich der inhaltlich relevanten Modellparameter, wenn die Weibull-Verteilung anstatt der Gamma-Verteilung gewählt wurde.

Wie beschrieben, wurde die Weibull-Verteilung als statistisches Modell für den unbekannten Prozess, der die Daten erzeugt haben könnte, genutzt. Die Weibull-Verteilung

ist über den Lageparameter  $scale_i$  und den Formparameter  $shape_i$  parametrisiert:  $Y_i \sim Weibull(scale_i, shape_i)$ . In der Regressionsmodellierung interessiert man sich häufig für den bedingten Erwartungswert,  $\mu_i = E(Y_i|x_i)$ , wobei  $Y_i$  die Zielvariable bezeichnet, die auf die Einflussgröße  $x_i$  bedingt wird. Für die Weibull-Verteilung besteht folgender 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  $\Gamma(\ )$  die Gamma-Funktion bezeichnet. Für ein inhaltlich direkter zu interpretierendes Ergebnis parametrisiert *brms* die Weibull-Verteilung direkt auf  $\mu_i$ . Um die Positivität dieses bedingten Erwartungswertes einzuhalten, wurde dieser dabei mit dem natürlichen Logarithmus als Link-Funktion an den linearen Prädiktor gekoppelt.

#### 2.3.4.1 Modellierung der Überlebenszeit im Hessischen Ried

Der lineare Prädiktor für den bedingten Erwartungswert  $\mu_i$  ist aus den Haupteffekten und Zweifach-Interaktionen zweier kategorialer Variablen (Bodenbearbeitungsvariante  $V_i \in \{1, 2, 3\}$  und Herkunft  $H_i \in \{1, \dots, 6\}$ ) nach folgender Additionsformel aufgebaut:

$$\begin{aligned} \log(\mu_i) = & \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,V2} \cdot (V_i = V2) + \beta_{\mu,V3} \cdot (V_i = V3) \\ & + \beta_{\mu,H2} \cdot (H_i = H2) + \beta_{\mu,H3} \cdot (H_i = H3) + \dots \\ & + \beta_{\mu,H2,V2} \cdot (H_i = H2) \cdot (V_i = V2) + \dots \end{aligned}$$

mit dem Intercept  $\beta_{\mu,0}$  (steht für Bearbeitungsvariante „Kontrolle“ und Herkunft „Fulda“), die 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  $\beta_{\mu,H2,V2} \cdot (H_i = H2) \cdot (V_i = V2)$ .

Führten die in der obigen Beschreibung des linearen Prädiktors – mit (... = ...) notierten – Indikatorfunktionen zu einer wahren Aussage, ergab die jeweilige Indikatorfunktion den Wert 1; der jeweilige Modellterm beeinflusste den bedingten Erwartungswert. Führte die Bedingung hingegen zu einer falschen Aussage, ergab die Indikatorfunktion den Wert 0; durch Multiplikation wurde der betreffende Modellterm gleich dem Wert 0 und veränderte somit den bedingten Erwartungswert nicht.

Für den shape-Parameter wird die folgende Modellierung ohne Interaktionsterme genutzt, da sich diese nicht stabil schätzen ließen:

$$\log(\text{shape}_i) = \beta_{\text{shape},0} + \beta_{\text{shape},V2} \cdot (V_i = V2) + \beta_{\text{shape},V3} \cdot (V_i = V3) \\ + \beta_{\text{shape},H2} \cdot (H_i = H2) + \beta_{\text{shape},H3} \cdot (H_i = H3) + \dots$$

Es wurden nichtinformativ Prioriverteilungen (BANNER et al. 2020; LEMOINE 2019) gewählt (Tabelle 9). Eine Prüfung dieser Prioriverteilungen ergab keine sensitive Beeinflussung des Modellergebnisses im Vergleich zu flachen Prioriverteilungen.

Tabelle 9: Parameter und Priori der Überlebenszeitmodellierung im Hessischen Ried.

Parameter	Priori (Überlebenszeitmodell)
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; 1,1; 2,5)
$\beta_{\mu,V}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,H}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,H,V}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\text{shape},0}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\beta_{\text{shape},V}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\text{shape},H}$	<i>Normal</i> (0; 100)

#### 2.3.4.2 Modellierung der Überlebenszeit im Ostbraunschweigischen Flachland

Alle Probebäume waren gleicher Herkunft. Dementsprechend vereinfachte sich die Modellierung im Vergleich zur Modellierung im Hessischen Ried, da die Variable Herkunft entfiel. Die Verteilungsparameter der Weibull-Verteilung wurden hier wie folgt modelliert:

$$\log(\mu_i) = \beta_{\mu,0} + \beta_{\mu,V2} \cdot (V_i = V2) + \beta_{\mu,V3} \cdot (V_i = V3)$$

$$\log(\text{shape}_i) = \beta_{\text{shape},0} + \beta_{\text{shape},V2} \cdot (V_i = V2) + \beta_{\text{shape},V3} \cdot (V_i = V3)$$

In der Tabelle 10 werden die Prioriverteilungen der Parameter angegeben.

Tabelle 10: Parameter und Priori der Überlebenszeitmodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland.

Parameter	Priori (Überlebenszeitmodell)
$\beta_{\mu,0}$	<i>Student</i> (3; 1,1; 2,5)
$\beta_{\mu,V_{\text{Silvafix}}}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\mu,V_{\text{Mulchen}}}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\text{shape},0}$	<i>Student</i> (3; 0; 2,5)
$\beta_{\text{shape},V_{\text{Silvafix}}}$	<i>Normal</i> (0; 100)
$\beta_{\text{shape},V_{\text{Mulchen}}}$	<i>Normal</i> (0; 100)

### 2.3.4.3 Modellierung der Überlebenszeit im Hohen Fläming

Die Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit im Hohen Fläming erfolgte analog zur Modellierung im Ostbraunschweigischen Flachland. Lediglich der Modellterm der regionalen Bodenbearbeitungsvariante änderte sich von  $V_{Mulchen}$  zu  $V_{Streifenpflug}$ . Die Prioriverteilungen entsprachen ebenfalls denen aus dem Ostbraunschweigischen Flachland, außer  $\beta_{\mu,0}$  mit  $Student(3; -5,9; 2,5)$ .

### 2.3.4.4 Modellierung des Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserwachstums im Hessischen Ried

Die Höhe (in cm)  $Y_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , wurde im Hessischen Ried als weibull-verteilte Zielvariable modelliert. Die Verteilungsparameter der Weibull-Verteilung wurden wie folgt modelliert (hier mit stetig skaliertem Aufnahmezeitpunkt  $Z_i \in \{1, 2, 3, 4\}$ ):

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

mit dem Intercept  $\beta_{\mu,0}$  (steht für Bearbeitungsvariante „Kontrolle“, Herkunft „Fulda“ und Aufnahmezeitpunkt 0).

Für den Aufnahmezeitpunkt  $Z_i$  aus der Bearbeitungsvariante „Kontrolle“ und der Herkunft „Fulda“ wurde der bedingte Erwartungswert  $\mu_i$  durch das Produkt aus Steigungsparameter und Aufnahmezeitpunkt, also um  $\beta_{\mu,Z} \cdot Z_i$ , additiv verschoben. Zusätzlich wurden 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 unterschieden, wurden diese zeitkonstanten Unterschiede mittels probebaumspezifischer Verschiebungen des Intercepts berücksichtigt und durch den Term  $\gamma_{\mu,1} \cdot (B = B1)$  für jeden Probebaum von 1, ...,  $m$  berechnet.  $m$  entspricht dabei der Anzahl der Probebäume.

Die Schätzung des Wurzelhalsdurchmessers erfolgte analog zur Höhenschätzung. Es wurden nichtinformativ Prioriverteilungen (BANNER et al. 2020; LEMOINE 2019) gewählt

(Tabelle 11). Eine Prüfung der Prioriverteilungen ergab keine sensitive Beeinflussung des Modellergebnisses im Vergleich zu einer flachen Prioriverteilung.

Tabelle 11: Prioriverteilungen der Parameter für die Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung im Hessischen Ried (WHD: Wurzelhalsdurchmesser).

Parameter	Priori (Höhen-Modell)	Priori (WHD-Modell)
$\beta_{\mu,0}$	<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)

#### 2.3.4.5 Modellierung des Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserwachstums im Ostbraunschweigischen 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 modelliert. Alle Probestämme waren gleicher Herkunft. Dementsprechend vereinfachte sich die Modellierung des Höhenwachstums im Vergleich zur Modellierung im Hessischen Ried, da die Variable Herkunft entfiel:

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

Die Modellierung des Wurzelhalsdurchmessers folgte dem Modell der Höhenentwicklung. In der Tabelle 12 sind die zugehörigen Prioriverteilungen aufgelistet.

Tabelle 12: Prioriverteilungen der Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland (WHD: Wurzelhalsdurchmesser).

Parameter	Priori (Höhen-Modell)	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)

#### 2.3.4.6 Modellierung des Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserwachstums im Hohen

##### Fläming

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

Da das Höhenwachstum keine plötzliche – im Sinne von z. B. Sprüngen – Veränderung durch Verpflanzen erfuhr, da es sich um eine Eichensaat handelte, und im Alter 0 bei 0 cm Höhe startete, 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  $\mu_i$  mit der Identity-Link-Funktion in Abhängigkeit des Alters  $Alter_i$  (Jahre), der kategorialen Bodenbearbeitungsvariante  $V_i \in \{1, 2\}$  und eines Gruppeneffektes durch wiederholte Messungen an demselben Probebaum  $B_i \in \{1, \dots, m\}$  berechnet:

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

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

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

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

$$Alter_i \in 1,2,3$$

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

Da die Saat unter einem Kieferschirm erfolgte und dadurch Unterschiede in der Belichtung auftraten, wurde die Beleuchtungsstärke gemessen. Es wurde der *Indirect site factor* (*ISF*; diffuse Strahlung als relativer Anteil der Freilandstrahlung) ermittelt, um den empirischen Mittelwert (56,02 %) zentriert (ergibt *cISF*) und in das Modell aufgenommen. Die Modellergebnisse werden mit einer Korrektur des Lichtfaktors auf den mittleren Lichteinfall ( $cISF = 0$ ) präsentiert. Abweichend zur Höhenmodellierung waren in die WHD-Modellierung lediglich zwei Aufnahmen (Alter 2 und 3) eingegangen, das Höhenwachstumsmodell wurde dennoch unverändert angewendet.

Da es sich in diesem Fall um ein nichtlineares Modell handelte, verlangte *brms* die Wahl informativer Prioriverteilungen (Tabelle 13). Dies hat eine Steuerungswirkung, die mit dem Festlegen von Startwerten in frequentistischen, numerischen Lösungsalgorithmen zum Auffinden des Maximum-Likelihood Schätzers vergleichbar ist. Bei nichtlinearen Modellierungen unterliegen die Likelihood-Oberflächen häufig mehreren lokalen Minima, was solch eine bayesianische bzw. frequentistische Steuerungseinwirkung notwendig macht (siehe z. B. Anhang 8 in RITZ et al. (2020)). Darüber hinaus war eine Anhebung der Sample-Iterationen auf 1.500 für eine hohe Modellprädiktionsgüte notwendig.

Tabelle 13: Prioriverteilungen für das Wachstumsmodell der Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserschätzung im Hohen Fläming (WHD: Wurzelhalsdurchmesser).

Parameter	Priori (Höhen-Modell)	Priori (WHD-Modell)
$\beta_{0,a}$	<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)

#### 2.3.4.7 Darstellungen der Kulturentwicklung

Dargestellt werden die Ergebnisse der Überlebenszeitmodellierung als monoton fallende Treppenfunktionen. Aufgrund der 10 Replikationen je Teilpopulation, wurden je 10 Linien pro Farbe illustriert. Jede dieser Funktionen bildet einen plausiblen – angesichts der Daten und der Modellierung – zeitlichen Verlauf der Entwicklung des Anteils

überlebender Eichen einer Population (bedingt auf Ort und Behandlung) ab. Als Punkte sind die zu einem Inventurzeitpunkt erhobenen relativen Anteile dargestellt; nicht dargestellt sind die Punkte zum Pflanzzeitpunkt, da alle Eichen leben und die Punkte sich überlagern würden. Die zugrunde liegenden Ereigniszeitpunkte können jede mögliche monoton fallende Funktion zwischen zwei solchen Punkten ergeben.

Dargestellt werden die Ergebnisse der Wachstumsmodellierung in Form von Posteriorverteilungen des bedingten Erwartungswertes mit Median, sowie der inneren 50 %, 75 %, 90 %- und 95 %-Wahrscheinlichkeitsintervalle. Die Auswahl der Wahrscheinlichkeitswerte für diese Intervalle wurde nach McELREATH (2015) getroffen, da sie eine gute Darstellung der Verteilungen ermöglichen.



### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Nährstoffhaushalt

##### 3.1.1 Bodenphysikalische und -chemische Charakterisierung der Standorte

Die Korngrößenverteilung beeinflusst die Nährstoffvorräte im Boden. In allen Regionen war die Sandfraktion dominierend (Tabelle 14). Im Hohen Fläming und im Hessischen Ried lag der Sandanteil bei 80–90 %, wobei der Mittelsand ca. 50 % ausmachte. Im Hohen Fläming lag der Grobsandanteil über dem Feinsandanteil und im Hessischen Ried lag der Feinsandanteil bei ca. 30 % und der Grobsandanteile bei unter 5 %. Im Ostbraunschweigischen Flachland hingegen war der Sandanteil geringer (60–67 %) als in den anderen beiden Regionen und es kam ein größerer Ton- (10–17 %) und Schluff- (11–14 %) Anteil vor. Den größten Tonanteil wies die Silvafixparzelle des Ostbraunschweigischen Flachlands mit 17 % auf.

Tabelle 14: Korngrößenanteile in Masse-% für die Bodentiefe von 0–30 cm (Ton < 0,002 mm; fU (Feinschluff) = 0,002–0,0063 mm; mU (Mittelschluff) = 0,0063–0,02 mm; gU (Grobschluff) = 0,02–0,063 mm; fS (Feinsand) = 0,063–0,2; mS (Mittelsand) = 0,2–0,63 mm; gS (Grobsand) = 0,63–2,0 mm).

Region	Behandlung	Ton	fU	mU	gU	fS	mS	gS
Hoher Fläming	Kontrolle	7	3	6	7	14	43	20
	Silvafix	5	1	3	4	9	53	24
	Streifenpflug	5	1	4	5	11	57	18
Hessisches Ried	Kontrolle	4	3	1	4	29	56	4
	Silvafix	5	1	2	2	31	55	3
	Fräse	5	2	2	2	29	58	2
Ostbraunschweigisches Flachland	Kontrolle	10	4	6	14	29	34	4
	Silvafix	17	4	7	12	23	33	4
	Mulcher	12	3	7	11	25	36	5

Die Kationenaustauschkapazität (Abbildung 13) beschreibt das Potential von Böden, Nährstoffe in pflanzenverfügbarer Form zu speichern und hängt maßgeblich vom Ton- und Humusgehalt der Böden ab, da Tonminerale und organische Substanz negativ geladene Oberflächen besitzen. Im Hohen Fläming und im Hessischen Ried wiesen die Böden nach dem Bewertungsschema der Forstlichen Standortaufnahme (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2016) eine geringe bis gering-mittlere Kationenaustauschkapazität auf. Auffällig sind die geringe Streuung der Werte bei der Fräsvariante im Hessischen Ried

und die geringen Werte bei der Silvafixvariante im Hohen Fläming. Die Parzellen im Ostbraunschweigischen Flachland wiesen größere Kationenaustauschkapazitäten auf als die Parzellen im Hohen Fläming und im Hessischen Ried. Die Kationenaustauschkapazitäten lagen in einem Bereich von gering-mittel bis mittel-hoch, wobei die Silvafixvariante die größte Kationenaustauschkapazität und auch die größte Streuung der Werte aufwies.

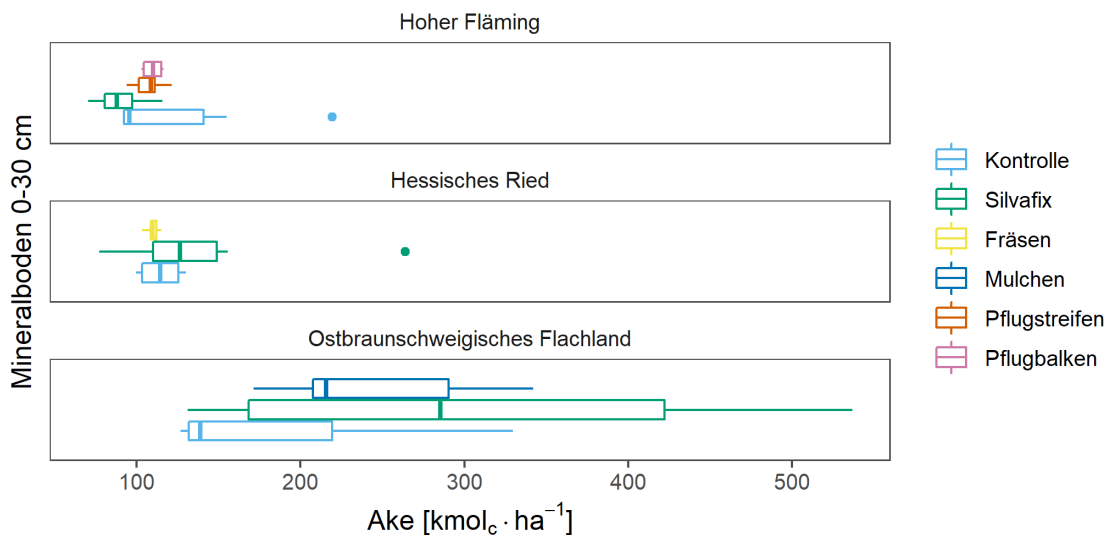


Abbildung 13: Boxplots der Kationenaustauschkapazität des Mineralbodens in der Bodentiefe von 0–30 cm in Abhängigkeit des Bodenbearbeitungsverfahrens für die drei Untersuchungsregionen.

Die Basensättigung beschreibt den Anteil der sogenannten basischen Kationen an der Belegung der Austauscherplätze. Mit steigendem Anteil basischer Kationen erhöht sich die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen und es kommt zu einer Verbesserung der Ernährungssituation. Zu den basischen Kationen zählen Ca, Mg, K und Na (SCHEFFER et al. 2008). Am geringsten war die Basensättigung im Hohen Fläming (Abbildung 14). Hier wiesen alle Behandlungen nach dem Bewertungsschema der forstlichen Standortaufnahme (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2016) eine geringe Basensättigung auf. Am niedrigsten waren die Werte der Silvafixbehandlung. Im Hessischen Ried zeigte die Kontrolle eine geringe Basensättigung und die Silvafixbearbeitung eine geringe bis mäßige Basensättigung. Hingegen zeigte die Fräsbehandlung deutlich höhere Werte um 30 %, was einer mäßig bis mittleren Basensättigung entspricht. Im Ostbraunschweigischen

Flachland lag die Basensättigung der Kontrolle und der Silvafixbehandlung in einem Bereich von 10–20 % und gilt als gering bis mäßig. Für das Mulchen lagen die Werte überwiegend im mittleren Bereich (30–50 %).

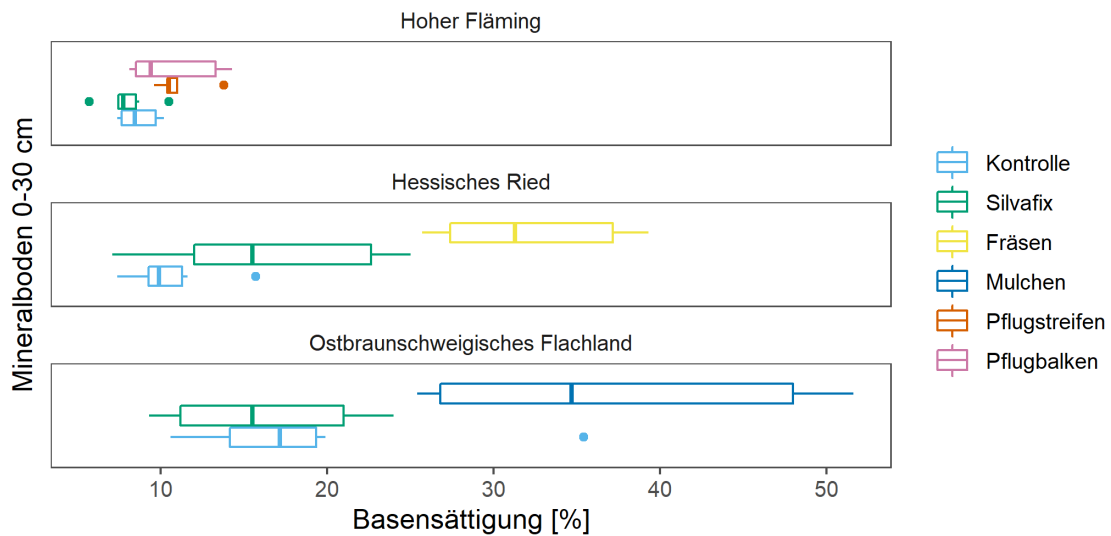


Abbildung 14: Boxplots der Basensättigung des Mineralbodens in der Bodentiefe von 0–30 cm in Abhängigkeit des Bodenbearbeitungsverfahrens für die drei Untersuchungsregionen.

Eine weitere wichtige Größe für das Verständnis bodenchemischer Prozesse ist der pH-Wert. Neben den Säureverhältnissen beschreibt der pH-Wert auch die Nährstoffverfügbarkeit. Böden sind – in Abhängigkeit ihres Versauerungszustands – in der Lage, Säureinträge abzuf puffern und damit den pH-Wert konstant zu halten. Auf den Versuchsflächen lagen die pH-Werte (gemessen in Wasser) im Austauscher-Pufferbereich von pH 5,0 bis 4,2 (Abbildung 15) und sind als „stark sauer“ anzusprechen (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2016). Im Austauscher-Pufferbereich verdrängen aus Tonmineralen und Silikaten freigesetzte Aluminium-Ionen die basischen Kationen, die in der Folge leicht ausgewaschen werden können und dadurch die Basensättigung vermindern. Die Mediane der pH-Werte lagen überwiegend im Bereich von 4,2 bis 4,5. Lediglich die Mediane der Silvafixbearbeitung im Hohen Fläming (pH 4,6) und der Fräsbearbeitung im Hessischen Ried (pH 4,8) lagen darüber.

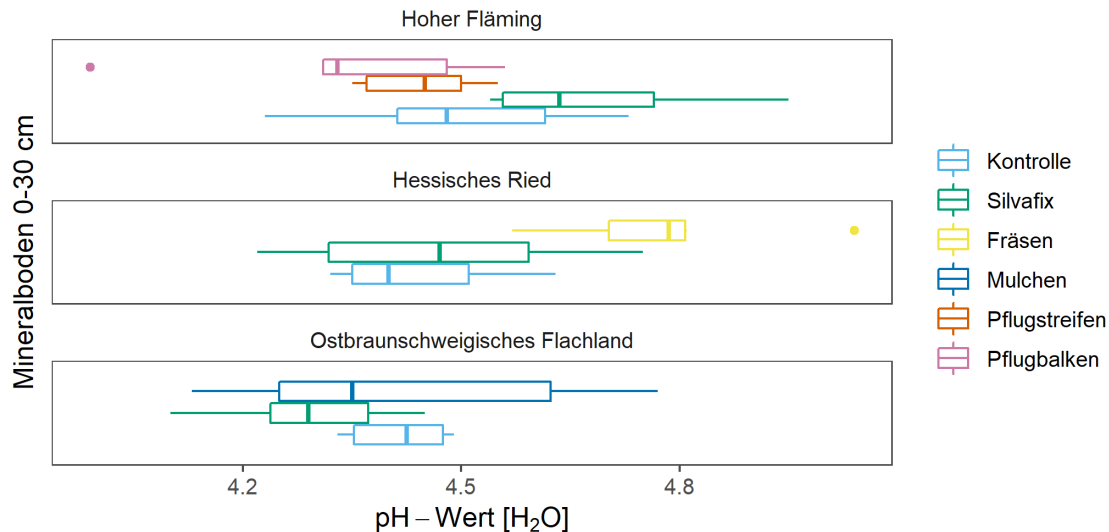


Abbildung 15: Boxplots der pH-Werte des Mineralbodens in der Bodentiefe von 0–30 cm in Abhängigkeit des Bodenbearbeitungsverfahrens für die drei Untersuchungsregionen.

### 3.1.2 Nährstofffrachten

Die aus den Sickerwasserproben der Mikrokosmen-Lysimeter berechneten Nährstofffrachten zeigten einen Jahresgang. Im Winterhalbjahr waren die Nährstofffrachten hoch; im Sommerhalbjahr niedrig (Abbildung 16). Diese Beobachtung galt für alle Regionen, Bodenbearbeitungsverfahren und Nährstoffe. Generell waren die Nährstofffrachten hoch, wenn auch die Nährstoffvorräte der Kontrollparzellen hoch waren. Folglich waren die Nährstofffrachten am gut nährstoffversorgten Standort im Ostbraunschweigeschen Flachland am höchsten, gefolgt vom Hessischen Ried. Am nährstoffärmsten Standort im Hohen Fläming wurden die geringsten Frachten beobachtet. Dementsprechend wies die Kontrollfläche im Hohen Fläming im Vergleich zu den anderen Regionen die geringsten Frachten auf.

Die Silvafixbearbeitung veränderte die Nährstofffrachten im Vergleich zur Kontrolle kaum (Abbildung 17). Allerdings konnte mit der gewählten Methode der Sickerwassergewinnung durch Mikrokosmen-Lysimeter nicht in den Schlagabraumwällen des Silvafix' auf den Rückegassen gemessen werden. Vermutlich sind die Frachten in den Schlagabraumwällen auf den Rückegassen aufgrund der Konzentration an organischem Material und des Fehlens von Vegetation jedoch besonders hoch. Um dieser Vermutung nachzugehen, wurden in den Schlagabraumwällen und auf weiteren ausgewählten Versuchsparzellen Proben gewonnen und auf mineralisierbaren Stickstoff untersucht (siehe Ka-

---

pitel „NO<sub>3</sub>-N<sub>min</sub>“). Dieser Verdacht wurde durch die Ergebnisse auf den gepflügten Flächen im Hohen Fläming bestärkt: In den Pflugsohlen veränderten sich die Nährstofffrachten gegenüber der Kontrolle kaum, in den Pflugbalken waren sie jedoch etwa doppelt so hoch gegenüber der Kontrolle. In den Pflugbalken wurden hohe NO<sub>3</sub>-N-Frachten von bis zu 120 kg·ha<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup> beobachtet. Mulchen und Fräsen hatten dagegen nur einen mäßigen Einfluss auf die Nährstofffrachten.

Die Nährstofffrachten zeigten eine große Variabilität zwischen den sechs Mikrokosmen-Lysimetern auf jeder Parzelle. Sie hingen von der Flussrate, der Mächtigkeit der Humusaufgabe, aber auch von der Bodenvegetation ab. Die Frachten aller Elemente stiegen mit zunehmender Flussrate (nicht gezeigt) und mit zunehmender Humusmächtigkeit an, mit Ausnahme von Sulfatschwefel (nicht gezeigt). In Tabelle 25 des Anhangs werden die Ergebnisse der Modellschätzung für die fixen Effekte wiedergegeben.



Abbildung 16: Erwartungswerte mit 95 % Kreditäritätsintervall der modellierten Nährstofffrachten in täglicher Auflösung während des 2-jährigen Beobachtungszeitraumes nach Regionen, Nährelement und Bodenbearbeitungsverfahren (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland).

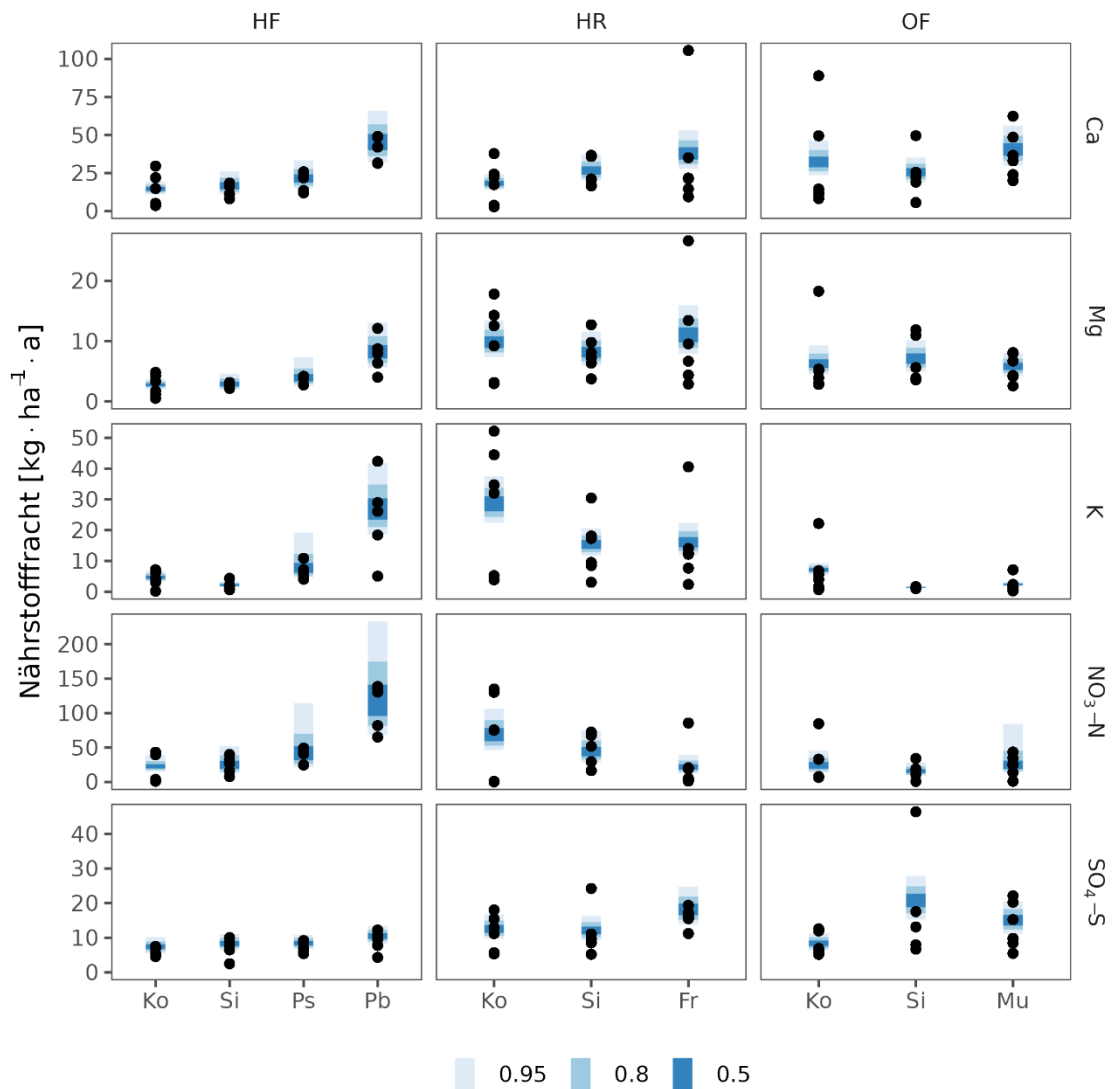


Abbildung 17: Mittlere jährliche Nährstofffrachten aus Modellschätzungen in Abhängigkeit des Bodenbearbeitungsverfahrens (Ko: Kontrolle, Si: Silvafix, Ps: Pflugsohle, Pb: Pflugbalken, Fr: Fräsen, Mu: Mulchen) für fünf Nährelemente (Zeilen) in den drei Untersuchungsregionen (Spalten; HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland). Die Punkte repräsentieren Messdaten und die blauen Balken Kreditabilitätsintervalle.

Da sich die Vegetation bekanntlich einen großen Einfluss auf die Nährstofffrachten hat und die verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren unterschiedlich auf die Vegetation auswirken, wurde der Einfluss der Vegetation auf die Nährstofffrachten durch marginale Effekte statistisch abgeleitet (Erklärung der "marginalen Effekte" siehe Abbildung 18). Die Nährstofffrachten nahmen mit zunehmender Trockenmasse der Begleitvegetation ab, mit Ausnahme von Sulfatschwefel (Abbildung 18). Den größten Effekt hatte die Begleitvegetation auf die Nitratfrachten. Bereits eine gringe Begleitvegetation konnte hohe Nitratfrachten stark reduzieren.

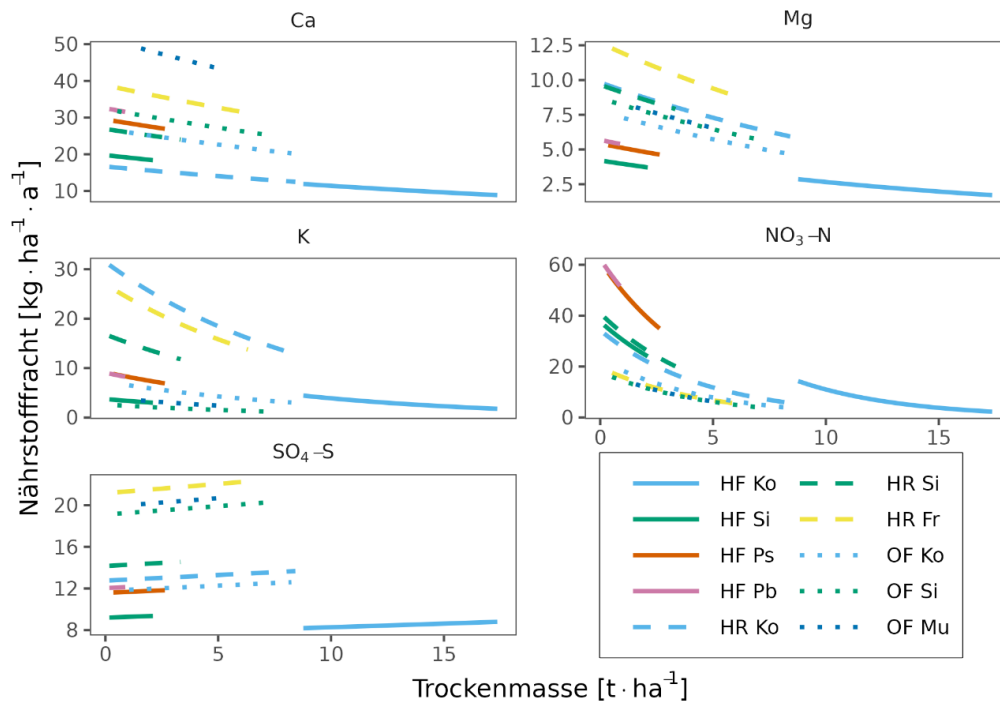


Abbildung 18: Marginale Effekte der bedingten Erwartungswerte (AREL-BUNDOCK 2022) der Trockenbiomassen auf die Nährstofffrachten. Die Linien repräsentieren Wertebereiche in denen die Modelle parametrisiert sind. (Bei den Berechnungen der marginalen Effekte werden allen kategorialen Variablen die Bedingungen des Intercepts zugewiesen und allen numerischen zentrierten Variablen der Wert „Null“, mit Ausnahme des untersuchten Parameters (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, Ko: Kontrolle, Si: Silvafix, Ps: Pflugsohle, Pb: Pflugbalken, Fr: Fräsen, Mu: Mulchen).

### 3.1.3 Nährstoffvorrat

Der Nährstoffvorrat direkt nach den Bodenbearbeitungen wurde berechnet, indem der Nährstoffvorrat in den Mikrokosmen-Lysimetern am Ende des Untersuchungszeitraums und die Summe der Nährstofffrachten über den kompletten Untersuchungszeitraum addiert wurden (Abbildung 19). Anhand der berechneten Nährstoffvorräte lässt sich beurteilen, ob die Durchführung der Bodenbearbeitung bereits zu einer unmittelbaren Veränderung der Nährstoffvorräte geführt hat. Im Vergleich zur Kontrolle reduzierte das Silvafixverfahren die pflanzenverfügbaren Ca- und Mg-Vorräte des Standorts im Hohen Fläming um 75 % bzw. 90 %, im Hessischen Ried um 28 % bzw. 68 % und im Ostbraunschweigischen Flachland um 28 % bzw. 32 %. Das Streifenpflugverfahren im Hohen Fläming führte im Vergleich zur Kontrolle zu geringeren pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräten in der Pflugsohle und zu höheren Vorräten in den Pflugbalken. Wurden jedoch die pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte aus Pflugsohle und Pflugbalken gemittelt, waren die Werte ähnlich wie in der Kontrolle. Das Fräsen im Hessischen Ried und das Mulchen



im Ostbraunschweigischen Flachland veränderten die pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte im Vergleich zur Kontrolle kaum.

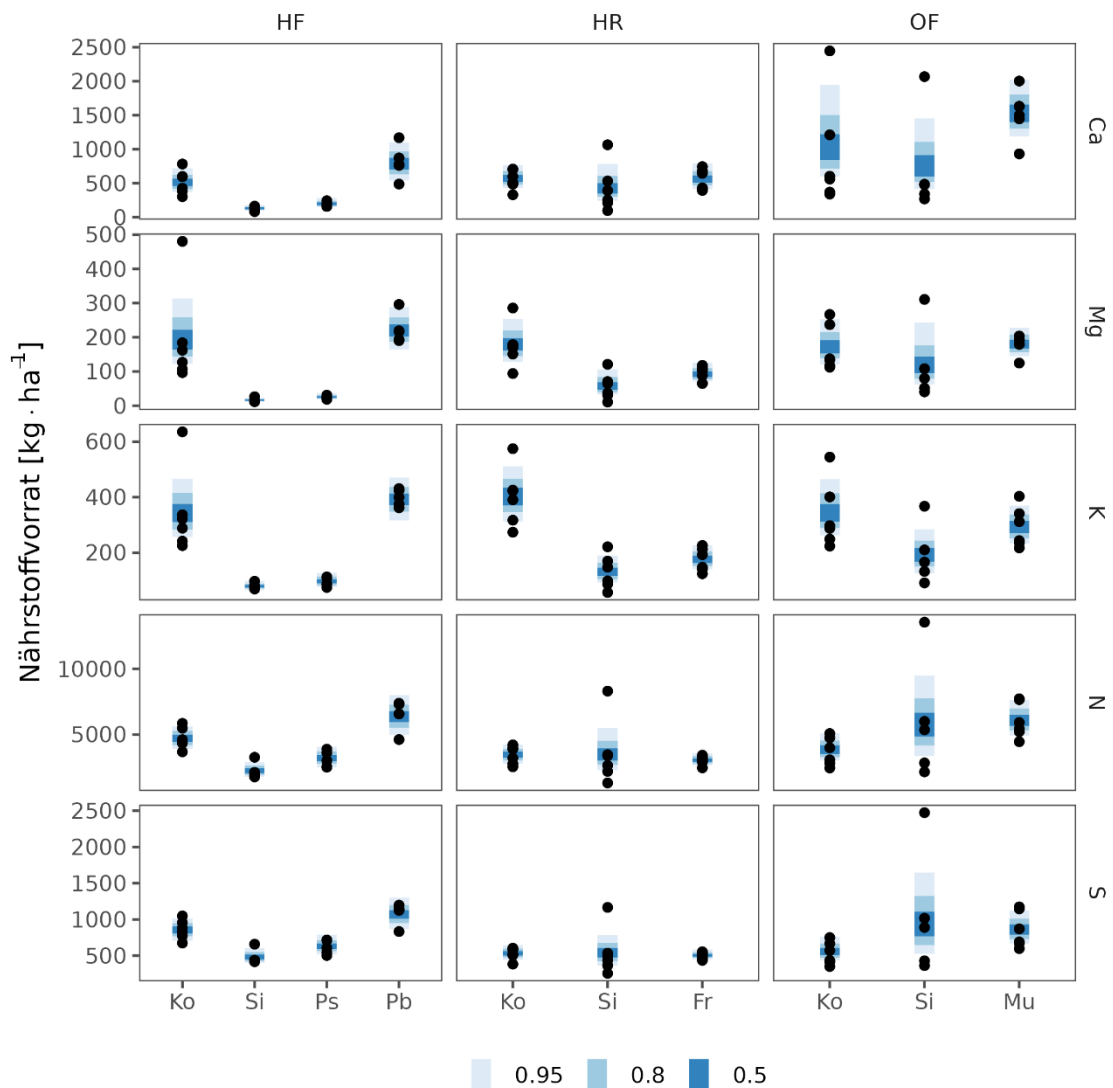


Abbildung 19: Pflanzenverfügbare Nährstoffvorräte direkt nach den Bodenbearbeitungen (berechnet aus den Summen der Nährstoffvorräte aus den Mikrokosmen-Lysimetern am Ende des Untersuchungszeitraumes und der Frachten über den Untersuchungszeitraum) aus Modellschätzungen nach Nährelementen, Regionen (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland) und Bodenbearbeitungsverfahren (Ko: Kontrolle, Si: Silvafix, Ps: Pflugsohle, Pb: Pflugbalken, Fr: Fräse, Mu: Mulchen). Die Punkte repräsentieren Messdaten und die blauen Balken Kreditibilitätsintervalle.

Die Gesamtnährstoffvorräte der Elemente N und S zeigten im Ostbraunschweigischen Flachland keine Veränderungen in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungsverfahren. Dagegen nahmen im Hessischen Ried die Gesamtnährstoffvorräte bei der Silvafixbehandlung gegenüber der Kontrolle leicht ab, während sie beim Fräsen unverändert blieben. Im Hohen Fläming nahmen die Gesamtnährstoffvorräte von N und S in der Pflugsohle und der Silvafixbehandlung im Vergleich zur Kontrolle ab. In den Pflugbalken waren die

Gesamtnährstoffvorräte von N und S höher als in der Kontrolle. Generell war die durch die Silvafixbearbeitung hervorgerufene Abnahme der Gesamtnährstoffvorräte von N und S relativ geringer, als die Abnahme der pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte von Ca, Mg und K. Die Abnahme der Gesamtnährstoffvorräte von N und S sowie der pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte von Ca, Mg und K nach der Silvafixbehandlung, war im Hohen Fläming am höchsten. Somit haben sich die Nährstoffvorräte aufgrund von Bodenbearbeitungen geändert. Die Ergebnisse der Modellschätzung für die jeweiligen Parameter werden in Tabelle 27 des Anhangs (7.3) präsentiert.

Zum besseren Verständnis der Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf die Nährstoffvorräte ist es hilfreich, die Vorratsveränderungen für die Kompartimente Vegetation, Humus und Mineralboden zu betrachten. Stellvertretend für alle in dieser Arbeit untersuchten Nährelemente wird dies für Ca in Abbildung 20 dargestellt und im Folgenden beschrieben. Eine Darstellung der Nährstoffvorräte nach Kompartimenten für die anderen in dieser Arbeit untersuchten Nährelemente findet sich im Anhang unter Punkt 7.2.

In allen Regionen enthielt die Begleitvegetation im Vergleich zur Humusauflage und zum Mineralboden wenig Ca (Abbildung 20). Im Hohen Fläming wies die Begleitvegetation der Kontrollvariante mit ca.  $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  die höchsten Ca-Vorräte auf. Die Bodenbearbeitungen reduzierten die Begleitvegetation und damit auch die Ca-Vorräte, welche am Versuchsende ca.  $2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  betragen.

In den Kontrollvarianten im Hohen Fläming und im Hessischen Ried waren die Ca-Vorräte im Auflagehumus bedeutend höher als im Mineralboden, während im Ostbraunschweigischen Flachland der Ca-Vorrat im Mineralboden am höchsten war. Die Bodenbearbeitungen hatten in allen Regionen einen erheblichen Einfluss auf die Vorräte im Auflagehumus. Das Silvafixverfahren führte auf allen Standorten zu einer horizontalen Verlagerung des Auflagehumus auf die Rückegasse und reduzierte somit die Ca-Vorräte in der Humusauflage im Vergleich zur Kontrolle. Im Hohen Fläming wurde durch den massiven Bewuchs nicht nur die gesamte Humusauflage entfernt, sondern auch Teile des durchwurzelteten Oberbodens. Hierdurch nahm nicht nur der Ca-Vorrat in der Humusauflage stark ab, sondern tendentiell auch im Mineralboden. Im Hessischen Ried und im Ostbraunschweigischen Flachland führte das Silvafixverfahren zwar auch zu einer Verlagerung der Humusauflage auf die Rückegasse, aber auch zu einer teilweisen

Einarbeitung in den Mineralboden. Dies führte zu einer Abnahme der Ca-Vorräte in der Humusauflage und zu einer Zunahme im Mineralboden.

Auch beim Streifenpflugverfahren kam es im Hohen Fläming zu einer horizontalen Verlagerung der Humusauflage, allerdings viel kleinräumiger als bei der Silvafixbehandlung. Im Bereich der Pflugsohle wurde die Humusauflage zur Freilegung des Mineralbodens vollständig entfernt und im Bereich der Pflugbalken angereichert. Hierdurch waren die Ca-Vorräte der Humusauflage in den Bereichen der Pflugbalken doppelt so hoch wie in der Kontrolle. Eine Beeinflussung der Nährstoffvorräte des Mineralbodens durch das Streifenpflugverfahren konnte nicht beobachtet werden.

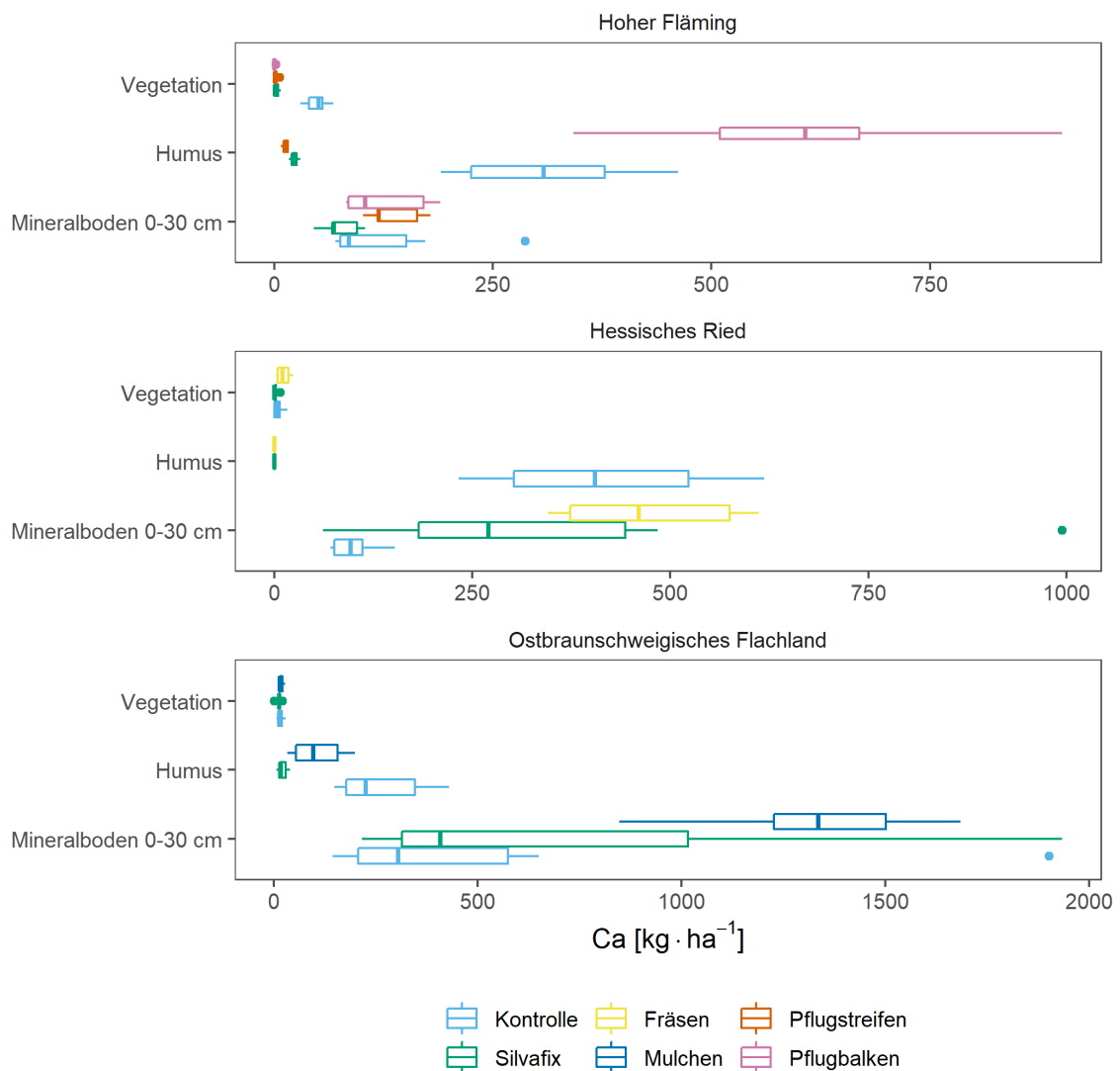


Abbildung 20: Boxplots der Ca-Vorräte in den Mikrokosmen-Lysimetern getrennt nach den Kompartimenten Vegetation, Humus und Mineralboden für die Regionen und Bodenbearbeitungsverfahren.

Das Fräsen im Hessischen Ried und das Mulchen im Ostbraunschweigischen Flachland führten zu einer starken Zunahme der Ca-Vorräte im Mineralboden im Vergleich zur Kontrolle, aber auch zum Silvafixverfahren. Bei diesen Verfahren wurde der Auflagehumus in den Mineralboden eingearbeitet.

#### 3.1.4 Relative Nährstofffrachten

Vor dem Hintergrund, dass sich die Bodenbearbeitungen unmittelbar auf die Verteilung der Nährstoffvorräte in der Fläche ausgewirkt haben, erscheint eine Betrachtung der Nährstofffrachten in Abhängigkeit von den auf der Fläche verbliebenen Nährstoffvorräten (relative Nährstofffrachten) zur Beurteilung der Beeinflussung des Nährstoffhaushaltes sinnvoll. Die Kontrolle zeigte die niedrigsten relativen Nährstofffrachten über alle Regionen und Nährstoffe (Abbildung 21). Aufgrund der horizontalen Verlagerung von Nährstoffen durch die Silvafixbehandlung waren, insbesondere für Calcium und Magnesium, die relativen Nährstofffrachten dieser Behandlungsvariante – trotz geringer absoluter Nährstofffrachten (siehe Abbildung 17) – sehr groß. Im Hohen Fläming verringerte die Auswaschung von Nährstoffen im Untersuchungszeitraum den verbliebenen Ca- und Mg-Vorrat in 0 bis 30 cm Bodentiefe um 22 % und 36 %, im Hessischen Ried um 16 % und 32 % und im Ostbraunschweigischen Flachland um 9 % und 17 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ca- und Mg-Vorräte durch die Silvafixbearbeitung im Vergleich zur Kontrolle stark reduziert wurden.

In den Pflugstreifen im Hohen Fläming wurde ein analoger Effekt wie beim Silvafix beobachtet: hohe relative Nährstofffrachten bei geringen absoluten Nährstofffrachten. Auch in den Pflugbalken wurden hohe relative Nährstofffrachten gemessen, die allerdings nicht auf niedrige Nährstoffvorräte (wie in den Pflugstreifen) zurückzuführen sind, sondern im Gegenteil auf hohe Nährstofffrachten bei gleichzeitig hohen Nährstoffvorräten. Dagegen zeigte das Fräsen im Hessischen Ried nur geringfügig höhere relative Nährstofffrachten im Vergleich zur Kontrolle. Das Mulchen im nährstoffreichen Ostbraunschweigischen Flachland hatte keinen Einfluss auf die relativen Ca- und Mg-Frachten. Tabelle 28 im Anhang (7.3) zeigt die Ergebnisse der Modellschätzung für jeden Parameter.

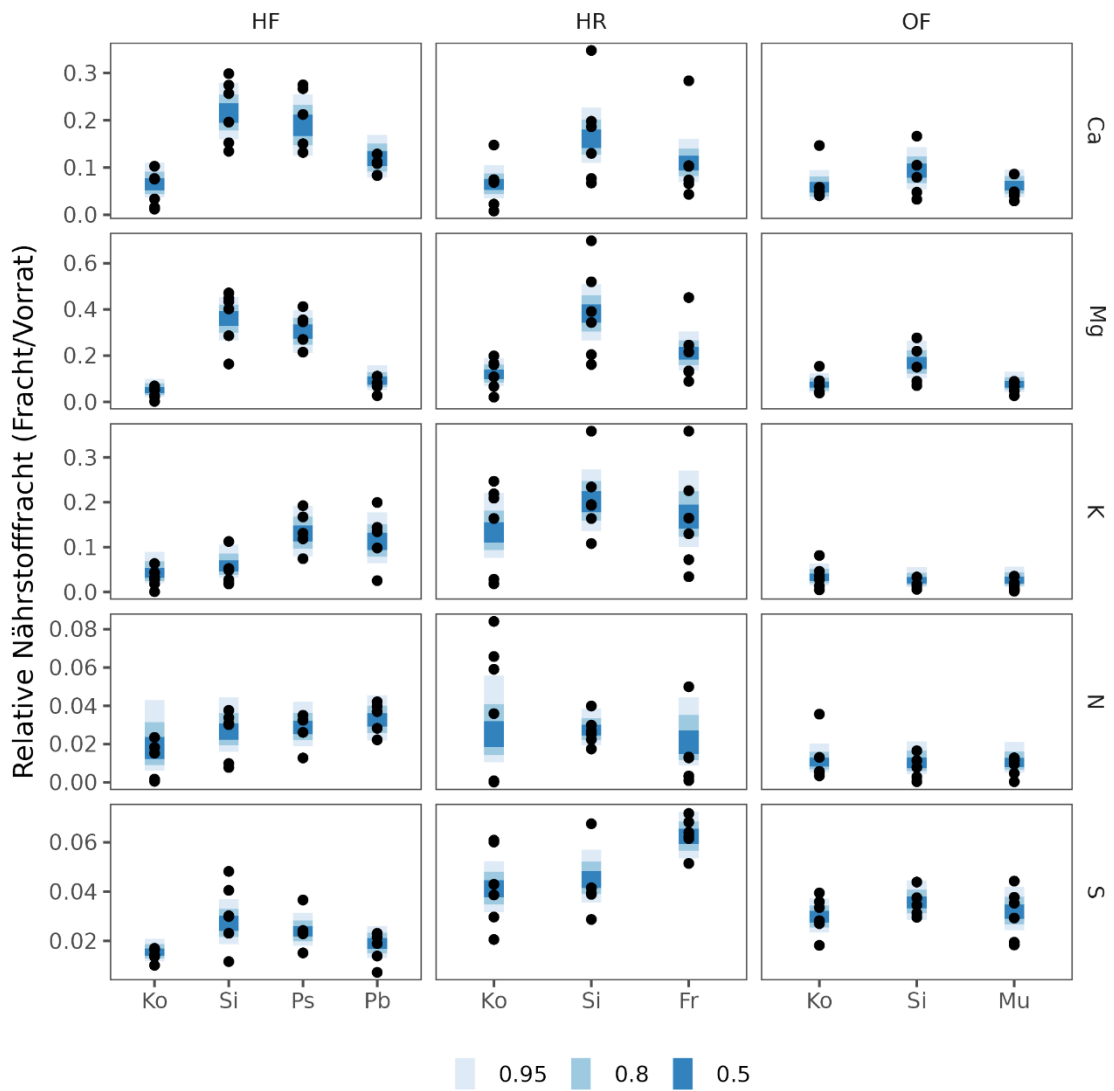


Abbildung 21: Relative Nährstofffrachten (Quotient aus aufsummierter Nährstofffracht des kompletten Untersuchungszeitraumes und Nährstoffvorrat) aus Modellschätzungen nach Nährelementen, Regionen (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland) und Bodenbearbeitungsverfahren (Ko: Kontrolle, Si: Silvafix, Ps: Pflugsohle, Pb: Pflugbalken, Fr: Fräse, Mu: Mulchen). Die Punkte repräsentieren Messdaten und die blauen Balken Kreditabilitätsintervalle.

### 3.1.5 $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorrat

Zur Abschätzung der Nitratfrachten unter den Schlagabraumwällen der Silvafixbehandlung und zur Abschätzung der Nitratfrachten in größeren Bodentiefen (die Mikrokosmen-Lysimeter reichen nur bis in 30 cm Bodentiefe) wurden  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Analysen durchgeführt. Die  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte der Kontrollen lagen im Herbst 2020 in allen Regionen und Bodentiefen nahe bei 0 (Abbildung 22). Im Gegensatz dazu wiesen die Rückegassen mit den Schlagabraumwällen auf den mit dem Silvafix bearbeiteten Parzellen in allen drei Regionen hohe  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte bis 30 cm Bodentiefe auf. Im Hohen Fläming und im Ostbraunschweigischen Flachland waren die  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte auch in größeren Bodentiefen deutlich höher als in der Kontrolle, nicht aber im Hessischen Ried.

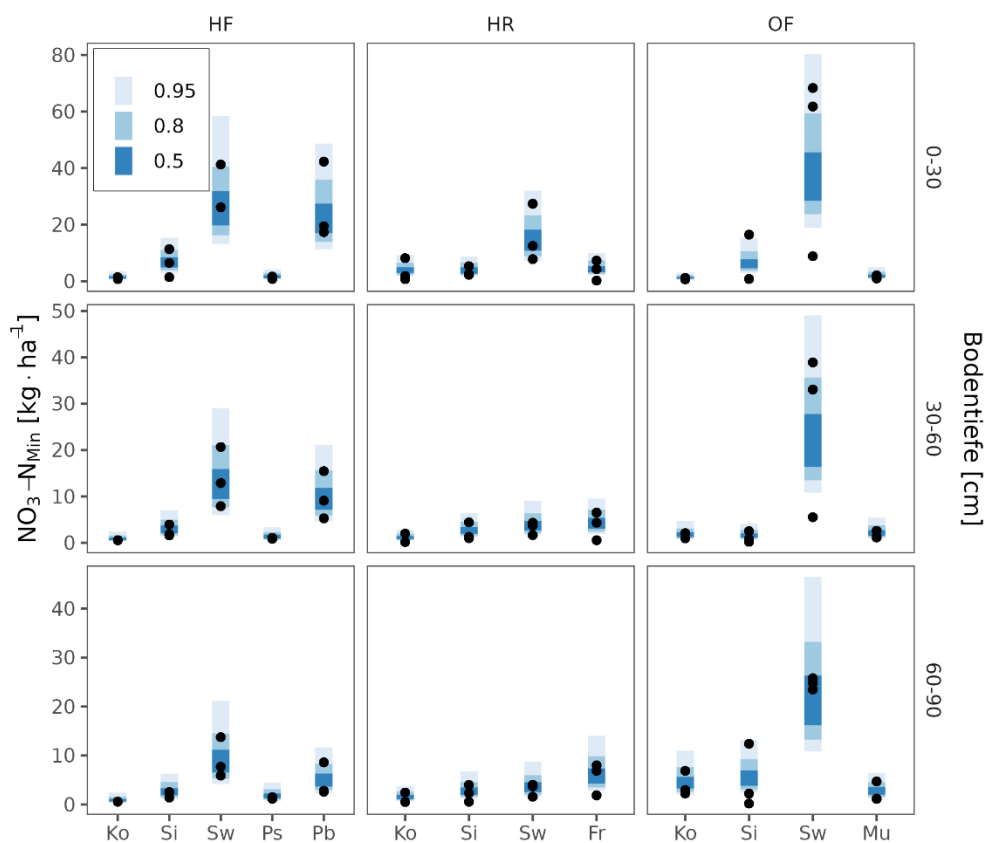


Abbildung 22:  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Gehalte im Mineralboden im Herbst 2020 (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, Ko: Kontrolle, Si: Silvafix, Sw: Schlagabraum Wall [Bereiche der Rückegassen auf den vom Silvafix geräumten Parzellen], Ps: Pflugsohle, Pb: Pflugbalken, Fr: Fräse, Mu: Mulchen).

Im nährstoffreichen Ostbraunschweigischen Flachland erreichten die  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte im Oberboden bis 30 cm mit ca.  $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  und in den Tiefenstufen von 30 bis 60 cm und 60 bis 90 cm mit ca.  $20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  die größten Werte. Diese Werte lassen sich auf-

grund der einfachen Modellstruktur leicht aus Tabelle 15 durch Multiplikation des Intercepts mit dem jeweiligen Parameter berechnen. Die Pflugbalken im Hohen Fläming wiesen ebenfalls hohe  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte auf, die jedoch geringer waren als die in den Silvafixwällen im Hohen Fläming. Die hohen  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte waren sowohl in den Silvafixwällen als auch in den Pflugbalken bis in große Bodentiefen (90 cm) zu beobachten. Alle anderen Behandlungen zeigten keine erhöhten  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$ -Vorräte.

Tabelle 15: Parameterspezifische Posteriori-Verteilung der Zufallseffekte für die  $\text{NO}_3\text{-N}_{\text{min}}$  Modellierung (Median in  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  [2,5 % Quantil; 97,5 % Quantil]) (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland).

Parameter	Boden Tiefenstufe [cm]		
	Boden Tiefenstufe [cm]		
	0–30	30–60	60–90
Intercept	3,89 [2,65; 5,64]		
HF Kontrolle	0,33 [0,14; 0,95]	0,21 [0,09; 0,65]	0,21 [0,08; 0,64]
HF Silvafix	1,63 [0,72; 4,26]	0,71 [0,31; 1,89]	0,63 [0,26; 1,74]
HF Schlagabraum Wall	6,53 [3,07; 14,95]	3,15 [1,46; 8,07]	2,22 [0,99; 5,55]
HF Pflugstreifen	0,39 [0,17; 1,13]	0,33 [0,14; 0,89]	0,43 [0,19; 1,21]
HF Pflugbalken	5,57 [2,67; 13,53]	2,37 [1,09; 5,71]	1,23 [0,55; 3,15]
HR Kontrolle	0,97 [0,43; 2,58]	0,28 [0,12; 0,75]	0,37 [0,16; 0,98]
HR Silvafix	0,93 [0,41; 2,38]	0,66 [0,29; 1,73]	0,67 [0,28; 1,84]
HR Schlagabraum Wall	3,58 [1,66; 8,80]	0,90 [0,39; 2,62]	0,88 [0,38; 2,34]
HR Fräse	1,05 [0,48; 2,72]	1,04 [0,47; 2,53]	1,44 [0,66; 3,76]
OF Kontrolle	0,30 [0,13; 0,81]	0,43 [0,18; 1,31]	1,09 [0,48; 2,98]
OF Silvafix	1,53 [0,68; 3,95]	0,39 [0,16; 1,08]	1,32 [0,58; 3,52]
OF Schlagabraum Wall	9,28 [4,53; 21,67]	5,46 [2,54; 13,67]	5,34 [2,58; 12,29]
OF Mulchen	0,45 [0,19; 1,29]	0,53 [0,21; 1,42]	0,68 [0,29; 1,78]

### 3.2 Bodenwasserspannung

Die Posteriori-Verteilungen der Regressionsparameter zeigen, dass die Schätzung der Parameter des ersten Zeitpunkts den größten Einfluss auf den geschätzten Median hatte (Tabelle 16). Hier waren je Region die Werte für die jeweilige Kontrolle am höchsten, was bedeutet, dass die Kontrollen im Vergleich zu den Bodenbearbeitungsvarianten trockener waren (Tabelle 16). Von den anderen Regressionsparametern hatten der Niederschlag (Tabelle 18) und die Sonnenscheindauer (Tabelle 19) einen ähnlich großen Einfluss. Den geringsten Einfluss hatte der Wasserdampfdruck (Tabelle 17). Über alle Regionen zeigten die Regressionsparameter der Witterung keinen gleichgerichteten Effekt auf die Behandlungen Kontrolle und Silvafix.

Die Bodenfeuchte zeigte in allen Regionen einen Jahresgang mit feuchten Böden im Winter und trockenen Böden im Sommer (Abbildung 23). Die Kontrollen im Hohen Fläming und im Hessischen Ried wiesen für die Forstkulturen im Jahr 2019 über mehrere Wochen und im Jahr 2020 über mehrere Monate Bodenwasserspannungen von über -1.300 hPa auf (Abbildung 23). Die bearbeiteten Varianten zeigten sowohl 2019 als auch 2020 für Pflanzen deutlich günstigere Bodenwasserspannungen als die Kontrollen. Im Hessischen Ried zeigte die gefräste Parzelle in den Herbstmonaten bessere Wiederbefeuchtungseigenschaften als die anderen Varianten. Im Ostbraunschweigischen Flachland waren die Böden während des gesamten Beobachtungszeitraums in einem günstigen Bodenfeuchtezustand. In dieser Region zeigten die Versuchspartellen mit Bodenbearbeitungen sehr ähnliche Bodenwasserspannungen wie die Kontrolle (Abbildung 23).



Tabelle 16: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für die Parameter des ersten Zeitpunkts (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, K: Kontrolle, S: Silvafix, P: Streifenflug, F: Fräse, M: Mulcher).

	HF_K	HF_S	HF_P	HR_K	HR_S	HR_F	OF_K	OF_S	OF_M
2,5 % Quantil	5,05	4,70	4,57	6,09	5,02	4,41	4,64	4,58	4,25
Median	5,15	4,79	4,65	6,17	5,08	4,48	4,72	4,65	4,32
97,5 % Quantil	5,25	4,88	4,74	6,26	5,15	4,55	4,79	4,73	4,40

Tabelle 17: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für den exponierten und skalierten Wasserdampfdruck (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, K: Kontrolle, S: Silvafix, P: Streifenflug, F: Fräse, M: Mulcher).

	HF_K	HF_S	HF_P	HR_K	HR_S	HR_F	OF_K	OF_S	OF_M
2,5 % Quantil	-14,56	-17,87	-17,77	-18,03	-17,84	-17,90	-17,84	-17,95	-17,84
Median	-12,07	-13,15	-13,14	-13,47	-13,11	-13,30	-13,35	-13,54	-13,29
97,5 % Quantil	-10,30	-10,02	-10,19	-10,54	-9,86	-10,54	-10,38	-10,46	-10,44

Tabelle 18: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für den exponierten und skalierten Niederschlag (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, K: Kontrolle, S: Silvafix, P: Streifenflug, F: Fräse, M: Mulcher).

	HF_K	HF_S	HF_P	HR_K	HR_S	HR_F	OF_K	OF_S	OF_M
2,5 % Quantil	-3,14	-3,92	-3,03	-3,79	-4,24	-3,33	-3,23	-3,27	-3,12
Median	-3,09	-3,83	-2,99	-3,69	-4,08	-3,28	-3,18	-3,21	-3,07
97,5 % Quantil	-3,04	-3,75	-2,95	-3,60	-3,95	-3,23	-3,13	-3,16	-3,03

Tabelle 19: Posteriori-Verteilung der Regressionsparameter für die exponierte und skalierte Sonnenscheindauer (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, K: Kontrolle, S: Silvafix, P: Streifenflug, F: Fräse, M: Mulcher).

	HF_K	HF_S	HF_P	HR_K	HR_S	HR_F	OF_K	OF_S	OF_M
2,5 % Quantil	-4,02	-4,65	-3,97	-4,64	-4,80	-4,15	-4,22	-4,25	-4,10
Median	-3,97	-4,58	-3,93	-4,55	-4,70	-4,10	-4,17	-4,19	-4,05
97,5 % Quantil	-3,92	-4,50	-3,88	-4,46	-4,61	-4,06	-4,12	-4,14	-4,00

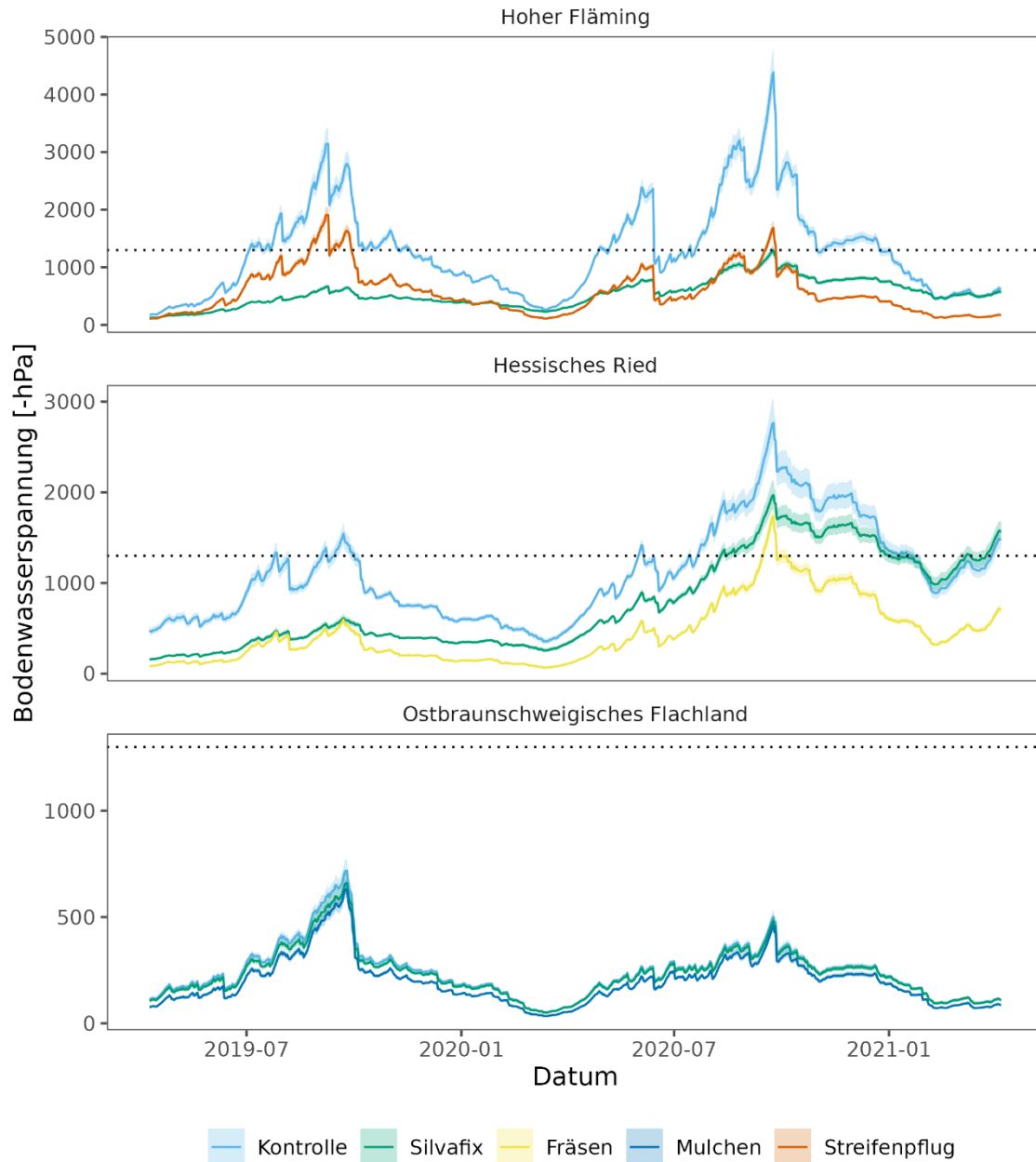


Abbildung 23: Darstellung des Verlaufs des Medians und des 95 % Kreditivitätsintervalls der Bodenwasserspannung über den Versuchszeitraum je Region und Bearbeitungsvariante. Die gepunktete horizontale Linie entspricht dem Wert von -1300 hPa.

### 3.3 Kulturentwicklung

#### 3.3.1 Überlebenswahrscheinlichkeiten

##### 3.3.1.1 Hessisches Ried

Nach drei Vegetationsperioden zeigten die Versuchsvarianten aus Herkunft und Bodenbearbeitung eine weite Streuung der Überlebenswahrscheinlichkeiten von 10–80 % (Abbildung 24). Trotz der großen Streuung war kein Verfahren überlegen. Bei drei von sechs Herkünften erreichte das Fräsen am Ende des Beobachtungszeitraums die geringste Überlebenswahrscheinlichkeit. Bei der Kontrolle waren die Überlebenswahrscheinlichkeiten bei allen Herkünften in der ersten Vegetationsperiode am geringsten. In der zweiten und dritten Vegetationsperiode nahmen die Überlebenswahrscheinlichkeiten der bearbeiteten Varianten stärker ab.

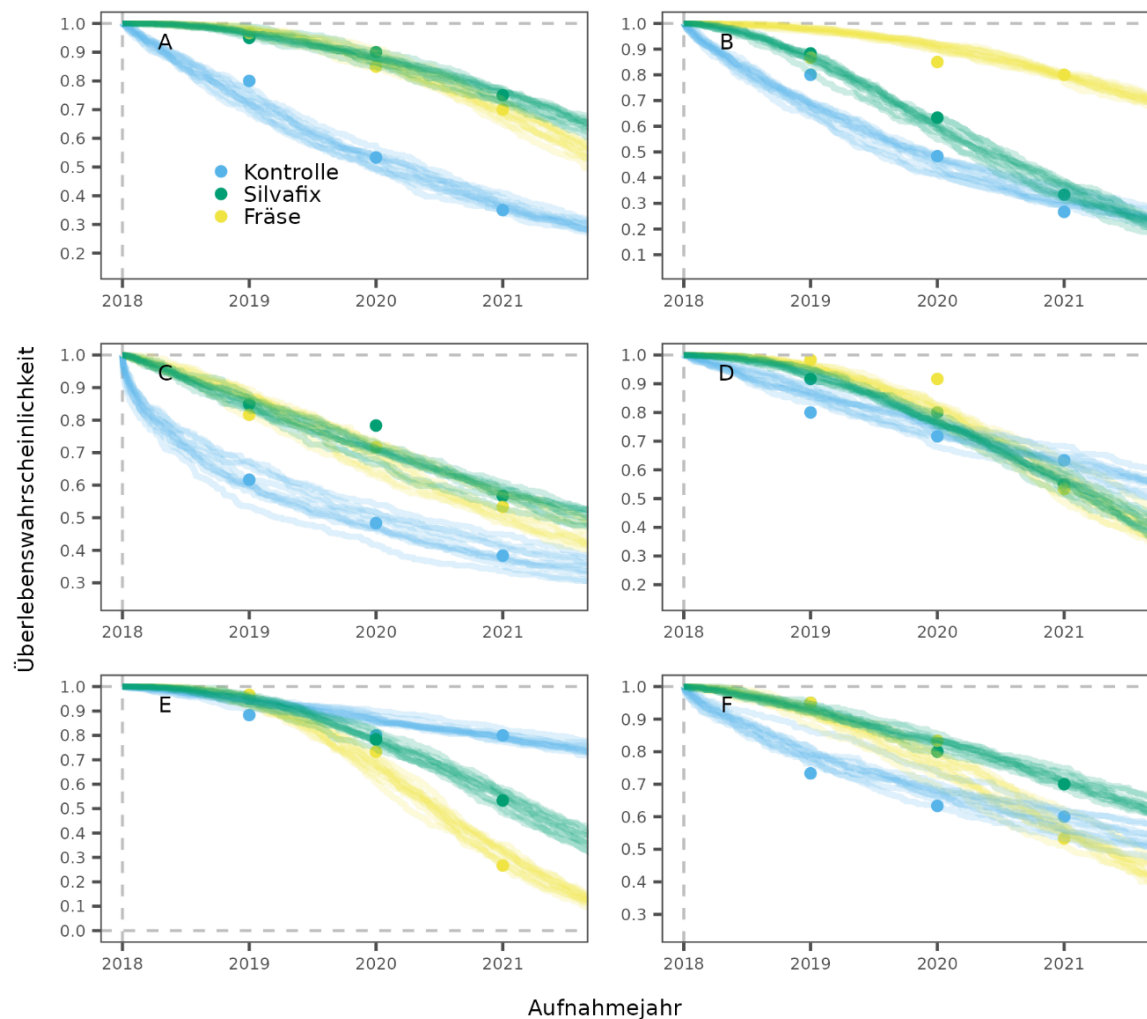


Abbildung 24: Beobachtete Überlebenseanteile (Punkte) und modellierte Überlebenswahrscheinlichkeiten (monoton abfallende Treppenfunktionen) im Hessischen Ried nach Herkünften (A: Fulda, B: Nidda, C: Spessart, D: Karben, E: Dieburg, F: Wolfgang).

In Tabelle 20 sind die geschätzten Erwartungswerte für den Zeitpunkt des Absterbens einer Eiche ab Pflanzung angegeben. Entsprechend der geringen Überlebenswahrscheinlichkeiten wurden niedrige Erwartungswerte für den Eintritt eines Absterbeereignisses von maximal 10,5 Jahren für die Herkunft Dieburg in der Kontrolle berechnet.

*Tabelle 20: Posteriori Erwartungswerte (in Jahren) und 95 % Kreditabilitätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) für den bedingten Erwartungswert – sowie dessen paarweise Differenzen – des Absterbezeitpunkts (in Jahren seit Pflanzung) der untersuchten Eichen im Hessischen Ried.*

Herkunft	Bearbeitungsverfahren	Posteriori
Fulda	Kontrolle	3,06 [2,20; 4,42]
	Silvafix	5,14 [3,82; 7,53]
	Fräse	4,15 [3,36; 5,32]
	Kontrolle – Silvafix	-2,08 [-4,29; -0,32]
	Kontrolle – Fräse	-1,10 [-2,50; 0,41]
	Silvafix – Fräse	0,98 [-0,58; 3,23]
Nidda	Kontrolle	2,78 [2,00; 4,10]
	Silvafix	2,64 [2,21; 3,20]
	Fräse	5,45 [4,03; 7,73]
	Kontrolle – Silvafix	0,14 [-0,80; 1,54]
	Kontrolle – Fräse	-2,67 [-4,89; -0,96]
	Silvafix – Fräse	-2,81 [-5,06; -1,32]
Spessart	Kontrolle	5,80 [2,86; 12,53]
	Silvafix	5,33 [3,48; 8,92]
	Fräse	4,06 [2,96; 5,76]
	Kontrolle – Silvafix	0,47 [-3,63; 6,90]
	Kontrolle – Fräse	1,74 [-1,50; 8,40]
	Silvafix – Fräse	1,27 [-0,96; 4,74]
Karben	Kontrolle	6,24 [3,80; 11,07]
	Silvafix	3,50 [2,85; 4,43]
	Fräse	3,38 [2,88; 4,16]
	Kontrolle – Silvafix	2,74 [0,28; 7,40]
	Kontrolle – Fräse	2,86 [0,43; 7,61]
	Silvafix – Fräse	0,12 [-0,78; 1,06]
Dieburg	Kontrolle	10,51 [5,66; 20,30]
	Silvafix	3,33 [2,80; 4,11]
	Fräse	2,50 [2,23; 2,80]
	Kontrolle – Silvafix	7,18 [2,35; 16,67]
	Kontrolle – Fräse	8,01 [3,17; 17,82]
	Silvafix – Fräse	0,83 [0,22; 1,64]
Wolfgang	Kontrolle	8,81 [4,37; 19,54]
	Silvafix	5,77 [3,91; 9,23]
	Fräse	3,71 [2,94; 5,01]
	Kontrolle – Silvafix	3,04 [-1,80; 13,47]
	Kontrolle – Fräse	5,10 [0,66; 15,70]
	Silvafix – Fräse	2,05 [0,08; 5,37]

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Engerlingsgrabungen spiegelten sich diese Ergebnisse in den Ausfällen wider. Im Mittel wurden die höchsten Engerlingsdichten im Stadium E3 in der Fräsparzelle gefunden (Abbildung 25).

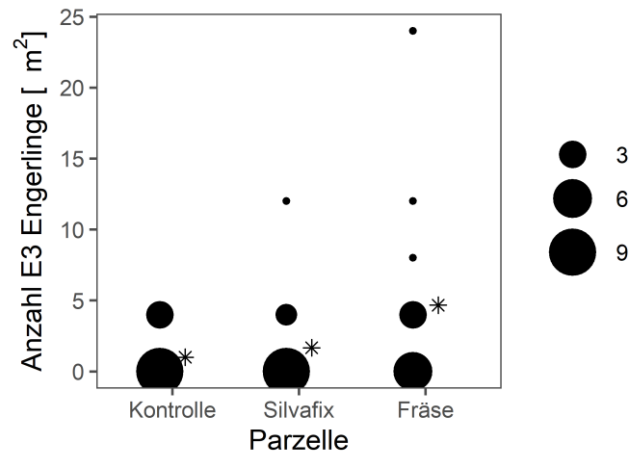


Abbildung 25: Ergebnisse der Engerlingsgrabung im Hessischen Ried. Die Kreise zeigen die Häufigkeit der Dichten und die Sterne geben den Mittelwert je Bearbeitung wider.

In den Bereichen der Herkünfte Nidda und Fulda wurden auf der Fräsfläche keine Engerlinge gefunden, in den Bereichen der anderen Herkünfte dagegen 1–10 Engerlinge  $\cdot$  m<sup>-2</sup>. Bei der Silvafixbearbeitung lag die Dichte bei 1–3 Engerlingen  $\cdot$  m<sup>-2</sup> und bei der Kontrolle bei 1 Engerling  $\cdot$  m<sup>-2</sup>.

### 3.3.1.2 Ostbraunschweigisches Flachland

Im Ostbraunschweigischen Flachland lagen die Überlebenswahrscheinlichkeiten nach drei Vegetationsperioden bei 85 % für die Silvafixbearbeitung und bei 70 % für die Kontrolle und das Mulchverfahren (Abbildung 26).

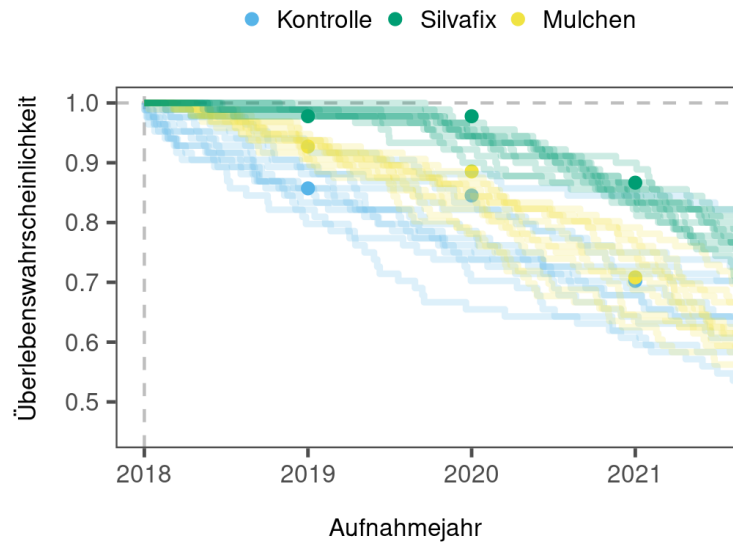


Abbildung 26: Beobachtete Überlebensanteile (Punkte) und modellierte Überlebenswahrscheinlichkeiten (monoton abfallende Treppenfunktionen) der Eichenkulturen im Ostbraunschweigischen Flachland.

Tabelle 21 gibt die geschätzten Erwartungswerte für den Todeszeitpunkt einer gepflanzten Eiche an. Den geringsten Erwartungswert zeigte die Mulchbehandlung.

Tabelle 21: Posteriori Erwartungswerte (in Jahren) und 95 % Kreditäritätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) für den bedingten Erwartungswert – sowie dessen paarweise Differenzen – des Absterbezeitpunkts (in Jahren seit Pflanzung) der untersuchten Eichen im Ostbraunschweigischen Flachland.

Bearbeitungsverfahren	Posteriori
Kontrolle (K)	17,42 [5,38; 62,46]
Silvafix (Si)	7,77 [4,22; 19,92]
Mulchen (Mu)	5,86 [3,39; 10,28]
K – Si	9,66 [-8,79; 54,03]
K – Mu	11,56 [-1,67; 56,87]
Si – Mu	1,90 [-4,29; 14,30]

### 3.3.1.3 Hoher Fläming

Für die Eichensaat im Hohen Fläming errechnete sich unter Berücksichtigung von Keimfähigkeit, Tausendkorngewicht und Auflaufprozent eine Anzahl von 15.500 bzw. 14.100 Eichen·ha<sup>-1</sup> für die Streifenpflug- bzw. Silvafixparzelle. Die Überlebenswahrscheinlichkeit der bearbeiteten Varianten lag nach 3 Vegetationsperioden bei annähernd 90 % (Abbildung 27). Die Überlebenswahrscheinlichkeiten der Probestämme der Streifenpflugparzelle lagen noch über denen der Silvafixparzelle. Im Gegensatz zu den

bearbeiteten Parzellen lag die Überlebenswahrscheinlichkeit der Kontrolle nach drei Vegetationsperioden nahe 0. Interessanterweise zeigten die Probebäume in den Folgejahren nach der ersten Aufnahme nur sehr geringe Ausfallraten.

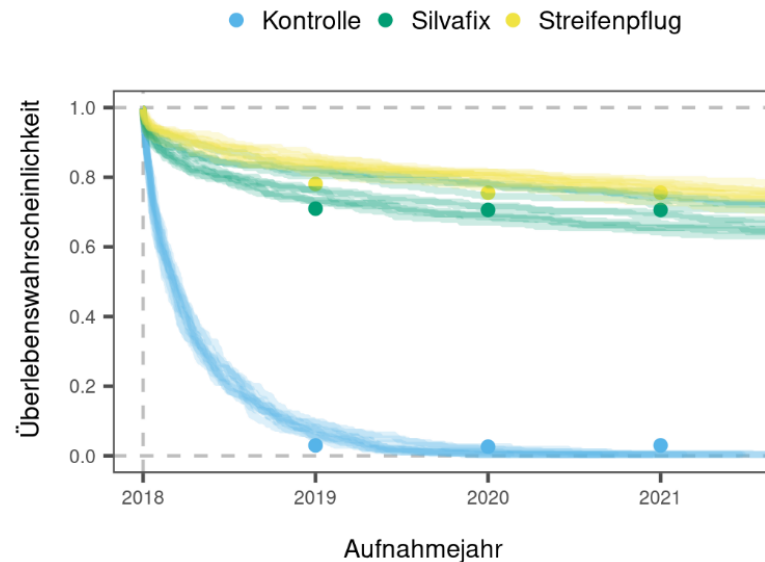


Abbildung 27: Beobachtete Überlebensanteile (Punkte) und modellierte Überlebenswahrscheinlichkeiten (monoton abfallende Treppenfunktionen) der Eichenkulturen im Hohen Fläming.

In Tabelle 22 werden die Erwartungswerte für den Todeszeitpunkt einer Eiche ab dem Aussaatzeitpunkt angegeben. Durch die intervall- oder rechts-zensierten beobachteten Ereignisse kommt es insbesondere in Teilpopulationen mit einem nur geringen relativen Anteil an abgestorbenen Eichen zu einer großen Breite des 95 % Unsicherheitsintervalls.

Tabelle 22: Posteriori Erwartungswerte (in Jahren) und 95 % Kreditätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) für den bedingten Erwartungswert – sowie dessen paarweise Differenzen – des Absterbezeitpunkts (in Jahren seit Pflanzung) der untersuchten Eichen im Hohen Fläming.

Bearbeitungsverfahren	Posteriori
Kontrolle (K)	0,33 [0,26; 0,41]
Silvafix (Si)	408,91 [58; 1919,12]
Streifenpflug (St)	570,11 [47,49; 2553,63]
K – Si	-408,58 [-1918,72; -57,68]
K – St	-569,78 [-2553,28; -47,17]
Si – St	-161,19 [-2212,09; 1551,45]

### 3.3.2 Höhen- und Wurzelhalsdurchmesserwachstum

Die Überprüfung der Vorhersagegüte der Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodelle, basierend auf der durch die Posterioriverteilungen voll spezifizierten bedingten (Weibull-)Verteilung für jede Beobachtungseinheit (auch als Posterior-Predictive-Check

bezeichnet), zeigte eine gute Anpassung der Modelle an die Daten (Abbildung 28).

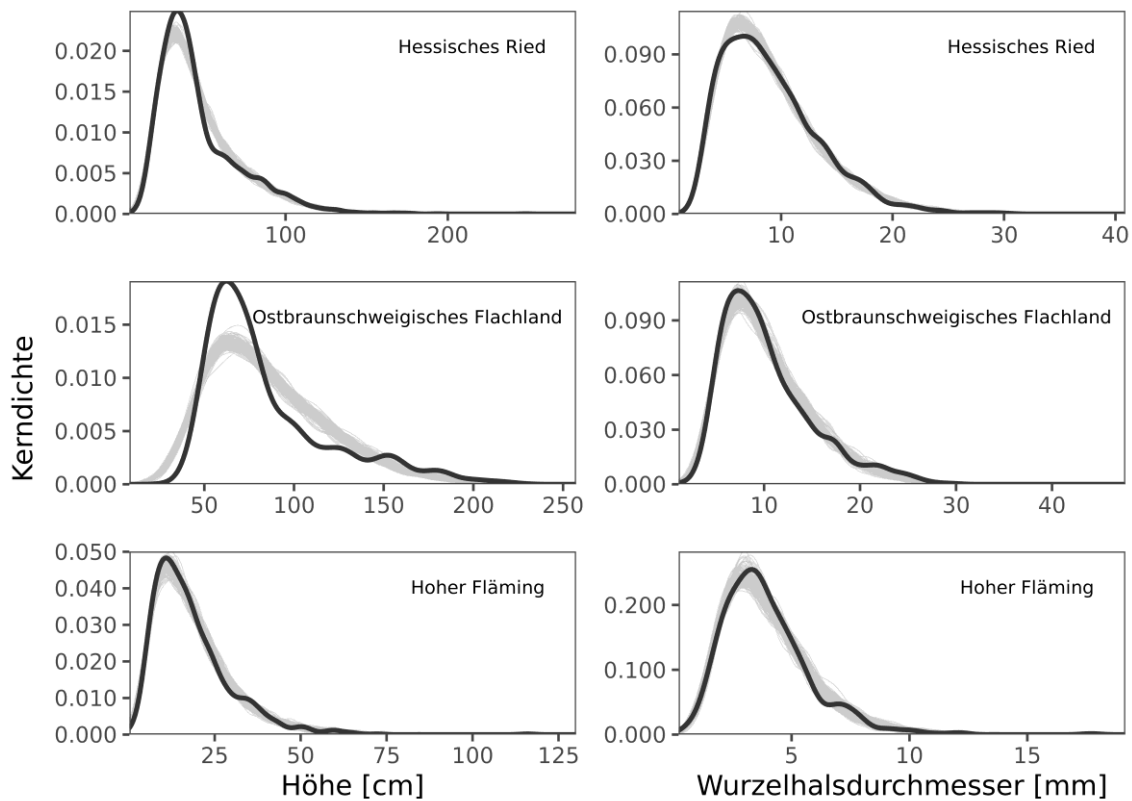


Abbildung 28: Visualisierung des Posterior-Predictive-Check für jedes der Höhe- und Wurzelhalsdurchmessermodelle. Jeweils dargestellt ist eine Kerndichteschätzung der Messdaten  $y_i$  (schwarz), sowie für 100 zufällige ausgewählte Samples  $s$  aus der Posteriori jeweils eine Kerndichteschätzung (grau) für simulierte Prädiktionen  $\hat{y}_i^{(s)}$ ,  $i = 1, \dots, n$  (zufällige Ziehungen aus den voll spezifizierten Weibull-Verteilungen) basierend auf den Kovariablenwerten  $x_i$ .

### 3.3.2.1 Hessisches Ried

Mit zunehmendem Alter nahm der Höhenzuwachs im Hessischen Ried zu (Abbildung 29). Spalte 2 zeigt die Differenzen der Silvafixbearbeitung abzüglich der Kontrolle. Lagten die Werte im positiven Bereich, so waren die Probestämme der Silvafixbearbeitung höher als die der Kontrolle. Anhand der Steigung konnte die zeitliche Entwicklung abgelesen werden. Bei positiven Steigungen entwickelte sich die Silvafixvariante besser als die Kontrolle. Die Teilabbildungen B2 und E2 zeigen eine deutlich bessere Entwicklungen der Kontrolle gegenüber der Silvafixvariante und Teilabbildung C2 eine deutlich bessere Entwicklung der Silvafixvariante gegenüber der Kontrolle. Die verbleibenden Teilabbildungen zeigen ein indifferentes Bild. In der Spalte 3 wird die Fräsbearbeitung mit der Kontrolle verglichen. Lediglich Teilabbildung E3 zeigt ein deutlich besseres Wachstum der Kontrolle gegenüber dem Fräsen. Die weiteren Teilabbildungen in Spalte 3 zeigen ein besseres Wachstum der Fräsbearbeitung, aufgrund der positiven Steigung, die errech-



neten Wahrscheinlichkeiten liegen außer für den Plot F3 bei über 75 %. Spalte 4 vergleicht die Fräsbearbeitung mit dem Silvafix. Alle Teilabbildungen außer E4 zeigen eine Überlegenheit der Fräsbearbeitung gegenüber dem Silvafix im Höhenwachstum, zwei davon mit einer Wahrscheinlichkeit von über 97,5 %. Teilabbildung E4 zeigt eine bessere Entwicklung des Silvafix im Vergleich zur Fräsbearbeitung.

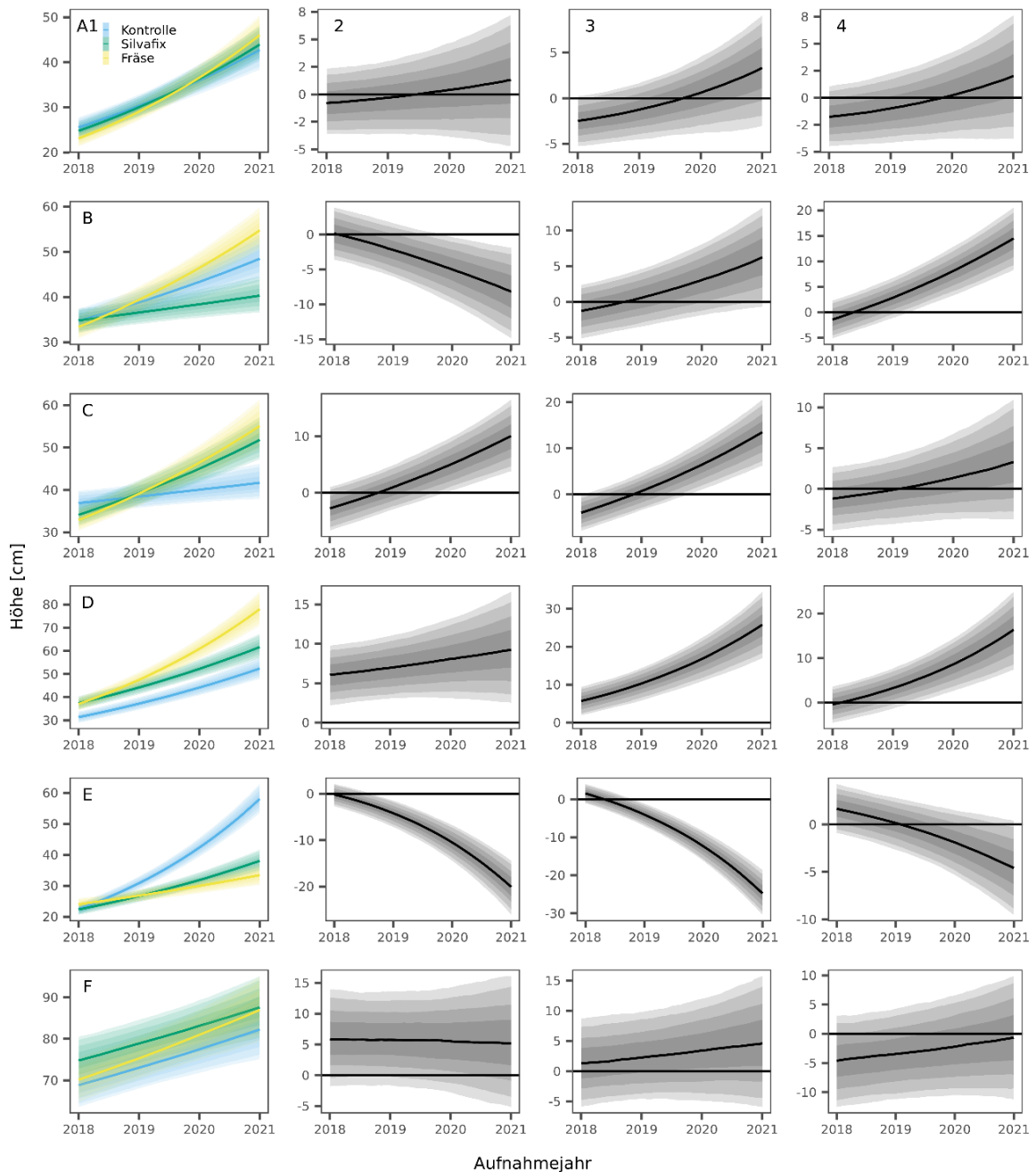


Abbildung 29: Höhenentwicklung, als bedingte Erwartungswerte, der Herkunft im Hessischen Ried über die Aufnahmejahre in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungsverfahren. In den Zeilen sind die Herkunft gegeben (A: Fulda, B: Nidda, C: Spessart, D: Karben, E: Dieburg, F: Wolfgang), in der ersten Spalte der Median, das 50 %, 75 %, 90 % und 95 %-Quantil von  $E(Y_i|V_i)$ , analog dazu in der zweiten Spalte  $E(Y_i|V_i = \text{Silvafix}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ ; dritte Spalte  $E(Y_i|V_i = \text{Fräse}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ , vierte Spalte  $E(Y_i|V_i = \text{Fräse}) - E(Y_i|V_i = \text{Silvafix})$ .

---

Bei allen Herkünften und Bearbeitungen nahm der Zuwachs des Wurzelhalsdurchmessers mit zunehmendem Alter zu (Abbildung 30). (Die Ergebnisse der Parameterschätzungen sind in Tabelle 23 gegeben). In Spalte 2 ist zu erkennen, dass die Kontrolle in Teilabbildung B2 eine deutlich bessere Entwicklung des Wurzelhalsdurchmessers aufwies als die Bearbeitung mit dem Silvafix. In zwei Fällen war die Entwicklung gleich und in drei Fällen war die Silvafixvariante der Kontrolle überlegen. Beim Vergleich der Fräsvariante mit der Kontrolle zeigte lediglich Teilabbildung B3 keine positive Steigung, ansonsten war die Entwicklung der Fräsvariante immer der Kontrolle überlegen, in drei Fällen mit Wahrscheinlichkeiten von über 97,5 %. Beim Vergleich der Bodenbearbeitungen Fräsen und Silvafix miteinander, zeigte sich immer eine positive Steigung. Dies bedeutet eine Überlegenheit der Entwicklung des Wurzelhalsdurchmessers bei der Fräsvariante gegenüber dem Silvafix. In zwei Fällen ergaben sich Wahrscheinlichkeiten von über 97,5 %.

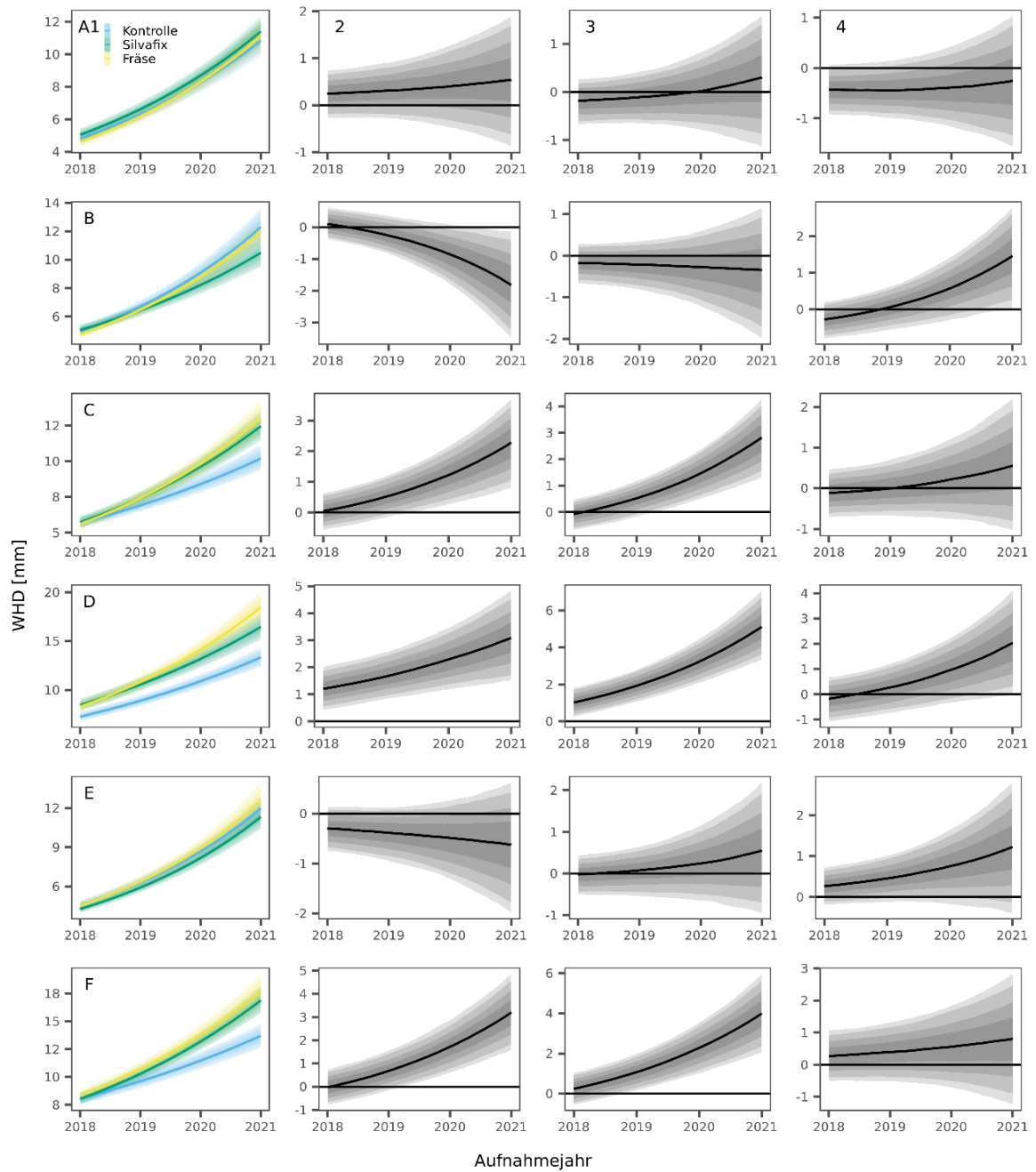


Abbildung 30: Wurzelhalsdurchmesserentwicklung als bedingte Erwartungswerte der Herkünfte im Hessischen Ried über Aufnahmejahre in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungsverfahren. In den Zeilen werden die Herkünfte wiedergegeben (A: Fulda, B: Nidda, C: Spessart, D: Karben, E: Dieburg, F: Wolfgang), in der ersten Spalte der Median, das 50%-, 75%-, 90%-, 95%-Quantil von  $E(Y_i|V_i)$ , analog dazu in der zweiten Spalte  $E(Y_i|V_i = \text{Silvafix}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ ; dritte Spalte  $E(Y_i|V_i = \text{Fräse}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ , vierte Spalte  $E(Y_i|V_i = \text{Fräse}) - E(Y_i|V_i = \text{Silvafix})$ .

Tabelle 23: Erwartungswerte und 95 % Kreditabilitätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) der Parameter-spezifischen Posteriori-Verteilungen für die Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung des Hessischen Rieds.

Parameter	Posteriori (Höhen-Modell)	Posteriori (WHD-Modell)
$\beta_{\mu,0}$	25,56 [23,60; 27,78]	4,81 [4,49; 5,17]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix}}$	0,97 [0,87; 1,10]	1,05 [0,95; 1,16]
$\beta_{\mu,V_{Fräse}}$	0,90 [0,81; 1,01]	0,96 [0,87; 1,06]
$\beta_{\mu,H_{Nidda}}$	1,35 [1,21; 1,51]	1,03 [0,92; 1,14]
$\beta_{\mu,H_{Spessart}}$	1,44 [1,29; 1,61]	1,18 [1,07; 1,31]
$\beta_{\mu,H_{Karben}}$	1,23 [1,09; 1,37]	1,51 [1,37; 1,67]
$\beta_{\mu,H_{Dieburg}}$	0,88 [0,79; 0,98]	0,95 [0,86; 1,05]
$\beta_{\mu,H_{Wolfgang}}$	2,69 [2,40; 3,00]	1,68 [1,52; 1,85]
$\beta_{\mu,Z}$	1,19 [1,15; 1,23]	1,31 [1,27; 1,36]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Nidda}}$	1,04 [0,88; 1,21]	0,97 [0,84; 1,13]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Nidda}}$	1,07 [0,91; 1,25]	1,00 [0,88; 1,16]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Spessart}}$	0,96 [0,81; 1,11]	0,96 [0,83; 1,11]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Spessart}}$	0,99 [0,84; 1,15]	1,03 [0,89; 1,19]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Karben}}$	1,23 [1,05; 1,45]	1,11 [0,97; 1,28]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Karben}}$	1,31 [1,13; 1,54]	1,18 [1,04; 1,37]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Dieburg}}$	1,02 [0,87; 1,20]	0,89 [0,77; 1,04]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Dieburg}}$	1,18 [1,01; 1,38]	1,03 [0,89; 1,19]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Wolfgang}}$	1,12 [0,96; 1,31]	0,95 [0,83; 1,09]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Wolfgang}}$	1,13 [0,97; 1,31]	1,07 [0,94; 1,23]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},Z}$	1,02 [0,98; 1,06]	1,00 [0,96; 1,04]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},Z}$	1,06 [1,01; 1,11]	1,02 [0,98; 1,07]
$\beta_{\mu,H_{Nidda},Z}$	0,94 [0,90; 0,99]	1,03 [0,98; 1,09]
$\beta_{\mu,H_{Spessart},Z}$	0,88 [0,84; 0,92]	0,93 [0,89; 0,97]
$\beta_{\mu,H_{Karben},Z}$	1,00 [0,96; 1,04]	0,93 [0,89; 0,98]
$\beta_{\mu,H_{Dieburg},Z}$	1,16 [1,11; 1,20]	1,05 [1,01; 1,09]
$\beta_{\mu,H_{Wolfgang},Z}$	0,89 [0,86; 0,93]	0,91 [0,87; 0,95]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Nidda},Z}$	0,92 [0,87; 0,98]	0,94 [0,88; 1,01]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Nidda},Z}$	0,99 [0,93; 1,06]	0,98 [0,92; 1,04]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Spessart},Z}$	1,08 [1,02; 1,15]	1,07 [1,01; 1,13]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Spessart},Z}$	1,07 [1,01; 1,14]	1,07 [1,00; 1,14]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Karben},Z}$	0,98 [0,92; 1,03]	1,02 [0,96; 1,08]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Karben},Z}$	1,02 [0,96; 1,08]	1,04 [0,98; 1,11]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Dieburg},Z}$	0,85 [0,81; 0,90]	1,00 [0,95; 1,06]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Dieburg},Z}$	0,77 [0,72; 0,82]	1,00 [0,93; 1,06]
$\beta_{\mu,V_{Silvafix},H_{Wolfgang},Z}$	0,97 [0,92; 1,03]	1,07 [1,02; 1,13]
$\beta_{\mu,V_{Fräse},H_{Wolfgang},Z}$	0,96 [0,90; 1,01]	1,05 [0,99; 1,12]
$\gamma_{\mu,m}$	1,29 [1,28; 1,31]	1,25 [1,23; 1,26]
<i>shape</i>	282,74 [230,78; 345,32]	604,90 [489,10; 759,03]

### 3.3.2.2 Ostbraunschweigisches Flachland

Im Ostbraunschweigischen Flachland zeigte die Kontrolle gegenüber den Bodenbearbeitungsvarianten ein evident besseres Höhenwachstum (Teilabbildungen B und C) (Abbildung 31). Teilabbildung D zeigt ein deutlich besseres Höhenwachstum der Eichen nach der Silvafixbearbeitung gegenüber dem Mulchen. Die Ergebnisse der Parameterschätzungen sind in Tabelle 24 gegeben.

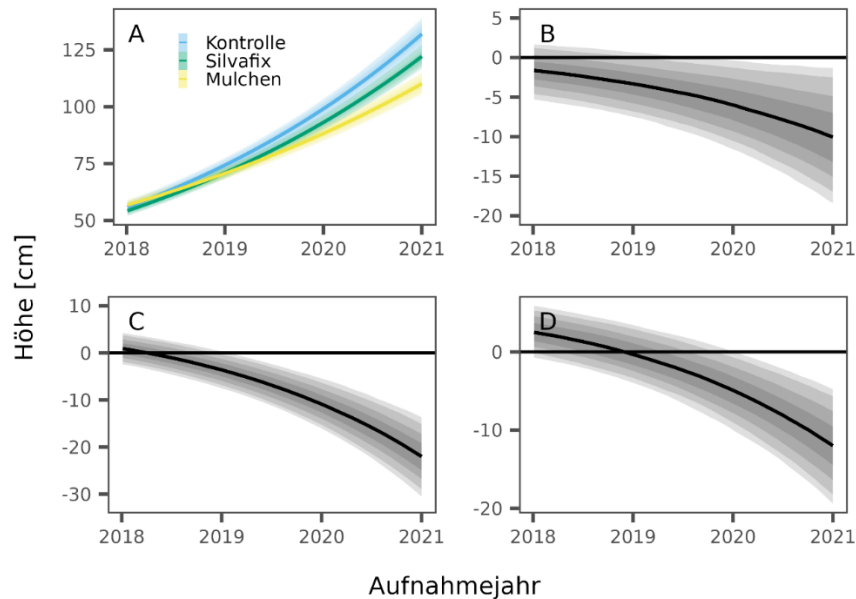


Abbildung 31: Ergebnisse der Höhenmodellierung im Ostbraunschweigischen Flachland (A zeigt  $E(Y_i|V_i)$ , B zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Silvafix}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ , C zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Mulchen}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ , D zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Mulchen}) - E(Y_i|V_i = \text{Silvafix})$ ).

Bei den Ergebnissen der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung (Abbildung 32) zeigte sich ein anderes Bild als bei der Höhenentwicklung. Hier wiesen die Pflanzen mit der Silvafixbearbeitung gegenüber der Kontrolle (Teilabbildung B) und der Mulchvariante (Teilabbildung D) die größten Zuwächse auf. Gegenüber der Kontrolle waren die Pflanzen der Mulchvariante im Wurzelhalsdurchmesserzuwachs unterlegen (Teilabbildung C).

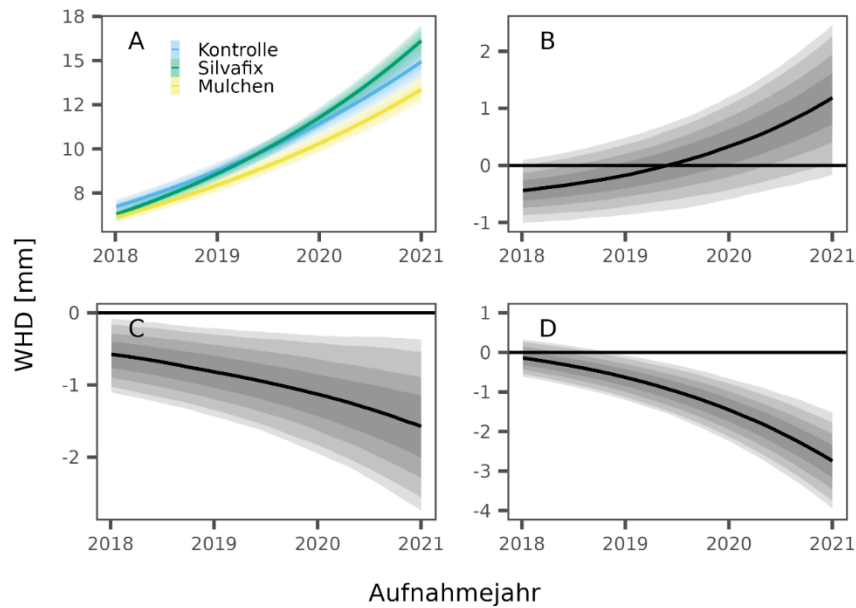


Abbildung 32: Ergebnisse der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung im Ostbraunschweigischen Flachland (A zeigt  $E(Y_i|V_i)$ , B zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Silvafix}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ , C zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Mulchen}) - E(Y_i|V_i = \text{Kontrolle})$ , D zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Mulchen}) - E(Y_i|V_i = \text{Silvafix})$ ).

Tabelle 24: Erwartungswerte und 95 % Kredibilitätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) der Parameter-spezifischen Posteriori-Verteilungen für die Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung des Ostbraunschweigischen Flachlands.

Parameter	Posteriori (Höhen-Modell)	Posteriori (WHD-Modell)
$\beta_{\mu,0}$	55,78 [53,44; 58,46]	6,72 [6,34; 7,11]
$\beta_{\mu,V_{\text{Silvafix}}}$	0,97 [0,91; 1,03]	0,93 [0,86; 1,01]
$\beta_{\mu,V_{\text{Mulchen}}}$	1,02 [0,96; 1,08]	0,91 [0,84; 0,99]
$\beta_{\mu,Z}$	1,33 [1,31; 1,36]	1,31 [1,28; 1,33]
$\beta_{\mu,V_{\text{Silvafix},Z}}$	0,98 [0,96; 1,01]	1,05 [1,02; 1,07]
$\beta_{\mu,V_{\text{Mulchen},Z}}$	0,94 [0,92; 0,96]	0,99 [0,97; 1,02]
$\gamma_{\mu,m}$	1,17 [1,15; 1,19]	1,25 [1,23; 1,28]
$shape$	556,78 [384,26; 804,47]	664,19 [457,09; 986,27]

### 3.3.2.3 Hoher Fläming

Teilabbildung A zeigt das Höhenwachstumsmodell im Hohen Fläming (Abbildung 33), Teilabbildung B zeigt ein deutlich besseres Höhenwachstum der Silvafixbehandlung im Vergleich zur Streifenpflugbehandlung.

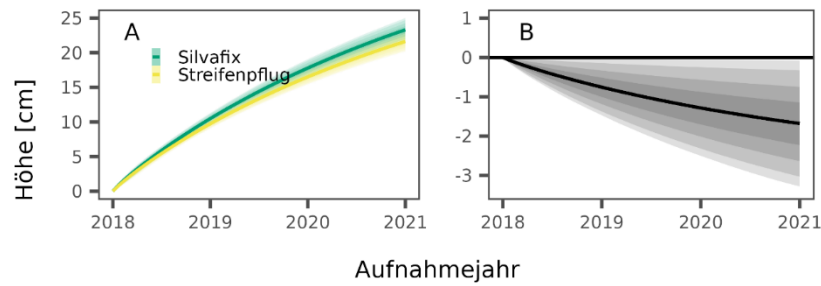


Abbildung 33: Ergebnis der Höhenwachstumsmodellierung im Hohen Fläming (A zeigt  $E(Y_i|V_i)$ , B zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Streifenflug}) - E(Y_i|V_i = \text{Silvafix})$ ).

Die Modellierung des Wurzelhalsdurchmessers (Abbildung 34) zeigt eine deutlich bessere Entwicklung nach der Bearbeitung mit dem Silvafix als mit dem Streifenflug. Die Werte der Parameterschätzungen sind in Tabelle 25 dargestellt.

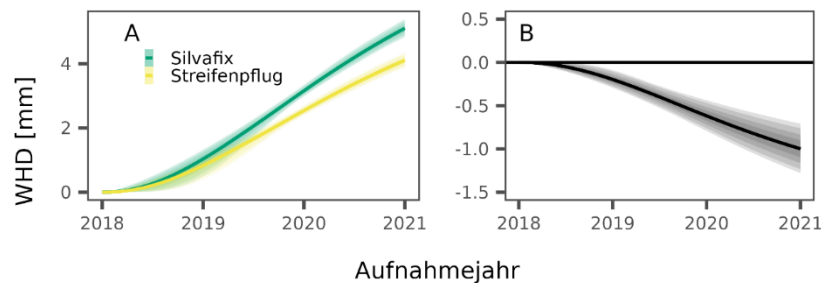


Abbildung 34: Ergebnis der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung im Hohen Fläming (A zeigt  $E(Y_i|V_i)$ , B zeigt  $E(Y_i|V_i = \text{Streifenflug}) - E(Y_i|V_i = \text{Silvafix})$ ).

Tabelle 25: Erwartungswerte und 95 % Credibilitätsintervalle (Werte in eckigen Klammern) der Parameter-spezifischen Posteriori-Verteilungen für die Höhen- und Wurzelhalsdurchmessermodellierung des Hohen Flämings (Werte in Klammern geben die Grenzen des 95 % Credibilitätsintervalls).

Parameter	Posteriori (Höhen-Modell)	Posteriori (WHD-Modell)
$\beta_{0,a}$	3,80 [3,45; 4,29]	2,26 [1,82; 2,99]
$\beta_{cISF,a}$	0,00 [0,00; 0,01]	0,01 [0,00; 0,01]
$\beta_{V\text{streifenflug},a}$	-0,07 [-0,15; 0,00]	-0,22 [-0,28; -0,16]
$\beta_{0,b}$	-1,49 [-2,39; -0,77]	-0,71 [-1,77; 0,16]
$\beta_{0,c}$	-0,09 [-0,25; 0,13]	0,93 [0,38; 1,92]
$\delta_{B,a}$	0,37 [0,31; 0,42]	0,27 [0,16; 0,32]
$\delta_{B,b}$	0,11 [0,01; 0,30]	0,07 [0,00; 0,20]
$\delta_{B,c}$	0,06 [0,00; 0,14]	0,05 [0,00; 0,14]
$shape$	3,65 [3,44; 3,87]	4,68 [4,30; 5,08]

## 4 Diskussion

### 4.1 Nährstoffhaushalt

Die Kulturlächenvorbereitung zur Verjüngung der Bestände ist eine Kombination aus Holzernte, Flächenräumung und Bodenbearbeitung und führt zu einer Störung der Ökosystemfunktionen, wie z. B. der Nährstoffflüsse. Störungen gehören zu Waldökosystemen dazu. Sie werden durch Sturmschäden (MELLERT et al. 1998; ROTHE und MELLERT 2004), Borkenkäferkalamitäten (HUBER 2005; HUBER et al. 2004; MIKKELSON et al. 2013), aber auch durch die reguläre Holzernte (BORMANN et al. 1968; KLINCK et al. 2013; KOHLPAINTNER et al. 2009; WEIS et al. 2006; WEIS et al. 2001) sowie die Kulturlächenvorbereitung (LUNDMARK-THELIN und JOHANSSON 1997; MCLAUGHLIN et al. 2000; STAAF und OLSSON 1994) hervorgerufen und können unterschiedlich starke Reaktionen des Ökosystems nach sich ziehen. Das können beispielsweise erhöhte Nährstoffflüsse sein (VITOUSEK et al. 1979).

Ob eine Bodenbearbeitung zu einer Erhöhung der Nährstofffrachten führt, hängt von ihrer Wirkung auf die Vegetation und von der Mächtigkeit der Humusaufgabe ab. Stellt sich nach Ökosystemstörungen eine üppige Krautvegetation ein, treten Nährstoffverluste in der Regel nur über einen kurzen Zeitraum auf (HEDWALL et al. 2013; KLINCK et al. 2013; MELLERT et al. 1998; ROTHE und MELLERT 2004; WEIS et al. 2001), da die Krautvegetation die freiwerdenden Nährstoffe aufnimmt. Eine Bodenbearbeitung, die die Begleitvegetation stark reguliert, kann somit auf ansonsten bewachsenen Standorten zu erhöhten Nährstofffrachten beitragen. Störungen stimulieren zudem die Mineralisierung der nährstoffreichen Humusaufgabe von Waldböden und begünstigen Nährstofffrachten. Mit zunehmender Mächtigkeit und Abbaubarkeit der Humusaufgabe steigt das Potenzial als Quelle für Nährstofffrachten (KOHLPAINTNER et al. 2009; MATEJEK et al. 2008).

Als weitere Quelle für erhöhte Nährstofffrachten können Wiederbefeuchtungsphasen nach Trockenperioden genannt werden. Es ist bekannt, dass die bodenchemischen Prozesse nach Trockenperioden verändert und nach Wiederbefeuchtung erhöhte Nährstoffkonzentrationen im Sickerwasser zu beobachten sind (LAMERSDORF et al. 1998). Während der Versuchsdurchführung war es überdurchschnittlich trocken, so dass die Nähr-



stofffrachten bei Wiederholung der Versuche in „Normaljahren“ wahrscheinlich eine andere Dynamik und Größenordnung aufweisen würden. Da in der vorliegenden Untersuchung alle Varianten den gleichen Umwelteinflüssen ausgesetzt waren, ist ein Vergleich zwischen den Varianten dennoch möglich.

#### 4.1.1 Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Nährstofffrachten

Unabhängig davon, ob und welche Bodenbearbeitung durchgeführt wurde, stimmen die Beobachtungen der Nährstofffrachten im Jahresverlauf mit denen anderer Autoren überein. So werden in den Wintermonaten aufgrund der Vegetationsruhe generell die höchsten Nährstoffauswaschungsraten beobachtet (BORMANN et al. 1968; STREBEL et al. 1989).

Im zweijährigen Beobachtungszeitraum konnte in allen Versuchsregionen und -varianten eine Abnahme der Nährstofffrachten im zweiten Jahr im Vergleich zum ersten Jahr nach der Bodenbearbeitung beobachtet werden. Andere Forscher stellten fest, dass drei Jahre nach einem Kahlschlag mit oder ohne Schlagräumung die N-Konzentrationen in der Bodenlösung nicht mehr erhöht waren und keine weiteren Nährstoffverluste durch den Eingriff zu erwarten waren (HEDWALL et al. 2013). Ähnliche Beobachtungen wurden in einem Hiebsformenversuch im Solling gemacht, wo 4 Jahre nach Kahlhieb eines Fichtenbestandes keine erhöhten Nitratkonzentrationen im Vergleich zu einem Kontrollbestand ohne Eingriff gemessen werden konnten (KLINCK et al. 2013). Schwedische Studien zeigten nach 5 Jahren einen Rückgang der Nährstoffflüsse auf das Niveau vor der Störung durch Kahlhieb oder Sturmschäden (HELLSTEN et al. 2015; RING et al. 2013; STAAF und OLSSON 1994). Daher erscheint der Beobachtungszeitraum von 2 Jahren in dieser Studie zu kurz, um die Frage zu beantworten, wann die Nährstofffrachten der bodenbearbeiteten Flächen nicht mehr erhöht sind. In der vorliegenden Untersuchung ging es um den Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Nährstofffrachten und den Anwuchserfolg von Eichenkulturen, so dass die Kontrolle eine geräumte und mit Eichen bepflanzte Fläche ohne Bodenbearbeitung darstellt. Folglich sind auch auf der Kontrolle Ökosystemstörungen (Holzernte, Eichenpflanzung) aufgetreten.

Es war nicht das Ziel, festzustellen, wann die Frachten auf das Niveau eines ungestörten Waldbestandes absinken. Wahrscheinlich bestimmt die Zeit bis zur vollflächigen Wie-

derbesiedlung mit krautiger Vegetation nach der Bodenbearbeitung die Dauer der erhöhten Nährstofffrachten. Die Entwicklung der Begleitvegetation auf den Versuchsflächen in den Versuchsregionen war sowohl vor, als auch nach den Bodenbearbeitungen unterschiedlich. Im Hohen Fläming und im Hessischen Ried entwickelte sich auf den Kontrollparzellen eine homogene und reiche Vegetationsdecke, auf den mit dem Silvafix behandelten Parzellen und auf den Parzellen mit dem Bestverfahren entwickelte sich die Begleitvegetation nur spärlich. Im Ostbraunschweigischen Flachland entwickelte sich auf allen Parzellen eine homogene und reiche Vegetationsdecke.

Es konnte nicht generell bestätigt werden, dass die Bodenbearbeitung der regional etablierten Standardverfahren zu höheren Nährstofffrachten führt als keine Bodenbearbeitung. Mulchen und Fräsen veränderten die Nährstofffrachten im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle nur geringfügig, so dass die pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte nahezu unverändert blieben und kaum Nitratverluste auftraten. Durch das Mulchen wurde der Mineralboden oberflächlich mit organischer Substanz angereichert, durch das Fräsen wurde der Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm mit organischer Substanz angereichert. Durch die Einarbeitung wurde die Mineralisation angeregt und der austauschbare Nährstoffvorrat im Mineralboden erhöht, was sich in einer Erhöhung der Basensättigung nach Mulchen und Fräsen zeigte.

Gestiegene Mineralisationsraten würden aber auch gestiegene Nitratfrachten erwarten lassen.

Ein Großteil des durch Mulchen und Fräsen eingearbeiteten organischen Materials ist jedoch holzigen Ursprungs (Schlagabraum, Baumstümpfe) mit einem weiten C:N-Verhältnis (BLACK und HARDEN 1995), das N fixiert (LAIHO und PRESCOTT 2004). Es wird vermutet, dass Mulchen und Fräsen hierdurch eine N-Immobilisierung begünstigen und damit die Nitratfrachten reduzieren. SCHMIDT et al. (1996) bestätigen, dass eine durchmischende Bodenbearbeitung das C:N-Verhältnis erweitert. Böden mit weiten C:N-Verhältnissen weisen geringere N-Frachten auf, als Böden mit engen C:N-Verhältnissen (BORKEN und MATZNER 2004; GUNDERSEN et al. 1998; LOVETT et al. 2002). Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Mikroorganismen für den Abbau organischer Substanz enge C:N-

Verhältnisse benötigen. Sind diese in der organischen Substanz nicht vorhanden, nehmen die Mikroorganismen mineralisches N aus dem Boden auf: Stickstoff wird immobilisiert.

Entgegen den Erwartungen wiesen sowohl das Mulchen als auch das Fräsen erhöhte Sulfatfrachten auf. Beim Fräsen lagen die Sulfatfrachten bei über 6 % des Vorrates (Abbildung 21) und waren relativ am höchsten. Ein Anstieg der Sulfatfrachten durch Mulchen und Fräsen kann zum einen auf eine gestiegene Mineralisationsrate zum anderen auf eine Anhebung des pH-Wertes zurückgeführt werden. Bei der Mineralisation wird der im Boden gebundene Schwefel zu leicht wasserlöslichem Sulfat oxidiert, das mit dem Sickerwasser ausgewaschen wird. Gestiegene Mineralisationsraten können auch durch Oxidation organischer Verbindungen zu einer pH-Wert-Anhebung beitragen (GRYSCHKO und HORLACHER 1997). Zudem wurden dem Boden durch die Einarbeitung von Humus Basen zugeführt, die ebenfalls zu einer pH-Wert-Anhebung führten. Eine Anhebung des pH-Wertes im Austauscher-Pufferbereich führt zur Freisetzung von gepufferten Säuren, wodurch der pH-Wert-Anstieg wiederum abgepuffert wird (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG 2016; SCHEFFER et al. 2008). Langzeitbeobachtungen (Level-II-Flächen) zeigen nach wie vor erhöhte Sulfatvorräte in den Böden als Folge der sauren Einträge (JOHNSON et al. 2018). Sulfat gelangt dabei über die abnehmende Sorptionskraft von Böden bei steigendem pH-Wert in die Bodenlösung (SCHEFFER et al. 2008) und führt zu erhöhten Sulfatfrachten im Sickerwasser.

Ein Anstieg der Sulfatfrachten ist auch bei einem Anstieg des pH-Wertes in intakten Wäldern zu beobachten (PAAR et al. 2016). Somit sind die gestiegenen Sulfatfrachten eher als „Altlast“ der sauren Einträge anzusehen und nicht als Folge der Bodenbearbeitung. Ein Hiebsformenversuch im Solling kam zu dem gleichen Ergebnis, dass Sulfat den größten Anteil an den ausgewaschenen Anionen einnahm und somit den größten Treiber für Nährstoffauswaschungen darstellte (KLINCK et al. 2013). Im Gegensatz zu den Nitratfrachten waren die Sulfatfrachten nicht von der Vegetation abhängig (Abbildung 18). Ein bayerischer Hiebsformenversuch zeigte unterschiedliche Reaktionen der Nitrat- und Sulfatkonzentrationen im Sickerwasser nach den Hiebsmaßnahmen (WEIS et al. 2006) und bestätigt unsere Beobachtung. In der zukünftigen Diskussion um die Reduzierung von

Nährstofffrachten ist daher auch Sulfat zu beachten. Dabei ist insbesondere das unterschiedliche Verhalten im Vergleich zu Nitrat zu berücksichtigen. Während die Nährstoffverluste durch Nitratauswaschung durch eine angepasste Vegetation reduziert werden können, ist diese Maßnahme bei Sulfat nicht wirksam.

Die Bodenbearbeitung mit dem Streifenpflug im Hohen Fläming führte zu kleinräumigen Verlagerungen von organischem Material, damit auch zu kleinräumigen Nährstoffverlagerungen und kleinräumigen Unterschieden in den Nährstofffrachten. Die jährlichen Nährstofffrachten in den Mikrokosmen-Lysimetern der Pflugsohle waren gering. In Bereichen mit Mineralbodenfreilegung werden Nährstoffe entzogen, was die Nährstofffrachten reduziert (STEVENS und HORNING 1990). In den Pflugbalken (Bereiche mit Humusakkumulation) wurden im Vergleich zu den Kontrollflächen und der Pflugsohle hohe Nährstofffrachten gemessen. Die  $N_{\min}$ -Analyse ergab jedoch für die Pflugbalken ein geringeres Nitratauswaschungspotential als die Nitratfrachten der Lysimeter zeigten. Es ist davon auszugehen, dass die verbliebene Vegetation durch die nur teilflächige (streifenweise) Bodenbearbeitung das erhöhte Nährstoffpotenzial der Pflugbalken nutzen konnte, so dass in der  $N_{\min}$ -Analyse geringere Nitratmengen gemessen wurden als in den vegetationsfreien Mikrokosmen-Lysimetern. Hierdurch kommt es zu einer Überschätzung der Nitratfrachten durch die Mikrokosmen-Lysimeter einerseits. Ein Mikrokosmen-Lysimeter ohne Begleitvegetation überschätzte die Frachten auf Parzellen mit Begleitvegetation, während ein Mikrokosmen-Lysimeter mit Begleitvegetation die Frachten auf Parzellen mit weniger Begleitvegetation unterschätzte. Andererseits wird hierdurch erst das Frachtpotential durch Humusakkumulation und das Frachtminderungspotential von Vegetation ersichtlich.

Im Nachhinein hat sich die Entscheidung, Pflugsohle und Pflugbalken getrennt voneinander zu untersuchen, als vorteilhaft erwiesen. Hieraus wird ersichtlich, wie sich Humusentzug und -anreicherung auf die Nährstofffrachten auswirken und hilft im weiteren Verlauf der Arbeit, die Ergebnisse der Silvafixbearbeitung zu verstehen. Auf einer gepflügten Fläche in Finnland wurden niedrige Nährstoffflüsse in Bereichen mit Mineralbodenfreilegung, mittlere Nährstoffflüsse in Bereichen ohne Bodenbearbeitung und hohe Nährstoffflüsse in Bereichen mit Humusablagerung (Pflugbalken) beobachtet

(PIIRAINEN et al. 2007). Im Gegensatz zu der Kontrollfläche in der finnischen Studie (Flächen ohne Bodenbearbeitung) wurden auf der Kontrollfläche im Hohen Flämig in dieser Untersuchung im Vergleich mit den Bereichen mit Mineralbodenfreilegung geringere Nährstofffrachten beobachtet. Die Unterschiede sind vermutlich durch die Begleitvegetation zu erklären: Im Hohen Flämig war diese stärker ausgeprägt als in der finnischen Studie. Folglich führte das Streifenpflügen zu kleinräumigen Nährstoffverlagerungen, die mit einem gesteigerten Risiko von Nährstofffrachten einhergehen. Das Vorhandensein von Bodenvegetation schien dieses Risiko jedoch zu verringern.

Die Bodenbearbeitung mit dem Silvafix führte zu einer großräumigen Verlagerung von organischem Material und damit auch zu einer Verlagerung von Nährstoffen von der bearbeiteten Fläche auf die Rückegasse. Die jährlichen Nährstofffrachten in den Mikrokosmen-Lysimetern waren auf den mit dem Silvafix behandelten Flächen gering. Sie lagen für alle Nährstoffe auf dem gleichen Niveau wie in den Kontrollen, mit Ausnahme von Nitrat, das geringere Frachten aufwies als in den Kontrollen. Im Vergleich zu den regionalen Bodenbearbeitungsverfahren waren die Frachten auf den vom Silvafix bearbeiteten Flächen für alle Nährelemente geringer. In Bereichen mit Mineralbodenfreilegung wurden bei der Silvafixbearbeitung Nährstoffe auf die Rückegasse verlagert. Durch die Nährstoffverlagerung wurden die auf der Fläche verbliebenen pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte deutlich reduziert. Dies verringerte das Potential für Nährstofffrachten mit dem Sickerwasser, so dass die Nährstofffrachten im Vergleich zu den anderen Bearbeitungsverfahren geringer ausfielen. Andere Autoren bestätigen, dass ein Nährstoffentzug die Nährstofffrachten reduziert (BORMANN et al. 1968; HELLSTEN et al. 2015; STEVENS und HORNING 1990; WALL 2008). MATEJEK et al. (2008) weisen darauf hin, dass die Nitratkonzentration im Sickerwasser wesentlich mit der Mineralisationsrate der organischen Auflage zusammenhängt. Bei der Silvafixräumung wurde der Mineralboden freigelegt, was mit einer Entfernung der Humusauflage einhergeht. Das Mineralisationspotential wurde dadurch stark reduziert und entsprechend waren die absoluten Frachten geringer als bei den regionalen Verfahren, bei denen der Humus auf der Fläche belassen wurde.

Auf den ersten Blick schien die Verringerung der Nährstofffrachten durch die Silvafixbearbeitung positiv zu sein. Es kamen jedoch Zweifel auf. Deshalb wurden die relativen

Nährstofffrachten in Relation zu den Nährstoffvorräten nach den jeweiligen Bodenbearbeitungsverfahren berechnet. Beim Vergleich der relativen Frachten der Silvafixbearbeitung mit den regionalen Bodenbearbeitungsverfahren ergab sich ein gegensätzliches Bild zum Vergleich der absoluten Frachten. Waren bei den absoluten Frachten die Nährstofffrachten der Silvafixbearbeitung im Vergleich zu den regionalen Bearbeitungsverfahren geringer, so waren sie bei der Betrachtung der relativen Frachten höher. Dies gilt insbesondere für Ca und Mg (Abbildung 21). Dass die relativen Nährstofffrachten beim Silvafixverfahren am höchsten sind, lässt sich auf folgende Hauptursachen zurückführen: Zum einen wurde durch die Silvafixbearbeitung die Vegetation und das Samenpotential in der Humusaufgabe entfernt. Die Folge war ein spärliches Aufkommen von Begleitvegetation, die die mineralisierten Nährstoffe hätte aufnehmen können. TIEBEL et al. (2021) konnten zeigen, dass einige Arten, wie z. B. die Birken, in der Lage sind, eine Samenbank im Boden aufzubauen. Diese wäre in der Lage, die Flächen schnell wieder zu begrünen und dadurch Nährstoffe zu binden. Zum anderen wurde bei der Silvafixräumung im Gegensatz zum Fräsen und Mulchen kein holziges Material mit einem weiten C:N-Verhältnis eingearbeitet, welches wie oben beschrieben N immobilisiert und dadurch Nährstofffrachten reduziert.

Die etwas höheren Nährstofffrachten bei der Silvafixbearbeitung im Vergleich zur Pflugsohle des Streifenpfluges im Hohen Flämings sind auf die etwas andere Arbeitsweise des Streifenpfluges zurückzuführen. In der Pflugsohle wurde der Humus bis auf den Mineralboden entfernt, allerdings schneidet das Pflugschar den Humus ab und greift nicht wie der Rechen des Silvafix in den Mineralboden ein und lockert diesen auf. Durch die Auflockerung des Bodens wird beim Silvafix die Mineralisation stärker angeregt als in der Pflugsohle. Darüber hinaus nimmt die Kationenaustauschkapazität des Bodens (Ake) nach der Silvafixbearbeitung ab, nicht aber in der Pflugsohle. Da in Böden mit geringem Tonanteil der Humusgehalt für die Sorption kationischer Nährstoffe entscheidend ist, deutet eine Abnahme der Ake auf eine Entfernung von humusreichem Mineralboden durch die Silvafixbearbeitung hin. Durch die Abnahme der Ake wird das Nährstoffspeichervermögen des Bodens verringert, was wiederum auf höhere Nährstofffrachten hindeutet (SCHEFFER et al. 2008). Die Entfernung des mineralischen Oberbodens erklärt auch

den Anstieg des pH-Wertes bei der Silvafixbehandlung im Hohen Fläming. In unverlehmten Sanden und in schwach verlehnten Sanden sind die Böden bis 10 cm deutlich saurer als in tieferen Bodenschichten (EVERS et al. 2022).

Es stellte sich auch die Frage, ob in den Wällen der Silvafixbearbeitung hohe Nährstofffrachten zu beobachten sind. Streifenpflügen führte, wie oben beschrieben, zu kleinräumigen Unterschieden in der Höhe der Nährstofffrachten zwischen Pflugsohle (niedrig) und Pflugbalken (hoch). Ein ähnlicher Effekt – wenn auch in größerem Maßstab – wurde durch die Silvafixbearbeitung erwartet, aufgrund der Humusverlagerung. Auf den Rückegassen der Silvafixflächen wurden keine Mikrokosmen-Lysimeter installiert, da es methodisch nicht möglich gewesen ist und es außerdem untypisch ist, Bereiche zu untersuchen, in denen keine Bäume gepflanzt werden. Während des Versuchs stellte sich die Nichtbeachtung der Rückegassen der Silvafixbearbeitung als falsch heraus. Um dennoch eine Gesamtbeurteilung des Verfahrens zu ermöglichen und den Mangel im Versuchsdesign zu beheben, wurden  $N_{\min}$ -Analysen durchgeführt. Die hohen Nitratvorräte der  $N_{\min}$ -Proben aus den Rückegassen der Silvafixbearbeitung wiesen auf hohe Nitratfrachten und damit auch auf hohe Nährstofffrachten in den mit Schlagabraum und Humus angereicherten Bereichen der Rückegassen hin. Da auch in einer Bodentiefe von 60 bis 90 cm hohe Nitratvorräte gemessen wurden, konnte eine Auswaschung von Nitrat (und Nährstoffen) unter den Rückegassen angenommen werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von SMOLANDER et al. (2000), wonach in Bereichen mit Humusanreicherung erhöhte Nitratkonzentrationen im Sickerwasser zu erwarten sind. Die absoluten Stickstofffrachten könnten sogar noch höher sein, da im Sickerwasser erhebliche Mengen an organischem Stickstoff ( $N_{\text{Org}}$ ) enthalten sein können (KRÜGER et al. 2021; ROSÉN und LUNDMARK-THELIN 1987; WALL 2008), welches bei dieser Methode nicht erfasst wurde.

In einer Studie auf einem grundwasserfernen, landwirtschaftlich genutzten Sand-Geest-Boden wurden die Herbst- $N_{\min}$ -Vorräte (0–90 cm) in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit einer Grenzwertüberschreitung für Nitratkonzentrationen im Grundwasser angegeben (BISCHOFF et al. 2022). Herbst- $N_{\min}$ -Vorräte unter  $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  lassen auf Nitratkonzentrationen im Sickerwasser schließen, die unterhalb des Grenzwertes der EU-Trinkwasserrichtlinie für Nitrat im Trinkwasser von  $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  (2020/2184 EU) liegen.

Wenn die Herbst- $N_{\min}$ -Vorräte im Bereich von 16 bis 39  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  liegen, sind in Abhängigkeit von der Jahreswitterung Grenzwertüberschreitungen möglich, mehr als 40  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  liegen die Nitratkonzentrationen immer über dem Grenzwert. In dieser Studie wurde der  $\text{NO}_3$ - $N_{\min}$ -Vorrat analysiert, da angenommen wurde, dass Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und nicht Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) ausgewaschen wird. Die Herbst  $\text{NO}_3$ - $N_{\min}$ -Vorräte unter den Schlagabraumwällen der Silvafixbearbeitung im Hohen Fläming (46  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) und im Ostbraunschweigischen Flachland (78  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) betragen über 40  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Im Wertebereich mit vereinzelt Grenzwertüberschreitungen lagen nur die Bodenbearbeitungen der Pflugbalken im Hohen Fläming (35  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) und die Schlagabraumwälle der Silvafixbearbeitung im Hessischen Ried (21  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Alle anderen Behandlungen lagen unter 15  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Eine Einschränkung von Bodenbearbeitungsverfahren wie Fräsen oder Mulchen aufgrund befürchteter Grundwasserbelastungen aufgrund erhöhte N-Frachten erscheint folglich unbegründet. Nitratausträge sind hingegen bei der Silvafix- und Streifenpflugbearbeitung zu erwarten.

Die hohen  $\text{NO}_3$ - $N_{\min}$ -Vorräte unter dem Schlagabraum der Silvafixbearbeitung im Hohen Fläming erklären sich durch die vollständige Verlagerung der Vegetation und der Humusaufgabe von der Fläche auf die Rückegassen zusätzlich zum Schlagabraum. Im Vergleich zum Hohen Fläming wurde im Hessischen Ried durch die Silvafixbearbeitung weniger organisches Material auf die Rückegassen verlagert. Zudem wuchsen im Hessischen Ried die vom Silvafix gerodeten Spätblühenden Traubenkirschen in den Schlagabraumwällen weiter, so dass die Schlagabraumwälle stark bewachsen waren und hierdurch viele Nährstoffe aufgenommen wurden, was hohen Nährstofffrachten entgegenwirkte (HEDWALL et al. 2013; MELLERT et al. 1998; WEIS et al. 2001). Das Ostbraunschweigische Flachland wies im Vergleich zu den anderen Regionen die höchsten  $\text{NO}_3$ - $N_{\min}$ -Vorräte unter den Schlagabraumwällen auf der Silvafixbearbeitung auf. Dies wird mit der im überregionalen Vergleich besseren Nährstoffversorgung begründet, die zu einem niedrigeren C:N-Verhältnis des Humus und damit zu einer schnelleren Mineralisation führte (BORKEN und MATZNER 2004; LOVETT et al. 2002). Schlagabraum behindert die Etablierung von Begleitvegetation (STEVENS und HORNING 1990) und fördert die Mineralisierung durch einen besseren Feuchtigkeits- und Temperaturhaushalt (ROSÉN und LUND-



MARK-THELIN 1987) und erhöht damit das Risiko von Nährstoffverlusten durch Auswaschung. In einer finnischen Studie konnte nachgewiesen werden, dass die Konzentrationen von  $N_{Org}$ , P, Ca, Mg und K im Sickerwasser unter Schlagabraum mit zunehmender Intensität der Schlagabraumkonzentration anstieg (WALL 2008).

Festzuhalten ist, dass die absoluten Nährstofffrachten bei der Silvafixräumung geringer sind, als bei den regionalen Vergleichsverfahren. Die relativen Frachten sind jedoch höher. Durch die Nährstoffverlagerung der Silvafixbearbeitung auf die Schlagabraumwälle sind die Nährstofffrachten unter den Schlagabraumwällen sehr wahrscheinlich gestiegen. Somit kann die Hypothese, dass das Sivafixverfahren geringere Nährstofffrachten in der Bodenlösung hervorruft als die regionalen Vergleichsverfahren, nicht bestätigt werden. Vielmehr scheint das Gegenteil der Fall zu sein: Erhöhung der relativen Nährstofffrachten auf der Fläche sowie ein hohes Nitrat- und Nährstoffauswaschungspotential unter den Schlagabraumwällen der Silvafixbehandlung.

#### 4.1.2 Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Nährstoffvorräte

Die Nährstoffvorräte der Kontrollparzellen stimmen mit den Werten aus den Bodenzustandserhebungen im Wald für die jeweilige Substratgruppe gut überein (EVERS et al. 2022; EVERS et al. 2019; PAAR et al. 2016). Im Hohen Fläming handelt es sich um Standorte, die den unverlehnten Sanden zugeordnet werden können. Diese Gruppe zeichnet sich in Sachsen-Anhalt durch eine geringe Austauschkapazität, Basensättigung und damit geringe austauschbare Nährstoffvorräte aus (EVERS et al. 2022) und stellt in der vorliegenden Studie den Standort mit der ärmsten Nährstoffversorgung dar. Im Vergleich zu den anderen Substratgruppen weisen die unverlehnten Sande den höchsten relativen Anteil austauschbarer Nährstoffvorräte in der Humusaufgabe auf (EVERS et al. 2022). Auch die Böden im Hessischen Ried sind der Gruppe der unverlehnten Sande zuzuordnen. Im Vergleich zu den anderen Substratgruppen in Hessen weisen die unverlehnten Sande im Hessischen Ried die geringsten Austauschkapazitäten auf und verfügen über geringe Basensättigungen (PAAR et al. 2016). Dementsprechend sind die austauschbaren Nährstoffvorräte gering und ein beträchtlicher Teil der Nährstoffe liegt in der Humusaufgabe vor (PAAR et al. 2016). Die Böden der Parzellen im Ostbraunschweigischen Flachland gehören zur Gruppe der verlehnten Sande und stellen in der vorliegenden Studie den Standort mit der reichsten Nährstoffversorgung dar. Im niedersächsischen Vergleich

weisen die verlehmtten Sande eine mittlere Austauschkapazität und Basensättigung auf (EVERS et al. 2019). Die Austauschkapazität ist abhängig von den Tongehalten der Böden. Die Korngrößenanalyse wies die geringsten Tongehalte für die Kontrollparzelle und die höchsten Tongehalte für die Silvafixparzelle aus (Tabelle 14). Dies erklärt die Streuung der Austauschkapazität für die Parzellen im Ostbraunschweigischen Flachland mit den geringsten Werten für die Kontrolle und den höchsten Werten für die Silvafixbearbeitung. Die Basensättigung der Kontrollparzelle liegt mit ca. 15 % unter dem Landesdurchschnitt von 40 % (EVERS et al. 2019). Die Nährstoffvorräte der verlehmtten Sande liegen im Vergleich der Substratgruppen im mittleren Bereich, wobei der relative Nährstoffanteil in der Humusaufgabe im Vergleich zu den unverlehmtten Sanden abnimmt (EVERS et al. 2019).

Die Nährstofffrachten nach Bodenbearbeitungen standen im Verhältnis zu den pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräten, die nach der Bodenbearbeitung noch vorhanden waren. Wurden die Vorräte durch die Bodenbearbeitung reduziert, waren die Nährstofffrachten gering. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Silvafixbearbeitung und das Streifenpflügen Nährstoffe über große bzw. kleine Distanzen verlagert wurden, so dass relativ geringe Nährstofffrachten einen großen Einfluss auf die verbliebenen geringen pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte hatten. Das bedeutet, dass die Nährstoffverlagerung durch die Bodenbearbeitung eine größere Rolle bei den Nährstoffverlusten auf den untersuchten Standorten spielte als die Nährstoffverlagerung mit dem Sickerwasser.

Mulchen und Fräsen verringerten die Nährstoffvorräte nicht, da sie keine horizontale Verlagerung der Humusaufgabe und der Nährstoffen bewirkten. Eine kanadische Studie bestätigt diese Beobachtungen; beim Fräsen blieben die Nährstoffvorräte auf dem gleichen Niveau wie in der unbehandelten Kontrolle (BOCK und VAN REES 2002). Bei der Anlage von Pflugstreifen, wie im Hohen Fläming, kommt es jedoch zu kleinräumigen Verlagerungen (PIIRAINEN et al. 2007). Die Reduktion der pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte in der Pflugsohle durch die Mineralbodenfreilegung war beträchtlich. Bis in eine Bodentiefe von 30 cm (Einbautiefe der Mikrokosmen-Lysimeter) wurde z. B. der pflanzenverfügbare Mg-Vorrat um ca. 80 % reduziert. KÄTZEL et al. (2005) wiesen bei in Pflugstreifen gepflanzten Eichen zwei Jahre nach der Kulturbegründung deutlich geringere

Magnesium-Blattspiegelwerte nach, als bei Eichen auf unbearbeiteten Flächen oder in Frästreifen. Geringere Blattspiegelwerte gehen mit einer verminderten Nährstoffversorgung einher. Die verminderte Nährstoffversorgung kann auf eine Vorratsabsenkung durch Humusentfernung zurückgeführt werden und stimmt mit den Ergebnissen dieser Untersuchung für die Pflugsohle überein. Die indirekten absoluten Nährstoffvorratsänderungen durch Nährstofffrachten infolge von Bodenbearbeitungen, waren bei allen Bearbeitungen im Vergleich zu den Nährstoffvorratsänderungen durch horizontale Verlagerung der Humusaufgabe während der Bodenbearbeitung gering.

Die Silvafixbearbeitung war mit einer erheblichen Nährstoffverlagerung und einer starken Reduktion der Begleitvegetation verbunden, was beides zu hohen Nährstoffverlusten führte. Durch die großen Mengen an Schlagabraum auf den Versuchspartellen und einer ausgeprägten Vegetation wurde viel organisches Material in die Bereiche der Rückegassen verlagert. Da auf armen Standorten ein erheblicher Teil der pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte in Biomasse und Humusaufgabe enthalten ist (EVERS et al. 2022), waren die Auswirkungen der Silvafixbearbeitung im Hohen Fläming und im Hessischen Ried größer als im Ostbraunschweigischen Flachland.

Die Größenordnung der durch den Silvafix verursachten Nährstoffvorratsreduktion durch horizontale Nährstoffverlagerung entsprach einer langjährigen Vollbaumnutzung. Besonders betroffen waren die Nährelemente Ca, K und Mg, weniger N. PRETZSCH et al. (2014) berichten von jährlichen Nährstoffexporten von 4 bis 6  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  für Ca und 0,5  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  für Mg für verschiedene Baumarten bei reiner Stammholzernte in einem schwachwüchsigen Bestand. Die atmosphärische Nährstoffdeposition liegt in etwa auf dem gleichen Niveau und kompensiert den Nährstoffentzug durch die reine Stammholzernte. Demgegenüber berichten PRETZSCH et al. (2014) von etwa doppelt so hohen Nährstoffentzügen bei einer Vollbaumnutzung, die zu negativen Nährstoffbilanzen und damit zu einer Minderung der Leistungsfähigkeit des Standortes führen. Bei einer Umtriebszeit der Eiche von 200 Jahren würde dies einen zusätzlichen Entzug von etwa 1.000  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  für Ca und 200  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  für Mg bedeuten. Im Hohen Fläming reduzierte der Silvafix den pflanzenverfügbaren Mg-Vorrat um 160  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  (80 % des pflanzenverfügbaren Mg-Vorrates), was einer 160-jährigen Vollbaumnutzung entspricht.

Aufgrund der wirksamen Begleitwuchsregulierung durch die Silvafixbearbeitung wurden im Vergleich zu den anderen Bodenbearbeitungsverfahren relativ hohe Frachten beobachtet. Absolut gesehen waren die Nährstofffrachten gering und im Vergleich zur Nährstoffverlagerung auf die Rückegasse während der Bearbeitung vernachlässigbar. Im Vergleich zu den nach der Bodenbearbeitung verbliebenen Nährstoffen zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Auf armen Standorten sind die Nährstofffrachten bedenklich, da im Hohen Fläming innerhalb von 2 Jahren bis zu 36 % der verbliebenen pflanzenverfügbaren Mg-Vorräte mit dem Sickerwasser verlagert wurden (dies entspricht weniger als 1 % des verbliebenen Gesamt-Mg-Vorrates). Auf nährstoffreichen Standorten ist dies weniger bedenklich. Neben ausreichenden Nährstoffvorräten im Mineralboden zum Ausgleich von Nährstoffverlusten besitzen diese Böden eine höhere Kationenaustauschkapazität, so dass mineralisierte Nährstoffe bei höherer Verfügbarkeit austauschbar gebunden werden können. Daher kommt der Begleitvegetation auf armen Standorten eine besondere Bedeutung für die Nährstoffspeicherung zu.

Nach dem Bewertungsschema der ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) verschlechterte der Silvafix die Nährstoffversorgung im Vergleich zur Kontrolle im Hohen Fläming von niedrig/mittel zu sehr niedrig, im Hessischen Ried von niedrig/mittel zu niedrig und im Ostbraunschweigischen Flachland von mittel zu niedrig/mittel. Langfristig führen großflächig reduzierte Nährstoffvorräte zu Zuwachseinbußen (ACHAT et al. 2015). Rodungen mit Raupen (bei denen der Oberboden auf Wälle geschoben wurde) verringerten die Vorräte an basischen Kationen und damit die Wuchsleistung von Eichen erheblich (NOPP et al. 1998). In einer kanadischen Studie wurden durch das Abschieben des Oberbodens mit einer Raupe die austauschbaren Gehalte an Ca, Mg und K um 49, 16 und 77 % reduziert (BOCK und VAN REES 2002). Diese Werte stimmen in der Größenordnung gut mit den Werten der vorliegenden Studie für den schwach nährstoffversorgten Standort im Hohen Fläming überein. Um Wuchsdepressionen bei solch massiven Eingriffen zu minimieren, sollte nach STRUCK (1999) der Abstand der Wälle weniger als 20 m betragen. Diese Empfehlung beruht vermutlich auf der Annahme, dass die Nährstoffe im Bereich der Wälle verbleiben und über die Jahre durch die Laubstreu der Bäume an den Wällen wieder in die Fläche zurückgeführt werden. Da aber in Bereichen

mit Wällen erhöhte Nährstoffauswaschungen zu erwarten sind, sollte die Bodenbearbeitung eher streifen- oder plätzeweise erfolgen, um Nährstoffverluste zu minimieren (ALCÁZAR et al. 2002; LÖF et al. 2006).

#### 4.1.3 Alternativen zur Bodenschonung

Im Rahmen der Bodenbearbeitung wird der Waldboden vollflächig (Mulchen, Fräsen und Streifenpflug) mit Schleppern befahren. Das aus diesem Grund als bodenschonend geltende Silvafixverfahren wird von der Rückegasse aus durchgeführt, wodurch eine Befahrung des verdichtungsempfindlichen Waldbodens vermieden wird.

Die Bodenbearbeitung erfolgte im vorliegenden Versuch nach einer längeren Trockenperiode. Daher wiesen die Böden während der Bearbeitung eine untypisch niedrige Bodenfeuchte auf. Im Allgemeinen wird ein trockener Boden durch Befahren weniger beeinträchtigt als ein feuchter Boden (ALLMAN et al. 2017).

Die Versuchsfläche im Ostbraunschweigischen Tiefland wird – aufgrund der Pseudogley-Böden – als besonders verdichtungsempfindlich eingestuft. Zum Zeitpunkt der Bodenbearbeitung war der Boden jedoch sehr trocken und hart, so dass eine Bodenverdichtung durch das Befahren im Zuge der Bodenbearbeitung ausgeschlossen werden konnte. Somit konnte das Silvafix-Verfahren den Vorteil der Flächenräumung ohne ganzflächige Befahrung nicht ausspielen. Im Hessischen Ried und im Hohen Fläming handelt es sich um sandige Standorte, welche nicht als verdichtungsempfindlich gelten (EBELING et al. 2016b).

Die Ergebnisse dieser Untersuchung weisen allerdings auf negative Auswirkungen der Silvafixbearbeitung auf die Nährstoffversorgung der Pflanzen durch Nährstoffverlagerungen hin. Dies gilt insbesondere für Standorte mit hohen Nährstoffvorräten in Humusaufgabe und Vegetation. Auf der einen Seite stehen die regionalen Bodenbearbeitungsverfahren, die aufgrund der großflächigen Befahrung kritisch gesehen werden. Sie sind jedoch als nährstoffschonend einzustufen. Auf der anderen Seite steht das Silvafixverfahren, das aufgrund der teilflächigen Befahrung als bodenschonend gilt, aber aufgrund von Nährstoffverlagerungen kritisch zu betrachten ist. Wenn Bodenbearbeitung notwendig ist, wäre ein Verfahren wünschenswert, das sowohl ohne flächige Befahrung als auch ohne Nährstoffverlagerung auskommt.

Es konnte gezeigt werden, dass eine gut entwickelte Begeleitvegetation die Nährstofffrachten stark verringert (Abbildung 18). Da die Bodenbearbeitung in der Regel mit dem Ziel durchgeführt wird, die Begeleitvegetation zu reduzieren, stellt dies einen Zielkonflikt dar. Eine mögliche Lösung dieses Zielkonfliktes kann die Einsaat einer Nutzpflanzendecke sein, die die bearbeitete Fläche bei ausbleibender Begeleitvegetation schnell begrünt, aber nicht mit der Forstkultur konkurriert und zusätzlich den durch die Bodenbearbeitung gelockerten Boden gegen natürliche Rückverdichtungen stabilisiert (DASSOT und COLLET 2015; EVERS 2001).

STRUCK (1999) empfiehlt eine schnelle Aufforstung nach dem Mulchen oder Fräsen, um die Nährstoffverluste durch Auswaschung zu verringern. Zur Bindung der pflanzenverfügbaren Nährstoffe ist dies nicht ausreichend, da die Kultur den Boden erst nach Jahren flächig durchwurzelt. Die Einsaat einer Nutzpflanzendecke begrünt die Fläche schneller und bindet die Nährstoffe effektiver. Versuche zur Aussaat von Baumsamen mit Drohnen wurden gestartet. Diese sollten auch für die Einsaat von Nutzpflanzendecken erprobt werden, da sie das Anwendungsspektrum gegenüber den herkömmlichen, oft für den Einsatz im Wald ungeeigneten landwirtschaftlichen Saatverfahren deutlich erweitern. Darüber hinaus sollten auch neue Pflanzenmischungen systematisch auf ihre Auswirkungen auf die Nährstofffrachten getestet werden. STOLL (2011) spricht sich zum Beispiel gegen Leguminosen in Pflanzenmischungen aus, da sie N aus der Luft im Boden binden und dadurch die Nitratfrachten erhöhen.

Allerdings kann die Entfernung von Schlagabraum durch Bodenbearbeitungen auch einen positiven Effekt auf die Etablierung von krautiger Begeleitvegetation haben und damit zu einer Reduktion von Nährstofffrachten führen, da Schlagabraum nicht nur ein Kulturhindernis, sondern auch ein Hindernis für Begeleitvegetation darstellt (STEVENS und HORNING 1990). Dies gilt für Situationen, in denen sehr viel Schlagabraum nach Einschlägen auf den Hiebsflächen verbleibt und keine Bodenvegetation vorhanden ist. Diese Situation wäre vergleichbar mit der der Kontrollfläche im Hessischen Ried der vorliegenden Untersuchung. Die Mikrokosmen-Lysimeter wiesen einen spärlichen Bewuchs auf, so dass die Nitratfrachten mit  $75 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  auf einem hohen Niveau lagen.

In einer Studie im Solling förderte die Kalkung nach einem Lochhieb das Wachstum der krautigen Vegetation, so dass die Nährstoffkonzentration in der Bodenlösung auf dem

Niveau des unbehandelten Bestandes blieb (BAUHUS und BARTSCH 1995). Dies unterstreicht die Bedeutung der Entwicklung der Begleitvegetation im Ökosystem nach Störungen und zeigt, dass neben Bodenbearbeitungen auch andere Maßnahmen die Begleitvegetation fördern und somit ein Hilfsmittel zur Reduzierung von Nährstofffrachten darstellen.

## 4.2 Bodenwasserspannung

### 4.2.1 Der Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodenwasserspannung

Bodenbearbeitungen mit einer effektiven Begleitwuchsreduktion waren auf Standorten mit einer geringen nutzbaren Wasserspeicherkapazität in der Lage, das Trockenstressrisiko für Forstkulturen zu senken. Das Silvafixverfahren minderte das Trockenstressrisiko im Vergleich zu den anderen Bodenbearbeitungsverfahren ähnlich effektiv, verbesserte aber die Wasserinfiltrationsrate in den Wintermonaten nicht so stark wie die regionalen Standardverfahren.

Mehrere Untersuchungen kamen zu dem gleichen Ergebnis, dass Bodenbearbeitungen den Trockenstress für Forstkulturen reduziert konnte (HANSSON et al. 2018; LÖF et al. 1998; ÖRLANDER et al. 1998). HANSSON et al. (2018) führen den höheren Bodenwassergehalt in den bearbeiteten Bereichen auf die Beseitigung der Begleitvegetation zurück, wodurch die Transpiration reduziert wurde. LÖF et al. (1998) konnten zeigen, dass bei Kulturen unter Schirm eine tiefe Bodenbearbeitung die Bodenwasserspannung stark verbesserte. Die tiefe Bodenbearbeitung verringerte die Wurzelkonkurrenz des Schirmbestandes im Oberboden. Unter dem Gesichtspunkt, dass Altbestände ein größeres Matrixpotential aufbringen können als Sämlinge, erscheint eine tiefe Bodenbearbeitung unter Schirm sinnvoll, um den Kulturerfolg abzusichern. LÖF und BIRKEDAL (2009) konnten eine Verbesserung der Bodenfeuchte durch Bodenbearbeitung in einem Eichensaatversuch nach Windwurf in Südschweden, mit einer Kontrolle und vier Bodenbearbeitungsverfahren, nicht bestätigen. Sie zeigten für alle Varianten Werte über -600 hPa nach 2 Jahren. Diese Werte sind für Pflanzen eher günstig. Betrachtet man die Niederschläge in ihrer Studie, so fällt auf, dass die Niederschläge in den Sommermonaten bei etwa 100 mm pro Monat lagen. Somit lagen keine Trockenperioden vor, in denen Trockenstress für die Forstkulturen zu erwarten wäre. Daher konnten die Bodenbearbeitungsvarianten trotz erheblicher Begleitwuchsreduktion keine höhere Bodenfeuchte zeigen.

In der Literatur finden sich Angaben zum Beginn von Trockenstress im Bereich von Bodenmatrixpotentialen von -500 hPa bis -1300 hPa, in Abhängigkeit von Boden- und Baumart (GROH et al. 2013; ROSENQVIST et al. 2010). Wuchsreduktionen wurden bereits bei Bodenmatrixpotentialen ab -600 hPa beobachtet (GROSSNICKLE 2005; WAGNER et al. 2019). Es konnte gezeigt werden, dass frisch begründete Kulturen unter Trockenstress nicht in der Lage waren, neue Wurzeln zu bilden (GROSSNICKLE 2005). Die Neubildung von Wurzeln ermöglicht der frisch gesetzten Pflanze jedoch erst die Aufnahme von Bodenwasser und ist für einen erfolgreichen Anwuchs essentiell. Dies unterstreicht die Bedeutung eines ausreichend durchfeuchteten Bodens bei der Etablierung der Kultur und könnte die Ursache für den Ausfall der Eichensaat auf der Kontrollparzelle im Hohen Fläming sein. Aber auch das Pflanzenwachstum fällt bei Trockenheit geringer aus. Bei gleichem Lichtgenuss konnte gezeigt werden, dass Buchen bei Wasserdefizit ein vermindertes Wachstum aufwiesen (COLL et al. 2004; COLL et al. 2003).

In Abhängigkeit von Bodenart und Begleitvegetation zeigten die Kontrollen mit zunehmendem Sandgehalt und zunehmender Begleitvegetation eine stärkere Austrocknung im Sommer. Im Hohen Fläming herrschte im Jahr 2019 über mehrere Wochen und im Jahr 2020 über mehrere Monate Trockenstress für die Forstkulturen, da die Werte über -1300 hPa lagen. Die stärkere Austrocknung im Jahr 2020 im Vergleich zu 2019 im Hohen Fläming und im Hessischen Ried in den bearbeiteten Varianten kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Zum einen waren die Niederschläge im Jahr 2020 etwas geringer als im Jahr 2019, zum anderen hat sich im Laufe der Jahre eine Vegetationsdecke gebildet, die zu höheren Verdunstungsraten führt (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 Beobachtung der verbesserten Bodenfeuchte bei einer verminderten Verdunstung. Sie konnten erhöhte Grundwasserspenden im Offenland im Vergleich zum Wald nachweisen und führten dies auf geringere Verdunstungsraten im Offenland im Vergleich zum Wald zurück (ROSENQVIST et al. 2010).

Der Silvafix zeigte in den Regionen Hoher Fläming und Hessisches Ried eine deutliche Verbesserung der Bodenwasserspannung gegenüber den jeweiligen Kontrollen. Im Hohen Fläming war der Silvafix dem Streifenpflug überlegen. Dies wird auf die vollflächige



Bearbeitung des Silvafix zurückgeführt, wogegen der Streifenpflug nur streifenweise arbeitet und in den unbearbeiteten Bereichen die Begleitvegetation weiterhin für höhere Transpirationsraten sorgt. Ein Vergleich von Silvafix und Fräsen im Hessischen Ried zeigte, dass die Bodenwasserspannung nach dem Fräsen günstiger war, als nach der Silvafixbehandlung. Das Fräsen war das intensivere Bodenbearbeitungsverfahren, bei dem jegliche Begleitvegetation beseitigt wurde. Dagegen verblieben kleinere Bäume und andere Pflanzen, welche nicht vom Rechen des Silvafix erfasst wurden, auf der Silvafixparzelle und führten zu einer höheren Transpirationsrate der Silvafixparzelle im Vergleich zur Fräsparzelle.

Dass die Streifenpflugvariante im Hohen Fläming im ersten Jahr trockener war als die Silvafixbearbeitung, lässt sich auf die heterogene Flächenbeschaffenheit nach dem Pflügen zurückführen. Die Sensoren wurden sowohl in der Pflugsohle, als auch im Bereich der Pflugbalken installiert. In der Pflugsohle sammelt sich Niederschlagswasser, welches aus den Bereichen der Pflugbalken oberflächlich abfließt. Dadurch sind die Bodenfeuchten auf der Fläche heterogen: in den Pflugsohlen feucht; in den Pflugbalken trocken. Aufgrund der geringen Anzahl an Sensoren wurde bei der Auswertung der Daten von einer Unterteilung der Sensoren in Pflugsohle und Pflugbalken verzichtet.

Fräsen förderte im Hessischen Ried die Wasserinfiltration in den Oberboden durch schließen von Megaporen, in denen das Niederschlagswasser ansonsten in den Unterboden gelangte und für die Forstkulturen unerreichbar war. Diese Beobachtung bestätigen mehrere Autoren (BENECKE 1992; HORN und LEBERT 1992; SCHULTE-KARRING und SCHRÖDER 1992). Da das Fräsen das Bodenbearbeitungsverfahren war, das mit 30 cm am tiefsten in den Mineralboden eingriff, wurden die Megaporen auch am effektivsten verschlossen. Zudem lockerte das Fräsen den Boden bis zur Bearbeitungstiefe auf, was besonders in den ersten Monaten nach der Bodenbearbeitung, bevor die natürliche Bodenverdichtung einsetzte, die Infiltrationsrate erhöhte.

Aufgrund des hohen Wasserspeichervermögens des Bodens im Ostbraunschweigischen Flachland, der relativ geringen Verdunstungsraten der Waldbodenflora sowie der im Untersuchungszeitraum gleichmäßig gefallenen Sommerniederschläge zeigte der Standort keine Trockenstressgefährdung für die Forstkultur.

#### 4.2.2 Alternativen zur Verbesserung der Bodenwasserspannung

Eine Folge des Klimawandels sind extremere Witterungsverhältnisse (KEENAN 2015). Diese gehen unter anderem mit längeren Trockenperioden einher, die ein Hindernis für eine erfolgreiche Kulturbegründung darstellen. Dieser Problematik widmen sich derzeit mehrere Projekte mit unterschiedlichen Ansätzen. Neben der Entwicklung von Bewässerungskonzepten (BIEDERBICK 2020; VON LÜPKE et al. 2021) wird auch an sogenannten Bodenhilfsstoffen geforscht, welche den Kulturpflanzen ein zusätzliches Wasserreservoir für Trockenperioden zur Verfügung stellen sollen (BENIWAL et al. 2010; JAMNICKÁ et al. 2013; LANDIS 2011). Wie die Arbeit von BIEDERBICK (2020) zeigt, ist für die Bewässerung von Forstkulturen ein hoher logistischer Aufwand erforderlich. Dies führte zu durchschnittlichen Kosten von ca. 700 €·ha<sup>-1</sup> für einen Bewässerungsdurchgang bei stammzahlarmen Kulturen. Bei einer Eichenkultur dürften die Kosten den Wert von 700 €·ha<sup>-1</sup> für eine Bewässerung aufgrund der höheren Stammzahl um ein Vielfaches übersteigen. Somit scheiden Bewässerungen als Instrument zur Sicherung des Kulturerfolges aufgrund der hohen Kosten aus.

Bodenhilfsstoffe sind nach §2 Nr. 6 Düngegesetz (DüngG) „Stoffe ohne wesentlichen Nährstoffgehalt sowie Mikroorganismen, die dazu bestimmt sind a) die biologischen, chemischen oder physikalischen Eigenschaften des Bodens zu beeinflussen, um die Wachstumsbedingungen für Nutzpflanzen zu verbessern oder b) die symbiotische Bindung von Stickstoff zu fördern“. Im Gegensatz zu Pflanzenhilfsmitteln oder Pflanzenstärkungsmitteln wirken Bodenhilfsstoffe nicht direkt auf die Pflanze, sondern indirekt durch eine Verbesserung der Bodeneigenschaften. Zur Überbrückung von Trockenperioden sollen Bodenhilfsstoffe die Wasserspeicherkapazität von Böden erhöhen. Hierzu werden vor allem sogenannte „Superabsorbierende Hydrogele“ auf Basis von Polysacchariden eingesetzt (GUILHERME et al. 2015), die mehr als das Hundertfache ihres Eigengewichtes an Wasser zusätzlich im Boden binden können. In Topfversuchen konnte ein positiver Effekt von Hydrogelen auf die Trockenstressanfälligkeit nachgewiesen werden. So konnte für Buchenstecklinge ohne den Zusatz von Hydrogel ein signifikant höheres Blattpotential nach einer simulierten 50-tägigen Trockenperiode gezeigt werden, im Vergleich zu Pflanzen mit Hydrogelbehandlung (JAMNICKÁ et al. 2013). In einem Topfversuch mit Pappeln konnten BENIWAL et al. (2010) ebenfalls einen geringeren Trockenstress

bei einer Behandlung mit Hydrogel gegenüber einer Behandlung ohne Hydrogel nachweisen. In Praxisversuchen konnte dies nicht bestätigt werden (KIRSCHT 2011; REPÁČ et al. 2020; STOLL 2011). Dies liegt vermutlich an der geringeren Aufwandmenge an Hydrogel in den Praxisversuchen im Vergleich zu den Topfversuchen. Neben dem erhöhten Aufwand bei der Pflanzung durch das Einbringen des Bodenhilfsstoffes, erhöhen sich auch die Kulturkosten durch dessen Beschaffung. Für eine den Forstbetrieben angebotene Kapsel mit 1 g Hydrogel, die jeder Pflanze zur Minderung von Trockenstress beigegeben werden soll, wird ein Preis von 0,32 € brutto aufgerufen (FLÜGEL GMBH 2023). Dies würde für eine Eichenkultur mit 10.000 Pflanzen·ha<sup>-1</sup> Mehrkosten von 3.200 €·ha<sup>-1</sup> bedeuten. Neben den höheren Kosten und der nicht nachgewiesenen Wirkung bei geringen Einsatzmengen, wird der Einsatz von Hydrogelen kritisch gesehen, da hierdurch ein Kunststoff in die Umwelt eingebracht wird. So weisen PETERSEN et al. (2021) auf die nicht nachgewiesene Abbaubarkeit im Wald hin und dass der Einsatz von Hydrogelen den ausbleibenden Regen nicht ersetzen kann. Sie sprechen sich gegen einen Einsatz von Hydrogelen aus.

Bewässerungsmaßnahmen oder Bodenhilfsstoffe stellen im Gegensatz zu Bodenbearbeitungsverfahren in Beständen mit intensiver Begleitvegetation keine wirkliche Alternative zur Verbesserung der Bodenfeuchte dar. Dies ist auf die hohen Verdunstungsraten der Begleitvegetation zurückzuführen. So geben MÜLLER et al. (1997) für eine Vegetationsdecke aus *Calamagrostis epigejos* einen Wasserverbrauch von 40 mm·m<sup>-2</sup> in jedem Sommermonat an. An hochsommerlichen Strahlungstagen kann die Verdunstungsleistung von *Calamagrostis epigejos* bis zu 8 mm m<sup>-2</sup> betragen (MÜLLER 1967, zitiert nach MÜLLER et al. (1997)). Diese hohe tägliche Verdunstungsrate übersteigt die Wasserzufuhr durch Bewässerung oder auch das zusätzliche Wasserspeichervermögen durch eine übliche Gabe von Bodenhilfsstoffen. Dies verdeutlicht, dass Bewässerungsmaßnahmen oder Bodenhilfsstoffe nur einen Tropfen auf den heißen Stein darstellen. Auf Standorten mit der Gefahr eines trockenheitsbedingten Kulturausfalls ist eine Bodenbearbeitung zur effektiven Regulierung der Begleitvegetation, wie die Ergebnisse zeigen (Abbildung 23), unverzichtbar. Auch aus finanzieller Sicht erscheint eine Bodenbearbeitung im Vergleich zu Bewässerungsmaßnahmen oder Bodenhilfsstoffen sinnvoll. So werden die Kosten für die Anlage von Pflugstreifen inklusive vorheriger Flächenräumung mit 915–

1120 €·ha<sup>-1</sup> angegeben (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTWIRTSCHAFTLICHER LOHNUNTERNEHMER NIEDERSACHSEN E.V. 2020). Mulchen kostet 1.400–1.700 €·ha<sup>-1</sup> bei mittelschweren Verhältnissen (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTWIRTSCHAFTLICHER LOHNUNTERNEHMER NIEDERSACHSEN E.V. 2020) und Mulchen plus Fräsen – das Standardverfahren im Hessischen Ried – etwa das Doppelte von Mulchen allein. Für die Räumung mit dem Silvafix können Sätze von ca. 700 bis 800 €·ha<sup>-1</sup> angesetzt werden (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTWIRTSCHAFTLICHER LOHNUNTERNEHMER NIEDERSACHSEN E.V. 2020). Diese Kosten erscheinen auf den ersten Blick recht hoch. Doch fallen die Pflanzkosten ohne vorherige Bodenbearbeitung etwa 20–40 % höher aus im Vergleich zu Pflanzkosten nach Bodenbearbeitung (ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTWIRTSCHAFTLICHER LOHNUNTERNEHMER NIEDERSACHSEN E.V. 2020). Der Kostenvorteil der Bodenbearbeitung würde bei einer Handpflanzung einer Eichenkultur mit 10.000 Pflanzen·ha<sup>-1</sup> eines 30/50 Sortimentes und mittleren Bodenverhältnis bei 900–1800 €·ha<sup>-1</sup> liegen. Hinzu kommen noch Einsparungen von 700 bis 800 €·ha<sup>-1</sup> im ersten Jahr für den Verzicht einer Kulturpflege. Diese einfache Kalkulation zeigt, dass eine Bodenbearbeitung neben den Vorteilen der besseren Bodenfeuchte, auch finanzielle Vorteile bei der Kulturbegründung mit sich bringen kann.

Neben mechanischen Begleitwuchsregulierungen sind auch chemische Maßnahmen möglich. Studien, in denen der Einsatz von Herbiziden mit einer mechanischen Begleitwuchsregulierung verglichen wurde, zeigen die gleichen positiven Effekte auf die Bodenfeuchte durch den Einsatz von Herbiziden wie durch Bodenbearbeitung (DINGER und ROSE 2009; NILSSON et al. 1996a). In einer Untersuchung aus Schweden konnte gezeigt werden, dass eine mechanische Begleitwuchsregulierung einen ähnlich positiven Einfluss auf das Wachstum einer Forstkultur hatte, wie eine chemische Begleitwuchsregulierung (LÖF et al. 2006). Der Einsatz von Herbiziden zur Begleitwuchsregulierung findet in Deutschland jedoch kaum Anwendung (WILLOUGHBY et al. 2009) und wird daher nicht weiter thematisiert.

### 4.3 Kulturentwicklung

#### 4.3.1 Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf die Überlebenswahrscheinlichkeit von Eichenkulturen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Überlebenswahrscheinlichkeiten im Hessischen Ried anhand der Wurzel- und Sprossgewichte, den Wurzel/Spross-Verhältnissen sowie der Ergebnisse der Engerlingsgrabung diskutiert. 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 (Abbildung 12) 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 ungünstigen Wurzel/Spross-Verhältnis zeigten einen weniger guten Anwuchs. Die Flächen mit Bodenbearbeitung wiesen nach der ersten Vegetationsperiode aufgrund der Begleitwuchsregulierung und der dadurch günstigeren Bodenfeuchte die geringsten Ausfälle auf (LÖF et al. 1998; ÖRLANDER et al. 1998). Die Entwicklungen nach der zweiten Vegetationsperiode zeigten ebenfalls eine Überlegenheit der bodenbearbeiteten Flächen, auch wenn die Ausfälle zunahm. Nach der dritten Vegetationsperiode zeigten sich unerwartet hohe Ausfälle auf allen Parzellen. Neben den zum Teil erheblichen Mäh-schäden in der ersten und zweiten Vegetationsperiode auf der Kontrolle, die zu hohen Verlusten führten, wurde auf der Fläche auch Engerlingsfraß festgestellt, der die hohen Verluste in der dritten Vegetationsperiode erklärt. Die Bodenbearbeitungen erfolgten nach der Eiablage der E3 Stadien. Daher scheint die Häufigkeit der Funde weitere unbekannte Ursachen zu haben, die nicht kausal mit der Bodenbearbeitung in Zusammenhang gebracht werden können.

Da durch das Fräsen die Begleitvegetation am effektivsten reduziert wurde, ist davon auszugehen, dass sich der Engerlingsfraß auf die Eichenkultur konzentrierte (HUITING et al. 2006) und Herkünfte mit geringer Wurzelbiomasse stärker betroffen waren. Hiernach hätte die Herkunft „Nidda“ mit dem absolut geringsten Wurzelgewicht (Abbildung 11) die höchsten Ausfälle auf der gefrästen Parzelle aufweisen müssen. Die Ausfälle waren jedoch am geringsten. Eine Überprüfung der Ergebnisse der Engerlingsgrabung ergab für den Bereich der Herkunft „Nidda“ keine Engerlingsfunde. Somit bestätigt sich einerseits, dass das Vorkommen von Engerlingen in dieser Untersuchung unabhängig von der

Bodenbearbeitung war. Es ist wahrscheinlich, dass auf der Kontrollparzelle die üppige Begleitvegetation einer Konzentration des Engerlingsfraßes auf die Forstkultur entgegenwirkte. Aus diesem Grunde und wegen der geringeren Engerlingsdichte waren auf der Kontrollparzelle keine Ausfälle durch Engerlingsfraß zu verzeichnen. Für Freiflächenbedingungen gibt LÜPKE (1982) für Eichen ohne Engerlingsbefall einen Anwuchs von 77 bis 80 % nach drei Vegetationsperioden an. Diese Werte wurden nur bei der Herkunft „Dieburg“ der Kontrolle und der Herkunft „Nidda“ der Fräsbearbeitung erreicht. Bei den anderen Bearbeitungen lagen die Werte mit 30–80 % Ausfall zum Teil deutlich darunter.

Die Überlebenswahrscheinlichkeiten im Ostbraunschweigischen Flachland waren mit über 70 % in allen Varianten akzeptabel und lagen geringfügig unter dem von LÖF et al. (2004b) angegebenen Rahmen von 75 bis 100 %. Wie LÖF et al. (2004b) zeigen konnten, führten die Bodenbearbeitungen mit Begleitwuchsregulierung zu höheren Anwuchsraten. Hohe Ausfälle wurden bei der Kontrolle und Mulchbearbeitung in der dritten Vegetationsperiode durch die Kulturpflege hervorgerufen und hätten durch eine frühere Kulturpflege vermieden werden können. Die deutlich geringeren Ausfälle beim Silvafixverfahren sprechen für weniger Begleitwuchs im Vergleich zur Mulchvariante und zur Kontrolle. Das Mulchen konnte den Schlagabraum zerkleinern, aber durch die oberflächennahe Arbeitsweise keine langfristige Unterdrückung von Gräsern und Kräutern gewährleisten. In einer Studie aus Südschweden werden Überlebensraten von ca. 90 % für wurzelnackte Eichensämlinge nach mechanischer Begleitwuchsregulierung angegeben und Überlebensraten von 60 % für die Kontrolle ohne Begleitwuchsregulierung (LÖF et al. 2006). Die Autoren begründen den hohen Ausfall von 40 % in der Kontrolle damit, dass sich die Vegetation vor der Pflanzung über 2 Jahre entwickeln konnte. Diese Werte stimmen gut mit den beobachteten Überlebensraten im Ostbraunschweigischen Flachland überein. Die höhere Überlebenswahrscheinlichkeit der Kontrolle im Ostbraunschweigischen Flachland ist auf die zügige Kulturbegründung zurückzuführen, bevor sich die Begleitvegetation vollflächig etablieren konnte. Hieraus lässt sich die Empfehlung ableiten, in Beständen mit spärlicher Begleitvegetation zügig nach dem Hieb die neue Kultur zu begründen, wenn auf Bodenbearbeitungen verzichtet werden sollen.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit von weniger als 5 % auf der Kontrollparzelle im Hohen Fläming kommt einem Totalausfall gleich und ist auf eine zu geringe Bodenfeuchte

und Fraß zurückzuführen. Durch die geschlossene Vegetationsdecke konnte der Oberboden im Winter nicht durchfeuchten und die Keimung der Eichen wurde gehemmt. In einem Experiment unter Ausschluss von Fraß nahm die Anzahl aufgelaufener Eicheln mit Zunahme der Vegetation ab (DE LOMBAERDE et al. 2020). Auch ERDŐS et al. (2021) berichteten von einem Totalausfall, wenn Eicheln in eine Grasnarbe gesät wurden. Die üppige Vegetation in der Krautschicht bietet Mäusen einen guten Lebensraum. Werden Eicheln in diese eingebracht, ist ein Verlust durch Mäuse vorprogrammiert. Saaten sind generell durch Mäuse gefährdet (BIRKEDAL et al. 2009). Es konnte gezeigt werden, dass die Prädation durch Mäuse mit zunehmendem Flächenbewuchs ansteigt (VILLALOBOS et al. 2020).

Der gute Anwuchs in den bearbeiteten Varianten von über 70 % liegt im Vergleich zu Literaturangaben im oberen Bereich. LÖF et al. (2021) konnten eine Überlebensrate von 25 % für eine Eichensaart in einem schwedischen Versuch mit und ohne Zaunschutz feststellen. In beiden Varianten wurden von Mäusen abgebissene Sämlinge beobachtet. DE LOMBAERDE et al. (2020) geben eine Überlebensrate von 50 % nach 2 Jahren an und LÖF et al. (2004b) berichten von 50 bis 90 % überlebenden Eichen nach 4 Jahren. Andere Autoren empfehlen für eine erfolgreiche Eichensaart: eine Durchführung unter Schirm für einen geringen Begleitwuchs (FLEDER 1981); eine geringe Saattiefe für ein schnelles Auflaufen, aber auch nicht zu flach als Schutz vor Fraß (BIRKEDAL et al. 2010; NILSSON et al. 1996b; RÖHRIG 1976); eine Aussaat 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). PREUHSLER et al. (1994) geben für eine Eichensaart von  $380 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  in Frässtreifen unter Kieferschirm nach 3 Jahren eine Anzahl von 19.000 Eichensämlingen an. Im Vergleich dazu war im hier durchgeführten Versuch die Saatmenge 60 % geringer, aber die Anzahl der Eichensämlinge in den bearbeiteten Parzellen war lediglich um 25 % geringer. Zudem ist mit einem Auflaufen von Kiefern timerungsverjüngung zu rechnen, die hier nicht Gegenstand der Untersuchung war, aber Sämlingsdichten von über 30.000 Pflanzen/ha annehmen kann (PREUHSLER et al. 1994), so dass ein früher Bestandesschluss für eine gute Qualitätsentwicklung der Eiche gewährleistet ist (AMMER und DINGEL 1997).

#### 4.3.2 Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf das Höhenwachstum von Eichenkulturen

Fünf von sechs Herkünften zeigten im Hessischen Ried einen deutlichen Vorteil der Bodenbearbeitungsvarianten für den Höhenzuwachs gegenüber der Kontrolle. Dies wird auf eine geringere Konkurrenz durch Begleitvegetation zurückgeführt, was von anderen Autoren bestätigt wird (LÖF et al. 2006; 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) konnten eine sehr flexible Reaktion der Eiche auf Umweltbedingungen nachweisen, wonach der Höhenzuwachs weniger stark durch Konkurrenz beeinflusst wird, als der Biomassezuwachs. Nach JENSEN und LÖF (2017) spiegelt sich dieser Effekt in einem ähnlichen Höhenwachstum unter Konkurrenzbedingungen, bei schlankeren Pflanzen wider. LÖF et al. (2006) geben für einjährige Eichensämlinge nach dem dritten Standjahr eine Höhe von 70 cm in der Kontrolle und 90 cm nach Bodenbearbeitung vor der Pflanzung an. Eine Untersuchung der Trockenbiomassen ergab nach dem dritten Standjahr ein Gewicht von 50 g pro Pflanze in der Kontrolle und von 125 g in der Variante mit vorheriger mechanischer Begleitwuchsregulierung. Dies verdeutlicht, dass nach vorhergehender Bodenbearbeitung die Pflanzen sich deutlich besser entwickelten als ohne vorhergehende Bodenbearbeitung. Vergleicht man die Werte von LÖF et al. (2006) mit denen der einjährigen Sämlinge aus dem Hessischen Ried nach 3 Standjahren, so liegen die Höhen der Kontrollen 10 bis 20 cm unter den Angaben von LÖF et al. (2006). Die Pflanzhöhen der Varianten mit vorheriger Bodenbearbeitung aus dem Hessischen Ried liegen mit Höhen zwischen 30 und 50 cm deutlich unter den Angaben von LÖF et al. (2006). Eine Biomasseanalyse wurde in dieser Untersuchung leider nicht durchgeführt, wäre aber für die Interpretation der Ergebnisse hilfreich gewesen.

Im Ostbraunschweigischen Flachland zeigte die Eiche der Silvafixparzelle trotz der besseren Anwuchsraten nicht das beste Höhenwachstum. LÖF et al. (2004b) 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 zeigte, dass krautige Begleitvegetation, wie sie im



Ostbraunschweigischen Flachland vorherrschte, im Gegensatz zu baumartiger Begleitvegetation keinen Effekt auf das Höhenwachstum hatte (JENSEN und LÖF 2017).

Es scheint, als ob das Wachstum gesäter Eichen von einer intensiven Bodenbearbeitung profitierte. Dies wird auch von anderen Autoren bestätigt, die einen positiven Effekt auf das Wachstum gesäter Eichen durch Bodenbearbeitung und Begleitwuchsregulierung nachweisen konnten (LÖF et al. 2004b; 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 ermittelten Werten von 13 bis 40 cm in Abhängigkeit von Lichtgenuss und Bodenfeuchte (DEVETAKOVIĆ et al. 2019; ERDŐS et al. 2021; VAN HEES 1997). Mit abnehmendem Lichtangebot und abnehmender Bodenfeuchte nimmt auch das Höhenwachstum ab (VAN HEES 1997). Die hier ermittelten Werte sind von daher plausibel, da es sich einerseits um sehr trockene Jahre im Versuchszeitraum handelte und andererseits die Saat unter Schirm erfolgte. Das Wachstum in den Folgejahren verlief moderat. Nach drei Vegetationsperioden 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. ERDŐS et al. (2021) konnten nur ein geringen Höhenzuwachs 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 weniger als 25 cm und begründen dies mit einem verstärkten Wurzelwachstum der Eiche im Sämlingsstadium, was BEBRE et al. (2020) bestätigen.

#### 4.3.3 Der Einfluss von Bodenbearbeitungen auf das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen

Auf den Parzellen mit Bodenbearbeitung im Hessischen Ried konnte im Vergleich zur Kontrolle ein besseres Wurzelhalsdurchmesserwachstum beobachtet werden. Die Bodenbearbeitung beider Verfahren lockerte den Oberboden und beseitigte die Konkurrenzvegetation. Dadurch war eine gute Ausführung der Pflanzung gewährleistet und die Pflanzen konnten den Boden leichter durchwurzeln. Auf der Kontrollparzelle minderte die Konkurrenzvegetation – im überwiegenden Spätblühende Traubenkirsche – das Durchmesserwachstum, was mit einer geringeren Wurzelmasse einhergeht (ANDERSEN 2004). Ein überlegenes Wurzelhalsdurchmesserwachstum gegenüber den Bodenbearbeitungsverfahren konnte bei keiner der Herkünfte auf der Kontrollparzelle festgestellt

werden. Die Bodenlockerung wird nicht als Hauptkriterium für die Überlegenheit im Wachstum angesehen, da sandiges Ausgangssubstrat nicht verdichtungsempfindlich ist: Eher wirkt der Effekt der Konkurrenzreduktion. LÜPKE (1982) konnte für Eichensämlinge ohne Begleitvegetation nach vier Vegetationsperioden einen fast doppelt so großen Wurzelhalsdurchmesser ermitteln im Vergleich zu einer Variante mit Begleitvegetation. LÖF et al. (2006) geben für einjährige Eichensämlinge in einem Bodenbearbeitungsversuch in Südschweden Wurzelhalsdurchmesser von 9 mm in der unbehandelten Kontrolle nach 3 Wuchsperioden an. Wurde eine mechanische Begleitwuchsreduzierung durchgeführt, betrug der Wurzelhalsdurchmesser 11,5 mm. Die in dieser Studie verwendeten einjährigen Sämlinge aus dem Hessischen Ried wiesen in den Varianten mit mechanischer Begleitwuchsregulierung vergleichbare Werte auf, jedoch lagen die Zuwächse der Kontrolle über denen von LÖF et al. (2006). Dies kann auf die regelmäßige Mahd der Kulturen im Hessischen Ried zurückgeführt werden. Dadurch war die Konkurrenz der Begleitvegetation geringer als bei LÖF et al. (2006), die vermutlich nicht gemäht hatten, da sie dazu keine Angaben machten. JENSEN und LÖF (2017) bestätigen diese Beobachtung und weisen darauf hin, dass besonders bei Gehölzkonkurrenz das Wachstum des Wurzelhalsdurchmessers frühzeitig abnimmt.

Nach DASSOT und COLLET (2021) besteht eine enge Korrelation zwischen der Wurzelentwicklung und dem Wurzelhalsdurchmesser. Dieser Zusammenhang zeigt für den Standort des Ostbraunschweigischen Flachlands, dass die Mulchbearbeitung die schlechteste Wurzelentwicklung aufwies. Dies kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen Bodenverdichtungen durch das ganzflächige Befahren während des Mulchens, zum anderen eine schlechtere Pflanzung durch die Mulchauflage. Die Variante, bei der der Mineralboden mit Silvafix gelockert wurde, zeigte jedoch das beste Wachstum des Wurzelhalsdurchmessers. Durch die Auflockerung konnten die Pflanzen den Boden besser durchdringen und ein größeres Wurzelsystem ausbilden (DASSOT und COLLET 2021). Vermutlich wirkten beide Effekte, da die Werte der Kontrollvariante zwischen den beiden Varianten lagen.

Bei der Wurzelhalsdurchmesserentwicklung der Eichensaat im Hohen Fläming erreichten die Pflanzen der Streifenpflugbearbeitung mit 4 mm im Median nicht die von RUMPF (2007) ermittelten 5 mm nach 3 Jahren. Die der Silvafixbearbeitung jedoch schon, was

wie 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 den Faktor 2 bis 3 über den hier modellierten Werten.

#### 4.3.4 Alternative Eichenverjüngungsverfahren

Neben den beschriebenen Kulturverfahren stehen den Waldbauern weitere Möglichkeiten zur Verfügung, um neue Eichenbestände zu begründen. Die Königsdisziplin ist die Eichennaturverjüngung. Diese wurde im 19. Jahrhundert im Spessart erfolgreich, aber unter hohem Aufwand, betrieben (MÖLDER et al. 2017). Die Vorteile der Naturverjüngung liegen auf der Hand: eine ungestörte Wurzelentwicklung und epigenetisch an den Standort angepasstes Pflanzgut. Bei Eichenpflanzungen sah bereits BURCKHARDT (1870) in der Verwendung kleiner Pflanzensortimente mit weitgehend vollständigen Wurzeln den großen Vorteil, dass diese Pflanzen insbesondere auf sandigen Bodensubstraten rasch tiefere Bodenschichten erschließen können. Mit zunehmender Pflanzengröße steigt das Risiko von Wurzeldeformationen, die durch die Pflanzung verursacht werden (DAHMER 1998; NÖRR und MÖSSMER 2003; ROTHKEGEL et al. 2013). Für Eichenkulturen, die bei ungestörter Wurzelentwicklung in der Lage sind Stauhazone zu erschließen (FEICHT und GEYER 1992; KREUTZER, K. 1961), sollten Pflanzensortimente mit einem intakten Hauptwurzelwerk verwendet werden. Da bereits einjährige Sämlinge in der Regel beim Roden aus dem Saatbeet unterschritten werden, ist eine intakte Pfahlwurzel nur bei Saaten oder eben Naturverjüngungen zu erwarten.

Heutzutage sind Naturverjüngungen bei Eiche die Ausnahme. Dies liegt zum einen daran, dass Eichennaturverjüngung zwar für möglich gehalten wird, aber das Wissen für eine erfolgreiche Umsetzung fehlt (KÖHLER et al. 2020). Zum anderen wurde die Hypothese aufgestellt, dass zu Beginn des 20. Jahrhunderts ein Mehltaupilz nach Europa eingeschleppt wurde, der die Vitalität der Naturverjüngung beeinträchtigt und diese in den Jahren nach dem Auflaufen wieder absterben lässt (DEMETER et al. 2021). Dennoch gibt es Berichte über gelungene Eichennaturverjüngungen. In einer Untersuchung zur Naturverjüngung der Eiche im Pfälzerwald mit verschiedenen Hiebsformen zeigte der schnell geräumte Großschirmschlag gute Ergebnisse, während vom Femelschlag zur Initiierung

einer Eichennaturverjüngung abgeraten wird (LÜPKE 2008). Eine besondere Form der Eichennaturverjüngung stellt die sogenannte Hähersaat in Kiefernbeständen dar. Dabei handelt es sich um Eichen, die aus nicht genutzten Wintervorräten des Eichelhähers aufkommen. Im Herbst versteckt der Eichelhäher einzelne Eicheln, oft entlang von Strukturen wie Wegen oder Blößen. Vermutlich nutzt der Eichelhäher diese Strukturen wegen der besseren Auffindbarkeit der Verstecke (VULLMER und HANSTEIN 1995). Eine Übernahme von Hähersaat erscheint jedoch nur sinnvoll, wenn diese in Blößen heranwächst. Ansonsten wird von mangelnder Qualität und zu hohen Hiebsopfern im Hauptbestand berichtet (FISCHER 1993). Eine ökonomische Überlegenheit von Eichenbeständen aus Hähersaat gegenüber Eichenbeständen aus Kultur konnte nicht nachgewiesen werden (STIMM und KNOKE 2004).

Untersuchungen zum Einfluss des Wildes auf die Baumartenzusammensetzung kommen zu dem Ergebnis, dass die Eiche bevorzugt verbissen wird (AMMER 1996; HAGEN et al. 2020). Eichen, die noch nicht aus dem Äser herausgewachsen sind, müssen daher bei nicht angepassten Wildbeständen z. B. durch Zäune vor übermäßigem Verbiss geschützt werden. Verbisschutzmaßnahmen stellen einen erheblichen Kostenfaktor bei der Eichenverjüngung dar.

Bestandesbegründungen mit Eichengroßpflanzen kommen ohne Verbisschutzmaßnahmen aus, da die Pflanzen zum Pflanzzeitpunkt bereits aus dem Äser gewachsen sind (HEUKAMP 1994). Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Eichengroßpflanzen stellt ein Verzicht von Bodenbearbeitungsmaßnahmen zur Beseitigung von Schlagabraum (SCHNEIDER 1993) oder zur Begleitwuchsregulierung bei krautiger Konkurrenzvegetation dar (HEUKAMP 1994), da die Pflanzen aufgrund ihrer Größe ausreichend Licht erhalten. PAMPE (2001) weist in seiner Untersuchung zur Verwendung von Großpflanzen auf das erhöhte Anwuchsrisko hin. Da Eichengroßpflanzen und deren Pflanzung teurer sind als kleinere Eichensortimente, werden Eichengroßpflanzen in weiteren Verbänden gepflanzt. Weitere Pflanzverbände gehen zu Lasten der Qualität. So berichten KLEINSCHMIT et al. (KLEINSCHMIT et al. 1978) und RUSACK (1988) von apfelbaumartigem Wuchs bei Weitverbänden unter 2.000 Pflanzen·ha<sup>-1</sup>. Für einen befriedigenden Wuchs werden Ausgangspflanzenzahlen von mindestens 5.000 Pflanzen·ha<sup>-1</sup> empfohlen (KLEINSCHMIT et al. 1978; RENNER und RÖHRIG 1988). Aufgrund der geringeren Pflanzenzahlen in Verbindung

mit dem erhöhten Anwuchsrisiko kann der Einsatz von Großpflanzen nur für Sondersituationen, wie z. B. kleine Flächengrößen, von PAMPE (2001) empfohlen werden.

Um den Kostendruck bei der Kulturbegründung zu mindern, wurden in der jüngeren Vergangenheit Überlegungen und Versuche angestellt, die Anzahl der Ausgangspflanzen durch Eichentrupp- oder Eichennesterpflanzungen zu reduzieren. Die Idee der Eichentrupppflanzung wurde von GOCKEL (1995) aufgegriffen, der mithilfe einer Computersimulation eine Machbarkeitsstudie durchführte. Das Ergebnis war, dass Trupps von 27 Eichen mit einer Pflanzenzahl von  $2.900 \text{ Stück} \cdot \text{ha}^{-1}$  eine gleich gute Entwicklung erwarten ließen wie eine Eichenkultur im  $1 \times 1 \text{ m}$  Verband mit  $10.000 \text{ Pflanzen} \cdot \text{ha}^{-1}$  (GOCKEL 1995). Aufgrund dieser positiven Aussichten wurden Versuchsflächen mit Trupp- und Nesterpflanzungen angelegt. Eine Metastudie zeigte für die Nesterpflanzung ein ernüchterndes Bild, in dem von hohen Ausfällen, einer schlechteren Wuchsleistung und einer schlechteren Wuchsform im Vergleich zur Reihenpflanzung berichtet wird (SAHA et al. 2012). Dies wird mit dem engen Pflanzabstand von  $0,2 \text{ m}$  zwischen den Pflanzen in einem Nest begründet. Im Gegensatz dazu zeigte die Trupppflanzung einen gleichwertigen oder sogar besseren Wuchs als die konventionelle Reihenpflanzung (SAHA et al. 2012). PETERSEN (2007) weist jedoch darauf hin, dass Trupppflanzungen kein Selbstläufer sind und ein hoher Kulturpflegeaufwand betrieben werden muss, um die Weichlaubholzkonkurrenz auf die Eichentrupps zu steuern. Dies dürfte der ausschlaggebende Grund dafür sein, dass die so vielversprechende Trupppflanzung noch keinen Einzug in die forstliche Praxis gefunden hat, da bei den heutigen Reviergrößen von ca.  $2.000$  bis  $4.000 \text{ ha}$  dieser Pflegeaufwand vom Forstpersonal vor Ort nicht geleistet werden kann.

#### 4.4 Entscheidungshilfe Bodenbearbeitung

Die vorliegende Untersuchung bewertet die Auswirkungen von Bodenbearbeitungen auf den Nährstoffhaushalt und den Erfolg von Eichenkulturen. Allein unter diesen Gesichtspunkten konnte gezeigt werden, dass aufgrund der Vielfalt der forstlichen Standorte die Bodenbearbeitungen unterschiedliche Wirkungen zeigen. Im Folgenden soll eine Entscheidungshilfe bei der Wahl von Bodenbearbeitungsverfahren auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse vorgestellt werden. Eine schematische Übersicht ist in Abbildung 35 dargestellt.

Bei Kulturhindernissen, wie z. B. dichtem Schlagabraum, konkurrenzstarker Begleitvegetation oder mächtigen Humusauflagen, ist eine Bodenbearbeitung oft unumgänglich, um die gewünschte Verjüngung zu etablieren. Die Arbeitsverfahren sind dem Kulturhindernis entsprechend zu wählen. So sind bei mächtigen Humusauflagen Verfahren zu wählen, die lediglich den Mineralboden freilegen. Bei konkurrenzstarker Begleitvegetation ist dagegen ein intensiveres Bodenbearbeitungsverfahren zu wählen, das die Begleitvegetation wirksam reduziert. Wird die Notwendigkeit einer Bodenbearbeitung festgestellt, sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

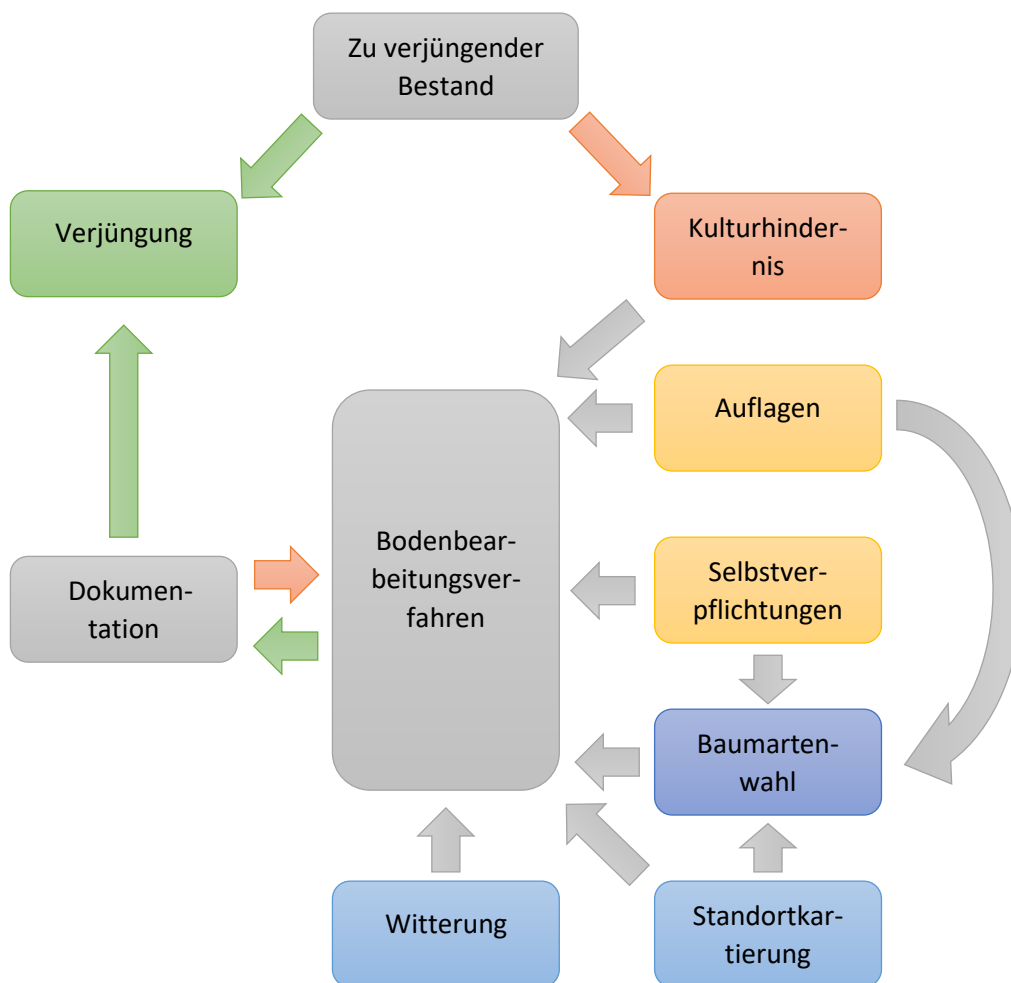


Abbildung 35: Schematische Übersicht für eine Unterstützung bei der Wahl von Bodenbearbeitungsverfahren.

---

### Auflagen & Selbstverpflichtungen

Ein geeignetes Bodenbearbeitungsverfahren berücksichtigt die Anforderungen der geltenden Gesetze und Verordnungen. So kann es z. B. aufgrund von Naturschutzverordnungen zeitliche Beschränkungen für Eingriffe geben oder bestimmte Bodenbearbeitungsverfahren sind unzulässig, weil Eingriffe in den Mineralboden aus kulturhistorischen Gründen verboten sind. Darüber hinaus können Auflagen auch die Baumartenwahl beeinflussen (z. B. zur Erhaltung der Habitatkontinuität). Neben den Auflagen unterliegen Forstbetriebe häufig Selbstverpflichtungen. Bodenbearbeitungsverfahren dürfen nicht im Widerspruch zu Selbstverpflichtungen wie Zertifizierungen, Förderprogrammen oder Vertragsnaturschutz stehen. Dies kann einerseits direkt die Bodenbearbeitungsverfahren eingeschränken, andererseits auch indirekt, da die Selbstverpflichtungen die Baumartenwahl einschränken.

### Forstliche Standortkartierung & Witterung

Eine forstliche Standortkartierung ist für die Wahl einer standortgerechten Bodenbearbeitung unerlässlich. Liegt keine forstliche Standortkartierung vor, sollte diese in Auftrag gegeben werden. Liegt eine forstliche Standortkartierung vor, können daraus standortgerechte Baumarten abgeleitet werden. Darüber hinaus geben Substratinformationen Auskunft über die Verdichtungsempfindlichkeit und Stabilität der zu bearbeitenden Böden. So sollten bei verdichtungsempfindlichen Böden Bodenbearbeitungsverfahren gewählt werden, die ohne vollflächige Befahrung auskommen, wie z. B. baggergestützte Verfahren. Darüber hinaus gibt eine Standortkartierung auch Aufschluss darüber, ob tiefgreifende Bodenbearbeitungsmaßnahmen notwendig sind, um das Potential eines Standorts zu erschließen. Denkbar wäre hier das Aufbrechen von Ortsteinschichten.

Die Witterung hat einen direkten Einfluss auf die Durchführung der Bodenbearbeitung. Sind die Böden nach Niederschlägen zu nass und somit nicht tragfähig, müssen die Maßnahmen verschoben oder alternative Verfahren gewählt werden.

### Baumartenwahl

In Abhängigkeit von der Baumartenwahl, den Pflanzensortimenten und der Pflanzverbänden ist das Bodenbearbeitungsverfahren so zu wählen, dass es den Anforderungen der ökologischen Produktion gerecht wird. So sind bei engen Pflanzverbänden und kleinen Pflanzensortimenten eher intensivere Bodenbearbeitungsverfahren zu wählen, als bei weiten Pflanzverbänden und größeren Pflanzensortimenten.

### Bodenbearbeitungsverfahren

Mit einem relativ leichten Bagger kann die Bodenbearbeitung von der Rückegasse aus bodenschonend durchgeführt werden. Durch die Wahl des Anbaugeräts und der Arbeitsweise wird die benötigte Intensität der Bodenbearbeitung erzielt. So kann die Arbeitsweise des Baggers durch eine teilflächige Bearbeitung nährstoffschonend gestaltet werden. Des Weiteren kann der Schlagabraum flächig abgelagert werden, um eine Nährstoffanreicherung auf der Rückegasse zu vermeiden. Dies kann durch plätzeweises Räumen oder durch Anlage von Räumstreifen erfolgen. Darüber hinaus stellt der Bagger eine Plattform mit vielfältigen Anbaumöglichkeiten dar. So kann durch den Anbau eines Streifenpflugs oder auch von Mulch- und Fräsaggregaten an den Bagger der Vorteil einer teilflächigen Befahrung durch den Bagger mit dem Vorteil einer nährstoffschonenden Bodenbearbeitung der regional etablierten Bodenbearbeitungsverfahren kombiniert werden. Hierdurch ist auch eine gute Anpassung der Bearbeitungsintensität an die jeweilige Intensität der Begleitvegetation möglich.

Es empfiehlt sich der Einsatz von Fachfirmen, die im Vorfeld auf die Besonderheiten der Bodenbearbeitung hingewiesen werden, damit die Arbeiten fachkundig ausgeführt werden.

### Dokumentation

Nach der Entscheidung für ein Bearbeitungsverfahren steht die Bewertung in der Praxis aus. Es muss beurteilt werden, ob das Bodenbearbeitungsverfahren standortangepasst ist und die Anforderungen tatsächlich erfüllt oder ob es Mängel aufweist. Aufgrund der Vielfalt der forstlichen Standorte ist es denkbar, dass in einem Forstrevier mehrere Bo-



denbearbeitungsverfahren geeignet sind. So könnte auf sandigen Standorten das Streifenpflügen und auf verdichtungsempfindlichen Lehmstandorten das Silvafixverfahren gute Ergebnissen erzielen.

Die Verfahrensbeurteilung beginnt mit dem Start der Bodenbearbeitung und ist regelmäßig zu kontrollieren. Entspricht das Verfahren den Anforderungen, kann die Arbeit fortgesetzt werden. Weist das Bodenbearbeitungsverfahren hingegen Mängel auf, ist die Arbeit einzustellen und ein anderes Verfahren zu wählen. Dabei darf das Ziel einer erfolgreichen Verjüngung nicht aus den Augen verloren werden. So kann ein Verfahren auch noch nach Jahren als unzureichend beurteilt werden, wenn der Kulturerfolg ausbleibt.

#### 4.5 Stärken und Limitierungen

##### 4.5.1 Stärken

Eine Stärke dieser Studie ist der kurze Zeitraum von 2 Wochen, in dem die Bodenbearbeitung in allen Regionen durchgeführt wurde. Dadurch konnten die Untersuchungen in allen Regionen zum selben Zeitpunkt beginnen. Zudem hat sich der hohe Aufwand bei der Silvafixbearbeitung gelohnt: Durch den Einsatz desselben Fahrers und desselben Baggers in allen Regionen war eine identische Ausführung der Flächenräumung gewährleistet. So konnte gezeigt werden, dass Unterschiede in der Intensität der Flächenräumung, die im Hohen Fläming die Humusaufgabe vollständig entfernte, im Ostbraunschweigischen Flachland jedoch nicht, auf das Räumverfahren zurückzuführen sind. Diese Unterschiede in der Räumintensität sind also keine unerwünschten Unwägbarkeiten durch eine fehlerhafte Ausführung aufgrund unterschiedlicher Fahrer oder desgleichen.

Ferner kommt der Einsatz von Mikrokosmen-Lysimetern anstelle von Saugkerzen der Studie zugute. Aufgrund des definierten Raumes ist keine aufwendige Wasserhaushaltsmodellierung, wie bei der Verwendung von Saugkerzen, erforderlich. Ein weiterer Vorteil von Mikrokosmen-Lysimetern gegenüber Saugkerzen ist, dass sie in sandigen Böden nahe der Bodenoberfläche eingesetzt werden können. Saugkerzen gewinnen unter diesen Bedingungen kaum Bodenlösung, da das Niederschlagswasser durch die Grobporen

des Sandbodens zu schnell versickert. Darüber hinaus konnte ein Zusammenhang zwischen Sickerwasserfracht und Vegetation hergestellt werden, was mit Saugkerzen so nicht möglich gewesen wäre. Durch die Bestimmung der Nährstoffvorräte der Mikrokosmen-Lysimeter konnte darüber hinaus ein direkter Bezug zu den Nährstofffrachten hergestellt werden. Dies wäre beim Einsatz von Saugkerzen aufgrund des fehlenden Volumenbezugs nicht möglich gewesen.

#### 4.5.2 Limitierungen

Feldversuche unterliegen zahlreichen Einschränkungen. Einige liegen in der Natur der Sache, z. B. kann das Wetter nicht beeinflusst werden. Aufgrund der fehlenden forstpraktischen Akzeptanz der regionalen Standardverfahren, konnten die Bodenbearbeitungsverfahren Mulchen, Fräsen und Streifenpflügen nur in der jeweiligen Region durchgeführt werden, so dass Wiederholungen in den anderen Regionen fehlten und eine überregionale Auswertung für diese Bodenbearbeitungsverfahren nicht möglich war. Neben den heterogenen Bodenbearbeitungsverfahren kamen ferner unterschiedliche Bestandesbegründungsverfahren (Saat *versus* Pflanzung), Pflanzenherkünfte und Pflanzverfahren in den verschiedenen Regionen zur Anwendung. Es war konsequent und aus praktischer Sicht logisch, das jeweils ortsübliche, regionale Verfahren in all seinen Facetten zu übernehmen, um Aussagen über dessen Wirkung treffen zu können. Allerdings führte das Fehlen von Wiederholungen der regionalen Verfahren zu Problemen bei der wissenschaftlichen Auswertbarkeit der Ergebnisse und die Vielfalt der Unterschiede zwischen den Verfahren erschwerte die Ursachenanalyse.

Zudem stellen die Kontrollen dieser Studie keine ungestörten Waldbestände ohne Eingriff dar. Eine Beurteilung der Höhe der Nährstofffrachten im Vergleich zu keinem Eingriff ist daher nicht möglich. Aus dem gleichen Grund kann auch keine Aussage darüber getroffen werden, in welchem Zeitraum die Nährstofffrachten wieder auf das Niveau eines ungestörten Bestandes absinken würden. Dieser Umstand ist der Tatsache geschuldet, dass die vorliegende Untersuchung zum Ziel hatte, den Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf die Nährstofffrachten und den Anwuchserfolg von Eichenkulturen zu untersuchen und demnach als Kontrolle eine geräumte und mit Eichen bepflanzte Fläche ohne Bodenbearbeitung benötigt wurde.

---

Weiterhin erscheint ein Untersuchungszeitraum von 2 Jahren zu kurz, um alle Nährstofffrachten zu erfassen. Für gut mit Nährstoffen versorgte Standorte gibt es Hinweise, dass die Nährstofffrachten bereits nach 2 Jahren nicht mehr erhöht sind (GUNDERSEN et al. 2006). Hingegen kann es auf schwach mit Nährstoffen versorgten Standorten 5–10 Jahre dauern (GUNDERSEN et al. 2006). Da es sich bei dieser Untersuchung jedoch um einen Verfahrensvergleich handelt, ist eine Bewertung der Verfahren hinsichtlich ihrer Nährstoffnachhaltigkeit dennoch möglich.

Auf den mit dem Silvafix bearbeiteten Flächen konnten aus praktischen Gründen nur in den geräumten Bereichen, nicht aber auf den Rückegassen mit Schlagabraumanreicherung, Mikrokosmen-Lysimeter eingebaut werden. Die Rückegassen mit Schlagabraumanreicherung nehmen mit 20 % allerdings einen erheblichen Anteil der Gesamtfläche ein. Zudem gab es Hinweise auf hohe Nährstofffrachten in diesen Bereichen. Somit wäre es sinnvoll gewesen, eine Methode zu entwickeln, die eine regelmäßige Messung von Nährstofffrachten auch in den Rückegassen mit Schlagabraumanreicherung ermöglicht.

## 5 Schlussfolgerungen

*Hypothese I: Bodenbearbeitungen mit den Standardverfahren (Fräsen, Mulchen und Streifenpflügen) führen zu höheren Nährstofffrachten in der Bodenlösung des Oberbodens als keine Bodenbearbeitung. Das Silvafixverfahren ist nährstoffnachhaltig, da es geringere Nährstofffrachten in der Bodenlösung des Oberbodens hervorruft, als die Standardverfahren.*

Es konnte nicht bestätigt werden, dass die regional etablierten Bodenbearbeitungsverfahren mit höheren Nährstofffrachten einhergehen als keine Bodenbearbeitung. Bodenbearbeitungen, wie Mulchen und Fräsen, regen zwar die Mineralisation an, doch die Einarbeitung von organischem Material mit einem weiten C:N-Verhältnis führt zu einer N-Immobilisierung und damit zu einer Verringerung der Nährstofffrachten. Dies gilt nicht für sulfatgetriebene Nährstofffrachten. Zwar wurden die Sulfatfrachten durch Mulchen oder Fräsen erhöht, das hatte allerdings nur geringe Auswirkungen auf die Frachten der untersuchten Nährstoffe (Ca, Mg, K). Ursächlich gehen hohe Sulfatkonzentrationen in der Bodenlösung auf die noch immer im Waldboden gespeicherten sauren Einträge der vergangenen Jahrzehnte zurück. Beim Streifenpflügen wurden in den Bereichen der Pflugbalken erhöhte Nährstofffrachten, vor allem von Nitrat, festgestellt. Die  $N_{\min}$ -Analysen deuten jedoch darauf hin, dass die Begleitvegetation in den Bereichen zwischen den Pflugstreifen in der Lage ist, die Nährstoffe aufzunehmen. Es lässt sich nicht uneingeschränkt bestätigen, dass das Silvafixverfahren geringere Nährstofffrachten hervorruft als die Standardverfahren. Zwar sind die absoluten Frachten geringer als bei den regionalen Standardverfahren, allerdings sind die relativen Frachten bezogen auf die Vorräte am höchsten. Darüber hinaus lassen die Ergebnisse der  $N_{\min}$ -Analysen unter den Schlagabraumwällen große Nährstoffauswaschungen vermuten. Somit ist die Hypothese I abzulehnen.

*Hypothese II: Bodenbearbeitungen und folgende Nährstofffrachten haben keinen messbaren Einfluss auf die Nährstoffvorräte der Standorte.*

Die Annahme, dass Bodenbearbeitungen und folgende Nährstofffrachten keinen messbaren Einfluss auf die Nährstoffvorräte der Standorte haben, ließ sich nicht für jedes Bodenbearbeitungsverfahren bestätigen. Flächige Bodenbearbeitungen, bei denen die

Nährstoffe am Standort verbleiben, wie Fräsen oder Mulchen, zeigten weder durch die Bodenbearbeitung selbst noch durch folgende Nährstofffrachten eine Abnahme der Nährstoffvorräte. Bodenbearbeitungen mit dem Streifenpflug verminderten die Nährstoffvorräte in der Pflugsohle und erhöhten die Nährstoffvorräte in den Pflugbalken. Aufgrund der kleinräumigen horizontalen Verlagerung bei der Streifenpflugbearbeitung war in der Gesamtbetrachtung keine Veränderung der Nährstoffvorräte festzustellen. Die Flächenräumung mit dem Silvafix ging mit einer großflächigen horizontalen Nährstoffverlagerung von der Kulturfläche auf die Rückegassen einher. Auf armen Standorten war dieser Effekt stärker als auf reichen Standorten. Darüber hinaus waren die nachfolgenden Nährstofffrachten relativ am höchsten. Somit kann die Hypothese für die regionalen Standardverfahren bestätigt werden, nicht aber für das Silvafixverfahren.

*Hypothese III: Bodenbearbeitungen begünstigen die Bodenwasserspannung. Das Silvafixverfahren hat eine ebenso günstige Wirkung auf die Bodenwasserspannung wie die Standardverfahren.*

Bodenbearbeitungen mit einer effektiven Reduktion der Begleitvegetation waren auf trockenstressgefährdeten Böden (Hoher Fläming und Hessisches Ried) in der Lage, das Trockenstressrisiko für Forstkulturen in den ersten beiden Jahren durch Verbesserung der Bodenwasserspannung zu senken und die Wasserinfiltrationsrate zu steigern. Das Silvafixverfahren minderte das Trockenstressrisiko im Vergleich zu den anderen Bodenbearbeitungsverfahren ähnlich effektiv, verbesserte aber die Wasserinfiltrationsrate in den Wintermonaten nicht so stark wie die regionalen Standardverfahren. Im Ostbraunschweigischen Flachland traten im Beobachtungszeitraum keine Trockenstressereignisse auf und die Bodenbearbeitungen zeigten keinen Vorteil hinsichtlich der Bodenwasserspannung gegenüber der Kontrolle.

*Hypothese IV: Bodenbearbeitungen begünstigen die Überlebenswahrscheinlichkeit von Eichenkulturen. Das Silvafixverfahren ist gleich gut geeignet wie die Standardverfahren.*

Die Hypothese, dass Bodenbearbeitungen die Überlebenswahrscheinlichkeit von Eichenkulturen begünstigt, wurde bestätigt. Ebenfalls wurde die gleich gute Eignung des Silvafix im Vergleich zu den Standardverfahren bestätigt. Für Eichensaaten zeigte sich, dass bei ausgeprägter Konkurrenzvegetation eine Bodenbearbeitung notwendig ist, da

ansonsten mit einem Totalausfall gerechnet werden muss. Bei Eichenpflanzungen fördern Bodenbearbeitungen die Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Konkurrenzstärke der Begleitvegetation. Bei konkurrenzschwacher Begleitvegetation (wie im Ostbraunschweigischen Flachland) ist keine Bodenbearbeitung erforderlich.

*Hypothese V: Bodenbearbeitungen begünstigen das Höhenwachstum von Eichenkulturen. Das Silvafixverfahren begünstigt das Höhenwachstum von Eichenkulturen in gleichem Maße wie die Standardverfahren.*

Die Hypothese, dass Bodenbearbeitungen das Höhenwachstum von Forstkulturen begünstigen, ließ sich bestätigen, wenn auch nicht in allen Fällen. Im Ostbraunschweigischen Flachland zeigte die Kontrolle das beste Höhenwachstum; im Hessischen Ried war die Kontrolle gleich auf mit dem Silvafixverfahren. Eine Über- oder Unterlegenheit des Silvafix gegenüber den Standardverfahren kann nicht generell bestätigt werden. Es scheint, als ob das Silvafixverfahren gegenüber dem Mulchen und Streifenpflügen überlegen ist, aber gegenüber dem Fräsen unterlegen.

*Hypothese VI: Bodenbearbeitungen begünstigen das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen. Das Silvafixverfahren begünstigt das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen in gleichem Maße wie die Standardverfahren.*

Gegenüber den Kontrollen wiesen die Forstkulturen nach Bodenbearbeitung ein besseres Wurzelhalsdurchmesserwachstum auf. Die Hypothese, dass Bodenbearbeitungen das Wurzelhalsdurchmesserwachstum von Eichenkulturen begünstigen, kann somit bestätigt werden. Allerdings zeigte sich das Silvafixverfahren gegenüber dem Fräsen unterlegen und gegenüber dem Mulchen und den Pflugstreifen überlegen. Dies wird neben der Reduktion von Begleitvegetation auf die Bodenlockerung zurückgeführt. Beim Fräsen wird der Boden tiefer gelockert als beim Silvafixverfahren. Die Silvafixbehandlung lockert den Boden tiefer als Mulchen oder Streifenpflügen.

Alles in allem sind die Bodenbearbeitungsverfahren Mulchen und Fräsen auf den untersuchten Standorten als nährstoffnachhaltig zu bewerten. Außerdem eignen sie sich für eine Regulierung von konkurrenzstarker Begleitvegetation. Unter dem Gesichtspunkt des Bodenschutzes ist ein Einsatz der Verfahren aufgrund der flächigen Befahrung und des intensiven Eingriffs allerdings sorgfältig zu prüfen. Auch der Streifenpflug ist trotz

kleinräumiger Nährstoffverlagerung als nährstoffnachhaltig einzustufen. Zudem verspricht das Streifenpflügen eine gute Kulturentwicklung bei einem mäßigen Vorkommen von Begleitvegetation. Durch die teilflächige, oberflächliche Bearbeitung mit leichten Schleppern ist das Verfahren zumindest etwas bodenschonender als die vollflächigen Verfahren Mulchen und Fräsen. Dennoch ist bei ungünstiger Witterung mit Bodenverdichtungen zu rechnen. Das Silvafixverfahren reduzierte in allen Regionen die Begleitvegetation effektiv und förderte die Kulturentwicklung. Es ist jedoch das einzige Verfahren, das nicht als nährstoffnachhaltig bewertet werden kann. Dieses Verfahren geht mit erheblichen Nährstoffverlagerungen auf die Rückegasse einher und beeinträchtigt dadurch die Leistungsfähigkeit des Standortes. Darüber hinaus ist in den Ablagerungsbereichen mit einer erhöhten Nährstoffauswaschung zu rechnen. Der Einsatz des Silvafix' sollte daher auf schwach nährstoffversorgten Standorten vermieden werden, insbesondere wenn ein Verbleib der Humusaufgabe auf der Fläche nicht gewährleistet werden kann (z. B. aufgrund eines Graswurzelfilzes). Auf der anderen Seite ist das Silvafixverfahren das bodenschonendste der untersuchten Bodenbearbeitungsverfahren, da der Bagger von der Rückegasse aus arbeitet und die Fläche nicht befahren wird. Um diesen Konflikt aufzulösen (Nährstoffnachhaltigkeit *versus* Bodenschutz), sollte ein neues Aggregat für den Baggeranbau entwickelt werden, das in seiner Arbeitsweise dem Streifenpflug ähnelt. Hierdurch wären sowohl die Anforderungen des Bodenschutzes (keine flächige Befahrung) als auch der Nährstoffnachhaltigkeit erfüllt.

Bodenbearbeitungen sind für Saaten in Beständen mit einer flächigen, konkurrenzstarken Bodenvegetation unumgänglich. Eine ganzflächige Bearbeitung ist nicht zwingend erforderlich. In Beständen mit konkurrenzschwacher Begleitvegetation (Ostbraunschweiges Flachland) ist eine Bodenbearbeitung vor der Kulturbegründung durch Pflanzung nicht zwingend erforderlich, in Beständen mit konkurrenzstarker Begleitvegetation (Hessisches Ried) hingegen schon. Daraus lässt sich ableiten, dass mit zunehmender Konkurrenzkraft der Begleitvegetation zunehmend intensivere Bearbeitungsverfahren zu wählen sind. Die Begleitvegetation stellt jedoch eine Senke für Nährstofffrachten dar. Um die Nährstofffrachten zu mindern, bietet sich bei ausbleibender Begleitvegetation die Einsatz einer Nutzpflanzendecke an.

---

Ich möchte diese Arbeit mit einem Zitat von Möller (1922, zitiert nach Huss (1990)) schließen: „... es ist uns keinerlei Eingriff in den Wald möglich, ohne daß wir damit neben den von uns unmittelbar verfolgten Zwecken zugleich zahllose andere Wirkungen auslösen, deren Folgen wir gar nicht übersehen, die wir nur mühsam und teilweise durch strenge Beobachtung allmählich kennenlernen können. ...“ Wie das Zitat zeigt, war man sich bereits vor über 100 Jahren der Komplexität des Ökosystems Wald bewusst. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass ein vermeintlich gut gemeinter Eingriff in den Boden durch Nährstoffverlagerung erhebliche negative Auswirkungen auf das Waldökosystem haben kann. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren konnten durch „strenge“ Beobachtung herausgearbeitet und ein praxistaugliches Alternativverfahren skizziert werden.



## 6 Literatur

- ABELE, G. und H. LIESER (1991): Räumrechen am Bagger zur Schlagabraumbeseitigung. In: AFZ 46 (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.
- ALBRECHT, A., M. HANEWINKEL, J. BAUHHUS und U. KOHNLE (2012): How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. In: *European Journal of Forest Research* 131 (1): 229–247.
- 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.
- ALVAREZ-URIA, P. und C. KÖRNER (2007): Low temperature limits of root growth in deciduous and evergreen temperate tree species. In: *Functional Ecology* 21 (2): 211–218.
- AMMER, C. (1996): Impact of ungulates on structure and dynamics of natural regeneration of mixed mountain forests in the Bavarian Alps. In: *Forest Ecology and Management* 88 (1–2): 43–53.
- AMMER, C., P. BALANDIER, N. S. BENTSEN, L. COLL und M. LÖF (2011): Forest vegetation management under debate: an introduction. In: *European Journal of Forest Research* 130 (1): 1–5.
- AMMER, C. und C. DINGEL (1997): Untersuchungen über den Einfluß starker Weichlaubholzkonzurrenz 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.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (Hrsg.) (2016): Forstliche Standortaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching bei München.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTWIRTSCHAFTLICHER LOHNUNTERNEHMER NIEDERSACHSEN E.V. (Hrsg.) (2020): AfL-Info 2020/21: Richtpreise, Tarife, Kalkulation, Adressen. Göttingen.

- 
- AREL-BUNDOCK, V. (2022): Marginal effects. Internet: <https://vincentarelbundock.github.io/marginaleffects/articles/marginaleffects.html#marginal-effect-at-the-mean-mem> (19.10.2022).
- ARNOLD, J. B. (2021): ggthemes: Extra themes, scales and geoms for „ggplot2“. Internet: <https://CRAN.R-project.org/package=ggthemes> (24.11.2021).
- ARNOLD, K.-D. (1982): Ein Versuch zur humuspflughchen Bodenbearbeitung. In: Der Forst- und Holzwirt (20): 514–517.
- AUGUIE, B. (2017): gridExtra: Miscellaneous functions for „Grid“ graphics. Internet: <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra> (16.11.2021).
- 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 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. (1969): Großmaschinen in der Schlagabraumbeseitigung. In: Der Forst- und Holzwirt 28 (4): 85–89.
- 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.
- BENIWAL, R. S., R. LANGENFELD-HEYSER und A. POLLE (2010): Ectomycorrhiza and hydrogel protect hybrid poplar from water deficit and unravel plastic responses of xylem anatomy. In: Environmental and Experimental Botany 69 (2): 189–197.
- BIEDERBICK, D. (2020): Bewässerung von Forstkulturen. Projektarbeit im Rahmen des Referendariats. Frankenberg. Internet: [https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfvva/news/termine/pdf/Bewaesserung\\_Projektarbeit\\_Biederbick\\_FA-Frankenberg\\_2020.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfvva/news/termine/pdf/Bewaesserung_Projektarbeit_Biederbick_FA-Frankenberg_2020.pdf) (24.03.2023).

- 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.
- BISCHOFF, N., A. FIER und L. NOLTEMEYER (2022): Eignung von Herbst-Nmin-Werten und schlagbezogenen N-Bilanzsalden zur Abschätzung des N-Austrags mit dem Sickerwasser am Beispiel des Dauerfeldversuches Thülsfelde. Internet: [https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober\\_44\\_2022](https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_44_2022) (21.09.2022).
- 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.
- BOL, R., D. JULICH, D. BRÖDLIN, J. SIEMENS, K. KAISER, M. A. DIPPOLD, S. SPIELVOGEL, T. ZILLA, D. MEWES, F. VON BLANCKENBURG, H. PUHLMANN, S. HOLZMANN, M. WEILER, W. AMELUNG, F. LANG, Y. KUZYAKOV, K. FEGER, N. GOTTSSELIG, E. KLUMPP, A. MISSONG, C. WINKELMANN, D. UHLIG, J. SOHRT, K. VON WILPERT, B. WU und F. HAGEDORN (2016): Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystems—an almost blind spot in ecosystem research. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179 (4): 425–438.
- 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.

- 
- BURCKHARDT, H. (1870): Säen und Pflanzen nach forstlicher Praxis - Handbuch der Holzerziehung. Hannover.
- BÜRKNER, P.-C. (2018): Advanced bayesian multilevel modeling with the R package brms. In: *The R Journal* 10 (1): 395–411.
- BÜRKNER, P.-C. (2017): brms: An package for bayesian multilevel models using Stan. In: *Journal of Statistical Software* 80 (1): 1–28.
- BÜRKNER, P.-C. und M. VUORRE (2019): Ordinal regression models in psychology: A tutorial. In: *Advances in Methods and Practices in Psychological Science* 2 (1): 77–101.
- CAMBI, M., Y. HOSHIKA, B. MARIOTTI, E. PAOLETTI, R. PICCHIO, R. VENANZI und E. MARCHI (2017): Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. In: *Forest Ecology and Management* 384: 406–414.
- 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): 1–32.
- 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.
- DAHMER, J. (1998): Wurzeln wollen wachsen. In: *Sonderteil-AFZ/Der Wald* 53 (9): 1–2.
- 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.
- DASSOT, M. und C. COLLET (2015): Manipulating seed availability, plant competition and litter accumulation by soil preparation and canopy opening to ensure regeneration success in temperate low-mountain forest stands. In: *European Journal of Forest Research* 134 (2): 247–259.
- 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.
- DAVIS, M. A., K. J. WRAGE und P. B. REICH (1998): Competition between tree seedlings and herbaceous vegetation: support for a theory of resource supply and demand. In: *Journal of Ecology* 86 (4): 652–661.

- 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.
- DEMETER, L., Á. P. MOLNÁR, K. ÖLLERER, G. CSÓKA, A. KIŠ, C. VADÁSZ, F. HORVÁTH und Z. MOLNÁR (2021): Rethinking the natural regeneration failure of pedunculate oak: The pathogen mildew hypothesis. In: *Biological Conservation* 253: 108928.
- DENNINGER, W. (1980): Schlagabraum-, Stock-, Aufwuchsbeseitigung und Bodenbearbeitung in einem Arbeitsgang mit dem Rotoclear-Landbreaker. In: *Forstarchiv* 51 (6): 122–124.
- 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): 17–24.
- 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.
- DŪMIŇŠ, K., T. A. ŠTĀLS und D. LAZDIŇA (2020): Effect of soil preparation method on soil temperature. In: *Rural Development* 2019 (1): 231–236.
- EBELING, C., L. FRANKE, H. MERKEL, A. WEIDNER, P. WÖRMANN und T. GAERTIG (2016a): Tree growth on skid trails—do soil structure disturbances affect the growth of beech (*Fagus sylvatica* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.)? In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 187 (7/8): 146–156.
- EBELING, C., F. LANG und T. GAERTIG (2016b): Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. In: *Forest Ecology and Management* 359: 74–82.
- EFRON, B. und C. MORRIS (1977): Stein’s Paradox in Statistics. In: *Scientific American* 236 (5): 119–127.
- EMMERLING, C. (2001): Response of earthworm communities to different types of soil tillage. In: *Applied Soil Ecology* 17 (1): 91–96.
- ENDRES, G. (1901): Über Eichen-Nachzucht im kgl. bayr. Forstamte Rohrbrunn (Spessart). In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 23 (6): 297–308.
- 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 seedling and watering experiment. In: *European Journal of Forest Research* 140 (3): 589–601.

- EVERS, J. (2001): Stoffhaushalt und Waldbautechnik bei Erstaufforstungen ehemals landwirtschaftlicher Nutzflächen. Schriftenreihe der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten, Landesamt für Agrarordnung Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen.
- EVERS, J., I. DAMMANN, N. KÖNIG, U. PAAR, V. STÜBER, A. SCHULZE, M. SCHMIDT, E. SCHÖNFELDER, J. EICHHORN, und NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.) (2019): Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen: Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Göttingen. Internet: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?univerlag-isbn-978-3-86395-388-1> (30.06.2020).
- EVERS, J., I. DAMMANN, U. PAAR, W. SCHMIDT, B. AHRENDT, B. SCHELER, N. KÖNIG, E. SCHÖNFELDER, M. SCHMIDT, A. HAFNER und J. EICHHORN (2022): Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt: Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Göttingen. Internet: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?univerlag-isbn-978-3-86395-549-6> (27.03.2023).
- FAHRMEIR, L., T. KNEIB, S. SHALABH und C. HEUMANN (2008): On the identification of trend and correlation in temporal and spatial regression. In: (2008): Recent Advances in Linear Models and Related Areas. 1–27.
- FALCO, L., R. SANDLER, F. MOMO, C. DI CIOCCO, L. SARAVIA und C. COVIELLA (2015): Earthworm assemblages in different intensity of agricultural uses and their relation to edaphic variables. In: PeerJ 3: 1–18.
- FEICHT, H. und R. GEYER (1992): Untersuchungen zur Wurzelentwicklung natürlich verjüngter / gesäter und gepflanzter Eichen auf im Unterboden verdichteten Standorten. In: Bericht über die Arbeitstagung „Pflanztechnik und Wurzelentwicklung“.
- FELTEN, D. und C. EMMERLING (2011): Effects of bioenergy crop cultivation on earthworm communities—A comparative study of perennial (*Miscanthus*) and annual crops with consideration of graded land-use intensity. In: Applied Soil Ecology 49: 167–177.
- FISCHER, E. (1993): Über den Umbau von Kiefernbeständen mit Eiche aus Hähersaat und Pflanzung. In: Forst und Holz 48 (18): 525–528.
- FLEDER, W. (1981): Begründung von Werteichenbeständen durch Saat. In: Forst und Holzwirt 36 (12): 275–277.
- FLÜGEL GMBH (2023): Produktinformation Wasserkapsel. Internet: <https://www.fluegel-gmbh.de/produkte/pflanzenstaerkung/verdunstungsschutz-wurzeln/wasserkapsel-f03.003> (25.03.2023).

- 
- 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.
- FSC DEUTSCHLAND und VEREIN FÜR VERANTWORTUNGSVOLLE WALDWIRTSCHAFT EV (2018): Deutscher FSC-Standard 3.0. Freiburg (Brsg.).
- 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.
- GEIGER, R. und G. FRITZSCHE (1940): Spätfrost und Vollumbruch. In: Forstarchiv 16 (10/11): 141–156.
- GELMAN, A. und J. HILL (2007): Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models. Analytical methods for social research. Cambridge ; New York.
- GEMMEL, P., U. NILSSON und T. WELANDER (1996): Development of oak and beech seedlings planted under varying shelterwood densities and with different site preparation methods in southern Sweden. In: New Forests 12 (2): 141–161.
- GOCKEL, H. A. (1995): Die Trupp-Pflanzung, Ein neues Pflanzschema zur Begründung von Eichenbeständen. In: Forst und Holz 50 (18): 570–575.
- 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.
- GROVE, H. (1981): Ein Verfahren zur humuserhaltenden Schlagräumung. In: Der Forst- und Holzwirt 36 (10): 227–229.
- GRYSCHKO, R. und D. HORLACHER (1997): Bodenversauerung: Ursachen, Auswirkungen, Maßnahmen. Handbuch Boden. Karlsruhe.
- GUILHERME, M. R., F. A. AOUADA, A. R. FAJARDO, A. F. MARTINS, A. T. PAULINO, M. F. T. DAVI, A. F. RUBIRA und E. C. MUNIZ (2015): Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. In: European Polymer Journal 72: 365–385.

- GUNDERSEN, P., I. CALLESEN und W. DE VRIES (1998): Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor CN ratios. In: *Environmental Pollution* 102 (1): 403–407.
- GUNDERSEN, P., I. K. SCHMIDT und K. RAULUND-RASMUSSEN (2006): Leaching of nitrate from temperate forests - effects of air pollution and forest management. In: *Environmental Reviews* 14 (1): 1–57.
- GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK (2014): Handbuch Forstliche Analytik. Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich (Fachliche Bearbeitung: N. König). Grundwerk, Juni 2005, mit Ergänzungen 1-5.
- HAEUSSLER, S., R. KABZEMS, J. MCCLARNON und L. BEDFORD (2021): Successional change, restoration success, and resilience in boreal mixedwood vegetation communities over three decades. In: *Canadian Journal of Forest Research* 51 (6): 766–780.
- HAGEN, R., N. KÜHL, M. KRÖSCHEL und R. SUCHANT (2020): Verbiss an Tanne und Eiche in Baden-Württemberg: Ein Vergleich zwischen nadelbaum- und laubbaumdominierten Waldbeständen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 190 (7/8): 161–168.
- 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. HAVERAEN (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.
- 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): 1–16.
- 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.
- 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.
- HETSCH, W., F. BEESE und B. ULRICH (1979): Die Beeinflussung der Bodenlösung durch Saugkerzen aus Ni-Sintermetall und Keramik. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 142 (1): 29–38.



- HEUKAMP, B. (1994): Großpflanzen - Verwendung, Anzucht. In: Forst und Holz 49 (4): 96–97.
- HILDEBRAND, E. E. (1983): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 102 (1): 111–125.
- HOFMANN, R. (1992): Die Waldfräse der Fa. Krohn - Chance oder Risiko? In: Forsttechnische Informationen 44. Jahrgang (8/9): 57.
- HORAK, J., S. VODKA, J. KOUT, J. P. HALDA, P. BOGUSCH und P. PECH (2014): Biodiversity of most dead wood-dependent organisms in thermophilic temperate oak woodlands thrives on diversity of open landscape structures. In: Forest Ecology and Management 315 (Supplement C): 80–85.
- 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.
- HUITING, H. F., L. G. MORAAL, F. C. GRIEPINK und A. ESTER (2006): Biology, control and luring of the cockchafer, *Melolontha melolontha* : literature report on biology, life cycle and pest incidence, current control possibilities and pheromones. Wageningen.
- HURLBERT, S. H. (1984): Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. In: Ecological Monographs 54 (2): 187–211.
- HUSS, J. (1990): Die Entwicklung des Dauerwaldgedankens bis zum Dritten Reich. In: Forst und Holz 45 (7): 163–171.
- IMMLER, T. (2006): Wenn Maikäfer zur Plage werden. In: LWF aktuell 54: S. 48-49.
- IRMAK, S. und D. Z. HAMAN (2001): Performance of the Watermark® granular matrix sensor in sandy soils. In: Applied Engineering in Agriculture 17 (6): 787–795.
- IRMAK, S., J. O. PAYERO, B. VAN DE WALLE, J. REES, G. ZOUBEK, D. L. MARTIN, W. L. KRANZ, D. E. EISENHAUER 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> (27.08.2019).

- IRRROMETER COMPANY© (2019): Reading Watermark soil moisture sensors. Internet: <https://www.irrometer.com/200ss.html> (09.12.2019).
- JAMNICKÁ, G., Ľ. DITMAROVÁ, D. KURJAK, J. KMEŤ, E. PŠIDOVÁ, M. MACKOVÁ, D. GÖMÖRY und K. STŘELCOVÁ (2013): The soil hydrogel improved photosynthetic performance of beech seedlings treated under drought. In: *Plant, Soil and Environment* 59 (No. 10): 446–451.
- 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.
- KARLSSON, M. und U. NILSSON (2005): The effects of scarification and shelterwood treatments on naturally regenerated seedlings in southern Sweden. In: *Forest Ecology and Management* 205 (1–3): 183–197.
- KÄTZEL, R., S. LÖFFLER, S. WINTER und R. KALLWEIT (2005): Zum Einfluss von Überschirmung und Begründungsverfahren auf den Entwicklungserfolg von Eichen- und Buchenvoranbauten in der Initialphase. In: (2005): *Ökologischer Waldumbau im nordostdeutschen Tiefland, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 23. Eberswalde: 79–101.*
- KAY, M. (2022): tidybayes: Tidy data and geoms for Bayesian models. Internet: <http://mjskay.github.io/tidybayes/> (05.03.2022).
- KAY, M. (2021): ggdist: Visualizations of distributions and uncertainty. Internet: <https://mjskay.github.io/ggdist/> (05.03.2022).
- KEENAN, R. J. (2015): Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. In: *Annals of Forest Science* 72 (2): 145–167.
- KENK, G. K. (1993): New perspectives in German oak silviculture. In: *Annales des Sciences Forestières* 50 (6): 563–570.

- KIRSCHT, M. (2011): Rekultivierung von Tagebaufolgeflächen mit verschiedenen Bodenhilfsstoffen und Baumarten. Monographie. Göttingen.
- KLEIN, J. P. und M. L. MOESCHBERGER (2003): Survival analysis: techniques for censored and truncated data. Statistics for biology and health. New York.
- KLEINSCHMIT, J., J. SVOLBA und P. STEINGAB (1978): Entwicklung von Eichenheisterkulturen im Forstamt Braunschweig. In: Der Forst- und Holzwirt 37 (8): 172–176.
- KLINCK, U., D. FRÖHLICH, K. J. MEIWES und F. BEESE (2013): Entwicklung der Stoffein- und -austräge nach einem Fichten-Kleinkahlschlag. In: Forstarchiv 84: 93–101.
- KOHLER, M., P. PYTTEL, C. KUEHNE, T. MODROW und J. BAUHUS (2020): On the knowns and unknowns of natural regeneration of silviculturally managed sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) forests—a literature review. In: Annals of Forest Science 77 (4): 101.
- 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.
- KRAHL-URBAN, J. (1952): Die maximale Wertholzleistungsfähigkeit in Eichenbeständen. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 71 (5–6): 141–151.
- KRAMER, W. (1978): Mechanische Bodenbearbeitung oder chemische Behandlung bei der Begründung von Kulturen im Forstamt Syke. In: Allg. Forst Zeitschr 33: 456–461.
- KREUTZER, K., K. (1961): Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 80: 356–391.
- KRÜGER, M., K. POTTHAST, B. MICHALZIK, A. TISCHER, K. KÜSEL, F. F. K. DECKNER und M. HERRMANN (2021): Drought and rewetting events enhance nitrate leaching and seepage-mediated translocation of microbes from beech forest soils. In: Soil Biology and Biochemistry 154: 108153.
- KUDERNA, M., E. PÖTSCH und W. BLUM (1993): Zur Wahl des Extraktionsmittels bei der Nmin-Bestimmung. In: Bodenkultur 44 (1): 7–14.
- KUNZ, J., G. LÖFFLER und J. BAUHUS (2018): Minor European broadleaved tree species are more drought-tolerant than *Fagus sylvatica* but not more tolerant than *Quercus petraea*. In: Forest Ecology and Management 414: 15–27.
- LABELLE, E. R., B. J. POLTORAK und D. JAEGER (2019): The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance. In: Canadian Journal of Forest Research 49 (2): 164–178.

- 
- 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.
- LAMERSDORF, N. P., C. BEIER, K. BLANCK, M. BREDEMEIER, T. CUMMINS, E. P. FARRELL, K. KREUTZER, L. RASMUSSEN, M. RYAN, W. WEIS und Y.-J. XU (1998): Effect of drought experiments using roof installations on acidification/nitrification of soils. In: *Forest Ecology and Management* 101 (1–3): 95–109.
- LANDIS, T. D. (2011): Uses for hydrogels in the nursery and during outplanting. In: *Forest Nursery Notes* (Winter): 17–22.
- 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* 140 (4): 807–817.
- 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., J. BRUNET, A. FILYUSHKINA, M. LINDBLADH, J. P. SKOVSGAARD und A. FELTON (2015): Management of oak forests: striking a balance between timber production, biodiversity and cultural services. In: *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 12 (1–2): 59–73.
- 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 (2004a): 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.

- LÖF, M., A. THOMSEN und P. MADSEN (2004b): 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 (2008): Einfluss unterschiedlicher Hiebsformen auf die Naturverjüngung eines Traubeneichen-Buchen-Mischbestandes. Der Versuch „Mastlager“ der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz im Forstamt Eppenbrunn (früher Fischbach). In: *Forstarchiv* 79: 4–15.
- LÜPKE, B. von (1982): Versuche zur Einbringung von Lärche und Eiche in Buchenbestände. Schriften der Universität Göttingen, Forstliche Fakultät und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 74. Frankfurt a.M.
- VON LÜPKE, N., J. METZ, R. PETERSEN, A. SCHMITT, M. KÖHLER und D. TAMKE (2021): Nicht den Kopf in den Sand stecken -> dafür gibt es doch Sensoren. In: *ImDialog* (4): 20.
- LÜSCHER, P., F. FRUTIG, S. SCIACCA, S. SPJEVAK und O. THEES (2010): Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. In: *EIDG. FORSCHUNGSANSTALT WSL (Hrsg.) (2010): Merkblatt für die Praxis, Band 45. Birnmensdorf: 12.*
- LYR, H. (1996): Effect of the root temperature on growth parameters of various European tree species. In: *Annales des Sciences Forestières* 53 (2–3): 317–323.
- LYR, H. und V. GARBE (1995): Influence of root temperature on growth of *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Tilia cordata* and *Quercus robur*. In: *Trees* 9 (4): 220–223.
- 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. KOHLPAINNER, R. GASCHÉ, C. HUBER, M. DANNENMANN und H. PAPAN (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.

- McELREATH, 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. TRETTIN (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 Sturmkahlflächen 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.
- MÖLDER, A., R.-V. NAGEL, P. MEYER, M. SCHMIDT, H. RUMPF und H. SPELLMANN (2017): Historischer Rückblick auf die Verjüngung von Eichen im Spessart des 19. Jahrhunderts – Bedeutung der angewandten Verfahren für die heutige Eichenwirtschaft. In: Forstarchiv 88 (3): 67–78.
- 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.
- MORTZFELDT (1896): Über horstweisen Vorverjüngungsbetrieb. In: Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen 28 (1): 2–31.
- MÜLLER, J., A. BOLTE, W. BECK und S. ANDERS (1997): Bodenvegetation und Wasserhaushalt von Kiefernforstökosystemen (*Pinus sylvestris* L.). In: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 28: 407–414.
- MV ML (Hrsg.) (2002): Richtlinien zur Umsetzung von Zielen und Grundsätzen einer naturnahen Forstwirtschaft in Mecklenburg-Vorpommern.
- 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).
- NIEMINEN, T. M., B. DE VOS, N. COOLS, N. KÖNIG, R. FISCHER, S. IOST und E. GRAF PANNATIER (2016): Part XI: Soil solution collection and analysis. In: (2016): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre. Eberswalde.

- 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.-E. HALLGREN (1996a): Competing vegetation effects on initial growth of planted *Picea abies*. In: *New Zealand J. For. Sci* 26 (1–2): 84–98.
- 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.
- NÖRR, R. und R. MÖSSMER (2003): Deformierte Wurzeln – eine unterschätzte Gefahr für die Stabilität. In: *Wald und Holz* 10: 39–42.
- NWALDLG (2020): Niedersächsisches Gesetz über den Wald und die Landschaftsordnung vom 21. März 2002 (Nds. GVBl. 2002, 112), letzte berücksichtigte Änderung: Inhaltsverzeichnis und § 15 geändert, § 17a eingefügt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 11.11.2020 (Nds. GVBl. S. 451).
- 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.
- OTTOW, J. C. G. (2011): *Mikrobiologie von Böden*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-00824-5> (15.07.2020).
- PAAR, U., J. EVERS, I. DAMMANN, N. KÖNIG, A. SCHULZE, M. SCHMIDT, E. SCHÖNFELDER, B. SCHELER, T. ULLRICH und J. EICHHORN (2016): *Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 15*. Göttingen. Internet: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?univerlag-isbn-978-3-86395-293-8> (30.06.2020).
- PALVIAINEN, M., L. FINÉR, A. LAURÉN, S. LAUNIAINEN, S. PIIRAINEN, T. MATTSSON und M. STARR (2014): Nitrogen, phosphorus, carbon, and suspended solids loads from forest clear-cutting and site preparation: Long-term paired catchment studies from eastern Finland. In: *AMBIO* 43 (2): 218–233.
- PAMPE, A. (2001): Versuche zur Verwendung von Traubeneichen- und Buchen-Großpflanzen in Nordwestdeutschland. In: *Forst und Holz* 56 (11): 331–337.

- 
- PEFC DEUTSCHLAND E.V. (2014): PEFC-Standards für nachhaltige Waldbewirtschaftung - Deutscher PEFC-Standard. In: Leitlinie für nachhaltige Waldbewirtschaftung zur Einbindung des Waldbesitzers in den regionalen Rahmen, Stuttgart.
- PELTZER, D. A., M. L. BAST, S. D. WILSON und A. K. GERRY (2000): Plant diversity and tree responses following contrasting disturbances in boreal forest. In: *Forest Ecology and Management* 127 (1–3): 191–203.
- PETERSEN, R. (2007): Eichen-Trupp-Pflanzung – erste Ergebnisse einer Versuchsfläche im NFA Neuhaus. In: *Forst und Holz* 62 (3): 19–25.
- PETERSEN, R., S. HEIN, S. TRETTER und G. WEZEL (2021): Zum Einsatz von Superabsorbent. In: *AFZ-DerWald* 76 (9): 64–65.
- 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.
- PREUHLER, T., S. KÜHNEL und K. BOCK (1994): Zum Wachstum von Eichensaat unter Kiefernschirm im Forstamt Nürnberg. In: *Forst und Holz* 49 (5): 123–128.
- PRIETZEL, J., K. E. REHFUESS, U. STETTER und H. PRETZSCH (2008): Changes of soil chemistry, stand nutrition, and stand growth at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in Central Europe during 40 years after fertilization, liming, and lupine introduction. In: *European Journal of Forest Research* 127 (1): 43–61.
- R CORE TEAM (2021): R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. Internet: <https://www.R-project.org/> (16.11.2021).
- RANIUS, T., P. ELIASSON und P. JOHANSSON (2008a): Large-scale occurrence patterns of red-listed lichens and fungi on old oaks are influenced both by current and historical habitat density. In: *Biodiversity and Conservation* 17 (10): 2371–2381.
- RANIUS, T. und N. JANSSON (2000): The influence of forest regrowth, original canopy cover and tree size on saproxylic beetles associated with old oaks. In: *Biological Conservation* 95 (1): 85–94.
- RANIUS, T., P. JOHANSSON, N. BERG und M. NIKLASSON (2008b): The influence of tree age and microhabitat quality on the occurrence of crustose lichens associated with old oaks. In: *Journal of Vegetation Science* 19 (5): 653–662.
- RENNER, G. und E. RÖHRIG (1988): Die Entwicklung von Eichen-Heisterpflanzungen im Staatlichen Forstamt Hasbruch. In: *Forst und Holz* 43 (18): 450–454.



- REPÁČ, I., M. BELKO, D. KRAJMEROVÁ und L. PAULE (2020): Planting time, stocktype and additive effects on the development of spruce and pine plantations in Western Carpathian Mts. In: *New Forests* 52 (3): 449–472.
- 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.
- RIPKEN, H. (1979): Rationalisierte Eichensaatverfahren in den Niedersächsischen Landesforsten. In: *AFZ* 34 (13): 314–317.
- RIPKEN, H. (1973): Zum Anbau und Kulturverfahren der Eiche auf wertholztauglichen Standorten Nordniedersachsens. In: *Forst und Holzwirt* 32 (5): 80–92.
- RITZ, C., S. M. JENSEN, D. GERHARD und J. C. STREIBIG (2020): Dose-response analysis using R. Chapman & Hall/CRC the R series. Boca Raton.
- 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.
- ROSÉN, K. und A. LUNDMARK-THELIN (1987): Increased nitrogen leaching under piles of slash— a consequence of modern forest harvesting techniques. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 2 (1–4): 21–29.
- 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.
- ROTHKEGEL, W., O. RUPPERT, H. BLASCHKE und B. STIMM (2013): Sorgfaltskriterien für Buche und Douglasie. In: *AFZ - Der Wald* 68 (20): 4–7.
- RUMPF, H. (2007): Erste Ergebnisse eines Freisaatversuches mit Traubeneiche im Nordwestdeutschen Flachland. In: *Forst und Holz* 62 (3): 13–18.
- RUSACK, H.-J. (1988): Verwendung von Eichen-Großpflanzen im Flachland Niedersachsens. In: *Forst und Holz* 43 (18): 454–456.
- SAHA, S., C. KUEHNE, U. KOHNLE, P. BRANG, A. EHRING, J. GEISEL, B. LEDER, M. MUTH, R. PETERSEN, J. PETER, W. RUHM und J. BAUHM (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.
- SCHEFFER, F., P. SCHACHTSCHABEL, H.-P. BLUME und K. STAHR (Hrsg.) (2008): *Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum-Lehrbuch*. Heidelberg.
- SCHMIDT, M. G., S. E. MACDONALD und R. L. ROTHWELL (1996): Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical properties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta. In: *Canadian Journal of Soil Science* 76 (4): 531–540.
- SCHMIDT, M., M. HANEWINKEL, G. KÄNDLER, E. KUBLIN und U. KOHNLE (2010): An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage — experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. In: *Canadian Journal of Forest Research* 40 (8): 1636–1652.
- SCHMIDT-WALTER, P. (2018): KSPclimpredict: Predict daily climate parameters from saved ModelObjects and Data. Internet: Unveröffentlicht.
- SCHNEIDER, G. (1993): Die Entenpfluher Baggerpflanztechnik. In: *AFZ* 48 (21): 1086–1089.
- SCHÜLER, G. (1992): Auswirkungen einer intensiven Bodenbearbeitung mittels einer neuartigen Stockfräse auf den Nährelementhaushalt eines Waldstandortes. In: *Forsttechnische Informationen* (8/9): 69–72.
- 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.
- VON SCHÜTZ, Ad. (1870): *Die Pflege der Eiche*. Berlin, Heidelberg. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-51415-9> (21.07.2020).
- 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.
- SIIRA-PIETIKÄINEN, A. und J. HAIMI (2009): Changes in soil fauna 10 years after forest harvestings: Comparison between clear felling and green-tree retention methods. In: *Forest Ecology and Management* 258 (3): 332–338.
- 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): 10172.
- SMITH, R., C. MCSWINEY, A. GRANDY, P. SUWANWAREE, R. SNIDER und G. ROBERTSON (2008): Diversity and abundance of earthworms across an agricultural land-use intensity gradient. In: *Soil and Tillage Research* 100 (1–2): 83–88.

- SMOLANDER, A., L. PAAVOLAINEN und E. MÄLKÖNEN (2000): C and N transformations in forest soil after mounding for regeneration. In: *Forest Ecology and Management* 134 (1–3): 17–28.
- SØE, A. R. B. und N. BUCHMANN (2005): Spatial and temporal variations in soil respiration in relation to stand structure and soil parameters in an unmanaged beech forest. In: *Tree Physiology* 25 (11): 1427–1436.
- SOUZA, S. T. de, P. C. CASSOL, D. BARETTA, M. L. C. BARTZ, O. KLAUBERG FILHO, Á. L. MAFRA und M. G. da ROSA (2016): Abundance and diversity of soil macrofauna in native forest, eucalyptus plantations, perennial pasture, integrated crop-livestock, and no-tillage cropping. In: *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 40 (0): 1–14.
- SSYMANK, A. (2016): Biodiversität und Naturschutz in Eichen-Lebensraumtypen. In: *AFZ-DerWald* 71 (20): 10–13.
- 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. HORNING (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): 53–65.
- STIMM, B. und T. KNOKE (2004): Häfersaaten: Ein Literaturüberblick zu waldbaulichen und ökonomischen Aspekten. In: *Forst und Holz* 59 (11): 531–534.
- 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. Hainholz Forstwissenschaften, Band 8. Göttingen.
- SUTMÖLLER, J., I. DAMMANN, M. WAGNER, B. SCHELER, U. PAAR, H. MEESENBURG und J. EICHHORN (2019a): Die extreme Trockenheit 2018 in Nordwestdeutschland, Teil 1. In: *AFZ-DerWald* 74 (6): 42–46.
- SUTMÖLLER, J., M. WAGNER, B. SCHELER, H. MEESENBURG und J. EICHHORN (2019b): Der Bodenfeuchtezustand zu Beginn der Vegetationszeit 2019. In: *AFZ-DerWald* 74 (15): 46–49.
- SUTTON, R. F. (1993): Mounding site preparation: A review of European and North American experience. In: *New Forests* 7 (2): 151–192.

- SYMADER, W. (2004): Was passiert, wenn der Regen fällt? Einführung in die Hydrologie. UTB Geowissenschaften, Biologie, Ökologie. Stuttgart.
- THÜNEN-INSTITUT (2014): Dritte Bundeswaldinventur - Ergebnisdatenbank. Internet: <https://bwi.info> (11.01.2022).
- TIEBEL, K., F. HUTH, N. FRISCHBIER und S. WAGNER (2020): Restrictions on natural regeneration of storm-felled spruce sites by silver birch (*Betula pendula* Roth) through limitations in fructification and seed dispersal. In: *European Journal of Forest Research* 139 (5): 731–745.
- TIEBEL, K., F. HUTH und S. WAGNER (2021): Is there an effect of storage depth on the persistence of silver birch (*Betula pendula* Roth) and rowan (*Sorbus aucuparia* L.) seeds? A seed burial experiment. In: *iForest - Biogeosciences and Forestry* 14 (3): 224–230.
- TIEBEL, K., A. KARGE, F. HUTH und S. WAGNER (2017): Strukturelemente fördern die Sameausbreitung durch Vögel. In: *AFZ - Der Wald* 72 (20): 24–27.
- 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.
- VODKA, S., M. KONVICKA und L. CIZEK (2009): Habitat preferences of oak-feeding xylophagous beetles in a temperate woodland: implications for forest history and management. In: *Journal of Insect Conservation* 13 (5): 553–562.
- VULLMER, H. und U. HANSTEIN (1995): Der Beitrag des Eichelhäher zur Eichenverjüngung in einem naturnah bewirtschafteten Wald in der Lüneburger Heide. In: *Forst und Holz* 50 (20): 643–646.
- WAGNER, M., B. SCHELER, J. SUTMÖLLER, I. DAMMANN, U. PAAR, H. MEESENBURG und J. EICHORN (2019): Die extreme Trockenheit 2018 in Norwestdeutschland, Teil 2. In: *AFZ-DerWald* 74 (6): 47–50.
- WALD UND HOLZ NRW (Hrsg.) (2014): Empfehlungen zur naturnahen Bewirtschaftung von Stiel- und Trauben-Eichenbeständen in Nordrhein-Westfalen. Internet: [https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Wald-und-Holz/Dokumente/180323\\_Empfehlungen\\_zur\\_naturnahen\\_Bewirtschaftung\\_von\\_Stiel-\\_und\\_Trauben-Eichenbestanden\\_in\\_NRW\\_.pdf](https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Wald-und-Holz/Dokumente/180323_Empfehlungen_zur_naturnahen_Bewirtschaftung_von_Stiel-_und_Trauben-Eichenbestanden_in_NRW_.pdf) (26.01.2022).

- 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.
- WEI, L., N. J. FENTON, B. LAFLEUR und Y. BERGERON (2019): The combined role of retention pattern and post-harvest site preparation in regulating plant functional diversity: A case study in boreal forest ecosystems. In: *Forests* 10 (11): 1006.
- WEIS, W., C. HUBER und A. GÖTTLEIN (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> (21.07.2020).
- WORRELL, R. und A. HAMPSON (1997): The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils - a review. In: *Forestry* 70 (1): 61–85.
- ZANG, C., A. ROTHE, W. WEIS und H. PRETZSCH (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182: 98–112.

## 7 Anhang

### 7.1 Veröffentlichungen und Vorträge

Folgende Beiträge konnten während der Promotion veröffentlicht werden:

- Tamke D., Talkner U. und Sennhenn-Reulen H. (2022): Nährstoffe dürfen nicht verloren gehen. *Land & Forst* (42): 44–46.
- Tamke D., Talkner U. und Sennhenn-Reulen H. (2022): Bodenbearbeitung und Nährstoffnachhaltigkeit. *Forst & Technik* (11): 22–27.
- Tamke D., Talkner U., und Weidig J. (2022): Ergebnisse aus dem ABoNae-Projekt – Wie nährstoffnachhaltig sind Bodenbearbeitungen vor der Kulturbegründung? *ImDialog* (4): 20–23.
- Tamke D., Talkner U., Sennhenn-Reulen H. (2023): Nährstoffe dürfen nicht verloren gehen. *Deutscher Waldbesitzer* (1): 33–35.
- Tamke D., Sennhenn-Reulen H., Petersen R. (2023): Initiale Entwicklung von Eichenkulturen nach Bodenbearbeitung in Deutschland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 192 (2021)(9/10): 219–240

Auf folgenden Tagungen und Seminaren konnte ein Vortrag gehalten werden:

- Projektvorstellung auf der Sektionstagung Waldernährung in Davos vom 4.–7.6.2019 (Poster).
- Vorstellung von Projektergebnissen bei der FOWITA in Freising (online) am 13.–15.09.2021 (Vortrag).
- Vorstellung von Projektergebnissen auf der Tagung „Stoffflüsse und Vorräte in Waldökosystemen: Messung, Monitoring & Modellierung“ (online) am 17.–18.3.2022 (Poster).
- Vorstellung von Projektergebnissen auf dem Seminar „Wiederbewaldung erfolgreich gestalten - Lehrgang für Wiederbewaldungsbeauftragte“ von Hessen Forst (online) am 20.7.2022 & 21.7.2022 (Vortrag).
- Vorstellung von Projektergebnissen auf der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2022 in Trier vom 5.–8.9.2022 (Poster).
- Vorstellung von Projektergebnissen auf der Sektionstagung Waldernährung vom 29.-30.9.2022 in Nürnberg (Vortrag).

## 7.2 Vorräte der Mikrokosmen-Lysimeter nach Kompartimenten

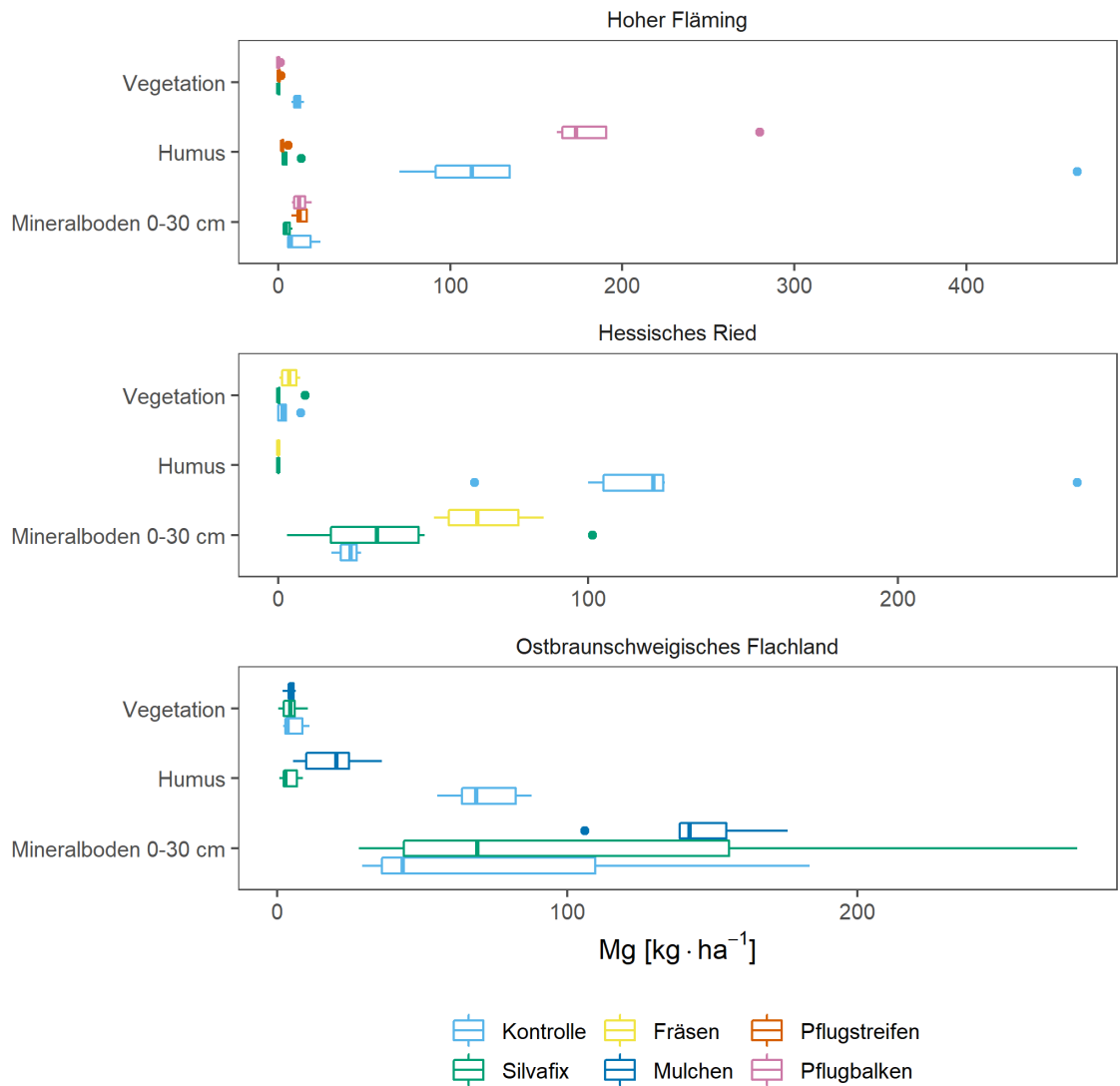


Abbildung 36: Boxplots der Mg Vorräte in den Mikrokosmen-Lysimetern getrennt nach den Kompartimenten Vegetation, Humus und Mineralboden für die Regionen und Bodenbearbeitungsverfahren.

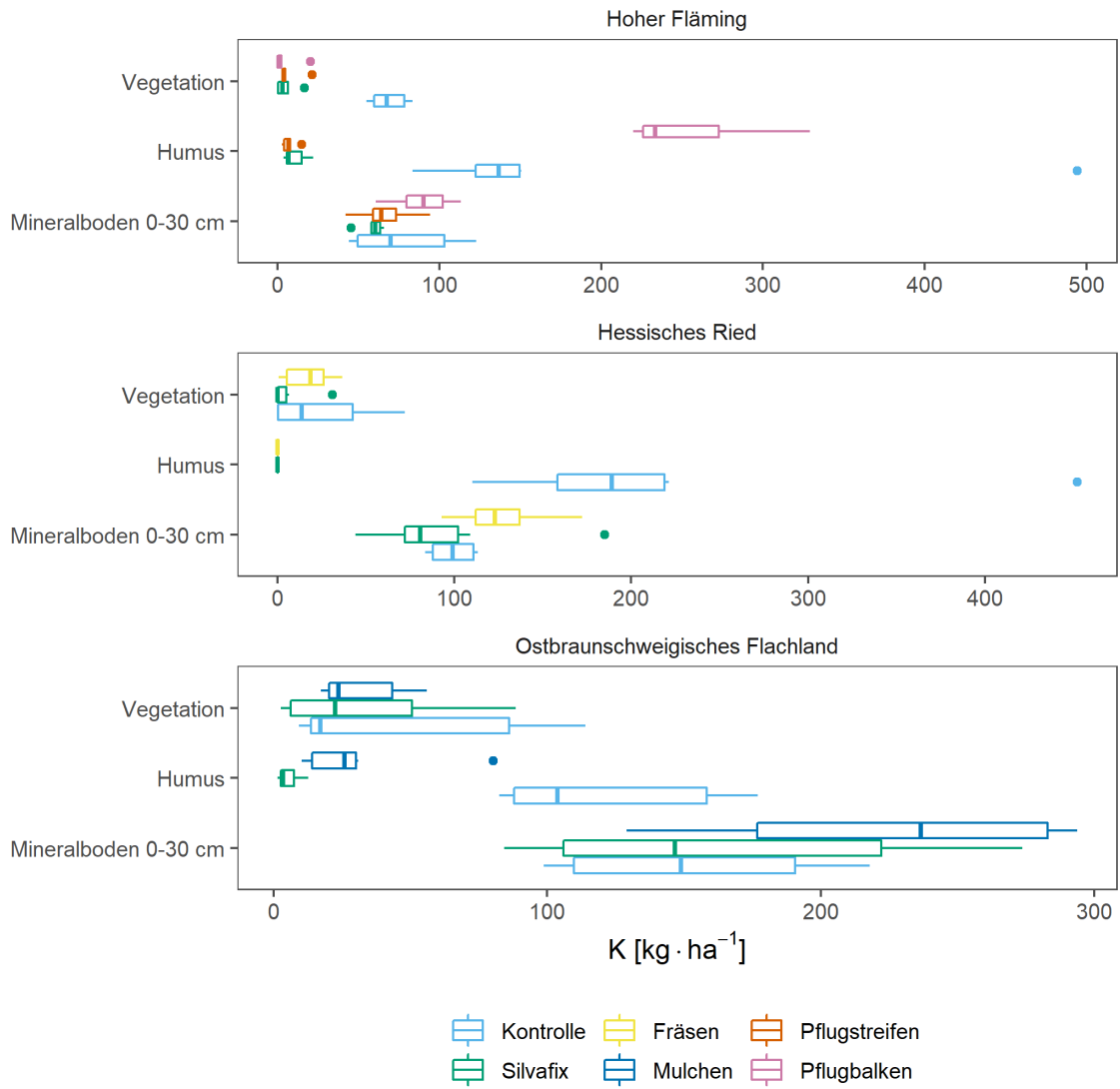


Abbildung 37: Boxplots der K Vorräte in den Mikrokosmen-Lysimetern getrennt nach den Kompartimenten Vegetation, Humus und Mineralboden für die Regionen und Bodenbearbeitungsverfahren.



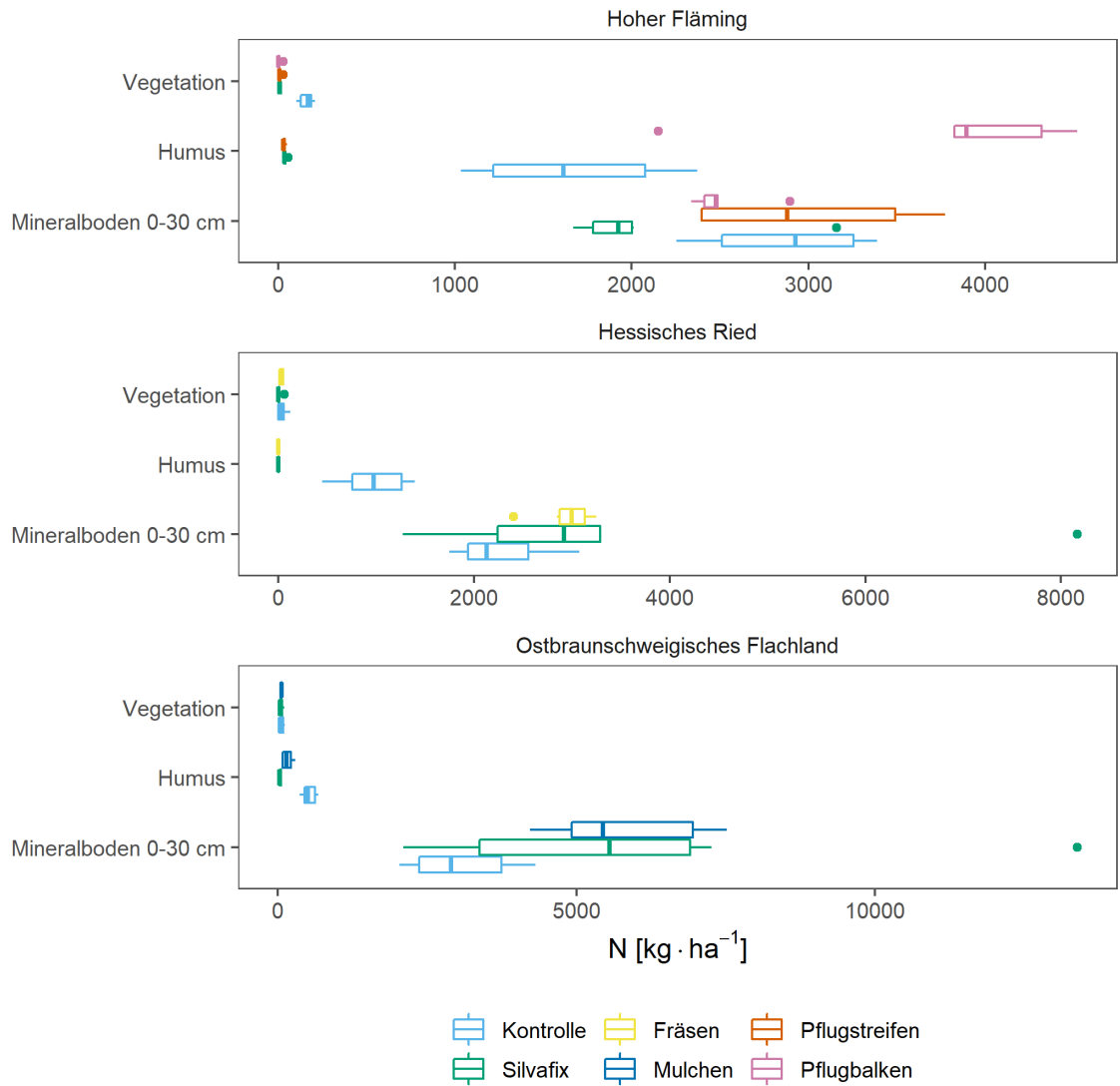


Abbildung 38: Boxplots der N Vorräte in den Mikrokosmen-Lysimetern getrennt nach den Kompartimenten Vegetation, Humus und Mineralboden für die Regionen und Bodenbearbeitungsverfahren.

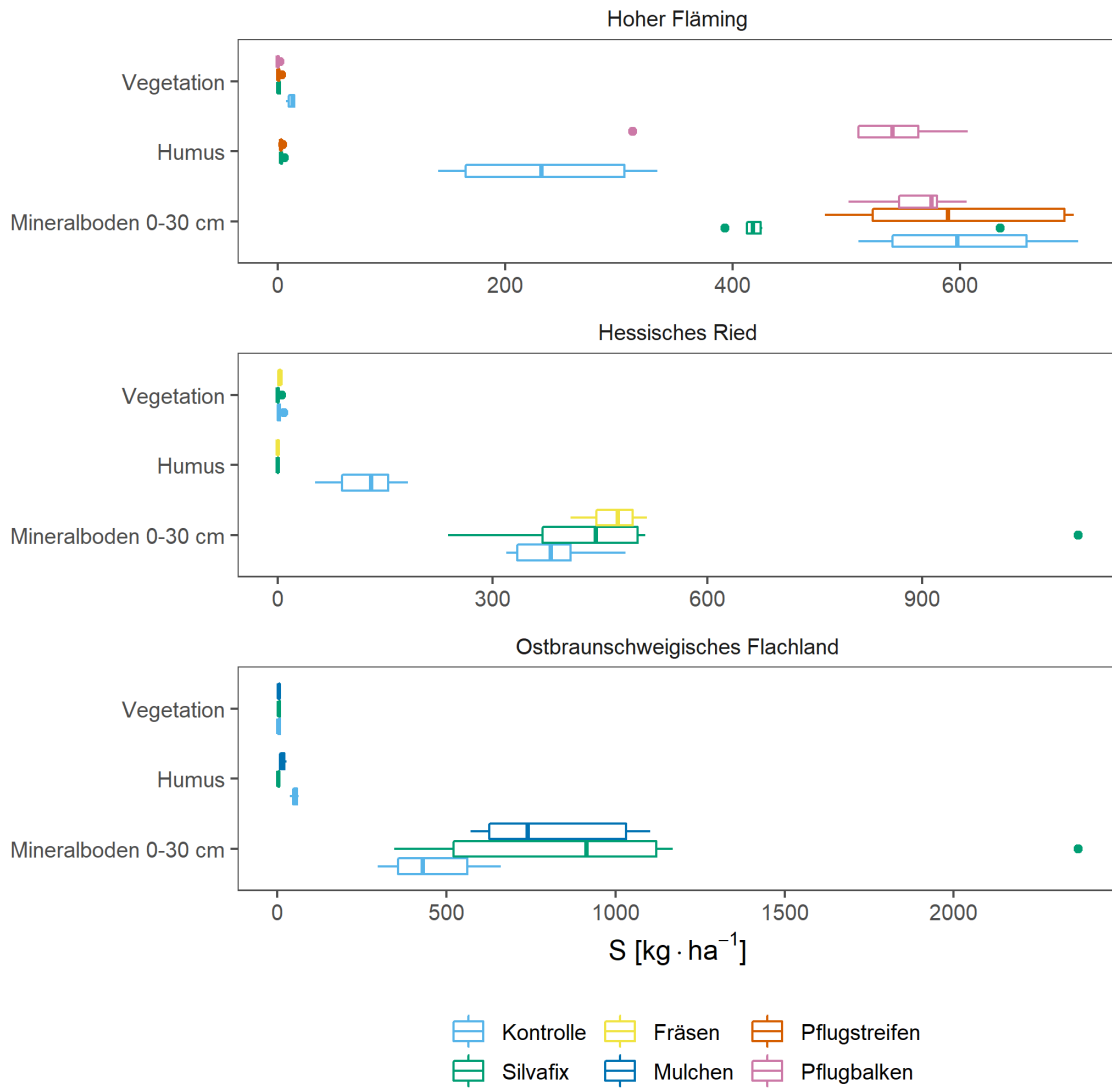


Abbildung 39: Boxplots der S Vorräte in den Mikrokosmen-Lysimetern getrennt nach den Kompartimenten Vegetation, Humus und Mineralboden für die Regionen und Bodenbearbeitungsverfahren.

### 7.3 Tabellen mit parameterspezifischen Posteriori-Verteilungen der Modellierungen

Tabelle 26: Parameterspezifische Posteriori-Verteilung der fixen Effekte des Nährstofffrachtmodells (Median in  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  [2,5 % Quantil; 97,5 % Quantil]) (HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, BEH: Behandlung, Bv: Bestverfahren, Si: Silvafix, CTM: zentrierte Trockenmasse, CHM: zentrierte Humusmächtigkeit, CFR: zentrierte Flussrate).

Parameter	Ca	Mg	K	NO <sub>3</sub> -N	SO <sub>4</sub> -S
Intercept $\beta_{\mu,0}$	0,03 [0,01; 0,07]	0,01 [0,00; 0,02]	0,02 [0,00; 0,06]	0,05 [0,01; 0,50]	0,02 [0,01; 0,03]
Shape Intercept $\beta_{shape,0}$	2,64 [2,35; 2,98]	2,79 [2,51; 3,14]	2,29 [2,00; 2,64]	1,20 [1,05; 1,37]	2,81 [2,48; 3,18]
BEH SI	1,29 [0,55; 2,83]	0,96 [0,47; 1,78]	0,37 [0,10; 1,22]	0,70 [0,04; 6,97]	1,23 [0,63; 2,46]
BEH Bv	1,96 [0,88; 4,06]	1,17 [0,58; 2,03]	0,71 [0,22; 2,22]	0,66 [0,07; 5,67]	1,55 [0,88; 2,60]
Region HR	1,41 [-0,65; 2,79]	2,44 [1,24; 4,41]	3,25 [0,81; 10,40]	0,55 [0,05; 4,04]	1,73 [0,99; 2,84]
Region OF	1,63 [0,74; 3,29]	1,64 [0,89; 2,91]	0,55 [0,14; 1,77]	0,29 [0,03; 2,36]	1,52 [0,87; 2,60]
Jahr2020	0,54 [0,45; 0,64]	0,49 [0,41; 0,58]	0,74 [0,62; 0,89]	0,61 [0,48; 0,77]	0,49 [0,43; 0,56]
CTM	0,97 [0,93; 1,00]	0,96 [0,93; 0,99]	0,93 [0,88; 0,98]	0,87 [0,80; 0,95]	1,00 [0,98; 1,03]
CHM	1,04 [0,97; 1,11]	1,05 [0,99; 1,10]	1,10 [0,98; 1,20]	1,09 [0,88; 1,29]	1,01 [0,95; 1,06]
CFR	1,68 [1,64; 1,74]	1,73 [1,69; 1,78]	1,66 [1,62; 1,69]	1,81 [1,75; 1,89]	1,59 [1,55; 1,63]
Shape CFR	4,75 [4,12; 5,10]	3,50 [3,12; 3,90]	4,65 [4,22; 5,13]	1,94 [1,78; 2,11]	5,33 [4,71; 5,93]

Tabelle 27: Parameterspezifische Posteriori-Verteilung für die Nährstoffvorratsmodellierung (Median in  $t \cdot ha^{-1}$  [2,5% Quantil; 97,5% Quantil]) (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ost-braunschweigisches Flachland, BEH: Behandlung, Bv: Bestverfahren, Ko: Kontrolle, Si: Silvafix, Ps: Pflugsohle, Pb: Pflugbalken, Fr: Fräse, Mu: Mulchen). Für multiplikative Darstellungen gilt:  $exp(\beta_0 + \beta_j) = exp(\beta_0) \cdot exp(\beta_j)$ .

Parameter	Ca	Mg	K	N	S
Intercept $\beta_{\mu,0}$	0,37 [0,11; 1,32]	0,11 [0,02; 0,87]	0,30 [0,10; 0,94]	3,70 [1,59; 8,72]	0,69 [0,31; 1,38]
Intercept $\beta_{shape,0}$	5,72 [2,73; 12,30]	6,36 [2,91; 14,71]	11,68 [5,47; 24,94]	12,87 [5,33; 28,26]	14,63 [5,84; 35,31]
Region HR	1,72 [0,49; 6,06]	1,56 [0,21; 11,01]	1,20 [0,37; 3,71]	0,89 [0,38; 2,13]	0,73 [0,35; 1,53]
Region OF	3,51 [1,01; 12,51]	2,44 [0,33; 14,73]	1,50 [0,46; 4,61]	1,38 [0,61; 3,55]	1,06 [0,51; 2,26]
BEH Si	0,50 [0,13; 2,10]	0,27 [0,03; 2,46]	0,34 [0,09; 1,20]	0,88 [0,32; 2,39]	0,98 [0,43; 2,62]
BEH Bv	1,05 [0,32; 3,84]	0,63 [0,09; 5,01]	0,60 [0,17; 1,98]	1,14 [0,44; 2,74]	1,13 [0,55; 2,65]
HF Ko	1,38 [0,42; 4,48]	1,69 [0,23; 11,42]	1,14 [0,37; 3,30]	1,26 [0,56; 2,98]	1,24 [0,62; 2,78]
HF Si	0,71 [0,20; 2,24]	0,53 [0,07; 2,96]	0,76 [0,26; 2,22]	0,69 [0,27; 1,57]	0,73 [0,34; 1,45]
HF Ps	0,52 [0,19; 1,35]	0,35 [0,07; 1,40]	0,54 [0,21; 1,28]	0,77 [0,40; 1,63]	0,81 [0,42; 1,47]
HF Pb	2,00 [0,75; 5,60]	3,07 [0,62; 12,10]	2,15 [0,89; 5,32]	1,51 [0,78; 3,23]	1,36 [0,72; 2,64]
HR Ko	0,90 [0,27; 3,19]	1,00 [0,16; 6,01]	1,11 [0,35; 3,33]	1,05 [0,43; 2,71]	1,06 [0,53; 2,37]
HR Si	1,28 [0,41; 4,35]	1,18 [0,15; 8,52]	1,05 [0,33; 3,54]	1,19 [0,51; 2,85]	1,08 [0,50; 2,27]
HR Fr	0,86 [0,27; 2,67]	0,83 [0,11; 5,02]	0,83 [0,26; 2,69]	0,82 [0,37; 1,97]	0,89 [0,42; 1,73]
OF Ko	0,80 [0,22; 2,75]	0,62 [0,10; 3,99]	0,77 [0,24; 2,40]	0,76 [0,30; 1,66]	0,78 [0,38; 1,53]
OF Si	1,11 [0,33; 3,76]	1,52 [0,24; 10,16]	1,22 [0,39; 3,68]	1,24 [0,54; 3,02]	1,27 [0,61; 3,04]
OF Mu	1,11 [0,33; 3,49]	1,03 [0,16; 6,90]	1,07 [0,39; 3,43]	1,04 [0,45; 2,35]	1,03 [0,52; 2,07]

Tabelle 28: Parameterspezifische Posteriori-Verteilung für die Modellierung der relativen Nährstofffrachten (Median [2,5 % Quantil; 97,5 % Quantil]) (HF: Hoher Fläming, HR: Hessisches Ried, OF: Ostbraunschweigisches Flachland, BEH: Behandlung, Bv: Bestverfahren, Ko: Kontrolle, Si: Silvafix, Ps: Pflugsohle, Pb: Pflugbalken, Fr: Fräse, Mu: Mulchen).

Parameter	Ca	Mg	K	N	S
Intercept $\beta_{\mu,0}$	0,09 [0,04; 0,24]	0,09 [0,02; 0,33]	0,06 [0,02; 0,22]	0,02 [0,01; 0,07]	0,02 [0,01; 0,03]
Intercept $\beta_{\phi,0}$	29,35 [15,74; 53,17]	18,05 [9,68; 33,43]	22,58 [12,01; 43,72]	78,39 [30,60; 185,14]	326,66 [170,81; 587,63]
Region HR	0,74 [0,28; 1,84]	1,43 [0,33; 6,91]	2,49 [0,80; 8,72]	0,95 [0,30; 2,56]	2,46 [1,33; 4,09]
Region OF	0,47 [0,18; 1,15]	0,58 [0,13; 2,80]	0,36 [0,10; 1,33]	0,40 [0,14; 1,03]	1,62 [0,94; 2,74]
BEH Si	2,65 [0,93; 7,55]	4,84 [0,89; 23,36]	1,22 [0,30; 4,20]	1,16 [0,43; 3,62]	1,31 [0,71; 2,51]
BEH Bv	1,73 [0,65; 4,36]	2,04 [0,47; 11,15]	1,59 [0,46; 5,76]	1,19 [0,39; 3,23]	1,31 [0,72; 2,30]
HF Ko	0,75 [0,26; 1,48]	0,60 [0,15; 2,27]	0,71 [0,18; 1,89]	0,84 [0,19; 1,52]	0,92 [0,52; 1,46]
HF Si	1,06 [0,45; 2,60]	1,27 [0,33; 5,66]	0,82 [0,26; 2,15]	1,00 [0,41; 2,38]	1,18 [0,73; 2,14]
HF Ps	1,37 [0,71; 3,06]	2,27 [0,62; 7,76]	1,38 [0,53; 4,21]	1,02 [0,56; 2,26]	1,07 [0,68; 1,75]
HF Pb	0,84 [0,37; 1,59]	0,54 [0,12; 1,71]	1,18 [0,43; 3,31]	1,14 [0,70; 2,80]	0,86 [0,47; 1,27]
HR Ko	0,98 [0,40; 2,12]	0,99 [0,24; 4,10]	0,95 [0,28; 2,93]	1,07 [0,54; 3,20]	1,00 [0,61; 1,85]
HR Si	1,01 [0,44; 2,29]	0,96 [0,22; 3,87]	1,26 [0,43; 4,39]	1,04 [0,47; 2,76]	0,85 [0,50; 1,41]
HR Fr	1,00 [0,41; 2,35]	0,98 [0,22; 3,24]	0,82 [0,23; 2,24]	0,87 [0,28; 1,70]	1,17 [0,76; 2,36]
OF Ko	1,29 [0,65; 3,49]	1,50 [0,34; 6,53]	1,35 [0,43; 5,18]	1,06 [0,52; 3,27]	1,08 [0,68; 1,88]
OF Si	0,9 [0,34; 1,97]	0,80 [0,18; 2,99]	0,95 [0,27; 2,91]	0,96 [0,34; 2,00]	1,00 [0,59; 1,68]
OF Mu	0,88 [0,35; 1,89]	0,76 [0,15; 2,75]	0,75 [0,17; 1,92]	0,97 [0,38; 2,37]	0,91 [0,54; 1,46]